

1985



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Cours : Antennes & Applications - **Antenne Patch**

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Télécommunications
Spécialité : M1 - ITLC

Année universitaire 2023/2024

Lignes de transmission microruban

- Avant d'étudier les antennes patch, faisons une petite parenthèse et parlons des lignes microruban;
- La ligne microruban est un type de lignes de transmission, qui est utilisé pour transporter des ondes électromagnétiques d'une partie à un autre;
- Comme le montre la figure (1), une ligne microruban comprend trois parties principales : un conducteur mince, un matériau diélectrique appelé substrat et un conducteur plan appelé plan de masse;
- En règle générale, l'air remplit le volume au-dessus du conducteur mince, ce qui implique que le champ électrique entre les deux conducteurs se déplace dans deux milieux différents;
- En conséquence, le champ électrique ne s'arrête pas brusquement au bord, mais il s'étend de ces extrémités comme le montre la figure (1).

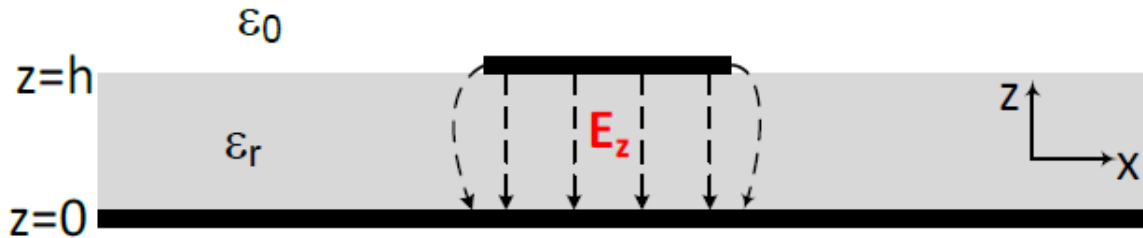


Figure.1. Une configuration de ligne de transmission microruban

Lignes de transmission microruban

- Pour simplifier l'analyse de telles structures, nous devons trouver un moyen de transformer le problème d'un champ qui se propage dans deux milieux différents en un champ qui se propage dans un milieu homogène;
- Cette transformation peut être effectuée si nous supposons que les deux milieux de la figure (1) sont équivalents à un seul milieu avec une constante diélectrique spécifique que nous appelons constante diélectrique effective ϵ_{eff} comme le montre la figure (2);

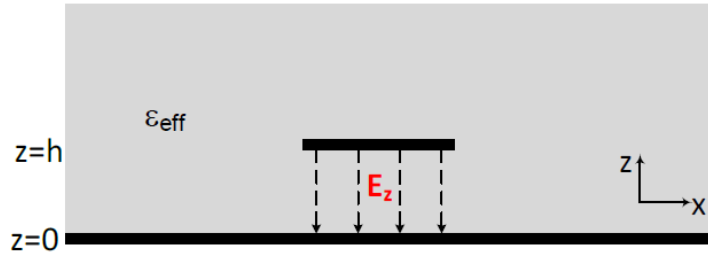
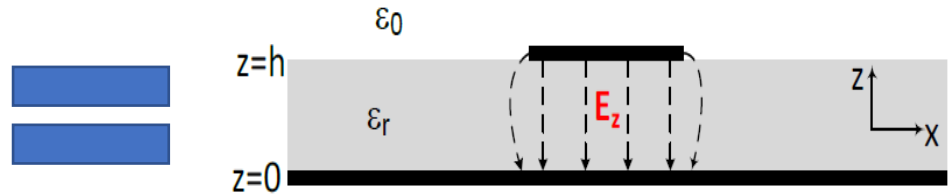


Figure.2. Transformation de la configuration de la figure (1) en un milieu homogène équivalent.

- Mathématiquement, ϵ_{eff} peut être écrit comme suit:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}}$$

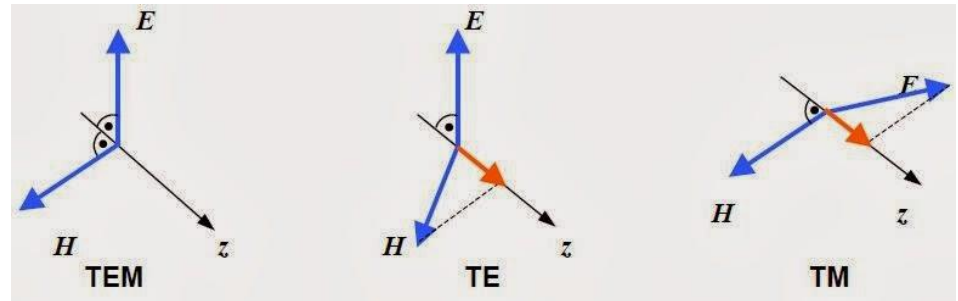
où W est la largeur du conducteur et h est l'épaisseur du substrat.



Les deux milieux de la figure (1)

Rappel sur les modes de propagation

- Les modes de propagation sont des solutions possibles, en utilisant les équations de Maxwell, pour les composants de champ électrique et magnétique à l'intérieur d'une ligne de transmission;
- On peut considérer ces modes comme la distribution géométrique des champs électriques et magnétiques à l'intérieur d'une ligne de transmission. En mode ligne de transmission, il est préférable de travailler avec le mode TEM;
- Dans ce mode, les champs électrique et magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. A l'intérieur d'un guide d'onde, l'onde peut se propager en mode Transversal Magnetic (TM), en mode Transversal Electric (TE) ou en mode hybride (HE). Dans le mode TM, seul le champ magnétique est perpendiculaire à la direction de propagation. Alors que dans le mode TE, seul le champ électrique est perpendiculaire au vecteur de direction de propagation.
- Pour l'antenne patch, on travaille avec mode TM.



Antenne imprimée ou patch

- Une antenne patch consiste en un élément métallique de forme quelconque (rectangulaire, circulaire, à fente, dipôle,...etc) déposé sur la surface d'un substrat diélectrique qui présente sur l'autre face un plan conducteur (plan de masse);
- Une antenne patch rectangulaire est l'antenne la plus courante;
- Les antennes microruban ou patch deviennent de plus en plus utiles car elles peuvent être imprimées directement sur une carte de circuit imprimé;
- Elles sont de plus en plus répandues sur le marché de la téléphonie mobile;
- Elles sont peu coûteuses;
- Elles ont un profil bas et sont faciles à fabriquer.

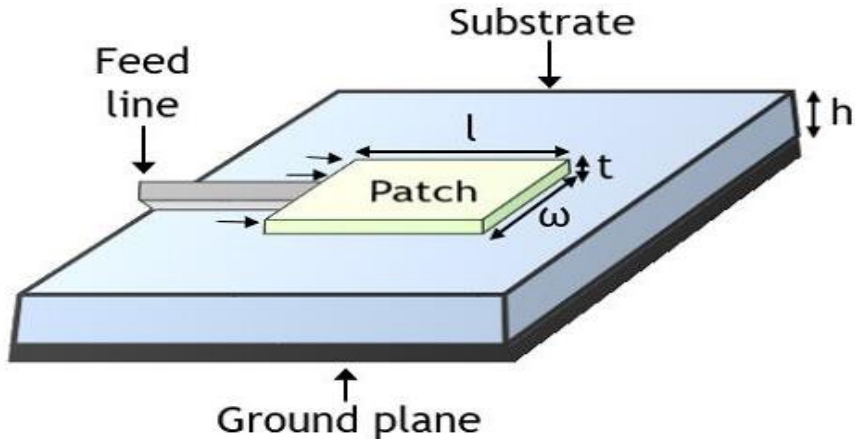
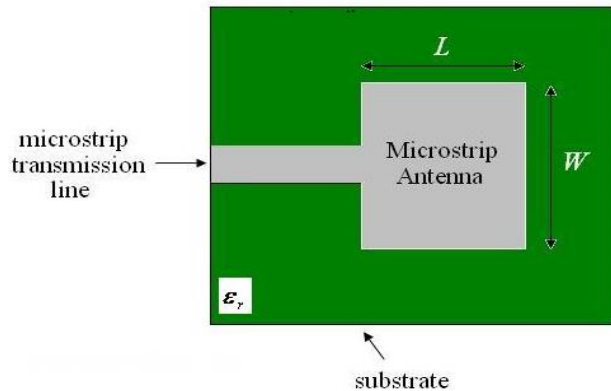


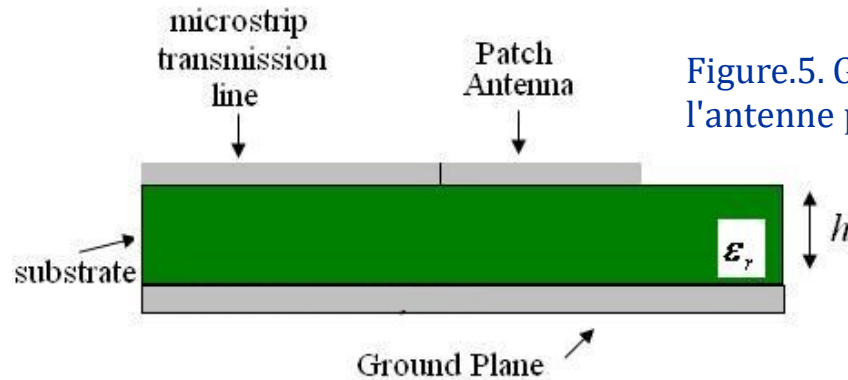
Figure 4. Géométrie de l'antenne microruban (patch).

Antenne imprimée ou patch

- Considérons l'antenne microruban illustrée sur la figure (5), alimentée par une ligne de transmission microruban. L'antenne patch, la ligne de transmission microruban et le plan de masse sont en métal à haute conductivité (généralement du cuivre). Le patch a une longueur L , une largeur W et est déposé sur un substrat (un diélectrique) d'épaisseur h avec une permittivité ou une constante diélectrique ϵ_r ;
- L'épaisseur du plan de masse ou du microruban n'a pas d'importance critique;
- Typiquement, la hauteur h est beaucoup plus petite que la longueur d'onde de fonctionnement, mais ne doit pas être beaucoup plus petite que 0,025 de la longueur d'onde (1/40ème de la longueur d'onde) ou l'efficacité de l'antenne sera complètement dégradée.



Vue de dessus de l'antenne patch



Vue latérale de l'antenne patch

Figure.5. Géométrie de l'antenne patch.

Composants d'une antenne patch

Le plan de masse (Ground plane) :

- C'est une surface conductrice (en cuivre) recouvrant la partie inférieure du substrat;
- C'est cette partie qui permet de faire rayonner la partie supérieure;
- Les dimensions du patch sont généralement de l'ordre de la demi-longueur d'onde;
- Le choix de la longueur est fonction de la valeur de la fréquence de résonance;
- Le plan de masse ne peut pas être infini;
- Il peut être égal à trois ou quatre fois la longueur d'onde, ce qui représente parfois un encombrement trop important;
- Un plan de masse plus petit conduira à une modification des propriétés de l'antenne.

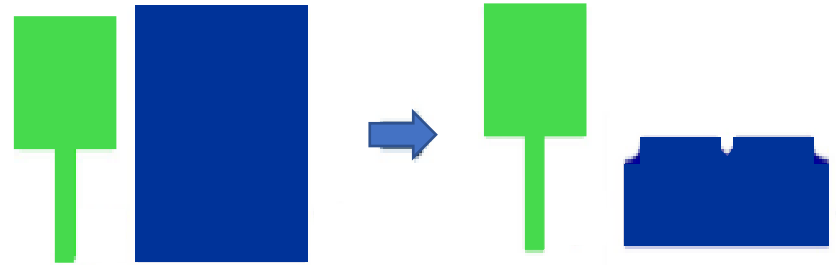


Figure.6. Plan de masse d'une antenne patch réduit.

Composants d'une antenne patch

Le substrat diélectrique (Dielectric substrate) :

- ➔ Il est composé d'un matériau isolant, d'épaisseur généralement faible devant la longueur d'onde et de permittivité relative ($2,2 < \epsilon_r < 12$);
- ➔ Les caractéristiques du substrat influent directement sur celles de l'antenne;
- ➔ Il est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, réduire les pertes par effet de joule et améliorer la bande passante de l'antenne;
- ➔ Parfois, il est préférable d'utiliser des substrats diélectriques d'épaisseur importante et de faible permittivité pour avoir une grande efficacité et une large bande passante.

Tableau 1. Variation des caractéristiques de l'antenne avec différents matériaux de substrat

	FR4 4.4	NELTEC 3.48	DUROID 2.2	FOAM 1.05
Resonant Freq (GHz)	3.13	2.97	2.98	2.99
Gain (dB)	2.2dB	5.5dB	7dB	8.7dB
VSWR	1.6	1.8	1.5	1.2
Return Loss in dB	-17.5	-11	-12.9	-19.8

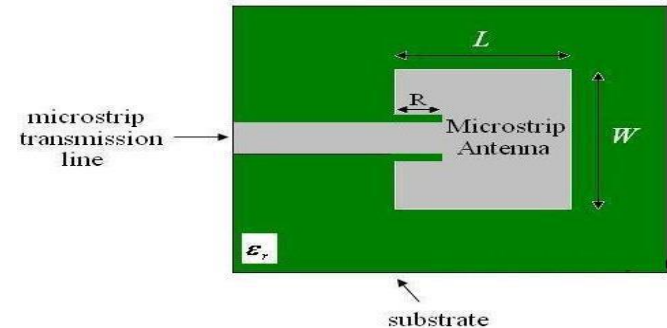


Figure.7. L'antenne concernée par la variation du substrat.

Composants d'une antenne patch

L'élément rayonnant (Le patch) :

- C'est une partie métallique de forme et de taille à définir selon l'application;
- Il a une géométrie variable (circulaire, rectangulaire, triangulaire ...etc.);
- Il doit être relié au reste du circuit par une ligne de transmission (micro-ruban) qui doit être adaptée en impédance à l'antenne et au reste du circuit afin d'éviter le phénomène de réflexion.

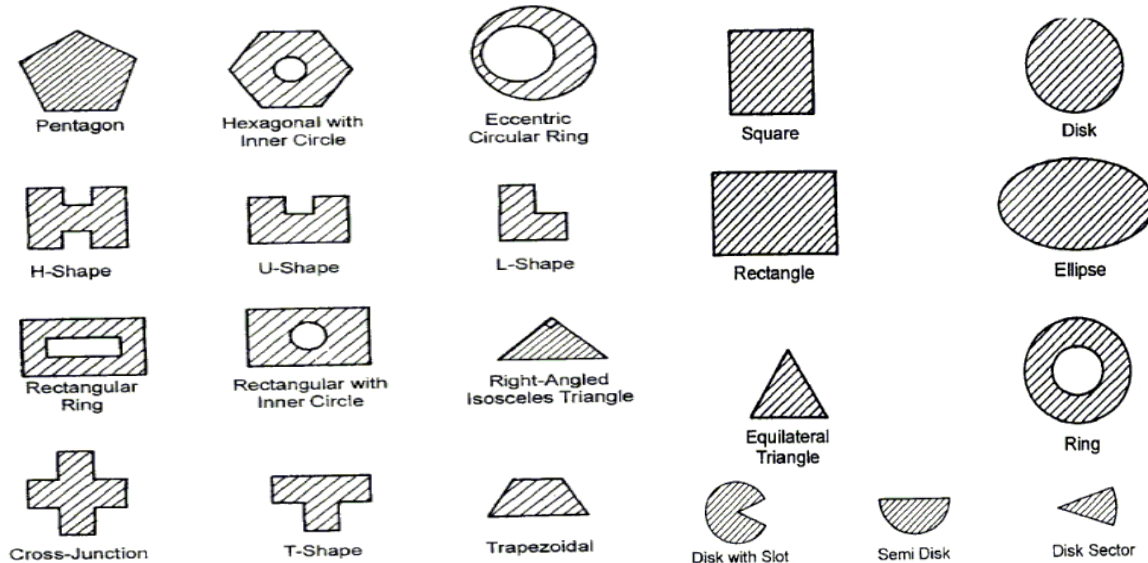


Figure.8. Différentes formes de l'élément rayonnant.

Mécanisme de rayonnement de l'antenne Patch

- L'antenne patch est similaire aux lignes de transmission microstrip avec de légères modifications car, contrairement à la transmission microstrip, nous voulons que le patch rayonne;
- Référons-nous à la figure (9) ci-contre, une antenne patch rectangulaire est simplement un métal déposé sur un substrat qui a une constante diélectrique ϵ_r ;
- Comme le montre cette figure, nous voulons réaliser deux propriétés :
 1. Le plan de masse bloque le rayonnement dans les $z -$ et l'oriente vers les $z +$;
 2. En zone lointaine, le champ de bords autour de $x = 0$ s'additionne en phase avec le champ de bords autour de $x = L$.

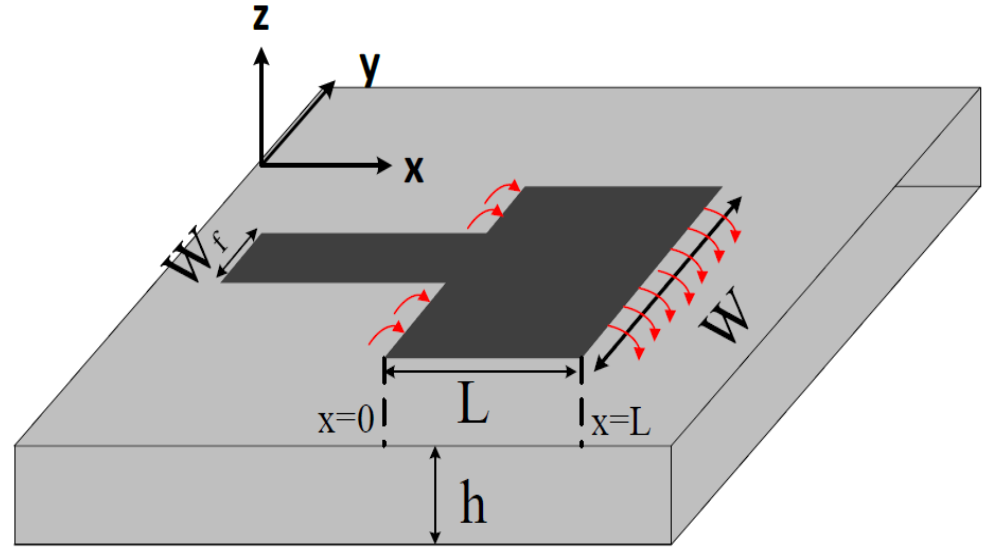


Figure.9. Antenne patch sur PCB. Les flèches rouges représentent le champ frangeant.

Mécanisme de rayonnement de l'Antenne Patch

- Le rayonnement maximum doit être sur la direction $z+$;
- Il s'avère que le mode TM_{10} , représenté sur la figure (10), garantit ces propriétés;
- Les champs qui s'étendent sur les extrémités sont appelés champs frangeants. Ils sont la raison du rayonnement;
- Ces champs rendent la longueur électrique un peu plus longue que la longueur physique comme l'illustre la figure (11);
- Mathématiquement, la longueur des franges, notée ΔL , est donnée par:

$$\Delta L = (0.412h) \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}$$

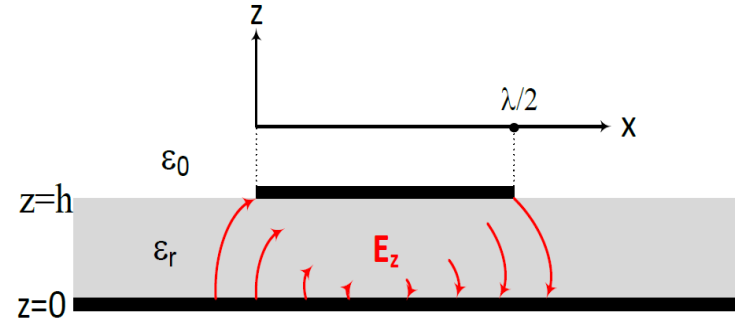


Figure.10. Distribution du champ (Mode TM_{10}) sur toute la longueur du patch.

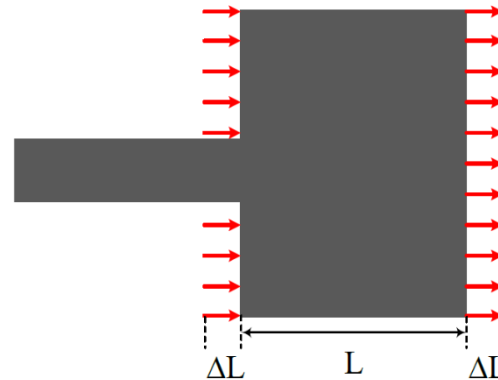


Figure.11. Vue de dessus d'une antenne patch. Il est à noter que la longueur électrique est de $L + \Delta L$.

Mécanisme de rayonnement de l'Antenne Patch

- Comme nous pouvons le déduire de l'équation de ΔL , l'augmentation de ϵ_r augmentera la longueur des franges si les autres paramètres (à savoir, W et h) sont conservés tels quels;
- Si $L = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\epsilon_r}$, nous aurons une résonance. Ainsi, le patch commence à rayonner. Cependant, en raison du champ de franges, nous avons besoin que la longueur électrique effective soit d'une demi-longueur d'onde. Par conséquent, la longueur physique requise pour obtenir la résonance doit être modifiée en:

$$L = L_e - 2\Delta L = \frac{\lambda_m}{2} - 2\Delta L$$

Où:

L_e est la longueur électrique;

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}};$$

Le facteur "2" provient du fait que nous avons des franges autour de $x = 0$ ainsi que de $x = L$.

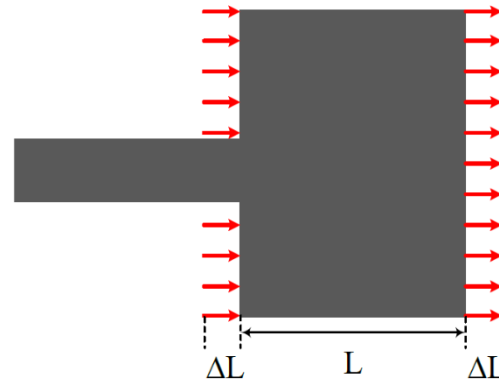
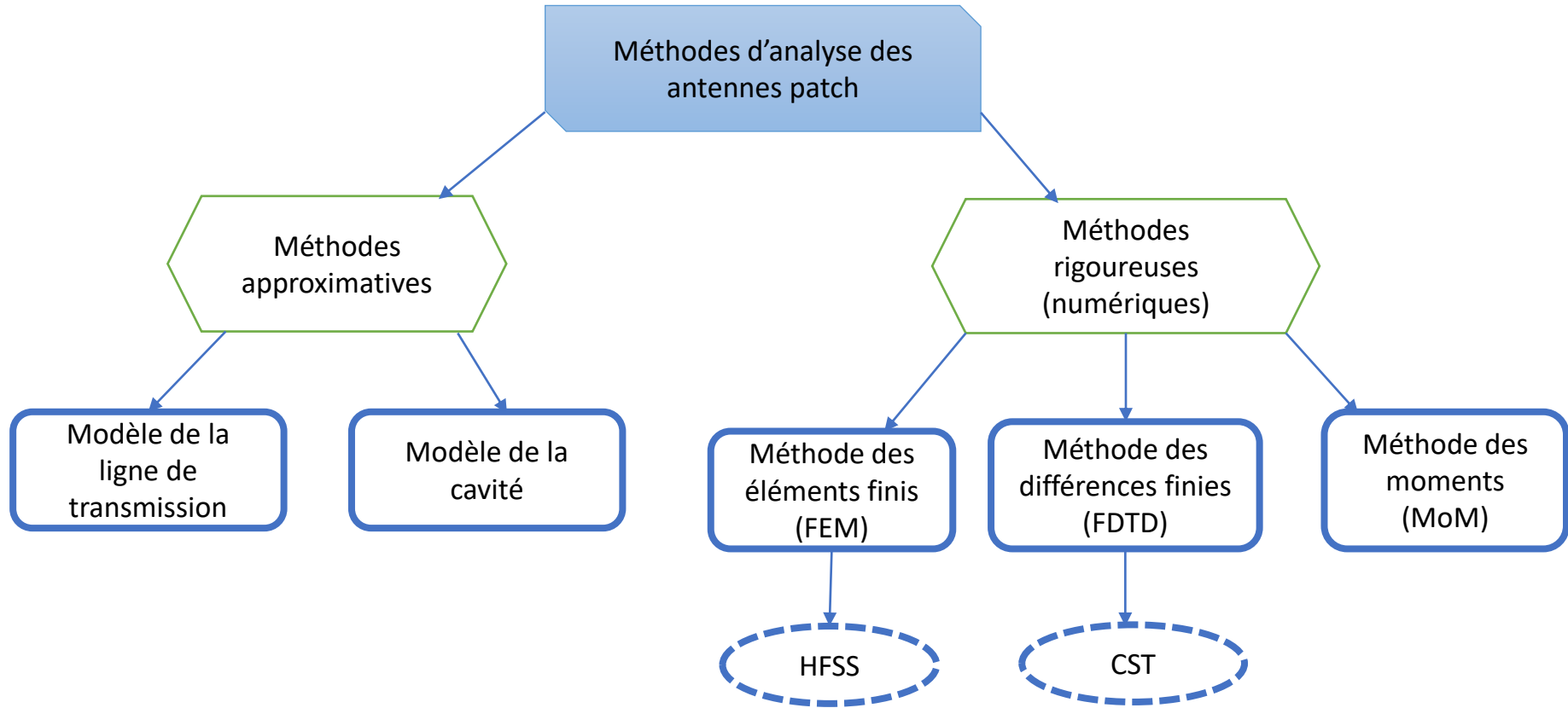


Figure.11. Vue de dessus d'une antenne patch. Il est à noter que la longueur électrique est de $L + \Delta L$.

Méthodes d'analyse des antennes patch



Modélisation de l'antenne patch rectangulaire

- Pour analyser les antennes patch, nous devons les modéliser;
- Dans la littérature, il existe plusieurs techniques telles que le modèle de la ligne de transmission et le modèle de la cavité;
- Nous nous concentrerons sur le modèle de ligne de transmission;
- L'étape finale est l'utilisation d'un simulateur full-wave tel que le HFSS ou le CST pour calculer réellement les paramètres optimisés.



Modélisation de l'antenne patch rectangulaire

- Le modèle de ligne de transmission suppose que le patch est équivalent à deux fentes rayonnantes qui sont séparées par une ligne de transmission à faible impédance d'une longueur d'environ $\lambda_m/2$;
- Comme le montre la figure (12), les fentes rayonnantes forment un réseau à deux éléments qui est polarisé linéairement sur la direction de la ligne d'alimentation (polarisation dans la direction x);
- Par conséquent, nous pouvons conclure que les antennes patch sont polarisées linéairement;
- Le plan xOz est appelé le plan E ;
- Tandis que le plan yOz est appelé le plan H .

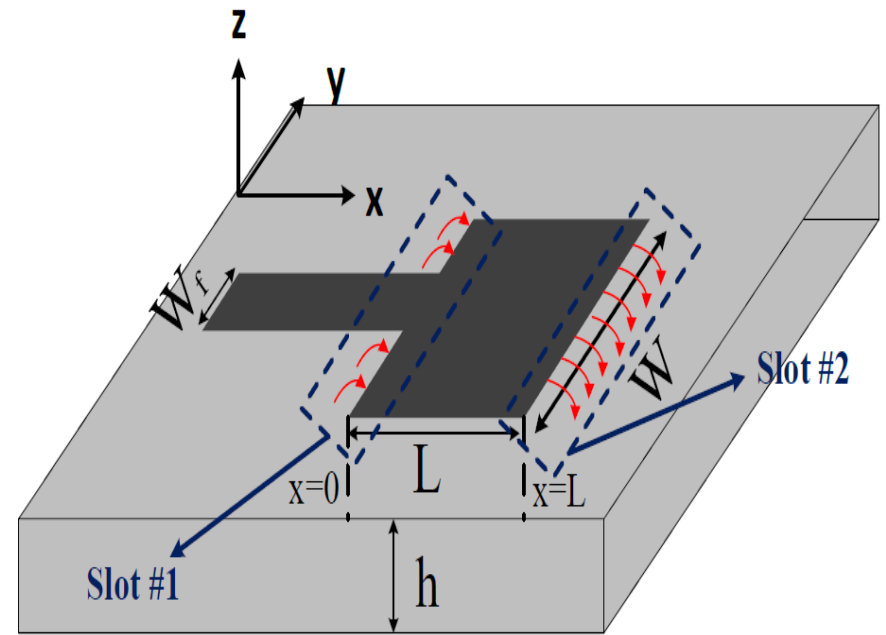


Figure.12. Modélisation de l'antenne patch en tant que réseau à deux fentes.

Diagramme de rayonnement du patch

- ➔ Concernant le diagramme de rayonnement, comme nous venons de le mentionner dans la section précédente, les antennes patch sont modélisées comme un réseau de fentes à deux éléments, le diagramme de rayonnement total est donc la multiplication du DR des modèles d'éléments par le facteur de mise en réseau;
- ➔ Par conséquent, pour une fente de dimensions $W \times h$, les champs électriques sont donnés comme suit:

$$E_{\theta} = E_o \cos \phi \frac{\sin \left(\frac{\pi W}{\lambda} \sin \theta \sin \phi \right)}{\sin \theta \sin \phi} \quad E_{\phi} = -E_o \cos \theta \sin \phi \frac{\sin \left(\frac{\pi W}{\lambda} \sin \theta \sin \phi \right)}{\sin \theta \sin \phi}$$

- ➔ Le facteur de réseau à deux éléments distribué le long de l'axe x est donné par:

$$F(\theta, \phi) = 2 \cos \left(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta \cos \phi \right) \Big|_{d=L_e} = 2 \cos \left(\pi \frac{L_e}{\lambda} \sin \theta \cos \phi \right)$$

Diagramme de rayonnement du patch

→ Par conséquent, le champ total, pour chaque direction, est donné par :

$$E_{\theta, \text{total}} = E_o \cos \phi \frac{\sin \left(\frac{\pi W}{\lambda} \sin \theta \sin \phi \right)}{\sin \theta \sin \phi} \left[2 \cos \left(\pi \frac{L_e}{\lambda} \sin \theta \cos \phi \right) \right]$$

$$E_{\phi, \text{total}} = -E_o \cos \theta \sin \phi \frac{\sin \left(\frac{\pi W}{\lambda} \sin \theta \sin \phi \right)}{\sin \theta \sin \phi} \left[2 \cos \left(\pi \frac{L_e}{\lambda} \sin \theta \cos \phi \right) \right]$$

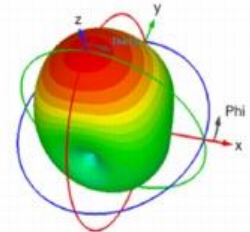
→ Les angles d'ouverture à 3dB sont donnés par:

$$\Theta_{\text{E-Plane}} = 2 \cos^{-1} \sqrt{\frac{7.03 \lambda^2}{4 \pi^2 (3L_e^2 + h^2)}}$$

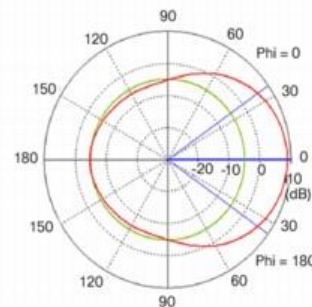
$$\Theta_{\text{H-Plane}} = 2 \cos^{-1} \sqrt{\frac{1}{2 + (2\pi/\lambda)W}}$$



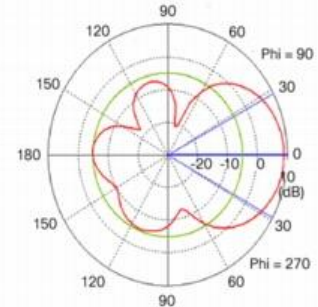
(a) Patch Antenna Model



(b) Patch Antenna 3D Radiation Pattern



(c) Patch Antenna Azimuth Plane Pattern



(d) Patch Antenna Elevation Plane Pattern

Figure.13. DR de l'antenne patch.

Impédance d'entrée du patch

→ L'impédance d'entrée d'une antenne patch, à la résonance, est approximativement réelle et est approchée par la formule ci-contre :

$$Z_A = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \approx \frac{R_r}{2} \Omega$$

→ où R_r est la résistance de rayonnement.

→ Notez que cette équation est une formule empirique pour le patch rectangulaire demi-onde, nous ne pouvons donc pas l'utiliser pour toutes les situations;

→ La formule générale peut être trouvée en utilisant le modèle de cavité.

Bande passante du patch

→ Du point de vue communications, la bande passante est une quantité importante que nous devons déterminer;

→ Les antennes patch sont intrinsèquement des antennes à bande étroite;

→ La bande passante du patch est donnée par:

$$BW = f_r \left(3.77 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \frac{Wh}{L \lambda} \right)$$

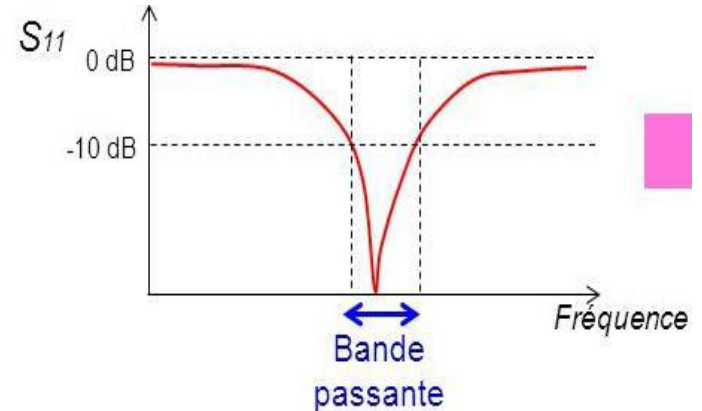


Figure.14. Bande passante de l'antenne patch.

Techniques d'alimentation de l'antenne Patch

- Il existe différentes techniques d'alimentation qui ont été utilisées dans la conception d'antennes patch pour améliorer leurs performances;
- Ces techniques d'alimentation peuvent être largement classées en méthodes d'alimentation avec et sans contact;
- Elles peuvent également être qualifiées de méthode d'alimentation directe ou indirecte;
- Dans l'alimentation par contact, une connexion directe existe entre la ligne d'alimentation et le patch rayonnant, par exemple une ligne microruban ou une alimentation coaxiale;
- Dans le procédé sans contact, la ligne d'alimentation est couplée électromagnétiquement au patch rayonnant, par exemple un couplage de proximité et un couplage d'ouverture. Les différentes techniques d'alimentation sont rapportées dans le diagramme de la diapositive suivante.

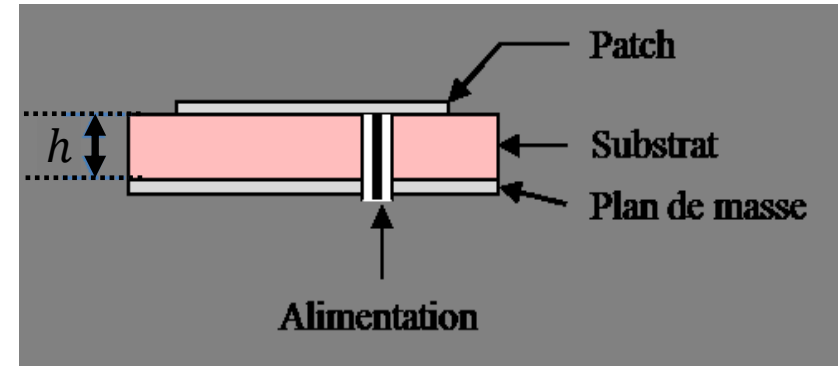


Figure.15. Alimentation d'une antenne patch.

Techniques d'alimentation de l'antenne Patch

→ Il est à noter que si la méthode d'alimentation est mauvaise, les performances et l'efficacité globales de l'antenne seront aussi mauvaises.

Alimentation de l'antenne patch

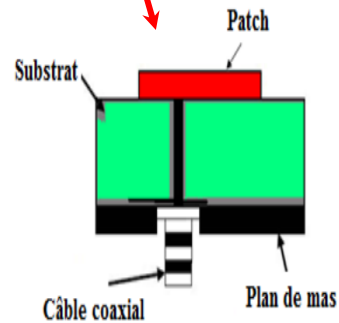
Alimentation directe par une ligne micro ruban

Décalée

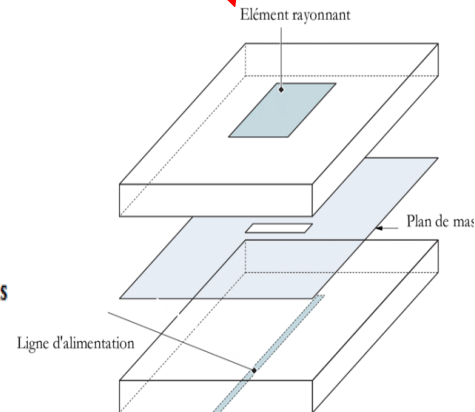
Axiale

Axiale avec encoche

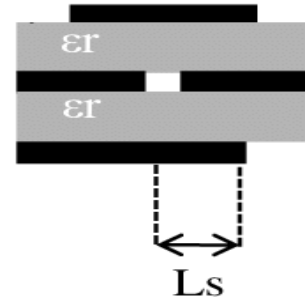
Alimentation coaxiale



Alimentation couplée par ouverture



Alimentation couplée par proximité



Techniques d'alimentation de l'antenne Patch

→ Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des différentes techniques d'alimentation.

Caractéristiques	Alimentation par ligne microruban	Alimentation par câble coaxial	Alimentation couplée par ouverture	Alimentation couplée par proximité
Rayonnement parasite de l'alimentation	Elevé	Elevé	Faible	Très faible
Fiabilité	Bonne	Moins bonne	Bonne	Bonne
Facilité de fabrication	Facile	Soudure et forage requis	Alignement requis	Alignement requis
Adaptation d'impédance	Facile	Facile	Facile	Facile
Bande passante (réalisé avec adaptation d'impédance)	2 - 5 %	2 - 5 %	2 - 5 %	13 %

Alimentation directe par une ligne micro ruban

- La connexion directe à une ligne micro ruban, dont le point de jonction est situé sur l'axe de symétrie de l'élément;
- Pratiquement, la plage approximative de variation de l'impédance, pour une antenne patch, est située entre 100 et 400 ($100\Omega < Z_A < 400\Omega$), ce qui provoque une désadaptation si le patch est connecté directement à la ligne de transmission standard qui a une impédance $Z_0 = 50$;
- La connexion directe à une ligne micro ruban, dont le point de jonction est décalé par rapport à cet axe de symétrie pour permettre une meilleure adaptation d'impédance;
- L'alimentation axiale avec encoche est celle qui donne de bons résultats.

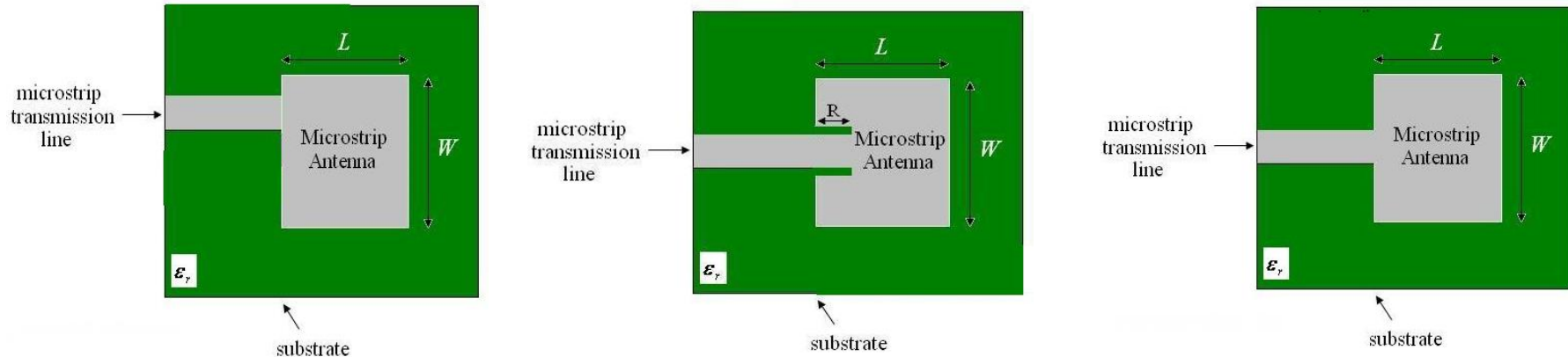


Figure.16. Alimentation directe par une ligne micro ruban

Avantages des antennes Patch

Avantages

- Elles fonctionnent à des fréquences micro-ondes où les antennes traditionnelles ne peuvent pas être conçues;
- Ce type d'antennes a une taille plus petite et fournira donc des appareils terminaux de petites tailles;
- Les antennes à base de microruban sont facilement gravées sur n'importe quel PCB et fourniront également un accès facile pour le dépannage pendant la conception et le développement Cela est dû au fait que le motif microruban est visible et accessible par le haut;
- Ces antennes sont faciles à fabriquer et confortables pour les parties courbées des appareils;
- Elles sont faciles à intégrer avec des MIC ou des MMIC;
- Les patchs microruban de différentes formes, par ex. rectangulaires, carrés, triangulaires, etc. sont facilement gravés;
- Elles ont un coût de fabrication inférieur et peuvent donc être fabriqués en série;
- Elles sont capables de supporter plusieurs bandes de fréquences (double, triple);
- Elles prennent en charge les types de polarisation double, à savoir. linéaire et circulaire à la fois;
- Elles sont légers;
- Elles sont robustes lorsqu'elles sont montées sur des surfaces rigides des appareils.

Inconvénients des antennes Patch

Inconvénients

- Le rayonnement parasite existe dans diverses antennes à base de microruban telles que l'antenne patch microruban, l'antenne à fente microruban et l'antenne dipôle imprimée;
- Ces antennes offrent de faibles rendements en raison des pertes diélectriques et des pertes dans les conducteurs;
- Elles offrent de faibles valeurs de gains;
- Elles présentent des niveaux plus élevés de rayonnement à polarisation croisée;
- Elles ont une capacité de gestion de puissance très faibles;
- Elles ont des bandes passantes intrinsèquement plus faibles;
- La structure de l'antenne microruban rayonne à partir des alimentations et d'autres points de jonction.

Algorithme de conception des antennes patch

Les étapes de conception sont données comme suit :

1. Calculer la valeur de W en utilisant l'équation:

$$W = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

2. Calculer la valeur de ϵ_r en utilisant l'équation:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}}$$

3. Calculer ΔL en utilisant l'équation suivante:

$$\Delta L = (0.412h) \frac{(\epsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\epsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}$$

4. Calculer L en utilisant l'équation suivante:

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L$$

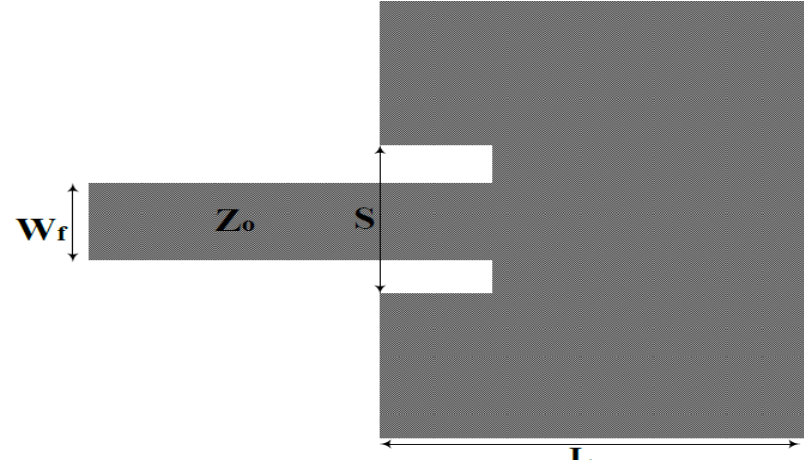


Figure.17. Antenne à concevoir

5. Calculer l'impédance d'entrée Z_A en utilisant l'équation:

$$Z_A = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \Omega$$

6. Choisir la technique d'alimentation permettant d'avoir une adaptation d'impédance.

Algorithme de conception des antennes patch

5. Calculer l'impédance d'entrée Z_A en utilisant l'équation:

$$Z_A = 90 \frac{\epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \Omega$$

6. Choisir la technique d'alimentation permettant d'avoir une adaptation d'impédance.

- Si on utilise l'option d'alimentation de la sonde, la profondeur du point d'alimentation, x_p , est donnée par:

$$x_p = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\sqrt{\frac{Z_A(x = x_p)}{Z_A(x = 0)}} \right)$$

- Si on utilise l'option d'alimentation à encoche, la profondeur du point d'alimentation, x_i , est donnée par:

$$x_i = \frac{L}{\pi} \cos^{-1} \left(\left[\frac{Z_A(x = x_i)}{Z_A(x = 0)} \right]^{1/4} \right)$$

Le plus souvent, on a: $Z_A(x = x_i) = Z_A(x = x_p) = 50\Omega$

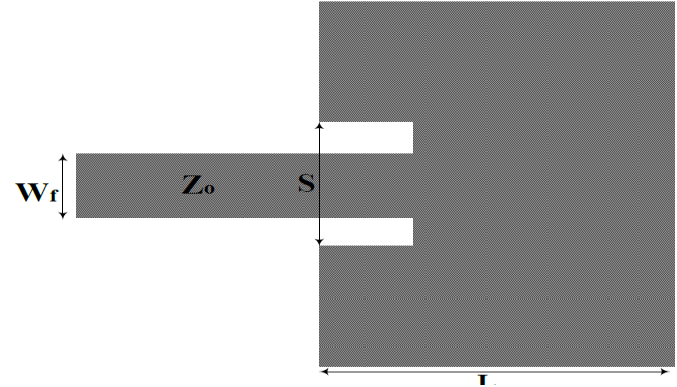


Figure.17. Antenne à concevoir

Etude paramétrique de l'antenne patch

Résumé des paramètres des patches et leur impact sur les performances:

→ On a une étude basée sur trois paramètres ϵ_r , h et W . L est exclu de cette étude puisqu'il est déterminé par la fréquence de résonance.

→ Un paramètre est modifié à la fois tout en gardant les trois autres fixes.

Constante diélectrique: Si ϵ_r est augmenté, alors:

1- La taille de l'antenne sera plus petite car la longueur d'onde effective est réduite $\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$;

2- La bande passante devient plus étroite ;

3- Augmentation de la puissance des ondes de surface ; par conséquent, une diminution de l'efficacité du rayonnement.

Épaisseur du substrat h : Si h est augmenté, alors:

1- La taille de l'antenne sera plus petite car la longueur d'onde effective est réduite $\lambda_m = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$;

2- La bande passante devient plus étroite ;

3- Augmentation de la puissance des ondes de surface ; par conséquent, une diminution de l'efficacité du rayonnement.

Largeur du Patch W : Si W est augmenté, alors:

1- L'impédance d'entrée devient plus petite ;

2- La bande passante devient plus large. En fait, la largeur du patch joue un rôle important lorsqu'il s'agit de concevoir un réseau d'antennes avec des excitations uniformes.