



Département Génie électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme  
de **Master**

-Filière-

**Télécommunications**

-Spécialité –

**Systèmes de Télécommunications et Réseaux**

- Thème -

# **Etude des outils nécessaires pour la conception et la caractérisation des filtres en technologie microruban.**

Réalisé par

**DERMOUCHI Nouha  
BOUABDALLAH Fares**

## **Membres de Jury :**

ATROUZ Brahim  
BEGHAMI Sami  
OUNNAS Badreddine  
BOUCHACHI Islem  
BOUDIAR Toufik

MAA ENSTA  
MAA ENSTA  
MCB ENSTA  
MCB ENSTA  
MCA ENSTA

Président  
Examinateur  
Examinateur  
Encadrant  
Encadrant

**Alger, le 20/06/2024**

**Année universitaire 2023–2024**

*Abstract Cet article examine en profondeur les outils et méthodes essentiels pour la conception et la caractérisation des filtres en technologie microruban, fondamentaux pour les systèmes de communication modernes. Ces filtres jouent un rôle crucial dans l'élimination des interférences, l'amélioration de la sélectivité des signaux et la réduction des pertes. Chaque étape du processus de conception est détaillée, depuis l'approximation initiale jusqu'à l'optimisation dimensionnelle, en passant par le choix des technologies et des outils de simulation. Les filtres micro-ondes, indispensables pour des applications telles que les radars, les satellites et les télécommunications sans fil, sont développés à partir de diverses technologies, notamment les filtres passifs volumiques, les filtres à ondes acoustiques et les filtres micro-ondes planaires. Utilisation de logiciels de simulation avancés comme CST Microwave Studio et HFSS est mise en avant pour l'analyse et la conception de ces filtres. Les performances et avantages de chaque type de filtre sont évalués et comparés afin de déterminer la technologie la plus appropriée aux besoins spécifiques de chaque application.*

**Mots-clés** Microruban, conception, micro-ondes, CST microwave studio, HFSS, Filtre passe-Bande, optimisation.

## 1. Introduction

Les filtres occupent une place essentielle dans les systèmes de communication en raison de leur capacité à éliminer les interférences, à accroître la sélectivité des signaux et à minimiser les pertes. Dans le domaine des applications micro-ondes, ils sont indispensables au bon fonctionnement des dispositifs tels que les radars, les satellites et les télécommunications sans fil, où l'exigence de précision et de performance est particulièrement élevée.[1]

La conception et la caractérisation des filtres exigent une approche méthodique et l'utilisation d'outils spécialisés à chaque étape du processus. De l'approximation initiale à l'optimisation des dimensions, en passant par le choix de la technologie et des outils de simulation, chaque phase doit être exécutée avec rigueur pour garantir le succès du projet.[2]

Cet article se propose d'explorer ces outils et méthodes, en offrant une vue d'ensemble des pratiques et techniques nécessaires à la conception de filtres micro-ondes performants en technologie microruban.

## 2. Choix du modèle

Pour choisir la méthode la plus appropriée pour réaliser un filtre passe-bande, il est crucial de considérer les exigences spécifiques en termes de régularité du Délai de groupe, de transition entre la bande passante et la bande de coupure, et de complexité de conception

**Le filtre Butterworth** est connu pour sa réponse en fréquence parfaitement plate, sans ondulations ni dans la bande passante ni dans la bande de coupure. Cela le rend idéal pour des applications où une réponse en fréquence lisse est prioritaire, comme dans les systèmes de sonorisation et d'audio. Toutefois, ce comportement se traduit par une transition plus graduelle entre la bande passante et la bande de coupure, nécessitant souvent un ordre plus élevé pour des performances comparables à d'autres filtres. [3]

**Le filtre Tchébychev de type I** se distingue par une transition plus rapide entre la bande passante et la bande de coupure, grâce à des ondulations dans la bande passante. Cela permet une plus grande précision et sélectivité dans cette bande, mais au prix d'une complexité accrue et de distorsions possibles dues aux ondulations.

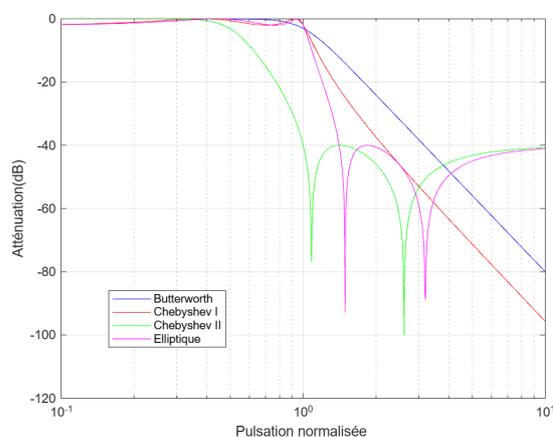


Figure 1: Comparaison des réponses fréquentielles de filtres analogiques d'ordre 4 : Butterworth, Chebyshev I, Chebyshev II et Elliptique

**Le filtre Tchébychev inversé** (ou de type II) inverse les caractéristiques du type I, en ayant des ondulations dans la bande de coupure plutôt que dans la bande passante. Cela offre une bande passante plate sans ondulation, ce qui est avantageux pour des applications où la pureté du signal est essentielle. Cependant, la présence d'ondulations en bande de coupure peut poser des problèmes dans certaines applications, et sa complexité reste similaire à celle du type I.

**Le filtre elliptique** combine les caractéristiques des

filtres Tchébychev de type I et II, présentant des ondulations à la fois dans la bande passante et la bande de coupure. Cela permet une transition extrêmement rapide entre les deux, offrant la meilleure sélectivité pour un ordre donné. Cependant, cette performance maximale est accompagnée de la plus grande complexité parmi les filtres mentionnés, ce qui peut rendre sa conception et sa réalisation plus difficiles et coûteuses.[4, 5]

La figure 1 illustre une comparaison entre ces modèles en termes de gain normalisé en fonction de la pulsation normalisée. La comparaison des performances des filtres en fonction du délai de groupe, dont nous avons déjà parlé ci-dessus, est illustrée dans la figure 2 pour  $n=4$ .

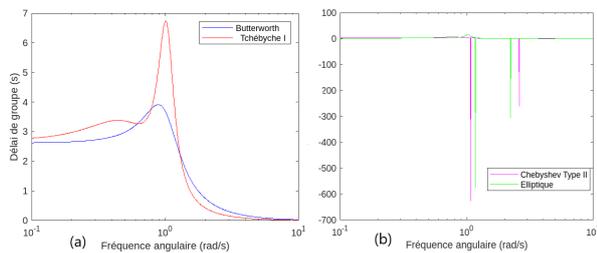


Figure 2: Le délai de groupe :(a)du filtre de Chébychev I et du filtre de Butterworth (b)du filtre de Chébychev II et du filtre de elliptique

La méthode de sélection du modèle, illustrée dans la figure 3, présente la démarche à suivre pour choisir le type de filtre analogique le mieux adapté en fonction des exigences de l'application et des spécifications requises.

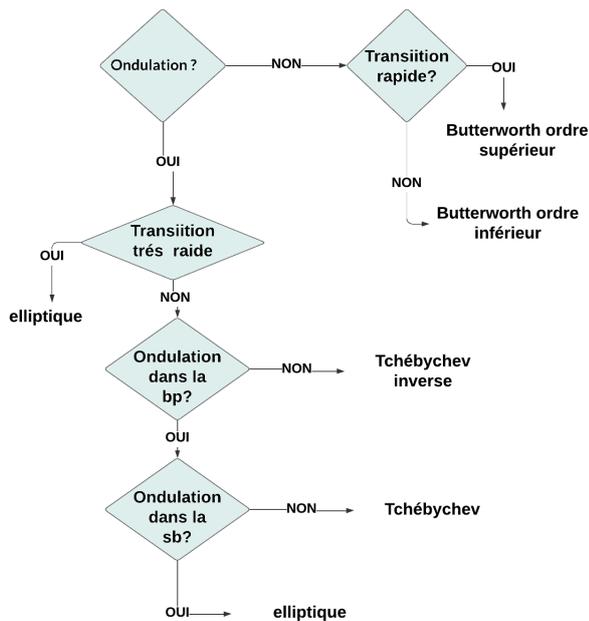


Figure 3: Méthode de détermination du filtre convenable avec bp : bande passante et sb : stop-bande

### 3. Description de différentes technologies de filtres

L'implémentation physique des fonctions de filtrage envisagées lors de la synthèse des circuits peut être réalisée en utilisant différentes technologies. Chaque technologie possède ses propres caractéristiques en termes de complexité, de coût et de performances électriques, ce qui la rend particulièrement adaptée à des applications spécifiques. Nous présentons ici brièvement les caractéristiques principales des technologies les plus fréquemment utilisées pour concevoir des filtres microondes passifs : les technologies volumiques, acoustiques et planaires. Une synthèse des avantages et des inconvénients de chaque technologie permettra, en fin de compte, de choisir la technologie la mieux adaptée aux contraintes de filtrage.

#### 3.1. Les Filtres Passifs Volumiques

Les technologies volumiques reposent sur l'utilisation de guides d'ondes rectangulaires ou circulaires, de résonateurs diélectriques ou de cavités métalliques. Ces technologies sont particulièrement adaptées au filtrage à bande étroite pour les signaux de haute puissance. De plus, les pertes associées à ce type de structures sont réduites grâce à l'utilisation de l'air, dont les propriétés isolantes sont remarquables. Par ailleurs, leur section relativement large permet de minimiser les pertes par effet Joule.

Cependant, le principal inconvénient des technologies volumiques réside dans leur encombrement et leur poids considérables. De plus, la mise en uvre de ces filtres est complexe, nécessitant un traitement mécanique spécial et un ajustement post-fabrication. Cette procédure d'ajustement contribue de manière significative à l'augmentation des coûts de production.

Lorsque le transport de puissance n'est pas un paramètre essentiel du dispositif à réaliser, les technologies planaires offrent une solution pour pallier les problèmes d'encombrement inhérents aux technologies volumiques.

#### 3.2. Filtres a onde acoustiques

Les filtres à ondes acoustiques se classent en deux types : les filtres à ondes acoustiques de surface (SAW : Surface Acoustic Waves) et les filtres à ondes acoustiques de volume (BAW : Bulk Acoustic Waves).

Le principe de ces filtres repose sur la piézoélectricité de matériaux spécifiques, tels que le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ). Ces matériaux permettent de transformer les oscillations électriques en oscillations mécaniques, et vice versa. Les signaux mécaniques se déplacent à une vitesse environ  $10^{-5}$  fois inférieure à celle des signaux électriques dans les résonateurs, entraînant ainsi une réduction significative du poids et de l'encombrement des résonateurs.

Les performances de ces filtres dépendent grandement

des propriétés des matériaux utilisés, ce qui rend leur conception complexe et nécessite des ajustements technologiques minutieux.

Facilement intégrables, ces filtres sont particulièrement intéressants pour les applications multistandards, notamment dans les systèmes de téléphonie mobile.[6, 7]

### 3.3. Filtres micro-ondes planaires

Lorsque le transport de fortes puissances n'est pas nécessaire, les technologies planaires constituent une alternative intéressante en termes de coût de production, de compacité, de légèreté, de facilité de réalisation des fonctions passives et d'intégration avec des circuits actifs. La figure 4 illustre les géométries courantes des différents types de lignes planaires, telles que les lignes microruban, coplanaires, triplaque et à fente.[8, 9]

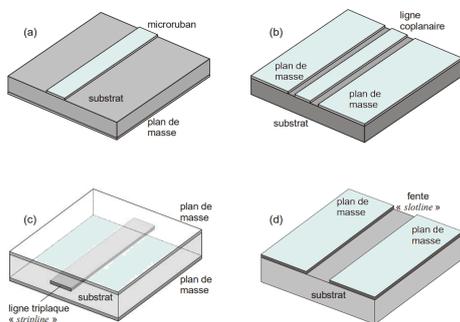


Figure 4: Quelques exemples de technologies planaires: (a) Microruban (b) Coplanaire (c) Ligne triplaque (d) Ligne à fente

Parmi les technologies planaires, **la technologie microruban** est la plus couramment utilisée aujourd'hui en raison de sa facilité de fabrication. Dans cette technologie, le conducteur principal est placé sur l'une des faces du substrat. Si la connexion des composants en série est relativement simple, celle des composants en parallèle est plus complexe, car le plan de masse se trouve à l'arrière du substrat, nécessitant l'utilisation de vias métallisés. Les principaux paramètres caractérisant la structure microruban sont la permittivité du substrat  $\epsilon_r$  (souvent choisie élevée pour concentrer le champ électromagnétique et ainsi réduire les pertes par rayonnement) et les paramètres géométriques  $W$  et  $h$  (généralement  $0.1 \leq \frac{W}{h} \leq 10$ )(voir figure 5)[10].

- $W$  : largeur de la ligne,
- $h$  : épaisseur du substrat,
- $T$  : épaisseur du métal.

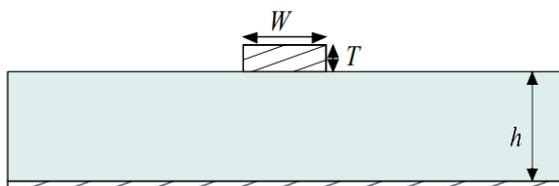


Figure 5: Coupe transverse d'une ligne microruban

En revanche, **les lignes coplanaires**(CPW) positionnent le conducteur principal et la masse sur la même face du substrat. Cette configuration présente plusieurs avantages :

- Facilite le montage des composants en parallèle ou en série.
- Élimine le besoin de vias métallisés.
- Offre une flexibilité de conception permettant d'obtenir une même impédance caractéristique avec différentes dimensions de lignes.

Cependant, l'utilisation des lignes coplanaires nécessite la création de ponts pour filtrer le mode impair (dispersif) qui coexiste avec le mode pair, impliquant un processus technologique supplémentaire.[11]

**La ligne triplaque (stripline)**, développée par Barrett et Barnes en 1951, est la première micro-ligne et la seule ligne homogène composée d'un unique diélectrique, supportant un mode fondamental réellement TEM. Aux fréquences micro-ondes, les pertes diélectriques sont généralement très faibles comparées aux pertes dans le conducteur.[11]

**La ligne à fente (slotline)** est une structure composée d'un substrat diélectrique métallisé sur une seule face. Sur cette face métallisée, une fente étroite est gravée pour former la ligne. Cette configuration est particulièrement avantageuse dans les circuits intégrés qui requièrent des lignes à haute impédance (il est difficile d'obtenir des impédances caractéristiques inférieures à 60 pour les lignes à fente), des courts-circuits ou des combinaisons hybrides avec des lignes à microruban.[8]

#### 3.3.1 Avantages et inconvénients des structures planaires

Les lignes de transmission présentent plusieurs propriétés avantageuses, parmi lesquelles :

- Faible coût
- Poids léger, dimensions réduites et faible encombrement
- Compatibilité avec les circuits intégrés
- Performances remarquables
- Fiabilité et reproductibilité accrues
- Possibilité d'intégrer des composants élémentaires aux circuits ; leur structure ouverte les rend particulièrement adaptées à l'utilisation des MICs (circuits intégrés micro-ondes)

Cependant, un inconvénient majeur des lignes microrubans est leur nature ouverte, ce qui entraîne une radiation d'énergie dans l'espace environnant.

#### 3.3.2 Comparaison entre les différentes lignes planaires

Une ligne de transmission se caractérise par son impédance, sa constante d'affaiblissement (mesurant les pertes) et la vitesse de propagation des signaux, dépendant du diélectrique utilisé.

- Les lignes microrubans réduisent les pertes ohmiques à haute fréquence plus efficacement que les lignes coplanaires (CPW).

- Les lignes CPW sont plus sensibles à l'épaisseur des conducteurs en raison de la distribution des champs électriques et magnétiques.
- Les lignes coplanaires sont plus robustes face à la dispersion des caractéristiques électriques selon la fréquence.
- Les circuits microrubans sont moins influencés par l'environnement grâce à leur plan de masse, contrairement aux circuits à guide d'onde coplanaire qui peuvent voir leurs caractéristiques modifiées par un plan de masse non contrôlé.
- Les lignes à fentes permettent des impédances élevées, ce qui pose des problèmes pour des impédances basses (50).
- La dispersion est importante pour les lignes à fentes, faible pour les microrubans et moyenne pour les lignes coplanaires.
- Les lignes microrubans peuvent être facilement fabriquées avec des techniques de conception de circuits imprimés.

### 3.4. Critères de choix topologiques et technologiques

Le choix de la topologie et de la technologie pour la réalisation d'un filtre dépend des propriétés électriques et des caractéristiques physiques requises pour son application. Ces spécifications sont détaillées dans le cahier des charges. Les critères de choix peuvent-être résumés de la façon suivante [12]:

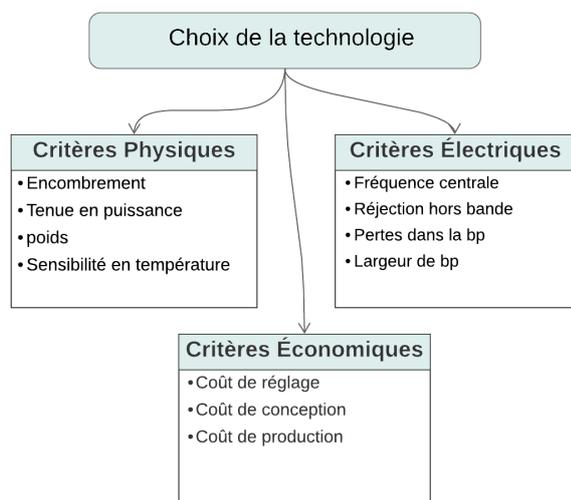


Figure 6: Choix de la technologie et la topologie des filtres avec bp: bande passante

Ces critères sont essentiels pour garantir que le filtre répondra aux exigences spécifiques de son application et fonctionnera de manière optimale dans l'environnement prévu.

## 4. Outils d'analyse

Les logiciels de simulation tels que CST Microwave et HFSS (High Frequency Simulation Software) constituent des outils indispensables dans le domaine des micro-ondes, permettant l'analyse, la conception et la simulation de filtres micro-ondes.

Créé en 1992, **CST STUDIO SUITE** résulte de nombreuses années de recherche et développement dédiées à l'élaboration des solutions de calcul les plus efficaces et précises pour la conception électromagnétique. **CST Microwave Studio** est un logiciel avancé de simulation électromagnétique destiné aux structures passives en trois dimensions. Il utilise la technique des intégrales finies (FIT, Finite Integration Technique) pour résoudre les équations de Maxwell. Grâce à cette capacité, **CST Microwave Studio** peut traiter une large gamme de problèmes électromagnétiques, allant des analyses statiques aux hyperfréquences, en couvrant à la fois les domaines temporel et fréquentiel.[13]

**Le logiciel HFSS (High Frequency Simulation Software)** est reconnu dans l'industrie comme l'outil de référence pour la simulation de champs électromagnétiques tridimensionnels à haute fréquence. Il propose des solveurs avancés basés sur la méthode des éléments finis (méthode fréquentielle) pour résoudre les équations de Maxwell dans un volume défini. Grâce à ces capacités, HFSS peut traiter un large éventail d'applications, incluant les micro-ondes, la radiofréquence (RF) et les technologies numériques ultrarapides.

**HFSS** permet de calculer des paramètres tels que les paramètres S, les fréquences de résonance et de visualiser les champs électromagnétiques. Il aide les utilisateurs à caractériser et optimiser les performances de diverses jonctions à base de guides d'ondes. Son principal atout réside dans sa capacité à gérer toutes sortes de structures homogènes et inhomogènes, indépendamment de la technologie utilisée (micro-ruban, coplanaire, ligne à fente, guide, circulateurs, coupleurs, filtres, etc.). Cette flexibilité est encore renforcée par l'intégration d'Optimetrics, qui permet d'optimiser davantage les conceptions.[13, 14]

## 5. Optimisation

Une fois la structure du filtre obtenue, sa réponse fréquentielle ne correspond souvent pas aux objectifs. Cette divergence entre les résultats de la synthèse et les objectifs suggère qu'il est extrêmement difficile d'effectuer directement la synthèse des filtres avec différentes technologies. Comme les résultats des simulations des filtres se rapprochaient de nos objectifs, nous envisageons d'utiliser une technique d'optimisation pour ajuster les dimensions du filtre et ainsi corriger sa réponse fréquentielle. Les dimensions initiales obtenues par la synthèse seront utilisées comme point de départ dans le processus d'optimisation afin de réduire le temps de calcul.

Il faut noter qu'il existe plusieurs algorithmes d'optimisation, et dans notre cas d'étude, nous allons présenter deux algorithmes largement utilisés dans l'optimisation des filtres : le PSO (Particle Swarm Optimization) et l'AG (Algorithme Génétique).

### 5.1. Optimisation par essaim de particules(PSO)

Proposés en 1995 par J. Kennedy et R. Eberhart [15], les algorithmes PSO cherchent à capturer les aspects fondamentaux de l'essaimage dans le domaine de l'optimisation. En substance, chaque particule dans la PSO est associée à une position et à une vitesse dans l'espace de recherche, ainsi qu'à un mécanisme pour ajuster sa vitesse en fonction de sa propre performance et de celle des autres particules.

Chaque particule  $i$  dans l'algorithme PSO est caractérisée par plusieurs éléments. Tout d'abord,  $x_i$  représente le vecteur de position de la particule  $i$  dans l'espace de recherche. Le vecteur  $y_i$  correspond à l'évaluation de la particule  $i$ , c'est-à-dire sa performance selon la fonction objectif. La particule  $i$  possède également un vecteur de vitesse  $v_i$ , qui détermine la direction et la magnitude de son mouvement dans l'espace de recherche.  $P_{best_i}$  représente l'évaluation de la meilleure position  $i_p$  obtenue par la particule  $i$  depuis le début de l'exécution de l'algorithme. Enfin,  $G_{best_i}$  correspond à l'évaluation de la meilleure position  $g_i$  de tout l'essaim, c'est-à-dire la meilleure position trouvée jusqu'à présent parmi toutes les particules de l'essaim. Le processus débute par une initialisation aléatoire des positions  $x_i$  et des vitesses  $v_i$  des particules  $i$ . Ensuite, jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint, les étapes suivantes sont répétées : pour chaque particule  $i$ , la fonction d'évaluation  $y_i$  est calculée à la position  $x_i$  si  $y_i$  est meilleure que  $P_{best_i}$ ,  $P_{best_i}$  et  $P_i$  sont alors mis à jours. De même, si  $y_i$  est meilleure que  $G_{best_i}$ , alors,  $G_{best_i}$  et  $g_i$  sont mis à jours. Ensuite, pour chaque particule  $i$ , la position  $x_i$  et la vitesse sont mises à jours en utilisant les équations suivantes. À chaque itération pour chaque particule,  $\vec{U}(\phi_i)$  est un vecteur aléatoire uniformément distribué dans l'intervalle  $[0, \phi_i]$ . Les coefficients  $\phi_1$  et  $\phi_2$  représentent les coefficients d'accélération utilisés pour évaluer l'influence de  $p_i$  et  $g_i$  sur l'essaim.

L'opérateur  $\otimes$  est utilisé pour la multiplication.

$$\begin{aligned} v_i &\leftarrow v_i + \vec{U}(0, \phi_1) \otimes (p_i - x_i) + \vec{U}(0, \phi_2) \otimes (g_i - x_i) \\ x_i &\leftarrow x_i + v_i \end{aligned}$$

(1)

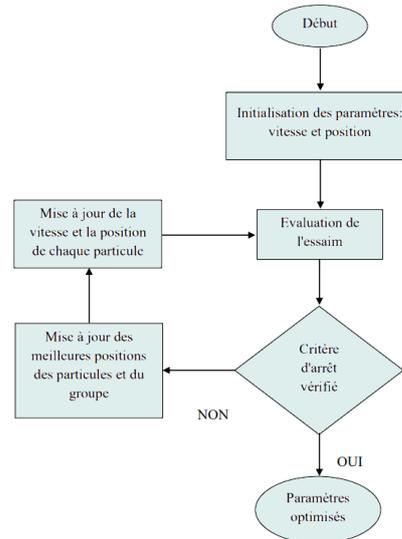


Figure 7: Organigramme de fonctionnement de l'algorithme PSO

### 5.2. Algorithme Génétique

En 1975, John Holland a présenté le premier modèle formel des algorithmes génétiques, appelé "canonical genetic algorithm" (CGA), dans son livre *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [16]. Il a démontré comment intégrer de l'intelligence dans un programme informatique grâce aux croisements (échange de matériel génétique) et à la mutation (source de diversité génétique). Ce modèle est devenu la base des recherches futures et a été particulièrement développé par Goldberg, qui a publié en 1989 un ouvrage de vulgarisation sur les algorithmes génétiques, ajoutant de nouvelles idées à la théorie existante.[17]

### 5.3. Schéma de fonctionnement

- Initialisation : Soit  $X^{(0)} \subset X$ , une population initiale de solutions.
- Étape  $k$  : Soit  $X^{(k)} \subset X$  la population courante :
  1. Sélectionner dans  $X^{(k)}$  un ensemble de paires de solutions de haute qualité ;
  2. Appliquer à chacune des paires de solutions sélectionnées un opérateur de croisement qui produit une ou plusieurs solutions néofants ;
  3. Remplacer une partie de  $X^{(k)}$  formée de solutions de basse qualité par des solutions néofants de haute qualité ;
  4. Appliquer un opérateur de mutation aux solutions ainsi obtenues (les solutions éventuellement mutées constituent la population  $X^{(k+1)}$ ) ;
- Si la règle d'arrêt est satisfaite, **alors** stop ;
- **Si non**, passer à l'étape  $k + 1$ .

La règle d'arrêt peut être de natures diverses, par exem-

ple un niveau minimum ou maximum que nous visons à atteindre pour la fonction d'évaluation. l'organigramme de fonctionnement général de ce type d'algorithme est illustré dans la Figure 8.

#### 5.4. Opérateurs de l'algorithme génétique

1. **Opérateur de codage:** Un vecteur codant une solution est appelé chromosome et ses composantes des gènes. Pour simplifier les opérations de croisement et de mutation, un codage binaire est utilisé. Mais parfois, les problèmes d'optimisation ont un espace de grande dimension ce qui nous ramène au codage réel
2. **Opérateur de sélection:** Cet opérateur est responsable de sélectionner les individus de la population pour la duplication dans la nouvelle génération, les désignant ainsi comme parents.
3. **Opérateur de Croisement:** Cet opérateur intervient après la sélection dans la population, ce qui nous laisse avec  $n/2$  individus, nécessitant donc un doublement pour former une nouvelle génération complète.
4. **La Mutation:** Une mutation se résume à l'inversion d'un ou de plusieurs bits dans le codage binaire, et à la modification aléatoire d'un ou de plusieurs gènes dans le codage réel.

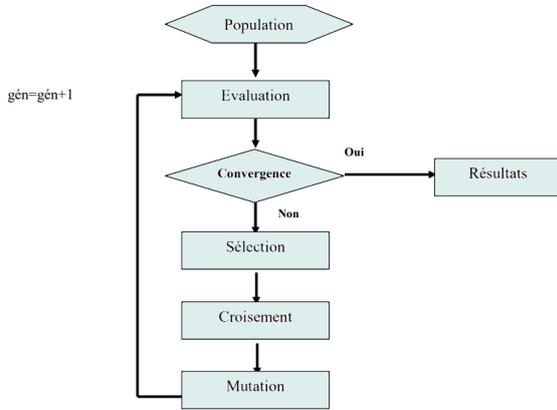


Figure 8: Organigramme de fonctionnement de l'algorithme Génétique

## 6. Conception et réalisation d'un filtre passe-bande(exemple d'application)

Le filtre hairpin offre des avantages significatifs par rapport aux filtres microruban traditionnels, notamment sa compacité et sa conception simple. En pliant le résonateur à demi-longueur d'onde, il réduit l'espace occupé sur le circuit imprimé, crucial pour les applications où l'espace est limité. Cette simplicité et efficacité en font un choix privilégié pour les systèmes

de communication moderne et les dispositifs micro-ondes.[18]

Dans cette section, nous allons voir un exemple d'application des concepts déjà présentés dans les sections précédentes en réalisant un filtre passe-bande en suivant toutes les étapes nécessaires. Ce filtre sera fait en technologie micro-ruban en utilisant des résonateurs de structure hairpin miniaturisés, sa bande passante s'étend de  $f_{c1}=865$  MHz à  $f_{c2}=935$  MHz avec une bande passante relative de  $FBW= 7.78\%$  et de fréquence centrale  $f_0 = 900$  MHz. Le filtre sera réalisé sur diélectrique de permittivité relative de  $\epsilon_r=4.3$ (FR4) et d'une épaisseur de 1.6mm. Un prototype passe-bas Chebyshev d'ordre  $n = 3$  avec une ondulation en bande passante de 3.01 dB ( $A_{max} = 0.5$ ) est sélectionné. Les paramètres  $g$  du prototype passe-bas sont:

$$\begin{aligned} g_0 &= g_4 = 1 \\ g_1 &= 1.5963 \\ g_2 &= 1.0967 \\ g_3 &= 1.5963 \end{aligned} \quad (2)$$

La figure 9 illustre la réponse fréquentielle d'un filtre de type Chebyshev, montrant l'amplitude de transmission en fonction de la fréquence. Le graphe met en évidence la bande passante de 865 MHz à 935 MHz ainsi que les ondulations, conformes aux spécifications du filtre conçu pour cette application spécifique.

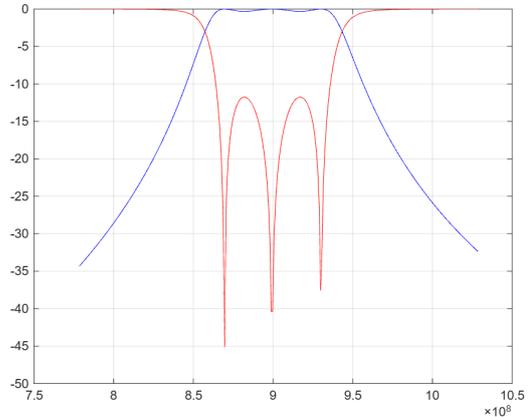


Figure 9: Le tracé de la fonction du transfert du filtre à partir du prototype de Tchebyshev

Deux paramètres essentiels régissant la performance des filtres sont la séparation entre les résonateurs adjacents  $s$ , et la distance séparant la base du résonateur de l'entrée ( $t$ ). Les détails sur leur influence seront abordés dans ce qui va suivre.  $s$  et  $t$  peuvent être déterminés respectivement par le coefficient de couplage mutuel  $M_{i,i+1}$ , et le facteur de qualité externe du filtre  $Q_e$ . Ces paramètres de conception sont définis comme suit:

$$Q_{e1} = \frac{g_0 g_1}{FBW} \quad (3)$$

$$Q_{en} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW} \quad (4)$$

$$M_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (5)$$

où  $Q_{e1}$  et  $Q_{en}$  sont les facteurs de qualité externes des résonateurs en entrée et en sortie respectivement, et  $M_{i,i+1}$  sont les coefficients de couplage entre chaque deux résonateurs.

Il convient de noter qu'au cours des simulations électromagnétiques, telles que celles réalisées avec CST, la relation entre  $s$  et  $M_{i,i+1}$  ainsi qu'entre  $t$  et  $Q_e$  peut être déterminée à l'aide de:

$$Q_e = \frac{w_0}{\Delta w_{\pm 90^\circ}}, \quad M_{i,i+1} = \pm \frac{f_{p2}^2 - f_{p1}^2}{f_{p2}^2 + f_{p1}^2} \quad (6)$$

où  $w_0$ ,  $\Delta w_{\pm 90^\circ}$ ,  $f_{p2}$  et  $f_{p1}$  sont respectivement la fréquence angulaire centrale, la largeur de bande absolue entre les points  $\pm 90^\circ$ , les pics de fréquence haute et basse.

Pour ce filtre, le facteur de qualité à l'entrée est  $Q_{e1} = 20.52$ , ce qui est semblable au facteur de qualité externe à la sortie  $Q_{e3}$ . Les coefficients de couplage entre le  $i$ -ème résonateur et le  $i + 1$ -ème résonateur sont  $M_{1,2} = M_{2,3} = 0,0588$ .

Les facteurs de qualité externes  $Q_e$  et les coefficients de couplage  $M_{i,i+1}$  en fonction des dimensions physiques sont affichés respectivement aux figures 10 et 11.

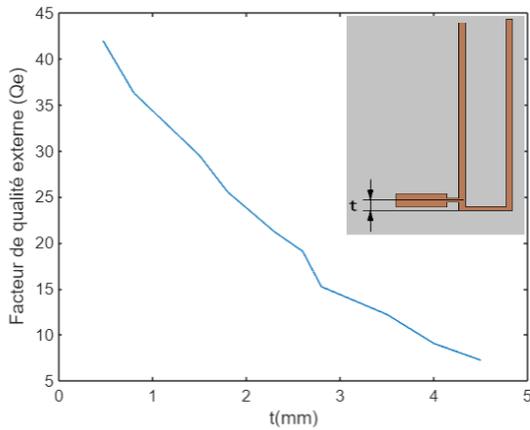


Figure 10: Facteur de qualité externe en fonction de la distance ( $t$ ) pour un résonateur

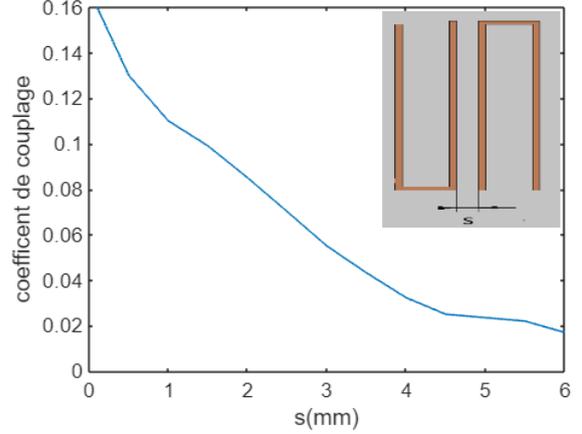


Figure 11: Coefficient de couplage en fonction de l'espacement ( $S$ ) entre deux résonateurs couplés

D'après la figure 10 et 11 et les calculs précédents de  $Q_e$  et  $M$ , la distance initiale est  $t = 2.3$  mm, les distances de séparation entre deux lignes sont  $S_{1,2} = S_{2,3} = S = 2.88$  mm.

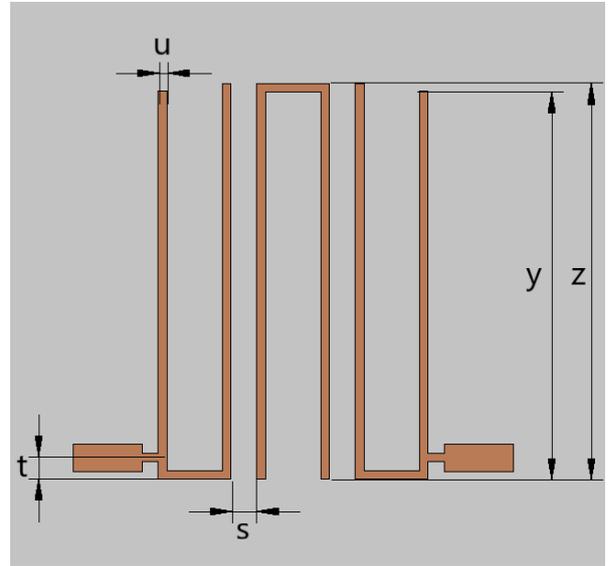


Figure 12: La structure du filtre Hairpin

Une fois les valeurs de  $S$  et de  $t$  sont obtenues, nous avons opté pour une optimisation avec CST. L'outil "Optimizer" du logiciel nous permet de choisir le type d'algorithme utilisé pour optimiser notre filtre. Comme montré dans la figure 13 l'algorithme génétique est utilisé pour optimiser le filtre conçu.

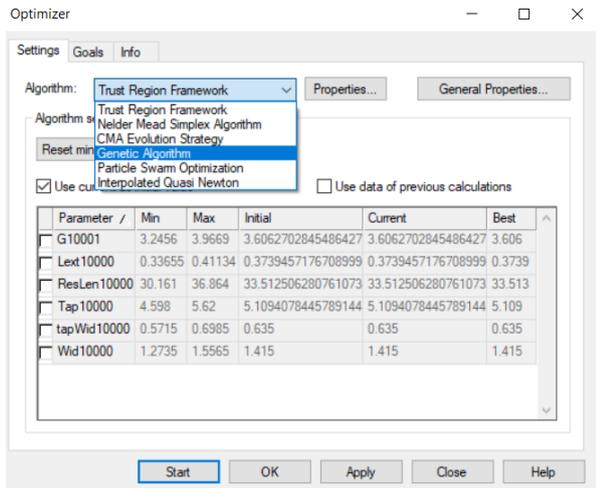


Figure 13: Fonction d'optimisation du logiciel CST

Après optimisation avec CST, les valeurs optimales obtenues sont  $t = 2.47$  mm,  $S_{1,2} = S_{2,3} = s = 3$  mm,  $y = 45.26$  mm,  $z = 46.14$  mm, et  $u = 1$  mm. Les résonateurs, placés avec toutes les dimensions déterminées, sont illustrés dans la figure 12. Les résultats simulés sont en bon accord avec ceux des références [19, 20].

## Résultats et Interprétations

Nous avons réalisé le filtre Hairpin selon la structure de la figure 12, en utilisant le même substrat que celui présenté précédemment (FR-4). La figure 14 présente une comparaison entre les résultats de simulation et les mesures expérimentales des paramètres S.

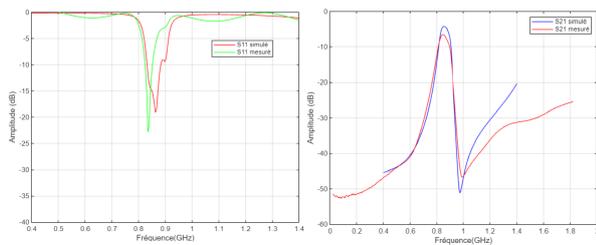


Figure 14: Les paramètres S mesurés et simulés du filtre Hairpin d'ordre 3

La figure 13 montre une bonne concordance entre la simulation et la mesure des paramètres S du filtre. Les courbes de S21 indiquent une transmission efficace dans la bande de fréquences spécifiée, tandis que les courbes de S11 montrent une bonne adaptation d'impédance avec de faibles réflexions dans la bande passante. De plus, une excellente rejection des fréquences indésirables en dehors de la bande passante est observée. Cette même figure met en évidence une forte corrélation entre les résultats simulés et mesurés des paramètres S, validant ainsi la conception du filtre. Les légères différences peuvent être attribuées aux tolérances de fabrication et aux variations des propriétés du matériau du substrat. Dans l'ensemble, la

cohérence entre la simulation et les mesures expérimentales confirme la robustesse de la conception du filtre.

Le prototype fabriqué du filtre est présenté à la figure 15(a) et son plan de masse dans la figure 15, tandis que sa simulation dans CST est illustrée à la figure 16.

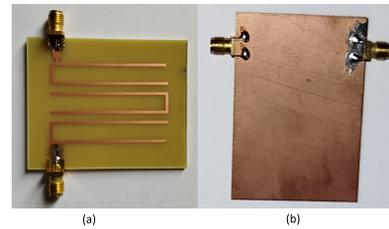


Figure 15: Le filtre fabriqué: (a) La structure du filtre (b) Le plan de masse du filtre

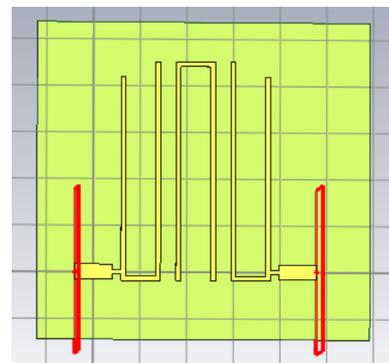


Figure 16: simulation CST

## 7. Conclusion

En résumé, cet article offre un guide détaillé pour la conception et la réalisation de filtres micro-ondes en technologie microruban. En explorant différentes méthodes de choix de modèle, en passant en revue les technologies de filtres les plus courantes, et en présentant des outils d'analyse et d'optimisation, il fournit un ensemble complet de ressources pour les ingénieurs et chercheurs dans ce domaine. De la sélection du modèle de filtre adapté aux exigences spécifiques d'une application à la mise en œuvre pratique à l'aide de logiciels de simulation avancés comme CST Microwave Studio et HFSS, en passant par l'optimisation des paramètres pour atteindre les performances désirées, cet article couvre l'ensemble du processus de conception. Enfin, à travers un exemple concret de conception et de réalisation d'un filtre passe-bande en technologie microruban, il illustre l'application pratique des concepts et des techniques discutés. En somme, cet article constitue une ressource précieuse pour quiconque souhaite se lancer dans la conception de filtres micro-ondes performants.

## References

- [1] PM Martin, G Tanné, E Rius, D Le Berre, and JF Favennec. Travaux pratiques supports de transmission en hyperfréquence: synthèse, réalisation et mesure d'un filtre passe-bas en technologie microruban. *J3eA*, 4:021, 2005.
- [2] Ian C Hunter, Laurent Billonet, Bernard Jarry, and Pierre Guillon. Microwave filters-applications and technology. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 50(3):794–805, 2002.
- [3] Stephen Butterworth et al. On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineer*, 7(6):536–541, 1930.
- [4] Richard J Cameron, Chandra M Kudsia, and Raafat R Mansour. *Microwave filters for communication systems: fundamentals, design, and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [5] L. Young G. Mahttei and E. M. T. Jones. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. Norwood, MA: Artech House, 1980.
- [6] Youngjin Lee, Jongin Im, and Seunghee Lee. Development of the rf saw filters based on pcb substrate. In *2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, pages 334–337. IEEE, 2006.
- [7] Jan-willem Lobeek and A Bart Smolders. Design and industrialisation of solidly-mounted baw filters. In *2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pages 386–389. IEEE, 2006.
- [8] by Leo G. Maloratsky. *RF and Microwave Integrated Circuits : Passive Components and Control Devices*.
- [9] Pierre Jarry and Jacques Beneat. *Advanced design techniques and realizations of microwave and RF filters*. John Wiley & Sons, 2008.
- [10] Jia-Shen G Hong and Michael J Lancaster. *Microstrip filters for RF/microwave applications*. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] Robert E. Collin. *Foundations for Microwave Engineering*. 2001.
- [12] Melle SEGHIER SALIMA. Caractérisation de nouvelles structures de filtres micro-ondes pour des applications en télécommunications. 2013.
- [13] Wenhua Yu. *Advanced FDTD methods: parallelization, acceleration, and engineering applications*. Artech House, 2011.
- [14] A El Ouadih, A Oulad-Said, and MM Hassani. Comparaison du modele des elements finis et du modele de la cavite pour la conception dune antenne patch rectangulaire miniaturisee et alimentee par une ligne coaxiale pour la bande ism de 2.4 ghz. *Mars*, 13:15, 2013.
- [15] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, volume 4, pages 1942–1948 vol.4, 1995.
- [16] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company ,INC, 1989.
- [17] L. H. Randy and D. H. Werner. *Genetic Algorithms in Electromagnetics*. IEEE Press. A John Wiley Sons, Inc, Publication, Publication 2007.
- [18] Abhay Purohit and Sandeep Toshniwal. Design and simulation of hairpin band pass filter for different substrate. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 3(1):62–64, 2015.
- [19] SM Gillette, AL Geiler, Z Chen, Y Chen, T Ar-ruda, C Xie, L Wang, X Zhu, M Liu, S Mukerjee, et al. Active tuning of a microstrip hairpin-line microwave bandpass filter on a polycrystalline yttrium iron garnet substrate using small magnetic fields. *Journal of Applied Physics*, 109(7), 2011.
- [20] M Damou et al. Conception et optimisation des filtres hairpin à base de la technologie planaire.