Coupleurs microondes en guide rectangulaire en bande Ku par impression 3D plastique

E. Laplanche^{a,b}, O. Tantot^a, N. Delhote^a, A. Périgaud^a,
S. Verdeyme^a, B. Barelaud^a, René-Philippe Gramond^c

^a XLIM, UMR 7252, Université de Limoges/CNRS, 123 av A. Thomas, 87060 Limoges, France

^b Centre National d'Etudes Spatiales, 18 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

^c Plateforme technologique RAMSEI'S, Lycée Turgot, 6 Rue Paul Derignac, 87031, Limoges, France

Contact email : etienne.laplanche@xlim.fr

Dans ce papier est présentée la conception de coupleurs directifs microondes basés sur des guides d'ondes volumiques facilement imprimables en plastique par technologie FDM ou Polyjet[®]. La conception d'un coupleur en guides d'ondes croisés est abordée à la manière d'un projet sub-divisible en plusieurs phases, de la bibliographie à la mesure du dispositif une fois celui-ci imprimé. L'ensemble de ces phases étant relativement interdépendantes, il est possible de se concentrer uniquement sur l'une d'elles dans le cadre d'une séance de travaux pratiques, ou d'en sélectionner plusieurs dans le cadre d'un projet par exemple.

Dans une seconde partie, deux topologies de coupleurs hybrides se prêtant également bien à ce type de projets sont présentées, à savoir des coupleurs Short-Slot et Ladder-Type.

I. Introduction

Au cours des dernières années, la démocratisation progressive des imprimantes 3D et les investissements réalisés afin de garantir leur disponibilité sur le territoire ont permis le développement d'une grande quantité d'activités dans les FabLabs, les universités et les laboratoires de recherche. Elles permettent de réaliser des prototypes et des démonstrateurs de principe efficaces, dans un contexte de recherche (1) comme dans un contexte pédagogique (2, 3).

Ici, nous présentons un projet de conception de coupleur directif, adapté à des étudiants de second cycle en formation d'ingénieur microondes. Ce dernier est découpé en différentes phases : Etude bibliographique, compréhension du dispositif et démarche de synthèse ; Conception assistée par ordinateur, étude paramétrique, optimisation ; Dessin assisté par ordinateur ; création de l'objet tridimensionnel ; Impression, nettoyage et métallisation du dispositif ; Mesure du dispositif et exploitation des résultats.

II. Principe des coupleurs directifs

Un coupleur directif est un octopôle réunissant entre eux, deux guides (ou lignes de transmission) de telle manière que l'accès ① soit découplé avec l'accès ④ (Fig.1) et l'accès ② soit découplé avec l'accès ③ (4).

L'accès ① est également couplé aux accès ② et ③. Par symétrie (plan Hor., Fig. 2), l'accès ④ est couplé aux accès ③ et ②.

Par symétrie (plan Ver., fig.2), l'accès ② est couplée à l'accès ① et découplé de l'accès ③. De même, l'accès ③ est couplé à l'accès ④ et découplé à l'accès ②.

Fig.1. (a) Vue CAO d'un coupleur à fentes, (b) Vue CAO d'un coupleur hybride Ladder-Type, (c) vue CAO d'un coupleur hybride Short-Slot ou Riblet-Type.

Soit le schéma d'un coupleur directif (Fig. 2)

Fig.2. Schéma d'un coupleur directif

Un coupleur est réciproque ($S_{ij} = S_{ji}$ avec $i \neq j$) et adapté si $S_{ii} = 0$.

Les différents paramètres S de ce dispositif (Fig.2) peuvent se définir ainsi :

- **Couplage (dB)** = $20 \cdot \log |S_{31}|$
- **Adaptation (dB)** = $20 \cdot \log |S_{ii}|$
- **Pertes d'insertion (dB)** = $20 \cdot \log |S_{21}|$
- **Isolation (dB)** = $20 \cdot \log |S_{41}|$
- **Directivité (dB)** = $20 \cdot \log |S_{43}| = \text{Couplage (dB)} - \text{Isolation (dB)}$
- **Bande passante relative** = $(f_2 - f_1)/f_0$ avec f_1 et f_2 les fréquences limites pour lesquelles la condition de platitude de la transmission est respectée.

Un coupleur est dit parfait si tous les accès sont adaptés tels que $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$ et si les accès ① et ④ sont découplés de même que les accès ② et ③ tels que $S_{41} = S_{14} = S_{32} = S_{23} = 0$.

Les guides d'ondes en regard peuvent avoir une transmission proche de 1 en module : $S_{21} = S_{12} = S_{43} = S_{34} = a \cdot e^{j\theta}$ avec "a" la directivité et θ est le terme de phase.

La transmission des guides en diagonale est identique : $S_{31} = S_{13} = S_{42} = S_{24} = b \cdot e^{j\varphi}$ avec "b" le couplage et φ le terme de phase. La matrice S du coupleur parfait peut s'écrire alors :

$$[S]_{\text{idéale}} = \begin{pmatrix} 0 & a \cdot e^{j\theta} & b \cdot e^{j\varphi} & 0 \\ a \cdot e^{j\theta} & 0 & 0 & b \cdot e^{j\varphi} \\ b \cdot e^{j\varphi} & 0 & 0 & a \cdot e^{j\theta} \\ 0 & b \cdot e^{j\varphi} & a \cdot e^{j\theta} & 0 \end{pmatrix} \quad [1]$$

Pour un multipôle réciproque (qui ne contient pas de matériaux anisotropes) et sans pertes, on peut alors écrire un ensemble de relations : $[S] \cdot [S^*] = [I]$, qui permet d'établir les expressions suivantes:

$$a^2 + b^2 = 1 \quad \text{et} \quad \varphi = \theta \pm \frac{\pi}{2}$$

Les ondes à la sortie de l'accès ② et de l'accès ③ sont en quadrature, propriété utilisée dans des dispositifs tels que des duplexeurs ou des réseaux d'alimentation d'antennes. Si les transmissions du coupleur sont égales entre elles (à -3dB), alors on parle de coupleur hybride.

Dans cet article sont présentés des coupleurs hybrides en guide rectangulaire, Ladder-Type (Fig.1.b) ou Short-Slot (Fig.1.c), ainsi qu'un coupleur à fentes (Fig.1.a). Outre l'orientation des guides d'entrée, ces différents coupleurs se distinguent sur leur principe de fonctionnement. On peut en effet voir un coupleur comme un composant réalisant une opération d'interférence entre deux ondes incidentes, dont le résultat permettra de coupler ou non une sortie à une autre. Dans le cas des coupleurs Ladder-Type ou à fentes, les ondes recombinaées sont issues de chemins physiques de longueur différentes ($l_1 \neq l_2$). Dans le cas des coupleurs Short-Slots, les ondes sont cette fois issues de modes de propagation différents ($\beta_1 \neq \beta_2$).

III. Coupleur directionnel

On présente ici un coupleur directionnel avec une valeur de couplage objectif de 30 dB et fonctionnant autour d'une fréquence centrale de 8.9 GHz. Il fonctionne sur la base d'un principe interférométrique imposant une condition de phase aux ondes transitant par deux ouvertures rayonnantes situées à l'interface de deux guides d'ondes. En fonction de la taille des ouvertures, de leur longueur et de la distance entre elles et l'axe central du guide, il est possible d'obtenir différentes valeurs de couplage pour la structure. L'abondance d'articles scientifiques et de livres traitant le sujet (5) peut être une bonne occasion de faire se confronter l'étudiant à la problématique bibliographique. Il est à noter que le caractère non-résonant de la structure et son nombre limité de paramètres clés permet une étude et une compréhension rapide du dispositif, adapté au temps d'un projet ou d'un stage de 2nd cycle.

En termes de conception, l'occasion est offerte à l'étudiant de mettre en application les connaissances acquises sur les logiciels de simulation électromagnétique 3D abordés en formation, comme HFSS ou CST Design Studio (voir Fig. 3.a). La conception du dispositif peut se clore sur une étude paramétrique et une optimisation, là encore suffisamment simples en termes de quantité de calcul pour être solvable avec les ressources généralement disponibles sur les ordinateurs d'enseignement. Le centre des fentes est à égale distance du milieu longitudinal des guides, la distance entre les centres des fentes est proche de $\lambda_g/4$ dans les axes des guides (d_1 et d_2 , Fig.3.a). Après une optimisation portant sur le niveau de couplage requis et la meilleure platitude on obtient les dimensions du coupleur données dans la Fig.3.a.

La troisième partie du projet consiste à concevoir les plans et l'habillage du dispositif en vue de sa fabrication (voir Fig.3.b). Les techniques de métallisation à faible coût utilisées sur ce type de dispositif et à ces fréquences permettent une réalisation du dispositif en une seule pièce, la conception de l'habillage n'a pas obligatoirement à inclure l'ajout de plans de joints et donc à tenir compte de la problématique mécanique des couples de serrage et de la répartition des vis d'assemblage le long de ce dernier. Néanmoins, l'ajout des flasques d'accès est l'occasion de se confronter à la question des standards de guides, de leur nomenclature, de leurs fréquences de fonctionnement et de leurs dimensions normalisées, afin de réaliser la connexion du dispositif.

Une fois l'impression 3D réalisée à l'aide d'un procédé Polyjet[®] ou FDM (ici le dispositif a été réalisé à l'aide d'une technique de dépôt FDM (Fused Deposit Modeling) via la machine Print SE de chez Stratasys[®]), le dispositif doit être débarrassé de son support de construction à l'aide d'un bain de soude à faible pourcentage, puis métallisé à l'aide

d'une laque argent de marque Ferro® (Ag L-200N). Ici, l'étudiant est confronté à des problématiques relativement simples d'utilisation de composés chimiques, nécessitant de manipuler sous hotte, dans des locaux spécifiquement dédiés à la chimie et en utilisant des équipements de protection personnels (gants, masque, lunettes).

Fig.3. (a) Vue CAO du coupleur à fentes, (b) Photo du coupleur (60mm x 60mm x 53.6 mm) avec ses flasques réalisés en impression FDM (Stratasys Print SE).

La dernière partie du projet consiste, après une phase de séchage de quelques jours, à mesurer le dispositif à l'analyseur de réseau, après une application d'un processus d'étalonnage. Les mesures doivent être réalisées et exploitées correctement, avec l'exportation d'un fichier de mesure qui pourra servir à comparer les résultats avec les simulations, point conclusif du projet. Les résultats de mesures obtenus sur le dispositif sont montrés Fig.4.

Fig.4. Réponses simulées et mesurées du coupleur directif, a # 0 dB, b = -30,6 dB.

On observe sur la Fig.4 à 10 GHz les pertes d'insertion (S_{21}) mesurées à 0,07 dB alors que la simulation HFSS pour $\sigma = 10^6 \text{ S}/\mu\text{m}$ donne un peu moins de 0,06 dB.

Le couplage (S_{31}) est mesuré à 30,6 dB à 10 GHz alors que la simulation donne pour HFSS 30,4 dB. Ce faible écart peut s'expliquer par des dimensions légèrement plus grandes pour les fentes de la maquette réalisée. L'adaptation mesurée (S_{11}) reste supérieure à 24,3 dB et l'isolation (S_{41}) supérieure à 43,2 dB. Ceci donne une directivité de 11,7 dB au lieu de 17,8 dB en simulation mais cet écart peut venir en partie d'un étalonnage imparfait à ces niveaux d'isolation mais surtout par une plus grande sensibilité à ces niveaux des tolérances de fabrication. La bande passante relative du coupleur est de 33% (pour une platitude sur la valeur de transmission couplée de $\pm 1,5$ dB).

On obtient donc un projet sollicitant de nombreuses compétences d'ingénierie, de l'étude bibliographique à l'exploitation des résultats de mesures, pouvant être découpés en 5 grandes étapes (étude, conception, maquetage, réalisation, mesure) indépendantes les unes des autres, ce qui peut permettre de n'en faire réaliser que certaines en fonction du contexte de l'étude. En ce qui concerne notre exemple d'application, on peut constater que les performances du coupleur à fentes obtenu sont satisfaisantes dans un objectif de validation de la théorie.

IV. Coupleurs hybrides « Short-Slot » et « Branch-Guide »

Une alternative au projet peut viser à réaliser des coupleurs short-slots (Riblet-Type (6), Fig.1.c) ou branch-guide (Ladder-Type (7), Fig.1.b). Ces coupleurs hybrides reprennent les avantages précités en termes de facilité de conception, de temps de calcul, de nombre de paramètres à optimiser et d'abondance en termes de références dans la littérature. Ces dispositifs ont également vu une grande évolution dans leur conception, de plus en plus complexe, au cours des dernières décennies, ce qui peut être l'occasion de faire une étude bibliographique plus poussée qu'avec le dispositif présenté précédemment. Dans le cadre d'un projet de master recherche par exemple, on peut imaginer la possibilité d'aboutir sur une démarche de synthèse et la production d'un code de calcul visant à initialiser les dimensions du dispositif avant la phase d'optimisation.

Le coupleur Branch-Guide est basé sur la recombinaison interférométrique des signaux issus de différents chemins, en $\lambda/4$, de manière analogue au coupleur directionnel présenté en III. Le coupleur Short-Slot fonctionne également à l'aide d'une recombinaison interférométrique, cette fois ci modale. Les modes de propagation TE_{10} et TE_{20} sont excités dans un tronçon de guide plus large. La longueur de ce tronçon de guide permet de contrôler le déphasage relatif entre les deux modes (en raison de la différence entre leurs constantes de propagation), et par conséquent le résultat de leur recombinaison, et donc le coefficient de couplage, qu'on peut souhaiter différent de 3 dB.

Ces dispositifs, plus complexes, imposent un nettoyage et une métallisation légèrement plus difficile que le premier dispositif, l'ensemble des surfaces à métalliser et des volumes à nettoyer n'étant pas directement accessibles depuis l'entrée de l'objet. Des exemples de simulation de ces dispositifs sont présentés Fig.6 et Fig.8.

Il est à noter que les dispositifs étudiés (Fig.5.a et Fig.7.a) dans le cadre de projets de master ont été réalisés avec la nouvelle imprimante F170 de marque Stratasys dont l'investissement a été rendu possible par un co-financement IDEFI-FINMINA (8), GIP-CNFM (9) et le département physique de la faculté des sciences et techniques de l'Université de Limoges.

Coupleur hybride Ladder-Type

Un coupleur hybride Ladder-Type a été conçu avec HFSS sur la base de la synthèse de R. Levy (7) puis optimisé sur les dimensions données dans la figure Fig.5.a pour en

améliorer les performances. Ce coupleur Branch-guide a ensuite été imprimé par impression Polyjet® en ajoutant 3 mm d'épaisseur de paroi et des flasques normalisés (UBR 120) pour des guides WR 75, métallisé avec la laque argent (Fig.5.b) et mesuré après un temps de séchage d'une journée (Fig.6).

Fig.5. (a) Vue CAO du coupleur Ladder-Type, (b) Photo du coupleur Ladder-Type réalisé en impression Polyjet® (Stratasys Eden 260V)

Fig.6. Réponses simulées et mesurées du coupleur hybride Ladder-Type, $a = b = -3\text{dB}$, $\varphi - \theta = 90^\circ$

Conformément à l'équation [2] sur la relation entre les phases, on observe bien en mesure et en simulation la différence de 90° entre les phases des voies de sortie ② et ③ ($\Delta \arg(S_{ij}) = 90^\circ \pm 0,5^\circ$) pour un intervalle de fréquences allant de 9,6 à 12,8 GHz supérieur à la bande passante de fonctionnement. Cette dernière est définie telle que $\Delta S_{21} = \Delta S_{31} = \pm 0,25 \text{ dB}$, soit de 10,2 à 13 GHz. L'adaptation dans la bande passante est supérieure à 20 dB et l'isolation meilleure que 20 dB. La moins bonne directivité est de l'ordre de 17 dB, mais reste toutefois similaire en mesure et simulation. On a pris en simulation une valeur de conductivité des parois de $\sigma = 10^6 \text{ S/m}$, ce qui donne un bon accord entre mesure et

simulation. Nous avons ainsi de conçu un coupleur hybride dont la bande de fonctionnement correspond à 51% de celle des guides WR 75 (9,54 à 15 GHz).

Coupleur hybride Short-Slot monobloc

Un coupleur hybride Short-Slot (type Riblet) a été également conçu avec HFSS sur la base de la synthèse de U. Rosenberg (5). Comme précédemment, il a ensuite été optimisé sur les dimensions données dans la figure Fig.7.a pour en améliorer les performances. Ce coupleur Short-Slot a ensuite été imprimé par impression FDM avec les mêmes techniques de construction que le coupleur précédent, métallisé avec la laque argent (Fig.7.b) et mesuré après un temps de séchage d'une journée (Fig.8).

Fig.7. (a) Vue CAO du coupleur Riblet-Type, (b) Photo du coupleur Riblet-Type réalisé en impression FDM (Stratasys F170)

Fig.8. Réponses simulées et mesurées du coupleur hybride Riblet-Type, $a = b = -3\text{dB}$, $\phi - \theta = 90^\circ$

Dans ce graphe (Fig.8), on retrouve bien les principes des coupleurs avec les mêmes constatations que pour le coupleur Ladder-Type : une bande passante pour la condition de phase ($\Delta \arg(S_{ij})^\circ$, 10,7 – 14,6 GHz) supérieure à celle de l'égalité des modules (10,5 – 13,1 GHz) mais avec un recouvrement incomplet de ces deux bandes. L'ondulation de la

différence de phase dans la bande est probablement due à la dégradation de l'étalonnage. En effet la mesure d'un dispositif 4 ports à l'aide d'un analyseur 2 port implique de nombreuses manipulations des câbles pour les permutations de connexion, ce qui peut amener l'étalonnage à se dégrader. L'adaptation dans la bande de fonctionnement est supérieure à 19 dB et l'isolation meilleure que 21 dB. La directivité est de l'ordre de 18 dB avec un accord satisfaisant entre mesure et simulation. Cette dernière a été réalisée avec une conductivité des parois tenant compte des résultats précédents de $\sigma = 0,5 \cdot 10^6$ S/m et donne un bon accord entre mesure et simulation. L'optimisation du coupleur a conduit à une bande de fonctionnement égale à 48% de celle des guides WR et donc d'amplitude similaire à celle du coupleur Ladder-Type.

Coupleur hybride Short-Slot en 3 parties

Lors de l'impression du coupleur Short-Slot monobloc, on a constaté qu'il était difficile de nettoyer les supports de construction dans les zones internes du coupleur. Huit jours ont été nécessaires dans un bain composé partiellement de soude, à température ambiante et sans circulation de fluide qui aurait pu éliminer plus rapidement les supports. De plus, la métallisation du coupleur monobloc s'est faite en remplissant le dispositif de laque argent, ce qui ne permet aucun contrôle de la qualité des dépôts en faces internes.

Pour éviter ces problématiques liées au caractère monobloc de la structure précédente, on a fait le choix de l'imprimer en trois parties. La pièce centrale a été inclinée de 45 degrés sur le plateau de l'imprimante, afin de limiter le besoin de support de construction lors de l'impression. Les pièces ont, cette fois-ci, nécessité seulement quelques minutes de nettoyage des supports et la métallisation a pu être réalisée au pinceau (en trois couches, en respectant un délai de séchage d'une journée), garantissant un meilleur état de surface. Cependant, même si les plans de joints sont prévus pour être colinéaires avec la direction du champ électrique dans les guides, ce qui induit moins de courants de fuite synonymes de pertes, les défauts d'ajustement et de contact des trois parties dégradent la réponse mesurée du coupleur.

Le montage des trois parties s'effectue à l'aide de flasques aux dimensions externes des guides. Ces derniers venant s'insérer et s'aligner dans les flasques avec un jeu serré (Fig.9.a et Fig.9.b).

Fig.9. Vue CAO du coupleur Riblet-Type en 3 parties, (b) Photo du coupleur Riblet-Type assemblé

Il est à noter que la réponse est assez dégradée (Fig.10) notamment sur le déphasage entre les accès 2 et 3 qui s'éloigne de la valeur objective de 90°, notamment pour les

fréquences les plus basses. Cette maquette reste néanmoins intéressante, car elle souligne les effets des assemblages mal contrôlés sur la réponse mesurée de tel dispositifs.

Fig.10. Réponses simulées et mesurées du coupleur hybride Riblet-Type en 3 parties, $a = b = -3\text{dB}$, $\varphi - \theta = 90^\circ$

Bilan comparatif

Le tableau I présente les performances des trois coupleurs étudiés. Les largeurs de bande sont données à iso-critère de platitude soit $\pm 0,25\text{ dB}$. Les performances sont tout à fait satisfaisantes par rapport à la littérature et permettent de valider l'ensemble du processus de conception lors d'un projet pédagogique.

Un facteur de mérite (FoM) est proposé en valorisant la compacité, la meilleure bande passante par rapport à la fréquence centrale du coupleur et son isolation, tel que :

$$\text{FoM} = \left(\frac{\text{Bande passante GHz}}{\text{Fréquence centrale GHz}} \right) \% \cdot \frac{\text{section guide}}{\text{Surface coupleur utile}} \cdot \text{Isolation (dB)} \quad [3]$$

TABLEAU I. Résultats des mesures des coupleurs

Coupleur	f_c GHz	Bande passante	"a" dB à f_c	"b" dB à f_c	Adaptation dB	Isolation dB	Directivité dB	FoM
Ladder-type	11,6	24%	2,7	3,8	20	20	17	89
Riblet-type	11,8	22%	3,5	3,54	19	21	18	34
A fentes	9,83	13%	0,07	30,6	24,3	43,2	11,7	249
(5)	26,8	25%	3,25	2,75	35	35	32	36

Pour les coupleurs Riblet-type et Ladder-type, les bandes passantes sont similaires ainsi que les autres paramètres. Néanmoins, le coupleur Riblet-type présente une meilleure platitude dans la bande de fonctionnement que le coupleur Ladder-type. A titre comparatif, les résultats publiés par U. Rosenberg (5) ont été obtenus pour un coupleur Riblet-type

réalisé en usinage classique en aluminium. Les résultats sont naturellement meilleurs malgré une fréquence centrale plus élevée, notamment en ce qui concerne l'adaptation et l'isolation grâce à un meilleur contrôle des dimensions. A travers le facteur de mérite proposé, il est montré que les performances du coupleur Riblet étudié et celui de l'étude (5) sont très proches.

V. Conclusion

Un projet de conception de dispositif micro-onde de coupleurs micro-ondes a ainsi été réalisé, ce projet comporte plusieurs étapes, permettant de former l'étudiant sur les différentes phases du travail d'ingénierie, de la recherche bibliographique au traitement des résultats de mesure. Ce type de projet est désormais accessible au plus grand nombre en raison de la simplicité de coût et de mise en œuvre des techniques de simulation, d'impression 3D et de métallisation tout en garantissant des résultats expérimentaux de bonne qualité et en accord avec les simulations électromagnétiques.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le Pôle Limousin de Microélectronique (PLM) du GIP-CNFM (7) ainsi que l'ANR IDEFI FINMINA (8) pour le co-financement de l'imprimante 3D professionnelle à destination de l'enseignement utilisée pour les derniers dispositifs.

Références

1. E. Laplanche, O. Tantot, A. Perigaud, N. Delhote, S. Verdeyme, et al., "3D Printed Ku-Band Compact Diplexer", *International Workshop on Microwave Filters, (7th IWFMF)*, Apr. 2018, Noordwijk, Netherlands.
2. N. Jolly, O. Tantot, A. Périgaud, N. Delhote, S. Bila, S. Verdeyme, R.-P. Gramond, "Conception et expérimentation de dispositifs microondes didactiques par impression 3D plastique", *Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes (J3eA)*, 31 janvier 2018.
3. J. Ramón, M. Garai, I. O. Saracho, P. Jorge, A. R. Cruz, J. M. Rebollar, "An Educational Perspective of Low Cost Additive Manufacturing by Fused Filament Fabrication of Microwave Waveguide Passive Devices", *Workshop on Additive Manufacturing for RF Passive Hardware, European Microwave Conference*, Oct 2016, London, United Kingdom.
4. P. Combes, "Microondes, Circuits passifs, propagation, antennes", volume 1, Dunod, 1997.
5. M. Surdin, « Directive couplers in wave guides », *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIIA: Radiolocation*, vol. 93, n° 4, p. 725-736, 1946.
6. U. Rosenberg et K. Beis, "Improved Narrow-Wall Short Slot Coupler Design Exhibiting Significant Increased Bandwidth and Low Cost Production", in *2001 31st European Microwave Conference*, 2001, p. 1- 4.
7. R. Levy & L. F. Lind, "Synthesis of Symmetrical Branch-Guide Directional Couplers", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 16, no 2, p. 80- 89, févr. 1968.
8. IDEFI-FINMINA : Initiative d'Excellence - Formation Innovante en Microélectronique et Nanotechnologies, ANR-11-IDFI-0017. Website: <http://www.cnfm.fr/VersionFrancaise/actualites/FINMINA>.
9. GIP-CNFM: Groupement d'Intérêt Public - Coordination Nationale pour la formation en Microélectronique et en nanotechnologies. Website: <http://www.cnfm.fr>.