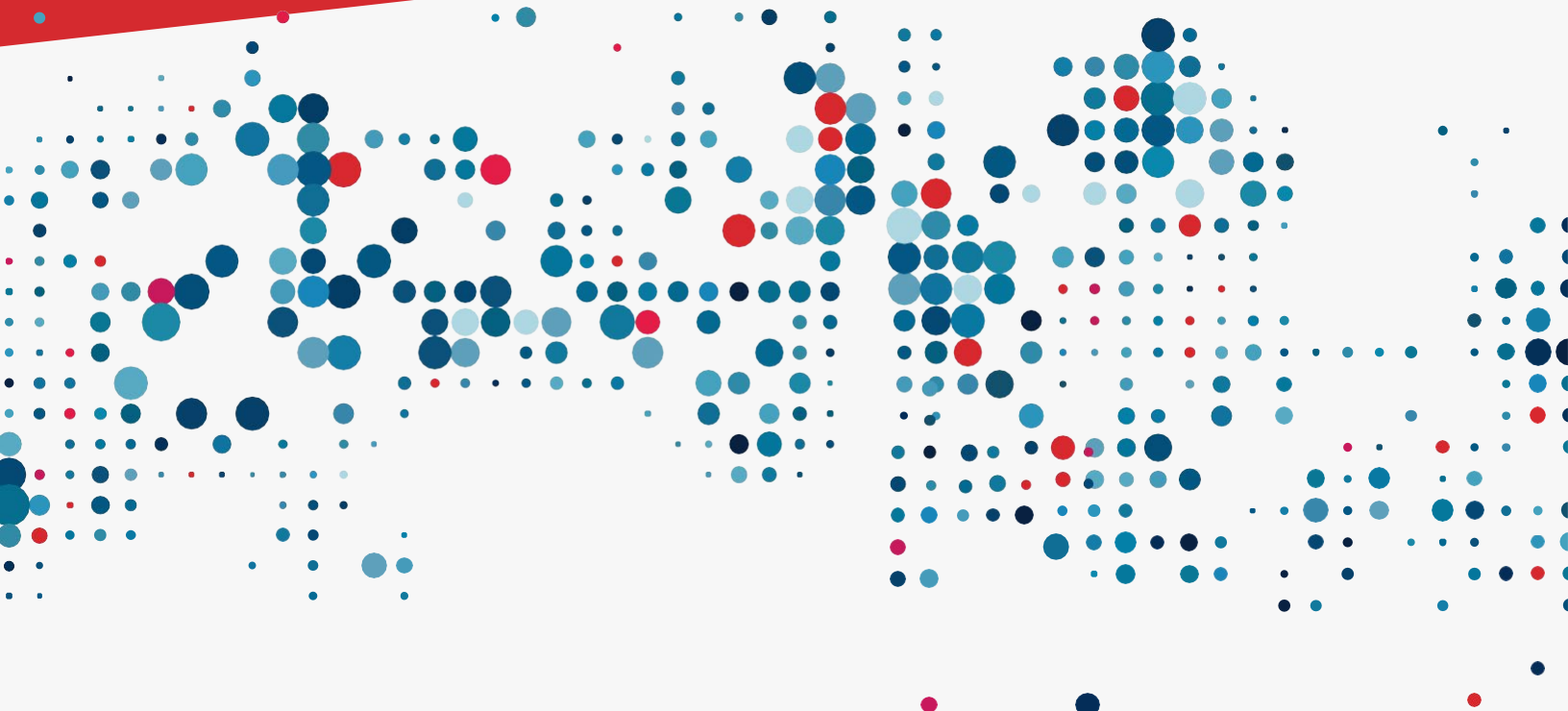


LIVRE BLANC

# Métamatériaux et surfaces intérieures reconfigurables

Vladan Jevremovic, Ph.D.



# Table des matières

|         |  |
|---------|--|
| 03..... | Introduction                                   |
| 03..... | Caractéristiques principales des métamatériaux |
| 05..... | Surfaces intelligentes reconfigurables (RIS)   |
| 07..... | Caractéristiques de base du SIF                |
| 08..... | RIS Cas d'utilisation                          |
| 09..... | RIS Modélisation de la propagation             |
| 11..... | Résumé   |

# Introduction

Les métamatériaux sont une nouvelle classe de matériaux artificiels, dont la microstructure est conçue pour présenter des propriétés électromagnétiques uniques non observées dans la nature et considérées auparavant comme physiquement inconcevables [1]. Tous les matériaux que l'on trouve dans la nature ont une structure périodique composée d'atomes. Dans les métamatériaux, une structure périodique artificielle est créée et insérée dans un matériau hôte. Cette structure périodique artificielle comporte des éléments constitutifs plus grands que les atomes du matériau hôte. Cette différence de taille a pour effet d'annuler la réponse naturelle du matériau hôte sous-jacent à l'onde électromagnétique entrante. Ainsi, les pertes de pénétration et de réflexion ainsi que l'angle de réflexion qui en résultent sont spécifiques à la structure artificielle et à l'angle de réflexion, et non à la structure atomique sous-jacente du matériau hôte. Dans cet article, nous parlons des principales caractéristiques des métamatériaux, nous présentons le concept de surface intelligente reconfigurable (RIS) et nous décrivons les cas d'utilisation potentiels des RIS dans les communications sans fil modernes.

## Principales caractéristiques des métamatériaux

Un métamatériau (du mot grec meta, qui signifie "au-delà", et du mot latin matera, qui signifie "matière") est un matériau conçu artificiellement pour avoir une propriété qui n'existe pas dans les matériaux naturels. Une microstructure métamatérielle est conçue artificiellement de telle sorte que la réponse macroscopique effective émergente de la structure à une excitation donnée n'est pas facilement rencontrée dans la nature [1]. Les structures périodiques artificiellement conçues dans un métamatériau peuvent être en métal, en plastique ou en semi-conducteur. Un motif répétitif de la structure périodique est appelé "méta-atome" et sa taille doit être bien inférieure à la longueur d'onde de l'onde électromagnétique qui interagit avec le métamatériau. Ce

est nécessaire car la structure périodique doit apparaître uniforme à l'onde entrante. Certains auteurs proposent que pour que le principe d'uniformité s'applique, la taille du méta-atome  $p$  doit être inférieure à un quart de la taille de l'onde.

de la longueur d'onde :

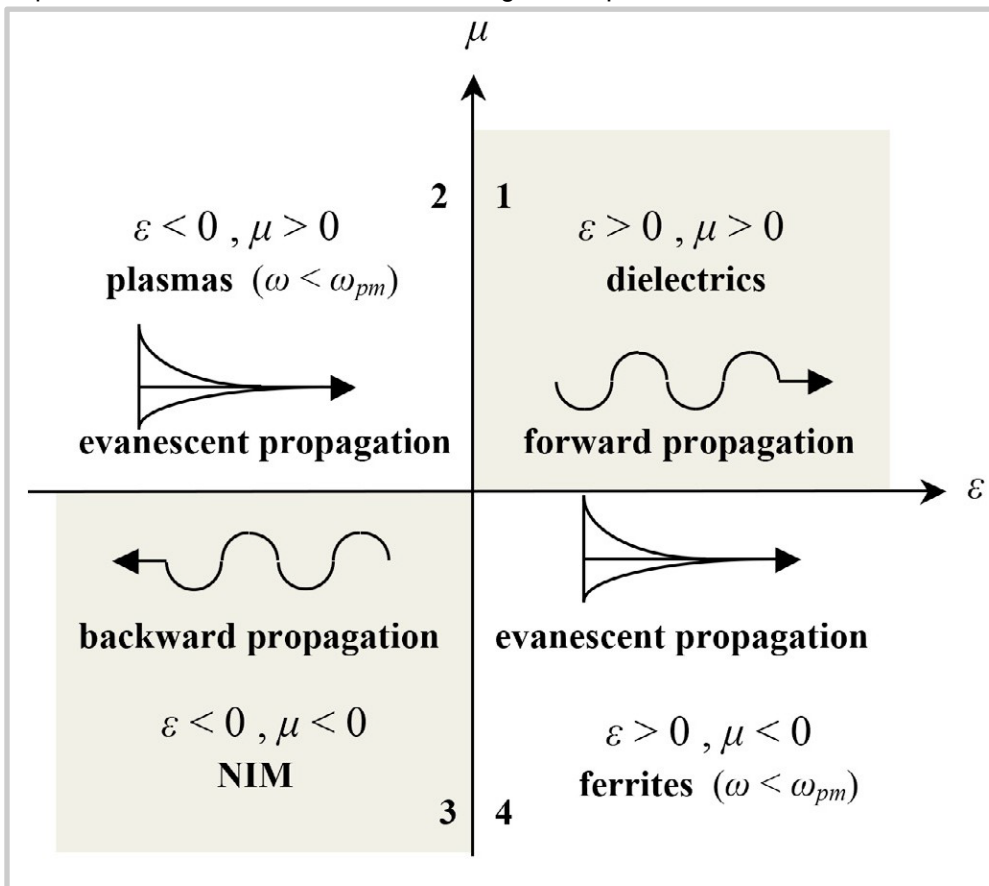
$$p \leq \lambda/4$$

L'interaction d'un matériau avec l'onde électromagnétique est quantifiée par l'indice de réfraction  $n$  et par ses paramètres constitutifs, la permittivité relative  $\epsilon$  et la perméabilité relative  $\mu$ .

$$n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$$

La plupart des matériaux présents dans la nature ont une perméabilité et une permittivité positives. Ces matériaux sont appelés diélectriques et sont caractérisés par la propagation d'ondes électromagnétiques vers l'avant, lorsque la vitesse de groupe et la vitesse de phase se déplacent dans la même direction et que le flux d'énergie est dans la même direction que le mouvement de la forme d'onde. Les ferrites ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ) et le plasma ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ) ont un produit  $\epsilon\mu$  négatif, et la réfraction est un nombre purement imaginaire, ce qui se traduit par une propagation avec perte à travers le matériau. Ce phénomène est également connu sous le nom de propagation évanescence.

Le cas le plus intéressant est celui où les deux éléments constitutifs sont négatifs. Même si les deux éléments constitutifs sont négatifs, leur produit est positif et l'indice de réfraction est un nombre réel. Ces matériaux sont appelés matériaux à indice négatif (NIM) [2]. Ils se caractérisent par une propagation à rebours, lorsque la vitesse de groupe et la vitesse de phase se déplacent dans la direction opposée et que le flux d'énergie est dans le sens inverse du mouvement de la forme d'onde. Il n'existe pas de matériaux NIM naturels connus et la création d'un matériau artificiel avec NIM est au cœur de la recherche sur les métamatériaux. La propagation vers l'avant, vers l'arrière et par évanescence est illustrée dans le diagramme  $\mu\epsilon$  ci-dessous :



**Figure 1 :** Permittivité ( $\epsilon$ ) et le diagramme de perméabilité ( $\mu$ ) [1].

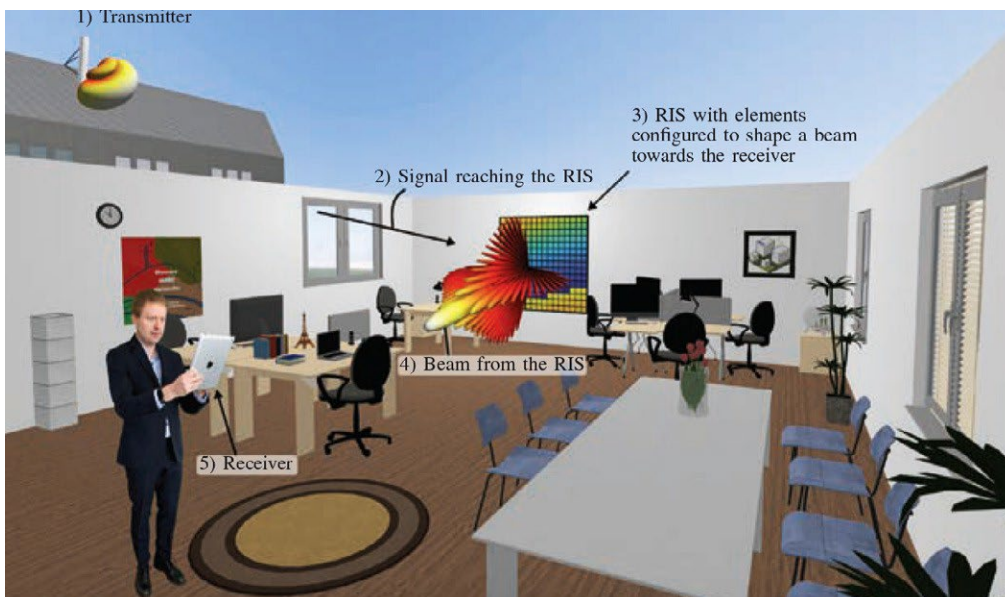
Les matériaux à indice de réfraction négatif (NRI) ont été prédits théoriquement pour la première fois en 1968 par Victor Veselago [3]. Une façon possible de créer un métamatériau NRI consiste à créer des couches alternées de fil métallique fin composé de nanorods métalliques ( $\epsilon$  négatif) et des couches de résonateurs circulaires à anneau fendu ( $\mu$  négatif), et de les empiler les unes sur les autres :



**Figure 2 :** Métamatériau à indice de réfraction négatif (NRI) pour les hyperfréquences, constitué de couches alternées de fil métallique fin et de résonateurs circulaires à anneau fendu (SRR) [1].

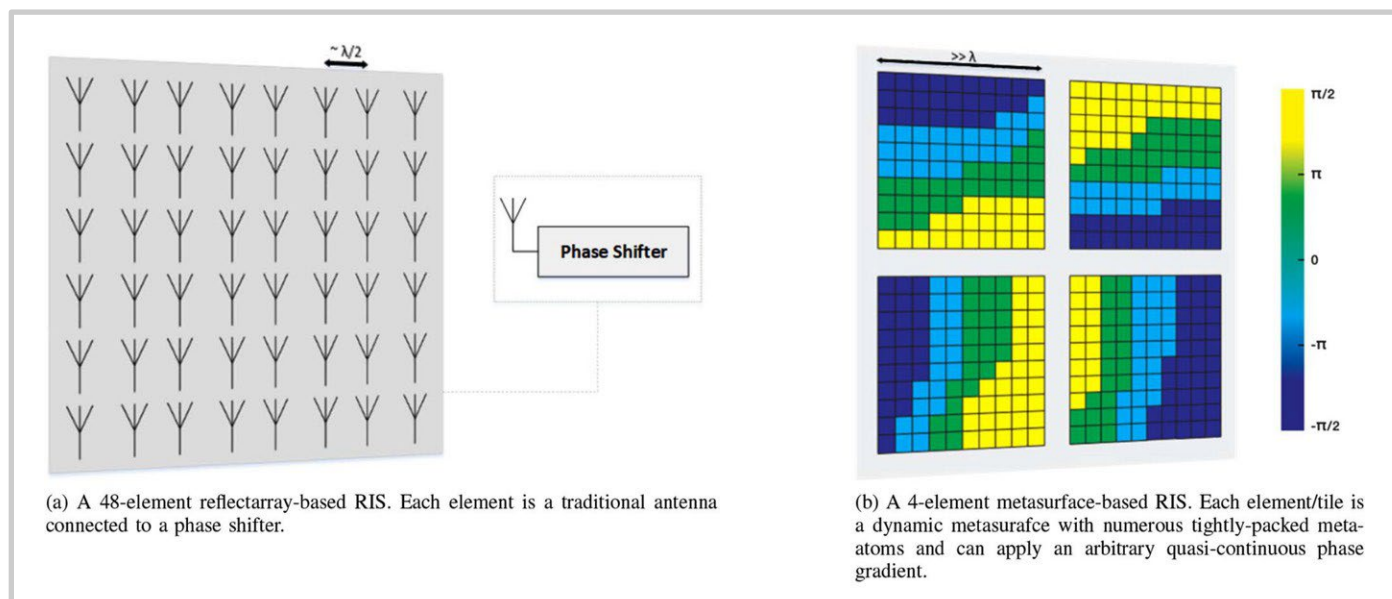
## Surfaces intelligentes reconfigurables (RIS)

Un RIS est une surface mince composée de  $N$  éléments, chacun étant une petite antenne qui reçoit et réémet passivement avec un délai configurable. Pour les signaux à bande étroite, ce retard correspond à un déphasage. Si les déphasages sont correctement ajustés, les ondes diffusées s'additionnent de manière constructive au niveau du récepteur. Ce principe ressemble à la formation de faisceaux traditionnelle ; chaque élément a un schéma de rayonnement fixe, mais l'ensemble des déphasages détermine l'endroit où se produit l'interférence constructive entre les ondes diffusées.



**Figure 3 :** Cas d'utilisation typique d'un SIF, qui reçoit un signal de l'émetteur et le réémet vers le récepteur [4].

Dans sa forme la plus simple, un SRI peut être mis en œuvre sous la forme d'un réseau de réflexion dynamique, dont les éléments sont des antennes omnidirectionnelles à terminaison contrôlable qui peuvent être modifiées dynamiquement pour rétrodiffuser et déphaser la forme d'onde incidente. Une mise en œuvre plus élaborée consisterait à utiliser une métasurface accordable dynamiquement, une forme planaire 2D de métamatériaux dont il a été démontré qu'elle possédait de grandes capacités de manipulation des ondes électromagnétiques. En s'appuyant sur la mise en œuvre de la métasurface, un élément RIS peut non seulement diffuser et déphaser le signal, mais aussi agir comme un miroir anormal avec un angle de réflexion contrôlable et même des capacités de manipulation de la polarisation.



**Figure 4 :** Différentes mises en œuvre d'un SIF [5]

En fait, toute surface passive qui peut être reconfigurée dynamiquement pour manipuler les ondes électromagnétiques incidentes et modifier les conditions du canal peut être appelée un SIF. Le SIF à base de réseaux de réflecteurs illustré à la figure 4(a) peut être considéré comme offrant de puissantes capacités de formation de faisceaux analogiques centralisés dans des endroits avantageux qui peuvent être utilisés par les points d'extrémité de la communication. La dimension de chaque élément des SIF basés sur des réseaux de réflexion agit individuellement comme un diffuseur.

Les conceptions antérieures de métasurfaces étaient basées sur des conceptions statiques de méta-atomes prédéfinis qui ne pouvaient pas être modifiés après la fabrication. Cependant, les conceptions ultérieures reposent sur des composants semi-conducteurs qui peuvent être reconfigurés en temps réel pour modifier la structure sous-jacente des méta-atomes et donc le comportement électromagnétique de la métasurface. Cette reconfigurabilité est obtenue en intégrant des composants qui peuvent être accordés soit électriquement, soit mécaniquement, soit thermiquement. Les métasurfaces accordables électriquement sont particulièrement intéressantes car elles peuvent être fabriquées à peu de frais en utilisant des technologies de semi-conducteurs bien connues et peuvent être accordées assez rapidement pour s'adapter au canal de communication sans fil variable dans le temps en incorporant des diodes varactors ou des cristaux liquides dans les méta-atomes. Un SRI basé sur une métasurface, illustré à la figure 4b, est composé de plusieurs tuiles et chaque tuile est une métasurface reconfigurable individuellement dont les dimensions sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde. Cela permet une grande flexibilité dans la manipulation du front d'onde incident. Par exemple, chaque tuile peut réfléchir le front d'onde incident dans une direction différente.

En général, la capacité d'optimiser la configuration des SIF est limitée par les informations disponibles sur les canaux concernés. Sans une connaissance au moins partielle de l'environnement de propagation sous-jacent, les SIF ne peuvent pas être utilisés efficacement pour améliorer les performances du système. Contrairement aux systèmes sans fil traditionnels dans lesquels l'acquisition des canaux est une question simple en utilisant des signaux pilotes, les systèmes sans fil RIS sont plus difficiles étant donné la nature passive du RIS et le nombre massif de paramètres de canal à estimer.

La littérature propose deux approches pour résoudre le problème de l'optimisation de la configuration RIS avec des informations limitées sur le canal. La première approche consiste à renoncer complètement à l'estimation du canal ; à la place, l'optimisation de la SRI peut être basée sur le retour d'information du récepteur. Cela peut se faire à l'aide d'un livre de codes prédéfini de directions de faisceaux ; toutefois, la taille du livre de codes sera proportionnelle au nombre d'antennes de réception.

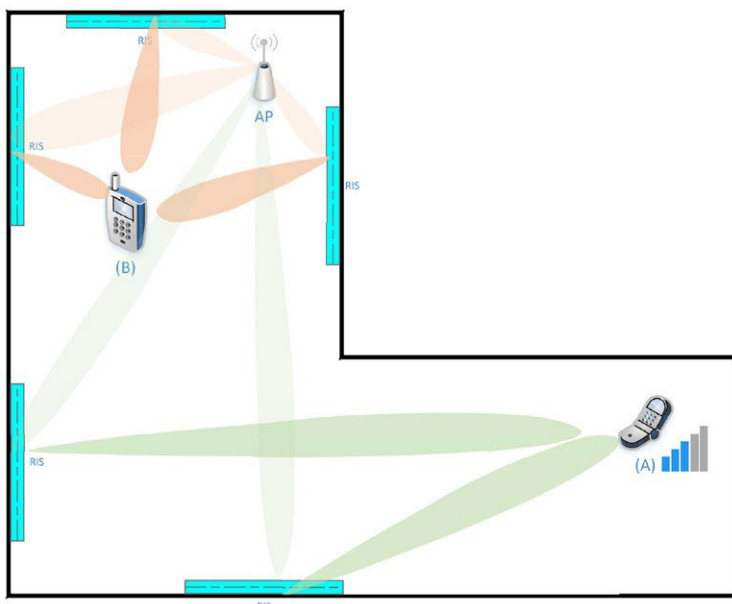
éléments. S'il y a beaucoup d'éléments RIS, la formation peut prendre beaucoup de temps. Cela peut poser un problème dans un environnement dynamique où le temps de cohérence du canal est limité. Néanmoins, s'appuyer sur le retour d'information du récepteur est une solution prometteuse, et la plupart des études empiriques ont construit des systèmes prototypes qui s'appuient sur le retour d'information du récepteur pour guider l'optimisation de la configuration des SIF sans connaissance explicite des canaux concernés.

L'autre approche consiste à équiper un petit sous-ensemble d'éléments RIS de récepteurs actifs de faible puissance capables de traiter les pilotes et d'estimer les canaux pertinents. Cette approche ne permet pas à elle seule de fournir suffisamment d'informations aux utilisateurs.

Toutefois, en tirant parti des outils de la détection comprimée et de l'apprentissage automatique, les informations limitées disponibles peuvent être utilisées pour calculer des estimations suffisamment précises pour tous les éléments du canal. Il a été démontré que seulement 1 % des éléments RIS doivent être actifs dans des scénarios de propagation pratiques pour permettre une prédiction suffisamment précise des canaux [5].

## Caractéristiques de base du SIF

Le débit de données réalisable sur un canal de communication sans fil est limité par l'ordre de modulation, le nombre de flux spatiaux et les interférences dans le canal. Un utilisateur éloigné de l'émetteur sera contraint d'utiliser une modulation à faible débit et aura donc un débit de données plus faible. Une liaison en visibilité directe (LOS) peut bénéficier d'un gain de canal de communication élevé mais souffrira probablement d'un manque de trajets multiples, ce qui limitera le nombre de flux spatiaux et, par conséquent, le débit de données réalisable. Les caractéristiques de propagation dans les bandes de fréquences supérieures (30-100 GHz) donneront plus souvent lieu à ces scénarios. Les SIF peuvent être utilisés pour modifier le canal sans fil dans ces scénarios et améliorer considérablement les performances globales du système.



**Figure 5 :** L'utilisateur A est loin de l'AP et a une faible puissance de signal reçue. L'utilisateur B a une puissance de réception élevée mais un canal de faible rang. Les RIS peuvent être optimisés pour aider dans les deux scénarios [5]◆

La présence du SIF au milieu de l'environnement de propagation offre une occasion unique de modifier le canal sans fil d'une manière qui n'est pas possible avec les réseaux MIMO traditionnels. Le SIF peut être utilisé pour maintenir le canal sans fil dans de bonnes conditions, ce qui augmente le débit de données réalisable. Les SIF peuvent également être utilisés pour atténuer les effets de l'étalement Doppler et de l'évanouissement par trajets multiples. Les SIF peuvent fonctionner dans plusieurs modes pour répondre à divers objectifs [4], [5] :

- En tant que grand formateur de faisceau analogique pour concentrer la puissance sur un récepteur à antenne unique
- Améliorer le rang des canaux et le nombre de conditions pour faciliter le multiplexage spatial
- Pour réduire les interférences et permettre le partage du spectre
- Pour atténuer l'étalement Doppler
- Réduire les écoutes clandestines en limitant les fuites de signaux en dehors de la zone prévue.

Des capteurs d'environnement épars peuvent être déployés pour surveiller l'environnement de propagation et fournir des informations à un contrôleur centralisé. Ces informations peuvent prendre la forme de coefficients de canaux partiels ou de positions d'utilisateurs. Le vaste potentiel des SIF pour façonner l'environnement radio ne sera limité que par la capacité à trouver efficacement de bonnes configurations dans l'intervalle de cohérence du canal.

Il ne fait aucun doute que les SIF peuvent être utilisés pour les liaisons de communication fixes, mais les opérations mobiles nécessitent une estimation et une reconfiguration des canaux en temps réel, même dans les cas d'utilisation à l'intérieur des bâtiments. Un mouvement de quelques millimètres modifie les canaux dans les fréquences de 28 GHz et plus. Il reste à démontrer si un protocole d'estimation peut permettre une reconfiguration en temps réel et dans quelles conditions de mobilité. Le SRI aura besoin d'une source d'énergie pour la reconfigurabilité et de canaux de contrôle sans fil. Il est probable que l'interface de commande consommera la majeure partie de l'énergie au niveau du SRI, de sorte qu'il est impossible de prédire la consommation totale d'énergie tant que l'estimation des canaux et la reconfigurabilité n'auront pas été résolues et validées.

## Cas d'utilisation des SIF

Il faut énormément de temps et de ressources pour faire passer un nouveau concept technologique, tel que les SIF, de la théorie à la pratique. Des avantages très convaincants par rapport aux technologies existantes doivent être établis pour motiver un tel investissement ; nous devons essentiellement démontrer des améliorations décuplées par rapport à une mesure de performance pratiquement importante, et pas seulement des gains de 20 % qui pourraient disparaître dans une mise en œuvre imparfaite [4]. Les communications MIMO et à ondes millimétriques ont passé ce test dans le développement de la 5G depuis le début de l'année.

Le premier permet de multiplier par 10 le nombre d'utilisateurs desservis, tandis que le second permet de multiplier par 10 le débit de données par utilisateur en utilisant une bande passante beaucoup plus large.

Pour motiver le développement pratique de la technologie SIF, la question cruciale est la suivante : quel est le cas d'utilisation convaincant ? La réponse n'est pas claire. L'extension de la couverture est une option, mais comme chaque élément RIS doit être configuré de manière identique sur l'ensemble de la bande de fréquences, la technologie RIS n'est pas adaptée aux canaux à large bande. L'amélioration du multiplexage spatial et de l'atténuation des interférences représente un autre cas d'utilisation, mais il est en concurrence avec le MIMO massif. Un autre cas d'utilisation potentiel est le TeraHertz, où la mise en œuvre d'émetteurs-récepteurs cohérents est un véritable défi, et où les canaux épars rendent utiles des chemins de propagation supplémentaires, même s'ils sont faibles. Le dernier cas d'utilisation est peut-être le plus prometteur, mais il n'existe pas encore de preuves tangibles.



# Modélisation de la propagation des SIF

L'analyse de propagation d'une SIF comporte les étapes suivantes [4] :

- Trouver la fonction de Green de la source du signal, qui est une somme d'ondes sphériques si la source du signal est proche ou une onde plane si elle est éloignée.
- Calcul du champ d'impact à chaque élément RIS
- En intégrant ce champ sur la surface de chaque élément, on obtient la densité de courant
- Calcul du champ rayonné par chaque élément
- En appliquant le principe de superposition pour trouver le champ au niveau du récepteur

La simulation EM à ondes complètes permet de saisir pleinement l'interaction d'une onde entrante avec les RIS et de calculer les champs réfléchis à la fois dans le champ proche et le champ lointain des surfaces. Cependant, l'application de l'analyse d'ondes complètes

à un canal de communication réaliste, tel qu'un immeuble de bureaux, nécessite une mémoire et un temps de calcul extrêmement importants. Le traçage de rayons, une méthode asymptotique largement utilisée pour la modélisation de la propagation, est une alternative efficace. Dans [6], les auteurs proposent une méthode de modélisation hybride efficace. La méthode nécessite une simulation d'ondes complètes pour obtenir le diagramme de rayonnement de l'émetteur et la section transversale radar complexe (RCS) du SIF. La SER complexe est utilisée pour mettre en œuvre la SRI en tant que source de rayonnement secondaire dans le modèle de rayonnement. traces. Cette méthode permet d'intégrer directement les SIF dans le traçage des rayons. La procédure de modélisation peut donc être résumée comme suit :

- Tracer l'antenne émettrice en excluant le RIS pour obtenir le champ électrique  $\vec{E}_1$  partout.
- En utilisant le traçage de rayons, calculer la puissance totale reçue au SIF,  $P_{RIS\text{Tot}}$
- Calculer la RCS complexe de la RIS à l'aide de l'analyse d'ondes complètes
- Tracer les rayons diffusés à l'exclusion de l'émetteur pour obtenir le champ électrique  $\vec{E}_2$  partout dû au RIS
- Le champ électrique total est :  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$

Dans le même article, les auteurs comparent l'ampleur du champ électrique de la méthode hybride avec l'analyse des ondes complètes à l'aide de HFSS :

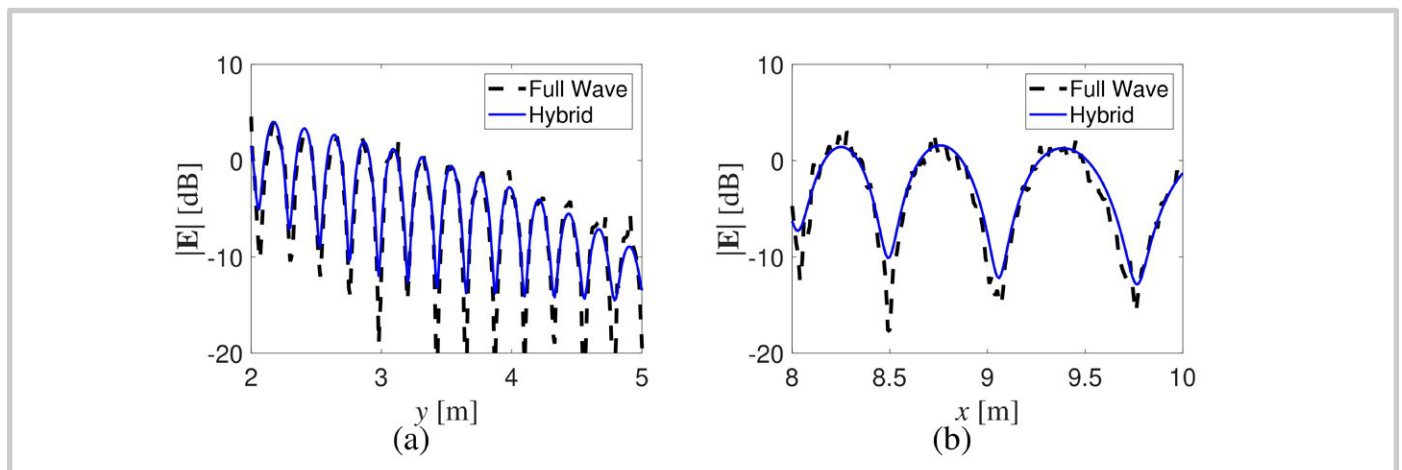


Figure 6 : Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes (a)  $x=9\text{m}, z=1\text{m}$ , et (b)  $y=3\text{m}, z=1\text{m}$  [6].

Il est clair que la méthode hybride proposée a une très bonne précision par rapport à l'analyse traditionnelle de la propagation des ondes totales.

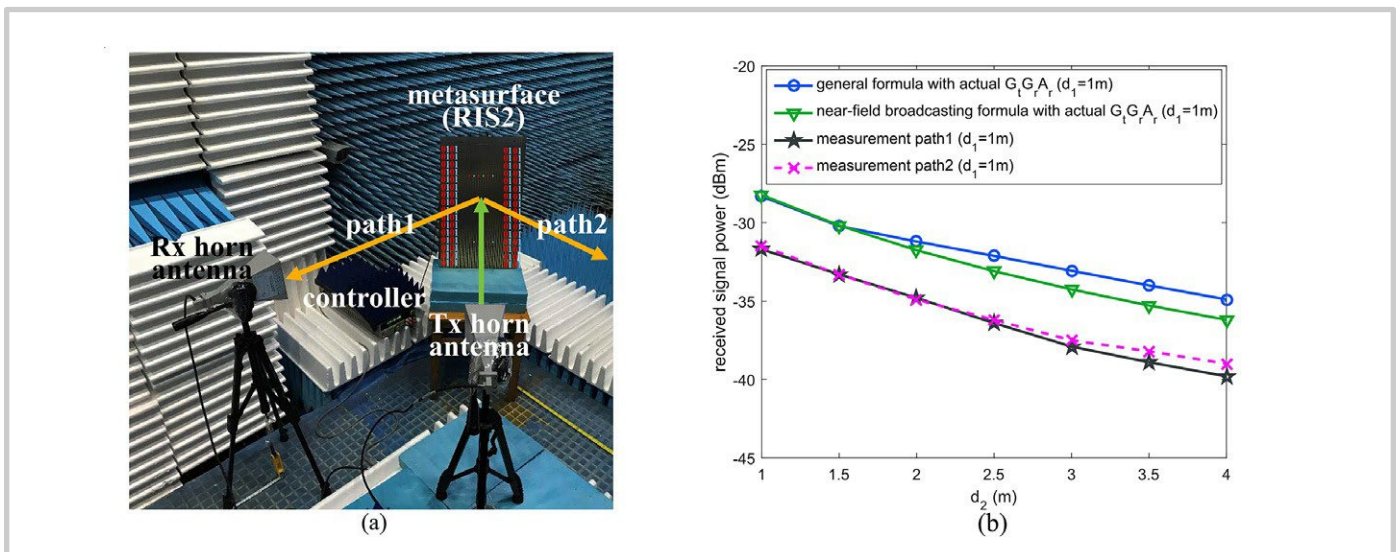
Une autre méthode, proposée dans [7], développe une équation de perte de chemin à grande échelle sous forme fermée et donne une approximation de la perte de chemin dans le champ proche et le champ lointain du SIF :

$$\text{CHAMP}_{\text{PLNEAR}} \sim \frac{(d_1+d_2)^2}{\text{CHAMP}_{\text{PLFAR}} \sim (d_1 d_2)^2}$$

Où  $d_1$  est la distance entre l'émetteur et le SIF et  $d_2$  est la distance entre le récepteur et le SIF.

Si les distances sont égales ( $d_1 = d_2 = d$ ), l'affaiblissement sur le trajet en champ proche est proportionnel à  $4d^2$ , et l'affaiblissement sur le trajet en champ lointain est proportionnel à  $d^4$ . Cela signifie que l'affaiblissement sur le trajet augmente beaucoup plus rapidement une fois que le récepteur/émetteur se trouve dans le champ lointain du SIF. La limite entre le champ proche et le champ lointain est donnée par  $L = 2D^2 / \lambda$ , où  $D$  est la plus grande dimension de la SIF. Si la SIF est un carré de 1,5 mètre de côté et si la fréquence d'émission est de 30 GHz, la limite se situe à  $L = 900$  mètres. Pour la plupart des applications intérieures pratiques, l'émetteur et le récepteur se trouvent dans le champ proche de la SIF.

À des fins de vérification, le banc d'essai a été installé dans une chambre anéchoïque à micro-ondes. Trois métasurfaces différentes ont été utilisées pour jouer le rôle de RIS dans trois scénarios différents. La configuration et les mesures de la réflexion intelligente à travers le grand RIS (scénario 2) sont illustrées ci-dessous :



**Figure 7 :** Photographie de mesure et résultats de la réflexion intelligente à travers le grand RIS dans le cas de la radiodiffusion en champ proche. (a) Photographie. (b) Puissance du signal reçu le long des deux trajets en fonction de  $d_2$  lorsque  $d_1=1m$  [7].

Dans cette configuration, le RIS réfléchit le signal entrant, qui se trouve à la distance  $d_1$ , le long de deux chemins distincts, le chemin 1 et le chemin 2. La distance  $d_1$  est fixée à 1 mètre, tandis que le signal a été mesuré le long du chemin 1 et du chemin 2 à des distances  $d_2 = 1$  à 4 mètres.

La figure 4b montre que la différence entre la puissance calculée et la puissance mesurée au niveau du récepteur est de l'ordre de 3 à 4 dB. Cette erreur est assez importante, étant donné que cette configuration a été mesurée dans un environnement contrôlé (chambre anéchoïque). Par conséquent, l'utilité de cette formule d'approximation de l'affaiblissement sur le trajet est limitée.

# Résumé

Dans cet article, nous avons donné un aperçu des métamatériaux et des surfaces intelligentes reconfigurables (RIS). Les principales caractéristiques des SIF sont l'amélioration de la couverture, l'amélioration du rang des canaux, la suppression des interférences et l'amélioration de la qualité de l'air.

Atténuation de l'effet

Plusieurs cas d'utilisation potentiels ont été identifiés, l'amélioration du signal TeraHertz pouvant être envisagée comme suit comme la plus prometteuse.

Nous avons présenté les défis de la mise en œuvre et identifié la conception de protocoles pratiques pour la reconfigurabilité en temps réel étant la plus importante.

Enfin, nous avons présenté deux approches de la modélisation de la propagation des signaux électromagnétiques en présence de RIS : une approche hybride de traçage de rayons et une approche de modélisation de la propagation des signaux électromagnétiques en présence de RIS.

l'approximation de l'affaiblissement du chemin à grande échelle en champ proche et en champ lointain.

## Références

- [1] Ung, Bora. (2008). Métamatériaux : une méta-vue. Optics Photonics News Phys. Rev. Lett. Phys.
- [2] J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", Phys. Rev. Lett. 85, 3966-3969 (2000).
- [3] V. G. Veselago, Sov. Phys. USPEKHI 10, 509-514 (1968)
- [4] E. Bjornson, O. Ozdogan, E.G. Larsson : "Reconfigurable Intelligent Surfaces : Three Myths and Two Critical Questions", IEEE Communications Magazine, Décembre 2020
- [5] M.A. ElMosallamy, H. Zhang, L. Song, K.G. Seddik, Z. Han, G.Y. Li : "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications : Principles, Challenges, and Opportunities" , IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, Vol6, No3, September 2020
- [6] Y. Liu, C.D. Saris : "Hybrid Full-Wave/Ray Tracing Propagation Modelling of Reconfigurable Intelligent Surface Enabled Communication Channels", à paraître dans IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022.
- [7] W. Tang, M.Z. Chen, X. Chen, J.Y. Dai, Y. Han, M. Di Renzo, Y. Zeng, S. Jin, Q. Cheng, T. J. Ciu : "Wireless Communications with Reconfigurable Intelligent Surface : Path Loss Modeling and Experimental Measurement", IEEE Transactions on Wireless Communications Vol20, No1, janvier 2021.

## À propos d'iBwave

Les solutions iBwave, la norme en matière de planification de réseaux intérieurs convergents, sont à l'origine d'une expérience sans fil exceptionnelle dans les bâtiments, permettant à des milliards d'utilisateurs finaux et d'appareils de se connecter à l'intérieur d'un large éventail de lieux. En tant que référence mondiale de l'industrie, nos solutions logicielles permettent une planification, une conception et un déploiement plus intelligents de tout projet, quelle que soit sa taille, sa complexité ou sa technologie. En plus de nos logiciels innovants, nous sommes reconnus pour notre assistance de classe mondiale dans 100 pays, pour notre base de données de composants la plus complète de l'industrie et pour notre programme de certification bien établi. Pour plus d'informations, visitez : [www.ibwave.com](http://www.ibwave.com)



[www. ibwave. com](http://www.ibwave.com)