



**HAL**  
open science

# Impact de la topologie du réseau d'antennes dans la combinaison de la modulation spatiale full-duplex et de la récupération d'énergie RF

Hery Zo Jean Baptiste Andriamanohisoa, Florin Hutu, Guillaume Villemaud

► **To cite this version:**

Hery Zo Jean Baptiste Andriamanohisoa, Florin Hutu, Guillaume Villemaud. Impact de la topologie du réseau d'antennes dans la combinaison de la modulation spatiale full-duplex et de la récupération d'énergie RF. XXIII-èmes Journées Nationales Microondes 2024, Jun 2024, Antibes (France), France. hal-04570577

**HAL Id: hal-04570577**

**<https://hal.science/hal-04570577>**

Submitted on 7 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

# Impact de la topologie du réseau d'antennes dans la combinaison de la modulation spatiale full-duplex et de la récupération d'énergie RF

Hery Zo Andriamanohisoa, Florin-Doru Hutu, Guillaume Villemaud

Univ Lyon, INSA Lyon, INRIA, CITI Laboratory, EA3720, 69621 Villeurbanne, France  
hery-zo.andriamanohisoa@insa-lyon.fr

**Résumé** — Dans cet article, on étudie l'impact de la topologie du réseau d'antennes sur la capacité de récupération d'énergie dans un système qui combine la modulation spatiale full-duplex et la récupération d'énergie par ondes radio. L'idée consiste à recycler l'énergie transmise par l'antenne émettrice, par effet de couplage, aux autres antennes du réseau. Deux topologies d'antennes ont été étudiées : linéaire et circulaire. Des simulations montrent les variations des coefficients de transmission en fonction de l'espacement entre les antennes. Dès lors, les niveaux de puissance qui peuvent être recyclés aux ports de chaque antenne ont été calculés. On constate alors que quand l'espacement est plus grand que la demie longueur d'onde, on récupère plus d'énergie avec la topologie circulaire qu'avec la topologie linéaire.

## 1. Introduction

Pour alimenter un objet communicant à faible consommation d'énergie, il existe des techniques de récupération d'énergie par ondes radio (RFEH : RF Energy Harvesting). Dans certains scénarios d'application, cette approche peut se substituer (totalement ou en partie) à la technique classique d'alimentation à travers des batteries. L'idée consiste à convertir un signal radioélectrique en une tension continue fournissant une énergie qui peut être stockée et réutilisée. Dans [1], le principe de base de la technique RFEH est exposé. Dans [2], les auteurs dressent un état de l'art des topologies de circuits de redressement des signaux RF et montrent leurs performances respectives.

D'autre part, dans le cadre des systèmes MIMO (Multiple Input Multiple Output), la modulation spatiale combinée au full-duplex (FDSM : full-duplex spatial modulation) est une technique qui permet de réduire la consommation d'énergie et de réutiliser la même bande passante pour supporter la communication bidirectionnelle simultanément [3]. Contrairement aux autres systèmes MIMO, à un instant donné, le système FDSM utilise une seule (ou un sous-ensemble) de ses antennes pour émettre et une (voire plusieurs) autre antenne pour la réception.

L'idée de la combinaison de la modulation spatiale et de la récupération d'énergie a été proposée récemment dans la littérature. Dans [4][5], les auteurs proposent un système de relais qui utilise la modulation spatiale full-duplex et qui est alimenté par le transfert de puissance sans

fil. La communication et la récupération d'énergie ne sont cependant pas effectuées simultanément. Dans un premier temps, l'émetteur transmet l'énergie nécessaire pour que le relais puisse effectuer la communication. Dans un second temps, le relais reçoit l'information venant de l'émetteur et simultanément la retransmet vers le récepteur final.

Dans ce papier, un système FDSM qui opère la RFEH en même temps que la communication est considéré. L'idée consiste à se servir d'un sous-ensemble d'antennes qui ne sont pas utilisées ni par l'émetteur ni par le récepteur pour opérer le RFEH. La différence avec les autres systèmes RFEH qui récupèrent de l'énergie venant d'un émetteur distant est que dans le cas présent on va recycler la puissance rayonnée par l'antenne émettrice. Cette énergie est transmise aux autres antennes par effet de couplage. Pour avoir une information sur le niveau de puissance qui peut être récupéré, deux topologies de réseau d'antennes "patch" seront étudiées : topologie linéaire et topologie circulaire. Au travers de simulations électromagnétiques, on va calculer les coefficients de transmission. Les coefficients de transmission nous permettent alors d'estimer le niveau de puissance disponible. Nous avons considéré le rendement d'un redresseur à gamme dynamique large connecté aux antennes. Ce rendement nous a permis de calculer la puissance DC espérée en sortie du redresseur.

## 2. Le système FDSM et RFEH

On considère le système FDSM avec RFEH résumé par la Figure 1. Chaque nœud est équipé de  $Nt$  antennes. Au nœud A, selon le principe de la modulation spatiale, les bits à envoyer sont groupés en trames de longueur  $N = \log_2(Nt) + \log_2(M)$ , où  $M$  est l'ordre de la modulation classique utilisée. Les premiers  $\log_2(Nt)$  bits sont utilisés pour choisir le sous-ensemble d'antennes qui va émettre. Les  $\log_2(M)$  forment le symbole de la modulation classique utilisée. A la réception au nœud B, on détecte à la fois le signal envoyé et l'indice de l'antenne qui a été utilisé.

En même temps, à travers la technique full-duplex, sur le nœud A, un autre sous-ensemble d'antennes est utilisé pour la réception du signal envoyé par le nœud B. En plus du signal utile venant du nœud B, on reçoit aussi le signal envoyé par les antennes d'émission du même nœud A. Ce signal est beaucoup plus puissant que le signal utile et est

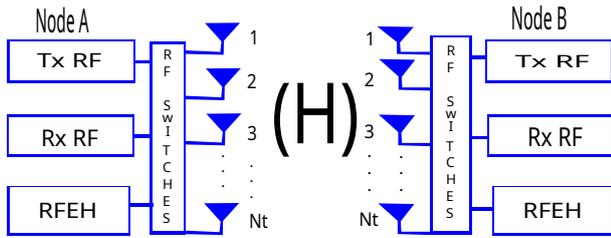


FIGURE 1. Système FDSM combiné avec la RFEH

appelé signal d'auto-interférence. Sa présence perturbe la réception du signal distant et par conséquent, au niveau de l'antenne de réception du nœud A, il doit être réduit idéalement à un niveau inférieur à celui du bruit. Il existe des techniques de suppression du signal d'auto-interférence aux différents niveaux de la chaîne : séparation entre les antennes, techniques d'isolation, suppression dans le domaine analogique et dans le domaine numérique.

D'autre part, l'idée derrière la récupération d'énergie à partir des ondes radios est de convertir le signal radio en une puissance continue qui peut être stockée et réutilisée. Le signal RF est capté par l'antenne, ensuite, à travers un circuit d'adaptation d'impédance, il est placé à l'entrée d'un circuit redresseur à base de diodes Schottky. Le circuit d'adaptation d'impédance a le rôle de permettre un transfert d'énergie maximal entre la source et le circuit redresseur. Un circuit redresseur est caractérisé par sa puissance de fonctionnement, sa fréquence et son rendement de conversion  $\eta$ . Le rendement de conversion est calculé par :

$$\eta = 100 \cdot 10^{(P_{DC} - P_{RF})/10} \quad (1)$$

où  $\eta$  est le rendement de conversion en [%],  $P_{DC}$  est la puissance continue à la sortie du circuit redresseur en  $dBm$  et  $P_{RF}$  est la puissance du signal radio à l'entrée de ce circuit en  $dBm$ . Ce rendement de conversion varie en fonction de la puissance d'entrée, de la fréquence et de l'impédance de la charge.

Dans le système étudié, les antennes qui ne sont pas utilisées à l'émission ou à la réception (partie FDSM) seront utilisées pour la récolte d'énergie RF.

### 3. Etudes des réseaux d'antennes : topologie linéaire et topologie circulaire

Les réseaux d'antennes étudiés sont illustrés par la Figure 2. Afin de pouvoir calculer la quantité d'énergie qu'on espère récupérer, on va étudier le couplage mutuel entre les antennes. La distance  $d$  est l'espacement entre les centres des deux paires de patches voisins ; et est normalisé par la longueur d'onde  $\lambda$ . Chaque patch est adapté à la fréquence de 868 MHz. Avec la simulation sur le logiciel ADS-Momentum, on obtient les résultats présentés par la suite.

#### 3.a. Variation des coefficients de réflexion pour les deux topologies d'antennes

Vu que les antennes seront proches les unes par rapport aux autres (distances inférieures à la longueur d'onde), le

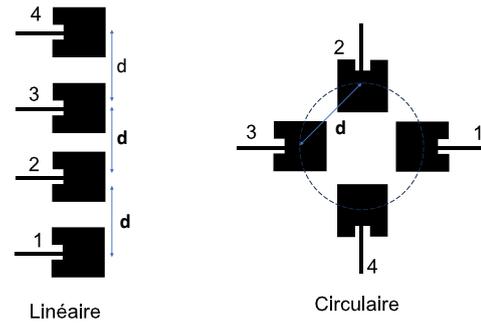


FIGURE 2. Réseaux étudiés : topologie linéaire à gauche, topologie circulaire à droite

couplage entre elles est fort, ce qui agit sur la valeur du coefficient de réflexion de chaque antenne. Cet aspect est étudié par la suite.

Comme le montre la Figure 3, on peut constater que les coefficients de réflexion sont toujours en dessous de  $-15$  dB. Les antennes sont donc toujours adaptées même en présence proche des autres antennes. Pour la disposition linéaire, quand l'espacement entre les antennes est inférieur à  $0.5\lambda$ , les coefficients de réflexion sont influencés par la présence des antennes voisines.

#### 3.b. Variation des coefficients de transmission pour la topologie linéaire

Pour la topologie linéaire, le résultat est illustré par la Figure 4. On constate que les coefficients de transmission décroissent quand la distance augmente. Les coefficients de transmission sont compris entre  $-50$  dB et  $-10$  dB. Plus les antennes sont éloignées l'une de l'autre, plus la puissance transmise par effet de couplage diminue. Les coefficients de transmission ne sont pas les mêmes pour chaque paire d'antennes. Quand les antennes sont plus éloignées l'une par rapport à l'autre, le coefficient est plus

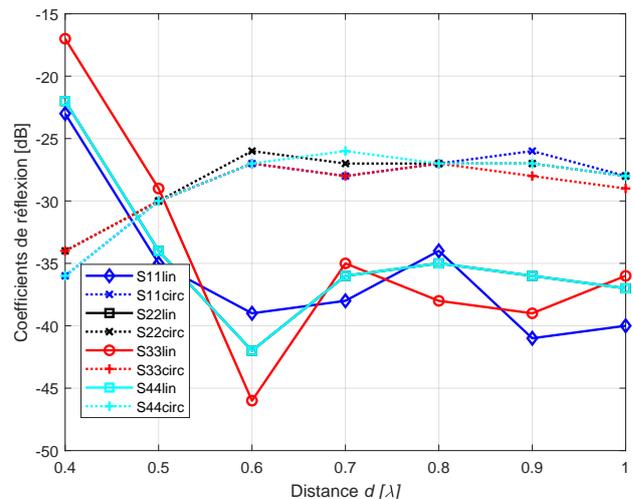


FIGURE 3. Variations des coefficients de réflexion à la fréquence 868 MHz en fonction de l'espacement  $d$  entre les centres des antennes

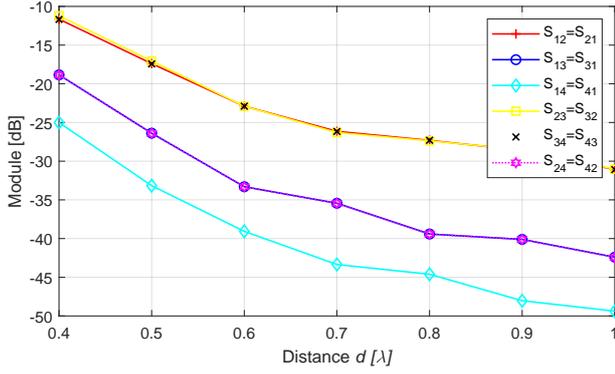


FIGURE 4. Coefficients de transmission : topologie linéaire

petit, par exemple  $S_{12} > S_{13}$ . Cela veut dire que quand l'antenne 1 émet un signal avec une puissance donnée, elle transmet évidemment plus de puissance à l'antenne 2 qu'à l'antenne 3.

### 3.c. Variation des coefficients de transmission pour la topologie circulaire

De la même façon, on va faire la même analyse pour une topologie circulaire. Les variations des coefficients de transmission sont illustrées par la Figure 5. Les coefficients des transmissions ne sont pas les mêmes que pour la topologie linéaire. Les quatre antennes n'ont pas le même axe de polarisation par conséquent, les coefficients de transmission pour les antennes qui ont la même polarisation sont supérieurs par rapport aux coefficients de transmissions entre deux antennes de polarisations différentes. Quand l'espacement entre les antennes augmente, les coefficients de transmission diminuent, comme dans le cas de la configuration linéaire. Pour résumer, les coefficients de transmission ne dépendent pas seulement de la distance entre les antennes mais aussi de la polarisation.

## 4. Etudes des deux configurations en termes de récupération d'énergie RF

L'idée derrière le self-recycling (auto-recyclage) est de récupérer l'énergie transmise par l'antenne d'émission du même nœud A, par effet de couplage mutuel entre les an-

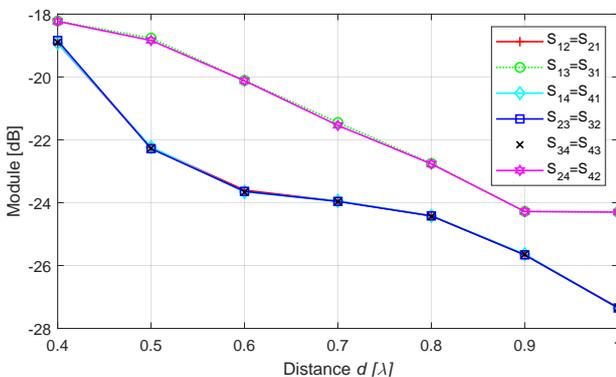


FIGURE 5. Coefficients de transmission : topologie circulaire

tennes, au lieu (ou en plus) de récupérer de l'énergie à partir des sources ambiantes. A partir des informations sur les coefficients de transmission présentés précédemment, on peut calculer le niveau de puissance qu'on pourra espérer récupérer.

### 4.a. Puissance disponible en self-recycling

On suppose une puissance d'émission  $PTx = 20$  dBm. L'indice Tx désigne l'antenne utilisée pour l'émission et l'indice Ex, qui sera utilisé plus loin, désigne l'antenne utilisée pour effectuer la récolte d'énergie RF. Comme les antennes émettent de manière équiprobable, il y a quatre scénarios possibles. Dans cet article, nous allons nous restreindre au cas où l'antenne d'émission est  $Tx = 1$ . On peut appliquer la même procédure pour le cas où  $Tx = 2, Tx = 3$ , et  $Tx = 4$ .

On peut calculer la puissance du signal RF disponible aux autres antennes par

$$P_{RF} = PTx + S_{ij} \quad (2)$$

où  $P_{RF}$  la puissance du signal radio en dBm,  $PTx$  la puissance d'émission de l'antenne en dBm,  $S_{ij}$  le coefficient de transmission en dB. On a obtenu la variation de la puissance disponible de la Figure 6 pour le cas où  $Tx = 1$ .

$P_{RF}AntNlin$  et  $P_{RF}AntNcirc$  désignent la puissance du signal RF disponible au port de l'antenne  $N$  dans la topologie linéaire et circulaire respectivement. Comme on peut le constater, le niveau de puissance disponible pour la topologie circulaire est supérieur par rapport à la topologie linéaire quand  $d > 0.5\lambda$ . Pour la topologie circulaire, on a  $P_{RF}Ant3circ > P_{RF}Ant2circ$  et  $P_{RF}Ant3circ > P_{RF}Ant4circ$ . Cela est dû au fait que l'antenne  $Ant3$  a la même polarisation que l'antenne  $Ant1$  et que l'antenne  $Ant2$  et  $Ant4$  ont différentes polarisations que l'antenne  $Ant1$ . Il est donc plus avantageux d'utiliser  $Ex = 3$ . On

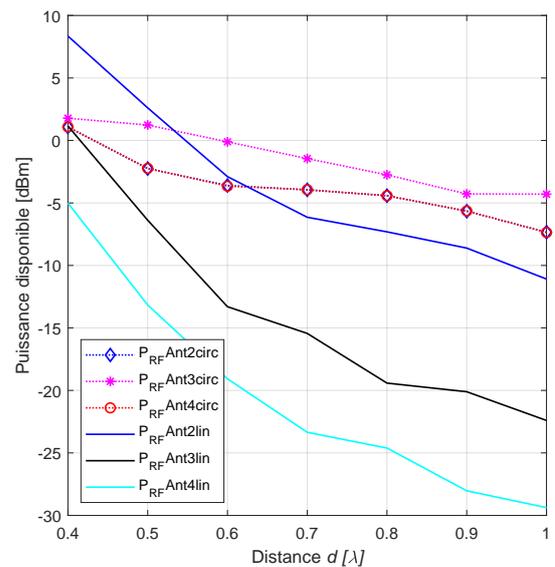


FIGURE 6. Puissance disponible sur les autres antennes quand  $Tx=1$

remarque aussi que  $P_{RF}Ant2circ = P_{RF}Ant4circ$  pour toutes les valeurs de  $d$ . Pour la topologie linéaire, plus l'antenne est loin de l'antenne émettrice, plus le niveau de puissance est faible, c'est à dire que  $P_{RF}Ant2lin > P_{RF}Ant3lin$  et  $P_{RF}Ant3lin > P_{RF}Ant4lin$ . Il est donc préférable d'utiliser l'antenne  $Ex = 2$  pour opérer la récupération d'énergie.

#### 4.b. Puissance de sortie du redresseur

On va ici aussi considérer le scenario où  $T_x = 1$  pour calculer le niveau de puissance continue qu'on espère récupérer à la sortie d'un redresseur RF placé en sortie de l'antenne. Le redresseur est adapté en impédance avec l'antenne. On suppose qu'on utilise le redresseur proposé par les auteurs de [6] parce qu'il est le plus approprié pour cette application. En effet, il peut fonctionner efficacement sur une large gamme de puissances d'entrée. Par conséquent, il pourra récupérer efficacement l'énergie RF à partir des signaux ambiants mais aussi par "self recycling". Le rendement de conversion est toujours supérieur à 35% dans la plage de puissance de  $-20 dBm$  à  $5 dBm$ . On peut calculer la puissance de sortie du redresseur par l'équation 3 :

$$P_{DC} = 10 \cdot \log_{10}(\eta/100) + P_{RF} \quad (3)$$

où  $P_{DC}$  le niveau de puissance continue à la sortie du redresseur,  $\eta$  le rendement de conversion du redresseur et  $P_{RF}$  la puissance du signal radio à l'entrée du système RFEH.

Le niveau de puissance qu'on peut espérer récupérer à la sortie du redresseur est illustré par la Figure 7.  $P_{DC}AntNlin$  et  $P_{DC}AntNcirc$  désignent la puissance de sortie du redresseur connecté à l'antenne  $N$  dans la topologie linéaire et circulaire respectivement. On récupère globalement plus d'énergie avec la topologie circulaire

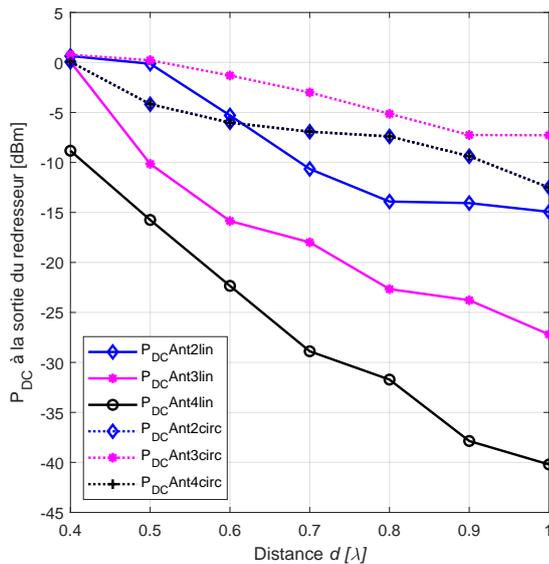


FIGURE 7. Puissance de sortie du redresseur quand  $T_x=1$

qu'avec la topologie linéaire. Pour la topologie circulaire, le niveau de puissance qu'on peut espérer récupérer est toujours supérieur à  $-15 dBm$ . Quand l'espacement entre les antennes est inférieur à  $0.5 \cdot \lambda$ , on peut récupérer plus avec l'antenne  $Ex = 2$  de la disposition linéaire qu'avec l'antenne  $Ex = 3$  de la topologie circulaire. Mais quand l'espacement augmente, on peut récupérer plus d'énergie en utilisant la topologie circulaire. Ces niveaux de puissance DC sont davantage exploitables par les circuits de conversions DC-DC qui sont placés en sortie du redresseur.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons fait la comparaison de la topologie linéaire et de la topologie circulaire d'un réseau de quatre antennes en termes de capacité de l'auto-recyclage d'énergie par onde radio dans le cadre des systèmes MIMO et plus particulièrement de la modulation spatiale full-duplex. Pour les deux topologies, quand l'espacement entre les antennes augmente, le niveau de puissance que l'on peut récupérer diminue. Quand l'espacement entre les antennes est inférieur ou égal à la moitié de la longueur d'onde, on peut récupérer plus d'énergie en utilisant une topologie linéaire d'antenne. Quand l'espacement est plus grand que  $\lambda/2$ , on peut récupérer plus d'énergie en utilisant la topologie circulaire. En complément de ces travaux, il faudra également étudier le choix du sous-ensemble d'antennes à utiliser pour un fonctionnement en modulation spatiale full-duplex optimisé.

## Références

- [1] S. Hemour and K. Wu, "Radio-frequency rectifier for electromagnetic energy harvesting : Development path and future outlook," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 11, 2014.
- [2] A. Fumtchum *et al.*, "A survey of RF energy harvesting circuits," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 10, 2021.
- [3] Y. Zhou *et al.*, "Full duplex spatial modulation system performance depending on self-interference cancellation accuracy," in *2020 14<sup>th</sup> European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2020.
- [4] A. Koc *et al.*, "Two-Way Full-Duplex Spatial Modulation Systems With Wireless Powered AF Relaying," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, 2018.
- [5] W. Qu *et al.*, "Spatial-modulation based wireless information and power transfer with full duplex relaying," in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018.
- [6] J. Argote-Aguilar *et al.*, "Efficient Association of Low and High RF Power Rectifiers for Powering Ultra-Low Power Devices," in *2022 29<sup>th</sup> IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, 2022.