

Efficacités Spectrale et Energétique des Systèmes de Relais

Le-Quang-Vinh TRAN, Olivier BERDER, Olivier SENTIEYS

IRISA/INRIA

6 rue de Kérampont, BP 80518, 22305, Lannion, France

vinh.tran@irisa.fr, olivier.berder@irisa.fr

olivier.sentieys@irisa.fr

Résumé – Dans cet article, l’efficacité spectrale et l’efficacité énergétique d’un système de relais sont pris en considération. Le compromis entre le spectre et l’énergie est exploité par trois modèles de transmission: MNCR (MIMO normal cooperative relay), MSCR (MIMO simple cooperative relay) et MFCR (MIMO full cooperative relay). L’analyse de probabilité de coupure indique que tous les modèles obtiennent un ordre de diversité de 4. Les résultats d’analyse et de simulation montrent que MSCR offre une meilleure efficacité spectrale que MNCR et MFCR. Toutefois, compte tenu de l’efficacité énergétique de ces modèles, MFCR offre la distance de transmission la plus longue grâce à un plus faible taux d’erreur binaire (TEB). La consommation d’énergie est estimée en utilisant un modèle réaliste dont les paramètres sont extraits des caractéristiques du CC2420, un émetteur-récepteur de capteurs sans fil largement utilisé et disponible dans le commerce. Enfin, pour les différentes distances de transmission, les stratégies de coopération les plus efficaces sont également identifiées par les résultats de simulation et d’analyse.

Abstract – In this paper, spectral efficiency and energy efficiency of a relay system are considered. The trade-off between spectrum and energy is exploited via three transmission models: MNCR (MIMO normal cooperative relay), MSCR (MIMO simple cooperative relay) and MFCR (MIMO full cooperative relay). The outage probability analysis derives that all the models have the diversity order of 4. The analytic and simulation results show that MSCR provides better spectral efficiency than MNCR and MFCR. However, considering the energy efficiency of these models, MFCR is shown to have the longest transmission range due to its better BER (Bit Error Rate) performance. The energy consumption is estimated by using a realistic power consumption model where the parameters are extracted from the characteristics of CC2420, a wireless sensor transceiver widely used and commercially available. Moreover, for different transmission distances, the optimal cooperative scheme in terms of energy efficiency is also provided by simulation and analytic results.

1 Introduction

Les systèmes MIMO (Multi-Input Multi-Output), notamment ceux basés sur les codes spatio-temporels distribués (DSTC), sont connus pour leurs avantages en termes de capacité, de fiabilité et d’efficacité spectrale. Un système DSTC utilisant différents nœuds pour construire une transmission MIMO virtuelle est très efficace pour induire un gain de diversité [1]. La transmission par relais a par ailleurs été identifiée comme l’une des technologies de base qui pourrait permettre le transfert d’information robuste et hautement fiable dans les réseaux sans fil. Elle propose de bonnes performances en termes de probabilité de coupure pour de forts rapports signal sur bruit (SNR) [2]. L’analyse de probabilité de coupure est étendue pour les réseaux multi-relais dans [3].

Les recherches présentées ici considèrent une transmission directe de la source à la destination et utilisent les DSTC au niveau des relais pour améliorer significativement les performances. Le protocole de relaying utilisé par les relais est l’Amplify and Forward (AF). Dans notre travail, nous considérons trois modèles : la coopération classique (MNCR pour MIMO normal cooperative relay), la coopération simple (MSCR pour MIMO simple cooperative relay) et enfin la coopération totale

(MFCR pour MIMO full cooperative relay) et focalisons sur la probabilité de coupure et la consommation d’énergie. La différence entre les trois modèles est donc le niveau de coopération entre des relais, c’est-à-dire pas de coopération pour MNCR (les relais font simplement suivre les signaux à destination), utilisation des DSTC aux relais pour MSCR et MFCR, avec en plus un échange de données entre relais pour ce dernier modèle. Premièrement, une approximation de la probabilité de coupure est obtenue dans la région des hauts rapports signal sur bruit. La justesse de l’approximation analytique de la probabilité de coupure est, ensuite, vérifiée par des simulations pour différents modèles. Le modèle utilisant une coopération simple entre les relais (MSCR) propose la meilleure performance en termes de probabilité de coupure, mais les résultats sont plus nuancés en ce qui concerne l’efficacité énergétique. L’expression analytique de la consommation totale d’énergie de chaque schéma de transmission est dérivée à partir d’un modèle réaliste de consommation basé sur les caractéristiques du composant radio CC2420, largement utilisé et disponible dans le commerce. Enfin, la meilleure stratégie de coopération en termes énergétiques est proposée en fonction de la distance de transmission et la distance relative des relais. Le modèle le plus efficace en énergie peut être choisi facilement en fonction des paramètres

applicatifs.

Le reste de cet article est organisé de la façon suivante. Dans la section II, les modèles de MFCR, MSCR et MNCR sont décrits en détail. Ensuite, l'analyse et la simulation de probabilité de coupure pour ces modèles sont proposées dans la Section III. La section IV présente les résultats en termes de consommation d'énergie pour donner la meilleure stratégie de coopération.

Les minuscules et majuscules en gras représentent les vecteurs et matrices, respectivement. a^* est le conjugué de a , \mathbf{a}^T désigne le vecteur transposé de \mathbf{a} et \mathbf{A}^H désigne la matrice hermitienne transposée de \mathbf{A} .

2 Système de relais

Le système que nous considérons se compose d'une source avec deux antennes, et d'une destination et deux relais qui ont seulement une antenne. Le processus de transmission des modèles, MNCR, MSCR et MFCR, peut être décomposé selon les étapes suivantes.

Étape 1 : La source transmet simultanément les signaux codés par le code d'Alamouti $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} s[2k] & s[2k+1] \\ -s^*[2k+1] & s^*[2k] \end{bmatrix}$ à deux relais et à la destination. Les signaux reçus aux relais et à la destination sont

$$\mathbf{y}_{sj} = \sqrt{P_s} \mathbf{X} \mathbf{h}_{sj} + \mathbf{n}_{sj}, \quad j \in \{r_1, r_2, d\} \quad (1)$$

où $\mathbf{h}_{sj} = [h_{sj}[2k] \quad h_{sj}[2k+1]]^T$ est un vecteur de coefficients du canal de Rayleigh, $\mathbf{n}_{sj} = [n_{sj}[2k] \quad n_{sj}[2k+1]]^T$ est un vecteur de bruit blanc gaussien additif (AWGN) et P_s est la puissance de transmission de la source.

Étape 2 : Pour le MNCR, les deux relais utilisent le protocole AF pour transmettre consécutivement les signaux à destination. Les données reçues à destination en provenance des relais peuvent s'écrire

$$y_{jd}[m] = \sqrt{P_r} h_{jd}[m] r_j[m] + n_{jd}[m] \quad j \in \{r_1, r_2\}, m \in \{2k, 2k+1\} \quad (2)$$

où P_r est la puissance de transmission des relais. Les signaux transmis par relais, $r_j[m]$, peuvent être exprimés comme

$$\mathbf{r}_j = (\mathbf{H}_{sj}^H \tilde{\mathbf{y}}_{sj}) / \sqrt{P_s} (\mathbf{H}_{sj}^H \mathbf{H}_{sj}) \quad j \in \{r_1, r_2\} \quad (3)$$

où $\mathbf{H}_{sj} = \begin{bmatrix} h_{sj}[2k] & h_{sj}[2k+1] \\ h_{sj}^*[2k+1] & -h_{sj}^*[2k] \end{bmatrix}$, $\mathbf{r}_j = [r_j[2k] \quad r_j[2k+1]]^T$ et $\tilde{\mathbf{y}}_{sj} = [y_{sj}[2k] \quad y_{sj}^*[2k+1]]^T$.

Pour le MSCR, les deux relais utilisent le code spatio-temporel distribué non-régénératif $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{r_1}[2k] & r_{r_2}[2k+1] \\ -r_{r_1}^*[2k+1] & r_{r_2}^*[2k] \end{bmatrix}$ pour transmettre simultanément les signaux ré-encodés par Alamouti à la destination :

$$\mathbf{y}_{rd} = \sqrt{P_r} \mathbf{R} \mathbf{h}_{rd} + \mathbf{n}_{rd}, \quad (4)$$

où $\mathbf{h}_{rd} = [h_{rd}[2k] \quad h_{rd}[2k+1]]^T$, $\mathbf{n}_{rd} = [n_{rd}[2k] \quad n_{rd}[2k+1]]^T$.

Pour MFCR, avant de transmettre les signaux à destination, les deux relais échangent leurs données (\mathbf{y}_{sr_1} et \mathbf{y}_{sr_2}) l'un avec l'autre pour obtenir la diversité de réception. Dans ce travail, nous supposons qu'il n'y a pas d'erreurs dans l'échange de données entre les deux relais. Du fait de cet échange, les signaux transmis par les deux relais à la destination sont les mêmes, $\mathbf{r}_{r_1} = \mathbf{r}_{r_2} = \mathbf{r}$. Les signaux reçus à destination sont représentés par (4) avec $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r[2k] & r[2k+1] \\ -r^*[2k+1] & r^*[2k] \end{bmatrix}$

Étape 3 : Tous les signaux reçus sont alors combinés pour obtenir la diversité spatiale et la technique de combinaison à gain maximal est utilisée pour décoder les signaux.

Nous supposons que les communications ci-dessus sont effectuées sur un canal de Rayleigh à évanouissement plat. Les coefficients du canal sont les mêmes pour deux intervalles de temps consécutifs. Statistiquement, nous modélisons $h_{ij}[m]$ où $i \in \{s, r_1, r_2\}$ et $j \in \{r_1, r_2, d\}$ comme des variables aléatoires gaussiennes, complexes et indépendantes avec des moyennes nulles et des variances σ_{ij}^2 . De même, nous modélisons $n_{ij}[m]$ comme des variables aléatoires gaussiennes, complexes et indépendantes avec des moyennes nulles et des variances N_0 .

3 Probabilité de coupure

3.1 Approximation mathématique

Soit $P_s = P_r = P$ et le rapport signal sur bruit défini par $SNR = P/N_0$, nous pouvons déterminer la probabilité de coupure des modèles grâce au paramètre SNR , comme dans [4]. Dans ce travail, nous supposons que le relais 1 et le relais 2 ont la même distance par rapport à la source et la destination, donc nous pouvons obtenir $\sigma_{sr} = \sigma_{sr_1} = \sigma_{sr_2}$ and $\sigma_{rd} = \sigma_{r_1d} = \sigma_{r_2d}$.

La moyenne de l'information mutuelle maximale entre la source et la destination pour les signaux aléatoires générés i.i.d gaussiens complexes à symétrie circulaire pour MNCR, MSCR et MFCR s'écrit respectivement

$$I_{MNCR} = \frac{1}{3} \log \left(1 + SNR \|\mathbf{h}_{sd}\|^2 + f(SNR \|\mathbf{h}_{sr_1}\|^2, SNR |h_{r_1d}|^2) + f(SNR \|\mathbf{h}_{sr_2}\|^2, SNR |h_{r_2d}|^2) \right) \quad (5)$$

$$I_{MSCR} = \frac{1}{2} \log \left(1 + SNR \|\mathbf{h}_{sd}\|^2 + f(SNR \|\mathbf{h}_{sr}\|^2, SNR \|\mathbf{h}_{rd}\|^2) \right) \quad (6)$$

$$I_{MFCR} = \frac{1}{4} \log \left(1 + SNR \|\mathbf{h}_{sd}\|^2 + f(SNR \|\mathbf{H}_{sr}\|^2, SNR \|\mathbf{h}_{rd}\|^2) \right) \quad (7)$$

où $\|\mathbf{h}_{sr}\|^2 = \max(\|\mathbf{h}_{sr_1}\|^2, \|\mathbf{h}_{sr_2}\|^2)$, la fonction $f(\cdot)$ est définie dans [2], et $\|\mathbf{H}_{sr}\|^2 = \|\mathbf{h}_{sr_1}\|^2 + \|\mathbf{h}_{sr_2}\|^2$.

La probabilité de coupure de MSCR et MFCR peut être approchée pour les hauts rapports signal sur bruit par

$$Pr[I_{MSCR} < R] \sim \frac{1}{4!} \frac{\sigma_{sr}^4 \sigma_{rd}^4}{\sigma_{sd}^4} \frac{1}{\sigma_{sd}^4} \left(\frac{2^{2R} - 1}{SNR} \right)^4 \quad (8)$$

$$Pr[I_{MFCR} < R] \sim \frac{1}{4!} \frac{1}{\sigma_{rd}^4 \sigma_{sd}^4} \left(\frac{2^{4R} - 1}{SNR} \right)^4 \quad (9)$$

Pour MNCR, les bornes inférieure et supérieure de la probabilité de coupure peuvent être exprimées par

$$\frac{1}{48} \frac{1}{\sigma_{rd}^4 \sigma_{sd}^4} \left(\frac{2^{3R} - 1}{SNR} \right)^4 \leq Pr[I_{MNCR} < R] \leq \frac{1}{12} \frac{1}{\sigma_{rd}^4 \sigma_{sd}^4} \left(\frac{2^{3R} - 1}{SNR} \right)^4 \quad (10)$$

où R est l'efficacité spectrale, et σ_{ij}^2 la variance de la variable aléatoire gaussienne de moyenne nulle, $h_{ij}[m]$ avec $i \in \{s, r_1, r_2\}$ et $j \in \{r_1, r_2, d\}$.

3.2 Résultats de simulation

La Fig. 1 montre les probabilités de coupure de MNCR, MSCR et MFCR en fonction de SNR_{norm} [2] pour des réseaux

statistiquement symétriques, i.e. $\sigma_{ij}^2 = 1$, $R = 1$. Les courbes continues représentent les approximations analytiques tandis que les courbes pointillées représentent les résultats de simulations obtenues par la méthode de Monte Carlo. Les approximations de la probabilité de coupure obtenues pour MSCR et MFCR correspondent bien aux simulations à haut SNR , tandis que pour MNCR les résultats de simulation sont bien entre la borne inférieure et la borne supérieure. Tous les modèles ont ordre de diversité de 4, mais c'est MSCR qui a la meilleure probabilité de coupure. En outre, en comparaison avec le système présenté par Seddik et al (1-3-1) [3] qui utilise une source, trois relais et une destination, tous équipés d'une antenne seulement, MNCR, MSCR et MFCR proposent également une meilleure probabilité de coupure.

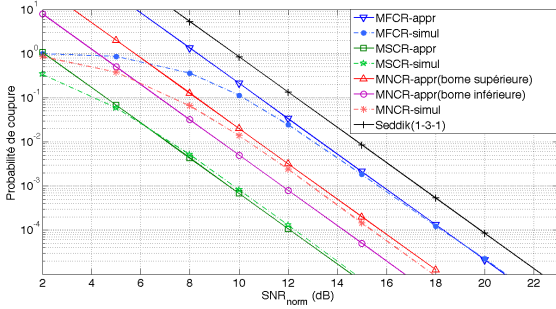


FIGURE 1 – Probabilité de coupure en fonction de SNR_{norm}

4 Consommation d'énergie

4.1 Analyse mathématique

Pour évaluer l'efficacité énergétique des modèles, au lieu d'utiliser le modèle typique d'énergie de [5], le présent article applique un modèle réaliste de la consommation de puissance [6] qui utilise les caractéristiques de l'émetteur-récepteur sans fil CC2420 pour une estimation précise de consommation d'énergie.

La consommation totale d'énergie pour l'émission et la réception, notée par P_T et P_R est

$$P_T(d_{sd}) = P_{TB} + P_{TRF} + P_A(d_{sd}) = P_{T0} + P_A(d_{sd}) \quad (11)$$

$$P_R = P_{RB} + P_{RRF} + P_L = P_{R0} \quad (12)$$

où P_{TB}/P_{RB} est la consommation (mW) du circuit de traitement des signaux numériques en bande de base pour l'émission/réception, P_{TRF}/P_{RRF} la consommation (mW) du circuit frontal d'émission/réception, P_A la consommation (mW) de l'amplificateur de puissance, P_L la consommation (mW) de l'amplificateur à faible bruit et d_{sd} la distance de transmission. Étant donné que P_{TB} et P_{TRF} ne dépendent pas de la distance de transmission, on peut les modéliser comme une seule constante, P_{T0} . De même, vu que P_{RB} , P_{RRF} et P_L ne dépendent pas de la distance de transmission, la consommation du circuit de réception peut également être considérée comme une constante, P_{R0} .

En général, la consommation de l'amplificateur de puissance, $P_A(d_{sd})$ dépend de la puissance d'émission souhaitée $P_{Tx}(d_{sd})$ et l'efficacité de drain η .

$$P_A(d_{sd}) = \frac{P_{Tx}(d_{sd})}{\eta} \quad (13)$$

D'autre part, P_{Tx} peut être dérivée en fonction de la puissance de réception désirée P_{Rx} à la destination

$$P_{Tx}(d_{sd}) = P_{Rx} \times \frac{(4\pi d_{sd})^2 L}{G_t G_r \lambda^2} \quad (14)$$

où G_t et G_r sont les gains d'antenne de l'émetteur et du récepteur, L est le facteur de perte du système, λ est la longueur d'onde porteuse.

P_{Rx} peut être exprimé comme [7]

$$P_{Rx} = N_0 SNR(1 + \alpha) N_f R_b \quad (15)$$

avec α le facteur de roll-off, N_f le facteur de bruit, SNR le rapport signal sur bruit et R_b le débit binaire de transmission.

La consommation d'énergie par bit peut être dérivée par

$$E^b = (P_T(d_{sd}) + P_R)/R_b \quad (16)$$

La consommation d'énergie totale par bit de MNCR, MSCR, MFCR et du schéma Alamouti 2-1 peut être calculée facilement et désignée par E_N^b , E_S^b , E_F^b et E_A^b respectivement

$$E_F^b = \frac{N_0 \rho_F(P_e, r)(1 + \alpha) N_f (4\pi d)^2 L}{\eta G_t G_r \lambda^2} + \frac{6P_{T0} + 6P_{R0}}{R_b} \quad (17)$$

$$E_S^b = \frac{N_0 \rho_S(P_e, r)(1 + \alpha) N_f (4\pi d)^2 L}{\eta G_t G_r \lambda^2} + \frac{4P_{T0} + 4P_{R0}}{R_b} \quad (18)$$

$$E_N^b = \frac{N_0 \rho_N(P_e, r)(1 + \alpha) N_f (4\pi d)^2 L}{\eta G_t G_r \lambda^2} + \frac{4P_{T0} + 5P_{R0}}{R_b} \quad (19)$$

$$E_A^b = \frac{N_0 \rho_A(P_e)(1 + \alpha) N_f (4\pi d)^2 L}{\eta G_t G_r \lambda^2} + \frac{2P_{T0} + 1P_{R0}}{R_b} \quad (20)$$

Dans une puce CC2420, la puissance d'émission maximale, P_{Tx}^{max} , est 0dBm et la sensibilité du récepteur est -95dBm. Par conséquent, dans une communication réelle, les conditions suivantes doivent être remplies

$$P_{Tx} \leq P_{Tx}^{max} (0dBm) \quad (21)$$

$$P_{Rx} \geq P_{Rx}^{min} (-95dBm) \quad (22)$$

Par ailleurs, à cause des caractéristiques du CC2420, les distances de transmission maximale de MFCR, MSCR, MNCR et Alamouti 2-1 (notées par $d_F^{max}(P_e, r)$, $d_S^{max}(P_e, r)$, $d_N^{max}(P_e, r)$ et $d_A^{max}(P_e)$ respectivement) peuvent être déterminées en fonction de la probabilité d'erreur binaire P_e et la distance relative des relais r (définie par le rapport de la distance source-relais d_{sr} et la distance de transmission d_{sd}).

Le MFCR est le meilleur choix si $E_F^b < \min(E_S^b, E_N^b, E_A^b)$. Grâce aux Eq. (17), (18), (19) et (20) nous pouvons tirer

$$\max(B, C, D) < d < d_F^{max}(P_e, r) \quad (23)$$

$$\text{avec } B = \min\left(\sqrt{\frac{(2P_{T0} + 2P_{R0})A}{(\rho_S(P_e, r) - \rho_F(P_e, r))}}, d_S^{max}(P_e, r)\right),$$

$$C = \min\left(\sqrt{\frac{(2P_{T0} + 1P_{R0})A}{(\rho_N(P_e, r) - \rho_F(P_e, r))}}, d_N^{max}(P_e, r)\right),$$

$$D = \min\left(\sqrt{\frac{(4P_{T0} + 5P_{R0})A}{(\rho_A(P_e) - \rho_F(P_e, r))}}, d_A^{max}(P_e)\right)$$

et $A = \frac{\eta G_t G_r \lambda^2}{N_0(1 + \alpha) N_f (4\pi)^2 L R_b}$.

De même, le schéma Alamouti est choisi si

$$0 < d < \min(D, E, F) \quad (24)$$

avec $E = \min\left(\sqrt{\frac{(2P_{T0}+3P_{R0})A}{(\rho_A(P_e)-\rho_S(P_e,r))}}, d_A^{max}(P_e)\right)$,
 et $F = \min\left(\sqrt{\frac{(2P_{T0}+4P_{R0})A}{(\rho_A(P_e)-\rho_N(P_e,r))}}, d_A^{max}(P_e)\right)$.

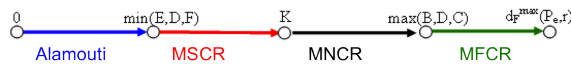
Le seuil pour MSCR et MNCR est désigné par K . Ainsi, le MSCR est choisi si

$$d < K \quad (25)$$

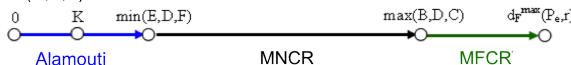
où $K = \min\left(\sqrt{\frac{P_{R0}A}{(\rho_S(P_e,r)-\rho_N(P_e,r))}}, d_A^{max}(P_e,r)\right)$.

D'après Eq. (16), (17) et (18), nous déterminons la meilleure stratégie de coopération, comme illustré par Fig. 2. Il est à noter que si $K < \min(D, E, F)$ ou $K > \max(B, C, D)$, MSCR ou MNCR respectivement, ne représente pas une solution économique en énergie, et ne serait donc pas utilisé.

$$\min(D, E, F) < K < \max(B, C, D)$$



$$0 < K < \min(D, E, F)$$



$$\max(B, C, D) < K$$



FIGURE 2 – Meilleure stratégie de coopération pour optimiser énergie

4.2 Résultats de simulation

La Fig. 3 met en évidence la meilleure stratégie de coopération du système afin de minimiser la consommation d'énergie dans le cas d'une probabilité d'erreur fixée $P_e = 10^{-5}$. Chaque zone de couleur représente le modèle qui nous donne la consommation énergétique minimale en fonction de d_{sd} et r . La couleur blanche représente la zone dans laquelle l'utilisation CC2420 ne permet d'obtenir une transmission fiable ($P_e \leq 10^{-5}$) avec aucun des modèles étudiés. Les résultats d'analyses et de simulations montrent que MFCR a la meilleure efficacité énergétique pour les longues distances de transmission grâce à l'échange de données entre les deux relais. La Fig. 3 peut s'avérer très utile pour des applications réelles. Étant donné un système comme celui considéré dans cet article, lorsque r et d_{sd} sont fixés à $P_e = 10^{-5}$, nous pouvons choisir le modèle optimal du point de vue de la consommation d'énergie.

5 Conclusion

Dans cet article, nous avons montré l'intérêt d'utiliser les codes spatio-temporels au niveau du relais. Bien que MSCR, MFCR et MNCR aient tous l'ordre de diversité de 4, MSCR nous donne la meilleure performance en termes d'efficacité spectrale, tandis que MFCR est le plus efficace en énergie. L'analyse de la probabilité de coupure MNCR, MSCR et MFCR confirme les résultats de la simulation. En utilisant les caractéristiques réelles d'un émetteur-récepteur sans fil, CC2420,

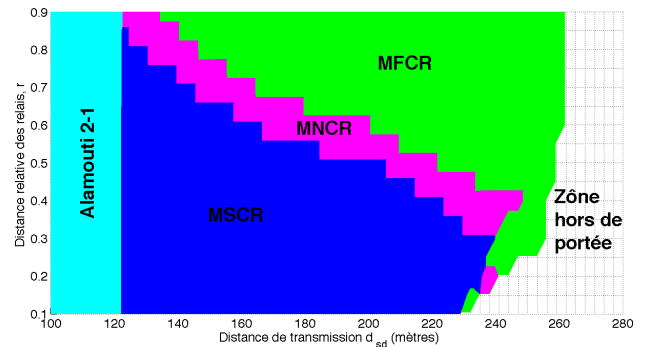


FIGURE 3 – Meilleure stratégie de coopération pour minimiser la consommation d'énergie ($P_e = 10^{-5}$).

nous obtenons une estimation précise de la consommation d'énergie pour MNCR, MSCR et MFCR. Chaque modèle a une distance maximale de transmission pour r fixé et une P_e souhaitée et il est possible de trouver le modèle optimal en énergie en fonction de la distance de transmission.

Références

- [1] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2425, Oct. 2003.
- [2] J. N. Laneman, G. W. Wornell, and D. N. C. Tse, "Cooperative diversity in wireless networks : Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transaction on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [3] K. G. Seddik, A. K. Sadek, W. Su, and K. R. Liu, "Outage analysis of multi-node amplify-and-forward relay networks," *Wireless Communication and Networking Conference*, vol. 2, pp. 1184–1188, Apr. 2006.
- [4] L. Q. V. Tran, O. Berder, and O. Sentieys, "Spectral efficiency and energy efficiency of distributed space-time relaying models," *IEEE Consumer Communications & Networking Conferenc (CCNC)*, Jan. 2011.
- [5] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1089–1098, Aug. 2004.
- [6] Q. Wang, M. Hempstead, and W. Yang, "A Realistic Power Consumption Model for Wireless Sensor Network Devices," *Sensor and Ad-hoc Communications and Networks, SECON'06*, vol. 1, pp. 286–295, Sep. 2006.
- [7] Y. Li, B. Bakkaloglu, and C. Chakrabarti, "A System Level Energy Model and Energy-Quality Evaluation for Integrated Transceiver Front-Ends," *IEEE Transactions on Very Large Scale Intergration Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 90–103, Jan. 2007.