

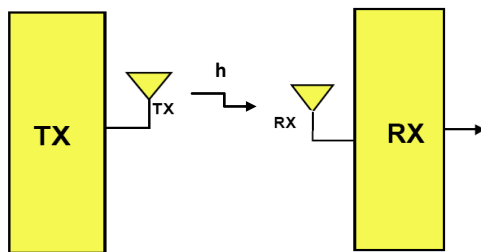
Chapitre 4

Introduction aux techniques MIMO

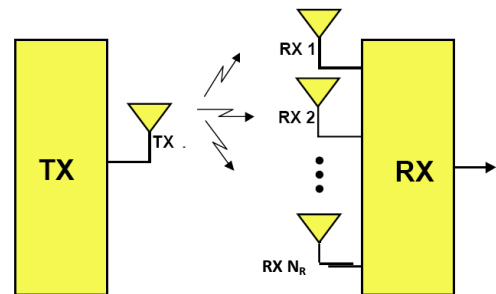
I-Introduction

Les systèmes de communication sont de quatre types :

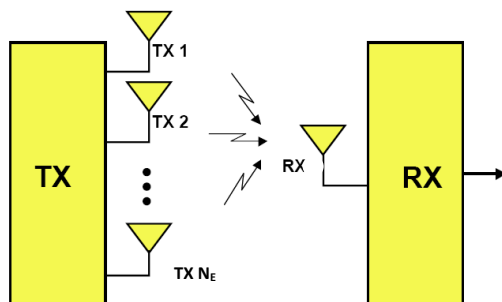
- Single Input Single Output (SISO),
- Multiple Input Single Output (MISO),
- Single Input Multiple Output (SIMO),
- Multiple Input Multiple Output (MIMO).



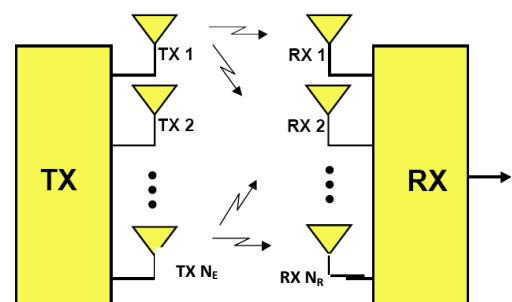
Système SISO



Système SIMO



Système MISO



Système MIMO

L'objectif, dans ce chapitre, est de donner un aperçu sur le principe des techniques multi-antennes MIMO utilisées dans les systèmes de communication sans fil.

L'application de ces techniques permet d'augmenter la capacité des canaux de communication sans fil par rapport à un système SISO. Une application qui est très prometteuse dans tous les systèmes haut débit : réseaux locaux sans fil (WLAN), réseaux de communication de 3^{ème} génération et boucles d'abonnés WiMAX.

II- Modèle de canal MIMO

Le canal MIMO est un canal radio-mobile dans lequel les sous-canaux (chaque sous-canal lie une antenne émettrice à une antenne réceptrice) sont à trajets multiples et où de l'interférence entre symboles est observée au récepteur.

L'idée de base d'un système MIMO est de transmettre l'information, dans une bande de fréquence donnée, en utilisant plusieurs antennes à l'émission et à la réception.

Conséquences :

- Augmentation du débit transmis, dans cette bande, d'un facteur N_E égal au nombre d'antennes émettrices.
- Amélioration de l'efficacité spectrale et/ou de la fiabilité des transmissions numériques sans augmenter la largeur de bande passante et la puissance transmise.

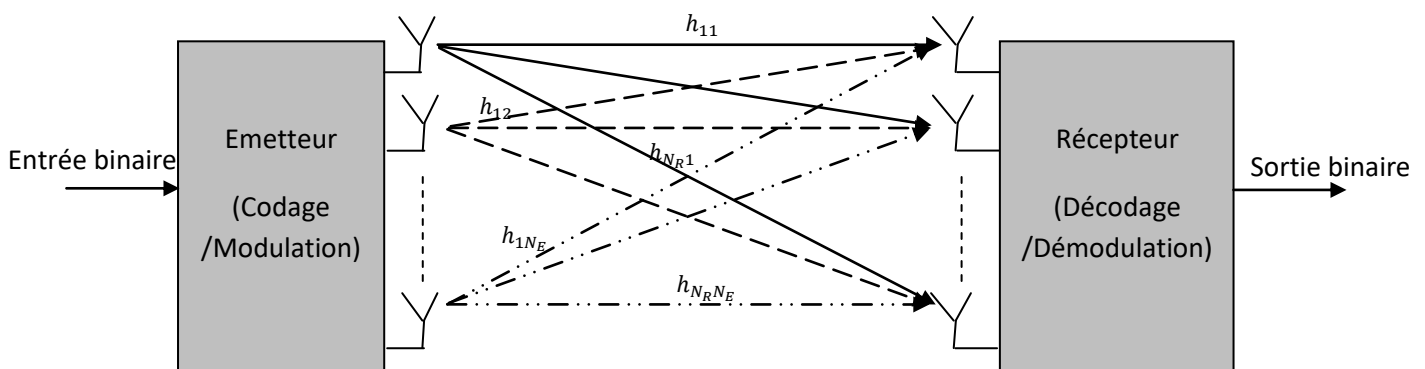


Fig.IV-1. Schéma d'un système de communication sans fil MIMO

Le signal z_i émis sur l'antenne i , à l'instant t , est reçu sur l'antenne j , multiplié par un coefficient h_{ji} . La somme des signaux issus des N_E antennes émettrices et reçus par l'antenne j est donnée par :

$$y_j = \sum_{i=1}^{N_E} h_{ji} \cdot z_i + b_j$$

h_{ji} : coefficient d'atténuation complexe de canal entre l'antenne j et l'antenne i . Il est aléatoire et suit une distribution gaussienne complexe centrée et de variance unitaire.

b_j : bruit complexe additif blanc gaussien de DSP bilatérale $N_0/2$.

En considérant tous les signaux reçus simultanément sur les N_R antennes réceptrices, le modèle du canal MIMO s'écrit :

$$y = H \cdot z + b$$

Où $z = [z_1, \dots, z_{N_E}]^T$, $y = [y_1, \dots, y_{N_R}]^T$, $b = [b_1, \dots, b_{N_R}]^T$

$$\text{et } H = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1N_E} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & \dots & h_{N_R N_E} \end{bmatrix}$$

H : matrice de dimension $N_R \times N_E$. L'exposant « T » indique le vecteur transposé.

Notons que les sous-canaux doivent être indépendants (dé-corrélés).

III- Capacité d'un canal MIMO

On considère

- $E_{si} = \frac{E_s}{N_E}$ l'énergie transmise sur chacune des antennes d'émission,
- $\rho = \frac{E_s}{N_0}$ le rapport signal à bruit à la réception.

Pour une réalisation de canal fixe H , la capacité instantanée d'un canal MIMO est donné par :

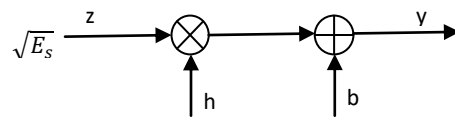
$$C(\rho, N_E, N_R) = \log_2 \left(\det \left(I_{N_R} + \frac{\rho}{N_E} H H^H \right) \right) \quad [\text{bit/s /Hz}]$$

Elle augmente linéairement avec $\min(N_R, N_E)$.

H^H : matrice conjuguée-transposée de H et I_{N_R} : Matrice identité de taille $(N_R \times N_R)$.

Une comparaison peut être faite avec les capacités des autres systèmes de communication :

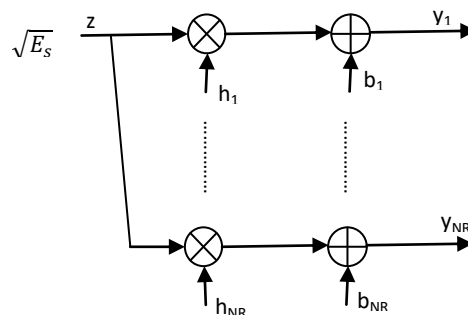
- **Capacité d'un canal SISO :**



$$C = \log_2(1 + \rho|h|^2)$$

h : coefficient d'atténuation complexe du canal entre l'antenne d'émission et celle de réception. Ce coefficient peut être fixe (canal déterministe) ou aléatoire (canal variable dans le temps).

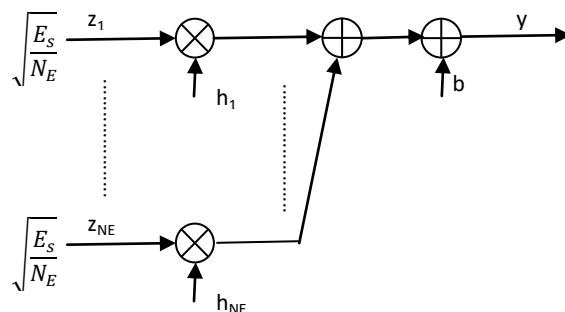
- **Capacité d'un canal SIMO :** si on utilise N_R antennes à la réception.



$$C = \log_2 \left(1 + \rho \sum_{i=1}^{N_R} |h_i|^2 \right)$$

h_i : coefficient d'atténuation complexe du canal entre l'antenne d'émission et la $i^{\text{ème}}$ antenne de réception.

- **Capacité d'un canal MISO :** si on utilise N_E antennes à l'émission.



$$C = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_E} \sum_{i=1}^{N_E} |h_i|^2 \right)$$

h_i : coefficient d'atténuation complexe du canal entre la $i^{\text{ème}}$ antenne d'émission et l'antenne de réception.

La puissance totale à l'émission est divisée par N_E .

III-1- Capacité ergodique ou moyenne d'un canal MIMO

La capacité instantanée du canal MIMO donnée plus haut est une variable aléatoire. Par conséquent, on utilise la capacité ergodique.

Supposons que le canal varie rapidement dans le temps ou qu'il soit très sélectif en fréquence (effets des trajets multiples et du mouvement de l'émetteur et du récepteur), de sorte qu'un mot d'information soit émis à travers un grand nombre de réalisations indépendantes du canal H ; dans ce cas le canal est dit « ergodique ».

La capacité du canal s'obtient en calculant l'espérance mathématique sur toutes les réalisations possibles du canal MIMO.

$$C_{ergo}(\rho, N_E, N_R) = E \left\{ \log_2 \left(\det \left(I_{N_R} + \frac{\rho}{N_E} H H^H \right) \right) \right\}$$

Sur la figure suivante, est représentée la capacité ergodique en fonction du rapport signal à bruit (en dB) pour différentes configurations des systèmes de communication sans fil.

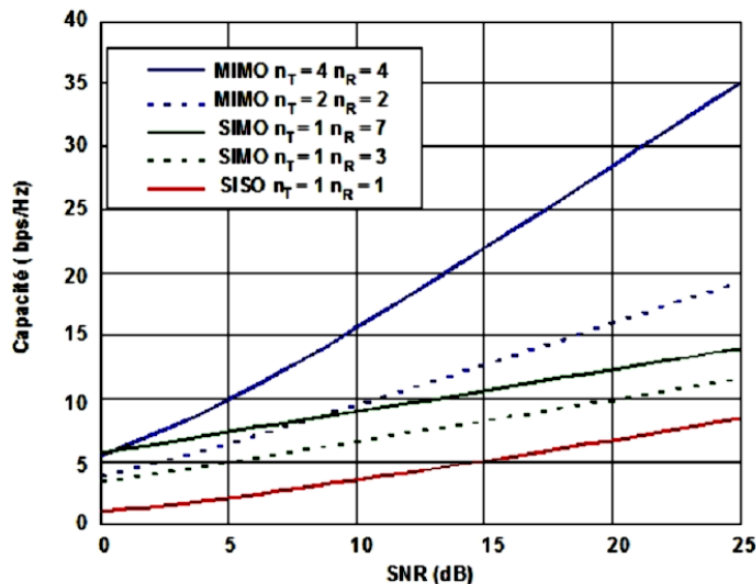


Fig.IV-2. Capacité ergodique pour configurations de systèmes MIMO, SISO et SIMO

Le débit théorique maximal augmente avec l'augmentation du nombre de transmission en parallèle.

IV- Architectures et techniques MIMO

IV-1- Diversité

La diversité suggère qu'il y a plus d'un parcours de transmission ou méthode de transmission disponible entre émetteur et récepteur. Dans ce cas, le système peut sélectionner le parcours ou la méthode qui produit le meilleur signal reçu.

Les techniques les plus courantes pour réaliser la diversité sont :

- la diversité en fréquence,
- la diversité en temps,
- la diversité spatiale,

On définira ici la diversité spatiale exploitée dans les systèmes MIMO.

IV-1-1- Diversité spatiale MIMO

Le système de communication est construit de la manière suivante : l'émetteur est équipé de plusieurs antennes qui sont physiquement séparées par un nombre appréciable de longueurs d'ondes. De même à la réception, plusieurs antennes, qui fournissent le signal d'entrée au récepteur, doivent être également séparées par un nombre appréciable de longueurs d'ondes (au moins une demi-longueur d'onde). Grâce à cette construction, l'évanouissement sur chaque antenne est indépendant.

Des sous-canaux à trajets multiples sont ainsi mis en jeu et sont décorrélés les uns des autres :

- certains donnent lieu à de faible SNR à la réception,
- d'autres donnent lieu à de fort SNR à la réception.

Le principe de la technique basée sur la diversité spatiale consiste à émettre un même message simultanément sur les différentes antennes émettrices. A la réception, des répliques du signal sont reçues à travers les sous-canaux indépendants et la probabilité que ces répliques subissent simultanément un évanouissement diminue.

Le nombre de répliques reçues est appelé **ordre de diversité**. Il est fonction du nombre d'antennes à l'émission et à la réception.

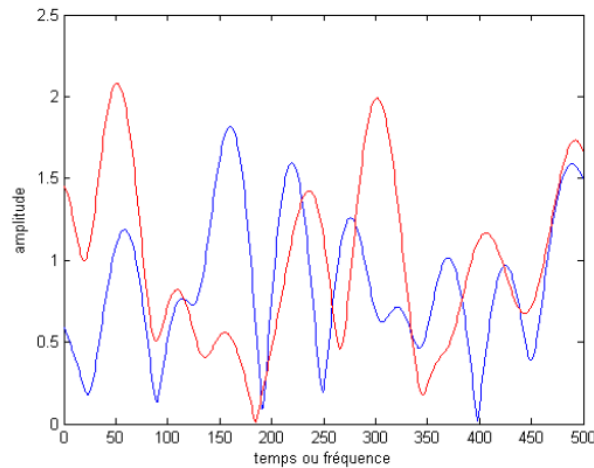


Fig.IV-3. Exemple de superposition de répliques du signal reçu

Le phénomène de diversité spatiale, produit par les sous-canaux de propagation, améliore la qualité du lien puisqu'il permet :

- de combattre les évanouissements,
- d'augmenter le rapport signal sur bruit (grâce au gain de diversité) et par conséquent minimiser la probabilité d'erreur de transmission.

Les techniques de diversité peuvent être soit de type:

- diversité à l'émission utilisée dans les systèmes MISO,
- diversité à la réception utilisée dans les systèmes SIMO,
- ou diversité à l'émission et à la réception utilisée dans les systèmes MIMO.

IV-2- Multiplexage spatial MIMO

Une autre catégorie de systèmes MIMO utilise le multiplexage spatial.

Le multiplexage spatial permet d'augmenter le débit d'information sur un canal MIMO.

Le principe consiste à émettre sur chacune des N_E antennes d'émission un symbole différent (multiplexage des symboles sur les N_E antennes d'émission). Par conséquent, le débit de transmission est multiplié par un facteur N_E (gain de multiplexage). Les signaux reçus sur les N_R antennes de réception sont réarrangés pour récupérer le signal d'origine. Les sous-canaux de propagation doivent être décorrélés.

L'architecture **H-BLAST** (Horizontal-Bell Labs Layered Space-Time) est un exemple de multiplexage spatial MIMO:

- La chaîne d'information est découpée en N_E sous-chaînes qui sont ensuite codées indépendamment.
- Chaque sous-chaîne codée est modulée puis transmise par son antenne. La transmission des chaînes codées se fait simultanément.

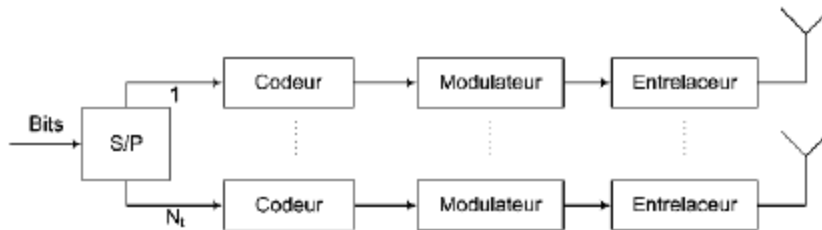


Fig.IV-4. Emetteur H-BLAST

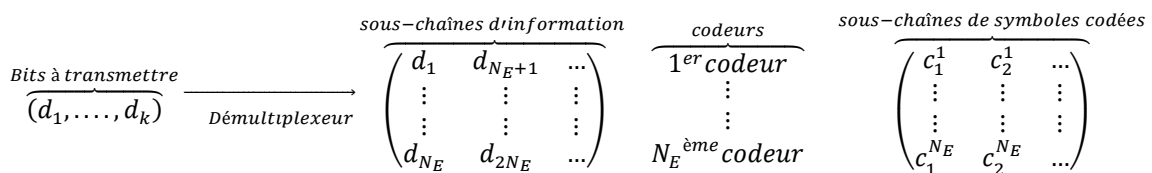


Fig.IV-5. Transmission codée pour émetteur H-BLAST

IV-3- Codage spatio-temporel

Les codes spatio-temporels répartissent l'information à travers l'espace et le temps et par conséquent permettent d'exploiter la diversité $N_E \cdot N_R$.

Deux familles de codes spatio-temporels sont utilisées :

- Les codes en blocs (STBC : Space-Time Block Coding) qui sont simples à mettre en œuvre.
- Les codes en treillis (STTC : Space-Time Trellis Coding) qui offrent les meilleures performances.

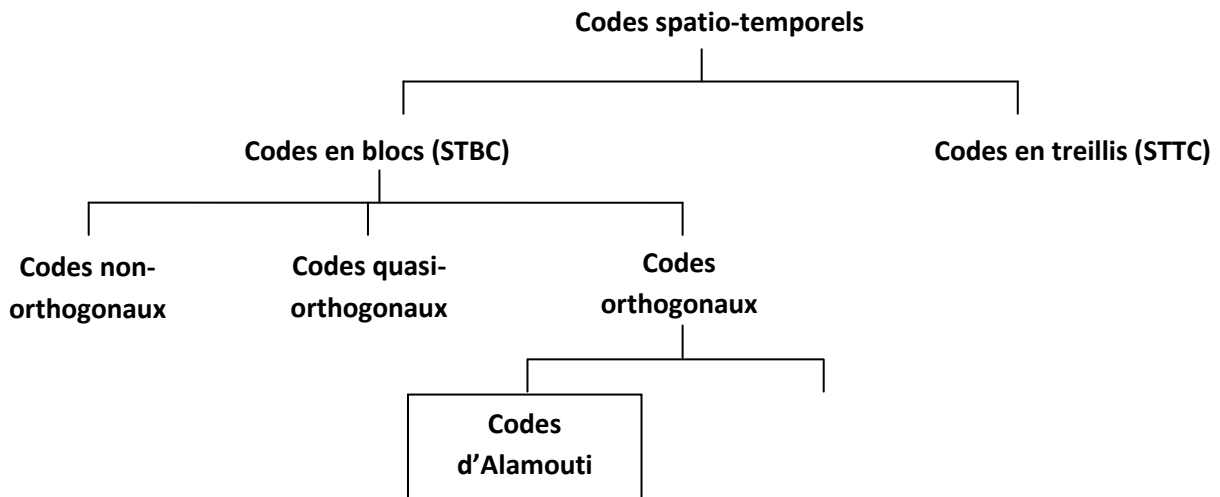


Fig.IV-6. Codes spatio-temporels

IV-3-1- Code d'Alamouti

C'est une technique de transmission qui utilise deux antennes à l'émission.

Soit à transmettre deux symboles z_1 et z_2 sur deux antennes pendant deux temps symboles.

On transmet le vecteur $[z_1 \ z_2]^T$ pendant le premier temps symbole et on transmet le vecteur $[-z_2^* \ z_1^*]^T$ pendant le deuxième temps symbole.

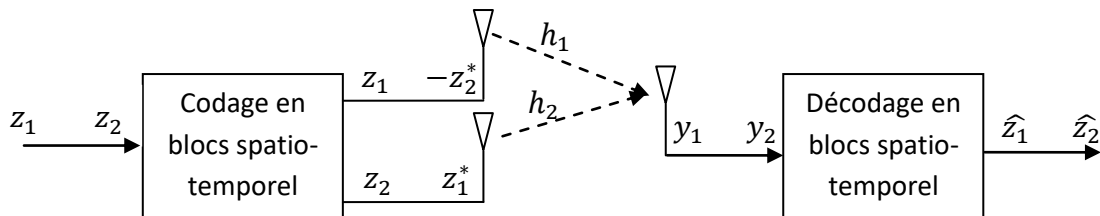


Fig.IV-7. Code d'Alamouti pour $N_E=2, N_R=1$

h_1 et h_2 sont les coefficients d'atténuation associés à chacune des antennes d'émission.

On reçoit sur l'antenne de réception les signaux y_1 et y_2 pendant les deux temps symboles :

$$\begin{cases} y_1 = h_1 z_1 + h_2 z_2 + b_1 \\ y_2 = -h_1 z_2^* + h_2 z_1^* + b_2 \end{cases}$$

dont la forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ -z_2^* & z_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow Y = ZH + B$$

Le code présente la propriété d'être orthogonal puisque :

$$Z.Z^H = (|z_1|^2 + |z_2|^2).I$$

avec I : matrice identité de taille 2x2,

Z^H : matrice conjuguée transposée de Z , elle s'écrit :

$$Z^H = \begin{bmatrix} z_1^* & -z_2 \\ z_2^* & z_1 \end{bmatrix}$$

De manière générale, un code orthogonal permet au récepteur de séparer facilement les données transmises par différentes antennes et qui se superposent au niveau de chaque antenne de réception.

Le système d'équations précédent peut également se mettre sous la forme équivalente :

$$\begin{cases} y_1 = h_1 z_1 + h_2 z_2 + b_1 \\ y_2^* = -h_1^* z_2 + h_2^* z_1 + b_2^* \end{cases}$$

qui s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2^* \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow Y = HZ + B$$

On peut vérifier que la matrice H présente la propriété d'être orthogonale par :

$$H.H^H = (|h_1|^2 + |h_2|^2).I$$

avec :

$$H^H = \begin{bmatrix} h_1^* & h_2 \\ h_2^* & -h_1 \end{bmatrix}$$

Comme H est une matrice orthogonale, le décodage consiste à multiplier le vecteur reçu Y par H^H :

$$\tilde{Y} = H^H Y = (|h_1|^2 + |h_2|^2)Z + \tilde{B}$$

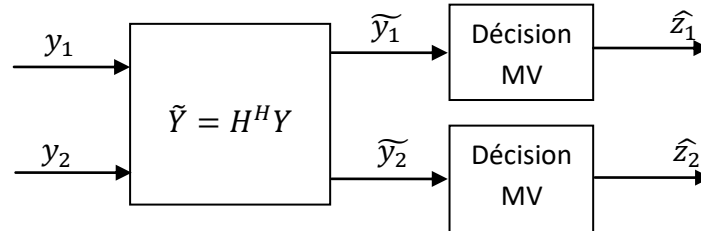
D'où :

$$\tilde{y}_1 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)z_1 + h_1^* b_1 + h_2 b_2^*$$

$$\tilde{y}_2 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)z_2 + h_2^* b_1 - h_1 b_2^*$$

Les mots codés z_1 et z_2 sont aisément estimés en utilisant deux décodeurs à seuil au sens du maximum de vraisemblance.

$$\hat{Z} = \text{décision}(\tilde{Y})$$



Le code Alamouti (avec $N_E=2$, $N_R=1$) est le seul code orthogonal complexe permettant d'atteindre la diversité maximale avec un rendement égal à l'unité.

Références bibliographiques

- 1) G. Baudoin et coll., « *Radio communications numériques /1- Principes, modélisation et simulation* », 2^{ème} édition DUNOD 2007.
- 2) J. Proakis, « *Digital communications* », Mc Graw-Hill, 4th edition, 2001.
- 3) B. Sklar, "*Digital Communications, Fundamentals and applications*", Prentice Hall, 2001.
- 4) D. Le Ruyet et B. Özbek, « Systèmes MIMO et codage spatio-temporel », REE 2005, n°4, pp. 69-78, 2005.

Cours sur sites Internet

- 5) Cours « Systèmes multi-antennes MIMO » D. Le Ruyet , laboratoire électronique et communication, Conservatoire national des arts et métiers CNAM.
- 6) Projet national de recherche « MIMO et accès multiples avancés pour réseaux sans fil », Laboratoire de Télécommunications de Tlemcen, 2011-2013.