

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 30.06.14.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la
demande : 01.01.16 Bulletin 15/53.

56 Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du
présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

○ Demande(s) d'extension :

71 Demandeur(s) : ORANGE Société anonyme — FR.

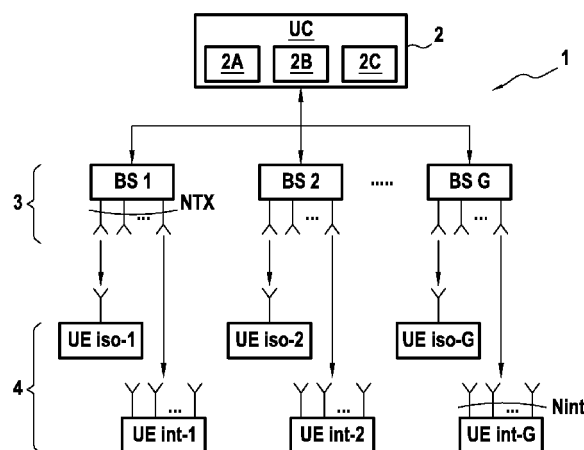
72 Inventeur(s) : LEJOSNE YOHAN, YUAN-WU JULIE
et SLOCK DIRK.

73 Titulaire(s) : ORANGE Société anonyme.

74 Mandataire(s) : CABINET BEAU DE LOMENIE.

54 PROCÉDE ET DISPOSITIF DE DETERMINATION DE FILTRES D'EMISSION ET DE RECEPTION POUR UN
SYSTEME DE COMMUNICATION.

57 Le système comprend une pluralité de dispositifs émetteurs et récepteurs, les liaisons entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs du système et les interférences en résultant pouvant être modélisées sous la forme d'un réseau à interférences asymétrique partiellement connecté. Le procédé selon l'invention comprend une étape de détermination d'au moins un filtre d'émission destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif émetteur du système et d'au moins un filtre de réception destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif récepteur du système, ledit au moins un filtre d'émission et ledit au moins un filtre de réception étant déterminés de sorte qu'après application desdits filtres, le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté peut être modélisé sous la forme de deux sous-réseaux isolés l'un par rapport à l'autre, des flux de données pouvant être transmis entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux, sans générer d'interférences les uns envers les autres.



Arrière-plan de l'invention

L'invention se rapporte au domaine général des télécommunications.

Elle concerne plus particulièrement une méthode de détermination de filtres d'émission et de réception destinés à être utilisés dans un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs qui, lorsqu'ils utilisent des ressources identiques pour communiquer simultanément (ex. fréquence), sont susceptibles de générer des interférences entre eux. Ces interférences représentent de façon connue un obstacle majeur dans les réseaux de télécommunications sans fil.

L'invention a une application privilégiée mais non limitative notamment dans le cas d'un réseau de télécommunications sans fil cellulaire, en voie descendante, dans lequel les dispositifs émetteurs sont par exemple des stations de base, chaque station de base étant associée à une cellule du réseau et servant une pluralité d'utilisateurs munis de dispositifs récepteurs tels que des terminaux.

Dans ce contexte, il est connu de modéliser les liaisons existant entre les stations de base et les terminaux et la topologie d'interférences en résultant, par un canal à interférences ou IBC pour Interference Broadcast Channel en anglais. Un canal IBC modélise un système (ou de façon équivalente, un réseau) de communication dans lequel plusieurs dispositifs émetteurs essaient de communiquer avec plusieurs dispositifs récepteurs mais chaque dispositif récepteur n'est lié qu'à un unique dispositif émetteur.

Des techniques efficaces d'élimination d'interférences existent pour ces canaux, telles que par exemple des techniques d'alignement d'interférences ou IA (pour Interference Alignment en anglais). Ces techniques IA consistent :

- d'une part, à confiner les interférences vues par un dispositif récepteur particulier dans un sous-espace vectoriel de dimension réduite en appliquant au signal utile, au niveau du dispositif émetteur servant ce dispositif récepteur, une matrice de précodage ou plus généralement un filtre d'émission, et
- d'autre part, à utiliser les dimensions restantes pour décoder le signal utile en le projetant sur un sous-espace vectoriel orthogonal au sous-espace vectoriel associé aux interférences.

Ces techniques IA permettent ainsi d'augmenter le gain de multiplexage dans les réseaux dans lesquels plusieurs dispositifs émetteurs utilisent la même ressource radio grâce à la mise en œuvre de méthodes de multiplexage (temporel, fréquentiel, etc.).

A cet effet, certaines de ces techniques décrites en particulier dans le document de V. Cadambe et al. intitulé « Interference alignment and degrees of freedom of the k-user interference channel », IEEE Transactions on Information Theory, vol. 54 n°8, 2008, utilisent des extensions de symboles, soit en temps soit en fréquence, dont la longueur tend vers l'infini en vue d'approcher un gain de multiplexage optimal : on les qualifie de techniques IA asymptotiques.

D'autres techniques, décrites par exemple dans le document de C. Yetis et al. intitulé « On feasibility of interference alignment in MIMO interference networks », IEEE Transactions on

Signal Processing, n°9, 2010, utilisent une réalisation de canal (i.e. pas d'extension de symboles) ou seulement un nombre limité de réalisations de canal pour étendre les symboles, et sont désignées par techniques IA linéaires.

Lorsqu'elles sont couplées à des dispositifs multi-antennes, ces techniques IA exploitent en outre la dimension spatiale offerte par l'utilisation d'antennes multiples au niveau des dispositifs émetteurs et des dispositifs récepteurs pour atteindre l'alignement d'interférences.

Dans le cadre de l'invention, on s'intéresse plus particulièrement à des systèmes de communication pouvant être modélisés par des canaux IBC asymétriques et partiellement connectés, du fait notamment que certains liens d'interférence dans le système sont assez faibles pour être ignorés. Un exemple d'un tel canal IBC asymétrique partiellement connecté est illustré à la **figure 1**.

Le canal IBC asymétrique de la figure 1 modélise un système de communication comprenant G cellules, chaque cellule étant associée à une station de base BS_i , $i=1, \dots, G$, $G > 1$, équipée d'un nombre NT_x d'antennes d'émission et servant $K+1=2$ terminaux d'utilisateurs UE_k , $k=1, \dots, K+1$. Chaque terminal est lié à une unique station de base.

Dans l'exemple illustré à la figure 1, on suppose que dans chaque cellule i , $i=1, \dots, G$, la station de base BS_i associée à cette cellule sert :

- un terminal dit isolé UE_{iso_i} , qui ne subit de l'interférence que de la part des signaux destinés aux autres terminaux de la cellule servis par la station de base BS_i (à savoir ici un terminal UE_2). Cette interférence dite multi-utilisateurs (ou MUI pour Multi-User Interference en anglais) provient des flux de données transmis par la station de base BS_i aux autres terminaux de la cellule en utilisant les mêmes ressources (ex. même intervalle de temps, même fréquence, etc.) que pour transmettre un flux de données à destination du terminal UE_{iso_i} ; et
- un terminal dit interféré UE_{int_i} , disposant de plusieurs antennes de réception et qui subit de l'interférence multi-utilisateurs de la part des signaux destinés aux autres terminaux de la cellule servis par la station de base BS_i (à savoir ici le terminal UE_{iso_i}), ainsi que des interférences de la part des terminaux des $G-1$ autres cellules (on parle d'interférence OCI pour Other Cell Interference en anglais). Cette interférence OCI est créée par les flux de données transmis par les stations de base des $G-1$ cellules avoisinantes à destination de leurs terminaux en utilisant les mêmes ressources que la station de base BS_i utilise pour communiquer avec le terminal UE_{int_i} .

Ce type de situation peut être rencontré notamment lorsque des cellules de petites dimensions sont déployées dans un réseau de télécommunications dans lesquelles certains terminaux sont en ligne de mire de la station de base (autrement dit ont une composante directe (ou « Line of Sight » en anglais) dominante), de sorte que l'interférence provenant des autres cellules peut être négligée pour ces terminaux.

La connectivité partielle du canal IBC peut être bénéfique pour les performances du système en ce qu'elle offre un degré de liberté supplémentaire pour éliminer l'interférence. Toutefois la prise en compte de ce degré de liberté constitue en soi un véritable challenge.

L'article de L. Ruan et al. intitulé « Interference alignment for partially connected MIMO cellular networks », IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 59 n°8, 2011, propose une solution d'alignement d'interférences linéaire permettant d'exploiter la connectivité partielle du canal IBC. Cette solution repose sur l'identification d'une affectation de flux au sein du système permettant l'application d'une technique IA linéaire simple sans extension de symbole, et la maximisation du nombre de degrés de liberté offerts par le système.

Toutefois cette solution s'appuie sur une recherche heuristique de l'affectation de flux optimale qui peut s'avérer délicate à mettre en œuvre.

Objet et résumé de l'invention

L'invention permet notamment de pallier cet inconvénient en proposant un procédé de détermination de filtres d'émission et de réception destinés à être utilisés dans un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, les liaisons entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs du système et les interférences en résultant pouvant être modélisées sous la forme d'un réseau à interférences asymétrique partiellement connecté, ce procédé comprenant une étape de détermination d'au moins un filtre d'émission destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif émetteur du système et d'au moins un filtre de réception destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif récepteur du système, ledit au moins un filtre d'émission et ledit au moins un filtre de réception étant déterminés de sorte qu'après application des filtres, le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté peut être modélisé sous la forme de deux sous-réseaux isolés l'un par rapport à l'autre, des flux de données pouvant être transmis entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux sans générer d'interférences les uns envers les autres.

Corrélativement, l'invention vise aussi une unité centrale d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, les liaisons entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs du système et les interférences en résultant pouvant être modélisées sous la forme d'un réseau à interférences asymétrique partiellement connecté, cette unité centrale comprenant un module de détermination d'au moins un filtre d'émission destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif émetteur du système et d'au moins un filtre de réception destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif récepteur du système, ledit au moins un filtre d'émission et ledit au moins un filtre de réception étant déterminés de sorte qu'après application des filtres, le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté peut être modélisé sous la forme de deux sous-réseaux isolés l'un par rapport à l'autre, des flux de données pouvant être transmis entre les dispositifs émetteurs et les

dispositifs récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux sans générer d'interférences les uns envers les autres.

Ainsi, l'invention propose d'utiliser un premier niveau de filtres d'émission et de réception afin de transformer le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté initial
5 modélisant le système de communication en deux sous-réseaux isolés l'un de l'autre.

Par « isolés », on entend au sens de l'invention que des flux de données peuvent être transmis entre les émetteurs et les récepteurs de ces deux sous-réseaux de façon indépendante, c'est-à-dire sans que les flux de données émis sur un sous-réseau par des dispositifs émetteurs (ex. stations de base) ne génèrent d'interférences sur les flux de données reçus par les dispositifs
10 récepteurs (ex. terminaux) de l'autre sous-réseau et inversement.

Cette séparation en deux sous-réseaux indépendants s'appuie avantageusement sur la connectivité partielle du réseau. La connectivité partielle du réseau traduit l'existence au niveau du système de communication de dispositifs récepteurs qui ne subissent pas ou peu (i.e. en quantité négligeable) d'interférences OCI provenant de signaux émis par des dispositifs émetteurs du
15 réseau autres que les dispositifs émetteurs auxquels ces dispositifs récepteurs sont liés. Dans l'exemple illustré à la figure 1, ces dispositifs sont les dispositifs récepteurs isolés UE_{iso_i} , $i=1,...,G$. Il convient de noter que ces dispositifs récepteurs isolés subissent en revanche des interférences de type MUI provenant des flux de données destinés aux autres dispositifs récepteurs rattachés au même dispositif émetteur qu'eux.

La séparation en deux sous-réseaux exploite cette caractéristique en isolant ces dispositifs récepteurs isolés non seulement des interférences de type OCI, mais également des interférences provenant des signaux destinés aux autres dispositifs récepteurs rattachés aux mêmes dispositifs émetteurs qu'eux (c'est-à-dire dans l'exemple de la figure 1, pour un dispositif récepteur isolé UE_{iso_i} connecté à un dispositif émetteur BS_i , de l'autre dispositif récepteur UE_{int_i}
25 connecté au dispositif émetteur BS_i).

En d'autres mots, on obtient dans un premier sous-réseau G liens à entrée unique et sortie unique (i.e. SISO pour Soft Input Soft Output) indépendants et parallèles reliant les dispositifs émetteurs et des dispositifs récepteurs du premier sous-réseau. Le second sous-réseau étant indépendant du premier, les dispositifs récepteurs de ce second sous-réseau sont maintenant
30 perturbés uniquement par les interférences provenant des signaux émis par les dispositifs émetteurs autres que les dispositifs émetteurs auxquels ils sont liés (et qui sont destinés aux autres dispositifs récepteurs interférés). Autrement dit, ce second sous-réseau est maintenant un canal SISO à interférences à G utilisateurs ou canal SISO IC à G utilisateurs, bien connu de l'homme du métier. Un tel canal SISO IC à G utilisateurs est souvent défini comme un canal
35 comprenant G paires « émetteur-récepteur » partageant la même ressources pour communiquer, chaque transmission par un dispositif émetteur de flux de données à destination du dispositif récepteur avec lequel il forme une paire générant, en l'absence de traitement, des interférences

pour tous les dispositifs récepteurs autres que le dispositif récepteur avec lequel le dispositif émetteur forme une paire.

Cette séparation des deux sous-réseaux permet avantageusement de pouvoir appliquer des traitements différents et efficaces aux communications émises indépendamment sur les deux sous-réseaux, et de simplifier ainsi les traitements mis en œuvre. Ces traitements peuvent s'appuyer notamment sur des traitements connus de l'état de la technique.

Ainsi, par exemple, du fait de la nature des liens du premier sous-réseau, il est possible de n'appliquer aucun traitement supplémentaire aux communications sur ces liens (transmission point-à-point), tandis que sur le second sous-réseau, des traitements de type alignement d'interférences peuvent être envisagés pour chaque dispositif récepteur. Ces traitements d'alignement d'interférences se traduisent par l'application au niveau des dispositifs émetteurs et récepteurs du deuxième sous-réseau d'un second niveau de filtres d'émission et de réception, qui vient compléter le premier niveau de filtres sur lequel s'appuie l'invention.

Grâce à la séparation en deux sous-réseaux indépendants permise par l'invention, les inventeurs ont observé une amélioration du gain de multiplexage par rapport aux techniques d'alignement d'interférences de l'état de l'art, c'est à dire à une augmentation du nombre de flux qui peuvent être attribués simultanément dans le système de communication en utilisant les mêmes ressources. Les performances du système de communication sont par ailleurs non seulement améliorées à fort rapport signal-à-bruit mais également pour des valeurs faibles à moyennes de ce rapport.

Il convient de noter que contrairement à l'état de l'art, l'invention ne nécessite pas de recherche heuristique pour tirer profit de la connectivité partielle du système de communication, mais s'appuie uniquement sur l'usage de filtres d'émission et de réception ce qui simplifie grandement son implémentation.

Par ailleurs, le procédé de détermination selon l'invention s'applique non seulement à un système de communication pouvant être modélisé par un canal IBC asymétrique partiellement connecté comme illustré à la figure 1, mais également à une configuration duale de ce canal dans laquelle plusieurs canaux d'accès interfèrent entre eux et qui peut être modélisé par un canal interférent à accès multiple ou canal IMAC (pour Interfering Multiple Access Channel). Un tel canal peut être considéré pour modéliser par exemple un réseau cellulaire hétérogène comprenant des macro-cellules dans lesquelles se trouve des terminaux d'utilisateurs et qui créent des interférences. Ces terminaux se trouvent par ailleurs également dans la portée de cellules plus petites qui ne créent pas d'interférences.

Ainsi, dans un premier mode de réalisation :

- le système de communication comprend G dispositifs émetteurs et $K+1$ dispositifs récepteurs liés à chaque dispositif émetteur, G désignant un entier supérieur à 1 et K désignant un entier supérieur ou égal à 1, chaque dispositif émetteur ayant N_{Tx} antennes d'émission et étant lié à au moins un dispositif récepteur dit isolé ayant N_{iso} antenne de réception et à un dispositif

récepteur dit interféré ayant Nint antennes de réception, ledit au moins un dispositif récepteur isolé subissant des interférences provenant de flux de données émis par ledit dispositif émetteur et le dispositif récepteur interféré subissant des interférences provenant de flux de données émis par ledit dispositif émetteur et par au moins un autre dispositif émetteur du système de communication ; et

— les filtres d'émission et de réception sont déterminés au cours de l'étape de détermination de sorte que :

$$H_{ij}^{iso} W_i(m) = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, G, j = 1, \dots, K, m = 1, \dots, K + 1, \text{ avec } m \neq j ;$$

et pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{rang}[H_{i1}^{int} W_1(1) \ H_{i1}^{int} W_1(2) \dots H_{i1}^{int} W_1(K) \ H_{i2}^{int} W_2(1) \ H_{i2}^{int} W_2(2) \dots H_{i2}^{int} W_2(K) \dots \\ \dots H_{iG}^{int} W_G(1) \ H_{iG}^{int} W_G(2) \dots H_{iG}^{int} W_G(K)] = K(G - 1)$$

où :

- H_{ij}^{iso} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur i et le dispositif récepteur isolé j lié à ce dispositif émetteur i , $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, K$;
- H_{ij}^{int} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur j et le dispositif récepteur interféré lié au dispositif émetteur i , $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, G$; et
- $W_i = [W_i(1), \dots, W_i(K + 1)]$, $i=1, \dots, G$, désigne le filtre d'émission appliqué par le dispositif émetteur i .

Les nombres d'antennes NTx, Niso et Nint vérifient préférentiellement :

$$NTx > K.Niso$$

$$\text{et } Nint \geq (G-2).K.Niso + NTx$$

Autrement dit, l'invention ne se limite pas à la configuration de la figure 1, mais peut être utilisée dans de nombreuses configurations d'utilisateurs isolés, et d'antennes au niveau des dispositifs émetteurs et des dispositifs récepteurs interférés. Le nombre d'antennes au niveau des récepteurs isolés peut être quelconque. Ainsi, à titre illustratif, on a par exemple : $Niso = 1$, $NTx = K+1$ et $Nint = K.(G-1)+1$.

Ce premier mode de réalisation concerne de façon privilégiée les systèmes de communication multi-antennes (ou MIMO pour Multiple Input Multiple Output en anglais) pouvant être modélisés par un canal IBC asymétrique partiellement connecté. De tels systèmes peuvent être rencontrés notamment dans les deux cas pratiques suivants :

— certains utilisateurs sont en bordure de cellule et subissent par conséquent des interférences des autres cellules (dispositifs récepteurs interférés au sens de l'invention). D'autres utilisateurs sont au contraire plus proches de la station de base servant la cellule dans laquelle ils se trouvent et ne subissent pas d'interférences des autres cellules (dispositifs récepteurs isolés au sens de l'invention). La présence d'une composante directe (LOS ou Line of Sight)

peut se traduire par une matrice de canal de rang 1 quel que soit le nombre d'antennes considéré au niveau d'un dispositif récepteur isolé ;

- le déploiement dense de petites cellules est un autre contexte dans lequel des configurations comme celle considérée se présentent. En effet, une densité de stations de base plus élevée augmente la possibilité d'être couvert par plusieurs stations de base et avec la topologie des villes, il est possible d'avoir des terminaux d'utilisateurs isolés et d'autres interférés. Encore une fois, une composante LOS justifie le fait que certains terminaux d'utilisateurs isolés voient seulement un canal de rang 1.

Dans ce premier mode de réalisation, l'application des filtres d'émission et de réception déterminés conformément à l'invention permet d'obtenir, comme souligné précédemment :

- un premier sous-réseau comprenant les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs isolés qui leur sont liés, et dans lequel les dispositifs récepteurs isolés sont non seulement isolés des interférences provenant des autres dispositifs émetteurs en raison de la connectivité partielle (c'est-à-dire des autres cellules lorsqu'un dispositif émetteur est associé à une cellule), mais également isolés des interférences multi-utilisateurs générées par les signaux destinés aux dispositifs récepteurs liés au même dispositif émetteur (dans l'exemple du réseau cellulaire, qui se trouvent au sein de la même cellule). Autrement dit, au sein de ce réseau, après la séparation, on obtient G liens parallèles et indépendants pouvant être modélisés chacun par un canal à entrée unique et sortie unique (ou SISO pour Single Input Single Output) ne nécessitant pas ou peu de traitement ; et
- un second sous-réseau comprenant les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs interférés qui leur sont liés, et dans lequel les dispositifs récepteurs interférés subissent des interférences de la part des autres dispositifs émetteurs (autrement dit les interférences OCI), mais ne subissent pas d'interférences dues aux flux destinés aux dispositifs récepteurs isolés émis par les dispositifs émetteurs auxquels ils sont liés. En d'autres termes, on obtient un canal SISO à interférences (IC) à G utilisateurs. Les communications sur un tel canal peuvent aisément être traitées en utilisant par exemple une technique d'annulation d'interférence connue (ex. technique IA linéaire), se traduisant par l'application d'un second niveau de filtres d'émission et de réception.

Dans ce premier mode de réalisation, le premier sous-réseau peut être obtenu aisément grâce à l'application d'un simple précodage de forçage à zéro (ou ZF pour Zero Forcing en anglais). Le second sous-réseau peut être obtenu en alignant les interférences provenant des flux affectés aux dispositifs récepteurs isolés en s'appuyant sur les antennes multiples en réception des dispositifs récepteurs interférés. L'interférence provenant des autres dispositifs émetteurs et due à l'émission de signaux destinés à des dispositifs récepteurs interférés n'est pas prise en compte à ce stade pour déterminer les filtres d'émission et de réception. Cette interférence est en effet naturellement présente dans un canal à interférences ou canal IC et peut être prise en

compte aisément ultérieurement en appliquant des traitements adaptés aux canaux IC sur le second sous-réseau.

Dans l'exemple illustratif donné précédemment ($N_{iso} = 1$, $N_{Tx}=K+1$ et $N_{int}=K.(G-1)+1$), chaque dispositif récepteur interféré dispose de $K.(G-1)+1$ antennes de réception. Pour créer le second sous-réseau, l'alignement d'interférences peut être réalisé au niveau de chaque dispositif récepteur sur $K.(G-1)$ dimensions. En effet, n'importe quel dispositif récepteur interféré reçoit des interférences provenant des autres cellules (i.e. des autres dispositifs émetteurs que celui auquel il est lié) et des dispositifs récepteurs isolés présents dans ces cellules sur un sous-espace de $K.(G-1)$ dimensions. Il suffit donc que le dispositif émetteur auquel le dispositif récepteur interféré considéré est lié s'assure que l'interférence multi-utilisateurs qu'il génère au sein de sa cellule est alignée dans cet espace à $K.(G-1)$ dimensions, qui peut être ensuite forcé à zéro puisque le dispositif récepteur dispose de $K.(G-1)+1$ antennes. De cette manière, les dispositifs récepteurs interférés disposent toujours d'une dimension (i.e. une antenne de réception « virtuelle » créée à cet effet) pour recevoir leur signal utile sans autre interférences que celles d'un canal IC.

Dans une variante de réalisation, les filtres d'émission et de réception sont déterminés au cours de l'étape de détermination en appliquant une technique itérative.

Cette technique itérative permet de simplifier le calcul des filtres d'émission et de réception.

Cette technique itérative comprend par exemple les étapes suivantes :

(A) pour chaque dispositif récepteur interféré, sélectionner un filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times N_{int}}$ normalisé et déterminer les filtres d'émission suivantes pour chaque dispositif émetteur :

$$\forall i \in [1, G], W_i = \begin{pmatrix} H_i^{iso} \\ a_i H_{ii}^{int} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$\text{où } H_i^{iso} = \begin{pmatrix} H_{i1}^{iso} \\ H_{i2}^{iso} \\ \dots \\ H_{iK}^{iso} \end{pmatrix};$$

(B) pour chaque itération d'une pluralité d'itérations, mettre à jour le filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times (N_{int})}$ de chaque dispositif récepteur interféré et le filtre d'émission de chaque dispositif émetteur selon :

$$a_1 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{12}^{\text{int}} W_2(1))^T \\ (H_{12}^{\text{int}} W_2(2))^T \\ \dots \\ (H_{12}^{\text{int}} W_2(K))^T \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(1))^T \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(K))^T \\ \dots \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_G(1))^T \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_1 = \begin{pmatrix} H_1^{\text{iso}} \\ a_1 H_{11}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$a_2 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{21}^{\text{int}} W_1(1))^T \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(2))^T \\ \dots \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(K))^T \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(1))^T \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(K))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(1))^T \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_2 = \begin{pmatrix} H_2^{\text{iso}} \\ a_2 H_{22}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

...

- le système comprend G dispositifs récepteurs et $K+1$ dispositifs émetteurs liés à chaque dispositif récepteur (soit un total de $G.(K+1)$ émetteurs), G et K désignant des entiers supérieurs ou égaux à 1, chaque dispositif récepteur ayant NRx antennes de réception et étant lié à au moins un dispositif émetteur dit non interférent ayant $Niso$ antennes d'émission et à un
- 5 dispositif émetteur dit interférent ayant $Nint$ antennes d'émission, ledit au moins un dispositif émetteur non interférent ne créant pas d'interférences vers les dispositifs récepteurs autres que celui auquel il est lié et le dispositif émetteur interférent créant des interférences vers tous les dispositifs récepteurs ; et
- les filtres d'émission $b_i \in \mathbb{C}^{(Nint) \times 1}$ pour $i = 1, \dots, G$ destinés à être appliqués par les
- 10 dispositifs émetteurs interférents et les filtres de réception $B_i \in \mathbb{C}^{(NRx) \times 1}$ pour $i = 1, \dots, G$ destinés à être appliqués par les dispositifs récepteurs sont déterminés au cours de l'étape de détermination de sorte que :

$$B_j(m)H_{ij}^{sc} = 0 \quad \text{pour } i = 1, \dots, K, j = 1, \dots, G, m = 1, \dots, K + 1, \text{ avec } m \neq j ;$$

15 et pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{Rang} \begin{bmatrix} B_1(1)H_{i1}^{mc} \\ B_1(2)H_{i1}^{mc} \\ \dots \\ B_1(K)H_{i1}^{mc} \\ B_2(1)H_{i2}^{mc} \\ B_2(2)H_{i2}^{mc} \\ \dots \\ B_2(K)H_{i2}^{mc} \\ \dots \dots \\ B_G(1)H_{iG}^{mc} \\ B_G(2)H_{iG}^{mc} \\ \dots \\ B_G(K)H_{iG}^{mc} \end{bmatrix} = K(G - 1)$$

où :

- 20 • H_{ij}^{sc} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur non interférent i et le dispositif récepteur j lié à ce dispositif émetteur, $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, K$;
- H_{ij}^{mc} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur interférent i et le dispositif récepteur j , $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, G$; et
- $B_i = \begin{bmatrix} B_i(1) \\ B_i(2) \\ \dots \\ B_i(K + 1) \end{bmatrix}$, $i=1, \dots, G$, désigne le filtre de réception appliqué par le récepteur i .

Dans ce second mode de réalisation, les nombres d'antennes NRx, Niso et Nint vérifient préférentiellement :

$$NRx > K.Niso$$

$$\text{et } Nint \geq (G-2).K.Niso + NRx$$

5 Ce second mode de réalisation concerne donc les systèmes de communication multi-antennes (ou MIMO pour Multiple Input Multiple Output en anglais) pouvant être modélisés par un canal IMAC asymétrique partiellement connecté. Un tel système peut être rencontré notamment dans les réseaux hétérogènes. Il correspond par exemple à G utilisateurs équipés de dispositifs récepteurs ayant chacun deux antennes de réception, et qui sont servis chacun par une
10 macro cellule associée à une station de base (dispositif émetteur) multi-antennes et par une petite cellule. Dans cette configuration, les cellules macro génèrent des interférences mais pas les petites cellules en raison de leur plus faible puissance. La station de base de la macro-cellule a par exemple au moins G antennes tandis que la station de base de la petite cellule n'a qu'une seule antenne d'émission pour servir l'utilisateur se trouvant dans la petite cellule. Dans une telle cellule
15 (petite cellule) les utilisateurs sont souvent en ligne de mire de la station de base ce qui justifie le fait de n'avoir qu'une seule antenne d'émission. En variante, plusieurs antennes d'émission peuvent être considérées, la matrice du canal entre la station de base et l'utilisateur étant cependant de rang 1 en raison de la visibilité directe entre la station de base et l'utilisateur.

Ainsi, toute solution proposée par l'invention pour le problème d'origine posé par les
20 canaux IBC asymétriques partiellement connectés peut être utilisée sur le réseau dual grâce au principe de dualité IMAC-IBC.

Dans un mode particulier de réalisation, les différentes étapes du procédé de détermination selon l'invention sont déterminées par des instructions de programmes d'ordinateurs.

25 En conséquence, l'invention vise aussi un programme d'ordinateur sur un support d'informations, ce programme étant susceptible d'être mis en œuvre dans une unité centrale ou plus généralement dans un ordinateur, ce programme comportant des instructions adaptées à la mise en œuvre des étapes d'un procédé de détermination tel que décrit ci-dessus.

Ce programme peut utiliser n'importe quel langage de programmation, et être sous la
30 forme de code source, code objet, ou de code intermédiaire entre code source et code objet, tel que dans une forme partiellement compilée, ou dans n'importe quelle autre forme souhaitable.

L'invention vise aussi un support d'informations lisible par un ordinateur, et comportant des instructions d'un programme d'ordinateur tel que mentionné ci-dessus.

Le support d'informations peut être n'importe quelle entité ou dispositif capable de
35 stocker le programme. Par exemple, le support peut comporter un moyen de stockage, tel qu'une ROM, par exemple un CD ROM ou une ROM de circuit microélectronique, ou encore un moyen d'enregistrement magnétique, par exemple une disquette (floppy disc) ou un disque dur.

D'autre part, le support d'informations peut être un support transmissible tel qu'un signal électrique ou optique, qui peut être acheminé via un câble électrique ou optique, par radio ou par d'autres moyens. Le programme selon l'invention peut être en particulier téléchargé sur un réseau de type Internet.

5 Alternativement, le support d'informations peut être un circuit intégré dans lequel le programme est incorporé, le circuit étant adapté pour exécuter ou pour être utilisé dans l'exécution du procédé en question.

Selon un autre aspect, l'invention vise aussi un dispositif émetteur d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs
10 récepteurs, ledit dispositif émetteur étant lié à au moins un dispositif récepteur du système de communication et comprenant :

- un module d'obtention d'un filtre d'émission déterminé par une unité centrale selon l'invention ;
- un module d'application dudit filtre d'émission lors d'une communication avec ledit au moins un
15 dispositif récepteur.

Dans une variante de réalisation dans ce dispositif émetteur, le module d'application est en outre apte à appliquer un second filtre d'émission lors de ladite communication résultant de l'application d'une technique d'alignement d'interférences entre le dispositif émetteur et un dispositif récepteur du système de communication lié au dispositif émetteur.

20 L'invention vise également selon un autre aspect encore un dispositif récepteur d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, ledit dispositif récepteur étant lié à au moins un dispositif émetteur du système de communication et comprenant :

- un module d'obtention d'un filtre de réception déterminé par une unité centrale selon
25 l'invention ;
- un module d'application du filtre de réception lors d'une communication avec ledit au moins un dispositif émetteur.

Dans une variante de réalisation, le module d'application de ce dispositif récepteur est en outre apte à appliquer un second filtre de réception lors de ladite communication résultant de l'application d'une technique d'alignement d'interférences entre ledit dispositif récepteur et un
30 dispositif émetteur du système de communication auquel est lié le dispositif récepteur.

Selon un autre aspect, l'invention concerne également un système communication comprenant :

- une unité centrale selon l'invention ;
- 35 — une pluralité de dispositifs émetteurs selon l'invention ; et
- une pluralité de dispositifs récepteurs selon l'invention.

Dans un mode de réalisation, au moins un dispositif émetteur est lié à une pluralité de dispositifs récepteurs, et au moins un dispositif récepteur est lié à un unique dispositif émetteur.

Ce mode de réalisation concerne plus particulièrement les canaux IBC asymétriques partiellement connectés.

Dans un autre mode de réalisation, au moins un dispositif récepteur est lié à une pluralité de dispositifs émetteurs, et au moins dispositif émetteur est lié à un unique dispositif émetteur.

Ce mode de réalisation concerne plus particulièrement la configuration duale des canaux IBC asymétriques partiellement connectés, à savoir les canaux IMAC. Ainsi, avantageusement, toute solution pour le problème d'origine peut être utilisée sur le réseau dual grâce au principe de dualité IMAC-IBC.

Le dispositif émetteur, le dispositif récepteur et le système bénéficient des mêmes avantages que ceux cités précédemment pour le procédé de détermination et l'unité centrale selon l'invention.

On peut également envisager, dans d'autres modes de réalisation, que le procédé de détermination, l'unité centrale, le dispositif émetteur, le dispositif récepteur et le système de communication selon l'invention présentent en combinaison tout ou partie des caractéristiques précitées.

Brève description des dessins

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention ressortiront de la description faite ci-dessous, en référence aux dessins annexés qui en illustrent des exemples de réalisation dépourvus de tout caractère limitatif. Sur les figures :

- la figure 1, déjà décrite, représente un modèle de canal IBC à interférences, asymétrique et partiellement connecté auquel peut être appliquée l'invention ;
- la figure 2 représente, de façon schématique, un système de communication conforme à l'invention, dans son environnement, dans un premier mode de réalisation dans lequel ce système de communication peut être modélisé par le canal IBC de la figure 1 ;
- la figure 3 illustre l'architecture d'une unité centrale du système de communication de la figure 2 ;
- la figure 4 représente, sous forme d'ordinogrammes, les principales étapes d'un procédé de détermination selon l'invention lorsqu'il est mis en œuvre par l'unité centrale du système de communication de la figure 2 ;
- la figure 5 illustre schématiquement les deux sous-réseaux indépendants obtenus conformément à l'invention à partir du canal IBC de la figure 1 ;
- les figures 6A et 6B illustrent les performances atteintes par le système de communication de la figure 2 en termes de degré de libertés et de débit atteint ;
- la figure 7 représente, de façon schématique, un système de communication conforme à l'invention, dans son environnement, dans un second mode de réalisation dans lequel ce

système de communication peut être modélisé par un canal IMAC asymétrique partiellement connecté ;

— la figure 8 représente un modèle de canal IMAC asymétrique partiellement connecté pouvant être utilisé pour modéliser le système de communication de la figure 7 ; et

5 — la figure 9 illustre schématiquement les deux sous-réseaux indépendants obtenus conformément à l'invention à partir du canal IMAC de la figure 8.

Description détaillée de l'invention

Comme mentionné précédemment, l'invention s'applique à différentes configurations
10 de systèmes de communication. Plus précisément, elle a une application privilégiée lorsque les liaisons entre les dispositifs émetteurs et récepteurs et les topologies d'interférences au sein du système de communication considéré peuvent être modélisées par un canal IBC asymétrique partiellement connecté ou par une configuration duale de ce canal, à savoir par un canal IMAC asymétrique partiellement connecté. Ces deux configurations (IBC et IMAC) constituent des
15 réseaux à interférences asymétriques et partiellement connectés au sens de l'invention. Nous allons, dans la suite de la description, envisager ces deux configurations dans deux modes de réalisation distincts du système de communication.

Quelle que soit la configuration envisagée de réseau à interférences, l'invention est remarquable en ce qu'elle propose de déterminer des filtres d'émission et de réception destinés à
20 être appliqués respectivement au niveau des dispositifs émetteurs et des dispositifs récepteurs du système de communication, et qui présentent avantageusement la caractéristique de séparer le réseau à interférences initial en deux sous-réseaux indépendants l'un de l'autre. Plus précisément, après séparation, les flux de données échangés entre les nœuds (dispositifs émetteurs et récepteurs) d'un sous-réseau n'interfèrent pas sur les flux de données échangés entre les nœuds
25 de l'autre sous-réseau et inversement. Il est alors possible de traiter de façon indépendante et relativement simple les communications échangées sur ces deux sous-réseaux, en utilisant par exemple à cet effet des techniques connues de l'état de la technique (ex. technique IA linéaire).

Nous allons maintenant illustrer plus précisément les principales étapes mises en œuvre lors de la détermination de ces filtres, dans un premier mode de réalisation de l'invention
30 dans lequel celle-ci est appliquée à un système de communication modélisé à l'aide d'un canal IBC asymétrique partiellement connecté tel que représenté à la figure 1.

La **figure 2** représente, de façon schématique, un système de communication 1 conforme à l'invention, dans ce premier mode de réalisation.

Le système de communication 1 comprend une unité centrale 2, une pluralité de
35 dispositifs émetteurs 3 et une pluralité de dispositifs récepteurs 4, tous conformes à l'invention.

Dans l'exemple envisagé à la figure 2, les dispositifs émetteurs sont des stations de base BS1, BS2,...,BSG, avec G, entier supérieur à 1, chaque station de base étant associée à une cellule distincte, dans laquelle se trouvent K+1 utilisateurs, K désignant un entier supérieur ou égal

à 1. Les dispositifs récepteurs 4 sont des terminaux de ces utilisateurs. Aucune limitation n'est attachée au type de terminaux envisagés.

Par souci de simplification dans la suite de la description, on considère $K=1$. Ainsi, dans l'exemple représenté sur la figure 2, la station de base BS1 est liée à deux terminaux UEiso_1 et UEint_1, la station de base BS2 est liée à deux terminaux UEiso_2 et UEint_2, etc.

Chaque station de base BSi, $i=1,...,G$ est équipé ici de $NTx=2$ antennes d'émission. Chaque terminal UEint_i lié à la station de base BSi est équipé de $Nint=K.(G-1)+1=G$ antennes de réception. Chaque terminal UEiso_i lié à la station de base BSi est équipé de $Niso=1$ antenne de réception.

En variante d'autres configurations d'antennes peuvent être envisagées comme mentionné ultérieurement.

Dans chaque cellule, le terminal UEiso_i est supposé isolé des interférences créées par les autres cellules (c'est-à-dire par les flux de données transmis simultanément par les autres stations de base que la station de base BS_i) : on le désigne par terminal isolé. Le terminal UEint_i subit quant à lui des interférences des autres cellules : on le désigne par terminal interféré. Les terminaux UEiso_i et UEint_i subissent par ailleurs des interférences (multi-utilisateurs) causées par la transmission de flux de données vers des terminaux autres que eux-mêmes liés à la station de base BSi, autrement dit dans le cas représenté à la figure 2, le terminal UEiso_i subit de l'interférence multi-utilisateur due au flux émis par la station de base BSi à destination du terminal UEint_i et le terminal UEint_i subit de l'interférence multi-utilisateur due au flux émis par la station de base BSi à destination du terminal UEiso_i.

Dans la suite du document, par « le terminal UEiso_i (respectivement UEint_i) subit des interférences de la part du terminal UEint_i (respectivement UEiso_i) », on entend au sens de l'invention que les flux de données émis par la station de base BSi et destinés au terminal UEint_i (respectivement UEiso_i) interfèrent les flux de données transmis simultanément par la station de base BSi et destinés au terminal UEiso_i (respectivement UEint_i) et qui représentent le signal utile destiné à ce terminal.

On comprend bien dès lors que les liaisons entre les stations de base et les terminaux du système de communication 1, ainsi que la topologie d'interférences en découlant, peuvent être modélisées par un canal IBC asymétrique partiellement connecté tel que représenté à la figure 1. Les connections partielles à gauche des stations de base traduisent l'absence d'interférences en provenance des autres cellules au niveau des terminaux isolés UEiso_1,...,UEiso_G, tandis qu'à droite des stations de base, la connectivité totale traduit le fait que les terminaux interférés subissent à la fois de l'interférence multi-utilisateurs en provenance de leur propre cellule et des interférences des autres cellules.

Conformément à l'invention, l'unité centrale 2 est apte à tenir compte de la connectivité partielle du système de communication 1 pour améliorer les performances de ce dernier. Plus précisément, l'unité centrale 2 est apte à déterminer des filtres d'émission et de

réception destinés à être appliqués respectivement par les stations de base et les terminaux interférés du système 1, et qui sont déterminés de telle façon qu'après application de ces filtres, le canal IBC asymétrique partiellement connecté de la figure 1 est séparé en deux sous-réseaux indépendants l'un de l'autre, c'est-à-dire qui ne génèrent pas d'interférences l'un sur l'autre.

5 L'unité centrale 2 a dans le premier mode de réalisation décrit ici l'architecture matérielle d'un ordinateur telle qu'illustrée schématiquement à la **figure 3**. Elle comprend notamment un processeur 5, une mémoire vive 6, une mémoire morte 7, une mémoire non volatile réinscriptible 8, ainsi que des moyens de communication 9 avec les stations de base BS1,...,BSG et les terminaux UEiso_1,...,UEiso_G et UEint_1,...,UEint_G du système de communication 1.

10 La mémoire morte 7 de l'unité centrale 2 constitue un support d'enregistrement conforme à l'invention, lisible par le processeur 5 et sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur conforme à l'invention, comportant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé de détermination de filtres conforme à l'invention, décrit ultérieurement en référence à la figure 4, dans une variante particulière de réalisation.

15 Ce programme d'ordinateur définit de façon équivalente des modules fonctionnels de l'unité centrale 2 (modules logiciels ici), et notamment dans le premier mode de réalisation décrit ici, un module d'obtention 2A d'estimations des canaux de propagation entre les dispositifs émetteurs 3 (stations de base) et les dispositifs récepteurs 4 (terminaux isolés et interférés) du système de communication 1, un module de détermination 2B de filtres d'émission et de réception à appliquer au niveau des dispositifs émetteurs 3 et des dispositifs récepteurs 4, un module de
20 fourniture 2C des filtres ainsi déterminés aux dispositifs émetteurs 3 et aux dispositifs récepteurs 4. Les fonctions de ces modules sont décrites ultérieurement plus en détail en référence aux étapes du procédé de détermination.

Dans la suite de la description, on désigne par :

25 — $H_i^{iso}[t] \in \mathbb{C}^{1 \times NTx} = \mathbb{C}^{1 \times 2}$, $i=1,...,G$, la matrice représentant, à l'instant t , les coefficients du canal de propagation entre les antennes d'émission de la station de base BSi servant la cellule i et l'unique antenne de réception du terminal isolé UEiso_ i , et par

— $H_{ji}^{int}[t] \in \mathbb{C}^{Nint \times NTx} = \mathbb{C}^{G \times 2}$, $i, j=1,...,G$, la matrice représentant à l'instant t les coefficients du canal de propagation entre les antennes d'émission de la station de base BSi servant la cellule i
30 et les antennes de réception du terminal interféré UEint_ j se trouvant dans la cellule j .

Les flux de données (symboles) transmis à l'instant t par la station de base BSi, $i=1,...,G$ sont notés $X_i[t]$.

La sortie du canal de propagation $y_j^{int}[t]$ observée à l'instant t au niveau du terminal interféré UEint_ j se trouvant dans la cellule j est une combinaison linéaire bruitée des flux de
35 données émis par les différentes stations de base BSi, $i=1,...,G$. Autrement dit :

$$y_j^{int}[t] = \sum_{i=1}^G H_{ji}^{int}[t] X_i[t] + Z_j^{int}[t]$$

où $Z_j^{int}[t]$ désigne un bruit blanc additif gaussien de variance σ^2 au terminal UEint_j interféré de la cellule j.

La sortie du canal de propagation $Y_j^{iso}[t]$ observée à l'instant t au niveau du terminal isolé UEiso_j se trouvant dans la cellule j est une combinaison linéaire bruitée des flux de données émis par la station de base BSj de la cellule j uniquement, soit :

$$Y_j^{iso}[t] = H_j^{iso}[t]X_j[t] + Z_j^{int}[t]$$

où $Z_j^{iso}[t]$ désigne un bruit blanc additif gaussien de variance σ^2 au terminal UEiso_j isolé de la cellule j.

Nous allons maintenant, sur la base de ces notations et en référence à la **figure 4**, décrire les principales étapes du procédé de détermination selon l'invention telles qu'elles sont mises en œuvre dans le premier mode de réalisation par l'unité centrale 2 de la figure 2.

On suppose que l'unité centrale 2 obtient en préliminaire, via son module 2A, une estimation des coefficients complexes des matrices H_{ij}^{int} et H_{ij}^{iso} , $i,j=1,...,G$ des canaux de propagation séparant les dispositifs émetteurs (stations de base) 3 des dispositifs récepteurs 4 (terminaux) du système de communication 1 (étape E10). L'obtention d'une telle estimation de canal ou CSI (pour Channel State Information en anglais) ne pose aucune difficulté pour l'homme du métier et n'est pas décrite en détail ici.

Puis il identifie à partir de ces estimations, par le biais de son module 2A, les terminaux isolés UEiso_i (c'est-à-dire qui ne subissent que des interférences MUI) et les terminaux interférés UEint_i (qui subissent des interférences MUI et OCI des autres cellules) pour chaque cellule i, $i=1,...,G$, (par exemple en comparant, de façon connue en soi, les estimations des canaux de propagation par rapport à un seuil prédéterminé) (étape E20).

Comme mentionné précédemment, la configuration du système de communication 1 en termes de liaisons et d'interférences est similaire à celle d'un canal IBC asymétrique partiellement connecté tel qu'illustré à la figure 1.

Conformément à l'invention, le module 2B de l'unité centrale 2 divise ce canal IBC en deux sous-réseaux isolés SubNW1 et SubNW2 comme représenté à la **figure 5**, en déterminant des filtres d'émission et de réception appropriés destinés à être appliqués par les stations de base BSi, $i=1,...,G$ et par les terminaux interférés UEint_i, $i=1,...,G$ respectivement (étape E30).

Le premier sous-réseau SubNW1 est constitué des G terminaux isolés UEiso_i, $i=1,...,G$ et des G stations de base BSi, $i=1,...,G$ renommées sur la figure 5 en BSi', $i=1,...,G$. Les G terminaux isolés UEiso_i, $i=1,...,G$, sont déjà en partie isolés de certaines interférences en raison de la connectivité partielle du système de communication 1. En effet, ils ne subissent pas d'interférences OCI des autres cellules, mais seulement des interférences MUI provenant des flux destinés aux terminaux interférés UEint_i, $i=1,...,G$ se trouvant dans les mêmes cellules qu'eux.

Pour s'assurer que les terminaux isolés UEiso_i, $i=1,...,G$ ne reçoivent aucune interférence de la part des terminaux interférés UEint_i se trouvant dans la même cellule i qu'eux

et liés à la même station de base BSi, comme chaque station de base BSi, $i=1,...,G$ a $NTx=2$ antennes d'émission et sert $K+1=2$ terminaux, le module 2B choisit à cet effet un simple précodage (i.e. filtre d'émission) de type forçage à zéro (ou ZF pour Zero Forcing) pour être appliqué au niveau de chaque station de base BSi. Ce faisant, on obtient un premier sous-réseau
 5 SubNW1 isolé des interférences susceptibles d'être créées par les dispositifs du second sous-réseau et comprenant G liens SISO (pour Single Input Single Output) parallèles et indépendants.

Le second sous-réseau SubNW2 est constitué des G terminaux interférés UEint_i, $i=1,...,G$ et des G stations de base BSi, $i=1,...,G$ renommées sur la figure 5 en BSi'', $i=1,...,G$. Le module 2B détermine des filtres d'émission et de réception destinés à être appliqués au niveau des
 10 stations de base BSi, $i=1,...,G$ et au niveau des terminaux interférés UEint_i, $i=1,...,G$, de sorte à obtenir un canal SISO IC. A cet effet, il aligne les interférences en provenance des flux affectés aux terminaux isolés UEiso_i, $i=1,...,G$, uniquement, et ce dans un sous-espace vectoriel de dimension bien choisie.

Les notations BSi' et BSi'' sont utilisées pour désigner la station de base BSi après
 15 séparation en deux sous-réseaux indépendants.

Il convient de noter que le module 2B ne tient pas compte des interférences OCI dues à des flux attribués aux terminaux interférés UEint_i car de telles interférences sont naturellement présentes dans un canal IC, et que des techniques de traitement efficaces existent pour s'affranchir de telles interférences sur un canal IC.

20 Chaque terminal interféré UEint_i dispose de G antennes de réception. Il suffit donc au module 2B d'aligner les interférences sur G-1 dimensions au niveau de chaque terminal interféré UEint_i. De cette manière, les terminaux interférés UEint_i, $i=1,...,G$ disposent toujours d'une dimension résiduelle pour recevoir leur signal utile sans autres interférences que celles résultant du canal SISO IC obtenu dans le second sous-réseau SubNW2.

25 En d'autres termes, au cours de l'étape E30, le module 2B détermine des filtres d'émission $W_i = [W_i(1)W_i(2)]$, $i = 1, \dots, G$, avec $W_i(1), W_i(2) \in \mathbb{C}^{NTx \times 1} = \mathbb{C}^{2 \times 1}$ à appliquer à chaque station de base BSi, $i=1,...,G$, et des filtres de réception $a_i, i \in [1, G]$ avec $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times Nint} = \mathbb{C}^{1 \times G}$ à appliquer au niveau de chaque terminal interféré UEint_i, $i=1,...,G$ tels que les équations (1) et (2) suivantes soient vérifiées :

30 Equations (1) :

$$\text{Rang}[H_{11}^{int}W_1(1) \ H_{12}^{int}W_2(1) \ \dots \ H_{1G}^{int}W_G(1)] = G - 1$$

$$\text{Rang}[H_{21}^{int}W_1(1) \ H_{22}^{int}W_2(1) \ \dots \ H_{2G}^{int}W_G(1)] = G - 1$$

...

$$\text{Rang}[H_{G1}^{int}W_1(1) \ H_{G2}^{int}W_2(1) \ \dots \ H_{GG}^{int}W_G(1)] = G - 1$$

où rang[M] désigne le rang de la matrice M.

Equation (2) :

$$[H_1^{iso}W_1(2) \ H_2^{iso}W_2(2) \ \dots \ H_G^{iso}W_G(2)] = [0 \ 0 \ \dots \ 0]$$

Dans ces équations, $W_i(1)$ désigne la représentation vectorielle du filtre d'émission destiné à être appliqué par la station de base BSi pour les flux émis à destination du terminal isolé UEiso_i de la cellule i, et $W_i(2)$ désigne la représentation vectorielle du filtre d'émission destiné à être appliqué par la station de base BSi pour les flux émis à destination du terminal interféré UEint_i de la cellule i. Les vecteurs $W_i(1)$ et $W_i(2)$ sont des vecteurs complexes de dimensions (NTx)x1, soit ici 2x1.

Dans le mode de réalisation décrit ici, le module 2B implémente un algorithme simple itératif pour déterminer des filtres d'émission W_i et de réception a_i vérifiant les équations (1) et (2). Cet algorithme se déroule comme suit. Par souci de simplification, dans la description de l'algorithme on omet l'indice désignant l'itération courante ainsi que la dépendance au temps t.

Au cours d'une étape d'initialisation (étape E31, $iter=0$), le module 2B sélectionne de manière aléatoire, pour chaque terminal interféré UEint_i, $i=1,...,G$, le filtre de réception a_i (autrement dit ses coefficients complexes). Puis le filtre de réception a_i obtenu est normalisé selon :

$$a_i \leftarrow \frac{a_i}{a_i^H a_i}$$

où a_i^H désigne le vecteur hermitien du vecteur a_i .

Le module 2B dérive ensuite à partir du vecteur a_i , le filtre d'émission W_i tel que :

$$\forall i \in [1, G], W_i = \begin{pmatrix} H_i^{iso} \\ a_i H_{ii}^{int} \end{pmatrix}^{-1}$$

A l'issue de cette étape d'initialisation E31, un indice $iter$ d'itération courante est incrémenté (étape E32).

Puis au cours de chaque itération $iter$, le module 2B s'assure que chaque contrainte de rang imposée par les équations (1) est satisfaite en sélectionnant les filtres de réception a_i , $i=1,...,G$ dans un espace d'annulation approprié dérivé à partir de ces équations (1), puis en mettant à jour les filtres d'émission W_i , $i=1,...,G$ à partir des filtres de réception ainsi sélectionnés (étape E33).

Plus précisément à cet effet, dans le premier mode de réalisation décrit ici, le module 2B détermine les couples de filtres de réception n_i , et d'émission W_i de manière concomitante pour $i=1,...,G$, tels que :

$$n_i \in \ker \begin{bmatrix} (H_{i2}^{int} W_2(1))^T \\ (H_{i3}^{int} W_3(1))^T \\ \dots \\ (H_{iG}^{int} W_G(1))^T \end{bmatrix}$$

où $\ker[M]$ désigne le noyau (ou de manière équivalente le kernel) de la matrice M. Il convient de noter que le kernel d'une matrice définissant un espace de dimension 1, l'inclusion des n_i dans les kernels correspondants est une égalité qui peut être utilisée pour définir un vecteur n_i normé.

Puis, le module 2B réalise une mise à jour partielle du filtre de réception a_i , $i=1,...,G$ calculé à l'itération ($iter-1$) précédente selon l'équation :

$$a_i^{(iter)} \leftarrow \beta \times n_i^{(iter)} + (1 - \beta) \times a_i^{(iter-1)}$$

où β désigne un nombre réel prédéterminé compris entre 0 et 1 dont dépend la vitesse de convergence de l'algorithme itératif.

5 La notation $x \leftarrow y$ signifie que la valeur de x est mise à jour avec la valeur y . L'indice désignant l'itération $iter$ courante considérée a été ajoutée par souci de clarté dans l'équation de mise à jour du filtre de réception a_i .

Le choix de la valeur de β dépend d'un compromis vitesse de convergence versus robustesse de la convergence. Comme mentionné précédemment en effet, plus β est élevé, plus l'algorithme converge lentement mais cette convergence est robuste.

10 Le module 2B normalise ensuite le filtre de réception a_i , $i=1,...,G$ ainsi obtenu à l'issue de la mise à jour selon :

$$a_i \leftarrow \frac{a_i}{a_i a_i^H}$$

Puis il détermine alors le filtre d'émission W_i , $i=1,...,G$ à partir du filtre de réception a_i , $i=1,...,G$ normalisé suivant :

15
$$W_i = \left(\frac{H_i^{iso}}{a_i H_{ii}^{int}} \right)^{-1}$$

Le filtre d'émission W_i , $i=1,...,G$ est ensuite à son tour normalisé par le module 2B selon :

$$W_i \leftarrow \frac{W_i}{W_i W_i^H}$$

20

ceci étant répété consécutivement pour chaque couple a_i , W_i pour $i=1,...,G$.

Le filtre de réception n_i ainsi déterminé pour $i=1,...,G$ par le module 2B pour chaque terminal interféré UEint_1 représente une antenne de réception virtuelle du terminal UEint_1 générée dans la dimension de l'espace à Nint=G dimensions où il n'y a pas d'interférences liées aux flux de données transmis aux utilisateurs isolés des autres cellules (ces interférences sont éliminées grâce au précodage par les filtres d'émission W_i , $i=1,...,G$).

Si un nombre maximal d'itérations prédéterminé IMAX n'a pas été atteint (réponse non à l'étape E34), l'indice $iter$ est incrémenté (étape E32) et les étapes E33 et E34 sont réitérées.

Le nombre d'itérations maximal IMAX est déterminé pour qu'à l'issue de ce nombre d'itérations maximal IMAX, il y ait une forte probabilité que les équations (1) soient vérifiées. Ce faisant, l'égalité suivante est vérifiée :

Equation (3) :

$$a_i H_{ij}^{int} W_j(1) = 0 \text{ pour } i,j=1,...,G$$

Il convient de noter que les équations (2) et (3) sont les formulations mathématiques de la séparation du canal IBC en deux sous-réseaux indépendants. L'équation (2) traduit en effet le fait que le sous-réseau SubNW1 ne reçoit aucune interférence du sous-réseau SubNW2 et l'équation (3) que le sous-réseau SubNW2 ne reçoit aucune interférence du sous-réseau SubNW1.

5 Si le nombre d'itérations IMAX est atteint (réponse oui à l'étape E34), le module 2B évalue, dans le mode de réalisation décrit ici, un indicateur *interf* représentatif des interférences résiduelles au niveau des G terminaux interférés à l'issue des IMAX itérations, après application des filtres d'émission W_i , $i=1,...,G$ par les stations de base BSi, et des filtres de réception a_i , $i=1,...,G$ par les terminaux interférés UEint_i (étape E35). Cet indicateur d'interférences résiduelles est
10 évalué ici selon la formule :

$$interf = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G (a_i H_{ij}^{int} W_j(1)) \cdot (a_i H_{ij}^{int} W_j(1))^H$$

Il est ensuite comparé à un seuil de tolérance TOL prédéterminé, TOL désignant un nombre réel positif (étape E36).

Si l'indicateur *interf* est supérieur au seuil TOL (réponse non à l'étape test E36), autrement dit si les interférences résiduelles restent trop élevées après un nombre d'itérations
15 raisonnable, le module 2B réinitialise les filtres de réception a_i , $i=1,...,G$ à de nouvelles valeurs (étape E37) et les étapes E32 à E37 sont réitérées à partir de ces nouvelles valeurs.

Si l'indicateur *interf* est inférieur au seuil TOL (réponse oui à l'étape test E36), cela signifie que les interférences résiduelles sont négligeables, et l'algorithme itératif est arrêté.

Les filtres de réception a_i , $i=1,...,G$ et les filtres d'émission W_i , $i=1,...,G$ obtenus à
20 l'issue des IMAX itérations sont fournis par l'unité centrale 2, via son module 2C et ses moyens de communication 9, aux terminaux interférés UEint_i et aux stations de base BSi respectivement du système de communication 1, pour être appliqués par ces derniers lors de leurs communications au sein du système (étape E40).

Par définition, l'application de ces filtres d'émission et de réception permet de
25 transformer le système de communication 1 en deux sous-réseaux indépendants SubNW1 et SubNW2. Dans ces deux sous-réseaux, des traitements indépendants peuvent ainsi être mis en œuvre.

Plus précisément, dans le sous-réseau SubNW1, les G liens obtenus sont des liens SISO qui ne nécessitent pas de traitement supplémentaire.

30 Le sous-réseau SubNW2 est quant à lui équivalent à un canal SISO à interférences ou canal SISO IC, qui peut être traité en appliquant une technique d'alignement d'interférence entre chaque station de base BSi et chaque terminal interféré UEint_i, $i=1,...,G$. Ceci équivaut à appliquer un second niveau de filtres d'émission et de réception à chaque station de base et à chaque terminal interféré. Ce second niveau de filtres peut être évalué par l'unité centrale 2 et être fourni

aux stations de base et aux terminaux interférés de façon similaire aux filtres d'émission W_i et de réception a_i , $i=1,...,G$.

En variante, l'unité centrale 2 peut envoyer un unique filtre d'émission à chaque station de base BS_i et à un unique filtre de réception a_i , à chaque terminal interféré UEint_i, $i=1,...,G$, ces filtres tenant compte d'une part des filtres d'émission et de réception déterminés conformément à l'invention et d'autre part, des filtres d'émission et de réception résultant de la technique d'alignement d'interférences appliquée dans le sous-réseau SubNW2.

Nous allons maintenant illustrer brièvement les performances pouvant être atteintes par le système de communication 1 mettant en œuvre l'invention, et les comparer avec les performances obtenues par d'autres systèmes.

Une première métrique de performance pouvant être considérée est la somme des degrés de libertés (ou DOF pour Degrees of Freedom) obtenus à l'aide du système de communication considéré. Cette première métrique est équivalente au gain de multiplexage atteint par le système de communication. Elle se définit par :

$$M1 = \sum_j d_j$$

où d_j désigne le degré de liberté atteignable par un utilisateur j avec :

$$d_j = \lim_{P \rightarrow \infty} \frac{R_j(P)}{\log_2 P}$$

où $R_j(P)$ représente le débit atteignable pour l'utilisateur j avec une puissance d'émission P.

Conformément à l'invention, on obtient après application des filtres d'émission W_i et des filtres de réception a_i , $i=1,...,G$, deux sous-réseaux SubNW1 et SubNW2 séparés : le premier sous-réseau SubNW1 est un sous-réseau avec G liens parallèles, alors que le second sous-réseau SubNW2 est un canal SISO IC à G utilisateurs. Les deux sous-réseaux sont indépendants et ne génèrent pas d'interférences l'un vers l'autre comme illustré à la figure 5.

Sur les G liens parallèles du sous-réseau SubNW1, il est possible d'atteindre G degrés de liberté en réalisant G transmissions point-à-point.

Sur le canal SISO IC à G utilisateurs, en appliquant une technique IA asymptotique, on peut tenter d'atteindre une borne dite de décomposition égale à $G/2$ degrés de liberté (ou plus généralement $G.(M.N)/(M+N)$ dans le cas de stations de base ayant M antennes d'émissions et de terminaux récepteurs ayant N antennes de réception, et $(M.N)/(M+K.N)$ pour un canal IBC symétrique avec K utilisateurs par cellule). De plus amples détails sur les techniques IA asymptotiques et la borne de décomposition sont donnés dans le document de V. Cadambe et Jafar cité précédemment.

En appliquant une technique IA linéaire a canal SISO IC à G utilisateurs du second sous-réseau SubNW2, on peut atteindre une borne dite propre égale à $2G/(G+1)$ degrés de liberté (ou plus généralement $G \cdot \frac{M+N}{G+1}$ pour un canal SISO IC et $GK \cdot \frac{M+N}{GK+1}$ pour un canal IBC symétrique).

Autrement dit, après séparation, le recours via un second niveau de filtres d'émission et de réception, à une technique IA asymptotique sur le canal SISO IC du second sous-réseau SubNW2 permet d'approcher une borne de décomposition égale à $3G/2$ degrés de liberté. Le recours à une technique IA linéaire permet d'approcher une borne propre égale à :

$$G + \frac{2G}{G+1} = \frac{G^2 + 3G}{G+1}$$

5 degrés de liberté.

A titre de comparaison, si l'on n'effectue pas de séparation entre les sous-réseaux comme dans l'invention, il est possible en présence d'un canal IBC asymétrique partiellement connecté tel qu'illustré à la figure 1, de recourir à une stratégie dite naïve consistant à transmettre G flux de données aux terminaux isolés UEiso_i, $i=1,...,G$ et un flux de données à l'un des terminaux interférés, par exemple au terminal UEint_1.

Cette stratégie peut être mise en œuvre en s'assurant que chaque station de base BSi, $i=1,...,G$ applique un filtre d'émission réalisant un forçage à zéro entre le terminal isolé UEiso_i et une antenne virtuelle situé au niveau du premier terminal interféré UEint_1. Autrement dit, le filtre d'émission appliqué par la station de base BSi est donné par une version normalisée de :

$$\forall i \in [1, G], W_i = \left(\begin{matrix} H_i^{iso} \\ a_1 H_{1i}^{int} \end{matrix} \right)^{-1}$$

15 où a_1 désigne un filtre de réception créant une antenne virtuelle au niveau du terminal interféré

$$\text{UEint}_1, \text{ et où } H_i^{iso} = \begin{pmatrix} H_{i1}^{iso} \\ H_{i2}^{iso} \\ \dots \\ H_{iK}^{iso} \end{pmatrix}.$$

Selon cette stratégie naïve, seule la première station de base BS1 transmet deux flux à destination du terminal isolé UEiso_1 et du terminal interféré UEint_1 qui lui sont liés. Les autres stations de base n'envoient qu'un seul flux à destination de leur terminal isolé ; elles réalisent également un forçage à zéro en direction de l'antenne virtuelle du récepteur 1, autrement dit, elles n'envoient pas d'interférences sur l'antenne virtuelle du terminal interféré UEint_1. En agissant selon cette stratégie naïve on obtient un nombre de degrés de libertés égal à $G+1$.

Deux autres stratégies encore plus simples peuvent être utilisées en considérant uniquement un sous-ensemble de terminaux récepteurs du canal IBC partiellement connecté. Ainsi, par exemple, en ne considérant que les terminaux isolés on obtient un nombre égal à G de degrés de liberté. En ne considérant que les terminaux interférés, on se ramène à un canal MIMO IC à G utilisateurs. La borne propre d'un tel système est égale à $\frac{G+2}{G+1} G$ degrés de libertés. Sa borne de décomposition est égale à $\frac{2G}{G+2} G$ degrés de liberté.

Les performances en terme de degrés de liberté des différentes stratégies précitées sont résumées dans la table ci-dessous :

Stratégie	Borne de	Borne propre	Autre borne
-----------	----------	--------------	-------------

	décomposition		
Séparation avec IA	$G+G/2$	$G+2G/(G+1)$	
Stratégie naïve			$G+1$
Stratégie Terminaux Isolés			G
Stratégie Terminaux Interférés	$\frac{2G}{G+2} G$	$\frac{G+2}{G+1} G$	

On remarque dans cette table que, pour de grandes valeurs de G , la stratégie simple consistant à ne traiter que les terminaux interférés, permet d'approcher $2G$ DOF. Ceci est supérieur aux $\frac{3G}{2}$ DOF obtenus à l'aide de l'invention en utilisant une technique IA itérative. Cependant, ce constat n'est valable que pour des grandes valeurs de G . Or, G est généralement considéré comme assez faible dans des situations réalistes. En outre, les techniques IA asymptotiques qui peuvent être utilisées pour approcher la borne de décomposition, induit un délai qui augmente de façon exponentielle avec G , mais également avec le nombre d'antennes. Par conséquent, seules de petites valeurs G et peu d'antennes peuvent être considérés pour obtenir un gain de multiplexage décent avec un nombre raisonnable d'extensions de symboles.

La **figure 6A** représente les bornes des degrés de liberté par cellule des différentes des stratégies envisagées en fonction du nombre de cellules G . Plus précisément sur cette figure :

- la courbe C1 illustre la borne de décomposition obtenue avec la stratégie de traitement des terminaux interférés seulement ;
- la courbe C2 illustre la borne propre obtenue avec l'invention (séparation des réseaux et IA) ;
- la courbe C3 illustre la borne de décomposition obtenue avec l'invention (séparation des réseaux et IA);
- la courbe C4 illustre la borne obtenue avec la stratégie naïve ;
- la courbe C5 illustre la borne propre avec la stratégie de traitement des terminaux interférés seulement ; et
- la courbe C6 illustre la borne obtenue avec le traitement des terminaux isolés seulement.

Comme mentionné ci-dessus, la stratégie qui consiste à ne traiter que les terminaux interférés ne se révèle intéressante que pour de grandes valeurs de G , et plus précisément pour $G \geq 7$. Pour des valeurs G faibles (et réalistes), comme $G \leq 6$, nous observons que la proposition de d'abord séparer le réseau conformément à l'invention permet d'obtenir un plus grand DOF. Ainsi, bien que l'approche proposée par l'invention puisse être sous-optimale, elle se révèle intéressante en termes de degrés de liberté pouvant être atteints (et ainsi de débit maximal pouvant être atteint), et donc pour maximiser les performances du système de communication à forts rapports signal-sur-bruit.

La **figure 6B** illustre des résultats de simulation de type Monte-Carlo montrant que l'invention permet également d'améliorer les performances du système de communication à des valeurs raisonnables de rapports signal-sur-bruit.

Nous considérons sur cette figure les résultats obtenus en termes de débits versus rapport signal-sur-bruit (SNR) avec la méthode naïve décrite précédemment (courbe D2) et la méthode de séparation proposée par l'invention (courbe D1).

Pour la méthode de séparation, les transmissions vers les terminaux isolés sur le premier sous-réseau SubNW1 sont des transmissions point-à-point, tandis que sur le canal SISO IC du second sous-réseau SubNW2, on envisage la stratégie IA décrite dans le document de C. Lameiro et al. intitulé « An interference alignment algorithm for structured channels », Proc. SPAWC, Germany, Juin 2013, qui vise à approcher la borne propre avec un nombre fini d'extensions de symboles (extension sur 16 symboles et 6 flux par utilisateur sur la figure 6B). La puissance d'émission est fixée à P pour chaque station de base et est répartie de manière uniforme entre les flux transmis par celle-ci. Dans l'exemple

Les deux stratégies, naïve et séparation, sont évaluées dans un réseau avec G=4 cellules.

Pour la méthode naïve, on peut montrer que le débit SR_{naive} pouvant être atteint est donné par :

$$SR_{naive}(SNR) = \sum_{i=2}^G \log_2 \left(1 + \frac{||H_i^{iso} W_i(1)||^2}{\sigma^2} \right) + \log_2 \left(1 + .5 \frac{||H_1^{iso} W_1(1)||^2}{\sigma^2} \right) + \log_2 \left(1 + .5 \frac{||a_1 H_{11}^{int} W_i(2)||^2}{\sigma^2} \right)$$

où $\sigma^2 = 10^{-\frac{SNR}{10}}$. On voit bien dès lors qu'il y a dans le calcul G+1 termes en log et donc G+1 degrés de liberté.

Pour la méthode de séparation selon l'invention, après séparation les utilisateurs isolés sont servis par une simple transmission point-à-point. Si la séparation a atteint un alignement parfait, le débit des utilisateurs isolés est :

$$SR_{iso}(SNR) = \sum_{i=1}^G \log_2 \left(1 + \frac{P_{iso} ||H_i^{iso} W_i(1)||^2}{\sigma^2} \right)$$

Toutefois, comme l'algorithme de séparation peut ne pas atteindre un alignement parfait, nous prenons en compte l'interférence MUI résiduelle possible et :

$$SR_{iso}(SNR) = \sum_{i=1}^G \log_2 \left(1 + \frac{P_{iso} ||H_i^{iso} W_i(1)||^2}{\sigma^2 + P_{int} ||H_i^{iso} W_i(2)||^2} \right)$$

où P_{iso} et P_{int} sont respectivement la puissance allouée à chaque flux destiné à un terminal isolé et à un terminal interféré. Ayant choisi de partager équitablement la puissance entre les flux, nous avons $P_{iso} = \frac{T}{T+d}$ et $P_{int} = \frac{d}{T+d}$ où T est la longueur de l'extension de symbole pour le canal SISO IC du second sous-réseau SubNW2 et d est le nombre de flux attribués à un terminal interféré sur toute l'extension symbole.

En prenant une extension sur T symboles dans le canal SISO IC du second sous-réseau SubNW2, on obtient des matrices de canal diagonales. Soit $H_{j,i}^e$ la matrice du canal étendu entre le récepteur j et l'émetteur isolé i

$$H_{j,i} = \text{diag}(a_i[1]H_{ji}^{\text{int}}[1]W_i(2)[1], \dots, a_i[T]H_{ji}^{\text{int}}[T]W_i(2)[T])$$

La technique IA optimise ensuite de manière itérative un second niveau de filtres d'émission V_i et de réception U_j . Le débit est donné par :

$$SR_{IC}(\text{SNR}) = \sum_{i=1}^K \log_2 |I + (\sigma^2 U_i^H U_i + U_i^H Q_{I_i} U_i)^{-1} U_i^H Q_{D_i} U_i|$$

où Q_{I_i} et Q_{D_i} désignent respectivement la matrice de covariance d'interférence et la matrice de covariance du signal :

$$Q_{D_i} = P_{\text{int}} H_{e,i} V_i V_i^H H_{e,i}^H$$

et

$$Q_{I_i} = P_{\text{int}} \sum_{i \neq j} H_{e,i,j} V_j V_j^H H_{e,i,j}^H$$

si l'alignement est parfaitement atteint lors de la séparation. Cependant, pour inclure les possibles interférences résiduelles après la séparation, nous considérons que :

$$Q_{I_i} = \sum_{j \neq i} (P_{\text{int}} H_{e,i,j} V_j V_j^H H_{e,i,j}^H + P_{\text{iso}} H_{i,j} H_{i,j}^H) + P_{\text{iso}} H_{i,i} H_{i,i}^H$$

où $H_{i,j}$ est la matrice d'interférence résiduelle entre le terminal récepteur i et la station de base émettrice j sur le canal étendu. Par conséquent :

$$H_{i,j} = \text{diag}(a_i[1]H_{ij}^{\text{int}}[1]W_j(1)[1], \dots, a_i[T]H_{ij}^{\text{int}}[T]W_j(1)[T])$$

est une matrice diagonale qui, pour $i = j$, représente l'interférence MUI résiduelle et, pour $i \neq j$, représente l'interférence OCI résiduelle due aux flux destinés aux terminaux isolés.

Le débit atteint après la séparation des sous-réseaux conformément à l'invention est alors :

$$SR_{\text{separ}}(\text{SNR}) = SR_{\text{iso}}(\text{SNR}) + SR_{IC}(\text{SNR})$$

Les simulations reportées sur la figure 6B ont été réalisées dans un réseau avec $G=4$ cellules ; 500 réalisations de canal ont été envisagées lors de simulations.

La méthode naïve doit en théorie atteindre $G + 1$ degrés de liberté. La stratégie de séparation selon l'invention G DOF pour le sous-réseau SubNW1 et pour le sous-réseau SubNW2, en assignant 6 flux par utilisateur sur un symbole et en considérant une extension de $T = 16$ symboles, on devrait atteindre $\frac{24}{16} = 1.5$ DoF, soit un total de 5.5 DOF pour cette stratégie. Les valeurs limites de 5 DOF et 5.5 DOF sont représentées sur la figure 6B à titre illustratif pour comparaison.

On constate ainsi que les DOF espérés sont atteints pour des valeurs relativement petites de rapport signal-sur-bruit. De même, on voit la méthode de séparation selon l'invention permet d'obtenir davantage de degrés de liberté à des valeurs de rapports signal-sur-bruit raisonnables (petites à moyennes).

Dans le premier mode de réalisation décrit ici, nous avons considéré un système de communications comprenant G cellules, chaque cellule étant associée à une station de base équipée de NTx=2 antennes d'émission et servant K+1=2 terminaux, à savoir un terminal isolé et un terminal interféré. Le terminal isolé est équipé de Niso=1 antenne d'émission tandis que le terminal interféré comprend Nint=G antennes de réception.

Ces hypothèses, bien que permettant d'illustrer facilement l'invention, ne sont pas limitatives pour autant, et l'invention s'applique à d'autres configurations. Ainsi, notamment elle peut s'appliquer à toutes configurations dans laquelle on a un terminal interféré par cellule et si :

- NTx désigne le nombre d'antennes d'émission d'un dispositif émetteur,
 - Niso désigne le nombre d'antennes de réception d'un dispositif récepteur isolé ;
 - Nint désigne le nombre d'antennes de réception d'un dispositif récepteur interféré ; et
 - K désigne le nombre de terminaux isolés par cellule ;
- les nombres d'antennes NTx, Niso et Nint et le nombre d'utilisateurs isolés par cellule vérifient :

$$NTx > K.Niso$$

$$\text{et } Nint \geq (G-2).K.Niso + NTx$$

Une telle configuration permet d'atteindre un nombre de degrés de liberté de G.Niso.K pour les terminaux isolés et un nombre de degrés de liberté égal à $2G \frac{NTx-K.Niso}{G+1}$ pour les terminaux interférés en approchant la borne propre et égal à $\frac{G(NTx-K.Niso)(NTx-K.Niso)}{2(NTx-K.Niso)} = \frac{G(NTx-K.Niso)}{2}$ en approchant la borne de décomposition. La méthode naïve permet seulement d'atteindre G.K.Niso+(NTx-K.Niso) degrés de liberté. Autrement dit, les performances de la méthode naïve sont inférieures à celles de l'invention pour la borne propre et pour la borne de décomposition. Le tableau ci-dessous illustre quelques comparaisons en termes de DOF entre la méthode naïve et la méthode de séparation selon l'invention pour K=2, Niso=1 et NTx=4 :

G	Nint	Stratégie naïve	Séparation avec IA – borne propre	Séparation avec IA – borne de décomposition
3	6	8	9	9
4	8	10	11.2	12
6	12	14	15.43	18

Des degrés de liberté identiques peuvent être atteints avec K=1 terminal isolé mais qui est équipé de Niso=2 antennes de réception au lieu de K=2 terminaux isolés chacun équipé d'une seule antenne de réception.

Il convient de noter que la généralisation à des nombres G, NTx, K, Niso, Nint telle que proposée ci-dessus ne poserait aucune difficulté pour l'homme du métier pour adapter les étapes

du procédé de détermination précédemment décrites. En particulier, le module 2B de l'unité centrale 2 détermine dans ce cas des filtres d'émission et de réception de sorte que :

$$H_{ij}^{iso} W_i(m) = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, G, j = 1, \dots, K, m = 1, \dots, K + 1, \text{ avec } m \neq j ;$$

5 et pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{rang}[H_{i1}^{int} W_1(1) \ H_{i1}^{int} W_1(2) \ \dots \ H_{i1}^{int} W_1(K) \ H_{i2}^{int} W_2(1) \ H_{i2}^{int} W_2(2) \ \dots \ H_{i2}^{int} W_2(K) \ \dots \\ \dots \ H_{iG}^{int} W_G(1) \ H_{iG}^{int} W_G(2) \ \dots \ H_{iG}^{int} W_G(K)] = K(G - 1)$$

où :

- H_{ij}^{iso} est la matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur i et le dispositif
- 10 récepteur isolé j lié à ce dispositif émetteur $i, i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, K$;
- H_{ji}^{int} est la matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur i et le dispositif récepteur interféré lié au dispositif émetteur $j, i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, G$; et
- $W_i = [W_i(1), \dots, W_i(K + 1)]$, $i=1, \dots, G$, désigne le filtre d'émission appliqué par le dispositif émetteur i .

15 A cet effet, à chaque itération de l'algorithme itératif mis en œuvre par le module 2B, celui met à jour le filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times (N_{int})}$ de chaque dispositif récepteur interféré si $NTx=K.N_{iso}+1$ et le filtre d'émission de chaque dispositif émetteur selon :

$$a_1 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{12}^{int} W_2(1))^T \\ (H_{12}^{int} W_2(2))^T \\ \dots \\ (H_{12}^{int} W_2(K))^T \\ \\ (H_{13}^{int} W_3(1))^T \\ (H_{13}^{int} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{13}^{int} W_3(K))^T \\ \\ \dots \\ (H_{1G}^{int} W_G(1))^T \\ (H_{1G}^{int} W_G(2))^T \\ \dots \\ (H_{1G}^{int} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_1 = \left(H_1^{iso} \right)^{-1} \begin{pmatrix} a_1 H_{11}^{int} \end{pmatrix}$$

$$a_2 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{21}^{\text{int}} W_1(1))^T \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(2))^T \\ \dots \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(K))^T \\ \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(1))^T \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(K))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(1))^T \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(2))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_2 = \begin{pmatrix} H_2^{\text{iso}} \\ a_2 H_{22}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

...

$$a_G \in \ker \begin{bmatrix} (H_{G1}^{\text{int}} W_1(1))^T \\ (H_{G1}^{\text{int}} W_1(2))^T \\ \dots \\ (H_{G1}^{\text{int}} W_1(K))^T \\ \\ (H_{G2}^{\text{int}} W_2(1))^T \\ (H_{G2}^{\text{int}} W_2(2))^T \\ \dots \\ (H_{G2}^{\text{int}} W_2(K))^T \\ \dots \\ (H_{(G-1)G}^{\text{int}} W_{G-1}(1))^T \\ (H_{(G-1)G}^{\text{int}} W_{G-1}(2))^T \\ \dots \\ (H_{(G-1)G}^{\text{int}} W_{G-1}(K))^T \end{bmatrix}, W_G = \begin{pmatrix} H_G^{\text{iso}} \\ a_G H_{GG}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$5 \quad \text{où } H_i^{\text{iso}} = \begin{pmatrix} H_{i1}^{\text{iso}} \\ H_{i2}^{\text{iso}} \\ \dots \\ H_{iK}^{\text{iso}} \end{pmatrix}.$$

Une mise à jour partielle des filtres d'émission et des normalisations peuvent être envisagées comme décrit précédemment dans l'exemple de la figure 2.

Cette étape est répétée jusqu'à ce que pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{rang} \begin{bmatrix} H_{i1}^{\text{int}} W_1(1) & H_{i1}^{\text{int}} W_1(2) & \dots & H_{i1}^{\text{int}} W_1(K) & H_{i2}^{\text{int}} W_2(1) & H_{i2}^{\text{int}} W_2(2) & \dots & H_{i2}^{\text{int}} W_2(K) & \dots \\ \dots & H_{iG}^{\text{int}} W_G(1) & H_{iG}^{\text{int}} W_G(2) & \dots & H_{iG}^{\text{int}} W_G(K) \end{bmatrix} = KG - 1$$

Dans le premier mode de réalisation décrit ici, on a considéré un système de communication 1 pouvant être modélisé par un canal IBC asymétrique partiellement connecté. Comme mentionné précédemment l'invention s'applique également à la configuration duale de ce canal, à savoir à un canal IMAC asymétrique partiellement connecté (réseau à interférences asymétrique partiellement connecté au sens de l'invention).

Nous allons donc maintenant décrire un second mode de réalisation de l'invention dans lequel le système de communication envisagé peut être modélisé par un canal IMAC asymétrique partiellement connecté. Un tel système est par exemple un réseau hétérogène.

La **figure 7** représente un système de communication 10 conforme à l'invention, dans ce second mode de réalisation.

Le système de communication 10 comprend une unité centrale 20, une pluralité de dispositifs émetteurs 30 et une pluralité de dispositifs récepteurs 40, tous conformes à l'invention.

Dans l'exemple envisagé à la figure 7, les dispositifs émetteurs 30 sont :

- des stations de base associées à des macro-cellules, BS_{mci} , $i=1,...,K_{int}$, K_{int} entier supérieur à 1 ($K_{int}=3$ sur la figure 7) ;
- des stations de base associées à des plus petites cellules, BS_{sci} , $i=1,...,K_{iso}$, K_{iso} entier supérieur à 1 ($K_{iso}=3$ sur la figure 7).

Les dispositifs récepteurs 40 sont G terminaux $UE_1,...,UE_G$ ($G=3$ sur la figure 1), chaque terminal étant équipé de $N_{Rx}=2$ antennes de réception. Chaque terminal UE_i , $i=1,...,G$ est lié à (servi par) $K+1=2$ dispositifs émetteurs ($K=1$), à savoir par une station de base BS_{mci} associée à une macro-cellule et une station de base BS_{sci} associée à une cellule plus petite.

La station de base BS_{mci} associée à la macro-cellule génère des interférences vers les autres terminaux que le terminal UE_i ; il s'agit d'un dispositif émetteur interférent au sens de l'invention. Elle est équipée d'au moins $K.(G-1)+1=G=3$ antennes d'émission ici.

En revanche la station de base BS_{sci} associée à la petite cellule ne génère pas d'interférence ; elle constitue un dispositif émetteur non interférent au sens de l'invention. Elle dispose d'au moins une antenne d'émission.

L'unité centrale 20 a la même architecture matérielle que l'unité centrale 2 et est apte à mettre en œuvre un procédé de détermination de filtres d'émission destinés à être appliqués par les stations de base des macro-cellules et de filtres de réception destinés à être appliqués par les terminaux conforme à l'invention dans le second mode de réalisation.

La **figure 8** illustre une modélisation du système de communication 10 par un canal IMAC asymétrique partiellement connecté.

Au regard de cette modélisation et de la dualité existant entre les canaux IBC et IMAC, on comprend bien dès lors que l'invention peut être appliquée également au système de communication 10 illustré à la figure 9.

On considère dans la suite de la description, les notations suivantes :

- $H_i^{sc}[t] \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ désigne la matrice du canal de propagation à l'instant t entre la station de base BSsci de la petite cellule i et le terminal UE i se trouvant dans cette cellule ; et
- $H_{ij}^{mc}[t] \in \mathbb{C}^{2 \times G}$ désigne la matrice du canal de propagation à l'instant t entre la station de base BSmci de la macro-cellule i et le terminal UE j .

5 Comme pour le canal IBC, l'unité centrale 20 peut séparer le canal IMAC en deux sous-réseaux indépendants. En notant $B_i = [B_i(1), B_i(2)]$, le filtre de réception destiné à être appliqué par le terminal UE i où $B_i(1)$ désigne le filtre à appliquer sur les flux de données reçus de la station de base BSsci et $B_i(2)$ désigne le filtre à appliquer sur les flux de données reçus de la station de base BSmci, les conditions de séparation considérées par l'unité centrale 20 sont :

10 Equations (4) :

$$\begin{aligned} \text{Rang} \begin{bmatrix} B_1(1)H_{11}^{mc} \\ B_2(1)H_{12}^{mc} \\ \dots \\ B_G(1)H_{1G}^{mc} \end{bmatrix} &= G - 1 \\ \text{Rang} \begin{bmatrix} B_1(1)H_{21}^{mc} \\ B_2(1)H_{22}^{mc} \\ \dots \\ B_G(1)H_{2G}^{mc} \end{bmatrix} &= G - 1 \\ &\dots \\ \text{Rang} \begin{bmatrix} B_1(1)H_{G1}^{mc} \\ B_2(1)H_{G2}^{mc} \\ \dots \\ B_G(1)H_{GG}^{mc} \end{bmatrix} &= G - 1 \end{aligned}$$

Equation (5) :

$$\begin{bmatrix} B_1(2)H_1^{sc} \\ B_2(2)H_2^{sc} \\ \dots \\ B_G(2)H_G^{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

15 En désignant par $b_i \in \mathbb{C}^{G \times 1}$ les filtres d'émission destinés à être appliqués par les stations de base des macro-cellules, l'unité centrale 20 cherche aussi à ce que les filtres d'émission et de réception vérifient :

Equation (6) :

$$B_j(1)H_{ij}^{mc}b_i = 0 \quad \forall (i, j)$$

Pour résoudre ce problème, l'unité centrale 20 est programmée pour utiliser l'algorithme itératif décrit précédemment en relation avec le premier mode de réalisation, avec :

20 $\overline{H_i^{iso}} = H_i^{scT}, \overline{H_{ij}^{int}} = H_{ij}^{mcT}, a_i = b_i^T, W_i = B_i^T \text{ et } NTx = NRx$

puisque les conditions (4), (5) et (6) sont équivalentes aux conditions (1), (2) et (3) mentionnées dans le premier mode de réalisation. Cet algorithme n'est pas décrit de nouveau en détail ici, ni les moyens mis en œuvre par l'unité centrale 20 qui sont similaires ou identiques à ceux de l'unité centrale 2.

A l'issue de l'algorithme itératif et de la détermination des filtres d'émission et de réception devant être appliqués par les stations de base BS_{mci}, BS_{sci} et les terminaux UE_i, $i=1,...,G$, le réseau de communication 10 est séparé en deux sous-réseaux indépendants SubNW10 et SubNW20, isolés l'un par rapport à l'autre et dans lesquels les flux de données peuvent être transmis entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux, sans générer d'interférences l'un envers l'autre.

La **figure 9** illustre cette séparation. Les notations UE_i' et UE_i'' sont utilisées pour désigner le terminal UE_i après séparation en deux sous-réseaux indépendants : un premier sous-réseau SubNW10 composé de G liens SISO indépendants et un second sous-réseau SubNW20 comprenant un canal SISO IC.

Les stations de base BS_{mci} de macro-cellule et BS_{sci} de petite cellule peuvent ainsi servir leur terminal commun UE_i en même temps et de façon indépendante sans générer d'interférences (modélisé par les terminaux UE_i' et UE_i'' sur la figure 9). Ceci se passe comme si les terminaux UE_i, $i=1,...,G$ avaient deux antennes de réception indépendantes, l'une ne recevant que de la station de base BS_{sci} grâce à la condition (6), et l'autre recevant uniquement des stations de base des macro-cellules grâce à l'équation (5).

Par conséquent, l'analyse des degrés de liberté effectuée pour le premier mode de réalisation s'applique également au système de communication 10.

De même, l'invention peut dans ce second mode de réalisation être appliquée à d'autres configurations d'antennes que celle envisagée à la figure 7. Par exemple, on peut envisager $G=3$ terminaux ayant chacun 4 antennes de réception, des stations de bases des petites cellules avec 2 antennes d'émission et des stations de base des macro-cellules avec 6 antennes d'émission. Il convient par ailleurs de noter qu'au lieu d'avoir une station de base de petite cellule avec 2 antennes d'émission co-localisées on peut également envisager d'avoir en variante deux stations de base avec une antenne d'émission chacune.

REVENDECATIONS

1. Procédé de détermination de filtres d'émission et de réception destinés à être utilisés dans un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, les liaisons entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs dudit système et les interférences en résultant pouvant être modélisées sous la forme d'un réseau à interférences asymétrique partiellement connecté, ledit procédé comprenant une étape de détermination d'au moins un filtre d'émission destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif émetteur du système et d'au moins un filtre de réception destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif récepteur du système, ledit au moins un filtre d'émission et ledit au moins un filtre de réception étant déterminés de sorte qu'après application desdits filtres, le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté peut être modélisé sous la forme de deux sous-réseaux isolés l'un par rapport à l'autre, des flux de données pouvant être transmis entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux, sans générer d'interférences les uns envers les autres.

2. Procédé de détermination selon la revendication 1 dans lequel, si G désigne le nombre de dispositifs émetteurs du système de communication, avec G entier supérieur à 1 :

- le premier sous-réseau comprend G liens à entrée unique et sortie unique (SISO) reliant les dispositifs émetteurs et des dispositifs récepteurs du premier sous-réseau ; et
- le second sous-réseau comprend un canal SISO à interférences à G utilisateurs.

3. Procédé de détermination selon la revendication 1 ou 2 dans lequel :

- ledit système comprend G dispositifs émetteurs et K+1 dispositifs récepteurs liés à chaque dispositif émetteur, G est un entier supérieur à 1 et K est un entier supérieur ou égal à 1, chaque dispositif émetteur ayant NTx antennes d'émission et étant lié à au moins un dispositif récepteur dit isolé ayant Niso antennes de réception et à un dispositif récepteur dit interféré ayant Nint antennes de réception, ledit au moins un dispositif récepteur isolé subissant des interférences provenant de flux de données émis par ledit dispositif émetteur et le dispositif récepteur interféré subissant des interférences provenant de flux de données émis par ledit dispositif émetteur et par au moins un autre dispositif émetteur du système de communication ; et
- les filtres d'émission et de réception sont déterminés au cours de l'étape de détermination de sorte que :

$$H_{ij}^{iso} W_i(m) = 0 \text{ pour } i = 1, \dots, G, j = 1, \dots, K, m = 1, \dots, K + 1, \text{ avec } m \neq j ;$$

et pour $i=1,\dots,G$:

$$\text{rang}[H_{i1}^{int} W_1(1) \ H_{i1}^{int} W_1(2) \ \dots \ H_{i1}^{int} W_1(K) \ H_{i2}^{int} W_2(1) \ H_{i2}^{int} W_2(2) \ \dots \ H_{i2}^{int} W_2(K) \ \dots]$$

$$\cdots H_{iG}^{int} W_G(1) H_{iG}^{int} W_G(2) \cdots H_{iG}^{int} W_G(K)] = K(G - 1)$$

où :

- H_{ij}^{iso} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur i et le dispositif récepteur isolé j lié à ce dispositif émetteur i , $i=1,\dots,G$ et $j=1,\dots,K$;
- H_{ji}^{int} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur i et le dispositif récepteur interféré lié au dispositif émetteur j , $i=1,\dots,G$ et $j=1,\dots,G$; et
- $W_i = [W_i(1), \dots, W_i(K + 1)]$, $i=1,\dots,G$, désigne le filtre d'émission appliqué par le dispositif émetteur i .

4. Procédé de détermination selon la revendication 3 dans lequel les filtres d'émission et de réception sont déterminés au cours de l'étape de détermination en appliquant une technique itérative.

5. Procédé de détermination selon la revendication 4 dans lequel ladite technique itérative comprend :

(A) pour chaque dispositif récepteur interféré, sélectionner un filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times (N_{int})}$ normalisé et déterminer les filtres d'émission suivantes pour chaque dispositif émetteur :

$$\forall i \in [1, G], W_i = \begin{pmatrix} H_i^{iso} \\ a_i H_{ii}^{int} \end{pmatrix}^{-1}$$

où $H_i^{iso} = \begin{pmatrix} H_{i1}^{iso} \\ H_{i2}^{iso} \\ \dots \\ H_{iK}^{iso} \end{pmatrix} ;$

(B) pour chaque itération d'une pluralité d'itérations, mettre à jour le filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times (N_{int})}$ de chaque dispositif récepteur interféré et le filtre d'émission de chaque dispositif émetteur selon :

$$a_1 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{12}^{\text{int}} W_2(1))^T \\ (H_{12}^{\text{int}} W_2(2))^T \\ \dots \\ (H_{12}^{\text{int}} W_2(K))^T \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(1))^T \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{13}^{\text{int}} W_3(K))^T \\ \dots \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_G(1))^T \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_G(2))^T \\ \dots \\ (H_{1G}^{\text{int}} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_1 = \begin{pmatrix} H_1^{\text{iso}} \\ a_1 H_{11}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

$$a_2 \in \ker \begin{bmatrix} (H_{21}^{\text{int}} W_1(1))^T \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(2))^T \\ \dots \\ (H_{21}^{\text{int}} W_1(K))^T \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(1))^T \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(2))^T \\ \dots \\ (H_{23}^{\text{int}} W_3(K))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(1))^T \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(2))^T \\ \dots \\ (H_{2G}^{\text{int}} W_G(K))^T \end{bmatrix}, W_2 = \begin{pmatrix} H_2^{\text{iso}} \\ a_2 H_{22}^{\text{int}} \end{pmatrix}^{-1}$$

...

$$a_G \in \ker \begin{bmatrix} (H_{G1}^{int} W_1(1))^T \\ (H_{G1}^{int} W_1(2))^T \\ \dots \\ (H_{G1}^{int} W_1(K))^T \\ \\ (H_{G2}^{int} W_2(1))^T \\ (H_{G2}^{int} W_2(2))^T \\ \dots \\ (H_{G2}^{int} W_2(K))^T \\ \\ \dots \\ (H_{(G-1)G}^{int} W_{G-1}(1))^T \\ (H_{(G-1)G}^{int} W_{G-1}(2))^T \\ \dots \\ (H_{(G-1)G}^{int} W_{G-1}(K))^T \end{bmatrix}, W_G = \begin{pmatrix} H_G^{iso} \\ a_G H_{GG}^{int} \end{pmatrix}^{-1}$$

où ker désigne le kernel de la matrice considérée ;

(C) Répéter l'étape (B) jusqu'à ce que

5 pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{rang} \begin{bmatrix} H_{i1}^{int} W_1(1) & H_{i1}^{int} W_1(2) & \dots & H_{i1}^{int} W_1(K) & H_{i2}^{int} W_2(1) & H_{i2}^{int} W_2(2) & \dots & H_{i2}^{int} W_2(K) & \dots \\ \dots & H_{iG}^{int} W_G(1) & H_{iG}^{int} W_G(2) & \dots & H_{iG}^{int} W_G(K) \end{bmatrix} = K(G-1)$$

6. Procédé de détermination selon la revendication 5 dans lequel à chaque itération, le filtre de réception $a_i \in \mathbb{C}^{1 \times (N_{int})}$, $i=1, \dots, G$, déterminé pour chaque dispositif récepteur interféré tient
10 compte en outre d'un filtre de réception déterminé à une itération précédente pour ce dispositif récepteur.

7. Procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 6 dans lequel les nombres d'antennes NTx, Niso et Nint vérifient :

$$\begin{aligned} 15 \quad & NTx > K \cdot Niso \\ & \text{et } Nint \geq (G-2) \cdot K \cdot Niso + NTx \end{aligned}$$

8. Procédé de détermination selon la revendication 1 dans lequel :

— ledit système comprend G dispositifs récepteurs et K+1 dispositifs émetteurs liés à chaque
20 dispositif récepteur, G et K désignant des entiers supérieurs ou égaux à 1, chaque dispositif récepteur ayant NRx antennes de réception et étant lié à au moins un dispositif émetteur dit non interférent ayant Niso antennes d'émission et à un dispositif émetteur dit interférent ayant Nint antennes d'émission, ledit au moins un dispositif émetteur non interférent ne créant pas d'interférences vers les dispositifs récepteurs autres que celui auquel il est lié et le dispositif
25 émetteur interférent créant des interférences vers tous les dispositifs récepteurs ; et

— les filtres d'émission $b_i \in \mathbb{C}^{(N_{int}) \times 1}$ pour $i = 1, \dots, G$ destinés à être appliqués par les dispositifs émetteurs interférents et les filtres de réception $B_i \in \mathbb{C}^{(N_{Rx}) \times 1}$ pour $i = 1, \dots, G$ destinés à être appliqués par les dispositifs récepteurs sont déterminés au cours de l'étape de détermination de sorte que :

$$5 \quad B_j(m)H_{ij}^{sc} = 0 \quad \text{pour } i = 1, \dots, K, j = 1, \dots, G, m = 1, \dots, K + 1, \text{ avec } m \neq j ;$$

et pour $i=1, \dots, G$:

$$\text{Rang} \begin{bmatrix} B_1(1)H_{i1}^{mc} \\ B_1(2)H_{i1}^{mc} \\ \dots \\ B_1(K)H_{i1}^{mc} \\ B_2(1)H_{i2}^{mc} \\ B_2(2)H_{i2}^{mc} \\ \dots \\ B_2(K)H_{i2}^{mc} \\ \dots \dots \\ B_G(1)H_{iG}^{mc} \\ B_G(2)H_{iG}^{mc} \\ \dots \\ B_G(K)H_{iG}^{mc} \end{bmatrix} = K(G - 1)$$

et pour $j=1, \dots, G, i=1, \dots, G$:

$$B_j(1)H_{ij}^{mc}b_i = 0 \quad \forall (i, j)$$

10

où :

- H_{ij}^{sc} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur non interférent i et le dispositif récepteur j lié à ce dispositif émetteur, $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, K$;
- H_{ij}^{mc} est une matrice représentant le canal entre le dispositif émetteur interférent i et le dispositif récepteur j , $i=1, \dots, G$ et $j=1, \dots, K$; et

15

- $B_i = \begin{bmatrix} B_i(1) \\ B_i(2) \\ \dots \\ B_i(K + 1) \end{bmatrix}$, $i=1, \dots, G$, désigne le filtre de réception appliqué par le récepteur i .

9. Programme d'ordinateur comportant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 lorsque ledit programme est exécuté par un ordinateur.

20

10. Support d'enregistrement lisible par un ordinateur sur lequel est enregistré un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes du procédé de détermination selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

11. Unité centrale d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, les liaisons entre les dispositifs émetteurs et les dispositifs récepteurs dudit système et les interférences en résultant pouvant être modélisées sous la forme d'un réseau à interférences asymétrique partiellement connecté, ladite unité centrale comprenant un module de détermination d'au moins un filtre d'émission destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif émetteur du système et d'au moins un filtre de réception destiné à être appliqué au niveau d'un dispositif récepteur du système, ledit au moins un filtre d'émission et ledit au moins un filtre de réception étant déterminés de sorte qu'après application desdits filtres, le réseau à interférences asymétrique partiellement connecté peut être modélisé sous la forme de deux sous-réseaux isolés l'un par rapport à l'autre, des flux de données pouvant être transmis entre les émetteurs et les récepteurs de façon indépendante sur les deux sous-réseaux, sans générer d'interférences l'un envers l'autre.

12. Dispositif émetteur d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, ledit dispositif émetteur étant lié à au moins un dispositif récepteur du système de communication et comprenant :

- un module d'obtention d'un filtre d'émission déterminé par une unité centrale selon la revendication 11 ;
- un module d'application dudit filtre d'émission lors d'une communication avec ledit au moins un dispositif récepteur.

13. Dispositif émetteur selon la revendication 12 dans lequel ledit module d'application est en outre apte à appliquer un second filtre d'émission lors de ladite communication résultant de l'application d'une technique d'alignement d'interférences entre ledit dispositif émetteur et un dispositif récepteur du système de communication lié audit dispositif émetteur.

14. Dispositif récepteur d'un système de communication comprenant une pluralité de dispositifs émetteurs et une pluralité de dispositifs récepteurs, ledit dispositif récepteur étant lié à au moins un dispositif émetteur du système de communication et comprenant :

- un module d'obtention d'un filtre de réception déterminé par une unité centrale selon la revendication 11 ;
- un module d'application dudit filtre de réception lors d'une communication avec ledit au moins un dispositif émetteur.

15. Dispositif récepteur selon la revendication 14 lequel ledit module d'application est en outre apte à appliquer un second filtre de réception lors de ladite communication résultant de

l'application d'une technique d'alignement d'interférences entre ledit dispositif récepteur et un dispositif émetteur du système de communication auquel est lié le dispositif récepteur.

1/6

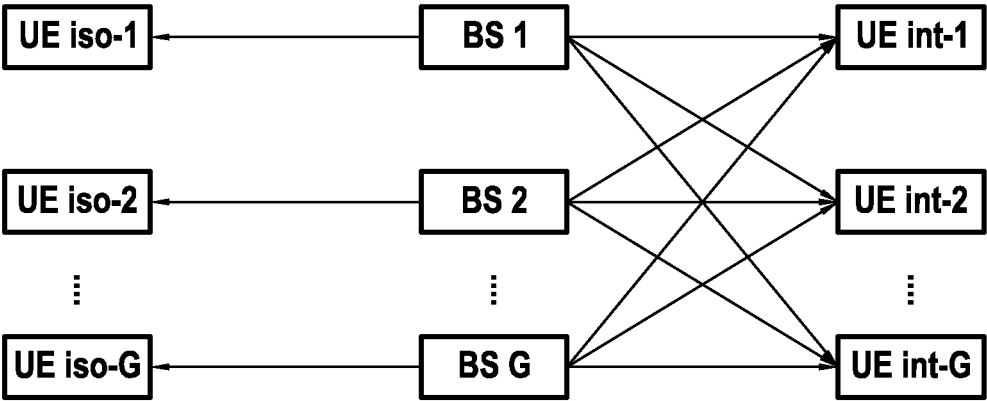


FIG.1

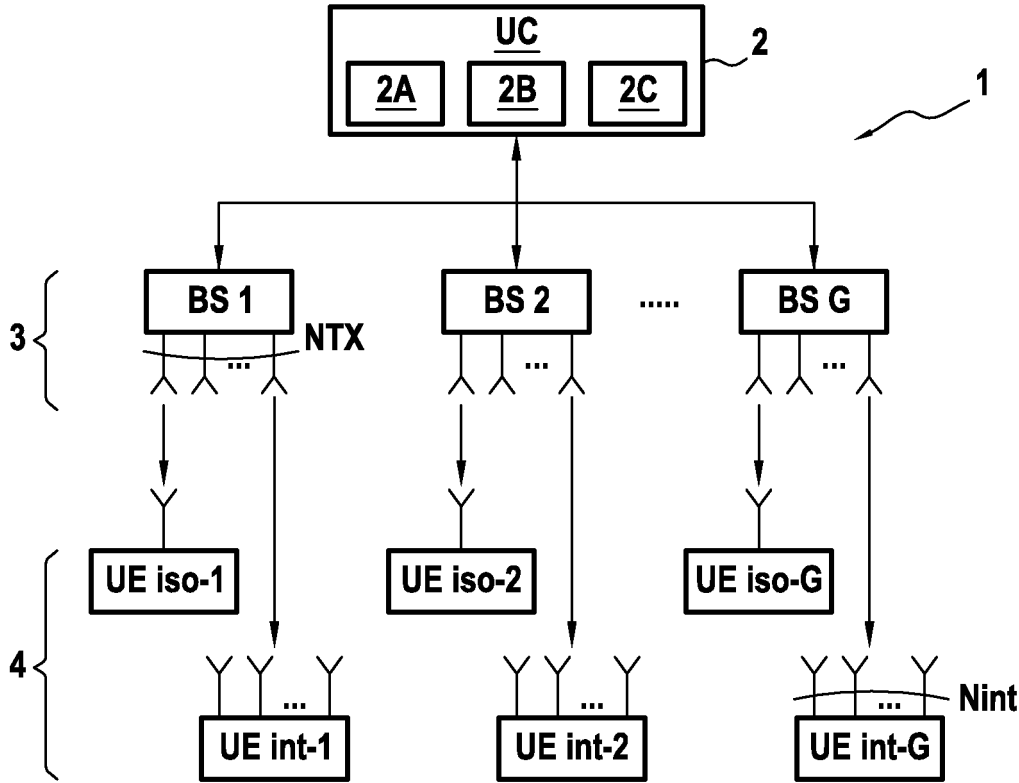


FIG.2

2/6

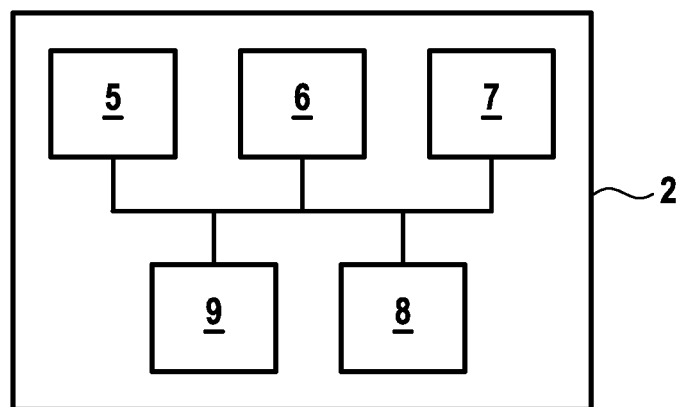


FIG. 3

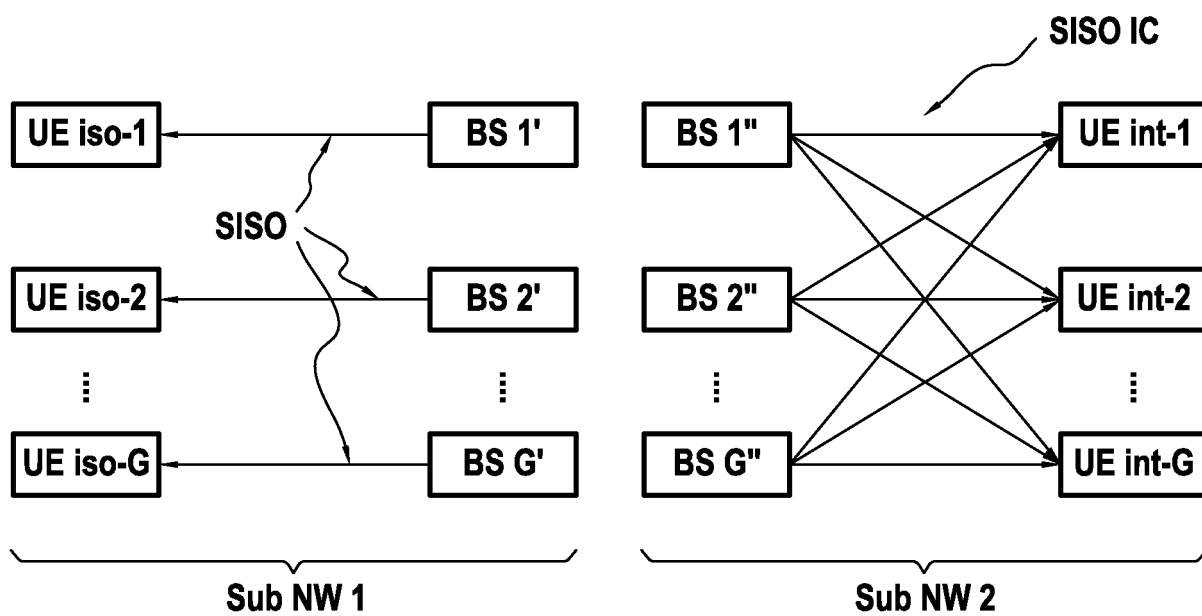


FIG. 5

3/6

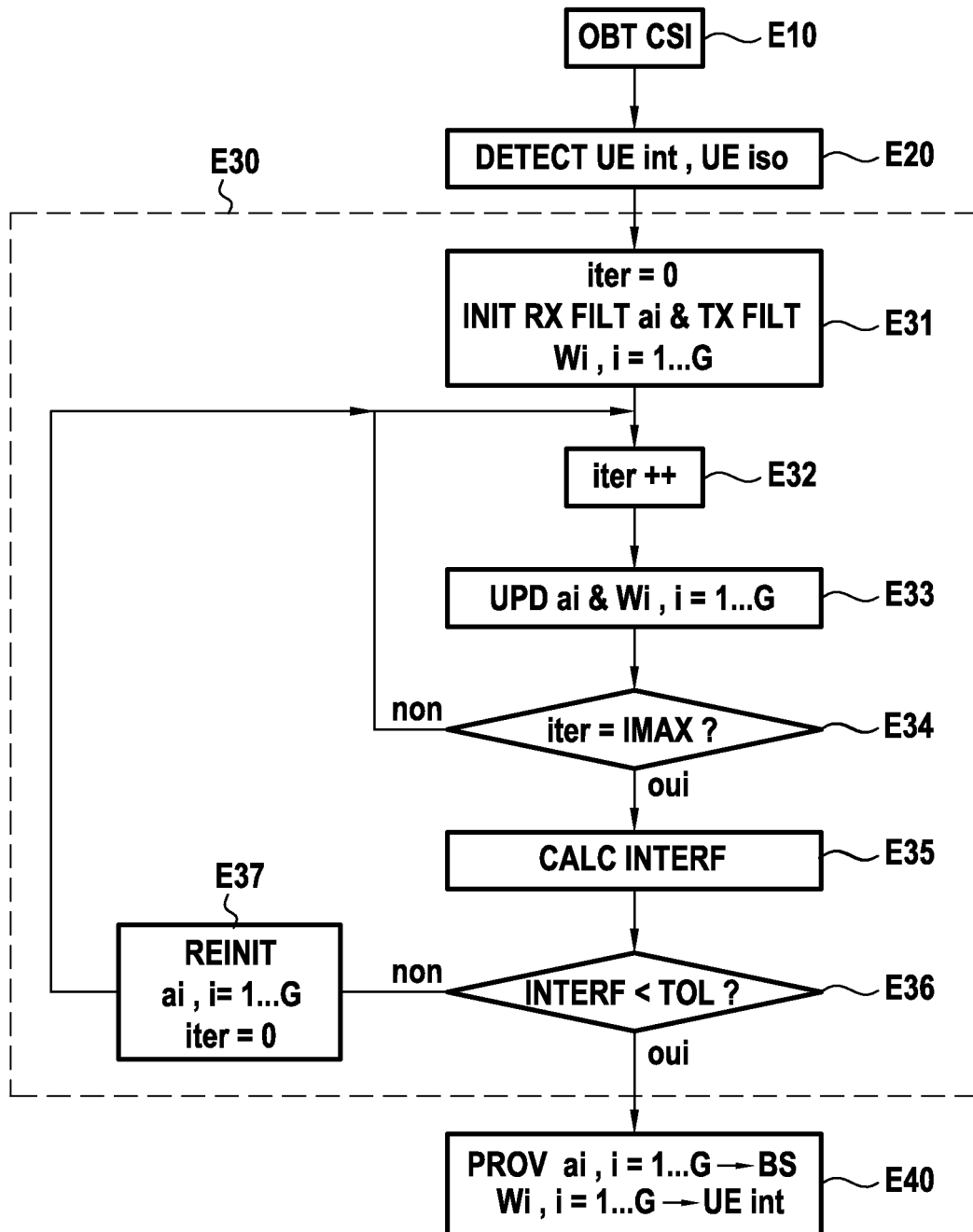


FIG.4

4/6

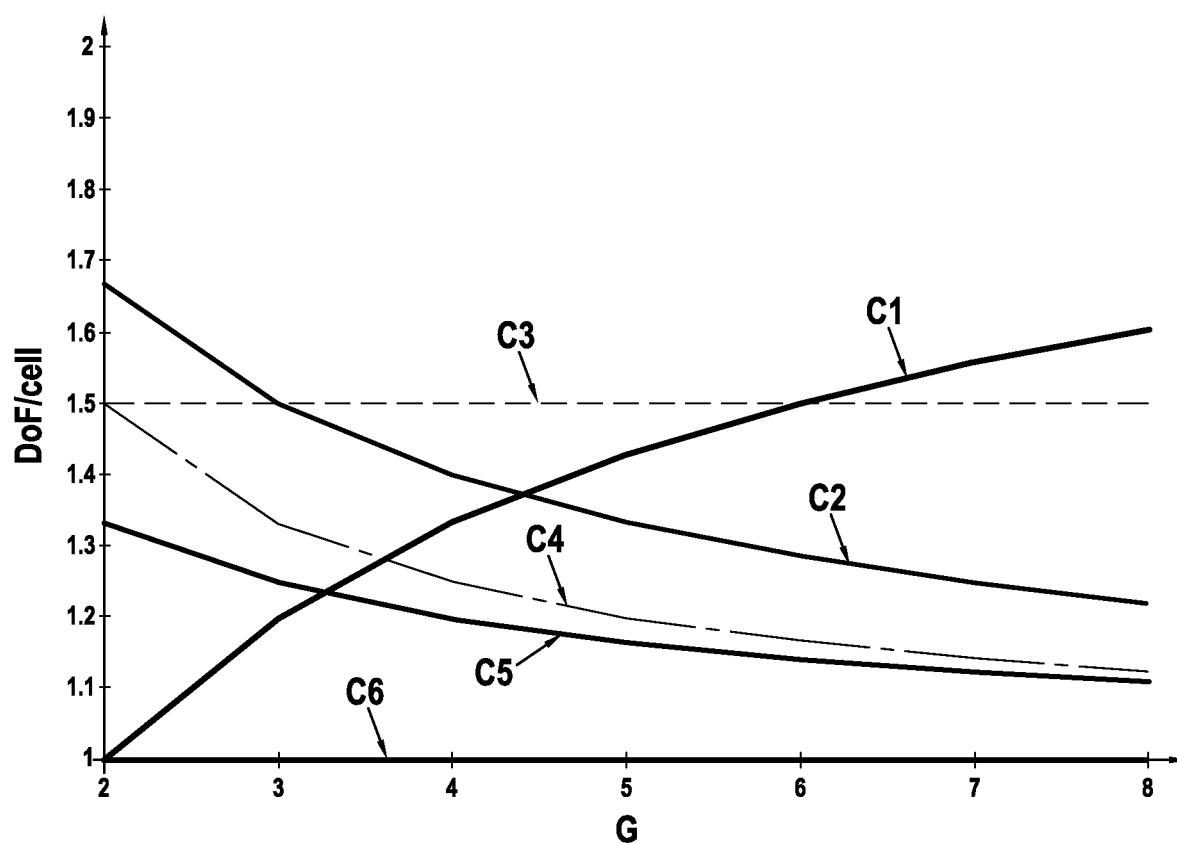


FIG.6A

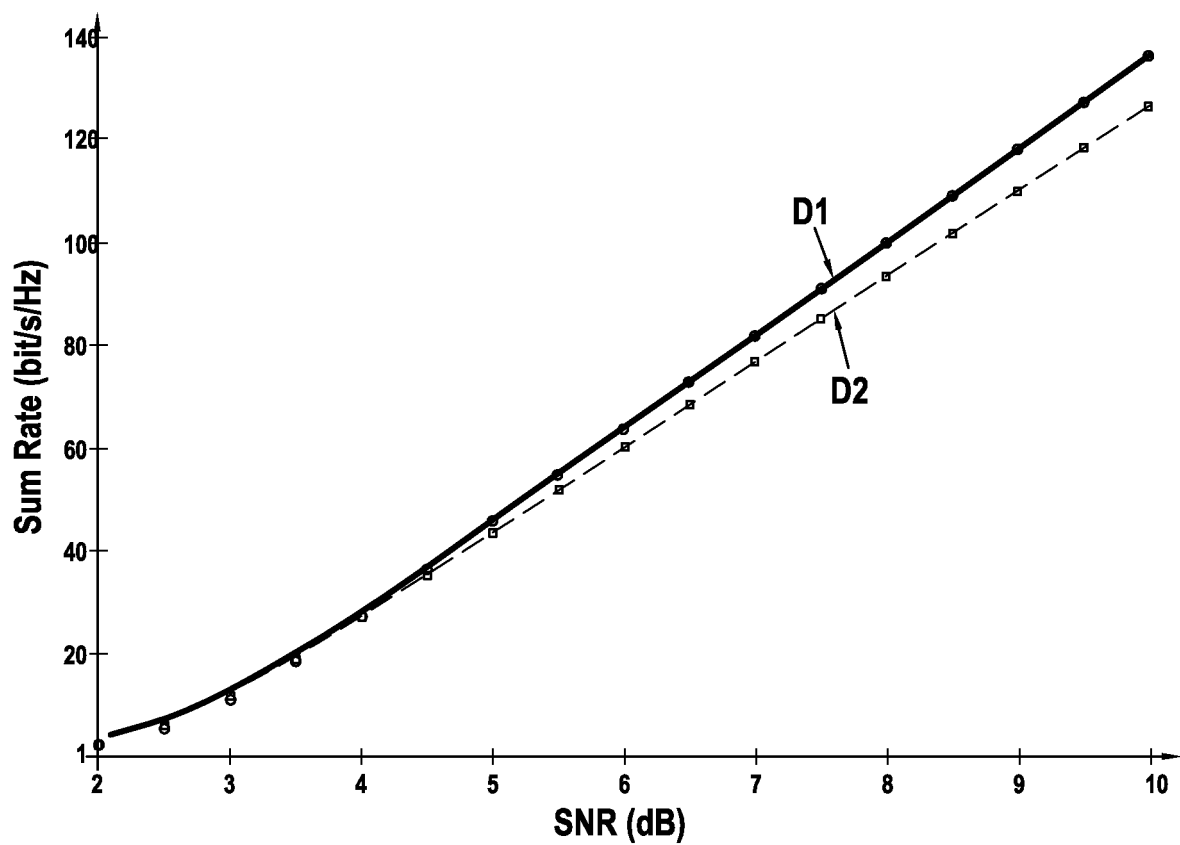


FIG.6B

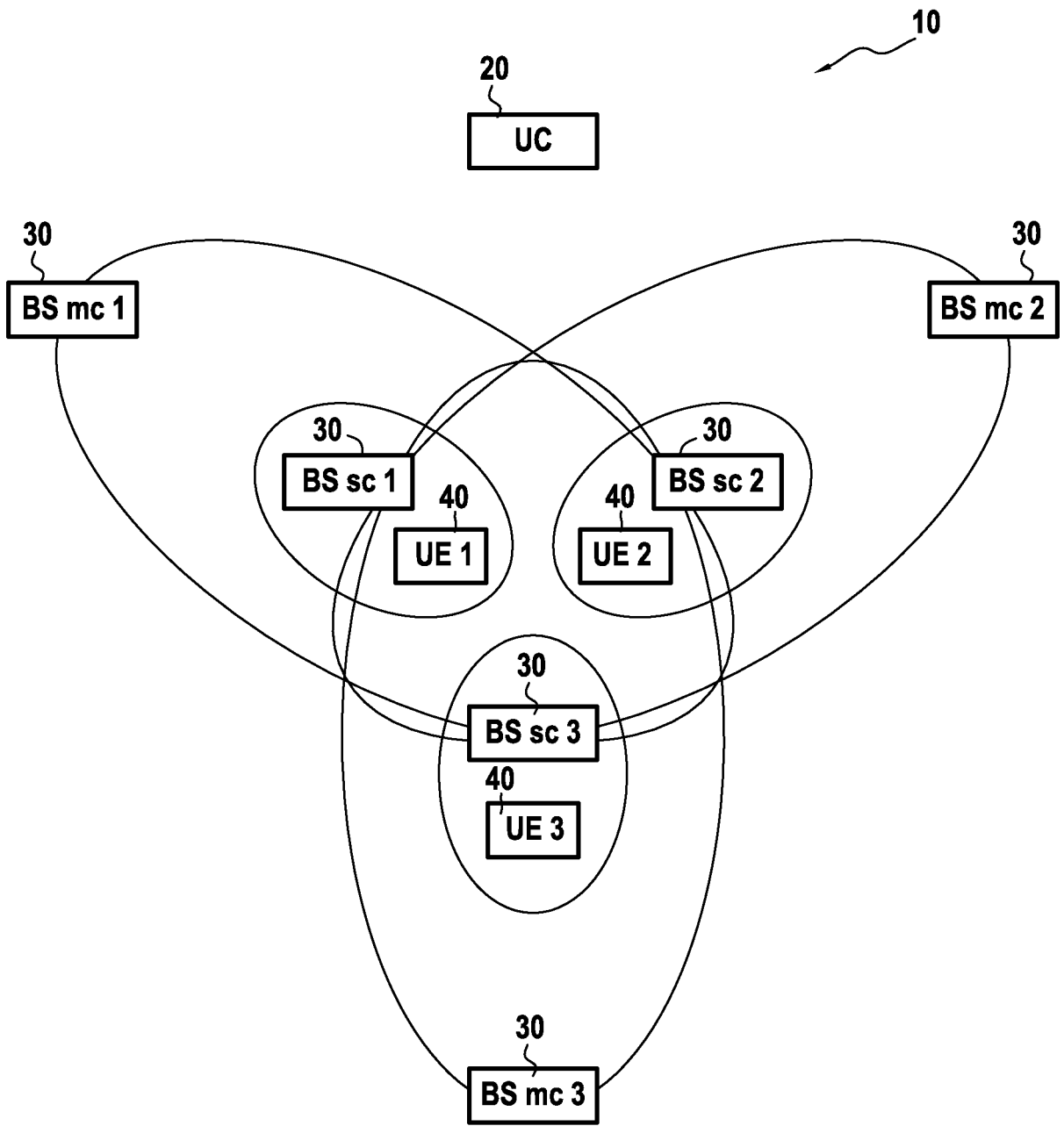
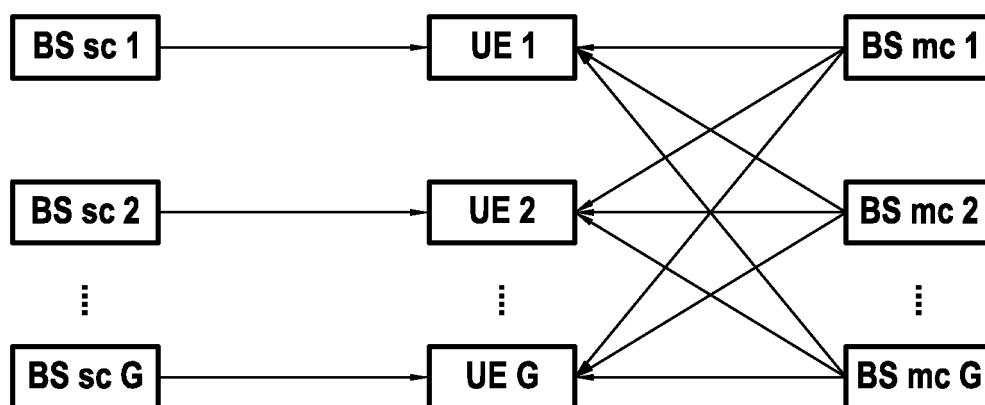
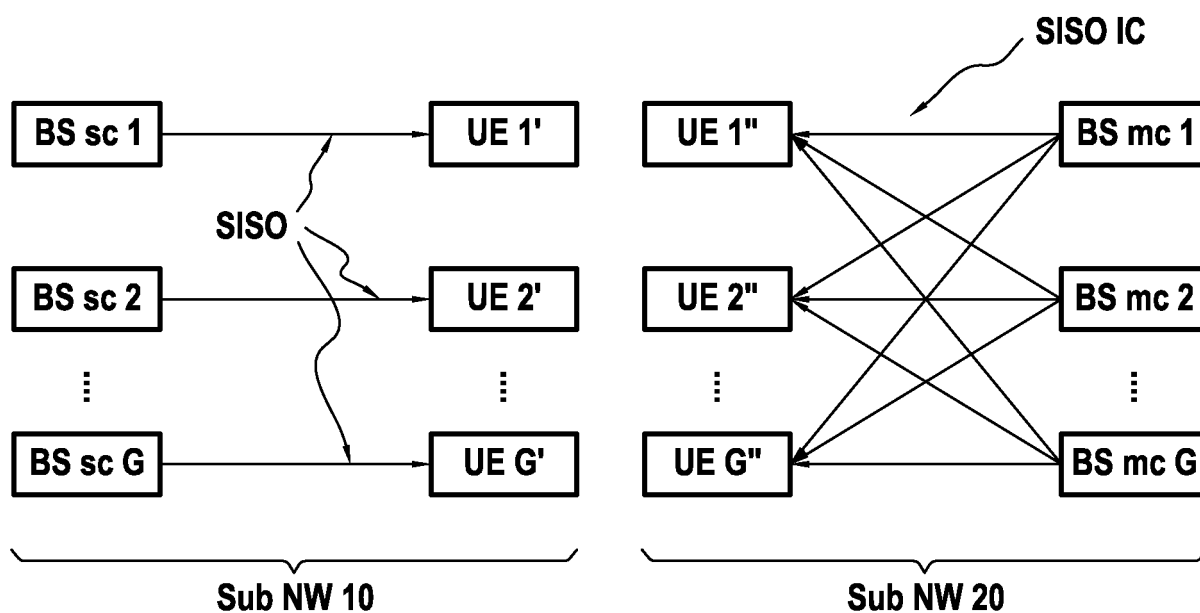


FIG.7

6/6

**FIG.8****FIG.9**



RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement
national

FA 799404
FR 1456224

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 2012/281778 A1 (RUAN LIANGZHONG [CN] ET AL) 8 novembre 2012 (2012-11-08) * le document en entier *	1-15	H04B15/00 H04B1/7097 H04B1/10
A	LIANGZHONG RUAN ET AL: "Interference Alignment for Partially Connected MIMO Cellular Networks", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 60, no. 7, 1 juillet 2012 (2012-07-01), pages 3692-3701, XP011447366, ISSN: 1053-587X, DOI: 10.1109/TSP.2012.2192432 * le document en entier *	1-15	
A	YETIS C M ET AL: "On Feasibility of Interference Alignment in MIMO Interference Networks", IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, US, vol. 58, no. 9, 1 septembre 2010 (2010-09-01), pages 4771-4782, XP011309308, ISSN: 1053-587X * le document en entier *	1-15	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (IPC) H04B
A	CADAMBE V R ET AL: "Interference Alignment and Spatial Degrees of Freedom for the K User Interference Channel", IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, 2008 : ICC '08 ; 19 - 23 MAY 2008, BEIJING, CHINA, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 19 mai 2008 (2008-05-19), pages 971-975, XP031265511, ISBN: 978-1-4244-2075-9 * le document en entier *	1-15	
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
23 février 2015		Ayala Perriello, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant			

