

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2022/136798 A1

(43) Date de la publication internationale
30 juin 2022 (30.06.2022)

(51) Classification internationale des brevets :
H04L 1/00 (2006.01) H04L 1/18 (2006.01)
H04L 5/00 (2006.01)

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2021/052423

(22) Date de dépôt international :
21 décembre 2021 (21.12.2021)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
2014132 24 décembre 2020 (24.12.2020) FR

(71) Déposant : ORANGE [FR/FR] ; 111, quai du Président
Roosevelt, 92130 Issy-les-Moulineaux (FR).

(72) Inventeurs : VISOZ, Raphaël ; ORANGE - Intellectual
Property and Licensing, Orange Gardens - 44 avenue de
la République -, CS 50010, 92326 CHÂTILLON CEDEX
(FR). AL KHANSA, Ali ; ORANGE - Intellectual Property
and Licensing, Orange Gardens - 44 avenue de la Répu-
blique -, CS 50010, 92326 CHÂTILLON CEDEX (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,
CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,
HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,
KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME,
MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ,
OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA,

(54) Title: METHOD FOR RECEIVING AT LEAST ONE DATA FRAME IN AN OMAMRC SYSTEM, AND CORRESPONDING DESTINATION, COMPUTER PROGRAM AND SYSTEM

(54) Titre : PROCÉDE DE RECEPTION D'AU MOINS UNE TRAME DE DONNEES DANS UN SYSTEME OMAMRC, DESTINATION, PROGRAMME D'ORDINATEUR ET SYSTEME CORRESPONDANTS

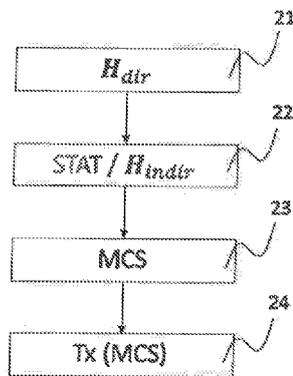


Fig 2

(57) Abstract: Method for receiving at least one data frame in an OMAMRC system, corresponding destination, computer program and system. The invention relates to a method for receiving at least one data frame in a communication system implementing M sources, optionally L relays and a destination, where $M \geq 2$ and $L \geq 0$, according to which the destination implements, for at least one data frame and the associated sequencing, an initial link adaptation phase, prior to the first transmission phase of the frame, comprising: - estimating (21) the transmission channels associated with the direct links between the sources and/or relays and the destination, which channels are referred to as direct channels, - obtaining (22) statistics of the transmission channels associated with the indirect links between the sources and/or relays and the destination, which channels are referred to as indirect channels, and - determining (23), from the indirect channel statistics and direct channel estimates, M rates to be allocated to the M sources for transmitting the data frame.

(57) Abrégé : Procédé de réception d'au moins une trame de données dans un système OMAMRC, destination, programme d'ordinateur et système correspondants. L'invention concerne un procédé de réception d'au moins une trame de données, dans un système de communication mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et une destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$, selon lequel la destination met en œuvre, pour au moins une trame de données et l'ordonnancement associé, une phase initiale d'adaptation de lien, préalable à la première phase de transmission de ladite trame, comprenant : - l'estimation (21) des canaux de transmission associés aux liens directs entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux directs, - l'obtention (22) des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux indirects, - la détermination (23), à partir desdites statistiques des canaux indirects et estimations desdits canaux directs, de M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.



WO 2022/136798 A1

SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasienn (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

DESCRIPTION

Titre : Procédé de réception d'au moins une trame de données dans un système OMAMRC, destination, programme d'ordinateur et système correspondants.

1. Domaine de l'invention

La présente invention se rapporte au domaine des communications numériques.

L'invention se rapporte plus particulièrement à la transmission de trames de données entre au moins deux sources et une destination avec relaiage par au moins un nœud pouvant être un relais ou une source, et à la phase d'adaptation de lien mise en œuvre préalablement à la transmission d'une trame.

Il est entendu qu'un relais n'a pas de message à transmettre. Un relais est un nœud dédié au relaiage des messages des sources tandis qu'une source a son propre message à transmettre et peut en outre, dans certain cas, relayer les messages des autres sources. La source est dite coopérative dans ce cas.

Il existe de nombreuses techniques de relaiage connues sous leur appellation anglo-saxonne : « amplify and forward », « decode and forward », « compress-and-forward », « non-orthogonal amplify and forward », « dynamic decode and forward », etc.

L'invention s'applique notamment, mais non exclusivement, à la transmission de données via des réseaux mobiles, par exemple pour des applications temps réel, ou via par exemple des réseaux de capteurs.

Un tel réseau peut notamment être un réseau multi-utilisateurs, constitué de plusieurs sources, plusieurs relais et une destination utilisant un schéma d'accès multiple orthogonal du canal de transmission entre les sources, relais et la destination, noté OMAMRC (« *Orthogonal Multiple-Access Multiple-Relay Channel* » selon la terminologie anglosaxonne).

2. Art antérieur

On décrit ci-après l'art antérieur en relation avec un système de communication OMAMRC mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et une destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$.

Dans un tel système de communication, au cours d'une première phase de transmission, les M sources sont configurées pour transmettre des messages sur K intervalles de temps (en anglais « time slots ») et B sous-bandes de fréquence, avec $K \geq 1$ et $B \geq 1$. Au cours d'une deuxième phase de transmission coopérative, une sélection de relais parmi les M sources et les L relais est configurée pour transmettre un signal représentatif d'au moins un des messages sur T_{used} intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence.

Une trame comprend les données transmises sur les $(K + T_{used})$ intervalles de temps.

Une phase d'adaptation de lien peut être mise en œuvre préalablement à la transmission d'au moins une trame, pour déterminer les ressources à allouer aux sources pour la transmission des trames.

Différentes techniques d'adaptation de lien sont connues.

Par exemple, si les conditions radio varient rapidement, i.e. en cas de variations rapides du canal global de transmission entre les sources et la destination (par exemple en situation de mobilité), une technique d'adaptation lente de lien peut être mise en œuvre (en anglais « Slow Link Adaptation » ou SLA). A l'inverse, si les conditions radio varient lentement, une technique d'adaptation rapide de lien peut être mise en œuvre (en anglais « Fast Link Adaptation » ou FLA).

La différence entre ces techniques d'adaptation lente ou rapide de lien repose sur la connaissance des différents liens du système par la destination.

En effet, comme un tel système de communication fait intervenir des relais, la destination ne connaît pas tous les liens du système et peut observer directement uniquement les liens directs (source vers destination ou relais vers destination). En revanche, les liens indirects entre les sources (S-S), entre les relais (R-R), entre les sources et les relais (S-R) ne sont pas directement observables par la destination.

Pour obtenir une connaissance totale de tous les liens du système au niveau de la destination (en anglais « Channel State Information », CSI), les sources / relais peuvent estimer les canaux indirects et remonter ces informations à la destination (« feedback »). La destination peut estimer directement les canaux directs.

Une telle connaissance CSI par la destination est toutefois particulièrement coûteuse, car elle nécessite un échange d'informations de contrôle important entre les sources, les relais et la destination.

Si le canal global de transmission entre les sources et la destination varie lentement, il est possible de remonter toutes les estimations des canaux indirects à la destination (par exemple avant la transmission d'une nouvelle trame ou de quelques trames, ou dès qu'un changement dans l'estimation d'un canal indirect est détecté) et de mettre en œuvre une technique d'adaptation de lien de type FLA pour déterminer les débits à allouer aux sources. Une nouvelle allocation peut ainsi être mise en œuvre trame par trame ou pour un groupe de quelques trames, ou dès qu'un changement de CSI est détecté.

En revanche, si le canal global de transmission entre les sources et la destination varie rapidement, la connaissance CSI à la destination devient trop coûteuse.

Pour limiter le coût de la surcharge de la voie de retour (« feedback overhead »), seule une information sur la distribution/statistique des canaux (en anglais « Channel Distribution Information », CDI) de tous les liens est supposée connue par la destination. Par exemple, une telle information sur la distribution/statistique des canaux est une qualité moyenne (par exemple un rapport signal à bruit moyen « SNR moyen », un rapport signal à bruit plus interférence moyen « SINR moyen », etc). Une telle information CDI est supposée constante sur plusieurs centaines de trames.

Dans ce cas, une technique d'adaptation de lien de type SLA est mise en œuvre pour déterminer les débits à allouer aux sources. Une nouvelle allocation peut ainsi être mise en œuvre pour un groupe de quelques centaines de trames, ou dès qu'un changement de CDI est détecté.

Le document WO 2019/162592 publié le 29 août 2019 décrit notamment un système de communication OMAMRC mettant en œuvre une adaptation lente de lien. Il propose une technique permettant de maximiser l'efficacité spectrale moyenne (métrique d'utilité) au sein du système considéré sous-contrainte de respecter une qualité de service individuelle (QoS) par source.

On présente ci-après l'efficacité spectrale globale d'un système de communication OMAMRC mettant en œuvre une technique d'allocation de débit basée sur une technique FLA ou sur une technique SLA selon l'art antérieur.

Soit $\eta^{frame}(P, H)$ une variable aléatoire représentative de l'efficacité spectrale par trame par rapport à une stratégie d'allocation de débit P , notée $P = P_{sla}$ pour une technique d'adaptation lente de lien et $P = P_{fla}$ pour une technique d'adaptation rapide de lien, et H une matrice représentative du canal global de transmission.

On définit deux efficacités spectrales moyennes, dont l'une est une très bonne approximation de l'autre : l'efficacité spectrale globale par trame $\bar{\eta}$ et l'efficacité spectrale globale $\bar{\eta}_0$, qui est le rapport du nombre moyen de bits correctement reçus et du nombre moyen d'utilisation de canal (ressource radio sous bandes et intervalle de temps) nécessaire. On suppose que le canal global de transmission est invariant pour la durée d'une trame, i.e. que les liens directs et indirects ne varient pas pour la durée d'une trame.

On définit le vecteur représentatif d'un nombre de sous-bandes allouées pour chaque nœud (source ou relais), pour un intervalle de temps t , comme un vecteur à $(M+L)$ dimensions $n_t \in \{0, \dots, B\}^{M+L}$. $n_{t,i}$ est le nombre de sous-bandes allouées à un utilisateur i pour une transmission sur l'intervalle de temps $t = 0$ correspondant à la première phase de transmission, ou sur un intervalle de temps $t > 0$ correspondant à la phase de transmission coopérative.

Si une technique d'adaptation lente de lien est mise en œuvre, l'efficacité spectrale globale peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\bar{\eta}^{sla} = \mathbb{E}\{\eta^{frame}(P_{sla}, H)\}$$

avec $\mathbb{E}\{\cdot\}$ l'opérateur qui correspond à la moyenne/espérance sur la distribution du canal H

où

$$\bar{\eta}_0^{sla} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}(T_{used})} (1 - \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}}\}),$$

avec :

$$R_i = \frac{K_i}{n_{0,i} \times F},$$

K_i la charge utile transmise $n_{0,i} \times F$ ressources temps-fréquence (également appelées « utilisation de canal » ou « channel use » ou « ressource element » selon la terminologie du 3GPP) par la source i ,

T_{used} le nombre de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative,

T_{max} le nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative,

$\mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}}\}$ l'espérance d'une indication d'événement de coupure individuel $\mathcal{O}_{i,T_{max}}$ pour la source i à l'issue de la phase de transmission coopérative.

Une indication d'événement de coupure est une variable aléatoire prenant une valeur égale à 1 si un nœud source ou un ensemble de nœuds source n'est pas décodé correctement par la destination (notamment à l'issue d'un nombre maximum de transmissions coopératives autorisées T_{max}), 0 sinon. Plus, généralement, on définit l'indication de coupure $\mathcal{O}_{i,t}$ comme une variable aléatoire qui prend la valeur 1 si la source i n'est pas décodée correctement après la première phase de transmission et à chaque transmission coopérative l jusqu'à t ($l = 1, \dots, t$). Si la source i est décodée correctement avant ou à la transmission t , l'indication de coupure $\mathcal{O}_{i,t}$ prend la valeur 0. Ainsi, $\mathcal{O}_{i,T_{max}} = 1$ signifie que la source i ne sera pas décodée correctement durant une trame (car le nombre de transmission pendant la phase de transmission coopérative ne peut dépasser T_{max}).

$\mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}}\} = \Pr(\mathcal{O}_{i,T_{max}} = 1)$ est donc la probabilité d'un événement de coupure de type « la source i n'est pas décodée correctement » et représente l'ensemble des liens ayant conduits à une coupure de la source i .

$\mathbb{E}(T_{used})$ représente l'espérance du nombre d'intervalles de temps nécessaire pour la phase de transmission coopérative, et peut être déterminé comme suit : $\mathbb{E}(T_{used}) = \sum_{t=0}^{T_{max}} t \Pr(T_{used} = t)$.

Une utilisation du canal est la plus petite granularité en ressource temps-fréquence défini par le système qui permet la transmission d'un symbole modulé. Le nombre d'utilisations du canal est lié à la bande de fréquence disponible et à la durée de transmission.

Si une technique d'adaptation rapide de lien est mise en œuvre, l'efficacité spectrale globale peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\bar{\eta}^{\text{fla}} &= \mathbb{E}\{\eta^{\text{frame}}(P_{\text{fla}}, H)\} \\ &= \mathbb{E}\left\{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + T_{\text{used}}} (1 - \mathcal{O}_{i, T_{\text{max}}})\right\},\end{aligned}$$

avec :

$\mathcal{O}_{i, T_{\text{max}}}$ un événement de coupure individuel pour la source i à l'issue de la phase de transmission coopérative comme décrit ci-dessus,

T_{used} une variable correspondant au nombre minimal de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative permettant de décoder l'ensemble des sources (i.e. aucune source n'est coupée) :

$$T_{\text{used}} = \min_{t \leq T_{\text{max}}} t \text{ tel que (toutes les sources sont décodées correctement ou } t = T_{\text{max}})$$

En résumé, la technique d'adaptation rapide de lien, basée sur une connaissance totale du canal global de transmission (CSI) permet d'allouer des débits aux sources d'une façon précise.

Néanmoins, dans un système MAMRC, le nombre de canaux / liens croît de façon exponentielle avec le nombre de nœuds (source ou relais). Par conséquent, il existe une forte probabilité qu'au moins un lien varie au cours du temps, engendrant l'échange d'une grande quantité d'informations de contrôle entre les sources/ relais et la destination.

Une telle technique d'adaptation rapide de lien est donc difficilement utilisable.

Pour éviter l'échange d'un tel volume d'informations de contrôle, une technique d'adaptation lente peut être utilisée.

Néanmoins, une telle technique d'adaptation lente de lien est moins précise qu'une technique d'adaptation rapide de lien. En effet, la connaissance d'une distribution/statistique des canaux (CDI) peut être assez éloignée de la connaissance réelle des canaux (CSI) à un instant donné, ce qui peut engendrer des approximations lors de l'allocation des débits aux sources et réduire les performances du système de communication, par exemple en termes d'efficacité spectrale.

Il existe donc un besoin pour une nouvelle technique d'adaptation de lien qui ne présente pas l'ensemble des inconvénients de l'art antérieur.

3. Exposé de l'invention

L'invention propose une solution, sous la forme d'un procédé de réception d'au moins une trame de données, dans un système de communication mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et une destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$,

lesdites M sources étant configurées pour transmettre, au cours d'une première phase de transmission, des messages sur K intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, avec $K > 1$ et $B \geq 1$, ou $K \geq 1$ et $B > 1$, et une sélection desdites M sources et desdits L relais étant configurée

pour transmettre, au cours d'une phase de transmission coopérative un signal représentatif d'au moins un desdits messages sur T_{used} intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, selon un ordonnancement choisi par ladite destination,

les données transmises sur lesdits $(K + T_{used})$ intervalles de temps formant une trame de données.

Selon l'invention, ladite destination met en œuvre, pour au moins une trame de données et l'ordonnancement associé, une phase initiale d'adaptation de lien, préalable à ladite première phase de transmission de ladite trame, comprenant :

- l'estimation des canaux de transmission associés aux liens directs entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux directs,
- l'obtention des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux indirects, et
- la détermination, à partir desdites statistiques des canaux indirects et desdites estimations des canaux directs, de M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.

Par rapport à une technique d'adaptation lente de lien selon l'art antérieur, la solution proposée permet d'améliorer la précision de l'allocation de débit pour la transmission d'une trame de données, puisqu'elle tient compte de l'estimation des canaux directs (CSI des liens directs). Les débits à allouer aux sources peuvent ainsi être déterminés à partir d'une connaissance des informations CSI des liens directs. La solution proposée est donc plus robuste, même en cas de mobilité des sources et/ou des relais.

On rappelle que la technique d'adaptation lente de lien classique utilise la connaissance d'une distribution/statistique de l'ensemble des canaux (CDI), et n'est mise en œuvre que lorsque la statistique des canaux est mise à jour, par exemple toutes les centaines de trames. La destination n'utilise donc pas toute l'information à sa disposition, et n'utilise notamment pas la connaissance des liens directs source-destination et relais-destination.

Par rapport à une technique d'adaptation rapide de lien selon l'art antérieur, la solution proposée permet de réduire la quantité d'informations de contrôle échangées, puisqu'elle tient compte d'une connaissance d'une distribution/statistique des canaux indirects uniquement (CDI des liens indirects). Les débits à allouer aux sources peuvent ainsi être déterminés à partir de valeurs moyennes sur les liens indirects. En particulier, les sources et/ou relais sont donc adaptés à estimer les CDI des canaux indirects et à les remonter à la destination.

La solution proposée permet donc, selon au moins un mode de réalisation, d'utiliser les informations directement disponibles à la destination (estimation des canaux directs), tout en limitant le volume d'informations de contrôle échangé.

Notamment, la solution proposée peut être mise en œuvre lorsqu'une technique d'adaptation rapide de lien ne peut pas être implémentée car le canal global varie trop rapidement, ou quand une technique d'adaptation lente de lien est peu performante.

La solution proposée tire ainsi avantage des techniques d'adaptation rapide de lien sur les canaux directs pour optimiser l'allocation de débit, et d'adaptation lente de lien sur les canaux indirects pour limiter l'échange d'informations de contrôle. La solution proposée peut donc être considérée comme une solution intermédiaire d'adaptation de lien, basée sur une connaissance partielle du canal global à la destination.

En particulier, la solution proposée peut être mise en œuvre dans un système de communication de type OMAMRC mettant en œuvre un schéma d'accès multiple orthogonal en temps (en anglais « Time Division Multiplexing », TDM), avec dans ce cas $K \geq 1$ et $B = 1$, ou en fréquence (en anglais « Frequency Division Multiplexing », FDM), avec dans ce cas $K = 1$ et $B \geq 1$.

Un intervalle de temps associé à une sous-bande de fréquence peut notamment être divisé en F ressources temps/fréquence, avec $F \geq 1$.

En particulier, l'allocation de sous bandes entre les sources permet de réduire le temps nécessaire pour transmettre des données puisque les sources émettent simultanément dans un seul et même premier intervalle de temps (time slot). Un tel procédé est donc bien adapté pour des services exigeant en termes de latence.

Selon un mode de réalisation particulier, comme pour la technique d'adaptation rapide de lien, l'estimation des canaux directs peut être mise en œuvre pour chaque trame de données, pour un groupe de quelques trames (inférieur à 10 trames par exemple), ou dès qu'une variation d'un canal direct est détectée.

Les canaux directs peuvent notamment être estimés à partir d'au moins un signal de référence reçu par ladite destination, et émis par lesdites sources et/ou lesdits relais.

Par exemple, un signal de référence peut être un signal de référence de sondage (en anglais « Sounding Reference Signal » ou SRS, tels que définis dans la norme 3GPP LTE/NR). Notamment, de tels signaux de référence peuvent être émis par les sources et/ou les relais, à réception d'une requête de la destination. En particulier, une telle requête peut être diffusée par la destination dans un système de communication OMAMRC préalablement à la transmission d'une première trame de données.

En variante, le signal de référence peut être un signal de référence de démodulation (en anglais Demodulation Reference Signal » ou DMRS, tels que définis dans la norme 3GPP LTE/NR). Notamment, de tels signaux de référence peuvent être transmis conjointement aux trames de données au cours de la première phase de transmission ou de la phase de transmission coopérative d'une trame, et être

utilisés pour mettre à jour l'estimation des canaux directs (i.e. lorsqu'une première estimation des canaux directs est disponible au niveau de la destination).

Selon un autre mode de réalisation particulier, comme pour la technique d'adaptation lente de lien, l'obtention des statistiques des canaux indirects peut être mise en œuvre pour un ensemble de trames, par exemple une centaine de trames. En effet, une telle information CDI est supposée constante sur plusieurs centaines de trames.

En variante, les statistiques des canaux indirects peuvent être mise à jour dès qu'une variation d'un canal indirect est détectée.

La statistique des canaux indirects correspond par exemple à une qualité moyenne (par exemple un rapport signal à bruit moyen « SNR moyen », un rapport signal à bruit plus interférence moyen « SINR moyen », etc). Par exemple, la statistique de distribution de chaque lien indirect suit une distribution gaussienne et ne dépend que d'un paramètre qui est le SNR. D'autres distributions peuvent être envisagées, comme une distribution de Dirac. Dans ce cas, la statistique de distribution de chaque lien indirect suit une distribution de Dirac autour de la racine carrée des SNR associés à chacun des canaux indirects.

Par exemple, les sources ou relais sur un lien indirect recevant un signal de référence peuvent estimer le canal de transmission associé à ce lien indirect, puis déterminer une statistique associée à ce lien indirect et remonter cette information à la destination.

En particulier, si une source ou un relai d'un lien indirect détecte un changement dans le canal indirect, elle peut envoyer une notification à la destination signalant une modification d'au moins une statistique d'un desdits canaux indirects. Une telle notification est par exemple de type « Event driven CDI update ».

Ainsi, la destination peut mettre en œuvre une mise à jour de la statistique des canaux indirects à réception d'une telle notification.

Selon un mode de réalisation particulier, ladite détermination de M débits à allouer aux M sources met en œuvre une maximisation d'une métrique de qualité de service dudit système de communication, connaissant l'estimation des canaux directs.

Une telle métrique de qualité de service est par exemple de type efficacité spectrale, BLER (« Block Error Rate »), etc. Une maximisation de la qualité de service permet par exemple d'optimiser le débit ou de diminuer la puissance d'émission des sources pour un même débit.

Par exemple, ladite maximisation s'exprime sous la forme :

$$(\hat{R}_1, \dots, \hat{R}_M) = \underset{(R_1, \dots, R_M) \in \{\tilde{R}_1, \dots, \tilde{R}_{n_{MCS}}\}}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}(T_{\text{used}} | H_{\text{dir}})} (1 - \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i, T_{\text{max}}} | H_{\text{dir}}\})$$

sous contrainte que :

$$\mathbb{E}(\mathcal{O}_{i,T_{max}}|H_{dir}) \leq QoS, i \forall i \in \mathcal{S}$$

avec :

\mathcal{S} l'ensemble des sources,

R_i une variable représentant le débit à allouer à la source i , $i \in \{1, \dots, M\}$,

$n_{0,i}$ le nombre de sous-bandes allouées à la source i durant la première phase de transmission,

H_{dir} l'estimation des canaux directs,

$\mathcal{O}_{i,T_{max}}$ est l'indication de coupure qui prend la valeur 1 si la source i n'est pas décodé correctement durant une trame,

T_{used} le nombre de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative,

T_{max} le nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative,

$\mathbb{E}(T_{used}|H_{dir})$ une moyenne du nombre de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative, connaissant l'estimation des canaux directs,

$\mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}}|H_{dir}\}$ une moyenne du nombre de messages transmis par la source i non décodés par la destination à l'issue de la phase de transmission coopérative, connaissant l'estimation des canaux directs,

$\mathbb{E}(\mathcal{O}_{i,T_{max}}|H_{dir}) \leq QoS, i \forall i \in \mathcal{S}$ le taux d'erreur moyen acceptable par rapport à une qualité de service QoS, connaissant l'estimation des canaux directs.

Selon un mode de réalisation particulier, ladite détermination de M débits à allouer aux M sources met en œuvre un algorithme itératif basé sur la détermination d'un débit à allouer à la source i , pour chaque $i \in \{1, \dots, M\}$, en supposant les débits à allouer aux autres sources connus.

Par exemple, ladite détermination met en œuvre un algorithme itératif de type « Best Response Dynamics ».

Un tel algorithme permet notamment de réduire la complexité de la fonction multi-dimensionnelle de maximisation.

En particulier, un tel algorithme itératif peut être initialisé en utilisant un algorithme de type « Genie Aided ».

Selon un mode de réalisation particulier, la détermination des M débits à allouer aux M sources est mise en œuvre conjointement à la détermination d'un ordonnancement optimisé pour ladite trame.

On cherche alors à résoudre un problème joint d'optimisation de l'allocation des débits et de l'allocation des ressources.

Selon un mode de réalisation particulier, la destination transmet auxdites sources au moins une information représentative desdits débits (par exemple un schéma de modulation et codage (en anglais « Modulation and Coding Scheme » ou MCS), un index d'un schéma de modulation et codage, le débit lui-même, etc).

Par exemple, une telle information est diffusée par la destination, ou transmise dans un canal de contrôle spécifique à chaque source ou commun aux différentes sources. En particulier, la remontée des débits peut s'effectuer via des canaux de contrôle à débit très limité.

L'invention concerne également un nœud destination correspondant.

Un tel nœud destination est notamment adapté à mettre en œuvre le procédé de réception décrit précédemment. Il s'agit par exemple d'une station de base ou d'un eNodeB. Une telle destination pourra bien sûr comporter les différentes caractéristiques relatives au procédé selon l'invention, qui peuvent être combinées ou prises isolément. Ainsi, les caractéristiques et avantages de la destination sont les mêmes que ceux du procédé décrit précédemment. Par conséquent, ils ne sont pas détaillés plus amplement.

L'invention a en outre pour objet, un système comprenant M sources s_1, \dots, s_M , éventuellement L relais r_1, \dots, r_L et une destination d , $M \geq 2$, $L \geq 0$, pour une mise en œuvre d'un procédé de réception selon l'invention.

L'invention concerne encore un ou plusieurs programmes d'ordinateur comportant des instructions pour la mise en œuvre d'un procédé de réception tel que décrit ci-dessus lorsque ce ou ces programmes sont exécutés par au moins un processeur.

Dans un mode de réalisation particulier, le procédé de réception résulte d'une application logicielle découpée en plusieurs applications logicielles spécifiques mémorisées dans les sources, dans la destination et éventuellement dans les relais. L'exécution de ces applications logicielles spécifiques est apte à la mise en œuvre du procédé de réception.

En particulier, l'invention a pour objet chacune des applications logicielles spécifiques sur un ou plusieurs supports d'information, lesdites applications comportant des instructions de programme adaptées à la mise en œuvre du procédé de réception lorsque ces applications sont exécutées par des processeurs.

L'invention a en outre pour objet des mémoires configurées comportant des codes d'instructions correspondant respectivement à chacune des applications spécifiques.

4. Liste des figures

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation particulier, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des dessins annexés, parmi lesquels :

- la [Fig 1] illustre un exemple de système de communication de type OMAMRC dans lequel peut être mis en œuvre l'invention ;
- la [Fig 2] présente les principales étapes mises en œuvre par une destination selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la [Fig 3] illustre les informations échangées entre les sources/relais et la destination selon un mode de réalisation de l'invention ;
- la [Fig 4] illustre un exemple d'allocation de débits pour les sources dans un système de communication de type OMAMRC ;
- la [Fig 5] présente la structure simplifiée d'un nœud destination selon un mode de réalisation particulier.

5. Description d'un mode de réalisation particulier

5.1 Principe général

L'invention se place dans le contexte d'un système de communication coopératif, mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et une destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$, par exemple de type OMAMRC.

La figure 1 illustre un exemple de système de communication de type OMAMRC dans lequel peut être mis en œuvre l'invention, mettant en œuvre M sources s_1, \dots, s_M , L relais r_1, \dots, r_L et une destination d . Chaque source communique avec l'unique destination avec l'aide des autres sources (en anglais « user cooperation ») et des relais qui coopèrent. Une source peut donc se comporter comme un relais quand elle n'émet pas son propre message. La destination peut remonter des informations aux sources et aux relais (« feedback »), par exemple dans des canaux de contrôle entre la destination et chaque source ou relais (illustrés en pointillés sur la figure 1).

Les M sources sont configurées pour transmettre, au cours d'une première phase de transmission, des messages sur K intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, avec $K \geq 1$ et $B \geq 1$. Les K premiers intervalles de temps sont donc dédiés à une première transmission des messages des M sources.

Une sélection des M sources et des L relais est configurée pour transmettre, au cours d'une deuxième phase de transmission coopérative, un signal représentatif d'au moins un des messages des sources sur T_{used} intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence. Les T_{used} intervalles de temps suivants les K premiers intervalles de temps sont donc dédiés à des transmissions incluant au moins

une transmission coopérative. Une transmission coopérative est soit une transmission par un relais soit une transmission par une source capable d'aider la destination à décoder au moins une autre source. Plus précisément, une transmission coopérative est une transmission par un nœud qui contient des informations relatives à au moins un message d'un autre nœud. La transmission d'un relais est, par nature, une transmission coopérative mais aussi la transmission d'une source (qui est capable de coopération) qui inclut dans sa transmission des informations relatives à au moins un message d'une autre source. La coopération des nœuds relais assure une augmentation de la fiabilité des transmissions.

Dans un mode de réalisation particulier, les nœuds source et relais fonctionnent selon un mode « full-duplex ». Chaque nœud full-duplex se voit ainsi allouer au moins une sous-bande de fréquence et peut ainsi transmettre dans sa sous-bande et écouter simultanément les autres nœuds transmettant dans les autres sous-bandes. En d'autres termes, en mode « full-duplex », un nœud relais peut écouter la transmission des autres nœuds (source, relais) à chaque intervalle de temps, même quand il transmet, et un nœud source peut écouter la transmission des autres nœuds (source, relais) à chaque intervalle de temps même quand il transmet.

Dans un autre mode de réalisation, les nœuds source et relais fonctionnent selon un mode « half-duplex ». Selon ce mode « half-duplex », un nœud relais peut écouter la transmission des autres nœuds (source, relais) à chaque intervalle de temps quand il ne transmet pas, et un nœud source peut écouter la transmission des autres nœuds (source, relais) à chaque intervalle de temps quand il ne transmet pas.

Pour chaque intervalle de temps, il y a $N = B \times F$ ressources temps-fréquence, avec B le nombre de sous-bandes disponibles et F le nombre de ressources temps-fréquence associé à un intervalle de temps par sous bande. Le nombre de ressources temps-fréquence est supposé identique pour chaque intervalle de transmission. Dans le cas d'une transmission avec une modulation OFDM, un intervalle de temps peut correspondre à 7 symboles OFDM et une sous bande à 12 sous porteuses, ainsi $F=12*7$ correspond au nombre de ressources élémentaires d'un bloc de ressources physiques (en anglais « Physical Resource Block », PRB) en LTE, et B est le nombre de PRB (sous bandes) disponibles pour la bande de fréquence considérée.

Les données transmises sur les $(K + T_{\text{used}})$ intervalles de temps forment une trame de données.

Une trame est donc un ensemble d'intervalles de temps consécutifs utilisés pour la transmission des messages des M sources selon un ordonnancement défini par la destination.

On peut ainsi considérer qu'une trame est composée d'une première phase de transmission et d'une phase de transmission coopérative.

La première phase de transmission comprend $K \geq 1$ intervalles de temps, durant lesquels les M sources peuvent envoyer leur message de façon orthogonale en utilisant les sous-bandes orthogonales en fréquence et/ou les intervalles de temps, sur une ou plusieurs sous-bandes allouées à chaque source. Si $K = 1$, l'intervalle de temps $t = 0$ correspond à la première phase de transmission.

La phase de transmission coopérative comprend T_{used} intervalles de temps. Pour un intervalle de temps donné, un ordonnanceur alloue au moins une sous-bande ou une bande (si $B = 1$), à un nœud relais ou source, pour qu'il transmette vers la destination les redondances en fonction du ou des messages reçus qu'il a correctement décodés (en anglais « decoding set »). En d'autres termes, à chaque intervalle de temps $t = 0, \dots, T_{max}$, la destination peut allouer au moins une sous-bande à un nœud (ou aucun nœud). Cette allocation de ressources peut être fixée pour une ou plusieurs trames consécutives ou pour toutes les trames.

Ainsi, pendant cette phase de transmission coopérative, seuls les nœuds sélectionnés parmi les sources et les relais transmettent, et leur transmission intervient sur la ou les sous-bandes (ou la bande, si $B = 1$) qui leur sont respectivement allouées selon une partition déterminée pour chaque intervalle courant. Ainsi, les partitions peuvent être différentes entre tous les intervalles de temps, y compris le premier.

La sélection des nœuds et l'allocation des sous-bandes sont classiquement mises en œuvre par un ordonnanceur (« scheduler » en anglais), typiquement hébergé par la destination. Cette phase est plus généralement appelée « allocation de ressources » ou ordonnancement.

Un cycle de transmission dure donc $K + T_{used}$ intervalles de temps. La durée d'une trame ne peut dépasser $(K + T_{max})$ intervalles de temps, où T_{max} correspond au nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative ($T_{used} \leq T_{max}$). A chaque intervalle de temps, aucune, une ou plusieurs sous-bandes peuvent être allouées à un nœud.

Selon l'invention, l'orthogonalité du système de communication peut être obtenue par un multiplexage temporel (TDM, avec $B = 1$) reposant sur l'utilisation de plusieurs intervalles de temps alloués chacun à une source différente, ou par un multiplexage fréquentiel (FDM, avec $K = 1$) reposant sur l'utilisation de plusieurs bandes de fréquence allouées chacune à une source différente.

Par la suite, par souci de simplification, on suppose que le nombre de sous-bandes B est supérieur ou égal au nombre de sources ou utilisateurs M , i.e., $B \geq M$. On se place également dans le contexte d'une première phase de transmission d'une trame mettant en œuvre un schéma d'accès multiple orthogonal en fréquence FDM, i.e. $K = 1$ (FDM OMAMRC), selon lequel les nœuds, M sources

et L relais, fonctionnent selon un mode full-duplex qui leur permet d'écouter sans interférence les transmissions des autres nœuds.

Bien entendu, il s'agit d'un simple exemple illustratif et non limitatif. La généralisation à une première phase de transmission mettant en œuvre $K > 1$ intervalles de temps et $BK \geq M$ se déduit directement et sans ambiguïté, puisqu'elle s'apparente à une allocation de ressources sur BK sous-bandes pour la première phase de transmission.

Comme déjà indiqué, la transmission d'une trame peut être précédée d'une phase d'adaptation de lien, au cours de laquelle des débits sont alloués aux différentes sources. Par exemple, on considère un ensemble fini de débits (ou de schémas de modulation et codage), et on alloue à chaque source un débit parmi l'ensemble fini de débits.

L'invention concerne la phase d'adaptation de lien. Le principe général de l'invention repose sur la connaissance des liens directs par la destination, et l'obtention d'une statistique des liens indirects par la destination, pour optimiser l'adaptation de lien, i.e. l'allocation de débits aux différentes sources.

La figure 2 illustre les principales étapes mises en œuvre par l'invention, dans un système de communication tel que décrit ci-dessus.

Pour au moins une trame de données et l'ordonnancement associé, qui peut être choisi par la destination, la destination d met en œuvre une phase initiale d'adaptation de lien, préalable à la première phase de transmission de ladite trame.

La phase d'adaptation de lien comprend une étape d'estimation 21 des canaux de transmission associés aux liens directs entre les sources et/ou relais et la destination, dits canaux directs H_{dir} . Par exemple, en référence à la figure 1, les canaux directs que la destination peut directement estimer sont les canaux $s_1 - d$, $s_2 - d$, $s_M - d$, $r_1 - d$ et $r_L - d$.

La phase d'adaptation de lien comprend également une étape d'obtention 22 des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre les sources et/ou relais et la destination, dits canaux indirects H_{indir} (STAT sur H_{indir}). Par exemple, en référence à la figure 1, les canaux indirects sont les canaux $s_1 - s_2$, $s_1 - s_M$, $s_1 - r_1$, $s_1 - r_L$, $s_2 - s_M$, $s_2 - r_1$, $s_2 - r_L$, $s_M - r_1$, $s_M - r_L$. En particulier, cette étape d'obtention 22 tient compte de l'estimation des canaux directs (puisque l'on détermine une statistique uniquement pour les canaux indirects).

A partir de l'estimation des canaux directs H_{dir} , et des statistiques des canaux indirects H_{indir} connaissant H_{dir} , la destination peut déterminer, au cours d'une étape de détermination 23, M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.

La destination peut notamment transmettre aux M sources, au cours d'une étape de transmission 24, au moins une information représentative dudit au moins un débit.

La phase d'adaptation de lien est donc basée sur la connaissance des CSI des liens directs et des CDI des liens indirects. Pour ce faire, la destination peut déterminer directement les CSI des liens directs (par exemple pour une trame ou un groupe de quelques trames) et obtenir l'information CDI des canaux indirects (reçue par exemple pour une centaine de trames). La destination n'a pas besoin d'obtenir les CSI des liens indirects, uniquement les CDI des liens indirects (i.e. les statistiques, par exemple SNR, des liens qui évoluent très lentement dans le temps).

Comme on utilise une connaissance partielle des CSI (i.e. les CSI associés aux canaux directs), on peut considérer que la solution proposée est de type adaptation de lien rapide FLA. Toutefois, la quantité d'informations nécessaires à la destination est fortement diminuée par rapport aux techniques d'adaptation de lien rapide selon l'art antérieur. Une telle solution est par exemple nommée « adaptation de lien rapide avec connaissance partielle des CSI ».

En particulier, la phase d'adaptation de lien peut être mise en œuvre trame par trame, ou pour un groupe de quelques trames, avant la première phase de transmission d'une trame. Elle peut notamment être mise à jour lorsqu'une variation d'un canal direct ou indirect est détectée.

5.2 Description d'un mode de réalisation particulier

On présente ci-après, en relation avec la figure 3, les informations échangées entre les nœuds émetteurs (sources ou relais, s/r) et la destination (d) selon un mode de réalisation de l'invention.

Selon l'exemple illustré, si aucune transmission n'est en cours, la destination d peut diffuser un message 31 requérant la diffusion d'un signal de référence (« SRS request »). A réception de ce message, les sources et/ou relais peuvent chacun émettre un signal de référence 32.

En exploitant les signaux de référence reçus (symboles pilotes du type DMRS 3GPP LTE/NR, signaux de références du type SRS 3GPP LTE/NR, etc), la destination peut estimer directement les canaux de transmission associés aux liens directs source vers destination et relais vers destination (CSI), i.e. déterminer les gains des liens directs.

Concernant les liens indirects source-source, relais-relais, ou source-relais, seules les sources ou relais sur ces liens peuvent estimer les canaux de transmission associés, par exemple en exploitant les signaux de référence reçus, de manière similaire à celle utilisée pour les liens directs. Par exemple, une source ou un relais peut estimer des métriques / statistiques de ces liens indirects (CDI) en réception en considérant une adaptation lente, et transmettre ces métriques / statistiques à la destination à une cadence inférieure à celle de la phase d'adaptation de lien (par exemple toutes les centaines de trames). En variante, la destination peut diffuser un message requérant l'obtention de

telles métriques (« CDI request »), et recevoir des messages de retour (« CDI feedback ») en provenance des sources / relais des liens indirects. En particulier, les sources transmettent à la destination les statistiques des liens source-source ou source-relais, et les relais transmettent à la destination les statistiques des liens relais-relais.

A partir de l'estimation des canaux directs et des statistiques des canaux indirects, la destination peut déterminer les débits à allouer aux sources pour la transmission de la première trame. Par exemple, la destination diffuse des informations représentatives des débits à allouer aux différentes sources pour la transmission d'une première trame dans un message d'allocation de débits 33.

A réception de ce message d'allocation de débits 33, chaque source transmet ses données 34 en utilisant le débit obtenu à partir du message d'allocation de débits 33. Comme détaillé précédemment, les données des différentes sources forment la première trame, correspondant à une première phase de transmission et une phase de transmission coopérative.

Selon un mode de réalisation particulier, les données 34 transmises par une source ou un relais peuvent porter des symboles pilotes (DMRS) qui peuvent être utilisés pour une démodulation cohérente du signal reçu à la destination. De tels symboles peuvent notamment être utilisés pour mettre à jour l'estimation des canaux directs à la destination.

Si la destination a décodé toutes les sources (i.e. tous les messages /données transmis par les sources) avant T_{max} (où T_{max} correspond au nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative) alors la destination peut envoyer un message ACK 35, déclenchant l'effacement des mémoires tampons des sources.

Les sources peuvent alors transmettre une deuxième trame.

L'estimation des canaux directs peut notamment être mise à jour, par exemple suite à la réception de symboles pilotes. Les statistiques des canaux indirects peuvent en revanche rester inchangées.

La destination peut alors déterminer les débits à allouer aux sources pour la transmission de la deuxième trame à partir de l'estimation des canaux directs mise à jour et des statistiques des canaux indirects, et transmettre ces informations dans un message d'allocation de débits 36.

A réception de ce message d'allocation de débits 36, chaque source transmet ses données 37 en utilisant le débit obtenu à partir du message d'allocation de débits 36. Comme détaillé précédemment, les données des différentes sources forment la deuxième trame, correspondant à une première phase de transmission et une phase de transmission coopérative.

Si la destination n'a pas décodé toutes les sources (i.e. tous les messages /données transmis par les sources) jusqu'à T_{max} (T_{max} inclus), alors les mémoires tampons des sources sont effacées (par exemple sur la base de compteurs / timers dédiés) et les sources peuvent transmettre une troisième trame.

En particulier, au moins une partie des messages des sources transmis dans la deuxième trame est perdue, puisque le nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative est atteint sans que l'ensemble des sources soit décodé.

A nouveau, l'estimation des canaux directs peut être mise à jour, par exemple suite à la réception de symboles pilotes. Les statistiques des canaux indirects peuvent en revanche rester inchangées.

La destination peut alors déterminer les débits à allouer aux sources pour la transmission de la troisième trame à partir de l'estimation des canaux directs mise à jour et des statistiques des canaux indirects, et transmettre ces informations dans un message d'allocation de débits 38.

A réception de ce message d'allocation de débits 38, chaque source transmet ses données 39 en utilisant le débit obtenu à partir du message d'allocation de débits 38, et ainsi de suite.

Comme indiqué ci-dessus, les estimations des canaux directs peuvent être mises à jour pour chaque trame, ou pour quelques trames. En revanche, les statistiques des canaux directs peuvent être mises à jour à une cadence plus faible, par exemple de l'ordre de la centaine de trames.

Si toutefois une source ou un relais détecte un changement dans la statistique d'un canal indirect, il peut notifier la destination de ce changement, soit en transmettant à la destination une nouvelle statistique soit en transmettant une notification, par exemple de type « Event driven CDI update ». A réception d'une telle notification, la destination peut notamment diffuser un message requérant l'obtention de nouvelles statistiques (« CDI request »), et recevoir des messages de retour (« CDI feedback ») en provenance des sources / relais des liens indirects.

On décrit ci-après un exemple de détermination des débits à allouer aux différentes sources, permettant de maximiser une métrique de qualité de service du système de communication, connaissant l'estimation des canaux directs.

Selon cet exemple, l'approche proposée repose sur une prédiction des performances basée sur des considérations de théorie de l'information, notamment les probabilités de coupure. Cette approche permet de prédire le résultat de la mise en œuvre d'un contrôle de parité (CRC check) sans passer par la simulation de l'ensemble de la chaîne d'émission (codage modulation) et de réception (détection/démodulation, décodage). En ceci, elle définit une abstraction de la couche physique. Certains ajustements obtenus par simulation (appelé calibration dans le cadre des abstractions de la

couche physique) pour un schéma de codage donné peuvent être réalisés en introduisant des paramètres de pondération des informations mutuelles et/ou des SNR des liens.

Comme décrit ci-dessus, l'adaptation de lien proposée tient compte de la connaissance de la distribution (i.e. statistique de distribution) du canal sur les liens directs. En d'autres termes, pour des CSI connues pour les liens directs, la destination peut déterminer les débits à allouer aux sources en tenant compte des statistiques (CDI) des liens indirects.

On cherche par exemple à maximiser le débit moyen réel, c'est-à-dire le débit global sur un ensemble de trames.

A titre de simplification de la description, les hypothèses suivantes sont faites par la suite sur le système OMAMRC :

- les sources, les relais sont équipés d'une seule antenne d'émission ;
- les sources, les relais, et la destination sont équipés d'une seule antenne de réception ;
- les sources, les relais, et la destination sont parfaitement synchronisés ;
- les sources sont statistiquement indépendantes (il n'y a pas de corrélation entre elles) ;
- tous les nœuds émettent avec une même puissance ;
- il est fait usage d'un code CRC supposé inclus dans les K_i bits d'information de chaque source i pour déterminer si un message est correctement décodé ou pas, $i \in \mathcal{S}$;
- les liens entre les différents nœuds souffrent de bruit additif et d'évanouissement. Les gains d'évanouissement sont fixes pendant la transmission d'une trame effectuée pendant une durée maximale de $K + T_{max}$ intervalles de temps (avec $K = 1$ selon l'exemple décrit), mais peuvent changer indépendamment d'une trame à une autre. $T_{max} \geq 1$ est un paramètre du système ;
- la qualité instantanée du canal/liens direct en réception (CSIR Channel State Information at Receiver) est disponible à la destination, aux sources et aux relais ;
- les retours sont sans erreur (pas d'erreur sur les signaux de contrôle).
- les informations utilisées pour estimer les canaux directs (signaux de référence par exemple) sont transmises dans des canaux de contrôle unicast (d'une source ou d'un relais, vers la destination) supposés sans erreur,
- les statistiques des canaux indirects sont également transmises dans des canaux de contrôle unicast (d'une source ou d'un relais, vers la destination) supposés sans erreur, les sources transmettant à la destination les statistiques des liens source-source et éventuellement des liens source-relais, et les relais transmettant à la destination les statistiques des liens relais-relais et éventuellement des liens source-relais,
- les statistiques des canaux indirects peuvent être transmises à la destination lorsqu'un

changement est détecté, ou par exemple toutes les centaines de trames.

On utilise par la suite les notations suivantes :

- si $i \leq M$ le nœud i sélectionné est une source i dénotée s_i , $i \in \{1, \dots, M\}$; sinon $i > M$ et le nœud sélectionné est un relais $i - M$ dénoté r_{i-M} , $i \in \{M + 1, \dots, M + L\}$,
- $a_t \in (\mathcal{S} \cup \mathcal{R})^B$ est un vecteur de dimension B des nœuds sélectionnés pour l'intervalle de temps t , pendant la première phase de transmission ou pendant la phase de transmission coopérative, avec \mathcal{S} l'ensemble des sources et \mathcal{R} l'ensemble des relais. Le $i^{\text{ème}}$ élément $a_{t,i}$ du vecteur a_t désigne la $i^{\text{ème}}$ sous-bande et le nœud sélectionné actif (i.e. transmet) durant cet intervalle de temps t dans cette sous-bande i , $i \in \{1, \dots, B\}$. L'ordre dans le vecteur correspond à l'ordre des sous-bandes,
- $n_t \in \{0, \dots, B\}^{M+L}$ est le vecteur de dimension $M+L$ du nombre de sous-bandes allouées pour chaque nœud qui varie entre 0 (le nœud est inactif) et B (le nœud occupe toutes les sous bandes), source ou relais, pour l'intervalle de temps t , pendant la première phase de transmission ou pendant la phase de transmission coopérative. Le $i^{\text{ème}}$ élément $n_{t,i}$ du vecteur n_t désigne le nombre de sous-bandes allouées au nœud i à l'intervalle de temps t , $i \in \{1, \dots, M + L\}$. La somme des éléments composants le vecteur n_t est égale à B le nombre de sous-bandes,
- H_{dir} est la réalisation des canaux de transmission associés aux liens directs entre les sources/relais et la destination et
- H_{ind} la réalisation des canaux de transmission associés aux liens indirects entre les sources, entre les relais, et entre les sources et les relais.

Une réalisation est la valeur prise pour un tirage aléatoire à partir d'une statistique.

Une estimation de canal estime une réalisation de canal, qui est aussi un CSI. Les termes « estimation » ou « réalisation » sont donc considérés comme équivalents par la suite, et utilisés indifféremment.

En utilisant le théorème de l'espérance totale, i.e., $\mathbb{E}\{X\} = \mathbb{E}\{\mathbb{E}\{X|Y\}\}$, on obtient un débit moyen $\bar{\eta}^{fla}$ sur le canal global de transmission tel que :

$$\begin{aligned} \bar{\eta}^{fla} &= \mathbb{E}\{\eta^{\text{frame}}(P, H)\} \\ &= \mathbb{E}\left\{\mathbb{E}\{\eta^{\text{frame}}(P, H)|H_{dir}\}\right\} \\ &= \mathbb{E}\{\rho^{fla}\} \end{aligned}$$

Selon l'invention, on propose une nouvelle stratégie d'allocation de débit $P = P_{new}$ (adaptation de lien rapide avec connaissance partielle des CSI), qui ne dépend pas de la réalisation H_{ind} mais qui change pour chaque réalisation H_{dir} . Ainsi, le débit alloué à chaque source, noté R_s , $\{R_s, s = 1, \dots, M\}$ ne change pas avec l'espérance conditionnelle $\mathbb{E}\{\eta^{\text{frame}}(P_{new}, H)|H_{dir}\}$.

Pour maximiser le débit moyen $\bar{\eta}^{fla}$, la destination peut sélectionner pour chaque trame (d'où la dénomination adaptation de lien rapide), les débits à allouer aux sources pour maximiser la variable interne :

$$\begin{aligned}\rho^{fla} &= \mathbb{E}\{\eta^{frame}(P_{new}, H) | H_{dir}\} \\ &= \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M R_i n_{0,i} \mathbb{E}\left\{\frac{(1 - \mathcal{O}_{i,T_{max}})}{1 + T_{used}} \middle| H_{dir}\right\}\end{aligned}$$

connaissant la réalisation H_{dir} . On peut utiliser ρ_0^{fla} comme approximation de ρ^{fla} qui correspond à l'efficacité spectrale globale connaissant H_{dir} (ρ^{fla} est l'efficacité spectrale globale par trame connaissant H_{dir}) et ainsi pour obtenir le débit R_s par trame, la destination cherche donc à déterminer la variable interne ρ_0^{fla} ou ρ^{fla} , en utilisant d'une part les CDI des liens indirects, et d'autre part les CSI des liens directs.

L'efficacité spectrale globale basée sur la connaissance des CSI des liens directs peut s'écrire :

$$\rho_0^{fla} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}\{T_{used} | H_{dir}\}} (1 - \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}} | H_{dir}\}),$$

avec $\mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}} | H_{dir}\} = \Pr(\mathcal{O}_{i,T_{max}} = 1 | H_{dir})$ la probabilité d'avoir un événement de coupure individuel égal à 1 pour la source i , basée sur la distribution des probabilités des liens indirects connaissant les CSI des liens directs.

Notamment, selon l'exemple illustré en figure 4, on considère que les liens directs sont les liens $s_1 - d$, $s_2 - d$, $r_1 - d$ et $r_2 - d$, et les liens indirects sont les liens $s_1 - s_2$, $s_1 - r_1$, $s_1 - r_2$, $s_2 - r_1$, $s_2 - r_2$ et $r_1 - r_2$.

Les liens directs représentent les réalisations du canal qui sont fixes, sur lesquelles on détermine une CSI, et les liens indirects les réalisations du canal sur lesquelles on détermine une statistique.

Dans l'expression de la variable d'espérance interne ρ^{fla} , l'allocation de débit est donnée pour une réalisation connue des canaux directs, comme illustré en figure 4. Ainsi, connaissant les liens directs et des statistiques sur les liens indirects, on obtient $\rho^{fla} = \mathbb{E}\{\eta^{frame}(P, H) | H_{dir}\}$ ou ρ_0^{fla} .

Ensuite, le débit moyen $\bar{\eta}^{fla} = \mathbb{E}\{\eta^{frame}(P, H)\}$ peut être déterminé en tenant compte de l'espérance $\mathbb{E}\{\rho^{fla}\}$ sur les réalisations des liens directs.

L'efficacité spectrale basée sur une connaissance des CSI des liens directs peut donc être exprimée sous la forme d'une équation à plusieurs variables, fonction des débits de chaque source et des vecteurs d'allocation a_t pour chaque intervalle de temps t pour la phase de transmission coopérative. L'efficacité spectrale dépend donc de la sélection des nœuds et de l'allocation des sous-bandes.

L'allocation des débits (i.e. la détermination des débits à allouer aux M sources) visant à atteindre la meilleure efficacité spectrale met donc en œuvre une maximisation d'une métrique de qualité de service du système de communication (ρ^{fla} ou ρ_0^{fla}) avec ou sans contrainte par source. Dans le cas général d'une contrainte de qualité de service par source, elle peut par exemple, en utilisant ρ_0^{fla} , s'exprimer sous la forme :

$$(\hat{R}_1, \dots, \hat{R}_M) = \underset{(R_1, \dots, R_M) \in \{\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_{MCS}\}^M}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}(T_{used}|H_{dir})} (1 - \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i,T_{max}}|H_{dir}\}),$$

sous contrainte que $(\mathcal{O}_{i,T_{max}}|H_{dir}) \leq QoS, i$, pour tout i appartenant à \mathcal{S} ,

avec :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,t}|H_{dir}) &= \int \bigcap_{\mathcal{J} \subset \bar{\mathcal{S}}_{d,T-1}} \bigcup_{\mathcal{U} \subseteq \bar{\mathcal{J}}: s \in \bar{\mathcal{J}}} \left[\sum_{s \in \mathcal{U}} R_s n_{0,s} \right. \\ &> \left. \sum_{s \in \mathcal{U}} \bar{I}_{0,s} + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i}[\mathcal{C}_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i}[\mathcal{C}_{t,i}] \right] P(H|H_{dir}) dH_{ind}, \end{aligned}$$

et $P(H_H|H_{dir})$ la probabilité jointe de réalisation du canal global pour tous les liens du système, conditionnée à la connaissance CSI des canaux directs.

Si l'on suppose que les réalisations H_{ind} et H_{dir} sont indépendantes, on obtient :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,t}|H_{dir}) &= \int \bigcap_{\mathcal{J} \subset \bar{\mathcal{S}}_{d,T-1}} \bigcup_{\mathcal{U} \subseteq \bar{\mathcal{J}}: s \in \bar{\mathcal{J}}} \left[\sum_{s \in \mathcal{U}} R_s n_{0,s} \right. \\ &> \left. \sum_{s \in \mathcal{U}} \bar{I}_{0,s} + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i}[\mathcal{C}_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i}[\mathcal{C}_{t,i}] \right] P(H_{ind}) dH_{ind} \end{aligned}$$

où :

$\bar{I}_{l,i}$ est le bloc d'information mutuelle d'évanouissement du nœud i à la destination d pour les $n_{l,i}$ sous-bandes allouées au nœud i à l'intervalle de temps $l \in \{1, \dots, T_{used}\}$

$\mathcal{C}_{l,i} = \left[[\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{U} \neq \emptyset] \wedge [\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{J} = \emptyset] \right]$ avec $\mathcal{J} = \bar{\mathcal{S}}_{d,t-1} \setminus \mathcal{B}$ représente un ensemble de sources interférentes,

\wedge représente le « et » logique,

$[P]$ représente les crochets d'Iverson i.e. qui donne la valeur 1 si l'événement P est satisfait et la valeur 0 si non,

La condition $\mathcal{C}_{l,i}$ permet d'assurer que le nœud i considéré à l'intervalle de temps l comprend au moins un nœud du sous-ensemble \mathcal{U} dans son ensemble de décodage $\mathcal{S}_{i,l-1}$ (i.e. l'intersection entre l'ensemble de sources correctement décodées par le nœud i à l'intervalle de temps $l-1$ et l'ensemble \mathcal{U} n'est pas vide), et que le nœud i considéré à l'intervalle de temps l n'a décodé aucun nœud interférent (i.e. l'intersection entre l'ensemble de sources correctement décodées par le nœud i à l'intervalle $l-1$ et l'ensemble de sources interférentes est vide).

D'un point de vue analytique, un événement de coupure se produit si le vecteur des débits de ces sources n'est pas compris dans la région de capacité MAC (en anglais « Multiple Access Channel », en français « canal d'accès multiple ») correspondante.

L'annexe 1 présente plus en détail les événements de coupure.

Pour déterminer les débits $(\hat{R}_1, \dots, \hat{R}_M)$ à allouer aux différentes sources, on doit donc résoudre un problème d'optimisation à plusieurs variables, en cherchant à maximiser une métrique de qualité de service du système de communication comme présentée ci-dessus.

Selon un mode de réalisation particulier, il est possible de simplifier l'équation ci-dessus, pour s'affranchir du calcul de l'intégrale pour l'événement de coupure $\mathcal{O}_{s,t}$ tenant compte de la réalisation du canal H_{dir} , en utilisant une méthode de simulations de Monte-Carlo.

Ainsi, l'expression de l'événement de coupure $\mathcal{O}_{s,t}$ tenant compte de la réalisation du canal H_{dir} peut s'exprimer sous la forme approchée suivante :

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,t}|H_{dir}) &= \frac{1}{Nb_MC} \sum_{j=1}^{Nb_MC} \bigcap_{\mathcal{J} \subset \bar{\mathcal{S}}_{d,T-1}} \bigcup_{\substack{U \subseteq \bar{\mathcal{J}}: s \in \bar{\mathcal{J}} \\ L \subseteq \bar{\mathcal{U}}} \\ > \sum_{s \in \bar{\mathcal{U}}} \bar{I}_{0,s}(H_j) + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i}(H_j)[c_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i}(H_j)[c_{t,i}] \end{aligned}$$

où H_j est une réalisation du canal H basée sur la distribution des probabilités des liens indirects.

Cette expression peut encore être simplifiée par la coupure due à l'inégalité du débit somme

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,t}|H_{dir}) &= \frac{1}{Nb_MC} \sum_{j=1}^{Nb_MC} \bigcap_{\mathcal{J} \subset \bar{\mathcal{S}}_{d,T-1}} \bigcup_{\substack{U \subseteq \bar{\mathcal{J}}: s \in \bar{\mathcal{J}} \\ L \subseteq \bar{\mathcal{U}}} \\ > \sum_{s \in \bar{\mathcal{U}}} \bar{I}_{0,s}(H_j) + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i}(H_j)[c_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i}(H_j)[c_{t,i}] \end{aligned}$$

En variante, il est possible de supposer que la distribution statistique de chaque lien indirect suit une distribution de Dirac indépendante autour de la racine carré des SNR de chaque lien indirect en faisant l'hypothèse d'une variance du bruit égale à 1 (bruit blanc additif gaussien), au lieu de calculer l'équation ci-dessus. Par exemple, la distribution du canal $h_{a,b}$ dont le SNR est $\gamma_{a,b}$ est approximée par $\delta(h_{a,b} - \sqrt{\gamma_{a,b}})$.

Une telle variante peut réduire légèrement les performances du système de communication, mais offre une solution pour simplifier la complexité de l'algorithme d'allocation de débits.

On note par ailleurs qu'on a supposé jusqu'à présent une sélection des nœuds et allocation des sous-bandes connues, i.e. un ordonnancement connu de la destination.

Or comme indiqué ci-dessus, l'efficacité spectrale ρ^{fla} dépend notamment de la sélection des nœuds et de l'allocation des sous-bandes.

Ainsi, selon un mode de réalisation particulier, les problèmes d'allocation des débits aux sources et de sélection des nœuds peuvent être résolus conjointement.

En particulier, on constate qu'un vecteur a_t , représentant les nœuds sélectionnés pour l'intervalle de temps t , dépend des débits alloués aux sources et des vecteurs représentant les nœuds sélectionnés pour au moins un intervalle de temps précédent.

On considère par exemple que la stratégie de sélection des nœuds est basée sur une métrique de sélection de type bloc d'information mutuelle d'évanouissement.

On souhaite sélectionner le vecteur qui donne la plus grande information mutuelle, pour la phase de transmission coopérative.

Le vecteur sélectionné pour la phase de transmission coopérative peut s'écrire :

$$\hat{a}_t = \underset{a_t \in A_t}{\operatorname{argmax}} \left\{ \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i} \right\}$$

avec A_t l'ensemble de toutes les allocations possibles a_t , qui correspond à l'activation des nœuds qui peuvent aider la destination à l'intervalle de temps t , $t \neq 0$ (« round »).

On souhaite également sélectionner le vecteur qui donne la plus grande information mutuelle, pour la première phase de transmission. Toutefois, pour la première phase de transmission d'une trame, on souhaite allouer des sous-bandes uniquement aux sources, en allouant au moins une sous-bande par source.

Le vecteur sélectionné pour la première phase de transmission peut alors s'écrire :

$$\hat{a}_t = \underset{a_t \in P_t}{\operatorname{argmax}} \left\{ \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i} \right\}$$

avec P_t un sous-ensemble de A_t comprenant les vecteurs associés aux sources, à l'intervalle de temps $t = 0$.

Selon une première approche, une recherche exhaustive peut être mise en œuvre pour la résolution conjointe des problèmes d'allocation de débits et de sélection des nœuds.

Une telle approche étant particulièrement complexe et coûteuse, on propose ci-après des approximations.

Selon une deuxième approche, un algorithme de type BRD (« Best-Response Dynamic ») peut être utilisé. Un tel algorithme est notamment présenté en annexe 2.

Selon cette approche, plutôt que résoudre conjointement les problèmes d'allocation de débit et de sélection des vecteurs, on cherche une solution pour chaque utilisateur / source de manière itérative. En d'autres termes, une solution sous-optimale pour l'algorithme BRD est basée sur la

détermination d'un débit optimal pour un utilisateur / source pour un intervalle de temps donné, en considérant que les autres utilisateurs / sources sont inactifs, i.e. n'émettent pas de données.

Cet algorithme est répété successivement pour chaque utilisateur / source, puis pour l'ensemble des utilisateurs / sources, jusqu'à atteindre un point de convergence, au-delà duquel tout changement dans un débit alloué à un utilisateur / source conduit à une diminution de l'efficacité spectrale.

Classiquement, l'algorithme BDR comprend deux phases : une phase d'initialisation et une phase de correction itérative.

Au cours de la phase d'initialisation, on alloue des valeurs de débits initiaux aux différentes sources. Différentes techniques peuvent être mises en œuvre pour la phase d'initialisation : initialisation aléatoire (« random initialization »), initialisation à partir d'une valeur fixe (« fixed value initialization »), initialisation de type « Genie Aided », etc.

En particulier, l'initialisation selon l'approche « Genie Aided » permet d'allouer un débit à une source sans tenir compte des débits alloués aux autres sources. Pour ce faire, pour le calcul du débit initial alloué à une source, on fait l'hypothèse que les messages transmis par les autres sources sont connus de tous les autres nœuds (source ou relais). En conséquence, les sources n'interfèrent pas entre elles. Une autre hypothèse peut être faite sur l'allocation des ressources, par exemple en considérant une approche aléatoire. L'annexe 3 présente notamment un exemple d'initialisation des valeurs de débits initiaux pour les différentes sources selon l'approche « Genie Aided ».

Comme indiqué ci-dessus, d'autres techniques peuvent être mises en œuvre pour la phase d'initialisation. En particulier, la mémoire des sources peut être utilisée, en utilisant par exemple les débits alloués aux différentes sources pour la transmission d'une trame précédente, pour initialiser l'algorithme itératif de détermination des débits pour la transmission d'une trame courante. En effet, il est probable que le canal global de transmission varie peu entre la transmission d'une trame précédente et la transmission d'une trame courante, ce qui signifie que l'allocation des débits pour la trame courante devrait être assez proche de l'allocation des débits pour la trame précédente.

Quelle que soit la technique utilisée pour la phase d'initialisation, le choix d'un bon point de départ permet de faire converger l'algorithme BRD plus rapidement.

Au cours de la phase de correction, les débits obtenus à l'itération précédente sont mis à jour, en cherchant à optimiser les performances du système de communication (i.e. l'efficacité spectrale).

5.3 Structure simplifiée de la destination

On présente finalement, en relation avec la figure 5, la structure simplifiée d'un nœud destination selon au moins un mode de réalisation décrit ci-dessus.

Comme illustré en figure 5, une telle destination comprend au moins une mémoire 51 comprenant une mémoire tampon, au moins une unité de traitement 52, équipée par exemple d'une machine de calcul programmable ou d'une machine de calcul dédiée, par exemple un processeur P, et pilotée par le programme d'ordinateur 53, mettant en œuvre des étapes du procédé de réception selon au moins un mode de réalisation de l'invention.

A l'initialisation, les instructions de code du programme d'ordinateur 53 sont par exemple chargées dans une mémoire RAM avant d'être exécutées par le processeur de l'unité de traitement 52.

Le processeur de l'unité de traitement 52 met en œuvre des étapes du procédé de réception décrit précédemment, selon les instructions du programme d'ordinateur 53, pour :

- estimer des canaux de transmission associés aux liens directs entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux directs,
- obtenir des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux indirects,
- déterminer, à partir desdites statistiques des canaux indirects et estimations desdits canaux directs, M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.

ANNEXE 1

L'indication d'événement de coupure individuelle $\mathcal{O}_{s,t}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1} | \mathbf{h}_{\text{dir}}, \mathcal{P}_{t-1})$ de la source s après l'intervalle t (round t) de transmission dépend du vecteur \mathbf{a}_t de sélection des nœuds, du vecteur \mathbf{n}_t d'allocation de sous-bandes et du jeu $\mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1}$ de sources décodées à la fin de l'intervalle précédent, $t-1$. Il est en outre conditionnel de la connaissance des réalisations du canal des liens directs \mathbf{h}_{dir} (des gains du canal) ainsi que de \mathcal{P}_{t-1} . \mathcal{P}_{t-1} désigne le jeu des vecteurs $\hat{\mathbf{a}}_l$ de sélection (donc des nœuds sélectionnés) et des vecteurs $\hat{\mathbf{n}}_l$ d'allocation avec leur jeu de sources décodées $\mathcal{S}_{\hat{\mathbf{a}}_l, l-1}$ associé déterminés pour les intervalles (rounds) l précédant l'intervalle t , $l \in \{1, \dots, t-1\}$ et le jeu $\mathcal{S}_{\mathbf{d}, t-1}$ de sources décodées par la destination. Il faut noter que \mathbf{a}_0 est le vecteur de sélection des nœuds source transmettant pendant la première phase de transmission, que \mathbf{n}_0 est le vecteur d'allocation de sous-bandes allouées pour chaque source pendant la première phase de transmission et que $\mathcal{S}_{\mathbf{d}, 0}$ est le jeu de sources décodées par la destination à l'issue de la première phase.

L'indication d'événement de coupure commune $\mathcal{E}_{t, \mathcal{B}}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1} | \mathbf{h}_{\text{dir}}, \mathcal{P}_{t-1})$ pour le sous jeu de sources \mathcal{B} après l'intervalle de temps t (round t) est l'événement qu'au moins une source du sous-jeu \mathcal{B} n'est pas décodée correctement par la destination à la fin de cet intervalle t . Par la suite, les dépendances de $\mathcal{S}_{\mathbf{d}, t-1}$ à \mathbf{h}_{dir} et à \mathcal{P}_{t-1} sont omises pour simplifier les notations. On note $\bar{\mathcal{S}}_{\mathbf{d}, t} = \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_{\mathbf{d}, t}$ le jeu des sources non décodées avec succès par la destination à la fin de l'intervalle de temps t (round t).

D'un point de vue analytique, l'indication d'événement de coupure commune d'un sous jeu \mathcal{B} de sources intervient i.e. est satisfait si le vecteur des débits de ces sources n'est pas compris dans la région de capacité MAC correspondante.

Ainsi, pour un sous-jeu de sources $\mathcal{B} \subseteq \bar{\mathcal{S}}_{\mathbf{d}, t-1}$ donné, pour un vecteur \mathbf{a}_t candidat de nœuds sélectionnés et le vecteur \mathbf{n}_t d'allocation de sous-bandes correspondant, cet événement peut s'exprimer sous la forme :

$$\mathcal{E}_{t, \mathcal{B}}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1}) = \bigcup_{\mathcal{U} \subseteq \mathcal{B}} \mathcal{F}_{\mathbf{d}, \mathcal{B}}(\mathcal{U}),$$

$\mathcal{F}_{\mathbf{d}, \mathcal{B}}(\mathcal{U})$ traduit le non-respect de l'inégalité MAC associée au débit somme des sources contenues dans \mathcal{U} :

$$\mathcal{F}_{\mathbf{d}, \mathcal{B}}(\mathcal{U}) = \left[\sum_{s \in \mathcal{U}} R_s n_{0,s} > \sum_{s \in \mathcal{U}} \bar{I}_{0,s} + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i} [C_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i} [C_{t,i}] \right]$$

avec

- l l'index d'intervalle de temps (round) de la deuxième phase avec la convention que $l = 0$ correspond à la fin de la première phase (phase de transmission), $l \in \{1, \dots, T_{\text{used}}\}$,
- s l'index correspondant au nœud source, $s \in \{1, \dots, M\}$,

- i l'index correspondant à n'importe quel nœud (source et relais), $i \in \{1, \dots, M + L\}$,
- $n_{l,i}$ le nombre de sous-bandes allouées au nœud i pour l'intervalle de temps l (round) $l \in \{1, \dots, T_{used}\}$,
- $n_{0,s}$ le nombre de sous-bandes allouées à la source $s \in \{1, \dots, M\}$ par la destination pour la première phase,
- $\mathcal{C}_{l,i} = [(\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathbf{u} \neq \emptyset) \wedge (\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{J} = \emptyset)]$
avec $\mathcal{J} = \overline{\mathcal{S}}_{d,t-1} \setminus \mathcal{B}$, représente le jeu de sources interférentes, $\mathcal{C}_{l,i}$ vaut un si d'une part l'intersection entre le jeu de sources correctement décodées par le nœud i à l'intervalle $l - 1$ et l'ensemble \mathbf{u} n'est pas vide et d'autre part l'intersection entre le jeu de sources correctement décodées par le nœud i à l'intervalle $l - 1$ et le jeu de sources interférentes est vide,
- \wedge représente le « et » logique,
- $[P]$ représente les crochets d'Iverson i.e. qui donne la valeur 1 si l'événement P est satisfait et la valeur 0 si non,
- $\bar{I}_{l,i}$ le bloc d'information mutuelle d'évanouissement du nœud i à la destination d pour les $n_{l,i}$ sous-bandes allouées au nœud i à l'intervalle de temps $l \in \{1, \dots, T_{used}\}$:
$$\bar{I}_{l,i} = \sum_{f=1}^{n_{l,i}} I_{a_{l,f},d} [i = a_{l,f}]$$

où $I_{a_{l,f},d}$ est l'information mutuelle entre le nœud $a_{l,f}$ auquel est allouée la sous-bande f à l'intervalle de temps (round) $l \in \{1, \dots, T_{used}\}$ et la destination d . L'information mutuelle dépend de la puissance transmise sur la sous-bande du canal i.e. $\frac{P_T}{n_{l,a_{l,f}}}$ entre le nœud $a_{l,f}$ et la destination d avec P_T la puissance totale de ce nœud. Si le nœud i n'est pas sélectionné à l'intervalle de temps l alors le bloc d'information mutuelle $\bar{I}_{l,i}$ est nul.
- $\bar{I}_{0,s}$ le bloc d'information mutuelle d'évanouissement de la source s à la destination d , pour \mathbf{a}_0 et \mathbf{n}_0 donnés, à l'intervalle de temps correspondant à la phase de transmission (première phase),
- $R_s = K_s / (n_{0,s} F)$, $s = 1, \dots, M$ est le débit utilisé pendant la première phase avec K_s le nombre de bits d'information utile transmise sur $n_{0,s} F$ utilisations de canal.

Par la suite l'évènement de coupure pour une source donné s est défini sous la forme :

$$\mathcal{O}_{s,t}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1}) = \bigcap_{\mathcal{J} \subset \overline{\mathcal{S}}_{d,t-1}, \mathcal{B} = \bar{\mathcal{J}}, s \in \mathcal{B}} \mathcal{E}_{t,\mathcal{B}}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1})$$

qui est par définition l'intersection de tous les évènements de coupure commun correspondant à un jeu de sources \mathcal{B} incluant la source s . Une source s est en coupure si et seulement il n'existe aucun

jeu de sources \mathcal{B} la comprenant qui puisse être associé à un décodage sans erreur, i.e., $\mathcal{E}_{t,\mathcal{B}} = 0$. Il vient :

$$\mathcal{O}_{s,t}(\mathbf{a}_t, \mathbf{n}_t, \mathcal{S}_{\mathbf{a}_t, t-1}) = \bigcap_{\mathcal{J} \subset \bar{\mathcal{S}}_{d,t-1}} \bigcup_{\mathbf{u} \subseteq \bar{\mathcal{J}}: s \in \bar{\mathcal{J}}} \left[\sum_{s \in \mathbf{u}} R_s n_{0,s} > \sum_{s \in \mathbf{u}} \bar{I}_{0,s} + \sum_{l=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{l,i} [c_{l,i}] + \sum_{i=1}^{M+L} \bar{I}_{t,i} [c_{t,i}] \right].$$

Cet indicateur d'événement de coupure indique si une source est décodée sans erreur ($\mathcal{O}_{s,t} = 0$) ou si elle est en coupure ($\mathcal{O}_{s,t} = 1$). Cette approche permet de prédire le résultat de la mise en œuvre d'un contrôle de parité (CRC check) sans passer par la simulation de l'ensemble de la chaîne d'émission (codage modulation) et de réception (détection/démodulation, décodage). En ceci, elle définit une abstraction de la couche physique. Certains ajustements obtenus par simulation (appelé calibration dans le cadre des abstractions de la couche physique) pour un schéma de codage donné peuvent être réalisés en introduisant des paramètres de pondération des informations mutuelles et/ou des SNR des liens.

ANNEXE 2 - Algorithme GA

Algorithme 1 – Simulations de Monte-Carlo pour fixer la valeur initiale de la source s en utilisant une approche du type « Genie Aided » (GA):

1. $Max = 0$ (Initialisation de l'efficacité spectrale moyenne maximale)
2. **1^{ère} boucle sur k de 1 à n_{MCS} (n_{MCS} = nombre de schémas de modulation et de codage disponibles)**
3. $R_s = \bar{R}_k$, la source s adopte le débit \bar{R}_k ($\bar{R}_k \in \{\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_{n_{MCS}}\}$)
4. $out = 0$ (Initialisation du compteur de réalisations de Monte-Carlo)
5. $\bar{T}_{used} = 0$ (Initialisation du compteur de la somme de cycles de retransmission utilisés lors de la deuxième phase)
6. Sélection aléatoire de \mathbf{H}_{dir} fondée sur $P(\mathbf{H}_{dir})$ la distribution de probabilité des liens directs ($h_{source,destination}, h_{relay,destination}$)
7. **2^{ème} boucle sur j de 1 à Nb_MC (exemple Nb_MC=1000)**
8. Sélection aléatoire de \mathbf{H}_{ind} , fondée sur $P(\mathbf{H}_{ind})$ la distribution de probabilité des liens indirects ($h_{source,source}, h_{source,relay}$ or $h_{relay,relay}$).
9. $\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_{dir} \cup \mathbf{H}_{ind}$ (\mathbf{H}_j représente la réalisation de canal à une itération de Monte-Carlo courante j , fondée sur \mathbf{H}_{dir} et sur la \mathbf{H}_{indir} courante à l'itération j)
10. Initialisation de \mathbf{I}_{list} à la valeur \emptyset (liste contenant les informations mutuelles de tous les liens)
11. Initialisation de $activated_vector_list(0)$ à la valeur \emptyset (liste contenant le vecteur choisi à chaque phase de retransmission)
12. Calcul de $\bar{I}_{0,i}(\mathbf{H}_j)$ pour tous les nœuds $i \in \mathcal{S}$. ($\bar{I}_{l,i}$ est un élément de \mathbf{I}_{list})
13. **si $R_s n_{0,s} \leq \bar{I}_{0,s}$ alors**
14. continuer ou retour au point 7, (pas de mise à jour des variables out et \bar{T}_{used}).
15. **fin de si**
16. **3^{ème} boucle sur l de 1 à T_{max}**
17. $C_2 = \bar{I}_{0,s}$
18. Sélection de vecteur de nœuds $\hat{\mathbf{a}}_t$ par la destination en utilisant une stratégie de sélection aléatoire définie en deux étapes (i) déduire d'une variable discrète uniforme si une sous-bande est occupée (jusqu'à ce qu'au moins une sous-bande soit occupée) (ii) déduire d'une variable discrète uniforme quel nœud est sélectionné si la sous-bande est occupée
19. Ajouter $\hat{\mathbf{a}}_t$ et $\mathcal{S}_{\hat{\mathbf{a}}_t, t-1}$ à la liste de nœuds activés $activated_nodes_list(t) = \{(\hat{\mathbf{a}}_1, \mathcal{S}_{\hat{\mathbf{a}}_1, 0}), (\hat{\mathbf{a}}_2, \mathcal{S}_{\hat{\mathbf{a}}_2, 1}), \dots, (\hat{\mathbf{a}}_l, \mathcal{S}_{\hat{\mathbf{a}}_l, l-1})\}$.
20. Calculer $\bar{I}_{l,i}(\mathbf{H}_j)$ pour tous les nœuds $i \in \mathcal{S}$. ($\bar{I}_{l,i}$ est un élément de \mathbf{I}_{list})

21. **4^{ème} boucle sur i de 1 à $M + L$**
22. $C_2 = C_2 + \bar{I}_{l,i}[\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{U} \neq \emptyset]$
23. **fin de 4^{ème} boucle**
24. **si $R_s \leq C_2$ alors**
25. $T_{used} = t$
26. *Interruption de la 3^{ème} boucle, aller au point 33 (sans changer la valeur de out)*
27. **fin de si**
28. **si $t = T_{max}$ alors**
29. $out = out + 1$
30. $T_{used} = T_{max}$.
31. **fin de si**
32. **fin de 3^{ème} boucle**
33. $\bar{T}_{used} = \bar{T}_{used} + T_{used}$
34. **fin de 2^{ème} boucle**
35. Détermination de la probabilité d'interruption moyenne de la source s pour le débit \bar{R}_k :

$$\mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir}) = \frac{out}{Nb_MC}$$
36. Détermination du nombre moyen de cycles utilisés pendant la deuxième phase :

$$\mathbb{E}(T_{used} | \mathbf{H}_{dir}) = \frac{\bar{T}_{used}}{Nb_MC}$$
37. **si $\frac{R_s n_{0,s}}{1 + \mathbb{E}(T_{used} | \mathbf{H}_{dir})} (1 - \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir})) > Max$ et $(\mathcal{O}_{i,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir}) < QoS_i$**
38. $Max = \frac{R_s n_{0,s}}{1 + \mathbb{E}(T_{used} | \mathbf{H}_{dir})} (1 - \mathbb{E}(\mathcal{O}_{s,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir}))$
39. $\hat{R}_s^{GA} = \bar{R}_k$
40. **fin de si**
41. **fin de la 1^{ère} boucle**

ANNEXE 3: Algorithme BRD

Algorithme 2 – algorithme « Best response dynamics» (BRD) (Dynamique de meilleure réponse)

1. $t \leftarrow 0$ (Compteur du nombre d'itérations)
2. Initialisation de l'ensemble des débits disponibles : $\{\bar{R}_1, \dots, \bar{R}_{n_{MCS}}\}$
3. Initialisation des débits en utilisant un point de départ (*init*)

$$[\hat{R}_1(0), \dots, \hat{R}_M(0)] \leftarrow [\hat{R}_1^{init}, \dots, \hat{R}_M^{init}]$$
4. $\{\hat{R}_i(-1), \hat{\alpha}_i(-1)\} \leftarrow \{0,0\} \forall i \in \{1, \dots, M\}$ (Afin de permettre à la boucle tant que de débiter)
5. **Tant que** ($|\hat{R}_i(t) - \hat{R}_i(t-1)| > \varepsilon_1$) pour tout $i \in \{1, \dots, M\}$
6. $t \leftarrow t + 1$
7. **pour** $i \leftarrow 1$ à M **faire** (Pour chaque source, choisir le meilleur R_i en connaissant toutes les autres valeurs de débits $\hat{R}_j; j \neq i$)
8. $\hat{R}_i(t) \leftarrow \operatorname{argmax}_{\{R_i\}} \rho^{\text{fla}}(\hat{R}_1(t), \dots, \hat{R}_{i-1}(t), R_i, \hat{R}_{i+1}(t-1), \dots, \hat{R}_M(t-1) | \mathbf{H}_{dir})$
 Tel que $\{E(\mathcal{O}_{i,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir}) < \text{QoS}, i\} \forall i \in \{1, \dots, M\}$ (qui satisfait la condition)
9. **Fin de pour**
10. **Fin de tant que**

Algorithme 3 - Simulations de Monte-Carlo pour déterminer l'efficacité spectrale et le $E(\mathcal{O}_{i,T_{max}} | \mathbf{H}_{dir})$ utilisé dans l'algorithme BRD (étape 8):

1. $E_{total} = 0$, individual_counter[M]= {0,...,0}
 Initialisation de E_{total} : nombre de cycles cumulé de la deuxième phase (phase de retransmission) sur la boucle **Nb_MC**
 Initialisation du faisceau individual_counter[M]: chaque élément individual_counter[j] contient le nombre d'indications d'événements d'interruption individuelle pour l'utilisateur i sur la boucle **Nb_MC**
2. Sélection aléatoire de \mathbf{H}_{dir} fondée sur $P(\mathbf{H}_{dir})$ la distribution de probabilité des liens directs ($h_{source,destination}, h_{relay,destination}$).
3. **1^{ère} boucle sur j de 1 à Nb_MC** (exemple Nb_MC=100)
4. Sélection aléatoire de \mathbf{H}_{ind} , fondée sur $P(\mathbf{H}_{ind})$ la distribution de probabilité des liens indirects ($h_{source,source}, h_{source,relay}$ or $h_{relay,relay}$).
5. $\mathbf{H}_j = \mathbf{H}_{dir} \cup \mathbf{H}_{ind}$ (\mathbf{H}_j représente la réalisation de canal à une itération de Monte-Carlo courante j , fondée sur \mathbf{H}_{dir} et sur la \mathbf{H}_{indir} courante à l'itération j)

6. Initialisation de I_{list} à la valeur \emptyset (liste contenant l'information mutuelle de tous les liens)
7. Initialisation de $activated_vector_list(0)$ à \emptyset (liste contenant le vecteur choisi à chaque phase de retransmission)
8. **2^{ème} boucle sur t de 1 à T_{max}**
9. Calcul de $\bar{I}_{t-1,i}(H_j)$ pour tous les nœuds $i \in \mathcal{S}$. ($\bar{I}_{t-1,i}$ est un élément de I_{list})
10. $out = check_outage(t - 1, I_{list}, activated_nodes_list(t - 1), \mathcal{S});$
11. **si $out = 0$ alors**
12. $S_d = \mathcal{S};$
13. $E_{total} = E_{total} + t - 1;$
14. *Interruption ou sortie de boucle 2 pour aller au point 3;*
15. **sinon**
16. $S_d = get_decoding_set(t - 1, I_{list}, activated_nodes_list(t - 1));$
17. $S_r = get_decoding_set(t - 1, I_{list}, activated_nodes_list(t - 1));$
18. $S_s = get_decoding_set(t - 1, I_{list}, activated_nodes_list(t - 1));$
19. Sélection de vecteur de nœuds \hat{a}_t par la destination (en utilisant une stratégie de sélection)
20. Ajouter \hat{a}_t et $\mathcal{S}_{\hat{a}_t,t-1}$ à la liste de nœuds activés
 $activated_nodes_list(t) = \{(\hat{a}_1, \mathcal{S}_{\hat{a}_1,0}), (\hat{a}_2, \mathcal{S}_{\hat{a}_2,1}), \dots, (\hat{a}_t, \mathcal{S}_{\hat{a}_t,t-1})\}.$
21. **si $t = T_{max}$ alors**
22. $E_{total} = E_{total} + T_{max};$
23. Calcul de $\bar{I}_{T_{max},i}(H_j)$ pour tous les nœuds $i \in \mathcal{S}$.
24. $S_d =$
 $get_decoding_set(T_{max}, I_{list}, activated_nodes_list(T_{max}));$
25. **3^{ème} boucle sur s de 1 à M.**
26. **si $s \notin S_d$ alors**
27. $individual_counter[s] = individual_counter[s] + 1;$
28. **Fin si**
29. **Fin de 3^{ème} boucle**
30. **Fin si**
31. **Fin de sinon**
32. **Fin de 2^{ème} boucle**
33. **Fin de 1^{ère} boucle**

34. 4^{ème} boucle sur s de 1 à M

$$35. \quad \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{s,t} | \mathbf{H}_{dir}\} = \text{individual_counter}[s] / \text{Nb_MC}$$

36. Fin de 4^{ème} boucle

$$37. \quad \mathbb{E}(T_{used} | \mathbf{H}_{dir}) = E_{total} / \text{Nb_MC};$$

Calcul de l'efficacité spectrale à l'étape 8 de l'algorithme BRD en utilisant

$$\rho^{fla} = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}(T_{used} | \mathbf{H}_{dir})} \left(1 - \mathbb{E}(\mathcal{O}_{i,Tmax} | \mathbf{H}_{dir})\right).$$

check_outage évalue l'indication d'événement d'interruption commune d'un ensemble \mathcal{B}

check_outage($t, \mathbf{I}_{list}, \text{activated_nodes_list}(t), \mathcal{B}$);

1. Initialisation : $out = 0, card = |\mathcal{B}|$;
2. **1^{ère} boucle sur j de 1 à ($2^{card} - 1$)** (vérification de l'indication d'événement d'interruption correspondant à chaque sous-ensemble \mathcal{U} de \mathcal{B})
3. Initialisation : Prendre successivement un sous-ensemble \mathcal{U} , fixer $I = 0, SumRate = 0$, et $\mathcal{I} = \mathcal{B} \setminus \mathcal{U}$ (initialisation de l'information mutuelle courante, ainsi que du débit total et des nœuds source interférant pour un sous-ensemble $\mathcal{U} \in \mathcal{B}$).
4. **2^{ème} boucle sur k de 1 à M**
5. **si $k \in \mathcal{U}$ alors**
6. $s = k$;
7. $I = I + \bar{I}_{0,s}$;
8. $SumRate = SumRate + R_s n_{0,s}$;
9. **Fin si**
10. **Fin de la 2^{ème} boucle**
11. **3^{ème} boucle sur l de 1 à t** ($\hat{\mathbf{a}}_l$ est le vecteur de nœud sélectionné au cycle l)
12. **4^{ème} boucle sur i de 1 à M + L** ($\hat{\mathbf{a}}_l$ est le vecteur de nœud sélectionné au cycle l)
13. **si $\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{U} \neq \emptyset$ et $\mathcal{S}_{i,l-1} \cap \mathcal{I} = \emptyset$ alors**
14. $I = I + \bar{I}_{l,i}$;
15. **fin si**
16. **Fin de la 3^{ème} boucle**
17. **Fin de la 4^{ème} boucle**
18. **si $SumRate > I$ alors**
19. $out = 1$;
20. *Interruption ou sortie de la boucle 1 pour aller à l'étape 23;*

21. **fin si**
22. **Fin de la 1^{ère} boucle**
23. Retour *out*

get_decoding_set calcule l'ensemble de sources correctement ou le plus grand ensemble \mathcal{B} qui ne donne pas une indication d'événement d'interruption commune

`get_decoding_set($t, I_{list}, \text{activated_nodes_list}(t)$);`

1. $S_d = \emptyset$ (Initialization of the decoding set to phi)
2. **1^{ère} boucle sur *card* de M à 1** (boucle sur toute la cardinalité des sous-ensembles)
3. **2^{ème} boucle de C_M^{card} à 1** (boucle sur tous les sous-ensembles d'une cardinalité donnée)
4. Choisir successivement les sous-ensembles de sources : \mathcal{B} , où $|\mathcal{B}| = card$
 `$out = \text{check_outage}(t, I_{list}, \text{activated_nodes_list}(t), \mathcal{B})$;`
5. **si $out = 0$ alors**
6. *Interruption ou sortie de la boucle 2 pour aller à l'étape 9 ;*
7. **Fin si**
8. **Fin de la 2^{ème} boucle**
9. **si $out = 0$ alors**
10. $S_d = \mathcal{B}$;
11. *Interruption ou sortie de la boucle 2 pour aller à l'étape 13 ;*
12. **Fin de la 1^{ère} boucle**
13. retour S_d

REVENDICATIONS

1. Procédé de réception d'au moins une trame de données, dans un système de communication mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et une destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$, lesdites M sources étant configurées pour transmettre, au cours d'une première phase de transmission, des messages sur K intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, avec $K \geq 1$ et $B > 1$, ou $K > 1$ et $B \geq 1$, et une sélection desdites M sources et desdits L relais étant configurée pour transmettre, au cours d'une phase de transmission coopérative, un signal représentatif d'au moins un desdits messages sur T_{used} intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, selon un ordonnancement choisi par ladite destination, les données transmises sur lesdits $(K + T_{used})$ intervalles de temps formant une trame de données, caractérisé en ce que ladite destination met en œuvre, pour au moins une trame de données et l'ordonnancement associé, une phase initiale d'adaptation de lien, préalable à ladite première phase de transmission de ladite trame, comprenant :
 - l'estimation (21) des canaux de transmission associés aux liens directs entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux directs,
 - l'obtention (22) des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux indirects,
 - la détermination (23), à partir desdites statistiques des canaux indirects et estimations desdits canaux directs, de M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite estimation des canaux directs est mise en œuvre pour chaque trame de données.
3. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que lesdits canaux directs sont estimés à partir d'au moins un signal de référence reçu par ladite destination, et émis par lesdites sources et/ou lesdits relais.
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que lesdites statistiques des canaux indirects suivent une distribution de Dirac autour de la racine carrée d'un rapport signal-à-bruit du canal indirect correspondant.
5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite obtention des statistiques des canaux indirects est mise en œuvre pour un ensemble de trames de données.
6. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, qu'il comprend la réception d'une notification de modification d'au moins une statistique d'un desdits canaux indirects, et une mise à jour desdites statistiques.

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que ladite détermination de M débits à allouer aux M sources met en œuvre une maximisation d'une métrique de qualité de service dudit système de communication, connaissant l'estimation des canaux directs.

8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite maximisation s'exprime sous la forme :

$$(\hat{R}_1, \dots, \hat{R}_M) = \underset{(R_1, \dots, R_M) \in \{\tilde{R}_1, \dots, \tilde{R}_{n_{MCS}}\}^M}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^M \frac{R_i n_{0,i}}{1 + \mathbb{E}(T_{used} | H_{dir})} (1 - \mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i, T_{max}} | H_{dir}\})$$

sous contrainte que :

$$\mathbb{E}(\mathcal{O}_{i, T_{max}} | H_{dir}) \leq QoS, i \forall i \in \mathcal{S}$$

avec :

\mathcal{S} l'ensemble des sources ;

R_i une variable représentant le débit à allouer à la source i , $i \in \{1, \dots, M\}$,

$n_{0,i}$ le nombre de sous-bandes allouées à la source i durant la première phase de transmission,

H_{dir} l'estimation des canaux directs,

T_{used} le nombre de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative,

T_{max} le nombre maximum de transmissions coopératives autorisées pendant la phase de transmission coopérative,

$\mathbb{E}(T_{used} | H_{dir})$ une moyenne du nombre de transmissions coopératives utilisées pendant la phase de transmission coopérative, connaissant l'estimation des canaux directs,

$\mathbb{E}\{\mathcal{O}_{i, T_{max}} | H_{dir}\}$ une moyenne du nombre de messages transmis par la source i non décodés par la destination à l'issue de la phase de transmission coopérative, connaissant l'estimation des canaux directs,

$\mathbb{E}(\mathcal{O}_{i, T_{max}} | H_{dir}) \leq QoS, i \forall i \in \mathcal{S}$ le taux d'erreur moyen acceptable par rapport à une qualité de service QoS, connaissant l'estimation des canaux directs.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ladite détermination de M débits à allouer aux M sources met en œuvre un algorithme itératif basé sur la détermination d'un débit à allouer à la source i , pour chaque $i \in \{1, \dots, M\}$, en supposant les débits à allouer aux autres sources connus.

10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit algorithme itératif est initialisé en utilisant un algorithme de type « Genie Aided ».

11. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que ladite détermination de M débits à allouer aux M sources est mise en œuvre conjointement à la détermination d'un ordonnancement optimisé pour ladite trame.

12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'il comprend la transmission auxdites sources d'au moins une information représentative desdits débits à allouer aux M sources.

13. Destination d'au moins une trame de données, dans un système de communication mettant en œuvre M sources, éventuellement L relais et ladite destination, avec $M \geq 2$ et $L \geq 0$,

lesdites M sources étant configurées pour transmettre, au cours d'une première phase de transmission, des messages sur K intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, avec $K \geq 1$ et $B > 1$ ou $K > 1$ et $B \geq 1$, et une sélection desdites M sources et desdits L relais étant configurée pour transmettre, au cours d'une phase de transmission coopérative, un signal représentatif d'au moins un desdits messages sur T_{used} intervalles de temps et B sous-bandes de fréquence, selon un ordonnancement choisi par ladite destination,

les données transmises sur lesdits $(K + T_{used})$ intervalles de temps formant une trame de données, caractérisé en ce que ladite destination comprend au moins un processeur configuré pour mettre en œuvre, pour au moins une trame de données et l'ordonnancement associé, une phase initiale d'adaptation de lien, préalable à ladite première phase de transmission de ladite trame, comprenant :

- estimer des canaux de transmission associés aux liens directs entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux directs,

- obtenir des statistiques des canaux de transmission associés aux liens indirects entre lesdites sources et/ou relais et ladite destination, dits canaux indirects,

- déterminer, à partir desdites statistiques des canaux indirects et estimations desdits canaux directs, M débits à allouer aux M sources pour la transmission de ladite trame de données.

14. Programme d'ordinateur comportant des instructions pour la mise en œuvre d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 12 lorsque ce programme est exécuté par un processeur.

15. Système comprenant M sources (s_1, \dots, s_M) , éventuellement L relais (r_1, \dots, r_L) et une destination (d) , $M \geq 2$, $L \geq 0$, pour une mise en œuvre d'un procédé de réception selon l'une quelconque des revendications 1 à 12.

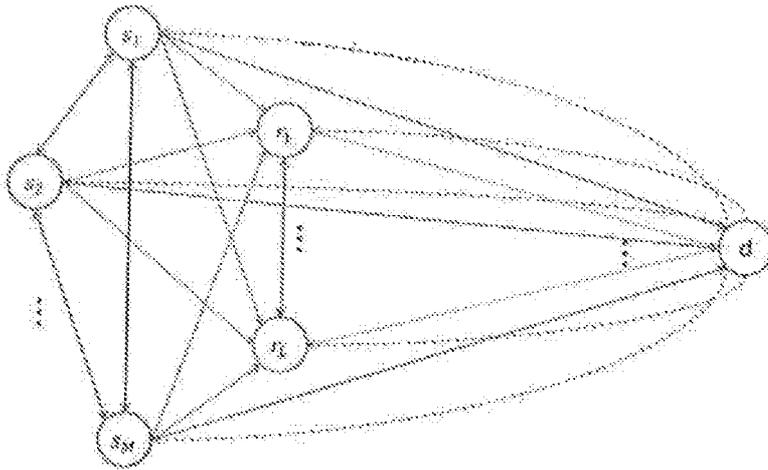


Fig 1

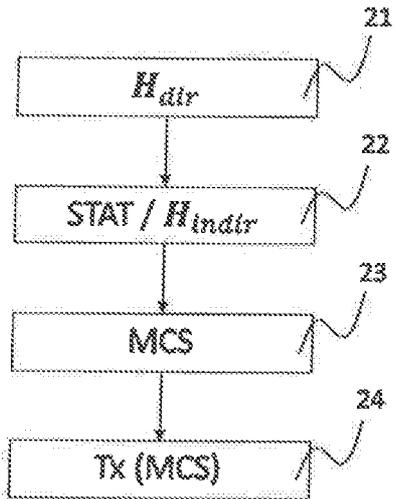


Fig 2

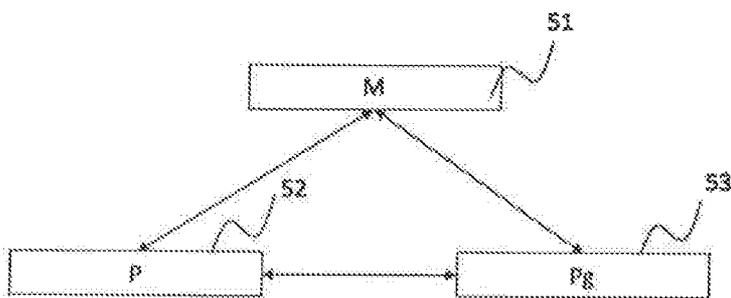


Fig. 5

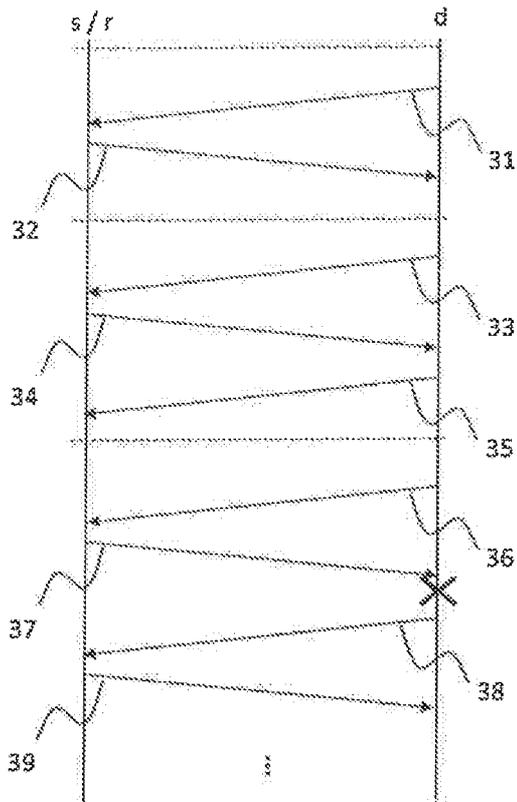


Fig 3

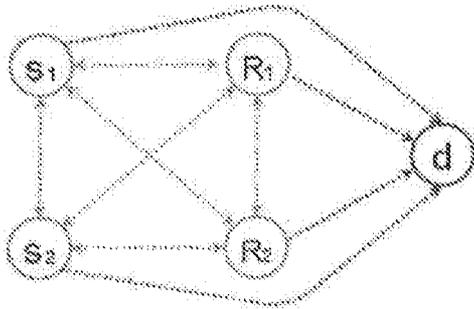


Fig 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/FR2021/052423

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>H04L 1/00(2006.01)i; H04L 5/00(2006.01)n; H04L 1/18(2006.01)n</i>		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H04L; H04W		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2019162592 A1 (ORANGE [FR]) 29 August 2019 (2019-08-29) cited in the application abstract page 9, line 31 - page 14, line 28 figure 1	1-15
A	US 2018367254 A1 (MOHAMAD ABDULAZIZ [FR] ET AL) 20 December 2018 (2018-12-20) abstract paragraph [0074] - paragraph [0098] figure 2	1-15
A	US 2020119804 A1 (CEROVIC STEPHAN [FR] ET AL) 16 April 2020 (2020-04-16) abstract paragraph [0057] - paragraph [0134] figure 1	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 04 April 2022		Date of mailing of the international search report 13 April 2022
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Garrammone, Giuliano Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>MOHAMAD ABDULAZIZ ET AL. "Cooperative Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat Request Strategies for Multi-Source Multi-Relay Wireless Networks" <i>IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US</i>, Vol. 20, No. 9, 01 September 2016 (2016-09-01), pages 1808-1811, [retrieved on 2016-09-08] DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2590538 ISSN: 1089-7798, XP011622357 abstract</p>	1-15
A	<p>MOHAMAD ABDULAZIZ ET AL. "Practical joint network-channel coding schemes for slow-fading orthogonal multiple-access multiple-relay channels" <i>2014 IEEE GLOBECOM WORKSHOPS (GC WKSHPs), IEEE</i>, 08 December 2014 (2014-12-08), pages 936-941 DOI: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063553 XP032747961 abstract figure 1</p>	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/FR2021/052423

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2019162592	A1	29 August 2019	EP	3756295	A1	30 December 2020
				FR	3078459	A1	30 August 2019
				US	2021067284	A1	04 March 2021
				WO	2019162592	A1	29 August 2019

US	2018367254	A1	20 December 2018	CN	108370293	A	03 August 2018
				EP	3387773	A1	17 October 2018
				FR	3045249	A1	16 June 2017
				US	2018367254	A1	20 December 2018
				WO	2017098188	A1	15 June 2017

US	2020119804	A1	16 April 2020	EP	3639427	A1	22 April 2020
				FR	3067543	A1	14 December 2018
				US	2020119804	A1	16 April 2020
				WO	2018229362	A1	20 December 2018

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. H04L1/00 ADD. H04L5/00 H04L1/18		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) H04L H04W		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	WO 2019/162592 A1 (ORANGE [FR]) 29 août 2019 (2019-08-29) cité dans la demande abrégé page 9, ligne 31 - page 14, ligne 28 figure 1 -----	1-15
A	US 2018/367254 A1 (MOHAMAD ABDULAZIZ [FR] ET AL) 20 décembre 2018 (2018-12-20) abrégé alinéa [0074] - alinéa [0098] figure 2 -----	1-15
A	US 2020/119804 A1 (CEROVIC STEPHAN [FR] ET AL) 16 avril 2020 (2020-04-16) abrégé alinéa [0057] - alinéa [0134] figure 1 -----	1-15
	-/--	
<input checked="" type="checkbox"/>	Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents	<input checked="" type="checkbox"/>
	* Catégories spéciales de documents cités: "A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée		Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale
4 avril 2022		13/04/2022
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Fonctionnaire autorisé Garramone, Giuliano

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>MOHAMAD ABDULAZIZ ET AL: "Cooperative Incremental Redundancy Hybrid Automatic Repeat Request Strategies for Multi-Source Multi-Relay Wireless Networks", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 20, no. 9, 1 septembre 2016 (2016-09-01), pages 1808-1811, XP011622357, ISSN: 1089-7798, DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2590538 [extrait le 2016-09-08] abrégé</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15
A	<p>MOHAMAD ABDULAZIZ ET AL: "Practical joint network-channel coding schemes for slow-fading orthogonal multiple-access multiple-relay channels", 2014 IEEE GLOBECOM WORKSHOPS (GC WKSHPs), IEEE, 8 décembre 2014 (2014-12-08), pages 936-941, XP032747961, DOI: 10.1109/GLOCOMW.2014.7063553 abrégé figure 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/FR2021/052423

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO 2019162592 A1	29-08-2019	EP 3756295 A1	30-12-2020
		FR 3078459 A1	30-08-2019
		US 2021067284 A1	04-03-2021
		WO 2019162592 A1	29-08-2019

US 2018367254 A1	20-12-2018	CN 108370293 A	03-08-2018
		EP 3387773 A1	17-10-2018
		FR 3045249 A1	16-06-2017
		US 2018367254 A1	20-12-2018
		WO 2017098188 A1	15-06-2017

US 2020119804 A1	16-04-2020	EP 3639427 A1	22-04-2020
		FR 3067543 A1	14-12-2018
		US 2020119804 A1	16-04-2020
		WO 2018229362 A1	20-12-2018
