

RAPPORT UIT-R M.2040

Antennes adaptatives et principales caractéristiques techniques

(Question UIT-R 224/8)

(2004)

1 Introduction

Le présent Rapport définit les principales notions liées aux antennes adaptatives et décrit les caractéristiques techniques de ces antennes. Dans l'analyse et la conception des systèmes hertziens, on a depuis toujours dissocié l'examen des systèmes d'antenne de celui d'autres aspects essentiels comme:

- les problèmes de propagation;
- les techniques de limitation des brouillages;
- l'organisation du système (techniques d'accès, commande de puissance, etc.);
- la modulation.

L'utilisation d'antennes adaptatives est tout indiquée dans une conception globale du système, c'est-à-dire lorsque toutes les composantes, y compris le système d'antenne, sont intégrées de façon optimale, ce qui améliore sensiblement la couverture (zone de couverture plus grande, moins de «trous» dans la couverture) pour chaque cellule ainsi que la capacité du système et permet de réduire considérablement les brouillages.

Dans le présent Rapport, on examine les diverses notions liées aux antennes adaptatives, ainsi que la notion de «canaux spatiaux»; les possibilités offertes par cette technologie sont analysées théoriquement et les principales caractéristiques sont définies. On trouvera à l'Annexe 1 un glossaire de termes concernant les systèmes d'antennes adaptatives.

1.1 Recommandations connexes

Les Recommandations suivantes de l'UIT-R peuvent être utiles en ce sens qu'elles concernent les systèmes mobiles auxquels les notions examinées ici se rapportent plus ou moins directement:

- Recommandation UIT-R M.622: Caractéristiques techniques et d'exploitation de systèmes cellulaires analogiques pour le service téléphonique public mobile terrestre
- Recommandation UIT-R M.1032: Caractéristiques techniques et d'exploitation des systèmes mobiles terrestres faisant appel à des techniques d'accès multivoies sans unité d'échange centrale
- Recommandation UIT-R M.1033: Caractéristiques techniques et d'exploitation des téléphones sans cordon et des systèmes de télécommunication sans cordon
- Recommandation UIT-R M.1073: Systèmes mobiles terrestres cellulaires numériques de télécommunication
- Recommandation UIT-R M.1074: Intégration des systèmes de radiocommunication mobiles publics
- Recommandation UIT-R M.1221: Prescriptions techniques et opérationnelles applicables aux stations de radiocommunication mobiles multimode cellulaires

- Recommandation UIT-R M.1457: Spécifications détaillées des interfaces radioélectriques des télécommunications mobiles internationales-2000 (IMT-2000)
- Recommandation UIT-R M.1678: Antennes adaptatives pour systèmes mobiles
- Recommandation UIT-R SM.856: Nouvelles techniques et nouveaux systèmes économes de spectre.

2 Antennes et antennes adaptatives

2.1 Antennes et couverture

Les antennes adaptatives peuvent être définies comme des antennes-réseaux avec traitement du signal qui peuvent modifier leur diagramme de rayonnement de façon dynamique pour s'adapter au bruit, au brouillage et à la propagation par trajets multiples. Elles sont utilisées pour améliorer le rapport signal/bruit+brouillage (SINR) à la réception et peuvent également être considérées comme des antennes à faisceaux modelés pour l'émission. De même, les systèmes à commutation de faisceaux utilisent un certain nombre de faisceaux fixes sur le site de l'antenne. Le récepteur sélectionne le faisceau qui renforce le plus l'intensité du signal et limite le plus les brouillages. Les systèmes à commutation de faisceaux ne peuvent pas être aussi performants que les systèmes adaptatifs mais ils sont beaucoup moins complexes et beaucoup plus faciles à moderniser. Enfin, les antennes adaptatives sont définies comme des systèmes qui peuvent associer des technologies d'antennes adaptatives et des technologies de faisceaux commutés. Un glossaire de termes utiles relatifs aux antennes adaptatives est donné dans l'Annexe 1; dans le présent paragraphe, la terminologie et son utilisation générale sont examinées plus avant.

Le lecteur est mis en garde contre le fait qu'il peut y avoir certaines variations dans l'utilisation de la terminologie: par exemple, on qualifie parfois les systèmes non adaptatifs ou les systèmes sans commutation de systèmes intelligents, simplement parce qu'une électronique radioélectrique est fixée sur le mât d'antenne, et souvent les expressions «systèmes adaptatifs» et «systèmes à formation de faisceaux» sont utilisées de façon lâche ou étroite. (Par exemple, la Recommandation UIT-R SM 856, qui, semble-t-il, est la seule autre Recommandation de l'UIT-R où l'on parle d'antennes adaptatives, utilise le terme «adaptatif» correctement mais donne brièvement un exemple où ce terme était utilisé de façon très étroite et très spécifique pour un ancien système en ondes métriques.) Par ailleurs, il faut faire attention lorsque le terme «adaptatif» est utilisé pour les systèmes mobiles terrestres, sans autre qualificatif, par exemple lorsqu'il est appliqué au contrôle dynamique de la modulation, des ressources de largeur de bande, du codage, de la puissance ou d'autres attributs de protocole d'une interface radioélectrique.

Adaptées à des environnements RF simples où l'on ne connaît pas précisément l'emplacement de l'utilisateur, les antennes équidirectives diffusent les signaux et une fraction minime seulement de l'énergie globale rayonnée est utilisée pour atteindre les utilisateurs (ou inversement, pour les émissions depuis l'utilisateur vers la station de base).

Compte tenu de cette limitation, on essaie avec les antennes équidirectives de surmonter les problèmes de propagation en augmentant simplement l'intensité des signaux. Dans des configurations où les utilisateurs (et par conséquent les brouilleurs) sont nombreux et relativement proches les uns des autres, les choses s'aggravent, en ce sens que la plus grosse partie de l'énergie du signal RF devient une source de brouillage potentielle pour d'autres utilisateurs de la même cellule ou de cellules adjacentes et le volume d'information acheminé par la liaison n'augmente pas.

En liaison montante (utilisateur vers station de base), les antennes équidirectives n'apportent aucun avantage de gain pour les signaux des utilisateurs desservis et limitent la portée des systèmes. Dans cette méthode non globale il n'y a pas non plus de possibilité de limitation de la propagation par trajets multiples.

Par conséquent, les antennes équidirectives ont une incidence directe et négative sur l'efficacité spectrale et limitent la réutilisation des fréquences.

Une simple antenne peut également être conçue de façon à avoir certains sens d'émission et de réception préférentiels: aujourd'hui de nombreux systèmes d'antenne classiques subdivisent ou «sectorisent» les cellules. Avec les systèmes d'antennes sectorielles, la zone couverte par une cellule classique est subdivisée en «secteurs» qui sont desservis par plusieurs antennes directives situées sur le site de la station de base. Du point de vue de l'exploitation, chaque secteur est traité comme une cellule différente. Les antennes directives ont un gain plus élevé que les antennes équidirectives, toutes choses étant égales par ailleurs; les secteurs desservis par ces antennes sont donc plus étendus que ceux desservis par une antenne équidirective. Cette sectorisation en cellules permet d'améliorer la réutilisation des canaux en limitant le brouillage causé par la station de base et ses utilisateurs au reste du réseau et on utilise beaucoup ce type de cellules à cette fin. Pour les services commerciaux, on a utilisé jusqu'à six secteurs par cellule.

2.2 Systèmes d'antennes adaptatives et systèmes à diversité

Dans ce contexte, il est important de comprendre ce que l'on entend par diversité. Comme l'a indiqué Winters [1], les trois principaux handicaps des systèmes hertziens cellulaires peuvent être regroupés en trois catégories, à savoir les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, l'étalement du temps de propagation et le brouillage dans le même canal. Comme on l'expliquera plus loin, l'utilisation d'antennes multiples, M , en nombre, permet généralement d'augmenter le gain de M et, en outre, d'assurer une diversité de gain pour lutter contre les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples. Le gain M peut être assimilé à la réduction de puissance requise à la réception pour un rapport S/N en sortie moyen donné (indépendamment de l'environnement) alors que la composante gain de diversité (uniquement présente lorsque la propagation par trajets multiples est évidente) est la réduction du rapport S/N moyen en sortie requis pour un taux d'erreur donné en présence d'évanouissements. Ainsi, les systèmes d'antenne à diversité spatiale intègrent deux ou plus de deux éléments d'antenne dont l'espacement physique est utilisé pour lutter contre les effets négatifs de la propagation par trajets multiples.

La diversité améliore la puissance effective du signal reçu si on utilise l'une des deux méthodes suivantes:

- *La diversité avec commutation*: en supposant que l'emplacement d'une antenne au moins sera favorable à un moment donné, le système passe en permanence d'une antenne à l'autre (connectant chacun des canaux de réception à l'antenne la mieux située) pour choisir l'antenne pour laquelle l'énergie du signal est maximale. La technique de diversité avec commutation réduit l'évanouissement du signal, mais n'augmente pas le gain étant donné qu'on utilise une seule antenne à un moment donné pas plus qu'elle ne limite les brouillages.
- *La combinaison en diversité*: les signaux provenant de chaque antenne sont combinés de façon cohérente pour produire un gain. Dans les systèmes à combinaison maximale des rapports, les signaux de sortie de toutes les antennes sont combinés afin d'optimiser le rapport énergie du signal reçu combiné/bruit.

Contrairement aux systèmes à diversité avec commutation, la combinaison en diversité utilise à tout moment, pour chaque utilisateur, tous les éléments d'antenne pour créer un diagramme de rayonnement d'antenne équivalent qui s'adapte de façon dynamique à l'environnement de propagation. Il n'est toutefois pas assuré que cette méthode maximise le gain pour tel ou tel utilisateur. Etant donné que les algorithmes qui déterminent la stratégie de combinaison s'efforcent de maximiser l'énergie totale du signal et non celle d'un utilisateur particulier, le diagramme d'antenne équivalent peut en fait fournir un gain de crête à des éléments rayonnants autres que l'utilisateur désiré (utilisateurs cocanal dans d'autres cellules, par exemple). Cela est particulièrement vrai en présence de brouillages importants qui caractérisent les systèmes cellulaires à forte charge de trafic.

2.3 Systèmes d'antenne et brouillage

Des systèmes d'antenne plus sophistiqués peuvent atténuer l'autre handicap des systèmes hertziens cellulaires, à savoir le brouillage cocanal. Pour l'émission, l'objectif est de concentrer la puissance RF vers chaque utilisateur d'un canal radioélectrique uniquement lorsque cela est nécessaire, limitant ainsi les brouillages causés à d'autres utilisateurs dans des cellules adjacentes. Pour la réception, le but est de fournir un gain de crête dans la direction de l'utilisateur désiré tout en limitant la sensibilité aux brouillages dans la direction des autres utilisateurs du même canal. Cela suppose l'utilisation d'un système d'antenne disposant de fonctions d'orientation de faisceau instantanées. Pour ce faire, on peut utiliser la technique des antennes-réseaux à commande de phase, en particulier les techniques numériques de formation de faisceaux.

Par ailleurs, l'utilisation d'un grand nombre d'éléments d'antenne simples confère une nouvelle dimension au traitement de la diversité.

2.4 Systèmes d'antenne intelligents

L'arrivée de processeurs de signaux numériques puissants et peu coûteux, de processeurs polyvalents et de circuits ASIC et ainsi que la mise au point de techniques de traitement du signal définies par logiciel ont fait des systèmes d'antenne adaptatifs évolués une réalité concrète pour les systèmes cellulaires. L'utilisation d'antennes-réseaux conjuguée aux techniques numériques de formation de faisceaux et à un traitement du signal en bande de base évolué peu coûteux ouvre des nouvelles perspectives prometteuses pour l'amélioration des systèmes de communication hertziens. On trouvera au § 12 des documents de référence utiles sur les antennes adaptatives.

Un système d'antenne adaptatif se compose essentiellement d'un réseau d'éléments d'antenne (généralement entre 4 et 12) dont les sorties sont combinées pour assurer une commande adaptative de l'émission et de la réception du signal. Les configurations des éléments d'antenne peuvent être linéaires, circulaires, planes ou aléatoires. Ces éléments sont le plus souvent installés sur le site de la station de base même s'ils peuvent également être mis en oeuvre dans le terminal mobile. Lorsqu'une antenne adaptative oriente son lobe principal à un gain amélioré dans une direction particulière pour desservir un utilisateur, les lobes latéraux et les zéros (directions de gain minimal) du système d'antenne pointent dans des directions variables par rapport au centre du lobe principal. Différents systèmes d'antennes intelligentes adaptatives ou à commutation de faisceaux permettent d'agir sur les lobes et les zéros avec plus ou moins de précision et de souplesse. Cela a des conséquences directes sur les performances des systèmes.

2.4.1 Antennes à commutation de faisceaux

Les systèmes d'antenne à commutation de faisceaux forment plusieurs faisceaux fixes ayant une sensibilité accrue dans telle ou telle direction. Ces systèmes d'antenne mesurent l'intensité du signal en choisissant un faisceau parmi plusieurs faisceaux fixes préalablement déterminés, à partir de combinaisons pondérées des signaux de sortie d'antenne présentant la plus forte puissance dans le canal de l'utilisateur distant et en passant d'un faisceau à un autre au fur et à mesure que le mobile se déplace dans le secteur. Ces choix sont déterminés par des techniques de traitement numérique du signal en bande de base ou du signal RF. Les systèmes à commutation de faisceaux peuvent être considérés comme des systèmes à «microsectorisation».

2.4.2 Antennes-réseaux adaptatives

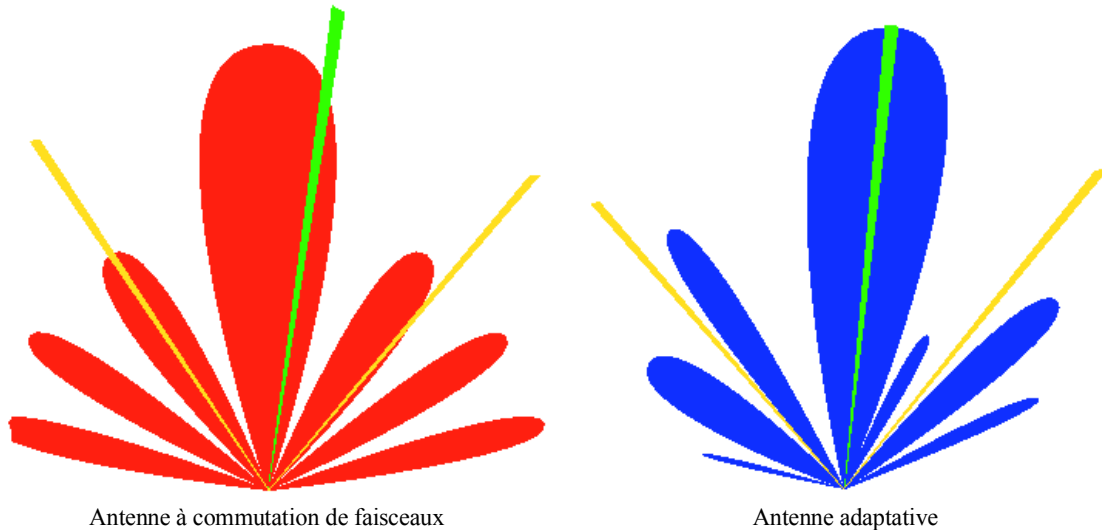
La technologie des antennes adaptatives constitue la méthode la plus évoluée à ce jour pour améliorer sensiblement l'efficacité spectrale. En utilisant divers algorithmes de traitement du signal, un système adaptatif identifie et suit tous les signaux et brouilleurs pris en considération afin de minimiser dynamiquement les brouillages et de maximiser la réception des signaux utiles. Tout comme un système à commutation de faisceaux, un système adaptatif tentera d'augmenter le gain du signal d'utilisateur reçu dans les différents éléments du réseau d'antenne. Toutefois, seul le système adaptatif assure un gain optimal tout en réduisant les brouillages. La technique de combinaison en diversité adapte en permanence le diagramme d'antenne à l'environnement. La différence entre cette technique et un système d'antenne adaptatif est essentiellement dans la variété des modèles sur lesquels se fondent les stratégies de traitement des deux systèmes. Dans un système à diversité, le modèle est simple puisqu'il n'y a qu'un seul utilisateur dans la cellule sur le canal radioélectrique considéré. Dans le système adaptatif, le modèle est élargi pour tenir compte de la présence de brouilleurs et souvent de l'évolution des caractéristiques de propagation associées à l'utilisateur. Dans ce second modèle, il est possible de distinguer les utilisateurs des brouilleurs même lorsque le rapport SINR est faible et d'offrir simultanément un gain fiable et une limitation des brouillages.

Les systèmes d'antenne adaptatifs pour les communications entre l'utilisateur et une station de base tirent parti de la dimension spatiale, en s'adaptant selon des stratégies prédéfinies à l'environnement RF, à savoir l'ensemble des utilisateurs et les autres émetteurs, au fur et à mesure que cet environnement évolue. Cette méthode actualise en permanence les diagrammes de rayonnement et de réception du système de la station de base en fonction de l'évolution de la configuration relative du signal utile et du signal brouilleur. En particulier, la possibilité de suivre le déplacement des utilisateurs à l'aide des lobes principaux de l'antenne et d'atténuer les effets des brouilleurs grâce aux zéros permet d'optimiser le bilan de liaison. En mettant en oeuvre numériquement les stratégies d'antenne intelligentes, la station de base peut adopter une stratégie personnalisée, distincte pour chaque canal actif du système via un seul réseau et un ensemble électronique.

La différence entre les deux méthodes – antennes adaptatives ou antennes à commutation de faisceaux – est illustrée de façon simplifiée à la Fig. 1 qui montre comment les algorithmes adaptatifs se comportent par rapport aux signaux brouilleurs et au signal utile.

FIGURE 1

Différence entre un système à commutation de faisceaux et un système adaptatif



Rap 2040-01

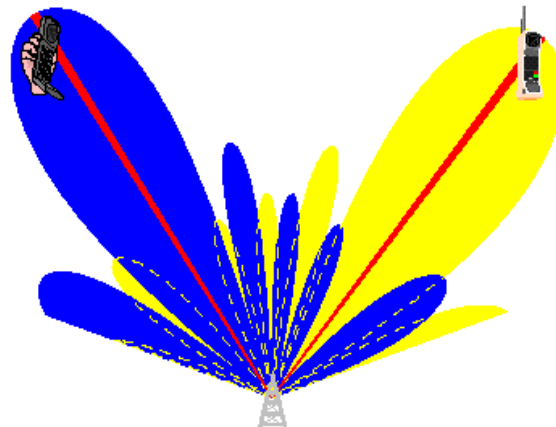
2.4.3 Traitement spatial: la méthode entièrement adaptative

A l'aide d'algorithmes sophistiqués ainsi que d'un équipement de traitement et de microprocesseurs puissants, le «traitement spatial» tire parti de la réutilisation des fréquences résultant de la suppression sans précédent des brouillages. Très schématiquement, le traitement spatial (accès multiple à répartition spatiale, (AMRS)) crée dynamiquement une structure de faisceaux différente pour chaque utilisateur et attribue une fréquence/des canaux en temps réel et en permanence. Le traitement spatial optimise l'utilisation d'antennes multiples pour combiner utilement les signaux dans l'espace, à l'aide de méthodes qui vont bien au-delà de la méthode «un utilisateur par faisceau».

Selon les caractéristiques de l'interface radioélectrique et la définition du service, des «canaux spatiaux» peuvent être créés de manière fiable par traitement spatial: chaque canal temporel classique (fréquence et intervalle de temps ou combinaison de code) peut être réutilisé à l'intérieur de la cellule avec un facteur de réutilisation inférieur à 1. La Fig. 2 illustre une telle situation pour deux utilisateurs. Des canaux spatiaux ou des techniques de réutilisation intracellulaire (AMRS) sont utilisés dans des systèmes cellulaires actuellement exploités dans plusieurs pays. La notion de réutilisation intracellulaire peut paraître inhabituelle mais elle est déjà utilisée lorsqu'il y a sélectivité spatiale suffisante dans la distribution et la collecte de l'énergie radioélectrique de la cellule. Selon l'interface radioélectrique, une sélectivité ou une discrimination spatiale aussi faible que 10 dB peut suffire pour différents emplacements dans la cellule. Selon les caractéristiques détaillées de l'interface radioélectrique, on peut distinguer des stations qui sont alignées avec la station de base (position radiale vraie), même des stations alignées avec deux stations adjacentes de ce type. Dans le présent paragraphe, nous utilisons des facteurs de réutilisation, R , inférieurs à l'unité que l'on ne peut pas obtenir avec des systèmes cellulaires normaux (pour lesquels $R > 1$).

FIGURE 2

Canaux spatiaux pour deux utilisateurs, facteur de réutilisation = 0,5



Rap 2040-02

3 Analyse théorique des améliorations apportées par les antennes adaptatives

3.1 Introduction

Cette analyse permet d'évaluer la capacité maximale ou l'efficacité spectrale d'une cellule en fonction du facteur de réutilisation des fréquences dans le réseau. On calcule le rapport SINR sur la liaison «montante» ou «retour» du réseau cellulaire à l'aide de simulations informatiques qui peuvent utiliser des valeurs recalculées empiriquement du gain de traitement apporté par les antennes adaptatives, au niveau de la station de base. (Dans cette analyse, on considère que les stations d'utilisateur ont des systèmes d'antenne classiques.) On calcule ensuite la capacité théorique à l'aide de la loi de Shannon, laquelle est modifiée pour tenir compte de diverses «lacunes de codage»¹.

3.2 Définition du modèle utilisé dans cette analyse

3.2.1 Méthode

Soit un réseau exploité à pleine charge (toutes les ressources de communication sont utilisées) et un nombre fixe d'utilisateurs, N , par station de base, pour une largeur de bande attribuée donnée, B . Le problème est de choisir le facteur de réutilisation des fréquences, R , qui maximisera la capacité du réseau et donc son efficacité spectrale. Le compromis est le suivant: plus le facteur de réutilisation des fréquences est faible plus la largeur de bande disponible par utilisateur est grande, b , mais plus le brouillage par utilisateur est élevé.

La largeur de bande disponible par utilisateur est la suivante:

$$b = B/(NR)$$

¹ Une lacune de codage est la différence (habituellement exprimée en dB par rapport au rapport S/N) entre la capacité du canal opérationnel et la limite de Shannon (qui suppose l'utilisation de codes de blocs de longueur infinie). Si la limite de Shannon est $\log_2(1 + S/N)$ bit/s/Hz et si le débit effectif est $\log_2(1 + a \times S/N)$ bit/s/Hz, $a \leq 1$, ou a est la lacune de codage.

Compte tenu de l'évaluation du rapport SINR disponible après traitement au niveau de l'antenne adaptative, la loi de Shannon donne la capacité par utilisateur disponible:

$$b \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$$

ou a représente la lacune de codage (située habituellement entre -3 dB et -6 dB).

La capacité globale de la cellule est alors $(B/R) \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$ et l'efficacité spectrale du réseau est: $\eta = (1/R) \times \log_2(1 + a \times \text{SINR}(R))$, habituellement exprimée en bit/s/Hz/cellule. A l'évidence, le rapport SINR dépend d'un certain nombre de facteurs de mise en oeuvre et de conception du système et pas uniquement de R .

Le facteur de réutilisation qui maximise la capacité totale de la station de base et donc l'efficacité spectrale du système du réseau est obtenu à partir du comportement de η en fonction de R et de la lacune de codage, a , et dépend de la mise en oeuvre spécifique du récepteur.

3.2.2 Modèle cellulaire

Le modèle cellulaire qui a été sélectionné dans cette analyse est un modèle de cellules circulaires concentriques dans lequel toutes les cellules ont la même superficie et la cellule considérée, elle aussi circulaire, est située au centre de toutes les cellules voisines [2]. L'analyse est faite avec 8, 16 et 24 cellules comme sources de brouillage dans le même canal pour la cellule centrale.

Les stations d'utilisateur sont placées uniformément dans leurs cellules respectives. On suppose qu'elles sont dotées d'antennes équidirectives classiques.

3.2.3 Modèle de propagation

On évalue le brouillage causé par les cellules voisines à la cellule considérée évalué et on prend un facteur d'affaiblissement sur le trajet type de 3,5. A ce stade, la dispersion des affaiblissements sur le trajet n'est pas prise en compte, même si on peut penser qu'elle aura une incidence sur la capacité. Cette incidence est plus importante lorsque le facteur de réutilisation est élevé, étant donné que plus le nombre de brouilleurs diminue, plus les effets de pondération sont réduits.

3.2.4 Limitations du modèle

La méthode présentée ci-dessus pourrait être améliorée, par exemple en adoptant différentes valeurs pour les paramètres, nombre d'éléments du réseau, modèles de propagation plus élaborés ou modèles cellulaires plus détaillés. Le modèle ne tient pas compte des effets de la propagation par trajets multiples. On peut considérer que la propagation par trajets multiples non égalisée réduit le rapport SINR.

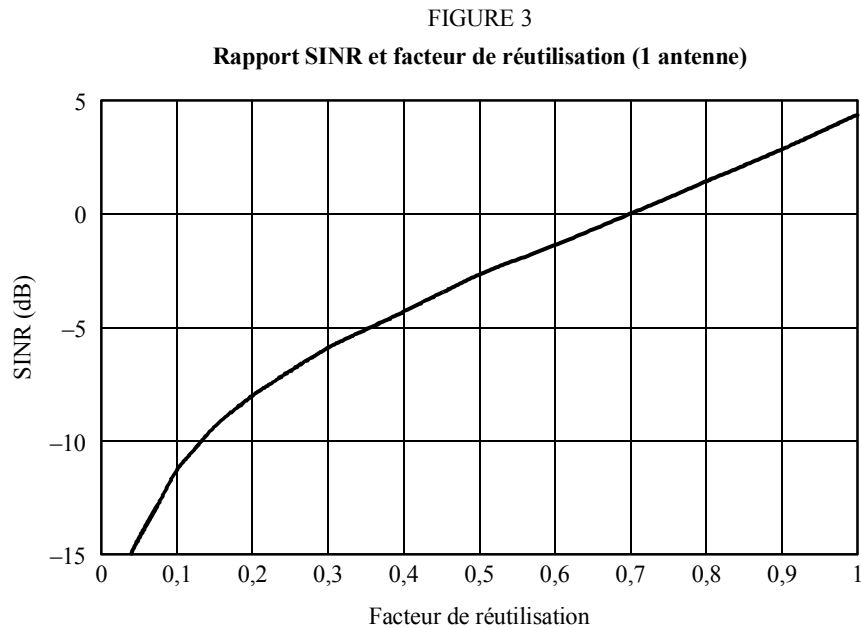
L'analyse tient compte uniquement de la liaison montante. Dans la mesure où le rapport SINR sur la liaison descendante est différent de celui sur la liaison montante, on devrait considérer que l'analyse est une analyse approximative. Il y a de nombreux facteurs qui déterminent la qualité de fonctionnement relative du traitement au niveau de l'antenne adaptative sur la liaison montante et la liaison descendante, notamment les suivants:

- les spécificités de l'interface radioélectrique, la méthode de duplexage, en particulier (duplex à répartition dans le temps (DRT)/duplex à répartition en fréquence (DRF));
- l'environnement de propagation;
- les définitions du service, notamment les débits de données, la mobilité de l'utilisateur, etc.;
- les algorithmes de traitement des antennes intelligentes.

3.3 Résultats et comparaisons

3.3.1 Exemple d'une antenne à un seul élément

On effectue une simulation avec une antenne à seul élément afin d'obtenir une référence pour les améliorations du rapport SINR apportées par les antennes adaptatives. La Fig. 3 donne un exemple du rapport SINR que l'on pourrait avoir en sortie de l'antenne, en fonction du facteur de réutilisation et tient compte de nombreux paramètres propres à la mise en oeuvre.



Rap 2040-03

La région où le facteur de réutilisation est faible (proche de l'unité) peut correspondre au cas de systèmes à accès multiple par répartition en code (AMRC) types; on calcule alors le rapport SINR avant application du «gain de traitement par désétalement». Pour des facteurs de réutilisation élevés, (par exemple 3, 6, 7, 9 ...), les effets de la dispersion par affaiblissement mentionnés au § 3.2.3 peuvent signifier que les valeurs moyennes du rapport SINR présentées dans la courbe sont optimistes.

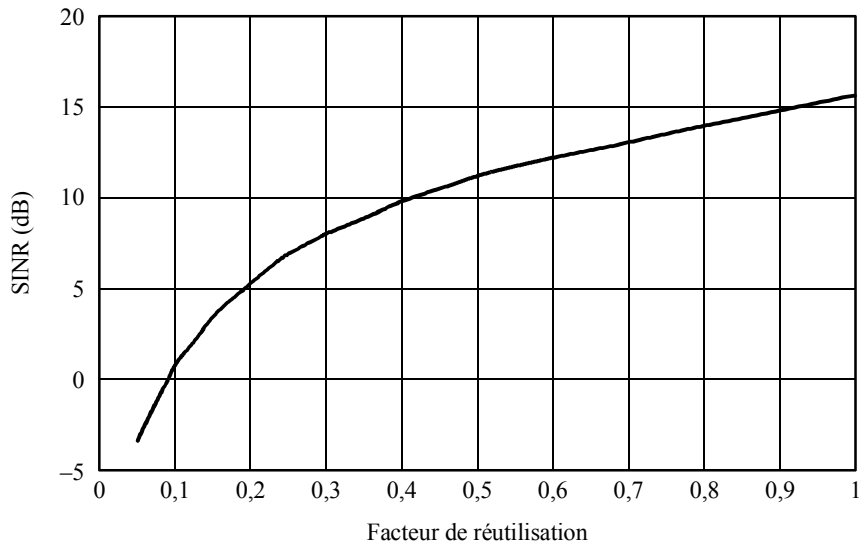
3.3.2 Exemple d'antenne-réseau adaptative à 12 éléments

La Fig. 4 représente le rapport SINR que l'on pourrait avoir sur la liaison montante pour une mise en oeuvre spécifique d'une antenne-réseau adaptative à 12 éléments, après traitement. Les résultats sont obtenus à l'aide d'un logiciel de simulation spécial adapté d'un logiciel de traitement d'antenne adaptative et de modèles de systèmes concrets. Ce logiciel vise à maximiser le rapport SINR, en augmentant le gain d'antenne pour l'utilisateur considéré tout en essayant de minimiser le gain pour les signaux brouilleurs.

Les facteurs de réutilisation plus petits (inférieurs à l'unité) que l'on peut obtenir dans le cas de configurations d'antennes totalement adaptatives (canaux spatiaux ou AMRS, voir § 2.4.3) montrent combien l'amélioration apportée par la technologie des antennes adaptatives peut être importante, même si les résultats obtenus dépendent de nombreux facteurs (voir en particulier le § 9.2). Il n'est simplement pas possible d'avoir des facteurs de réutilisation inférieurs à l'unité sans utiliser des antennes adaptatives même si, comme on l'a montré ci-dessus, les facteurs de réutilisation peuvent en général être beaucoup améliorés par rapport au cas classique.

FIGURE 4

**Rapport SINR et facteur de réutilisation pour une
antenne-réseau intelligente à 12 éléments**



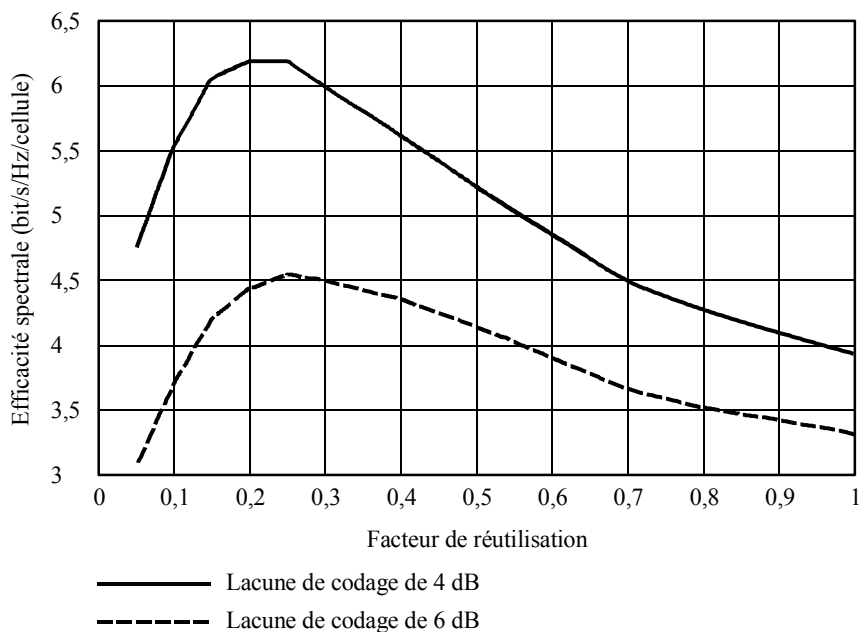
Rap 2040-04

3.3.3 Efficacité spectrale résultante

Les résultats ci-dessus servent de base pour définir l'efficacité spectrale en fonction du facteur de réutilisation, pour différentes valeurs de la «lacune de codage». Les résultats sont donnés dans la Fig 5. Ils donnent les valeurs du rapport SINR après traitement au niveau de l'antenne adaptative, en termes d'efficacité spectrale exprimée en bit/s/Hz/cellule et montrent le potentiel considérable des antennes adaptatives dans le cas de systèmes AMRC.

FIGURE 5

**Efficacité spectrale pour une antenne adaptative et facteur de réutilisation
pour une lacune de codage de 4 et 6 dB**



Rap 2040-05

Il ressort de l'analyse qu'on peut obtenir pour le réseau une efficacité spectrale comprise entre 4 et 6 bit/s/Hz/cellule. Par contre, la plupart des systèmes cellulaires de deuxième génération fonctionnent aujourd'hui avec une efficacité spectrale comprise approximativement entre 0,1 et 0,2 bit/s/Hz/cellule. En outre, un nouveau système utilisant une antenne adaptative et fonctionnant dans la région de 2 GHz présente une efficacité aussi élevée que 8 bit/s/Hz/cellule. Dans ce cas, les résultats de simulation et les résultats concrets font apparaître systématiquement des chiffres moyens de 1/3 pour le facteur de réutilisation dans cet exemple de systèmes AMRS DRT.

On parle parfois pour cette mesure de l'efficacité, et ceci prête plutôt à confusion, de «capacité nette du système» ou même de «potentiel net du système», exprimée en Mbit/s/MHz/cellule. En général, l'amélioration dépend de plusieurs facteurs; voir le § 9.2.

On peut calculer simplement l'efficacité spectrale, η , comme suit:

$$\eta = N_c R_d / (B_c R)$$

où:

N_c : nombre d'intervalles de temps/de porteuses

R_d : débit de données d'utilisateur par intervalle de temps

B_c : largeur de bande de la porteuse, et

R : facteur de réutilisation des fréquences, comme auparavant.

Ainsi, pour un système représentatif PCS 1900 nous avons:

$$\eta = (8 \times 13,3 \text{ kbit/s/intervalles}) / (200 \text{ kHz} \times 7) = 0,08 \text{ bit/s/Hz/cellule}$$

Le § 9.1 donne ces chiffres pour toute une série de systèmes concrets, y compris des systèmes hertziens fixes (AHF) et des systèmes mobiles. Ce type de mesure est très utile lorsqu'on examine l'utilisation du spectre ou que l'on compare d'éventuels scénarios de déploiement. Cela explique la grande importance du facteur de réutilisation, R , qui est fonction de nombreux facteurs comme indiqué ici et plus tard (voir le § 9.2).

3.3.4 Qualité de fonctionnement résultante du système

Les fabricants et les concepteurs ont utilisé avec succès des antennes adaptatives pour plusieurs interfaces radioélectriques existantes commercialisées ainsi que pour des interfaces radioélectriques en cours d'élaboration.

Les résultats publiés ou non publiés concernant les déploiements des systèmes, les essais sur le terrain ou les études de bureau font apparaître que la plupart de ces systèmes (à commutation de circuits) même s'ils ont été mis au point sans utiliser d'antennes adaptatives peuvent, s'ils ne présentent pas de caractéristiques contraires à l'inclusion d'antennes adaptatives, être performants. Cette analyse montre que si les caractéristiques des systèmes d'antennes adaptatives sont intégrées dès le départ dans la conception globale des interfaces radioélectriques, la qualité de fonctionnement peut être sensiblement améliorée et l'efficacité spectrale globale plus élevée.

Cette analyse fait également apparaître que, dans le cas des systèmes à commutation par paquets existants, il est difficile de se prononcer sur l'amélioration de la qualité de fonctionnement que l'on pourrait obtenir en utilisant des antennes adaptatives. Cela étant, pour respecter les critères de qualité de fonctionnement exigés par le modèle, ces systèmes doivent être fondamentalement conçus dès le départ en tenant dûment compte des spécifications propres aux antennes adaptatives.

4 Principaux aspects techniques des systèmes d'antennes adaptatives

La mise en oeuvre d'un système d'antennes adaptatives est un problème relativement complexe qui suppose de faire des compromis entre plusieurs paramètres. Les éléments techniques suivants ont été identifiés comme essentiels du point de vue de la qualité de fonctionnement générale même si certains aspects de mise en oeuvre doivent être considérés également comme des paramètres essentiels:

- nombre d'éléments d'antenne dans le réseau;
- aspects relatifs aux services:
 - circuits vocaux/par paquets de données;
 - services à large bande/services à bande étroite,
- aspects relatifs aux systèmes:
 - DRF/DRT;
 - techniques d'accès: AMRC/AMRT;
 - modulation: multiporteuse ou monoporteuse;
 - organisation des systèmes:
 - protocoles;
 - commande de puissance;
 - signaux pilotes;
 - synchronisation;
 - information de formation,
 - caractéristiques de propagation radioélectrique;
 - utilisation d'autres techniques de limitation des brouillages;
- souplesse de conception: adjonction d'une nouvelle caractéristique ou nouvelle conception générale du système.

4.1 Nombre d'éléments du réseau

Le nombre d'éléments d'une antenne réseau est un paramètre de conception fondamental étant donné qu'il définit le degré de liberté dont dispose le système pour créer des diagrammes optimaux ainsi que le gain supplémentaire qu'offrira le réseau. Une conséquence directe est qu'on peut facilement montrer que l'utilisation de n antennes donne la possibilité d'obtenir $(n - 1)$ zéros instantanés pour la limitation des brouillages. Ce paramètre n est habituellement situé entre 4 et 12, la limite supérieure étant dictée d'une part par des considérations économiques et d'autre part par des considérations pratiques de mise en oeuvre, d'installation ou, de plus en plus, des questions d'environnement. On obtient des résultats utiles lorsque n est égal à 2.

Plus le nombre d'éléments dans le réseau est grand, plus l'efficacité spectrale du système augmente.

4.2 Systèmes DRF et systèmes DRT

En règle générale, les systèmes d'antennes adaptatives différencient et identifient les émetteurs en fonction des phases et des amplitudes relatives du signal d'un émetteur donné, pour les différents éléments du réseau. Cet ensemble de nombres complexes est appelé «signature spatiale» de l'émetteur. Sur la liaison montante, la signature est directement mesurée par la station de base qui élabore sa stratégie de traitement pour les signaux en liaison montante. Sur la liaison descendante

toutefois, faute d'informations supplémentaires concernant le canal de propagation de la station de base vers l'utilisateur, il faut procéder à une évaluation ou à une extrapolation de la signature. Etant donné que l'évaluation de la signature sur la liaison descendante est moins exacte que celle sur la liaison montante, la qualité de fonctionnement de l'antenne adaptative en liaison descendante a tendance à être moins bonne que celle en liaison montante. Il y a donc une différence très nette entre les systèmes DRF et DRT:

- En raison de l'espacement en fréquence entre la liaison montante et la liaison descendante, les systèmes DRF présentent des caractéristiques de propagation en liaison montante et en liaison descendante qui ne sont pas très bien corrélées à court terme, alors que dans les systèmes DRT on peut considérer qu'il y a une meilleure réciprocité entre les canaux en liaison montante et les canaux en liaison descendante. Normalement, les canaux sont espacés temporellement sur des périodes qui sont bien inférieures à la réciproque de la périodicité d'évanouissement.
- Indépendamment du phénomène de décorrélation mentionné ci-dessus, le fait que la fréquence de la liaison montante ne soit pas la même que celle de la fréquence descendante pour un système DRF introduit une plus grande complexité pour le réaménagement des fréquences et nécessite un étalonnage de l'équipement plus poussé pour faire correspondre les signatures en liaison montante et celles en liaison descendante.

Le résultat concret est que les améliorations de capacité et, dans une moindre mesure, de gain en liaison descendante apportées par l'utilisation d'antennes adaptatives dans les systèmes DRF sont moins importants en général que pour les systèmes DRT en raison du déséquilibre relatif plus grand entre la qualité de fonctionnement en liaison montante et celle en liaison descendante dans les systèmes DRF. Il convient toutefois de souligner que l'on peut obtenir des gains importants pour les systèmes DRF.

4.3 Aspects relatifs aux services

Le type de service à fournir a également des incidences sur le problème d'extrapolation en liaison descendante mentionné ci-dessus: dans un système à commutation de circuits, on observe une certaine continuité à court terme dans la façon dont les ressources du système sont utilisées. Il y a donc la même continuité dans l'environnement de brouillage et on observe une certaine corrélation entre les caractéristiques de brouillage sur la liaison montante et sur la liaison descendante. Les systèmes d'antennes adaptatives peuvent exploiter cette corrélation de l'environnement de brouillage pour effectuer le traitement en liaison descendante. Dans un système à commutation par paquets, où les environnements de brouillage en liaison montante et en liaison descendante peuvent être très différents et où les transmissions d'utilisateur sont des transmissions «par salves», la corrélation entre les environnements de brouillage en liaison montante et en liaison descendante peut être très différente.

Par conséquent, le comportement des techniques d'antennes adaptatives sera différent dans les systèmes de transmission de données par paquets et dans les systèmes vocaux à commutation de circuits.

4.4 Souplesse de conception

Les avantages des technologies d'antennes adaptatives varieront aussi selon qu'elles sont ajoutées à l'interface radioélectrique d'un système existant ou intégrées dès le départ dans la conception de l'interface radioélectrique.

4.5 Environnement de propagation

Les algorithmes utilisés avec les antennes adaptatives peuvent aussi aider à lutter contre certains des effets de la propagation par trajets multiples en tirant parti de la diversité spatiale; de fait, les antennes adaptatives atténuent les problèmes de propagation par trajets multiples même si la qualité de fonctionnement qu'il est possible d'atteindre dépendra, en dernier ressort, de la complexité de l'environnement radioélectrique.

Les diagrammes de réception (d'émission) générés par l'antenne réseau ont tendance à réduire la compensation de la propagation par trajets multiples qu'il faut appliquer au niveau des récepteurs de la station de base (ou du terminal), ce qui réduit la complexité de l'égalisation temporelle grâce à une «égalité spatiale». Cette propriété sera de plus en plus précieuse au fur et à mesure que les systèmes évoluent vers des débits de symboles plus élevés et des modulations d'ordre supérieur. Par ailleurs, ce processus d'égalisation spatiale réduit un peu le degré de liberté dont on dispose pour générer concrètement des diagrammes, ce qui peut nuire à la qualité des techniques de limitation des brouillages.

4.6 Techniques d'accès

Deux grandes techniques d'accès doivent être examinées: l'AMRC et l'accès multiple à répartition en fréquence (AMRF). Le choix de l'une ou l'autre peut avoir une influence sur la qualité de fonctionnement du système d'antennes adaptatives, toutes choses égales par ailleurs. Intuitivement, la technique AMRC est mieux indiquée pour lutter contre les brouillages et ceci doit être pris en compte dans la conception des algorithmes pour les antennes adaptatives. Toutefois, dans un système AMRC qui transmet plusieurs canaux en parallèle sur une plus grande largeur de bande, chaque signal d'utilisateur doit faire face à un nombre important de signaux brouilleurs que le système d'antenne ne peut pas, individuellement, réduire à zéro; par conséquent, une stratégie dynamique d'annulation des brouillages n'est pas viable en l'occurrence et il faut mettre en oeuvre d'autres critères de formation de faisceaux.

4.7 Autres considérations relatives aux systèmes

La mise en oeuvre des techniques d'antennes adaptatives fait intervenir beaucoup de considérations relatives aux systèmes et beaucoup de compromis. Indépendamment des points indiqués ci-dessus, les éléments suivants doivent aussi être examinés:

- les facteurs qui ont une incidence sur la décorrélation entre la signature sur la liaison descendante et la signature sur la liaison montante:
 - la longueur des trames dans les systèmes DRT;
 - la distance de duplexage et le temps de propagation sur la liaison montante/la liaison descendante dans les systèmes DRF;
 - la largeur de bande de modulation;
 - l'interaction avec les fonctions de commande de puissance;
 - la mobilité de l'utilisateur;
- les facteurs qui ont une incidence sur la complexité de l'algorithme:
 - les exigences en ce qui concerne la modulation et l'égalisation;
 - les exigences propres aux services (services à commutation de paquets ou services à commutation de circuits);
 - la conception des protocoles pour les systèmes par paquets;

- les facteurs qui ont une incidence sur les compromis d'efficacité:
 - l'utilisation d'autres techniques de limitation des brouillages;
 - la planification des fréquences et/ou la politique de réutilisation des fréquences;
 - les fonctions du système qui ne peuvent pas utiliser des canaux spatiaux:
 - les fonctions de radiodiffusion;
 - les fonctions de radiomessagerie.

Les systèmes d'antennes adaptatives auront une incidence à la fois sur le coût et la complexité des réseaux dans lesquels ils sont employés. L'analyse de coût doit tenir compte de l'incidence pour chaque station de base et au niveau de l'ensemble du réseau. Pour ce qui est de la complexité, il y a d'autres questions dont il faut tenir compte pour les réseaux existants.

4.7.1 Autres considérations

Un certain nombre d'autres avantages des technologies d'antennes adaptatives sont moins communément reconnus. Par exemple, la redistribution inévitable des éléments d'amplification de puissance RF pour les systèmes d'antennes adaptatives conduit habituellement à une baisse du coût de l'amplificateur par rapport aux technologies classiques. Du point de vue du déploiement du réseau, il est parfois intéressant d'utiliser des antennes adaptatives pour une partie seulement des stations de base de l'infrastructure globale dans une zone, et, de façon analogue, les avantages au niveau de la limitation des brouillages peuvent être particulièrement intéressants dans des cas comme les arrangements de coordination transfrontière.

Comme indiqué au § 2.2, l'étalement du temps de propagation peut-être un handicap important dans de nombreux systèmes cellulaires. On peut montrer théoriquement [3] que les antennes adaptatives permettent de supprimer l'étalement du temps de propagation sur $(M - 1)/2$ symboles ou d'annuler $(M - 1)$ signaux retardés pour n'importe quel retard. Mais il faut habituellement que la plus grande partie ou la totalité de la capacité de traitement ne soit pas utilisée pour compenser les distorsions temporelles au détriment du traitement spatial, de sorte que les égaliseurs temporels ont un rôle important à jouer et, en fonction de l'interface radioélectrique et de l'environnement, le traitement des signaux numériques (DSP, *digital signal processing*) peut être complexe, souvent avec plusieurs niveaux d'adaptation heuristique (voir également le § 7)

5 Améliorations apportées aux systèmes AMRC

5.1 Introduction

Le présent paragraphe décrit plusieurs des aspects les plus importants des systèmes AMRC en termes de capacité et de couverture ainsi que leur relation avec le nombre d'éléments d'antenne. On examine en outre l'utilisation de la diversité à l'émission qui permet d'améliorer à la fois les liaisons montantes et les liaisons descendantes, ainsi que les avantages supplémentaires qu'offrent les antennes adaptatives puisqu'elles limitent activement les brouillages sur la liaison descendante et suppriment activement les brouillages sur la liaison montante.

Deux interfaces radioélectriques pour systèmes cellulaires numériques sont examinées ici pour montrer qu'il est possible d'améliorer de façon significative la qualité de fonctionnement en utilisant des systèmes d'antennes adaptatives.

Le § 5.2 analyse les effets de premier ordre des antennes adaptatives sur la capacité et la couverture d'un réseau AMRC ANSI-95. Les résultats de cette analyse illustrent bien le niveau d'amélioration auquel on peut s'attendre lorsqu'on utilise des antennes adaptatives dans certains des réseaux cellulaires numériques décrits dans la Recommandation UIT-R M.1073.

5.2 Systèmes AMRC (ANSI-95)

5.2.1 Introduction

L'analyse qui suit concerne l'incidence de l'utilisation des antennes adaptatives sur la capacité et la couverture des réseaux AMRC. Elle s'applique à tous les réseaux AMRC existants et montre les effets généraux, de premier ordre.

L'analyse ne tient pas compte des effets de diversité. Les évanouissements observés sur les canaux vers chacune des antennes sont supposés être parfaitement corrélés. Dans un système réel, selon la configuration des antennes et l'environnement de propagation, il y a habituellement une certaine décorrélation entre les canaux des différentes antennes. Sur la liaison montante, cette décorrélation entre les canaux de réception permet d'obtenir une capacité et une couverture supplémentaires qui vont au-delà de ce qui est présenté ici. Sur la liaison descendante, la décorrélation entre les canaux d'émission peut être exploitée en conjuguant la diversité à l'émission à l'utilisation d'antennes adaptatives pour obtenir une capacité et une couverture supplémentaires qui vont au-delà de ce qui est présenté ici. Les antennes au niveau de la station de base peuvent être configurées de façon à maximiser les avantages qu'apportent les antennes adaptatives ainsi que la diversité à la réception et à l'émission.

Bien plus, l'analyse ne tient pas compte de l'incidence de la suppression active des brouilleurs sur la liaison montante et de la limitation active des brouilleurs sur la liaison descendante. Cela augmentera aussi la capacité et la couverture, en particulier lorsqu'il y a dans le réseau des utilisateurs à débit de données élevé.

5.2.2 Capacité et couverture sur la liaison montante

Comme point de départ pour l'analyse de la capacité et de la couverture sur la liaison montante, on peut utiliser la formule suivante pour exprimer le rapport énergie binaire reçue/densité spectrale de puissance du bruit thermique+brouillage E_b/I_0 [4]:

$$\frac{E_b}{I_0} = MG \frac{S}{FN_{th}W + \alpha(1 + \beta)(N - 1)S} \quad (1)$$

où:

E_b : énergie binaire

I_0 : densité spectrale de puissance du bruit thermique+brouillage

F : facteur de bruit de la station de base

N_{th} : densité spectrale de puissance du bruit thermique

S : intensité du signal reçu par antenne

G : gain de traitement

α : facteur d'activité vocale

β : facteur de brouillage intracellulaire

N : nombre d'utilisateurs dans la cellule

W : largeur de bande du système

M : nombre d'antennes.

On peut utiliser l'équation (1) pour exprimer la capacité de la cellule:

$$N = N_{pole} - \frac{FN_{th}W}{\alpha(1 + \beta)S} \quad (2)$$

où N_{pole} est la *capacité polaire* définie par:

$$N_{pole} = \frac{MG}{\alpha d(1 + \beta)} + 1 \quad (3)$$

et où d est le rapport E_b/I_0 requis. On notera que la capacité polaire est proportionnelle au nombre d'antennes. La capacité polaire est égale à la capacité maximale théorique si les mobiles ont une puissance d'émission infinie à disposition, c'est-à-dire la capacité dans la limite où la couverture n'est plus un problème et seul le brouillage limite la capacité. Dans la pratique, les mobiles n'ont pas de puissance infinie. La capacité pratique est donc généralement une fraction de la capacité polaire. Les valeurs types sont comprises entre 50 et 60% de la capacité polaire [4]. Selon que l'on est plus ou moins proche de la capacité polaire pendant l'exploitation, la puissance du signal reçu requise par antenne, S , variera. A partir de l'équation (2) on peut exprimer l'énergie du signal reçu requise par antenne comme suit:

$$S = \frac{FN_{th}W}{N_{pole} \alpha(1 + \beta)(1 - N/N_{pole})} \quad (4)$$

Dans l'hypothèse où les stations d'utilisateur ont une puissance limitée, P_t , et dans l'hypothèse d'un affaiblissement sur le trajet avec un exposant de γ , on peut exprimer le rayon de la cellule, R' , comme suit:

$$R' = r_0 \left(\frac{P_t}{S} \right)^{1/\gamma} \quad (5)$$

où r_0 est une constante. La superficie A de la cellule étant proportionnelle au carré de son rayon, avec les équations (4) et (5) on peut calculer la relation:

$$A^{-\gamma/2} = k \frac{1}{N_{pole} - N} \quad (6)$$

où k est une constante. Si par approximation on suppose que N_{pole} est proportionnel à M (c'est-à-dire qu'on fait abstraction de «1» dans l'équation (3)), dans l'hypothèse d'une capacité polaire nominale de 1 lorsque $M = 1$ et en intégrant la constante k dans une zone de couverture normalisée, on peut réécrire l'équation (6) comme suit:

$$A^{-\gamma/2} = \frac{1}{M - N} \quad (7)$$

On peut maintenant exprimer la capacité normalisée sur la liaison montante, N , en fonction de la zone de couverture normalisée, du nombre d'antennes au niveau de la station de base et de l'exposant de l'affaiblissement sur le trajet:

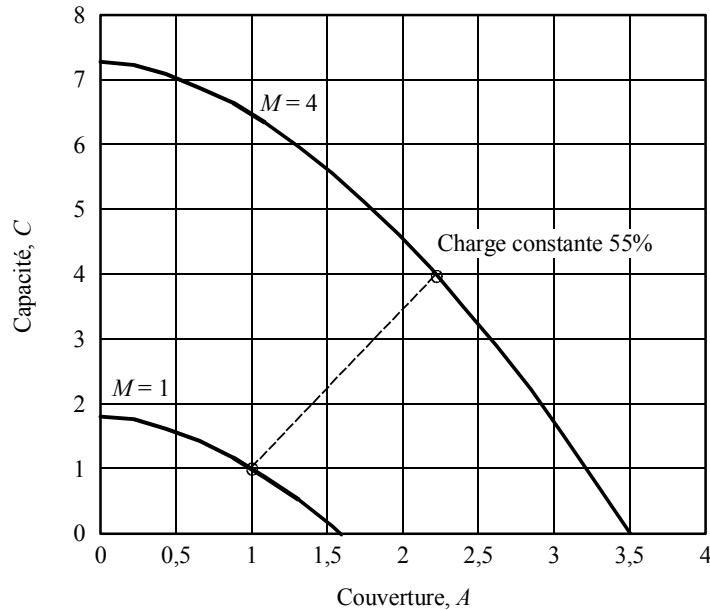
$$N = M - A^{\gamma/2} \quad (8)$$

Pour un nombre donné d'antennes et un exposant donné de l'affaiblissement sur le trajet, il y a donc un compromis entre la couverture et la capacité. La Fig. 6 donne une courbe de ces compromis pour 1 et 4 antennes avec un exposant de 3,5 pour l'affaiblissement sur le trajet.

La courbe $M = 1$ représente le compromis capacité-couverture lorsqu'on utilise une seule antenne et la courbe $M = 4$ représente le compromis capacité-couverture lorsqu'une antenne adaptative à quatre éléments effectue une formation de faisceaux sans zéros. Les points où la charge est égale à 55% de la capacité maximale (capacité polaire) sont également illustrés. Avec l'antenne adaptative, tout en conservant la même charge relative, on augmente simultanément la capacité d'un facteur de 4 et la couverture d'un facteur de 2,2.

FIGURE 6

Compromis capacité-couverture pour une antenne et pour quatre antennes.
Exposant de l'affaiblissement sur le trajet $\gamma = 3,5$



Rap 2040-06

Comme indiqué plus haut, un système AMRC fonctionne normalement à une certaine fraction de sa capacité maximale (la capacité polaire). La Fig. 6 illustre comment la capacité et la couverture augmentent lorsque la charge minimale est maintenue constante si l'on passe d'une station de base à une seule antenne à une station de base à plusieurs antennes. Dans la Fig. 6, les deux axes sont perpendiculaires de sorte que les facteurs d'amélioration de la capacité et les facteurs d'amélioration de la couverture sont exprimés en fonction l'un de l'autre pour une antenne-réseau à un seul élément et pour une antenne-réseau à quatre éléments ($M = 1, 4$ respectivement). Avec une charge minimale constante et dans hypothèse où la capacité polaire est proportionnelle au nombre d'antennes, l'augmentation de la capacité s'exprime comme suit:

$$\text{Gain de capacité pour une charge constante} = M \quad (9)$$

Pour voir comment la zone de couverture augmente, on peut diviser l'équation (8) par M , introduire le facteur de charge par antenne $\mu = N/M$ et réécrire l'équation comme suit:

$$A = (1 - \mu)^{2/\gamma} M^{2/\gamma}$$

Si μ reste constante, le gain de zone de couverture pour une charge constante est donné par:

$$\text{Gain de zone de couverture pour une charge constante} = M^{2/\gamma} \quad (10)$$

On peut donc réaliser simultanément un gain de capacité sur la liaison montante et un gain de zone de couverture sur la liaison montante dans les équations (9) et (10), comme illustré à la Fig. 6.

5.2.3 Capacité et couverture sur la liaison descendante

Il faut procéder à une analyse légèrement différente pour évaluer l'incidence de l'utilisation d'antennes adaptatives sur la capacité en liaison descendante.

Supposons que l'on peut exprimer un rapport moyen SINR pour la station d'utilisateur comme suit:

$$SINR_{avg} = \frac{P_{delivered, avg}}{N_{thermal} + P_{base}(1 - \eta_{avg})(1 + \beta_{avg})\rho_{avg}} \quad (11)$$

où:

- $P_{delivered, avg}$: puissance moyenne fournie à la station d'utilisateur
- $N_{thermal}$: puissance de bruit thermique
- P_{base} : puissance totale émise par la station de base
- η_{avg} : facteur d'orthogonalité moyen
- β_{avg} : rapport moyen brouillage intercellulaire/brouillage intracellulaire
- ρ_{avg} : affaiblissement moyen sur le trajet pour le brouillage.

On peut modéliser davantage la puissance moyenne fournie à la station d'utilisateur:

$$P_{delivered, avg} = k \frac{P_{base}}{MN} M^2 R^{-\gamma} = k \frac{P_{base}}{N} M R^{-\gamma} \quad (12)$$

Nous avons divisé ici la puissance disponible totale au niveau des stations de base entre les N utilisateurs et les M antennes, puis nous l'avons multipliée par le gain cohérent de combinaison de puissance qui est potentiellement M^2 (voir les facteurs de mise en oeuvre au § 9.2) puis par le facteur d'affaiblissement sur le trajet $R^{-\gamma}$, R étant le rayon de la cellule et γ étant un exposant de l'affaiblissement sur le trajet. La constante k doit être normalisée.

Parmi les variables utilisées dans le dénominateur de l'équation (11), la seule qui dépend du rayon de la cellule est l'affaiblissement moyen sur le trajet pour le brouillage, ρ_{avg} , qu'il est possible de normaliser comme suit:

$$\rho_{avg} = \rho_0 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma} \quad (13)$$

où ρ_0 et R_0 sont des constantes. A l'aide des équations (12) et (13) on peut réécrire l'équation (11) comme suit:

$$SINR_{avg} = \frac{kR_0^{-\gamma} P_{base} M R^{-\gamma} / N}{R^{-\gamma} N_{thermal} + P_{base}(1 - \eta_{avg})(1 + \beta_{avg})\rho_0 R^{-\gamma}} \quad (14)$$

Par exemple, en utilisant l'équation (14) on peut faire les observations suivantes:

Si l'on augmente le nombre d'antennes au niveau des stations de base d'un facteur M , si la puissance totale des stations de base est maintenue constante et si le rayon de la cellule est maintenu constant, on peut alors augmenter le nombre d'utilisateurs d'un facteur M (on suppose une formation de faisceaux parfaite sur la liaison descendante. En réalité, le facteur M est quelque peu réduit en raison de l'imperfection de la formation de faisceaux sur la liaison descendante.) Lorsqu'on a augmenté le nombre d'utilisateurs par station de base, on ne peut pas augmenter le rayon des cellules. Cela diminuerait le rapport S/I au niveau des stations d'utilisateur.

Toutefois, si on augmente le nombre d'antennes au niveau des stations de base d'un facteur M , si la puissance totale des stations de base est maintenue constante et si le nombre d'utilisateurs est constant, on peut augmenter le rayon des cellules d'au moins un facteur $M^{1/\gamma}$. Ce rayon peut en fait être augmenté davantage si le brouillage au niveau du dénominateur est réduit.

Si on augmente le nombre d'antennes d'un facteur M et si on augmente la puissance totale de la station de base d'un facteur M (c'est-à-dire si on garde le même nombre d'amplificateurs de puissance), on peut alors simultanément augmenter le nombre d'utilisateurs d'un facteur M et le rayon des cellules d'un facteur $M^{1/\gamma}$.

Les gains de couverture sur la liaison descendante sont bien sûr donnés par le carré des gains du rayon des cellules.

Il s'agit ici de montrer combien les relations importantes entre les ensembles de paramètres et les observations au § 9.2 concernant les facteurs de mise en oeuvre sont utiles. Dans la pratique, les avantages des antennes adaptatives peuvent être concrétisés dans différentes permutations de ces exemples simples, parfois dans des stations de base différentes déployées dans la même zone.

5.2.4 Résumé des résultats pour les systèmes AMRC

On peut résumer comme suit les incidences de l'utilisation d'antennes adaptatives sur la capacité et la couverture d'un système AMRC:

- si l'on augmente le nombre d'antennes sur la liaison montante d'un facteur M , alors la capacité et la zone de couverture sur la liaison montante augmentent respectivement d'un facteur M et $M^{2/\gamma}$. On obtient ces gains simultanément.
- si l'on augmente le nombre d'antennes sur la liaison descendante d'un facteur M et si la puissance totale des stations de base est maintenue constante, alors on peut augmenter la capacité sur la liaison descendante d'un facteur proportionnel à M (la valeur de M étant diminuée en raison de l'imperfection de la formation des faisceaux en liaison descendante) ou on peut augmenter la zone de couverture sur la liaison descendante d'un facteur légèrement supérieur à $M^{2/\gamma}$ (la valeur de M étant diminuée en raison de l'imperfection de la formation des faisceaux en liaison descendante).
- si l'on augmente le nombre d'antennes sur la liaison descendante d'un facteur M et si on augmente la puissance totale des stations de base d'un facteur M (c'est-à-dire que l'on conserve la même puissance dans les amplificateurs de puissance), alors on peut simultanément augmenter la capacité sur la liaison descendante d'un facteur proportionnel à M (la valeur de M étant diminuée en raison de l'imperfection de la formation des faisceaux en liaison descendante) et augmenter la zone de couverture sur la liaison descendante d'un facteur proportionnel à $M^{2/\gamma}$ (la valeur de M étant diminuée en raison de l'imperfection de la formation des faisceaux en liaison descendante).

Même si cela n'est pas analysé ici, on peut montrer que des systèmes AMRT (GSM et ANSI-136 par exemple) améliorent leurs performances lorsqu'on utilise des antennes adaptatives.

6 Diversité à l'émission, traitement des brouillages

Les effets sur la couverture et sur la capacité dont on vient de parler ne tiennent pas compte des avantages supplémentaires qu'apporte la diversité. Sur la liaison montante, la décorrélation entre les canaux de réception se traduit par une plus grande capacité et une plus grande couverture en liaison montante. Sur la liaison descendante, la décorrélation entre les canaux d'émission peut, si

l'utilisation d'antennes adaptatives est conjuguée à la diversité à l'émission, améliorer la capacité et la couverture sur la liaison descendante. Les antennes au niveau des stations de base peuvent être configurées de façon à maximiser les avantages qu'apportent l'utilisation d'antennes adaptatives et la diversité à l'émission et à la réception.

Les effets sur la couverture et sur la capacité ne tiennent pas non plus compte de la suppression active des brouilleurs sur la liaison montante et de la limitation active des brouilleurs sur la liaison descendante. Cela augmentera également la capacité et la couverture, en particulier lorsqu'il y a dans le réseau des utilisateurs à haut débit de données.

7 Duplexage et algorithmes

Seuls les systèmes DRT peuvent utiliser une fréquence non appariée ou «dépareillée» et les incidences en soi sont très intéressantes tant que le poids des antennes est déterminé et mis à jour suffisamment rapidement et que la station ne se déplace pas excessivement rapidement, étant donné que la liaison montante et la liaison descendante utilisent les mêmes canaux de fréquence. Les dispositions de fréquences DRT sont généralement plus universelles et on prévoit que dans l'avenir on utilisera davantage les systèmes DRT pour tirer parti de la plus grande affinité des systèmes d'antennes adaptatives avec ces systèmes et aussi pour tenir compte du fait qu'on peut ainsi mieux gérer l'asymétrie de trafic.

Il existe de nombreux algorithmes pour mettre en oeuvre les antennes adaptatives et les progrès récents réalisés dans les technologies de traitement numérique du signal ont permis d'adopter diverses méthodes pour le problème des vecteurs propres. Dans les systèmes plus sophistiqués aujourd'hui commercialisés, les algorithmes eux-mêmes sont corrigés automatiquement avec le temps, c'est-à-dire qu'ils apprennent et qu'ils s'adaptent plus ou moins [5].

8 Applications des stations

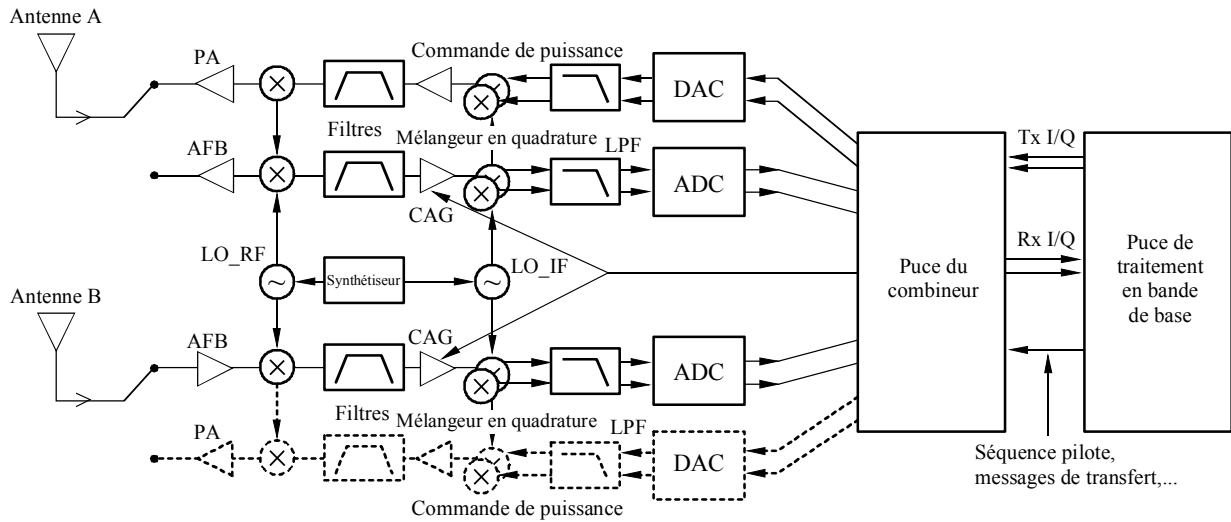
Beaucoup des stations d'utilisateur visées sont plus volumineuses que les combinés ordinaires conçus essentiellement pour des applications vocales ou des applications de données limitées. Par exemple, beaucoup de stations seront des ordinateurs portables ou des assistants numériques personnels et il est donc plus facile d'y intégrer des antennes multiples. Toutefois, il est possible avec des stations relativement petites d'assurer une séparation électromagnétique suffisante et/ou une décorrélation de polarisation permettant de réaliser ces modèles. Un problème de conception majeur est d'intégrer les contraintes supplémentaires RF et de commande pour un coût sensiblement plus bas que celui requis pour la station de base. Le présent paragraphe décrit la solution technologique générique d'un fournisseur appliquée aux stations, à savoir les stations intelligentes.

Les composantes matérielles supplémentaires sont notamment les suivantes: antennes, chaîne du récepteur, technologie des stations intelligentes. Mise en oeuvre uniquement pendant l'appel et/ou lorsqu'il y a une dégradation importante de la qualité de la communication (FER inférieur), l'adjonction d'une autre chaîne de réception augmente la consommation totale de puissance de la station de 2 à 3% seulement. La consommation de puissance du jeu de puces supplémentaires est négligeable. On a obtenu de bons résultats avec un espacement de $0,2 \lambda$ (à 1,9 GHz) entre deux antennes alignées. Ces résultats peuvent être améliorés si l'on utilise différents types et/ou différentes polarisations pour les antennes.

La Fig. 7 donne un exemple de système AMRC utilisant cette approche. Dans ce cas, l'intégration de la station intelligente n'a pas d'incidence sur la messagerie des protocoles et il n'est pas nécessaire de modifier les normes en vigueur. La configuration simple décrite ici ne devrait pas être considérée comme la seule solution possible.

FIGURE 7

Exemple de combiné pour systèmes AMRC



- ADC: convertisseur analogique/numérique (*analogue to digital converter*)
 AFB: amplificateur à faible bruit
 CAG: commande automatique de gain
 DAC: convertisseur numérique/analogique (*digital to analogue converter*)
 LO-IF: oscillateur local – FI
 LO-RF: oscillateur local – RF
 LPF: filtre passe-bas (*low-pass filter*)
 PA: amplificateur de puissance (*power amplifier*)

Rap 2040-07

Le jeu de puces doit avoir accès à certaines informations provenant de la puce en bande de base: code pilote, message de transfert, indication du type de salves, etc. En principe n'importe quel type d'interface radioélectrique actuelle peut être accepté mais il peut être souhaitable d'apporter des modifications ou des améliorations mineures au logiciel, aux jeux de puces pour une meilleure intégration globale des stations intelligentes.

Cette méthode pourrait être mise en oeuvre côté réception et côté émission, ce qui augmente le débit de données sur la liaison montante et améliore la durée de vie de la batterie.

9 Efficacité spectrale et déploiement

9.1 Gains d'efficacité spectrale et de capacité

Globalement, l'efficacité spectrale exprimée en bit/s/Hz/cellule peut être multipliée par 15 dans des systèmes en exploitation si on utilise des antennes adaptatives. A l'échelle mondiale, plus de 0,1 million de stations de base utilisant des antennes adaptatives ont déjà été mises en oeuvre pour des systèmes mobiles cellulaires hertziens de Terre. Des systèmes d'antennes adaptatives peuvent aussi être utilisés pour des applications fixes, par exemple l'accès hertzien fixe (AHF). Il est courant que des systèmes AHF utilisent des technologies mobiles et même lorsque ces systèmes sont exploités sur des fréquences qui ont été attribuées au service fixe, il est très important de tenir compte des cas où il n'y a pas de visibilité directe.

Pour ce qui est des estimations de la zone de couverture lors des procédures de planification des cellules RF, il convient de remarquer que, dans ce contexte, c'est l'enveloppe (la somme) des diagrammes d'antennes actives du secteur/de la cellule qui est utilisée et non une partie. Il est très efficace pour les bilans de liaison RF de faire en sorte que les liaisons montantes et les liaisons descendantes soient équilibrées et, pour cela, il est bien sûr nécessaire de tenir dûment compte des valeurs appropriées du gain de diversité et du gain de traitement spatial dont on a parlé plus haut et pas uniquement des gains passifs des antennes pour chaque liaison.

Au niveau international, les activités de normalisation n'ont presque pas tenu compte de l'utilisation facultative ou non d'antennes adaptatives mais cette situation devrait changer rapidement dans l'avenir proche étant donné que les antennes adaptatives semblent être une solution viable pour régler les problèmes importants de pénurie de spectre pour les services mobiles. Des techniques comme la sélection dynamique des fréquences ou la commande de puissance, différents schémas de modulation (multiplexage par répartition en fréquence orthogonale), les systèmes de radio-communication définis par logiciel² et différentes architectures de systèmes sont utiles mais les antennes adaptatives peuvent avoir des incidences beaucoup plus importantes sur l'utilisation de l'ensemble du spectre, comme indiqué dans le Tableau suivant:

Système	Gain de capacité
PHS	2× à 15×
GSM/GPRS/EDGE	2× à 6×
AMRC/IS-95	2× à 8×
AMRC-LB	2× à 8×

La colonne de droite montre le gain de capacité fournie dans le même spectre que celui spécifié dans la norme correspondante. Comme on l'a déjà dit, dans la plupart des cas, il est possible d'intégrer des antennes adaptatives dans les systèmes sans qu'il soit nécessaire de modifier la norme. Toutefois, en particulier pour les systèmes plus complexes, il peut être intéressant d'envisager l'intégration, totale ou partielle, d'une telle technologie dès le début, dans le processus de normalisation.

9.2 Facteurs de mise en oeuvre

En général, les gains effectifs de capacité et d'autres avantages dépendent de la nature des algorithmes précis qui sont utilisés ainsi que d'autres facteurs comme le nombre d'éléments d'antenne, l'espacement entre les éléments et/ou l'orientation, l'utilisation de faisceaux totalement adaptatifs ou de faisceaux commutés, la charge, le degré de concentration et la disposition relative des utilisateurs dans la zone (intercellulaire et intracellulaire), le fouillis, la propagation par trajets multiples, la vitesse de déplacement des utilisateurs, l'utilisation de systèmes DRT ou DRF, pour les systèmes DRF l'espacement en fréquence duplex, les modalités détaillées de la mise en oeuvre du DSP, l'utilisation d'algorithmes préalablement définis fixes, ou une certaine liberté pour les affiner, voir également le § 4.7.

² De nombreux modèles d'antennes adaptatives utilisent déjà aujourd'hui des systèmes de radiocommunication définis par logiciel.

Il faut bien comprendre que, pour les raisons données, il n'est pas possible de fixer des points de comparaison ou des critères relatifs étant donné qu'il y a beaucoup de variables. L'objet des chiffres donnés dans le Tableau est simplement d'illustrer le fait que les incidences de l'utilisation d'antennes adaptatives peuvent, dans certains cas, être importantes. Dans les cas les plus intéressants, les chiffres concernant la réutilisation des fréquences peuvent être aussi bas que 1/3, et lorsque ces chiffres sont des fractions, on utilise les termes de «cellule personnelle» ou de «domaine spatial» pour décrire cette idée de degré de sélectivité spatiale.

10 Exemple de coexistence (systèmes DRT/systèmes DRF)

L'effet direct de l'utilisation d'antennes adaptatives sur la coexistence est dû au fait que l'énergie RF rayonnée par les émetteurs est dirigée vers des zones spécifiques de la cellule et n'est pas constante dans le temps. Cette caractéristique joue un rôle essentiel pour déterminer la probabilité de brouillage dans les scénarios de coexistence. Dans l'absolu, le cas le plus défavorable peut sembler prohibitif mais le facteur statistique introduit par l'utilisation d'antennes adaptatives détermine le pourcentage de temps pendant lequel se produit le cas le plus défavorable. Si ce pourcentage est suffisamment bas, les règles de coexistence pourront être assouplies, ce qui facilite un déploiement dans des conditions économiques. Dans l'exemple décrit ici on suppose que seules les stations de base DRT utilisent des antennes adaptatives.

10.1 Méthodologie

Les scénarios de brouillage suivants pour la coexistence des systèmes DRF et DRT devraient être examinés.

Analyse déterministe:

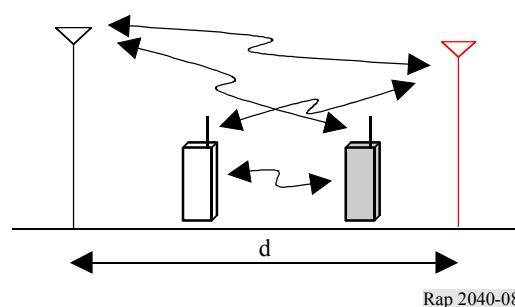
- 1 Station de base DRF <-> station de base DRT
- 2 Equipement d'utilisateur DRT <-> équipement d'utilisateur DRF

Simulation de Monte-Carlo:

- 3 Equipement d'utilisateur DRT <-> station de base DRF
- 4 Equipement d'utilisateur DRF <-> station de base DRT
- 5 Equipement d'utilisateur DRT <-> équipement d'utilisateur DRF

Les scénarios sont également décrits à la Fig. 8. Le présent Rapport ne concerne que le scénario station de base-station de base (BS-BS) et ne tient pas compte des effets de la propagation par trajets multiples.

FIGURE 8
Scénarios de coexistence



Les analyses dont il est fait état dans le présent Rapport concernent essentiellement des macrocellules BS-BS dans les zones rurales et dans les zones urbaines, étant donné que des analyses précédentes ont fait apparaître que les brouillages entre macrostations de base DRT et macrostations de base DRF étaient les plus problématiques. Les résultats peuvent toutefois s'appliquer facilement aux microcellules et aux picocellules mettant à contribution des stations de base et des équipements d'utilisateur.

Les effets du canal adjacent sont pris en considération en utilisant le rapport du brouillage dans le canal adjacent (ACIR, *adjacent channel interference ratio*).

$$ACIR = 10 \log \left[\frac{1}{\frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS}} \right] \quad \text{dB}$$

où:

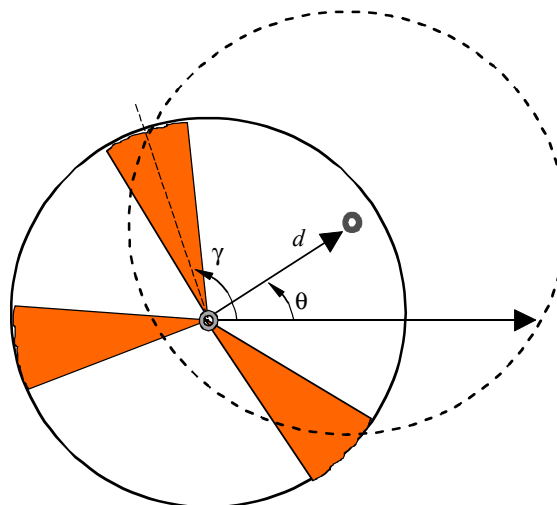
ACLR: rapport de fuite en puissance sur le canal adjacent (*adjacent channel leakage power ratio*)

ACS: sélectivité par rapport au canal adjacent (*adjacent channel selectivity*).

10.1.1 Analyse statistique

Comme cela a été dit plus haut, la mise en oeuvre de la technologie des antennes adaptatives au niveau de la station de base nécessite une analyse statistique. Par conséquent, le scénario 1 est traité à l'aide de la simulation de Monte-Carlo. La simulation statistique de la technologie des antennes adaptatives se fait à l'aide d'un instantané dans le temps. La structure de base pour la simulation dans le plan horizontal est illustrée à la Fig. 9.

FIGURE 9
Structure de base pour la simulation – plan horizontal

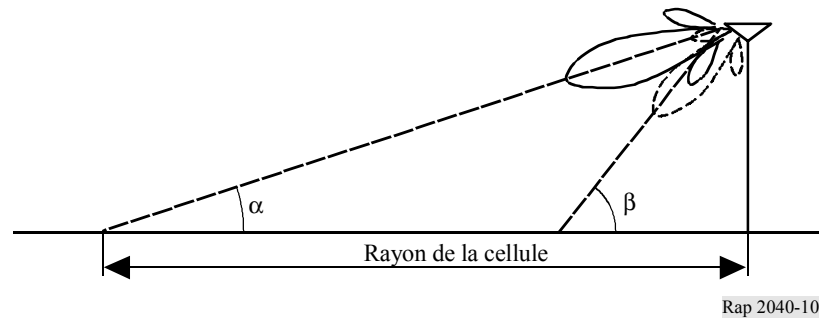


On suppose que pendant un intervalle de temps donné sur une porteuse quelconque, un faisceau au niveau de la station de base DRT équipée d'antennes adaptatives illumine chaque secteur, ce qui affecte la station de base ou l'équipement d'utilisateur DRF brouillé, ou vice versa. La distance entre les deux stations de base est fixée de façon à être plus courte que le plus grand des deux rayons. On suppose que les stations de base DRT ayant des antennes adaptatives sont situées en des points aléatoires dans la zone de la cellule DRF, ce qui fait que la distance d et l'angle θ par rapport à la station de base DRF sont aléatoires. On suppose aussi que les équipements d'utilisateur sont répartis uniformément dans la zone de la cellule. Dans la Fig. 9, γ est le décalage angulaire du faisceau principal de l'antenne adaptative par rapport à la même direction de référence que celle de l'angle θ .

Dans le plan vertical, on suppose que les faisceaux de l'antenne adaptative sont répartis dans une zone angulaire située entre α et β , comme indiqué à la Fig. 10. α est déterminé par le rayon de la cellule et la hauteur de l'émetteur et on suppose que β est égal à 45° . On suppose que l'ouverture du faisceau dans le plan vertical et le plan horizontal des antennes adaptatives est égale à 10° .

FIGURE 10

Structure de base pour la simulation – plan vertical



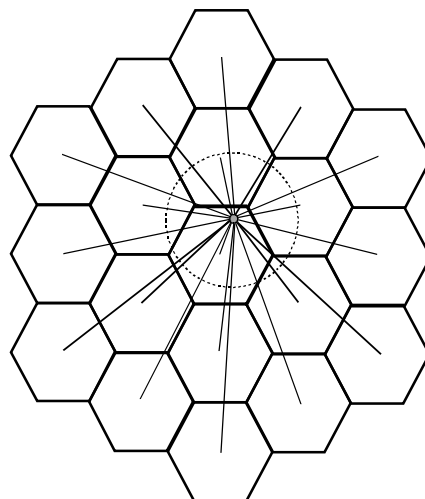
Rap 2040-10

10.1.2 Réseau de cellules

Pour démontrer l'incidence de l'utilisation d'antennes adaptatives sur la coexistence, on a examiné un réseau de 19 cellules. La Fig. 11 décrit le réseau de 19 cellules qui sont structurées autour d'une station brouilleuse.

FIGURE 11

Réseau de 19 cellules brouilleuses



Rap 2040-11

La densité des stations de base est basée sur [6]: on a pris pour hypothèse un rayon de cellule de 4 km pour les zones rurales et les macrocellules et de 1,5 km pour les zones urbaines et les macrocellules. On a également effectué des simulations comparatives avec des rayons de cellule compris entre 500 m et 9 km. On considère que la contribution des brouilleurs au-delà du 19ème brouilleur le plus proche est négligeable. On observe la probabilité de brouillage en supposant que la victime est protégée pendant au moins 95% du temps (seuil de brouillage de 5%).

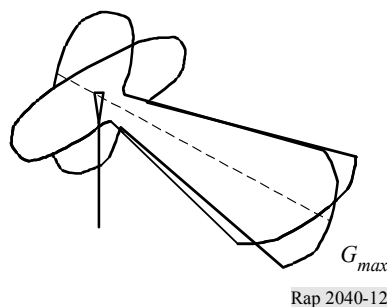
10.1.3 Commande de puissance

Dans tous les cas, on tient compte des effets d'une commande de puissance parfaite sur la liaison descendante et sur la liaison montante. Sur la liaison descendante, on abaisse la puissance d'émission du faisceau de la station de base DRT au fur et à mesure que l'utilisateur se rapproche de la station de base pour tirer parti de l'affaiblissement moins important sur le trajet. Dans le cas de simulations faisant intervenir un réseau DRF de cellules, on a pris pour hypothèse des valeurs aléatoires situées dans la gamme dynamique de la commande de puissance de la station de base DRF, comme indiqué dans [6]. Sur la liaison montante, on met en oeuvre la commande de puissance en abaissant la puissance d'émission de l'équipement d'utilisateur au fur et à mesure que l'utilisateur se rapproche de la station de base.

10.1.4 Gain de l'antenne de la station de base

Dans tous les documents, on considère que les stations de base DRF ont un gain maximum de 15 dBi, avec une certaine inclinaison vers le bas de façon que le gain en direction de l'horizon soit réduit de 3 dB. Pour les stations de base DRT qui utilisent des antennes adaptatives, chaque faisceau est modelé dans le plan E et dans le plan H, conformément à la Fig. 12.

FIGURE 12
Sections transversales dans le plan E et dans le plan H
du faisceau de l'antenne adaptative



10.1.5 Formation de faisceaux des équipements d'utilisateur

Les fonctions de formation de faisceaux permettent de réduire le brouillage causé ou subi par d'autres stations. Des études récentes [7], [8] montrent qu'avec deux positions d'antennes au niveau de l'équipement d'utilisateur il est possible de créer des faisceaux de 90° avec un gain d'environ 5,5 dBi et un rapport avant/arrière de 10 dB. Le rapport E_c/I_0 est sensiblement amélioré si l'objectif est d'améliorer le bilan de liaison (couverture). On a mesuré une amélioration allant jusqu'à 7 dB pour E_c et jusqu'à 2,5 dB pour l'indicateur de l'intensité du signal reçu grâce à la formation de faisceaux [7].

10.2 Résultats

10.2.1 Station de base DRT -> station de base DRF

Les valeurs correspondantes de ACLR et de ACS pour un espacement des canaux de 5 MHz sont utilisées pour les brouillages causés par une station de base DRT à une station de base DRF et vice versa. On a déterminé que si un seuil de brouillage acceptable compris entre -106 dBm et -114 dBm (zones rurales) est respecté pendant 95% du temps au moins, l'utilisation d'antennes adaptatives au niveau de la station de base permet de réduire de façon significative la distance de coexistence qui passe de 9,5 km à 3-5 km.

10.2.2 Station de base DRF -> station de base DRT

En utilisant le critère de protection contre les brouillages, on peut assurer une coexistence pendant au moins 90% du temps dans les cellules urbaines et dans les cellules rurales.

10.2.3 Résumé du cas BS-BS

Le Tableau ci-après résume les chiffres de brouillage pour le scénario macrostation de base-macrostation de base. Il est évident que l'utilisation d'antennes adaptatives permet de réduire l'isolement supplémentaire nécessaire. Ce Tableau indique l'isolement supplémentaire nécessaire pendant au moins 2% du temps dans les zones rurales et les zones urbaines, en utilisant un modèle de propagation à double pente. L'isolement supplémentaire, s'il est nécessaire, peut être facilement obtenu si l'on utilise des techniques de coexistence conviviales.

Brouillage macrostation de base-macrostation de base

Scénario	Puissance brouilleuse totale, seuil de 2% (dBm) pour les zones rurales ⁽¹⁾	Isolement supplémentaire nécessaire pendant moins de 2% du temps (dB) pour les zones rurales ⁽²⁾	Puissance brouilleuse totale, seuil de 2% (dBm) pour les zones urbaines ⁽¹⁾	Isolement supplémentaire nécessaire pendant moins de 2% du temps (dB) pour les zones urbaines ⁽³⁾
BS DRT à BS DRF	-101	5 à 13	-86	9 à 14
BS DRF à BS DRT	-88	18 à 26	-81	14 à 19

⁽¹⁾ Dans l'hypothèse d'un modèle de propagation à double pente.

⁽²⁾ Dans l'hypothèse où le niveau de brouillage maximal toléré est compris entre -114 et -106 dBm.

⁽³⁾ Dans l'hypothèse où le niveau de brouillage maximal toléré est compris entre -100 et -95 dBm.

10.3 Conclusions de l'analyse de coexistence

Cet exemple de mise en oeuvre montre qu'il est possible de réduire de façon significative le brouillage entre BS-BS en utilisant des antennes adaptatives, de sorte que des cas de coexistence autrement impossibles deviennent possibles. L'isolement supplémentaire, s'il est nécessaire, est obtenu à l'aide de techniques de coexistence conviviales.

11 Résumé général

Le présent Rapport a permis de décrire un grand nombre des aspects les plus importants de l'utilisation d'antennes adaptatives dans les systèmes cellulaires et de donner des exemples, en particulier:

- il a donné un modèle et une analyse permettant d'évaluer la capacité ou l'efficacité spectrale maximale d'une cellule en fonction du facteur de réutilisation des fréquences dans le réseau;
- il a permis d'illustrer les améliorations importantes qu'il est possible d'apporter en termes de couverture, de limitation des brouillages et d'efficacité spectrale globale;
- il a décrit plusieurs types d'antennes adaptatives et a montré que le facteur de réutilisation des fréquences peut être inférieur à l'unité;
- il a décrit comment ces techniques sont aujourd'hui utilisées dans les stations d'utilisateur ainsi que dans les stations de base;
- il a indiqué les avantages des systèmes DRT par rapport aux systèmes DRF en termes d'efficacité spectrale;
- il a montré les avantages possibles pour minimiser, voire éliminer les problèmes de coordination transfrontière;
- il a permis de constater que les normes en vigueur peuvent être utilisées sans modification et qu'il est possible de déployer de telles stations dans des scénarios de déploiement classiques plus importants.

12 Références bibliographiques

Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive d'ouvrages de référence mais plutôt d'un certain nombre d'ouvrages qui ont été retenus pour leur pertinence.

- [1] WINTERS, J. H. [février 1998] Smart antennas for wireless systems. *IEEE Personal Comm.* p. 23-7.
- [2] ETSI TS 25 104 V4.2.0 (2001-9).
- [3] RAPPAPORT, T. S. [1996] *Wireless Communications*. Prentice Hall.
- [4] KIM, K. et autres [2000] *Handbook of CDMA system design, engineering and optimization*. Prentice Hall.
- [5] TSOULOS, G. (éd.) [2001] *Adaptive antennas for wireless communications*. IEEE Press (this is an extensive, annotated collection of reprints).
- [6] ERICSSON, M. et autres [septembre 2001] Capacity study for fixed multi-beam antenna systems in a mixed service WCDMA system. PIMRC 2001, International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, San Diego, Etats-Unis d'Amérique.
- [7] EL ZOOGHBY, A. [octobre 2001] Potentials of smart antennas in CDMA systems and uplink improvements. *IEEE Ant. & Prop.*, Vol. 43, 5.
- [8] GORANSSON, B. et autres [septembre 2000] Advanced antenna systems for WCDMA: Link and system level results. PIMRC 2000, International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication, Londres, Royaume-Uni.

Bibliographie

Array Comm. [18-19 octobre 2001] Antennes adaptatives et évolution des systèmes IMT-2000 et des systèmes complémentaires. 3GPP Future Evolution Workshop, Helsinki, Finlande.

BRANKA, V. et JINHONG, Y. [avril 2003] *Space-Time Coding*. John Wiley & Sons Ltd.

International Engineering Consortium, On-line Smart Antenna Tutorial,
http://www.iec.org/online/tutorials/smart_ant/.

JANANASWAMY, R. [2001] Radiowave propagation and smart antennas for wireless communications. Kluwer Academic Pub.

LAIHO, J. et autres [2002] *Radio network planning and optimization for UMTS*. Wiley.

LIBERTI, J. C. et RAPPAPORT, T. S. [1999] *Smart antennas for wireless communications*. Prentice Hall.

Practical Subscriber Unit Adaptive Antenna Array Feasibility and Performance for Use with DMM Mode, 3GPP2-C50-20001204-031, décembre 2000.

Proposal for Differential Measurement Metric (DMM) Multiplexed into Forward Power Control Sub-channel, 3GPP2-C50-20001204-030, décembre 2000.³

QI BI, et autres [janvier 2001] Wireless mobile communications at the start of the 21st Century. *IEEE Comm. Magazine*.

Annexe 1

Glossaire de termes relatifs aux antennes adaptatives

- *Système d'antennes adaptatives*: Antenne-réseau avec traitement du signal associé, capable de changer son diagramme de rayonnement de façon dynamique pour s'adapter au bruit, au brouillage et à la propagation par trajets multiples. NOTE – Les antennes-réseaux adaptatives forment un nombre infini de diagrammes (en fonction d'un scénario) qui sont adaptés en temps réel.
- *Traitement spatial adaptatif*: Technique de traitement du signal évoluée qui intègre une mesure et une analyse très poussées des aspects de diffusion de l'environnement radiofréquence pour utiliser au mieux plusieurs antennes en combinant les signaux dans l'espace selon une méthode qui va au-delà de la méthode un faisceau par utilisateur.
- *Combinaison en diversité*: Technique visant à combiner de façon cohérente les signaux provenant d'antennes multiples pour produire un gain. NOTE – Cette technique utilise tous les éléments d'antenne, à tout moment pour chaque utilisateur, créant un diagramme d'antenne qui s'adapte de façon dynamique à l'environnement de propagation.
- *Antenne multifaisceaux*: Système d'antenne qui utilise plusieurs faisceaux pour l'émission et/ou la réception. NOTE – Les systèmes multifaisceaux peuvent être ou non adaptatifs.

³ The Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2) is a collaborative third generation (3G) telecommunications standards-setting project comprising North American and Asian interests developing global specifications for ANSI/TIA/EIA-41 "Cellular Radiotelecommunication Intersystem Operations network evolution to 3G, and global specifications for the radio transmission technologies (RTTs) supported by ANSI/TIA/EIA-41. This and other 3GPP2 documents are available free by e-mail request to: secretariat@3gpp2.org.

- *Entrées multiples/sorties multiples (MIMO)*: Technique qui utilise plusieurs antennes aux deux extrémités du trajet émission-réception, c'est-à-dire au niveau de la station de base et au niveau de la station d'un réseau hertzien.
 - *Gain du signal*: Augmentation de l'intensité du signal utile résultant de la combinaison de signaux d'entrée provenant de plusieurs antennes pour optimiser la puissance disponible nécessaire pour assurer un niveau donné de couverture.
 - *Antennes intelligentes*: un système d'antennes intelligentes combine plusieurs éléments d'antenne et une fonction de traitement du signal pour optimiser son diagramme de rayonnement et/ou de réception de façon automatique en fonction de l'environnement du signal. NOTE – Les deux grandes catégories d'antennes intelligentes, qui se distinguent par la méthode d'émission, sont les antennes adaptatives et les antennes à commutation de faisceaux.
 - *Codage spatio-temporel*: Technique de diversité d'émission qui tire parti de la dimension spatiale en émettant un certain nombre de trains de données à l'aide de plusieurs antennes situées sur le même site et de diverses structures de codage qui exploitent les effets de la propagation par trajets multiples pour obtenir une très grande efficacité spectrale.
 - *Diversité spatiale*: Information composite en provenance de l'antenne-réseau qui est utilisée pour minimiser les évanouissements et d'autres effets indésirables de la propagation par trajets multiples.
 - *Accès multiple à répartition spatiale (AMRS)*: Antennes intelligentes qui utilisent des techniques de traitement évoluées pour localiser et suivre le déplacement des stations fixes ou mobiles, orientant de façon adaptative les signaux d'émission vers les utilisateurs et les éloignant des brouilleurs. NOTE – Ce système permet d'attribuer le plus grand nombre de fréquences là où il y a le plus grand nombre d'utilisateurs et d'atteindre des niveaux supérieurs de suppression des brouillages, ce qui rend possible une meilleure réutilisation des fréquences que dans les schémas classiques hexagonaux de réutilisation des fréquences.
 - *Système d'antennes à faisceaux orientables*: Méthode qui utilise des antennes-réseaux à commande de phase, avec plusieurs colonnes d'éléments d'antennes par paires ou espacées de façon à créer un faisceau plus étroit dirigé uniquement vers l'utilisateur mobile désiré sur la liaison aller et en phase avec l'utilisateur mobile au fur et à mesure qu'il se déplace. NOTE – Les systèmes d'antennes à faisceaux orientables constituent une forme des systèmes d'antennes adaptatives.
 - *Système d'antennes à commutation de faisceaux*: Système d'antennes qui crée un certain nombre de faisceaux fixes, permettant au récepteur de sélectionner celui qui améliore le mieux l'intensité du signal et réduit le plus le brouillage. NOTE – Les systèmes à commutation de faisceaux forment un nombre fini de diagrammes fixes, préalablement définis ou de stratégies de combinaison (secteurs).
 - *Diversité avec commutation*: Technique de commutation du canal de réception vers une des multiples antennes pour sélectionner l'antenne avec l'énergie du signal maximale.
-