

RAPPORT UIT-R M.2038
Orientations technologiques

(2004)

SOMMAIRE

		Page
1	Introduction	2
2	Domaine d'application	3
3	Aperçu des principales nouvelles technologies	3
	3.1 Nouvelles technologies radioélectriques et incidence sur le spectre	5
	3.1.1 Technologie permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande	5
	3.1.2 Solutions techniques permettant de prendre en charge l'asymétrie de trafic	7
	3.1.3 Evolution des systèmes évolués grâce au DRT	8
	3.1.4 Antennes adaptatives et principales caractéristiques techniques	9
	3.1.5 Techniques MIMO (entrées multiples, sorties multiples).....	10
	3.2 Réseau d'accès et interfaces radioélectriques	11
	3.2.1 Systèmes radioélectriques définis par logiciel (SDR).....	11
	3.2.2 Noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (HDRPN, <i>high data rate packet nodes</i>)	13
	3.2.3 Technologies Internet et offre d'applications IP sur systèmes mobiles	14
	3.2.4 Accès hertzien large bande IP	15
	3.2.5 Technologie radio sur fibre (RoF)	16
	3.2.6 Réseaux radioélectroniques multibonds.....	18
	3.2.7 Stations HAPS.....	19
	3.3 Terminaux mobiles	21
	3.3.1 Architecture des terminaux	21
	3.3.2 Microsystèmes électromécaniques (MEMS) RF	21
	3.3.3 Nouvelles interfaces d'utilisateur novatrices.....	22
	3.3.4 Processeurs, terminaux et réseaux reconfigurables.....	23
4	Conclusions	24
5	Terminologie, abréviations.....	24

	Page
Annexe 1 – Technologies permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande	27
Annexe 2 – Solutions technologiques permettant de prendre en charge l'asymétrie du trafic	44
Annexe 3 – Innovations apportées aux systèmes évolués grâce au DRT	50
Annexe 4 – Antennes adaptatives et principales caractéristiques techniques.....	54
Annexe 5 – Techniques MIMO (entrées multiples, sorties multiples)	62
Annexe 6 – Systèmes radioélectriques définis par logiciel.....	70
Annexe 7 – Noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (HDRPN).....	83
Annexe 8 – Technologies Internet et prise en charge d'applications IP par des systèmes mobiles	87
Annexe 9 – Technologies d'accès hertzien large bande IP	99
Annexe 10 – Radio sur fibre (RoF).....	104
Annexe 11 – Architecture des terminaux.....	107
Annexe 12 – Microsystèmes électromécaniques (MEMS) RF	110
Annexe 13 – Nouvelles interfaces d'utilisateur novatrices pour les futurs terminaux hertiens multimédias	113
Annexe 14 – Processeurs reconfigurables	118
Annexe 15 – Réseaux radioélectriques multibonds	125

1 Introduction

La Recommandation UIT-R M.1645 définit le cadre et les objectifs d'ensemble du développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000 pour le réseau d'accès radioélectrique. Dans cette optique, les grandes orientations technologiques doivent être examinées. Le présent Rapport donne de nouvelles informations sur un grand nombre des orientations technologiques concernant le réseau d'accès radioélectrique, orientations qui se dessinaient au moment où la Recommandation UIT-R M.1645 a été élaborée. Selon son développement, son évolution, les fonctionnalités escomptées et le coût de déploiement, chacune de ces technologies peut ou non avoir une incidence sur ou être utilisée pour le développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000. Les travaux de recherche et le développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000 devraient tenir compte de ces technologies et donner des lignes directrices quant aux possibilités d'application ou à l'influence qu'elles pourraient avoir sur l'avenir des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000.

Les technologies décrites dans le présent Rapport sont des vecteurs technologiques potentiels. Pour l'instant, il n'a pas encore été décidé si ces technologies seront adoptées pour les futurs systèmes de communications mobiles et le présent Rapport n'exclut pas que soient adoptées d'autres technologies excellentes qui existent déjà ou qui pourraient voir le jour dans l'avenir.

2 Domaine d'application

Le présent Rapport donne des informations sur un grand nombre des orientations technologiques relatives aux réseaux d'accès radioélectrique prévues au moment où la Recommandation UIT-R M.1645 a été élaborée.

Le Rapport porte sur les domaines technologiques se rapportant plus ou moins directement au développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000. Ils sont classés en trois grandes catégories:

- Les technologies qui ont une incidence sur le spectre, sur son utilisation et/ou son efficacité.
- Les technologies qui concernent les réseaux d'accès et les interfaces radioélectriques.
- Les technologies qui concernent les terminaux mobiles.

3 Aperçu des principales nouvelles technologies

Dans ce paragraphe sont présentées les technologies qui semblent concerner plus au moins directement le développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000, à savoir les technologies ayant une incidence sur le spectre, son utilisation et/ou son efficacité, les technologies concernant les réseaux d'accès et les interfaces radioélectriques ainsi que les technologies concernant les terminaux d'utilisateur (voir les § 3.1, 3.2 et 3.3). D'autres détails sont donnés dans les Annexes correspondantes.

La demande dans le domaine des communications multimédias mobiles est en augmentation rapide. Or, le spectre des fréquences radioélectriques est une ressource précieuse et finie. Par conséquent, on fonde beaucoup d'espoir sur des technologies novatrices à grande efficacité spectrale pour améliorer la capacité des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000. Le § 3.1 traite de nouvelles technologies radioélectriques et de leur incidence sur l'utilisation du spectre, notamment les technologies à meilleure efficacité spectrale, celles utilisant plusieurs antennes, par exemple des antennes adaptatives ou des antennes multiples à l'émission et à la réception (MIMO, *multiple-input multiple-output*) ainsi que les technologies à utiliser en cas d'asymétrie de trafic et le duplex à répartition dans le temps (DRT).

Les algorithmes évolués de gestion des ressources radioélectriques (RRM, *radio resource management*) et les méthodes de partage souple des fréquences sont utiles pour maximiser et optimiser l'utilisation des fréquences. En outre, diverses techniques d'antenne et de codage – antennes intelligentes, techniques de diversité, techniques de codage, codage spatio-temporel et techniques combinées – améliorent la qualité des liaisons radioélectriques dans des canaux subissant des évanouissements de Rayleigh liés à la propagation par trajets multiples. Par ailleurs, des techniques d'accès multiple efficaces et la modulation adaptative améliorent l'efficacité de largeur de bande des systèmes.

Les antennes adaptatives améliorent l'efficacité spectrale d'un canal radioélectrique et, ce faisant, augmentent beaucoup la capacité et la couverture de la plupart des réseaux de transmission radioélectrique. Cette technologie utilise plusieurs antennes, des techniques de traitement numérique ainsi que des algorithmes complexes pour modifier les signaux transmis et reçus au niveau d'une station de base et d'un terminal d'utilisateur. Par ailleurs, les techniques MIMO peuvent améliorer grandement la capacité des liaisons radioélectriques en utilisant positivement les canaux complexes sujets à la propagation par trajets multiples utilisés pour certains systèmes de communications mobiles de Terre. Les techniques MIMO sont basées sur l'établissement de plusieurs canaux de communication indépendants parallèles dans le même conduit spatio-fréquentiel en utilisant plusieurs éléments d'antenne aux deux extrémités de la liaison.

Dans les communications multimédias large bande, le trafic devrait être essentiellement asymétrique. Compte tenu des incertitudes liées à l'asymétrie du trafic dans l'avenir, les systèmes de communications mobiles de demain devraient pouvoir s'adapter à différentes asymétries de trafic,

en particulier aux niveaux de la zone personnelle ou de l'accès d'utilisateur pour offrir l'asymétrie de trafic voulue tout en conservant une grande efficacité spectrale. La technique DRT est l'une des techniques qui permet d'offrir des services à haut débit de données asymétriques, avec une souplesse de déploiement du réseau: zones urbaines à forte densité de trafic, points d'accès publics, intérieur de bâtiments et applications pour des zones étendues. Les systèmes DRT n'ont pas besoin d'une paire de fréquences duplex étant donné que les transmissions sur la liaison montante et sur la liaison descendante se font sur la même porteuse dans la même bande de spectre. Souplesse, intégration et convergence seront essentielles dans les futurs systèmes de communications mobiles. Le § 3.2 présente les technologies relatives aux applications IP et à l'accès hertzien large bande IP, les technologies relatives aux systèmes définis par logiciel (SDR, *software-defined radio*) et les technologies permettant d'assurer une large couverture comme les systèmes radioélectriques sur fibre (RoF), les réseaux radioélectriques à bonds multiples ainsi que les stations placées sur des plates-formes à haute altitude (HAPS).

Un grand nombre de systèmes de communication hertiens fournissent aux utilisateurs des moyens commodes d'accéder à l'Internet, de communiquer entre eux ou d'avoir accès à des contenus multimédias. Les technologies hertiennes devraient évoluer dans une direction qui permettra d'offrir localement des services Internet et des services multimédias. L'incidence technologique de l'intégration du protocole IP et des systèmes hertiens est plus marquée dans le cas de l'accès à l'Internet mobile large bande. Pour pouvoir offrir des applications en temps réel ou des applications multimédias en utilisant le protocole Internet de bout en bout, tous les éléments, en général, d'un trajet emprunté par le service doivent respecter les exigences propres à l'accès hertzien mobile ou large bande. Pour assurer un transport IP efficace dans un environnement mobile large bande on a besoin avant tout d'un ensemble de technologies diverses «transparentes» «large bande» et «efficaces sur un plan énergétique».

Les systèmes SDR sont des systèmes de communications mobiles reconfigurables qui sont censés offrir une plate-forme commune permettant de faire tourner un logiciel qui met en oeuvre des piles de protocoles radioélectriques reconfigurables, augmentant ainsi les fonctionnalités et la polyvalence des réseaux et des terminaux à travers des modifications logicielles (téléchargements). Fondamentalement, la technologie SDR touche toutes les couches de communication (depuis la couche physique jusqu'à la couche application) de l'interface radioélectrique et a une incidence à la fois sur le terminal d'utilisateur et sur le réseau.

La technologie RoF est un système permettant d'interconnecter de façon transparente une station de base ou un élément de réseau de l'interface radioélectrique du système hertzien équivalent aux antennes d'émission et de réception qui lui sont associées à l'aide d'un réseau optique. La fibre optique se caractérise par un très faible affaiblissement d'insertion: on peut tirer des câbles sur des longueurs de plusieurs kilomètres et avoir une énorme largeur de bande et transporter ainsi de nombreux signaux RF différents sur une seule et même fibre.

La technologie de l'accès hertzien multibonds utilise plusieurs connexions hertiennes en série entre le terminal d'utilisateur cible et une station de base d'un système homogène ou de systèmes différents. Dans le cas d'un système hertzien fonctionnant dans des bandes de fréquences élevées où la zone de couverture est moins étendue, la technologie de l'accès hertzien multibonds peut être une solution pour que les terminaux d'utilisateur puissent avoir une connectivité hertzienne à une station de base.

Autre solution, les systèmes HAPS, qui utilisent une plate-forme aérienne. Ces systèmes peuvent offrir une couverture cellulaire mobile et desservir en services hertiens fixes plusieurs régions, qu'il s'agisse de zones (urbaines) à forte densité ou de zones (rurales) à faible densité.

Souplesse, intégration et convergence sont également essentielles pour les terminaux d'utilisateur. Le § 3.3 porte sur les technologies pour terminaux d'utilisateur reconfigurables – architecture de terminaux, processeurs reconfigurables, microsystèmes électromécaniques (MEMS, *micro-electro-mechanical systems*) radiofréquences – terminaux d'utilisateur plus petits et interfaces d'utilisateur pour terminal d'utilisateur souple.

Les équipements d'utilisateur mobiles de demain auront peut-être les caractéristiques de plates-formes programmables polyvalentes, en intégrant des processeurs polyvalents très puissants et offriront une plate-forme programmable souple pouvant être utilisée à des fins toujours plus diverses. La convergence de la connectivité hertziennne et d'une plate-forme programmable polyvalente risque d'exacerber certains des problèmes qui existent déjà et d'en faire naître de nouveaux; les facteurs environnementaux ainsi que les technologies classiques et les éléments du marché vont donc influencer l'architecture de ces dispositifs. Un processeur intégré bien conçu doté d'une unité reconfigurable permettra d'exécuter efficacement les instructions définies par l'utilisateur étant donné que des processeurs polyvalents comme les unités centrales de traitement (CPU) ou les systèmes de traitement réparti (DSP) ne peuvent pas fonctionner au niveau des bits. Ce type de processeur qui peut traiter de nombreux types de données au niveau des bits peut être utilisé efficacement pour diverses applications de systèmes de communications mobiles.

Les systèmes MEMS RF sont des micro-dispositifs (ou systèmes) intégrés combinant des composants électroniques et des composants mécaniques fabriqués à l'aide d'une technique de traitement par lots compatible avec un circuit intégré. Cette technologie permet d'obtenir des circuits intégrés compacts, légers, à faible puissance et très performants qui remplaceront des composants RF discrets passifs comme les oscillateurs commandés en tension (VCO), les filtres FI, RF et les duplexeurs.

L'informatique «vestimentaire» est également une technologie prometteuse qui fera naître de nouvelles idées d'interfaces homme-machine applicables aux terminaux d'utilisateur. A ce jour, de nombreuses solutions ne sont pas normalisées et sont protégées par des droits exclusifs. On a également manifestement besoin d'une certaine harmonisation et de pouvoir utiliser sans restriction des normes communes sur les interfaces ouvertes.

3.1 Nouvelles technologies radioélectriques et incidence sur le spectre

3.1.1 Technologie permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande

Pour répondre à la forte demande des utilisateurs nomades ou mobiles dans le domaine des services multimédias large bande, il faut accroître le débit binaire maximal des systèmes postérieurs aux IMT-2000. Pour augmenter la capacité des systèmes IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000, il est indispensable de mettre au point des technologies novatrices ou de nouveaux concepts permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande. Les algorithmes évolués de gestion des RRM seront utiles pour optimiser l'utilisation des ressources. Par ailleurs, il faudra utiliser des techniques d'antenne ou de codage – comme les antennes intelligentes, les techniques de diversité, les techniques de codage, le codage spatio-temporel et les techniques combinées – dans les systèmes postérieurs aux IMT-2000 pour améliorer la qualité des liaisons hertziennes dans des canaux sujets aux évanouissements de Rayleigh par propagation par trajets multiples. Par ailleurs, on aura besoin de techniques efficaces d'accès multiple, d'une modulation adaptative, d'une modulation adaptative en liaison descendante et de la technologie multibonds pour améliorer l'efficacité de largeur de bande du système.

Les techniques permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande qui sont examinées dans la présente Recommandation sont notamment les suivantes:

- les systèmes à bouquets de cellules (*bunched systems*);
- l'ultralarge bande (UWB);
- la modulation et le codage adaptatifs (AMC);
- le partage souple des fréquences.

Des descriptions de haut niveau de ces techniques seront données dans les paragraphes qui suivent et des renseignements plus détaillés seront fournis dans l'Annexe 1.

3.1.1.1 Résumé de chaque technique

- *Systèmes à bouquets de cellules*: Dans des environnements piétonniers ou à l'intérieur de bâtiments, la demande de trafic variera dans des proportions importantes, la mobilité de l'utilisateur sera grande et les types de trafic nombreux. Pour ce type d'environnement très complexe, on aura besoin d'algorithmes évolués de gestion des RRM. Il pourrait être intéressant d'avoir une unité centrale intelligente capable d'optimiser l'utilisation des ressources. Cette fonctionnalité est offerte par les systèmes à bouquets de cellules.
- *Systèmes UWB*: Avec l'ultralarge bande, il s'agit avant tout de développer, d'émettre et de recevoir une salve extrêmement brève d'énergie RF. Les ondes résultantes ont une très grande largeur de bande (généralement de l'ordre de quelques gigahertz).
- *AMC*: Les systèmes de modulation et de codage adaptatifs s'adaptent à la variation des canaux en faisant varier des paramètres comme l'ordre de modulation ou le débit de code, sur la base des informations relatives à l'état du canal (CSI, *channel status information*).
- *Partage souple des fréquences*: Le partage des fréquences porteuses entre différents opérateurs est une méthode qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources spectrales.

3.1.1.2 Avantages

- *Systèmes à bouquets de cellules*: Ces systèmes assurent une distribution dynamique de la charge de trafic, une gestion dynamique des ressources radioélectriques et une commande adaptative de la couverture. Ils conviennent bien pour assurer la couverture des points d'accès publics.
- *Systèmes UWB*: Ces systèmes permettent un partage des fréquences entre différents services et une meilleure utilisation du spectre.
- *AMC*: L'avantage de ces techniques est que la quantité de spectre utilisée est basée sur les conditions réelles du canal et non celles correspondant au cas le plus défavorable.
- *Partage souple des fréquences*: Utilisation plus efficace des ressources spectrales.

3.1.1.3 Problèmes à résoudre

- *Systèmes à bouquets de cellules*: Il faut examiner les problèmes de conception que posent le réseau d'accès radioélectrique (RAN) et l'algorithme RRM pour les systèmes à bouquets de cellules.
- *Systèmes UWB*: Il n'y a pas de définition internationalement reconnue des systèmes ultra large bande car les applications et les utilisations pour lesquelles cette technologie peut être utilisée sont très diverses et les dispositifs ne sont pas encore totalement mis au point. Les incidences de ces systèmes sur le plan réglementaire et sur le plan des brouillages ne sont pas encore connues.
- *AMC*: Tout retard pris dans la signalisation des conditions du canal réduit la fiabilité de l'indicateur d'état du canal, ce qui peut amener le système à choisir des niveaux de modulation ou un taux de codage incorrects.
- *Partage souple des fréquences*: Un partage souple des fréquences peut avoir des conséquences importantes sur le temps nécessaire pour explorer le spectre et localiser la technique d'accès radioélectrique (RAT, *radio access technology*) utilisée par la porteuse, une fois que le terminal a été mis sous tension.

3.1.2 Solutions techniques permettant de prendre en charge l'asymétrie de trafic

3.1.2.1 Considérations générales

Les interfaces radioélectriques pour les systèmes IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 peuvent offrir différentes fonctionnalités sur la liaison montante et la liaison descendante pour ce qui est de l'asymétrie de trafic. On entend ici par asymétrie de trafic le fait que le volume de trafic et, par conséquent, la quantité de ressources nécessaires peuvent varier entre la liaison montante et la liaison descendante.

L'asymétrie de trafic se manifeste à au moins quatre niveaux:

- *niveau «zone personnelle»*: le degré d'asymétrie pour le trafic entre dispositifs d'un réseau personnel (PAN);
- *niveau «accès de l'utilisateur»*: le degré d'asymétrie pour le trafic entre un utilisateur particulier et le réseau, pour un service particulier;
- *niveau «cellule»*: le degré d'asymétrie totale du trafic dans telle ou telle cellule;
- *niveau «réseau»*: le degré d'asymétrie totale du trafic dans l'ensemble du réseau.

Il en va autrement en particulier en ce qui concerne le volume de trafic considéré et la vitesse de changement de l'asymétrie. Pour des utilisateurs particuliers (c'est-à-dire au niveau «zone personnelle» ou au niveau «accès de l'utilisateur»), le degré d'asymétrie peut varier rapidement. Par contre, le degré d'asymétrie totale sur l'ensemble d'une cellule (c'est-à-dire au niveau «cellule») et encore plus sur l'ensemble du réseau (c'est-à-dire au niveau «réseau») variera beaucoup plus lentement en raison, d'une part, de la somme des différents services et, d'autre part, de la variation de la gamme des services fournis. La conception du système détermine si et comment cette asymétrie de trafic variable offerte peut être efficacement assurée.

3.1.2.2 Gamme de services offerts par les systèmes IMT-2000

Les réseaux IMT-2000 ou les systèmes postérieurs aux IMT-2000 offriront un ensemble d'applications symétriques ainsi que des applications essentiellement «montantes» (dans le sens station de base vers station mobile)¹ ou essentiellement «descendantes» (dans le sens station mobile vers station de base)¹ utilisant différents débits de données. Les estimations les plus récentes concernant la composition du trafic sont données dans le Rapport UIT-R M.2023. Il ressort d'une analyse de ces estimations que l'asymétrie de trafic totale dans une cellule particulière ou sur l'ensemble du réseau, pour les utilisateurs IMT-2000, aurait les mêmes caractéristiques d'«orientation du trafic» que le réseau fixe, en d'autres termes qu'il serait essentiellement un trafic «descendant». Toutefois, il convient de noter que les caractéristiques du trafic et le degré d'asymétrie de trafic entre un utilisateur particulier et le réseau peuvent, pour certains services IMT-2000 particuliers, être différents. Les nouvelles applications, comme les images ou les vidéo-clips, ainsi que le trafic d'homologue à homologue, qui devraient générer un trafic depuis des terminaux ou des serveurs connectés par accès hertzien, influenceront sur la composition du trafic IMT-2000. Compte tenu des incertitudes liées à l'asymétrie future du trafic, les systèmes d'accès radioélectrique de demain devraient pouvoir s'adapter à différents degrés d'asymétrie, en particulier au niveau «zone personnelle» ou au niveau «accès de l'utilisateur» pour assurer l'asymétrie de trafic offerte tout en conservant une grande efficacité spectrale.

¹ Voir la Recommandation UIT-R F.1399 – Terminologie relative aux accès hertziens.

3.1.2.3 Aspects techniques

La prise en charge par l'interface radioélectrique de l'asymétrie de trafic peut se faire de différentes façons:

- Attribution asymétrique des ressources, par exemple attribution asymétrique de fréquences en mode duplex par répartition en fréquence (DRF) ou attribution asymétrique d'intervalles de temps en mode DRT.
- Attribution symétrique de fréquences liaisons montantes/liaisons descendantes en mode DRF ou attribution symétrique de intervalles de temps liaisons montantes/liaisons descendantes en mode DRT, avec utilisation partielle uniquement de la capacité disponible dans l'un des deux sens de transmission.
- Application de différentes techniques d'augmentation de la capacité sur la liaison montante et la liaison descendante, quelles que soient les ressources attribuées. Ces techniques sont en général indépendantes du système duplex.

D'autres précisions sont données dans l'Annexe 2.

3.1.3 Evolution des systèmes évolués grâce au DRT

La technique DRT est tout indiquée pour les services asymétriques à débit de données élevé et permet en même temps un déploiement du réseau souple et peu coûteux, y compris dans les environnements urbains, les points d'accès publics ou à l'intérieur de bâtiments à forte densité de trafic et pour des applications sur des zones étendues. Dans la technique DRT les transmissions sur la liaison montante et sur la liaison descendante se font sur la même porteuse dans la même bande de fréquences. En d'autres termes, la technique DRT peut fonctionner dans une bande de fréquences non appariées, c'est-à-dire qu'aucune paire de fréquences duplex n'est nécessaire. La quantité de spectre minimale dont on a besoin correspond à la moitié seulement de la largeur de bande pour le mode DRF, c'est-à-dire qu'une seule attribution de 5 MHz de spectre est nécessaire lorsque le débit d'éléments DRT AMRC large bande (IMT-2000 DRT AMRC large bande) est le même (3,84 Mélément/s) qu'en mode DRF AMRC large bande (IMT-2000 AMRC, étalement direct).

Dans les systèmes IMT-2000 actuels, le DRT utilise à la fois les techniques AMRC et AMRT pour séparer les divers canaux de communication par intervalle de temps ou par code AMRC. Des intervalles de temps peuvent être affectés pour le transport des canaux de liaison descendante ou des canaux de liaison montante. La structure AMRT permet également d'utiliser un algorithme particulier grâce auquel plusieurs canaux sont reconnus et décodés simultanément (algorithme de détection commune). Cette méthode permet d'éliminer presque complètement les brouillages intracellulaires et améliore la capacité du système. Cela est possible en mode DRT car l'émission et la réception se font sur la même fréquence et présentent les mêmes distorsions de canal, ce qui simplifie le traitement.

En raison de la structure AMRT et de l'algorithme de détection commune qui réduit sensiblement les brouillages causés par d'autres signaux AMRC présents dans l'intervalle de temps, un système DRT AMRC large bande se comporte à bien des égards comme un système AMRT. Il n'y a pas de problème de «cell breathing» («respiration des cellules», c'est-à-dire que le rayon effectif de la cellule diminue lorsque la charge dans la cellule augmente); il n'est pas nécessaire de maintenir une marge de fonctionnement suffisante pour palier toute incertitude et la fonction de «soft hand-off» (transfert intercellulaire souple) n'est pas nécessaire. Cela est particulièrement précieux dans des scénarios de hotspots (points d'accès publics) caractérisés par une charge de données importante et des cellules de petite taille en intérieur comme en extérieur (pico et microcellules). Etant donné que les intervalles de temps pour la liaison montante et la liaison descendante peuvent être attribués séparément, la technique DRT AMRC large bande est tout indiquée pour un trafic asymétrique. Le degré d'asymétrie peut être contrôlé dynamiquement, ce qui améliore l'efficacité globale de fonctionnement.

Dès le début, la norme DRT a été mise au point en prévision de la mise en oeuvre d'antennes intelligentes qui peuvent améliorer sensiblement la capacité du système. Les antennes intelligentes offrent des avantages particuliers dans des configurations à macro ou microcellules où les signaux d'utilisateur ne sont pas très dispersés. Là aussi, l'utilisation en mode DRT du même canal radioélectrique physique pour la liaison montante et la liaison descendante simplifie le traitement nécessaire pour former les faisceaux de l'antenne. Cette caractéristique unique – réciprocité de canal – de la technique DRT facilite aussi la mise en oeuvre de techniques de codage et de diversité évoluées.

Enfin, la technique DRT est rentable pour les déploiements de réseau car elle tire parti de l'infrastructure d'un système uniquement DRF en offrant une capacité extensible pour les points d'accès publics. Cela est réalisé à l'aide d'une architecture multicouches de macro, micro et pico cellules DRF et DRT.

3.1.4 Antennes adaptatives et principales caractéristiques techniques

3.1.4.1 Présentation et avantages des antennes adaptatives dans les systèmes IMT-2000

Les antennes adaptatives peuvent être définies² comme un «réseau d'antennes capable de changer son diagramme dynamiquement pour s'adapter au bruit, au brouillage et à la propagation par trajets multiples. Les antennes adaptatives sont utilisées pour renforcer les signaux reçus et peuvent aussi être utilisées pour configurer des faisceaux à l'émission».

De même, les systèmes à faisceaux commutés «utilisent un certain nombre de faisceaux fixes sur le site d'une antenne. Le récepteur sélectionne le faisceau qui renforce le plus le signal et qui réduit le plus les brouillages. Les systèmes à faisceaux commutés ne seront pas nécessairement aussi performants que les systèmes adaptatifs mais ils sont beaucoup moins complexes et beaucoup plus faciles à mettre à niveau pour les utiliser avec les technologies hertziennes existantes».

Enfin, les antennes intelligentes sont aussi définies comme des systèmes qui «peuvent intégrer à la fois des techniques d'antennes adaptatives et de commutation de faisceaux».

Le lecteur est mis en garde contre le fait que la terminologie utilisée ici varie quelque peu; par exemple, les systèmes non adaptatifs ou non commutés sont parfois qualifiés de systèmes intelligents simplement en raison de l'intégration d'une électronique RF au niveau du mât et malheureusement les termes «adaptatifs» et «formation de faisceaux» sont souvent utilisés sans beaucoup de rigueur.

3.1.4.2 Avantages de l'utilisation d'antennes adaptatives

Avantages de l'utilisation d'antennes adaptatives dans les réseaux IMT-2000

Les antennes adaptatives améliorent l'efficacité spectrale d'un canal radioélectrique et, ce faisant, augmente grandement la capacité et la couverture de la plupart des réseaux de transmission radioélectriques. Cette technologie utilise plusieurs antennes, des techniques de traitement numériques et des algorithmes complexes pour modifier les signaux à l'émission et à la réception au niveau de la station de base et du terminal d'utilisateur. L'utilisation d'antennes adaptatives pourrait améliorer grandement les performances des systèmes dans toutes les interfaces radioélectriques IMT-2000 existantes.

Autres améliorations apportées par l'intégration d'antennes adaptatives dès la conception du système

L'application de la technologie des antennes adaptatives à une interface radioélectrique existante peut améliorer sensiblement l'efficacité spectrale de cette interface mais les avantages obtenus du point de vue de l'efficacité seront plus importants si l'antenne adaptative est intégrée dès le début,

² LIBERTI et RAPPAPORT, [1999]. *Smart Antennas for Wireless Communications*. Wiley.

c'est-à-dire lors de la conception de l'interface radioélectrique. La conception d'une interface radioélectrique, à bien des égards, a une incidence sur les gains d'efficacité spectrale que l'on peut obtenir si on utilise la technologie des antennes adaptatives notamment:

- méthodes de duplexage;
- largeur de bande de la porteuse;
- méthodes de modulation;
- commande de signalisation: radiodiffusion et radiomessagerie;
- structure des salves et des trames;
- méthodes de commande d'accès aux supports.

Les résultats peuvent être tout à fait impressionnants: on peut en effet démontrer qu'en intégrant des antennes adaptatives lors de la conception des systèmes on peut obtenir des gains d'efficacité spectrale de plus de 4000% supérieurs à ceux des systèmes 2G existants et de plus de 400% supérieurs à ceux des nouvelles interfaces radioélectriques IMT-2000.

3.1.4.3 Résumé

Les antennes adaptatives ont d'autres avantages qui sont moins bien connus. Par exemple, en raison de la redistribution inévitable des éléments d'amplification de puissance RF pour les systèmes d'antennes adaptatives le coût total de l'amplificateur est moins élevé qu'il ne le serait avec une technologie classique. Du point de vue du déploiement du réseau, il est parfois intéressant d'utiliser des stations à antennes adaptatives dans une partie seulement de l'infrastructure globale d'une zone et, de même, les avantages qu'offrent les techniques de limitation des brouillages peuvent être particulièrement intéressants dans certaines situations comme les accords de coordination transfrontière.

L'intégration de systèmes d'antennes adaptatives dans la conception des futurs systèmes IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000 améliorera sensiblement l'efficacité spectrale de ces nouveaux systèmes radioélectriques. On peut utiliser les gains d'efficacité spectrale résultant de l'utilisation de systèmes d'antennes adaptatives non seulement pour réduire le nombre de stations de base (cellules) nécessaires pour déployer un réseau IMT-2000 mais aussi pour obtenir des débits de données beaucoup plus élevés dans une portion limitée de spectre qui devient de plus en plus rare.

3.1.5 Techniques MIMO (entrées multiples, sorties multiples)

3.1.5.1 Résumé de la technologie

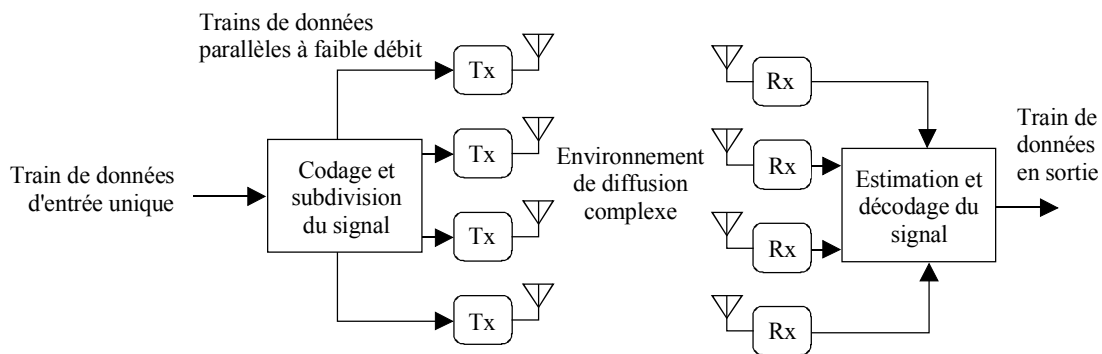
Les techniques MIMO (entrées multiples, sorties multiples) peuvent améliorer sensiblement la capacité de la liaison radioélectrique en utilisant de façon très positive les canaux complexes sujets à la propagation par trajets multiples utilisés pour les communications mobiles de Terre. Les solutions de remplacement dans cette famille de techniques sont nombreuses mais elles sont toutes basées sur l'établissement de plusieurs canaux de communications parallèles indépendants dans le même conduit spatio-fréquentiel en utilisant plusieurs éléments d'antenne aux deux extrémités de la liaison.

3.1.5.2 Avantages

L'utilisation des techniques MIMO a l'avantage d'augmenter le débit de données du système pour la même puissance rayonnée totale et la même largeur de bande de canal.

Dans des environnements à forte propagation par diffusion, le débit de données maximal théorique pour les algorithmes MIMO augmente en proportion directe du nombre d'antennes et n'est pas seulement proportionnel au logarithme du nombre d'antennes lorsqu'on utilise des méthodes classiques de formation de faisceaux à commande de phase. Pour la configuration illustrée à la Fig. 1, avec la méthode MIMO il est possible de faire doubler la capacité par rapport aux algorithmes classiques des antennes-réseaux à commande de phase dans les réseaux cellulaires.

FIGURE 1
Emetteur-récepteur MIMO



2038-01

3.1.5.3 Questions à examiner

Dans quelle mesure ces gains théoriques peuvent être réalisés dans des scénarios de déploiement de réseau réalistes? Cette question fait actuellement l'objet de travaux de recherche au sein de l'industrie et l'accent est mis tout particulièrement, d'une part, sur l'optimisation des performances du système d'antenne du terminal compte tenu des considérations de forme et d'encombrement des terminaux de demain comme les ordinateurs portables, les assistants personnels et les combinés et, d'autre part, sur la réduction autant que possible de la complexité de calcul des algorithmes de traitement du signal.

Les premiers résultats dont il est fait état dans la littérature ont montré que la plus grande partie de la capacité MIMO théorique pourrait être exploitée avec une antenne-réseau de terminal bien conçue. Les éléments d'antenne peuvent être distants les uns des autres de moins d'une longueur d'onde et il est aussi possible d'utiliser une autre polarisation pour augmenter le nombre d'éléments dans un terminal de taille donnée. Il a été montré que quatre éléments dans un terminal suffisent pour obtenir des gains de capacité importants si ces éléments sont intégrés comme un assistant personnel type.

Toutefois, lors de la conception de systèmes MIMO, il faut caractériser de façon précise les canaux de propagation MIMO dans des scénarios de déploiement réalistes et cette question est étudiée dans le cadre des projets de recherche du 3GPP, COST 259 et COST 273.

Les techniques MIMO sont brièvement passées en revue dans l'Annexe 5 qui donne également une liste de références à certains des travaux les plus importants qui ont été publiés dans ce domaine.

3.2 Réseau d'accès et interfaces radioélectriques

3.2.1 Systèmes radioélectriques définis par logiciel (SDR)

3.2.1.1 Considérations générales

Les systèmes SDR sont des systèmes de communications mobiles reconfigurables censés fournir une plate-forme commune permettant de faire tourner un logiciel qui met en oeuvre une pile de protocoles radioélectriques reconfigurables, augmentant ainsi les fonctionnalités et la polyvalence des réseaux et des terminaux à travers des modifications (téléchargements) logicielles. Avec la multiplication des interfaces de programmation d'application (API, *application programming interface*) ouvertes, les logiciels de vendeurs différents peuvent tourner sur des plates-formes matérielles «propriétaires». Sur de telles plates-formes, les protocoles et les applications de l'interface radioélectrique sont exécutés dans un même environnement logiciel.

La technologie SDR concerne donc toutes les couches de communication (depuis la couche physique jusqu'à la couche application), de l'interface radioélectrique (voir la Fig. 19) et a des incidences côté terminal mobile et côté réseau.

Les principaux objectifs de la technologie SDR sont de fournir des moyens permettant:

- d'adapter l'interface radioélectrique à la diversité des environnements de déploiement/des normes relatives aux interfaces radioélectriques;
- d'offrir de nouvelles applications et de nouveaux services;
- de mettre à jour les logiciels;
- d'exploiter pleinement les services offerts par des réseaux radioélectriques hétérogènes souples.

On trouvera dans l'Annexe 6 davantage de détails sur l'architecture des terminaux reconfigurables et sur les réseaux d'appui.

3.2.1.2 Exigences générales imposées par la technologie SDR

La technologie SDR impose des exigences aux systèmes de communications mobiles qui tombent dans trois grandes catégories:

- commande de reconfiguration radioélectrique;
- création et fourniture de service sur des réseaux convergents et avec des modes d'accès radioélectrique différents;
- gestion de l'environnement de l'utilisateur.

Par ailleurs, la technologie SDR doit intégrer les fonctions de sécurité permettant une exploitation fiable et il faut éviter tout éventuel abus malgré la grande souplesse qu'offre cette technologie.

3.2.1.3 Architecture SDR logique

L'architecture SDR logique doit pouvoir offrir les fonctions suivantes:

- gestion des profils de terminal, d'utilisateur et de service dans les entités de réseau et dans le terminal;
- commande de téléchargement et gestion de reconfiguration efficaces pour les terminaux et les entités de réseau;
- fonctionnalités d'adaptation et de négociation pour les services et les techniques RAT (par exemple, transfert vertical);
- garantie du respect des normes.

Ces fonctions sont des fonctions logiques, c'est-à-dire qu'elles peuvent être mises en oeuvre à différents endroits dans le réseau. De plus, elles peuvent être réparties à l'intérieur du réseau ou entre le réseau et le terminal.

Un exemple d'architecture SDR logique (aspects terminal et réseau) est donné dans l'Annexe 6.

3.2.1.4 Considérations contraignantes

La technologie SDR, étant donné qu'elle est très souple et qu'il est possible de changer la quasi-totalité des paramètres de l'interface radioélectrique ou des paramètres de couche supérieure (par exemple, les paramètres de la couche transport), peut faire l'objet d'une normalisation si une exploitation mixte (combinaison de différents vendeurs de logiciels et de matériel) et des interfaces API ouvertes entre modules sont nécessaires.

Il faut tenir compte d'éléments connexes, notamment:

- les fonctions de sécurité nécessaires pour un téléchargement de logiciels fiable et sécurisé (par exemple, téléchargement de logiciels limité aux modèles agréés par le fabricant, lesquels sont disponibles uniquement à partir d'un serveur sécurisé du fabricant afin de protéger la responsabilité du fabricant en ce qui concerne l'intégrité du système);
- pour le terminal: séparation des fonctionnalités utilisées pour les applications et pour le logiciel radio;
- pour le terminal concernant les nouvelles applications et les nouveaux services: demande de confirmation de l'utilisateur avant mise à jour du logiciel pour éviter toute incompatibilité avec un autre logiciel déjà installé.

3.2.2 Noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (HDRPN, *high data rate packed nodes*)

Etant donné que les services de transmission de données par paquets ont des caractéristiques différentes de celles des services de données vocales, il est peut-être possible de tirer parti des caractéristiques de certaines applications de transmission de données par paquets pour améliorer les performances du système lorsqu'il prend en charge ces services. Le concept de noeuds HDRPN correspond à une telle modification d'architecture et de structure qui tire parti des caractéristiques de temps de propagation moins strictes associées à certaines classes de trafic en mode paquet. Les noeuds HDRPN sont placés à proximité des artères que les abonnés mobiles sont susceptibles d'emprunter et lorsque les abonnés se trouvent à proximité immédiate de ces noeuds, le système transfère des fichiers importants à des débits de données élevés vers des utilisateurs qui ont des fichiers importants qui les attendent. Les noeuds HDRPN ne transmettent pas suffisamment de puissance pour que les terminaux mobiles puissent recevoir des débits de données élevés lorsqu'ils ne sont pas à proximité de l'un de ces noeuds. Il y aura en conséquence moins de brouillage dans la région et peut-être moins de stations de base.

Les systèmes IMT-2000 de demain devraient fournir des services de transmission de données par paquets à haut débit et poser de nouveaux problèmes qui mettront à rude épreuve les limites pratiques de la technologie existante. Les liaisons de transmission par paquets devraient être asymétriques, le débit sur la liaison descendante étant souvent beaucoup plus élevé. Souvent les paquets de données ne sont pas affectés par des retards de courte durée et des retards d'une minute peuvent être acceptables. Ces exigences sont différentes de celles fixées au départ pour les systèmes IMT-2000 où l'accent était mis sur les transmissions vocales et sur l'équilibre des trajets de transmission. Pour les prochaines phases d'évolution des IMT-2000, il est essentiel de réexaminer l'architecture de base afin de voir si ces nouvelles exigences pourraient affecter la structure du système. Pour certaines des nouvelles applications, il sera commode de négocier une valeur raisonnable pour le temps de propagation alors que dans d'autres cas il suffira d'obtenir la meilleure capacité possible. Les utilisateurs de l'Internet se sont habitués à avoir la meilleure catégorie de service possible lorsqu'ils utilisent des modems d'accès en ligne. S'il faut une minute pour transférer un gros fichier à un débit de 144 kbit/s, il en faudra six pour le transférer à un débit de 1444 kbit/s. Par conséquent, même s'il faut attendre 54 s avant de lancer le transfert dans le dernier cas, ce transfert sera tout de même achevé au même moment que dans le premier cas.

Les véhicules à bord desquels se trouvent les terminaux mobiles circulent en général assez rapidement et par conséquent la relation de ces terminaux avec leur station de base change rapidement. Cela est particulièrement vrai pour les véhicules qui circulent sur des voies express ou pour les trains à grande vitesse. Par conséquent, étant donné que pour la classe de données décrite ci-dessus on peut tolérer des temps de propagation de courte durée, il est logique que les terminaux «très mobiles» reçoivent de gros fichiers à un débit de données élevé lorsqu'ils sont à proximité d'un noeud HDRPN. A terme, cela fait baisser le coût des terminaux/des stations de base et peut réduire sensiblement le brouillage causé à d'autres terminaux ou d'autres stations de base. Les terminaux mobiles peuvent recevoir des données à un plus faible débit sur l'ensemble de la région.

3.2.3 Technologies Internet et offre d'applications IP sur systèmes mobiles

3.2.3.1 Résumé de la technologie

Les technologies Internet et les technologies hertziennes doivent évoluer vers une plus grande intégration. Les conséquences technologiques d'une telle intégration sont plus spectaculaires dans le cas de l'accès mobile large bande à l'Internet. Pour pouvoir offrir des applications multimédias ou des applications en temps réel en utilisant le protocole Internet de bout en bout, compte tenu de tous les éléments, d'un trajet emprunté par le service, il faut respecter les exigences liées à l'accès hertzien mobile ou large bande. De même, les réseaux d'accès devraient être équipés de façon à pouvoir offrir une mobilité IP grande vitesse tout en maintenant la qualité de service négociée. Par exemple, les composantes d'un réseau mobile devraient pouvoir contrôler et évaluer les conditions des canaux hertziens, et adapter en conséquence les paramètres de transmission pour éviter toute dégradation importante du débit.

Pour assurer un transport sur protocole IP efficace dans un environnement mobile, on a besoin avant tout de technologies diverses pour lesquelles les maîtres mots sont «transparence», «large bande» et «efficacité énergétique». Il en découle différents paramètres liés aux technologies Internet: qualité de service, acheminement et transfert, gestion de localisation, gestion de la qualité de service, gestion des ressources hertziennes, protocoles de radiomessagerie/de signalisation, architecture des terminaux, systèmes d'exploitation, reconfiguration de systèmes adaptatifs, etc.

Avec la prise en charge d'applications IP, on peut citer les applications suivantes.

Des services moins exigeants sur le plan de la qualité de service – accès au web, courrier électronique, SMS – sont déjà offerts sur les systèmes cellulaires existants. D'autres applications IP ambitieuses seront offertes sur systèmes mobiles, et parmi elles la téléphonie IP vient en tête: elle est actuellement mise en oeuvre dans des dispositifs de plus en plus petits, qu'il s'agisse d'ordinateurs portables «notebook» ou d'assistants personnels numériques. Toutefois, les gros besoins en largeur de bande ou le temps nécessaire pour le transfert vont freiner le développement de cette application si des améliorations importantes ne sont pas apportées (par exemple, compression efficace des en-têtes ou transfert transparent par point d'accès).

Les services commerciaux/bancaires mobiles sont d'autres applications lucratives où l'on peut tirer parti des possibilités offertes par l'intégration des technologies de l'Internet et des technologies mobiles. Dans ce type de services spécifiquement et dans tous les autres services en général, la condition préalable est d'avoir un environnement hertzien fiable (continu, sans interruption) et sécurisé. La solution viendra peut-être des technologies hertziennes évoluées, des technologies Internet ou bien des deux. Il faut prévoir des dispositions relatives à la sécurité pour que les systèmes mobiles puissent prendre en charge les applications IP.

3.2.3.2 Avantages de la technologie

Si la tendance actuelle se poursuit en ce qui concerne l'utilisation des technologies mobiles, l'intégration avec les technologies Internet va engendrer une révolution dans l'industrie des communications hertziennes qui n'épargnera personne: vendeurs, fournisseurs de services, d'applications et de contextes, responsables de l'élaboration des politiques et utilisateurs.

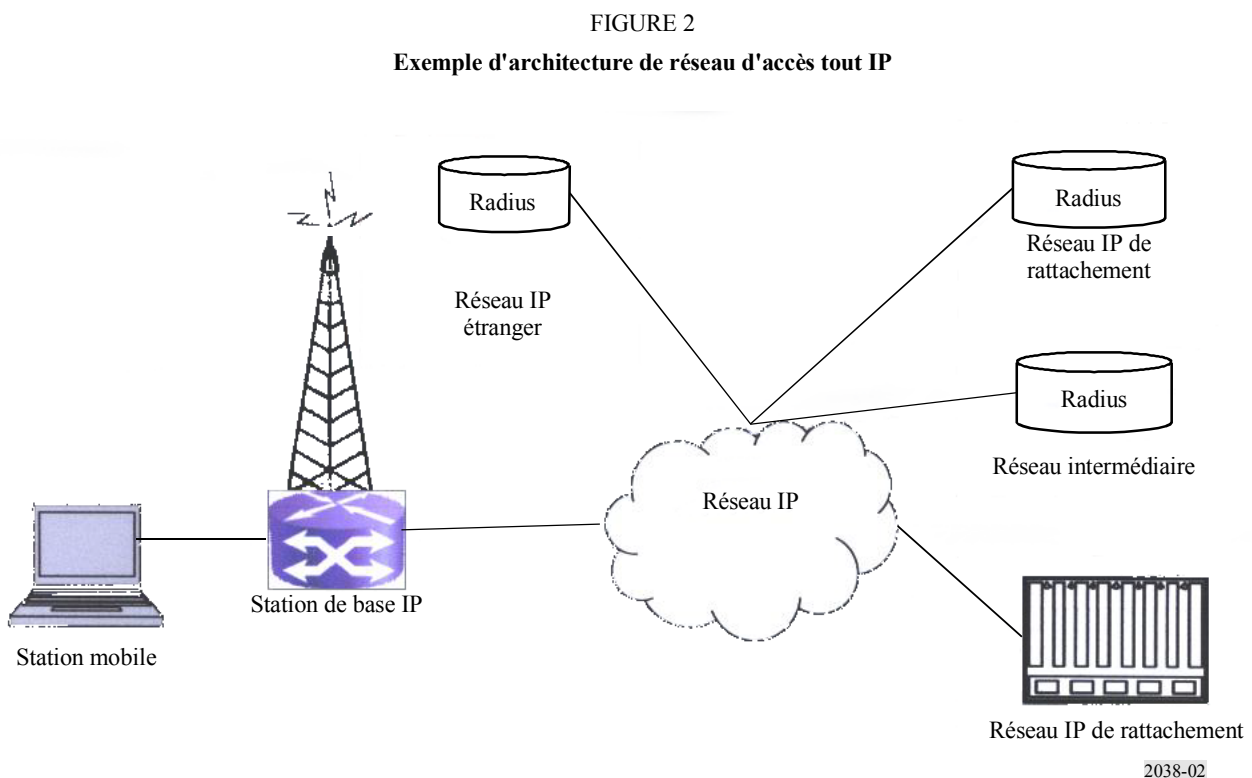
Les systèmes hertziens actuels (et ce sera vraisemblablement le cas pour les systèmes futurs) sont conçus, mis en oeuvre et exploités de façon indépendante pour pouvoir satisfaire des exigences différentes au niveau de la mobilité, des débits de données, des services, etc. Certains de ces systèmes sinon tous peuvent simultanément fournir des services en un lieu géographique spécifique et créer un environnement hertzien hétérogène pour les utilisateurs dans des zones de service qui se recouvrent. Par ailleurs, les réseaux hertziens de la prochaine génération seront des réseaux hétérogènes acceptant plusieurs technologies d'accès hertzien large bande et assurant une itinérance mondiale à travers des systèmes ayant leur propre technologie d'accès. Une solution tout IP semble être la plus prometteuse pour une intégration transparente de systèmes hertziens hétérogènes.

3.2.3.3 Questions à examiner

Commençons par l'architecture de réseau. Il faut examiner plusieurs questions importantes pour réaliser un environnement Internet mobile efficace ainsi que des réseaux hertziens hétérogènes. Pour que le système soit durable, il faut s'intéresser à la sécurité et à la capacité d'évolutivité. L'interopérabilité avec les systèmes anciens et les systèmes de demain, l'adressage IP, les questions liées aux droits de propriété intellectuelle, sont d'autant de questions qui devront être examinées.

3.2.4 Accès hertzien large bande IP

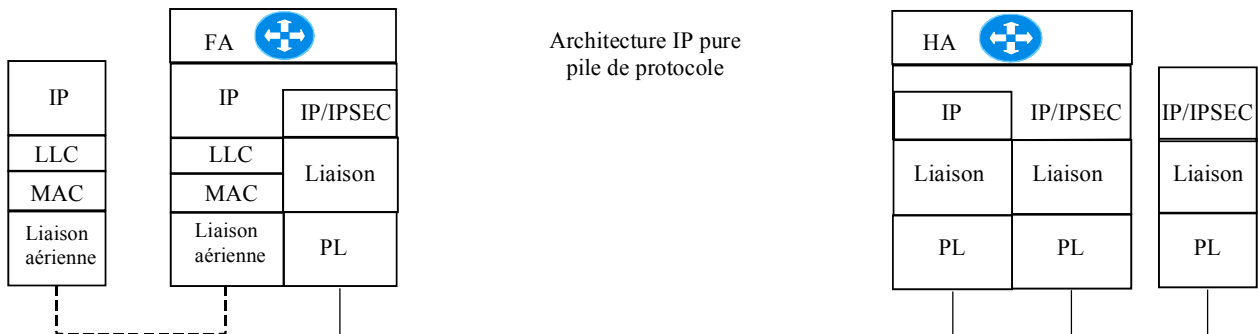
Dans un avenir prévisible, les services de données sont et seront acheminés essentiellement sur des réseaux IP. L'architecture de réseau globale devrait donc évoluer vers une architecture de bout en bout qui, au niveau de la couche 3, est une architecture totalement IP. Une telle architecture permettra d'accéder, en toute transparence, depuis des dispositifs mobiles à toutes les applications de données accessibles via l'Internet et les réseaux intranet d'entreprise. Si l'on dispose d'une capacité de système et de débits de données d'utilisateur suffisants, le marché des données hertziennes pourra croître organiquement et connaître la croissance explosive du commerce électronique ou de «l'infotainment» (information et divertissement) pour lesquels les services sont supposés être actuellement assurés sur des réseaux filaires. Cette méthode supprime la nécessité d'une programmation en double et/ou d'un reconditionnement du contenu, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule version pour les applications Internet/Intranet et les applications hertziennes. Pour en arriver là, il faut que l'architecture de réseau évolue pour que la transparence IP arrive jusqu'au bout du réseau et pour utiliser les protocoles IP. L'architecture de réseau nécessaire est illustrée à la Fig. 2 et les ramifications des piles de protocole à la Fig. 3.



RADIUS : service d'utilisateur commuté à authentification distante

FIGURE 3

Exemple de pile de protocoles de réseau d'accès tout IP

FA: Agent étranger (*foreign agent*)HA: Agent national (de rattachement) (*home agent*)

IP: Protocole Internet

IPSEC: Sécurité du protocole Internet (*Internet protocol security*)LLC: Commande de liaison logique (*logical link control*)MAC: Commande d'accès au support (*media access control*)PL: Couche physique (*physical layer*)

2038-03

Exemples de protocoles requis:

- 1) *Protocole IP mobile* – pour pouvoir offrir la mobilité. Il faudra apporter d'autres améliorations pour qu'il y ait itinérance transparente, à des vitesses analogues à celles de véhicules.
- 2) *RADIUS (service d'utilisateur commuté à authentification distante) et AAA (authentification, autorisation, comptabilité)* – pour assurer les fonctions de sécurité et la comptabilité.
- 3) *SIP (protocole d'initiation de session)* – pour prendre en charge la commande de service de bout en bout.

Pour que les performances de bout en bout soient optimales, il faut aussi que le réseau d'accès hertzien utilise le protocole IP. Dans les réseaux d'accès hertziens actuels, on suppose aussi que le trafic de données, qui est prédominant, est fortement asymétrique, le modèle type étant la navigation sur le web. Cela est vrai dans de nombreux cas mais les applications avec trafic de données symétrique sont de plus en plus nombreuses. Il s'agit notamment de la visioconférence et de diverses applications de données pour entreprises.

3.2.4.1 Résumé de la technologie

Le Tableau 1 donne les caractéristiques qui distinguent les interfaces 3G existantes et met l'accent sur un réseau d'accès IP. Les travaux concernant ce type de réseau d'accès hertzien mobile large bande sont actuellement en cours dans le cadre du projet IEEE 802.20.

3.2.5 Technologie radio sur fibre (RoF)**3.2.5.1 Résumé de la technologie**

Dans le présent Rapport, un système RoF est défini comme un système permettant d'interconnecter de façon transparente une station de base ou l'interface radioélectrique de système hertzien qui est l'élément de réseau équivalent avec ses antennes d'émission et de réception associées au moyen d'un réseau optique. Les signaux se propageant dans le réseau optique sont des répliques des signaux à l'interface radioélectrique de la station émettrice de base (BTS).

Cette définition peut être généralisée pour y inclure non pas un mais plusieurs répéteurs de BTS tant que tous sont logés dans le même local et partagent une même infrastructure de base, alimentation électrique, air conditionné, etc.

Les systèmes RoF sont décrits dans l'Annexe 10.

TABLEAU 1

Partie concernée	Réseau d'accès IP large bande	3G
Utilisateur final	Utilisateur mobile, de données à débit élevé Services de données asymétriques ou symétriques Dispositifs d'utilisateur final, au départ dispositifs de données compatibles carte PC Totale prise en charge des services de données à démarrage immédiat	Utilisateur «vocal» exigeant des services de données Services de données très asymétriques Dispositifs d'utilisateur final, au départ combinés compatibles données La prise en charge des services à démarrage «instantané» reste un problème
Fournisseur de services	Fournisseur de services de données hertziens – Départ de zéro ou fournisseur de services cellulaires évoluant Mobilité et itinérance mondiales	Fournisseur de services téléphoniques cellulaires évoluant vers services de données Mobilité et itinérance mondiales
Technologie	Nouveau PHY et MAC optimisés pour les paquets de données et les antennes adaptatives Bandes au-dessous de 3,5 GHz soumises à licence Architecture orientée paquets Disposition des canaux et commande pour services mobiles multimédias. Basés sur le protocole IP mobile Liaisons montantes et liaisons descendantes de données à haute efficacité Architecture de données à démarrage immédiat	Voir la Recommandation UIT-R M.1457 Bandes au-dessous de 2,7 GHz soumises à licence Architecture orientée circuits évoluant vers le mode paquet sur la liaison descendante Disposition des canaux et commande optimisés pour services téléphoniques mobiles. Basés MAP/SS7 Liaisons descendantes de données à efficacité moyenne, liaisons montantes à faible efficacité Temps de latence reste un problème

3.2.5.2 Avantages de la technologie

Les systèmes RoF sont utilisés lorsque la distance entre les stations BTS et les antennes est si importante qu'il devient difficile de les connecter par câble coaxial, même en utilisant des répéteurs en ligne. La fibre optique est caractérisée par de très faibles affaiblissements d'insertion, ce qui permet d'avoir des longueurs de câble sans répéteurs de plusieurs kilomètres et une très grande largeur de bande: de nombreux signaux RF différents peuvent être acheminés sur une seule fibre. Les systèmes RoF utilisent une modulation analogique simple de signaux optiques sans modulation et démodulation du signal RF. Les canaux des signaux RF peuvent être insérés ou extraits par un circuit optoélectronique direct. Les systèmes RoF ne sont pas sensibles au brouillage électromagnétique et aux problèmes de mise à la terre; la section transversale de la fibre est très faible ce qui permet de grouper plusieurs dizaines de fibres dans un seul et même câble optique; le câble optique est robuste et peut être placé dans des conduits, fixé sur des pylônes ou directement enterré; pour un coût supplémentaire modique, il peut même être revêtu d'une gaine d'acier protectrice.

Dans des configurations microcellulaires où différents systèmes hertziens partagent un même site, les systèmes RoF permettent d'utiliser un traitement centralisé, c'est-à-dire que les têtes RF des

systèmes sont placées à proximité immédiate des antennes et l'équipement de traitement des systèmes hertziens est logé dans une pièce centralisée dont l'environnement est en général contrôlé. Selon les scénarios de déploiement, le traitement centralisé pourrait apporter les avantages suivants: il permet de déployer un grand nombre de répéteurs dans des environnements urbains, diminue le nombre d'installations requises sur le toit des bâtiments, fait qu'il est moins nécessaire d'utiliser des amplificateurs RF de forte puissance qui sont coûteux et améliore la distribution spatiale de la capacité des stations BTS.

Ces avantages, bien que valables pour tous les systèmes hertziens, sont particulièrement importants pour les systèmes IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 et pour les réseaux cellulaires, pour les raisons suivantes:

- Les bandes de fréquences attribuées aux IMT-2000 sont plus élevées que celles attribuées aux systèmes de deuxième génération. De même, on peut raisonnablement penser que les bandes de fréquences qui seront attribuées aux systèmes postérieurs aux IMT-2000 seront plus élevées que celles attribuées aux systèmes de deuxième génération avec des affaiblissements de propagation plus élevés. Il sera donc plus difficile d'assurer une couverture adéquate avec uniquement des macrocellules, de sorte qu'on préférera, pour les systèmes IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000, déployer un plus grand nombre de microcellules.
- Etant donné que les systèmes IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 ont une capacité plus élevée que les systèmes de deuxième génération, on aura peut-être besoin d'un plus grand nombre de cellules pour couvrir une zone géographique donnée. Etant donné qu'il est de plus en plus difficile de mettre en service de nouveaux sites, des solutions comme les systèmes RoF permettent une concentration de stations BTS qui simplifie le déploiement du réseau radioélectrique.
- Par rapport aux systèmes de deuxième génération, la capacité d'une porteuse de systèmes IMT-2000 ou de systèmes postérieurs aux IMT-2000 est très importante, ce qui favorise, pour la couverture radioélectrique, des solutions, comme les systèmes RoF, qui permettent d'adapter la distribution spatiale de la capacité de la porteuse aux exigences propres à la zone de couverture ou au volume de couverture.

3.2.5.3 Questions à examiner

Lorsqu'on utilise un système RoF pour rayonner la ou les mêmes porteuses à partir d'antennes différentes, le transfert entre cellules relevant d'une même station BTS n'est pas nécessaire. Toutefois, il peut y avoir des brouillages dans la zone de recoupement entre cellules dus à la propagation par trajets multiples.

Lorsque les antennes d'un système RoF sont situées loin de part et d'autre de la station BTS, la précision spatiale d'un système de localisation basé sur le système hertzien ne peut pas être meilleure que la distance entre les antennes et la station BTS. Cela risque de diminuer la précision d'un système de localisation basé sur un système IMT-2000, dont l'exactitude est de l'ordre de quelques dizaines de mètres, s'il utilise des procédures de temps d'arrivée différentielles pour déterminer la position relative des terminaux mobiles par rapport à différentes stations BTS.

Par ailleurs, des dispositifs essentiels tels que les modulateurs optiques ou les amplificateurs à faible bruit seront développés ultérieurement.

3.2.6 Réseaux radioélectroniques multibonds

3.2.6.1 Résumé

Les réseaux radioélectriques multibonds sont des réseaux de radiocommunications mobiles qui se caractérisent par l'existence de noeuds radioélectriques (points d'extension) qui assurent des fonctions de retransmission. Ces noeuds radioélectriques peuvent être des terminaux mobiles dotés de fonctionnalités de relais particulières («réseaux multibonds ad hoc») ou de points d'extension fixes qui fonctionnent exclusivement comme des relais («réseaux multibonds structurés»).

TABLEAU 2

Réseaux multibonds ad hoc	Réseaux multibonds structurés
<ul style="list-style-type: none"> – Pas d'installation d'infrastructure fixe supplémentaire. – La couverture dépend de l'existence d'autres terminaux mobiles de relais dans la zone et ne peut pas être planifiée de façon fiable. – Peuvent assurer l'interconnexion entre terminaux mobiles dans une zone et également avec les points d'accès. – Les terminaux mobiles doivent assurer des fonctionnalités de réseau 	<ul style="list-style-type: none"> – Installation d'une infrastructure supplémentaire sous forme de points d'extension. – L'élargissement de la zone de couverture est garantie et planifiée. – Assure une plus grande connectivité au point d'accès et des fonctions de relais pour les communications locales

Les réseaux radioélectriques multibonds peuvent utiliser plusieurs connexions hertziennes successives entre un terminal d'utilisateur et une station de base. Par conséquent, d'autres terminaux d'utilisateur ou des points d'extension fixes améliorent la couverture de la station de base. Les multiples connexions hertziennes successives peuvent être établies dans un système homogène (système cellulaire ou système RLAN) ou dans différents systèmes (par exemple, certains bonds dans un système cellulaire, certains bonds dans un système RLAN).

3.2.6.2 Avantages de la technologie des réseaux radioélectriques multibonds

La Recommandation UIT-R M.1645 donne pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000 des débits de données utiles cibles de 100 Mbit/s (mobilité élevée) et de 1 Gbit/s (faible mobilité). De tels débits de données nécessitent des largeurs de bande de porteuse importantes qui, très vraisemblablement, ne seront disponibles qu'au-dessus de 3 GHz. Compte tenu des largeurs de bande de transmission importantes et des bandes de fréquences utilisées au-dessus de 3 GHz, les gammes de fréquences utilisées par les systèmes postérieurs aux IMT-2000 seront environ dix fois inférieures à celles des systèmes IMT-2000.

Cela a des conséquences au niveau de la couverture et de la capacité:

- Dans les réseaux radioélectriques monobonds classiques il faudrait, compte tenu de la petite taille des cellules, beaucoup de stations de base pour assurer une couverture universelle, ce qui augmenterait les coûts d'infrastructure.
- Du fait de la petite taille des cellules et des débits de données élevés par cellule la capacité de trafic par zone est très élevée. Cette capacité de trafic offerte dépassera vraisemblablement de beaucoup la demande de trafic moyenne par zone, d'où des déploiements de réseaux peu économiques.

La technologie des réseaux radioélectriques multibonds permet d'élargir la couverture assurée par chaque station de base; par ailleurs le réseau radioélectrique peut évoluer pour s'adapter à la capacité de trafic offerte et à la capacité de trafic demandée. Cette technologie tire parti du déploiement rapide des réseaux hertziens, pour un moindre coût.

3.2.7 Stations HAPS

Les stations HAPS sont situées sur un objet à une altitude comprise entre 20 et 50 km, en un point fixe nominal spécifié par rapport à la Terre. Dans les Régions 1 et 3, les bandes 1 885-1 980 MHz, 2 010-2 025 MHz et 2 110-2 170 et, dans la Région 2, les bandes 1 885-1 980 MHz et 2 110-2 160 MHz peuvent être utilisées par des stations HAPS qui servent de stations de base pour assurer les IMT-2000.

Une plate-forme HAPS peut se composer par exemple d'une peau multicouche légère, extrêmement résistante contenant de l'hélium en flottaison, d'un système de maintien en position comprenant un

GPS et un système de propulsion évolué, d'une charge utile de télécommunication, de panneaux solaires en silicone amorphe très minces pour l'alimentation de jour et de piles à combustible régénérables pour l'alimentation de nuit. Les technologies de base sont des piles solaires ou des piles à combustible à grande efficacité qui sont à la fois légères et durables, un dispositif d'étanchéité imperméable à l'hélium à fibres ultraminces de forte puissance, des techniques de gestion et de contrôle de pression thermique ainsi que des antennes-réseaux à commande de phase évoluées et des technologies MMIC (circuit intégré monolithique hyperfréquences).

Une station HAPS est conçue pour une durée de vie de cinq à dix ans. Au-delà, le service est limité par la dégradation graduelle des piles solaires et des piles à combustible, par la fatigue structurelle et la décomposition des modules de stockage des gaz. Grâce aux progrès réalisés dans la conception de matériaux composites résistant aux rayons ultraviolets, légers et à grande résistance, de piles à combustible, de piles solaires et de dispositifs à semi-conducteurs compacts grande vitesse, la durée de vie des stations HAPS de deuxième génération va augmenter.

Un système de Terre IMT-2000 utilisant des stations HAPS se compose d'un équipement de communication placé sur une ou plusieurs stations HAPS situées, au moyen d'une technologie de maintien en position, en des points nominalement fixes de la stratosphère (à environ 20 km d'altitude), d'une ou de plusieurs stations de commande/de commutation au sol et d'un grand nombre de terminaux d'accès d'abonné fixes ou mobiles. Le système utilise les technologies de transmission radioélectrique (RTT) qui respectent les exigences des IMT-2000 pour offrir aux stations fixes ou mobiles une capacité de communication haute densité et grande vitesse. L'architecture HAPS ressemble beaucoup, en théorie, à un très grand pylône terrestre qui est sectorisé en centaines de cellules.

La charge utile de télécommunications HAPS se compose d'un réflecteur léger multifaisceaux ou d'antennes-réseaux à commande de phase, d'antennes d'émission/de réception pour les liaisons passerelles avec des stations de commutation au sol et d'un très grand nombre de processeurs qui assurent les fonctions de réception, de multiplexage, de commutation et de transmission. La charge utile peut utiliser diverses techniques et normes d'accès multiple (par exemple, AMRT, AMRC) respectant les exigences des IMT-2000. Elle peut être conçue pour fonctionner comme seule station d'une infrastructure autonome (le réseau de stations de base équipées de tours est remplacé par un «réseau de stations de base dans le ciel») ou peut être intégrée à un système qui utilise les tours des stations de base de Terre classiques, les satellites et les stations HAPS.

Un système HAPS assurera une couverture cellulaire mobile et fournira des services hertziens fixes dans plusieurs régions qu'il s'agisse de zones (urbaines) à forte densité ou de zones (rurales) à faible densité. Avec les antennes d'émission/de réception à gain élevé utilisées dans les systèmes HAPS, on prévoit un nombre important de cellules au sol agencées de la même façon que dans le cas d'un système cellulaire classique. Un système cellulaire HAPS couvrira vraisemblablement trois types de zone:

- haute densité (urbaine);
- densité moyenne (suburbaine);
- faible densité.

Le système réaffecte de façon dynamique la capacité entre les différentes cellules, minute par minute, de façon à concentrer la capacité là où elle est le plus nécessaire, à un moment donné. Par exemple, le système HAPS peut affecter une capacité supplémentaire pour acheminer le trafic automobile aux heures de pointe, puis réaffecter cette capacité à un stade lors d'un événement ou d'une manifestation sportive en soirée. Les systèmes HAPS ont donc une plus grande souplesse que les systèmes classiques et peuvent être utilisés avec les systèmes de Terre classiques pour éviter des surcharges dans les points d'accès publics.

Il s'agit là d'une solution propre aux systèmes HAPS. D'autres solutions sont possibles.

3.3 Terminaux mobiles

3.3.1 Architecture des terminaux

Du point de vue de l'utilisateur, les IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 représentent une évolution fondamentale de leurs attentes. En effet, l'utilisateur n'attend plus simplement un ensemble «nouveau et amélioré» mais «statique» d'applications et de services, mais un flux continu et dynamique d'applications, de fonctionnalités et de services nouveaux, obéissant à «la loi de Moore».

Pour ce faire, on aura besoin d'un ensemble performant de plates-formes programmables polyvalentes mises au point par une large communauté de concepteurs, vigoureuse et dynamique.

On suppose que les nouveaux équipements d'utilisateur mobile ont les caractéristiques de plates-formes programmables polyvalentes en:

- intégrant des processeurs universels de forte puissance dont les prix ou les performances augmentent de façon spectaculaire selon une loi de Moore;
- fournissant une plate-forme programmable souple que l'on peut utiliser à des fins toujours plus diverses.

La convergence d'une connectivité hertzienne et d'une plate-forme programmable polyvalente exacerbe certains problèmes existants et en pose de nouveaux, de sorte que les facteurs environnementaux ainsi que les facteurs d'évolution de la technologie et du marché classiques influenceront l'architecture de ces dispositifs.

Les facteurs économiques, la sécurité et le respect de la sphère privée font partie des facteurs environnementaux importants.

Parallèlement aux facteurs environnementaux, il y a les facteurs d'évolution du marché et de la technologie classiques: le facteur d'entraînement lié à la valeur pour les utilisateurs, aux exigences de sécurité et les vecteurs technologiques.

Pour conserver l'intégrité de l'espace réseau et de l'espace utilisateur, le logiciel de communication sera «découplé» et mis en oeuvre parallèlement aux applications d'utilisateur qui sont écrites sur un processeur polyvalent tournant dans un environnement polyvalent lui aussi. Cette segmentation permet une viabilité économique optimale car la mise au point d'applications peut évoluer indépendamment des normes relatives aux communications et la sécurité est améliorée car les espaces utilisateur et réseau sont autonomes.

On évolue parallèlement vers une autonomie du sous-système radio, du sous-système application et des sous-systèmes mémoire pour répondre aux exigences environnementales triples liées à la fourniture de produits et de services économiquement viables, tout en maintenant la sécurité du réseau et de l'entreprise ainsi que la souveraineté de l'utilisateur sur l'espace «applications» et le caractère privé des données. Comme le dit le proverbe, «les bons comptes font les bons amis».

3.3.2 Microsystèmes électromécaniques (MEMS) RF

Les futurs systèmes de communications personnelles devront être légers, petits et consommer peu d'énergie. Les exigences liées aux terminaux IMT-2000, à savoir petite taille, multiplicité des bandes de fréquences, fonctionnement multimode et complexité fonctionnelle, nécessitent l'utilisation de dispositifs frontaux RF très intégrés et d'un système compact à circuits intégrés. Malgré de nombreuses années de recherche, les composants passifs discrets largement utilisés qui sont basés sur des solutions électroniques ne peuvent pas facilement satisfaire les exigences susmentionnées associées aux futurs terminaux IMT-2000.

Les systèmes MEMS RF sont des micros dispositifs (ou systèmes) intégrés combinant des composants électroniques et des composants mécaniques fabriqués à l'aide d'une technique de traitement par lots compatible avec un circuit intégré. On peut ainsi avoir des dispositifs petits, légers, consommant peu d'énergie et très performants qui remplaceront des composants RF passifs discrets comme les oscillateurs VCO, les filtres FI, les filtres RF et les duplexeurs. Les systèmes à circuits intégrés utilisant cette technologie permettent de réduire de 1/10 la taille physique de l'équipement mis en oeuvre.

Etant donné que les utilisateurs des futurs systèmes de communication hertziens poussent sans cesse les fabricants de combinés à ajouter davantage de fonctionnalités, ces fabricants doivent faire des compromis entre les contraintes de coût, de taille, de puissance et de conditionnement. La technologie MEMS RF devrait constituer un progrès décisif et permettre de satisfaire les exigences liées aux futurs terminaux. Les systèmes MEMS RF pour les terminaux futurs seront commercialisés dans les 5 prochaines années.

3.3.3 Nouvelles interfaces d'utilisateur novatrices

La réaction de l'utilisateur à une nouvelle technologie de télécommunication dépend non seulement des services offerts mais aussi des possibilités d'utilisation, de la conception et de la qualité des terminaux. L'informatique «vestimentaire» est un sujet d'étude très en vogue dans les universités du monde entier et porteur de nouvelles idées pour les interfaces homme-machine qui s'appliquent également aux terminaux mobiles.

La messagerie textuelle est aujourd'hui l'application de données «tueuse» et constitue un moyen de communication très efficace du point de vue de l'utilisation des fréquences comparé, par exemple, à une communication téléphonique. Le prochain boom devrait être celui de la messagerie multimédia mais ce type de messagerie nécessite un grand écran. Il est difficile d'avoir dans un seul et même petit terminal un système de saisie de texte commode et un écran suffisamment large.

A ce jour, un grand nombre des solutions offertes pour la saisie de texte ne sont pas l'objet de normes ouvertes mais sont des méthodes protégées par des droits de propriété intellectuelle. Sur les claviers physiques proposés on a souvent tendance à ajouter des fonctionnalités et/ou des boutons au clavier de numérotation classique plutôt que de diminuer le nombre de touches, ce qui pourrait être l'objectif pour minimiser l'espace requis.

Il est manifestement nécessaire de procéder à une harmonisation et de recommander l'utilisation de normes communes ouvertes sur les interfaces dans ce domaine. Par exemple, si un utilisateur s'habitue à un type de clavier et l'utilise régulièrement et avec compétence, il sera frustré si son prochain téléphone (qu'il s'agisse d'une nouvelle version ou d'une autre marque) a une interface d'utilisateur légèrement différente; il lui faudra alors recommencer le processus d'apprentissage.

3.3.3.1 Exemple de nouvelle interface physique

L'Annexe 13, à titre d'exemple, décrit une méthode qu'il est proposé d'utiliser pour combiner sur un seul et même terminal mobile compact un système de saisie de texte et un grand écran d'affichage. La présentation, en annexe, du clavier mondial optimisé pour les petits dispositifs hertziens (GKOS, *global keyboard optimized for small wireless devices*) placé sur la face arrière, montre que l'on peut encore trouver des types d'interfaces d'utilisateur physiques complètement nouveaux et encourage les fabricants à étudier davantage cette question et éventuellement à améliorer encore le concept proposé pour obtenir une norme commune pour ce type de solution. Le concept est une norme ouverte qui a été publiée pour la première fois le 5 octobre 2000. Pour tout complément d'information sur le clavier GKOS, veuillez consulter l'adresse: <http://gkos.com>.

3.3.4 Processeurs, terminaux et réseaux reconfigurables

3.3.4.1 Résumé de la technologie

Etant donné qu'il est nécessaire de traiter les données au niveau des bits notamment pour l'entrelaçage, la correction et la détection des erreurs, le chiffrement et le cryptage dans les systèmes de communications mobiles, en particulier le traitement numérique en bande de base des terminaux mobiles et des stations de base, on a besoin d'un processeur capable d'effectuer un traitement des données au niveau des bits à grande vitesse. Or, les processeurs polyvalents comme les CPU ou les DSP ne peuvent pas assurer ce type de traitement. On a donc besoin d'un processeur intégré bien conçu doté d'une unité reconfigurable permettant d'exécuter les instructions données par l'utilisateur. Ce processeur dispose d'une unité d'exécution particulière pour ce type d'instructions personnalisées, différente des unités d'exécution normales comme les unités d'exécution pour entiers. Cette unité d'exécution particulière peut être conçue de façon à pouvoir effectuer un traitement des données au niveau des bits et elle est réalisée avec des circuits reconfigurables car les instructions personnalisées varient d'une application à l'autre.

Comme indiqué dans l'Annexe 14, les informations de configuration d'un processeur reconfigurable type définissent les connexions entre les éléments de circuit dans l'unité d'exécution ainsi que les fonctions de ces éléments, les informations de configuration étant fournies par la mémoire de configuration. Ce processeur permet également d'exécuter diverses instructions personnalisées en changeant l'adresse correspondante de la mémoire de configuration. Les informations de configuration peuvent être mises à jour en un cycle d'horloge et la mémoire de configuration peut contenir un ensemble d'informations de configuration. Ces informations peuvent être réécrites en cours d'exécution, ce qui permet aux utilisateurs de définir des instructions autres que les instructions prédéfinies. Dans un prototype classique, tel que celui décrit dans l'Annexe 14, la longueur des informations de configuration est de 256 bits, la mémoire de configuration peut contenir 32 ensembles d'informations de configuration et la taille du circuit reconfigurable est d'environ 50 K portes, mémoire de configuration comprise, occupant plusieurs % de la taille entière du processeur. Cette technologie s'applique également aux stations de base.

3.3.4.2 Avantages de la technologie

Etant donné que ce type de processeur dispose d'une unité reconfigurable qui peut assurer de nombreux types de traitement de données au niveau des bits, il peut être utilisé, avec de bons résultats, pour diverses applications pour systèmes de communications mobiles. Par exemple, les performances d'un processeur doté d'une unité reconfigurable pour traiter un algorithme en norme de cryptage des données (DES, *data encryption standard*) sont six fois meilleures que celles d'un processeur qui ne dispose pas d'une unité reconfigurable. Le processeur peut également être utilisé avec des systèmes de communication hertziens, par exemple pour le traitement numérique en bande de base Bluetooth – correction d'erreur directe (CED), contrôle de redondance cyclique (CRC) ou embrouillage à une vitesse plusieurs fois supérieure à celle des processeurs classiques.

3.3.4.3 Questions à examiner

L'unité reconfigurable est conçue de façon à pouvoir assurer un traitement des données au niveau des bits et à pouvoir s'adapter aux diverses tâches liées à ce type de traitement. Elle peut être utilisée pour effectuer certaines opérations de traitement nécessaires pour les systèmes de communication hertziens. Il ne faut pas oublier un autre type de traitement numérique en bande de base où les

données sont traitées octet par octet ou mot par mot (et non bit par bit). Avec ces types de traitement de données, en particulier pour les systèmes IMT-2000 améliorés ou les systèmes postérieurs aux IMT-2000, il faudra peut-être élargir l'unité reconfigurable ou adopter un type différent d'unité reconfigurable. On sera peut-être amené à utiliser inévitablement des dispositifs en silicone de très grande taille et il faudra donc examiner avec soin des questions comme l'efficacité globale, la taille des portes, la consommation d'énergie et les possibilités d'application.

4 Conclusions

Le présent Rapport donne des informations utiles sur certains des moyens technologiques attendus: multiplication des technologies IP, augmentation de la puissance de traitement du signal dans les semi-conducteurs et de la capacité de transport dans les réseaux. Divers domaines sont concernés: nouvelles technologies radioélectriques ayant une incidence sur l'utilisation du spectre, réseau d'accès et interfaces radioélectriques, terminaux mobiles et technologies liées aux systèmes.

Ces technologies devraient être examinées dans le cadre des activités de recherche-développement mais pas nécessairement utilisées pour le développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000. Le présent Rapport ne donne pas une liste exhaustive des technologies qui pourraient être utilisées pour le développement futur des IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000, mais il convient de noter que d'autres technologies naissantes, qui ne sont pas prises en considération dans le présent Rapport, seront examinées elles aussi.

5 Terminologie, abréviations

Le Tableau 3 explique la terminologie utilisée pour les technologies de Terre des systèmes IMT-2000 (existants et améliorés) et pourra être utile pour comprendre la genèse de certaines des questions examinées dans le présent Rapport.

TABLEAU 3

Interfaces radioélectriques de Terre des IMT-2000

Désignation complète	Désignations courantes
AMRC IMT-2000 Etalement direct	UTRA FDD WCDMA UMTS
AMRC IMT-2000 Multiporteuse	CDMA2000 1X et 3X CDMA2000 1xEV-DO CDMA2000 1xEV-DV
AMRC IMT-2000 DRT (Code temporel)	UTRA TDD 3,84 Mélément/s débit d'éléments élevé, UTRA TDD 1,28 Mélément/s débit d'éléments faible, (TD-SCDMA) UMTS
IMT-2000 AMDC Monoporteuse	UWC-136 EDGE
IMT-2000 AMRF/AMRT (Fréquence-temps)	DECT

La liste ci-après d'abréviations, avec leur signification, peut également s'avérer utile.

AA	Antenne adaptative (<i>adaptive antenna</i>)
AAA	Authentification, autorisation, comptabilité (<i>authentication, authorization, accounting</i>)
ALU	Unité arithmétique et logique (<i>arithmetic-and-logic unit</i>)
AMC	Modulation et codage adaptatifs (<i>adaptive modulation and coding</i>)
API	Interface de programmation d'application (<i>application programming interface</i>)
ARPU	Revenu moyen par utilisateur (<i>average revenue per user</i>)
BAC	Composante d'accès de base (<i>basic access component</i>)
BAN	Réseau d'accès de base (<i>basic access network</i>)
BASM	Gestionnaire de signalisation d'accès de base (<i>basic access signalling manager</i>)
BMM	Module de gestion de largeur de bande (<i>bandwidth management module</i>)
BS	Station de base (<i>base station</i>)
BSI	Interface de station de base (<i>base station interface</i>)
CCN	Réseau central commun (<i>common core network</i>)
CED	Correction d'erreur directe
C/I	Rapport porteuse/brouillage (<i>carrier-to-interference ratio</i>)
CMM	Module de gestion de configuration (<i>configuration management module</i>)
C/N	Rapport porteuse/bruit (<i>carrier-to-noise ratio</i>)
CoMM	Contrôle du mode de coopération (<i>cooperative mode monitoring</i>)
CRC	Contrôle de redondance cyclique (<i>cyclic redundancy check</i>)
CSI	Information d'état du canal (<i>channel status information</i>)
CU	Unité centrale (<i>central unit</i>)
DES	Norme de cryptage des données (<i>data encryption standard</i>)
DRF	Duplex par répartition en fréquence
DRT	Duplex à répartition dans le temps
GKOS	Clavier mondial optimisé pour les petits dispositifs hertziens (<i>global keyboard optimized for small wireless devices</i>)
HAPS	Station placée sur une plate-forme à haute altitude (<i>high altitude platform station</i>)
H-ARQ	ARQ hybride (<i>hybrid ARQ</i>)
HDRPN	Noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (<i>high data rate packet nodes</i>)
HRM	Gestionnaire de reconfiguration de rattachement (<i>home reconfiguration manager</i>)
IMSI	Identité internationale d'abonné mobile (<i>international mobile subscriber identity</i>)
IP	Protocole Internet (<i>Internet Protocol</i>)
LMM	Gestion de mobilité locale (<i>local mobility management</i>)
LOC	Composante de localisation (<i>locator component</i>)

LRM	Gestionnaire de ressources local (<i>local resource manager</i>)
MCS	Système de modulation et de codage (<i>modulation and coding scheme</i>)
MEMS	Microsystèmes électromécaniques (<i>micro-electro-mechanical systems</i>)
MIMM	Module d'identification et de contrôle de mode (<i>mode identification & monitoring module</i>)
MIMO	Entrées multiples, sorties multiples (<i>multiple-input multiple-output</i>)
MNSM	Module de commutation et de négociation de mode (<i>mode negotiation and switching module</i>)
MUT	Terminal d'utilisateur multiservices (<i>multiservice user terminal</i>)
NI	Interface de réseau (<i>network interface</i>)
PAN	Réseau personnel (<i>personal area network</i>)
PDA	Assistant numérique personnel (<i>personal digital assistant</i>)
PRM	Gestionnaire de reconfiguration indirect (<i>proxy reconfiguration manager</i>)
RAN	Réseau d'accès radioélectrique (<i>radio access network</i>)
RAT	Technologie d'accès radioélectrique (<i>radio access technology</i>)
RAU	Unité d'antenne distante (<i>remote antenna unit</i>)
RHAL	Couche d'abstraction matérielle radio (<i>radio hardware abstraction layer</i>)
RoF	Radio sur fibre (<i>radio on fibre</i>)
RRM	Gestion des ressources radioélectriques (<i>radio resource management</i>)
RSSI	Indication d'intensité du signal reçu (<i>received signal strength indication</i>)
SDP	Protocole de description de session (<i>session description protocol</i>)
SDR	Système radioélectrique défini par logiciel (<i>software defined radio</i>)
SDRC	Contrôleur de reconfiguration et de téléchargement de logiciels (<i>software download and reconfiguration controller</i>)
SDR-CF	Couche cadre centrale SDR (<i>SDR core framework layer</i>)
SHO	Transfert souple (<i>soft hand-off</i>)
SIP	Protocole de début de session (<i>session initiation protocol</i>)
S/N	Rapport signal/bruit (<i>signal-to-noise ratio</i>)
SPRE	Stock de profils et de téléchargement de logiciels (<i>software download and profile repository</i>)
SRM	Gestionnaire de reconfiguration serveur (<i>serving reconfiguration manager</i>)
SWD	Diversité à commutation (<i>switched diversity</i>)
TRSA	Zone de reconfiguration de terminal (<i>terminal reconfiguration serving area</i>)
UE	Équipement d'utilisateur (<i>user equipment</i>)
UWB	Ultralarge bande (<i>ultra-wideband</i>)
WAP	Protocole d'application hertzien (<i>wireless application protocol</i>)

Annexe 1

Technologies permettant d'améliorer l'efficacité de la largeur de bande

1 Systèmes avec bouquets de cellules

1.1 Introduction

Dans les zones piétonnières et à l'intérieur des bâtiments, la demande de trafic varie dans des proportions importantes, la mobilité de l'utilisateur est grande et les types de trafic sont différents. Compte tenu de cet environnement très complexe, on aura besoin d'algorithmes évolués de RRM. Il sera intéressant d'avoir une unité intelligente centrale optimisant l'utilisation des ressources.

Un système à bouquets de cellules se compose d'un nombre limité de RAU qui sont connectées à une entité fonctionnelle appelée unité centrale (CU). Toute l'intelligence ainsi que des parties importantes des opérations de traitement du signal sont situées dans l'unité centrale. Les unités RAU sont des unités d'antenne simples pouvant émettre et recevoir des signaux d'utilisateur. La centralisation locale au niveau de l'unité centrale permet d'utiliser des algorithmes quasi optimaux pour la gestion des ressources car l'unité centrale connaît parfaitement l'attribution de toutes les ressources attribuées à un moment donné. L'utilisation des ressources est donc optimale dans un système à bouquets de cellules. Par ailleurs, il est possible d'améliorer ce type de système pour que le réseau RAN puisse détecter les changements, prendre des décisions intelligentes et appliquer des mesures appropriées, minimisant ou maximisant l'effet des changements.

Etant donné que les systèmes postérieurs aux IMT-2000 offriront non plus des services vocaux mais des services à haut débit de données, il faut accroître la capacité des systèmes. Les systèmes à bouquets de cellules sont tout indiqués pour les applications liées aux points d'accès publics. La zone de couverture de ces systèmes peut être facilement augmentée et prendre la forme géométrique souhaitée, quelle qu'elle soit. L'évolution vers des cellules de plus petite taille rendra le processus de planification du réseau d'accès radioélectrique intrinsèquement plus difficile et plus coûteux. Les systèmes à bouquets de cellules peuvent coexister avec des systèmes préexistants à microcellules et s'ajoutent à d'autres systèmes à bouquets de cellules dans un réseau hertzien. Les problèmes de conception liés à l'architecture du réseau RAN et les algorithmes RRM pour les systèmes à bouquets de cellules sont autant de questions à examiner.

1.2 Caractéristiques des systèmes

Les caractéristiques et les avantages des systèmes à bouquets de cellules sont décrits et comparés avec ceux des systèmes classiques.

– *Architecture centralisée au niveau local*

Les systèmes à bouquets de cellules se composent d'une unité centrale et de plusieurs unités RAU qui sont connectées à l'unité centrale. Etant donné que tous les émetteurs-récepteurs sont installés dans l'unité centrale, toutes les ressources en canaux sont contrôlées par cette unité. Ces systèmes ont donc une architecture localement centralisée dans laquelle l'unité centrale contrôle toutes les unités RAU. Ils se différencient des systèmes cellulaires classiques par le fait qu'il y a une ou plusieurs antennes sur le site d'une cellule.

– *Structure cellulaire hiérarchique du réseau RAN*

Les systèmes à bouquets de cellules peuvent être considérés comme la couche «cellule» la plus basse qui, dans une structure cellulaire hiérarchique, couvre les zones à forte densité de trafic. Ils peuvent coexister avec les systèmes à macrocellules existantes ainsi qu'avec d'autres systèmes à bouquets de cellules. Ces derniers systèmes sont tout indiqués pour assurer des services de transmission de données à grande vitesse dans les zones urbaines ou à l'intérieur de bâtiments.

– *Distribution dynamique de la charge de trafic*

Les systèmes à bouquets de cellules peuvent disperser la charge de trafic du système concentrée sur de petites régions. Lorsque la charge de trafic est concentrée dans l'une des unités RAU, l'unité centrale maintient la qualité de service en attribuant davantage de canaux à cette unité RAU.

– *Gestion dynamique des ressources radioélectriques*

Les systèmes à bouquets de cellules peuvent gérer dynamiquement les ressources de canaux radioélectriques étant donné que l'unité centrale peut synchroniser toutes les unités RAU. Les émetteurs-récepteurs étant dans l'unité centrale, cette unité peut contrôler toutes les ressources de canaux. Le prêt de canaux entre unités RAU est facile à gérer. En cas de variations importantes du trafic, la RRM devient dynamique et adaptative.

– *Commande adaptative de la couverture*

Dans les systèmes à bouquets de cellules, la couverture peut être étendue facilement et le réseau planifié selon les prévisions. Pour ce faire, on implante des unités RAU supplémentaires, là où on a besoin d'étendre la zone de couverture. Par ailleurs, on peut résoudre le problème des «trous» dans la zone de couverture en installant des unités RAU de façon souple, compte tenu de la situation du réseau radioélectrique.

1.3 Algorithme de gestion requis

Il y a deux types d'algorithmes nécessaires pour l'exploitation et la construction des systèmes à bouquets de cellules, l'un pour la gestion à l'intérieur d'un bouquet de cellules et l'autre pour la gestion entre bouquets de cellules adjacents.

– *A l'intérieur d'un bouquet de cellules*

– Multidiffusion dynamique

On utilise un système de multidiffusion dynamique pour améliorer les performances du système. On peut utiliser un système de sélection des unités RAU comme technique de multidiffusion dynamique. Avec ce système de sélection, on réduit les brouillages en transmettant le signal à travers les unités RAU qui ont été choisies. On a donc besoin d'un algorithme de sélection optimisé.

– Commande adaptative de la couverture assurée par les unités RAU

La commande de la couverture permet de transférer une charge de trafic importante d'une unité RAU à une autre, ce qui évite une dégradation de la qualité de service et permet de fournir facilement des services de transmission de données à grande vitesse. La charge de trafic dans chaque unité RAU doit être mesurée et, pour ce faire, on a besoin d'un algorithme permettant d'adapter la couverture assurée par les unités RAU en fonction des variations de la charge de trafic.

– Transfert entre unités RAU à l'intérieur d'un bouquet de cellules

Lorsqu'un utilisateur entre dans une unité RAU adjacente du système, avec multidiffusion dynamique, un transfert entre unités RAU est nécessaire. Ce transfert est inutile dans un système sans multidiffusion dynamique, c'est-à-dire lorsque le signal d'utilisateur est diffusé à l'intérieur d'un bouquet de cellules. Le passage d'une unité RAU à une autre n'est nécessaire que si une seule unité RAU a été retenue pour l'émission à un moment quelconque. Si l'émission du signal se fait via plusieurs unités RAU, le groupe des unités RAU sélectionnées doit être actualisé.

- Techniques de macrodiversité

Les trajets de propagation des ondes radioélectriques entre plusieurs unités RAU et un terminal mobile sont divers et multiples. La diversité de trajet peut être utilisée car les signaux reçus empruntent différents trajets faisant intervenir différentes unités RAU. Dans ce cas, on a besoin d'un algorithme pour combiner les signaux reçus afin de réaliser un gain de macrodiversité.

- Technologies radio sur fibre (RoF) pour les liaisons entre les unités RAU et l'unité centrale

Les technologies RoF sont nécessaires pour transférer des signaux entre unités RAU et l'unité centrale. Elles peuvent être utilisées dans un système de transmission où les signaux radioélectriques modulent le signal optique. Toutes les unités RAU et l'unité centrale auront besoin de dispositifs et d'algorithmes pour pouvoir convertir les signaux à modulation optique en signaux à modulation radioélectrique.

- *Entre bouquets de cellules*

- Assignation dynamique des ressources

L'assignation dynamique des ressources permet une utilisation efficace des ressources radioélectriques. Des techniques d'assignation dynamique des ressources telles que l'attribution dynamique des fréquences ou la commande de puissance permettent de réduire les brouillages entre bouquets de cellules et améliorent les performances du système. La situation du réseau doit être évaluée en permanence pour gérer dynamiquement les ressources.

- Commande adaptative de la couverture assurée par les bouquets de cellules

Cette technique permet de répartir une charge de trafic élevée entre différents bouquets de cellules. Cette répartition de la charge de trafic par commande de la zone de couverture permet de fournir un service de données à grande vitesse. Tout comme dans le cas des unités RAU, on a donc besoin d'un algorithme permettant d'adapter la zone de couverture en fonction des variations de la charge de trafic.

- Transfert entre bouquets de cellules ainsi qu'entre bouquets de cellules et macrostations de base

Le transfert entre bouquets de cellules est nécessaire lorsqu'un utilisateur traverse plusieurs bouquets de cellules relevant de différentes unités centrales. Lorsque l'utilisateur passe de la zone de service d'un bouquet de cellules à celle d'une macrostation de base, un transfert entre les différentes couches du système est aussi nécessaire.

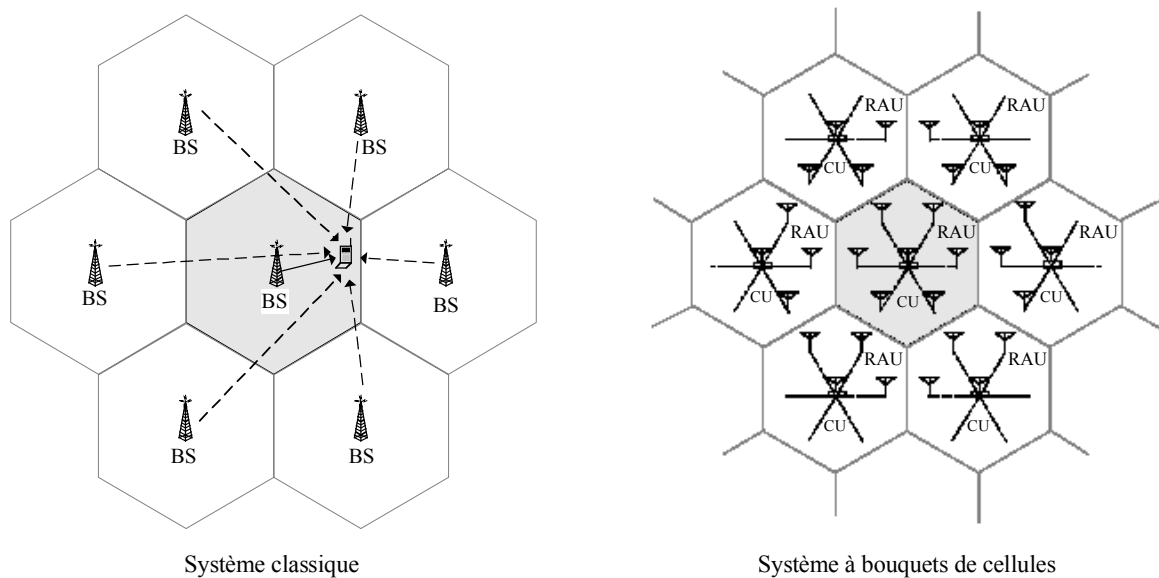
1.4 Analyse illustrative de la capacité des systèmes à bouquets de cellules

Dans le présent paragraphe, on évalue la capacité des systèmes à bouquets de cellules en appliquant la technologie aux réseaux d'accès radioélectrique AMRC. La plupart des études consacrées à ces systèmes cherchaient à améliorer l'efficacité du partage des ressources dans les systèmes à largeur de bande limitée (systèmes AMRF ou AMRT) [Ariyavisitakul et autres, 1996]. Un autre avantage des systèmes à bouquets de cellules est qu'ils permettent de réduire l'affaiblissement sur le trajet entre le terminal et les unités RAU, ce qui améliore la capacité dans des systèmes limités par les brouillages, comme les systèmes AMRC. Lorsqu'on utilise des systèmes à bouquets de cellules dans des réseaux d'accès radioélectrique AMRC, on peut réduire la puissance brouilleuse sur la liaison montante et augmenter ainsi la capacité [Spilling et autres, 1999]. Dans les systèmes de la prochaine génération, il faudra utiliser au mieux les ressources radioélectriques sur la liaison descendante plus que sur la liaison montante en raison de l'asymétrie du trafic. On calcule et on expose dans le présent paragraphe le gain de capacité sur la liaison descendante qu'offrent les systèmes à bouquets de cellules par rapport aux systèmes cellulaires classiques.

1.4.1 Modèle

Les systèmes à stations de base classiques et les systèmes à bouquets de cellules dans les réseaux RAN AMRC sont examinés. Les systèmes à bouquets de cellules se composent d'une unité centrale et de plusieurs unités RAU. Dans les systèmes classiques, une cellule comprend une station de base mais plusieurs unités RAU avec une unité centrale dans les systèmes à bouquets de cellules. On modélise les deux types de système en localisant respectivement les stations de base et les unités centrales au centre d'une grille hexagonale (voir la Fig. 4).

FIGURE 4
Configuration des systèmes



2038-04

Dans la mesure des performances, on intègre la probabilité d'interruption et la puissance d'émission de la station de base. Dans un système classique, le rapport E_b/N_0 à la réception sur la liaison descendante peut s'exprimer comme suit:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{i,j} = \frac{P_{i,j} / L(d_{i,j})}{I_{sc} + I_{oc} + N_0 W} \cdot \frac{W}{R_i} \quad (1)$$

où:

- i : indice du terminal
- j : indice de la station de base
- $P_{i,j}$: puissance attribuée au $i^{\text{ème}}$ terminal dans la $j^{\text{ème}}$ station de base
- W : largeur de bande d'étalement
- R_i : débit de données
- $N_0 W$: puissance de bruit thermique
- $L(d_{i,j})$: affaiblissement sur le trajet entre la $j^{\text{ème}}$ station de base et le $i^{\text{ème}}$ terminal (y compris le gain d'antenne).

Dans les systèmes à bouquets de cellules, le rapport E_b/N_0 peut s'exprimer comme suit:

$$\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{i,j} = \sum_{k=0}^{\text{Nombre d'unités RAU}} \left(\frac{P_{i,(k,j)} / L(d_{i,(k,j)})}{I_{sc, sr} + I_{sc, or} + I_{oc} + NoW} \cdot \frac{W}{R_i} \right) \quad (2)$$

où:

i : indice du terminal

k : indice de l'unité RAU

j : indice de l'unité centrale

$P_{i,(k,j)}$: puissance attribuée au $i^{\text{ème}}$ terminal à la $k^{\text{ème}}$ unité RAU de la $j^{\text{ème}}$ unité centrale

$P_{(k,j)}$: puissance d'émission totale de la $k^{\text{ème}}$ unité RAU de la $j^{\text{ème}}$ unité centrale

$L(d_{i,(k,j)})$: affaiblissement sur le trajet entre le $i^{\text{ème}}$ terminal et la $k^{\text{ème}}$ unité RAU de la $j^{\text{ème}}$ unité centrale (y compris le gain d'antenne)

$$I_{sc, sr} = (1 - \rho_{sr})(P_{(k,j)} - P_{i,(k,j)}) / L(d_{i,(k,j)})$$

niveau de brouillage provenant de la même unité RAU dans un bouquet de cellules

$$I_{sc, or} = (1 - \rho_{or}) \sum_{t \neq k}^{\text{Nombre d'unités RAU}} P_{(t,j)} / L(d_{i,(t,j)})$$

niveau de brouillage provenant de différentes unités RAU à l'intérieur d'un bouquet de cellules.

Dans les systèmes à bouquets de cellules, on peut appliquer la technique de combinaison maximale des rapports utilisant la macrodiversité entre les unités RAU pour améliorer le rapport E_b/N_0 à la réception. Une combinaison maximale des rapports idéale est prise pour hypothèse dans l'équation ci-dessus.

Dans un système cellulaire classique, le brouillage reçu peut être subdivisé en brouillage dans la même cellule et brouillage dans une autre cellule (voir l'équation (1)). Dans les systèmes à bouquets de cellules, le brouillage dans la même cellule peut être considéré comme la somme des deux brouillages différents: le brouillage reçu provenant de la même unité RAU dans un bouquet de cellules $I_{sc, sr}$, et le brouillage provenant de différentes unités RAU dans un bouquet de cellules $I_{sc, or}$. Les signaux provenant de différentes unités RAU qui empruntent d'autres trajets peuvent être moins orthogonaux par rapport aux signaux utiles que ceux provenant de la même unité RAU. Cette réduction d'orthogonalité est examinée dans l'équation (2).

Par interruption, on entend la situation dans laquelle une station de base (ou une unité RAU dans un système à bouquets de cellules) n'a pas suffisamment de puissance pour maintenir le rapport E_b/N_0 à la réception au niveau requis. La probabilité d'interruption peut donc être définie comme suit:

$$P_{\text{interruption}} = P\left(\left(\frac{E_b}{N_0}\right)_i < \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} \mid P_{TX} \geq \text{Puissance d'émission maximale de l'unité RAU ou de la BS}\right) \quad (3)$$

1.4.2 Résultats

On procède à une simulation par ordinateur pour évaluer les performances. On choisit comme modèle un système DRF-AMRC large bande. Les paramètres du système et les valeurs par défaut fixées pour l'analyse sont donnés dans le Tableau 4.

Les systèmes à bouquets de cellules ont une unité centrale et sept unités RAU. Chaque unité RAU est située à une distance du centre égale aux 2/3 du rayon. Le modèle de simulation de Monte-Carlo comprend deux niveaux et les données provenant de la cellule centrale sont collectées pour les

statistiques. La puissance d'émission maximale de la station de base est de 20 W dans les systèmes à bouquets de cellules comme dans les systèmes classiques. On considère que la puissance d'émission de chaque unité RAU dans les systèmes à bouquets de cellules est limitée à 20/7 W.

TABLEAU 4

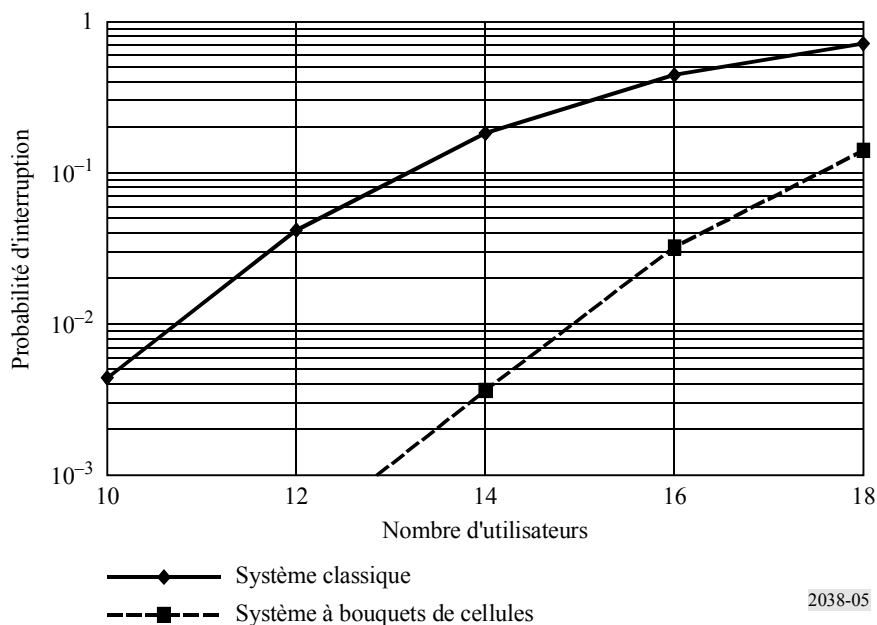
Paramètres appliqués du système

Paramètre	Valeur
Rayon de la cellule	1 km
Débit d'éléments	3,84 Mélément/s
Facteur d'occultation	8 dB
Rapport de puissance du canal d'information du système	0,15
Gain d'antenne	15 dBi
Débit de données	64 kbit/s
Rapport E_b/N_0 requis sur la liaison descendante	5,4 dB
Distribution des utilisateurs	Distribution uniforme
Orthogonalité à l'intérieur d'une unité RAU	0,6
Orthogonalité entre différentes unités RAU	0,3
Puissance d'émission de la cellule	20 W (43 dBm)
Commande de puissance	Parfaite

1.4.2.1 Probabilité d'interruption

La Fig. 5 illustre les probabilités d'interruption pour divers nombres d'utilisateurs. Les résultats font apparaître que les systèmes AMRC à bouquets de cellules peuvent prendre en charge davantage d'utilisateurs que les systèmes classiques. On peut voir que la capacité sur la liaison descendante peut être augmentée d'environ 40% pour un objectif de qualité de service correspondant à une interruption de 1%.

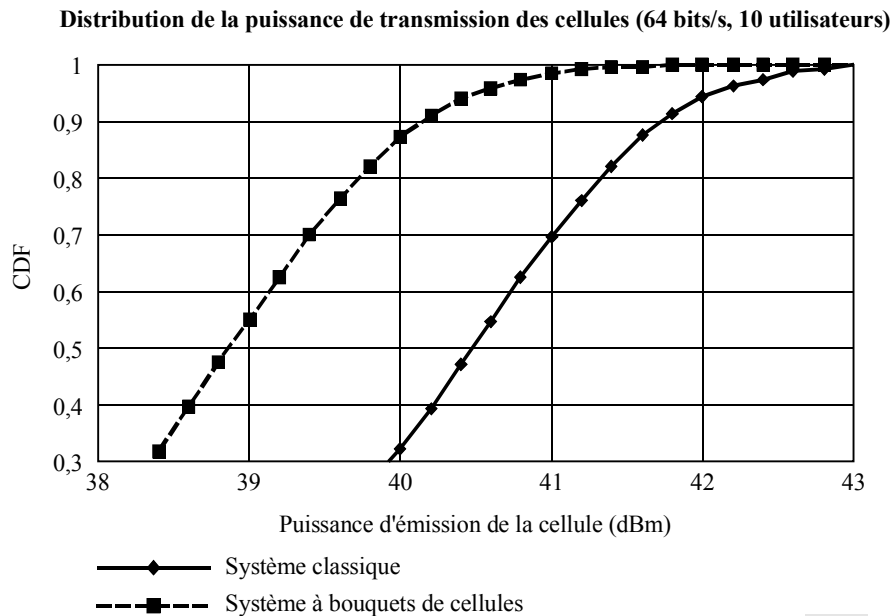
FIGURE 5

Interruption en fonction du nombre d'utilisateurs (64 bits/s)

1.4.2.2 Puissance d'émission totale de la station de base (ou de l'unité centrale)

La Fig. 6 illustre les fonctions de distribution cumulative (CDF) des puissances d'émission de la station de base et de l'unité centrale. Les résultats font apparaître que la puissance d'émission des systèmes AMRC à bouquets de cellules est plus faible que celle des systèmes classiques. L'amélioration est d'environ 2 dB à la valeur médiane. Dans les systèmes à bouquets de cellules, l'affaiblissement du signal entre l'utilisateur et les unités RAU est moins importante que dans les systèmes cellulaires classiques car les antennes réparties sont proches de l'utilisateur. Etant donné que la puissance d'émission requise est réduite, la puissance brouilleuse diminue et il est possible de prendre en charge un plus grand nombre d'utilisateurs.

FIGURE 6



2 Technologie ultralarge bande

D'autres techniques d'accès possibles, comme la technologie UWB, sont en cours d'élaboration. A ce jour, il n'y a pas de définition reconnue au niveau international de l'UWB car les applications et les utilisations de ce type de dispositifs pour les communications ou à d'autres fins sont très diverses et n'ont pas encore été pleinement exploitées. Etant donné que les nombreux dispositifs et applications UWB susceptibles d'être exploités présentent des caractéristiques techniques et opérationnelles différentes, les incidences réglementaires et les conséquences au niveau des brouillages restent inconnues. Une administration a toutefois adopté des règles, notamment des normes techniques et des restrictions en matière de spectre pour l'exploitation de dispositifs UWB à faible puissance afin de garantir la protection des services de radiocommunication existants ou planifiés³. Pour pouvoir utiliser la technologie UWB il faut fixer des seuils de brouillage appropriés et définir les limites concernant les fréquences d'exploitation autorisées. Le concept de base de la technologie UWB est de développer, d'émettre et de recevoir une salve d'énergie radiofréquence de durée extrêmement courte. La largeur de bande des ondes résultantes est très grande (généralement de quelques gigahertz).

³ La FCC des Etats-Unis a adopté le 14 février 2002 un premier rapport et une première ordonnance sur les systèmes de transmission UWB. Voir «In the Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules, Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, ET Docket 98-153». First Report and Order, 67 FR 34872, 16 mai 2002. Le document est disponible à l'adresse web: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf.

Un émetteur ultralarge bande à modulation temporelle (TM-UWB, *time modulated-UWB*) émet des impulsions ultracourtes ayant une forme particulière (monocycles) et les intervalles entre chaque impulsion sont strictement contrôlés. On obtient ainsi des signaux assimilables à du bruit, une onde entretenue ou des impulsions de puissance moyenne faible qui peuvent transmettre des données, des signaux vocaux ou des signaux vidéo ou qui peuvent être utilisés comme radar personnel ou encore comme dispositif de positionnement ou de poursuite. Des monocycles RF simples peuvent être transmis par une antenne large bande et peuvent être reconstituées à l'aide d'un récepteur adapté.

Les systèmes TM-UWB connus utilisent habituellement la modulation par position des impulsions, impulsion par impulsion. Le récepteur utilise un corrélateur croisé qui lui permet de détecter et de reconstituer le signal. Un simple bit d'information est généralement étalé sur plusieurs monocycles. Le récepteur additionne de façon cohérente le nombre adéquat d'impulsions pour reconstituer l'information transmise. Cela améliore beaucoup le gain de traitement.

La durée extrêmement courte des impulsions permet d'avoir un grand nombre d'intervalles de temps pour l'émission. En décalant l'instant réel de transmission de chaque monocycle sur un grand intervalle de temps, selon un code approprié, on peut structurer en canaux les trains d'impulsions. Dans un système d'accès multiple, chaque utilisateur disposerait de sa propre séquence de code. Seul un récepteur utilisant un corrélateur fonctionnant avec le même type de signal (par exemple, séquence de code) peut décoder le signal transmis.

A l'heure actuelle, les incidences des brouillages causés à des systèmes de communication numériques par des impulsions brèves n'ont pas été très étudiées, et on ne dispose pas de beaucoup d'expérience en pratique. En particulier, les systèmes cellulaires AMRC reposent sur l'utilisation d'une commande de puissance rapide. Ce mode de fonctionnement est indiqué au niveau de l'interface radioélectrique par quelques bits de données (non entrelacés car le temps de réponse doit être rapide). Cela signifie que les systèmes de communication numériques (et les systèmes cellulaires en particulier) peuvent être sensibles au brouillage qui introduit inévitablement des erreurs sur certains bits des données transmises. Pour cette raison, il faudra faire très attention à la compatibilité des systèmes UWB et des systèmes cellulaires AMRC tant que les caractéristiques des émissions UWB et leurs incidences sur les communications numériques ne seront pas mieux comprises.

Plus généralement, certaines administrations ont commencé à étudier la technologie UWB et procèdent à des analyses approfondies des aspects techniques et réglementaires nationaux associés à la mise en oeuvre de tels dispositifs, et examinent notamment les risques de brouillage préjudiciable que les dispositifs UWB peuvent causer à d'autres systèmes, en particulier aux services liés à la sécurité de la vie humaine.

3 AMC et ARQ hybride (H-ARQ)

On envisage d'assurer avec les systèmes IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 une vaste gamme de services, notamment des services multimédias à haut débit. Compte tenu de l'augmentation de la demande en capacité, il importe de maximiser l'efficacité spectrale. Plusieurs techniques d'amélioration de l'efficacité spectrale ont été proposées pour les systèmes de communication hertziens. L'un des domaines de recherche important en la matière est l'AMC qui peut être utilisé pour augmenter les débits de transmission dans les canaux sujets aux évanouissements. Les techniques AMC s'adaptent aux variations qui affectent les canaux en modifiant des paramètres comme l'ordre de modulation et le débit de code. Le principe fondamental de ces techniques consiste à changer le système MCS qui est basé sur l'information d'état du canal (CSI, *channel status information*). Par conséquent, l'unité de programmation doit disposer des informations CSI pour choisir le système de modulation et de codage approprié. Des erreurs dans

l'estimation des canaux peuvent toutefois amener cette unité à sélectionner le mauvais niveau MCS. Tout retard dans la signalisation des informations d'état du canal réduit aussi la fiabilité des informations CSI en raison de la variation permanente du canal mobile.

L'ARQ hybride (H-ARQ) peut être combiné à l'AMC pour accroître les performances globales. La mise en oeuvre de l'AMC est possible en réduisant le nombre de niveaux MCS requis et la sensibilité aux erreurs de mesure et au retard dans le retour de l'information. La combinaison de Chase et la redondance incrémentielle sont deux méthodes bien connues employées pour l'H-ARQ. La méthode de combinaison de Chase consiste à retransmettre par l'émetteur le paquet de données codées. Le décodeur situé au niveau du récepteur combine ces répliques multiples du paquet transmis en fonction du rapport S/N à la réception. On obtient ainsi un gain de diversité. La redondance incrémentielle est une autre solution pour la technique H-ARQ dans laquelle, plutôt que de retransmettre plusieurs fois l'ensemble du paquet codé, une information redondante supplémentaire est transmise par incrément si le décodage échoue à la première tentative.

3.1 Modulation adaptative sur la liaison descendante en fonction de la localisation de l'utilisateur, du niveau du rapport C/I à la réception et le débit de transmission requis

3.1.1 Introduction

De nombreux systèmes de modulation, tels que la modulation monoporteuse (SC), l'étalement direct (DS), l'AMRC, la modulation par répartition en fréquence orthogonale (MRFO), l'AMRC multiporteuses, ont été proposés pour les systèmes mobiles ainsi que pour les systèmes hertziens fixes et les systèmes d'accès hertzien nomades. Le choix de l'interface radioélectrique dépend des spécifications du système. La technique MRFO est intéressante pour sa grande insensibilité aux évanouissements par trajets multiples et aussi par le fait qu'elle peut offrir un débit de transmission élevé. Toutefois, la qualité au niveau des liaisons du système MRFO se dégrade lorsque le niveau du signal brouilleur cocanal provenant de cellules adjacentes augmente. Par ailleurs, la technique d'étalement du spectre tolère bien les brouillages cocanal mais il est difficile d'améliorer le débit de transmission par utilisateur en restreignant la largeur de bande attribuée.

Les techniques de modulation combinant le MRFO et l'AMRC (AMRC multiporteuses ou AMRC multiporteuses et étalement de spectre) sont des techniques intéressantes qui améliorent les gains de traitement, respectivement dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel. Par ailleurs, la technique combinant le MRFO et l'AMRC offre un débit de transmission élevé en présence d'évanouissements dus à la propagation par trajets multiples et permet de réduire les brouillages cocanal provenant de cellules adjacentes. Toutefois, on observe une dégradation du taux d'erreur sur les bits lorsque l'orthogonalité entre sous-porteuses et codes d'étalement devient moins bonne en raison d'un étalement important du taux de propagation, d'un décalage de fréquence ou d'autres facteurs.

3.1.2 Concept technologique

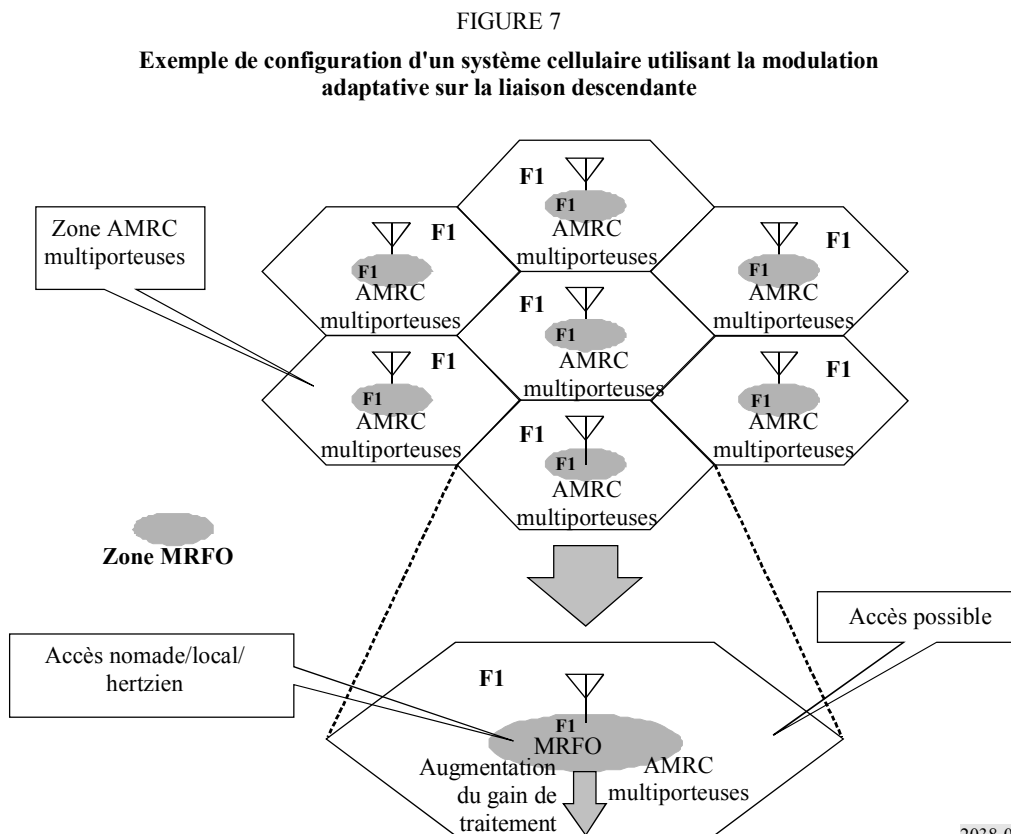
Comme indiqué ci-dessus, chaque technique de modulation présente des caractéristiques physiques distinctes. Plus précisément, ces techniques ont des avantages et des inconvénients selon les caractéristiques du canal, par exemple le rapport C/N , le rapport C/I , l'étalement du temps de propagation et d'autres paramètres.

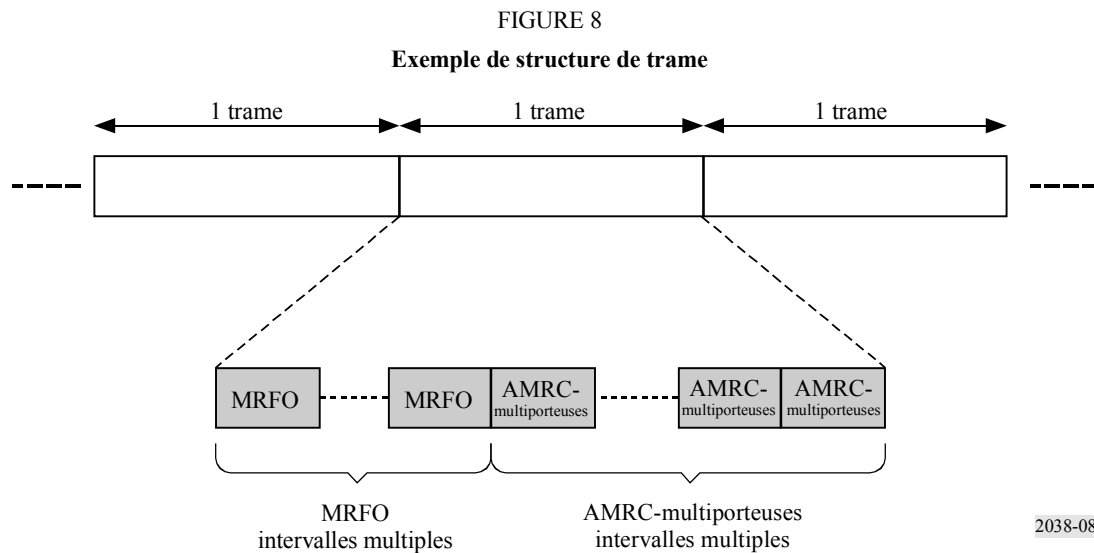
La modulation adaptative sur la liaison descendante qui est basée sur la localisation de l'utilisateur, le niveau du rapport C/I à la réception et le débit de transmission requis, pourra être retenue pour améliorer la capacité du système car elle permet d'attribuer à chaque intervalle de temps et à chaque utilisateur la modulation optimale. Les caractéristiques de la modulation adaptative sur la liaison descendante se résument comme suit:

- La station de base (BS) attribue la modulation optimale à chaque utilisateur par intervalle de temps, conformément aux caractéristiques de la liaison telles que la distance de propagation, l'indication d'intensité du signal reçu (RSSI, *received signal strength indication*), la puissance du signal brouilleur, l'étalement du temps de propagation et le débit de transmission requis pour chaque utilisateur.
- Chaque intervalle de temps devrait être occupé par une seule modulation pour éviter tout brouillage entre différentes interfaces radioélectriques. La synchronisation temporelle entre plusieurs cellules se fera sans difficulté à l'aide du GPS.
- La puissance d'émission dans chaque intervalle de temps aura une valeur différente selon la technique de modulation. On peut aussi appliquer une technique de commande de puissance d'émission pour chaque modulation en utilisant un algorithme de commande différent.
- La fréquence du canal peut être réutilisée dans chaque cellule radioélectrique, en attribuant une modulation différente en fonction des coordonnées de l'utilisateur.

3.1.3 Exemple de configuration

La Fig. 7 illustre un exemple de configuration d'un système cellulaire utilisant la technique de modulation adaptative sur la liaison descendante. Dans cet exemple on a choisi pour la modulation adaptative sur la liaison descendante les modulations MRFO et AMRC multiporteuses. La structure de trames du système cellulaire est celle illustrée à la Fig. 8. Dans cette Figure, une trame est divisée en plusieurs créneaux. Certains créneaux sont attribués à la MRFO et d'autres à l'AMRC multiporteuses. La synchronisation temporelle entre la trame et le créneau sera établie entre stations de base adjacentes à l'aide du GPS ou d'autres méthodes. On peut éviter les brouillages MRFO-AMRC multiporteuses en attribuant les intervalles de temps pour chaque système de façon indépendante.

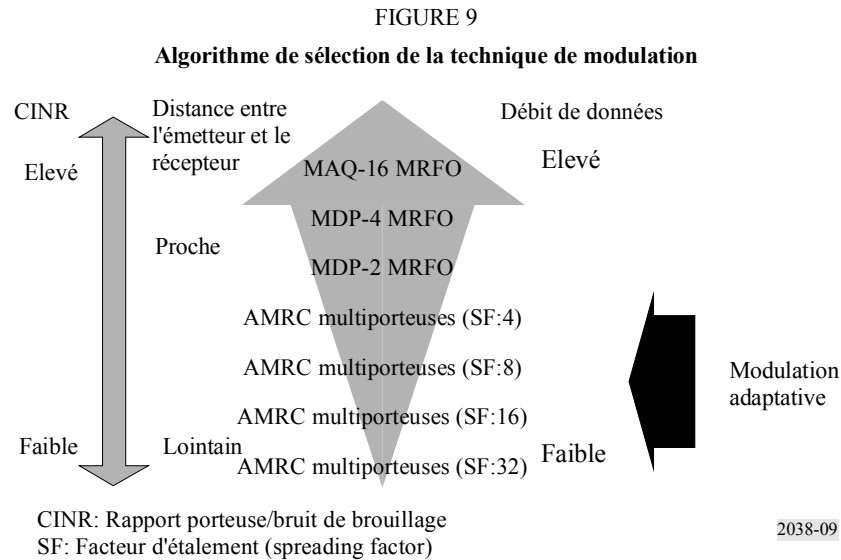




On choisit pour les intervalles MRFO une puissance d'émission inférieure à celle pour les intervalles AMRC multiporteuses afin d'éviter le brouillage cocanal entre cellules adjacentes. Dans ce cas, la zone de service pour les intervalles MRFO est limitée au voisinage immédiat de la station de base de manière à ce qu'il n'y ait pas de chevauchement entre ces zones, comme le montre la Fig. 7. Par conséquent, la même fréquence de canal peut être attribuée dans chaque cellule, ce qui améliore l'efficacité d'utilisation des canaux. Cette zone de service sera suffisante pour les services d'accès hertzien locaux/nomades à haut débit.

Par ailleurs, on a choisi pour les intervalles AMRC multiporteuses une puissance d'émission plus élevée que celle pour les intervalles MRFO. Les zones de service pour les intervalles AMRC multiporteuses ont été élargies de manière à se chevaucher, comme le montre la Fig. 7. Le brouillage cocanal entre cellules adjacentes est réduit à l'aide d'un code d'étalement dans le domaine fréquentiel. Le choix du code d'étalement par utilisateur devrait tenir compte de l'orthogonalité entre les autres codes utilisés dans la même cellule et dans les cellules adjacentes. Etant donné que les signaux AMRC multiporteuses ont la même zone de service que les systèmes cellulaires actuels, les utilisateurs pourront établir leur liaison de communication dans des conditions de très grande mobilité.

La Fig. 9 illustre un algorithme de sélection de la technique de modulation. Lorsque le rapport CINR du canal est élevé, que la liaison hertzienne est courte et que le débit de transmission de l'utilisateur est élevé, la station de base attribue un intervalle MRFO avec une modulation à haut débit, par exemple la modulation MAQ-16 à haut taux de codage. Si le rapport CINR est très bas et si la liaison hertzienne est longue, la station de base attribue un intervalle AMRC multiporteuses avec un facteur d'étalement élevé et un taux de codage faible pour maintenir la liaison de communication. Cet algorithme est basé sur une combinaison d'attribution adaptative de l'interface radioélectrique et de choix adaptatif de ses paramètres. Par conséquent, la technique de modulation adaptative sur la liaison descendante permettra d'améliorer la capacité des systèmes de communication hertziens en attribuant à chaque intervalle de temps et à chaque utilisateur la technique de modulation optimale.



3.1.4 Conclusion

La technique de modulation adaptative sur la liaison descendante est une technique prometteuse pour améliorer la capacité des systèmes de communication hertziens car elle attribue à chaque intervalle de temps et à chaque utilisateur la technique de modulation optimale. En utilisant cette technique, on pourra réutiliser la même fréquence de canal dans chaque cellule radioélectrique en attribuant une technique de modulation différente selon les coordonnées de l'utilisateur. Par ailleurs, on évitera le brouillage cocanal associé aux différentes techniques de modulation en séparant en temps réel la synchronisation des intervalles pour chaque type de modulation. On peut faire varier la puissance d'émission de chaque interface radioélectrique de façon à assurer une couverture de faisceau différente. Cette caractéristique permettra d'offrir une qualité de service différente aux différents utilisateurs en fonction de leurs besoins et de l'état du canal. En attribuant de façon adaptative le type de modulation et en choisissant de façon adaptative ses paramètres (séquence de conversion, taux de codage, facteur d'étalement, etc.), les utilisateurs pourront maintenir leurs communications même lorsque les conditions hertziennes sont difficiles.

L'algorithme de sélection adaptatif du type de modulation doit être examiné plus avant avec spécifications requises pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000. Le nombre de créneaux par trame, la longueur des créneaux ainsi que la longueur et le format des trames pour le système sont d'autres points à examiner. En outre, le type de modulation, le taux de codage, la puissance d'émission et d'autres paramètres propres à l'interface radioélectrique doivent être choisis avec soin pour que la technologie de modulation adaptative sur la liaison descendante soit très efficace au niveau de largeur de bande. La méthode de mesure des rapports C/I et C/N , ainsi que de la distance entre la station de base et la station mobile, de même que l'étalement du temps de propagation sont autant de questions à examiner. Les technologies associées aux antennes-réseaux adaptatives, la diversité, le codage spatio-temporel, les systèmes MIMO doivent être examinés plus avant pour que les améliorations soient optimales.

4 Partage souple du spectre

4.1 Méthode permettant un partage souple du spectre entre opérateurs

Les ressources radioélectriques sont rares et coûteuses. L'efficacité spectrale des systèmes cellulaires doit donc être optimisée. Cela est essentiel, en particulier si plusieurs opérateurs concurrents utilisent la même bande de fréquences. Les ressources spectrales devraient être attribuées à chaque opérateur de façon dynamique en fonction de leurs besoins. Le partage des fréquences porteuses entre différents opérateurs est une méthode qui permet d'optimiser l'utilisation de ces ressources.

Le processus d'attribution du spectre manque de souplesse à l'heure actuelle: en effet, on attribue à chaque opérateur une quantité de spectre fixe et ceux-ci s'engagent à respecter a priori certains objectifs en ce qui concerne le volume de trafic ou la couverture. S'ils ne respectent pas ces engagements, une partie du spectre qui leur a été attribué peut être réattribuée à d'autres opérateurs qui en ont besoin. Cette méthode peut être longue et elle n'est pas suffisamment souple. En outre, elle ne convient pas s'il y a sous-utilisation erratique du spectre. Il faut donc une méthode dynamique de réattribution du spectre en fonction des besoins de trafic.

Le présent Rapport propose une méthode permettant un partage des fréquences porteuses entre opérateurs par adaptation dynamique d'un ensemble de valeurs seuils sans que les opérateurs aient à échanger des informations concernant la charge de trafic, ce qui permet d'accorder la priorité à l'efficacité d'utilisation du spectre.

4.1.1 Description

4.1.1.1 Préambule

Les fréquences porteuses peuvent être partagées entre plusieurs opérateurs pour améliorer l'utilisation du spectre. Dans l'exemple qui suit, deux opérateurs A et B utilisent le spectre, F_A et F_B sont des fréquences «exclusives» et seul le réseau A ou le réseau B respectivement peut les utiliser. $F_{\text{partagé}}$ correspond à deux fréquences porteuses partagées entre les réseaux A et B. Cela signifie que ces fréquences partagées peuvent être attribuées aux utilisateurs mobiles des deux réseaux, selon la charge de trafic. Dans ce cas, chaque réseau peut potentiellement utiliser jusqu'à quatre fréquences porteuses. Les ressources radioélectriques peuvent donc être adaptées aux besoins de trafic, ce qui aboutit à une meilleure utilisation du spectre.

FIGURE 10

Attribution du spectre avec partage des fréquences

F_A	F_A	$F_{\text{partagé}}$	$F_{\text{partagé}}$	F_B	F_B
-------	-------	----------------------	----------------------	-------	-------

2038-10

Il s'agit de proposer une méthode de gestion de ces fréquences porteuses partagées, compte tenu des quatre principes susmentionnés, en définissant:

- des règles d'admission pour les utilisateurs mobiles (accès direct, ou transfert);
- une gestion de la charge de trafic;
- une gestion des priorités entre opérateurs pour l'utilisation des fréquences porteuses partagées.

4.1.1.2 Terminologie

Quatre seuils sont utilisés pour gérer la charge de trafic ou le nombre d'utilisateurs sur les fréquences porteuses:

- $T_{\text{admission}}$: seuil d'admission pour un nouvel appel,
- $T_{\text{HO accept}}$: seuil d'admission pour les demandes de transfert,
- $T_{\text{HO depart}}$: seuil du transfert,
- T_{drop} : seuil de déconnexion à partir duquel on déconnecte certains abonnés mobiles pour conserver une certaine qualité de service (des appels sont abandonnés de toute façon puisqu'il y a des interruptions).

La différence entre T_{drop} et $T_{\text{HO_depart}}$ devrait être définie par les risques d'interruption afin de garantir le meilleur compromis entre la probabilité d'interruption et l'utilisation globale des ressources.

4.1.1.3 Description de la méthode proposée

Dans le cas des fréquences partagées, deux ensembles de ces quatre seuils sont définis:

- *L'ensemble des seuils par défaut* correspond aux valeurs des seuils qui sont utilisées pour éviter l'utilisation des fréquences porteuses partagées.
- *L'ensemble des seuils cibles* correspond aux valeurs des seuils lorsque les fréquences porteuses partagées sont utilisées.

Chaque opérateur est libre de faire varier les quatre seuils utilisés pour la fréquence partagée à condition que ces seuils restent dans les limites des ensembles des seuils par défaut et des seuils cibles. Les ensembles des seuils cibles et des seuils par défaut peuvent être définis préalablement ou modifiés de façon dynamique pendant l'exploitation.

Essentiellement, chaque opérateur utilise un ensemble cible de valeurs seuils qui est différent de celui des autres opérateurs. La différence relative des seuils cibles entre les opérateurs entraîne automatiquement l'établissement de règles de priorité. Par exemple, si un opérateur A utilise un T_{drop} de 14 dB alors que l'opérateur B utilise un T_{drop} de 20 dB, l'opérateur A commence à déconnecter ses utilisateurs mobiles avant que l'opérateur B ne commence à le faire lui-même. *C'est ainsi que les règles de priorité sont fixées de façon dynamique.* Par ailleurs, il est facile d'avoir une idée du coût d'utilisation de ces fréquences porteuses en comparant les valeurs seuils respectives utilisées.

4.1.1.3.1 Gestion de la charge de trafic sur les fréquences partagées et les fréquences exclusives

Dans les paragraphes qui suivent, on illustrera la méthode basée sur des seuils d'augmentation du bruit, mais il convient de noter qu'il existe d'autres critères de mesure, par exemple la puissance totale émise par la station de base, les interruptions du système, etc.

Il y a un ensemble de seuils pour chaque opérateur concernant les fréquences partagées, qui sont adaptées de façon dynamique en fonction de la charge de trafic comme expliqué dans les deux cas ci-après.

4.1.1.3.1.1 Cas où les fréquences porteuses exclusives ne sont pas exploitées à pleine charge

Les utilisateurs mobiles admis sur les fréquences porteuses partagées doivent être basculés sur les fréquences exclusives. L'admission d'utilisateurs mobiles sur les fréquences porteuses partagées est arrêtée et il faut favoriser le basculement des utilisateurs des fréquences partagées sur les fréquences exclusives.

Dans ce cas, $T_{\text{admission}}$ et $T_{\text{HO_accept}}$ diminuent tout comme $T_{\text{HO_depart}}$ pour faire en sorte que les utilisateurs quittent la fréquence partagée. La valeur T_{drop} peut rester la même afin de limiter les interruptions sur la fréquence partagée.

Les seuils ne doivent pas être adaptés aveuglément pour ne pas:

- surcharger les fréquences porteuses exclusives;
- surcharger le système en effectuant trop de transferts entre fréquences.

Le résultat final est que tous les utilisateurs quitteront la fréquence partagée par transfert ou à la fin de leur communication.

4.1.1.3.1.2 Cas où les fréquences porteuses exclusives sont exploitées à pleine charge

Dans ce cas, l'objectif est d'accroître la charge de trafic sur la fréquence partagée.

Les nouvelles demandes d'appel sont dirigées vers les fréquences porteuses partagées. Dans ce cas, les valeurs de $T_{\text{admission}}$ ainsi que de $T_{\text{HO_depart}}$ et $T_{\text{HO_accept}}$ sont augmentées.

$T_{\text{admission_proprietary}}$ et $T_{\text{Hoaccept_proprietary}}$ sont les valeurs seuils utilisées sur la fréquence exclusive.

Etape 1: L'augmentation du bruit est mesurée sur la fréquence exclusive afin d'évaluer sa charge.

Etape 2: L'augmentation du bruit est comparée au seuil d'admission.

Etape 3: Si l'augmentation du bruit est inférieure au seuil d'admission, la fréquence exclusive n'est pas à pleine charge et peut accepter des demandes de ressources. Par conséquent, les seuils sur la fréquence partagée doivent être ramenés dans les limites données par les ensembles de valeurs par défaut et les ensembles de valeurs cibles pour éviter toute utilisation des fréquences partagées tant que les fréquences exclusives sont sous-utilisées.

Etape 4: Si l'augmentation du bruit est supérieure au seuil d'admission, elle est comparée au seuil de transfert.

Etape 5: Si l'augmentation du bruit est inférieure au seuil d'acceptation du transfert, la fréquence exclusive ne peut pas accepter de nouveaux utilisateurs mais peut prendre en charge les utilisateurs arrivant par transfert en provenance d'autres cellules. Par conséquent, le seuil d'admission doit être augmenté sur la fréquence partagée pour que les nouveaux utilisateurs puissent être directement servis sur la fréquence partagée.

Etape 6: Si l'augmentation du bruit est supérieure au seuil de transfert, la fréquence exclusive n'acceptera pas de nouveaux utilisateurs car elle est à pleine charge. Dans ce cas, tous les seuils sur la fréquence partagée doivent être augmentés.

4.1.1.3.2 Souplesse accrue: adaptation dynamique des ensembles de valeurs par défaut et des ensembles de valeurs cibles

Les seuils par défaut et les seuils cibles peuvent être déterminés au stade I des opérations. Toutefois, la souplesse est plus grande lorsque les seuils par défaut et les seuils cibles peuvent être adaptés de façon dynamique. Cela est possible en utilisant un contrôleur central (CC) pour communiquer avec un certain nombre d'opérateurs dans une zone géographique donnée (par exemple, pour signaler l'utilisation de fréquences porteuses partagées par certains opérateurs, pour évaluer les valeurs des seuils pour chacune des fréquences porteuses partagées attribuées à l'opérateur).

4.1.1.3.2.1 Informations échangées

Le volume d'information à échanger est limité. Toutefois, ce type d'information sera échangé uniquement en cas d'événement majeur, par exemple une surcharge importante à la suite de faibles variations du trafic (heures ou jours de pointe, etc.).

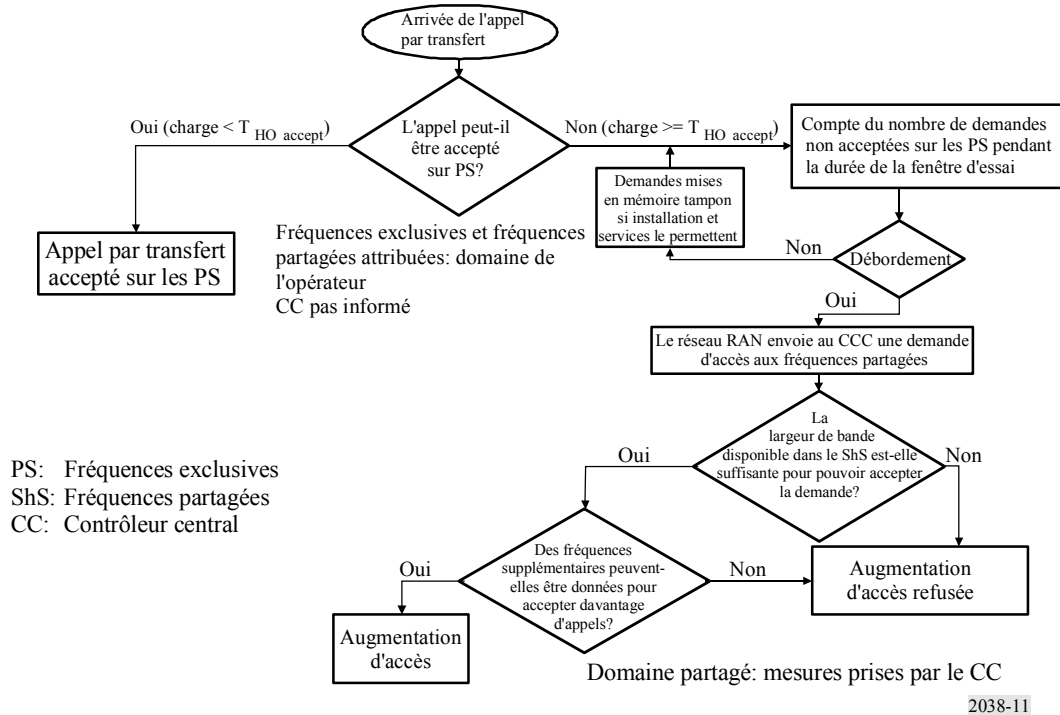
Après avoir analysé la demande d'accès, sur la base de l'utilisation qui est faite des fréquences partagées et d'autres demandes d'accès concurrentes, le contrôleur central enverra uniquement un message ACCESS INCREASE (augmentation d'accès) si une certaine largeur de bande peut être offerte à l'opérateur B sur les fréquences partagées. On notera que ce message contiendra l'ensemble des valeurs seuils cibles que doit appliquer cet opérateur. Cela suffit pour informer l'opérateur B qu'il peut avoir accès aux fréquences partagées.

4.1.1.3.2.2 Gestion des fréquences partagées avec le contrôleur central

La Fig. 11 montre la procédure d'admission des appels pour cette méthode. L'exemple est donné pour des appels HO mais il est également valable pour de nouveaux appels.

FIGURE 11

Admission des appels dans un partage dynamique des fréquences entre opérateurs



On a accès aux fréquences partagées uniquement lorsque les fréquences exclusives sont saturées. Avant d'envoyer un message SHARED SPECTRUM ACCESS REQUEST (demande d'accès aux fréquences partagées) au contrôleur central, le contrôleur local constate tout d'abord qu'il y a débordement. Pour ce faire, il compte le nombre de demandes non satisfaites pendant la durée d'observation. Pendant cette durée d'observation, les demandes d'accès peuvent être mises en file d'attente si des dispositifs sont prévus à cet effet et si les services peuvent tolérer une certaine attente. Sinon, elles sont tout simplement abandonnées.

Après avoir reçu le message SHARED SPECTRUM ACCESS REQUEST, les appels qui ont été mis en mémoire-tampon dans l'attente de ressources sont acceptés sur la fréquence partagée si la largeur de bande est suffisante. Sinon, les appels qui ont été éventuellement mis en file d'attente doivent être abandonnés. Cela se fait par l'envoi d'un message spécifique au contrôleur local ou simplement par des opérations de temporisation.

4.1.2 Conclusion et perspectives

Deux ensembles de seuils (valeurs par défaut et valeurs cibles) sont utilisés sur les fréquences partagées comme limites à l'intérieur desquelles on peut faire varier les valeurs seuils effectives. On peut ainsi répartir la charge de trafic entre fréquences exclusives et fréquences partagées et privilégier l'utilisation des fréquences exclusives.

Les règles de priorité et la répartition des coûts entre les opérateurs sont automatiquement établies à partir des valeurs spécifiques données aux ensembles de valeurs cibles et de valeurs par défaut.

On peut avoir davantage de souplesse pour adapter les ressources disponibles pour chaque opérateur en signalant la disponibilité d'une fréquence pouvant être utilisée en partage et en adaptant de façon dynamique les ensembles de valeurs seuils.

Comme indiqué plus haut, quatre principes doivent être respectés pour qu'il puisse y avoir partage des fréquences entre opérateurs:

- Un algorithme permet une adaptation dynamique des ressources disponibles pour chaque opérateur.
- A l'aide de cet algorithme, ces fréquences porteuses partagées ne seront utilisées que si toutes les fréquences porteuses exclusives sont exploitées à pleine charge. Des contrôles et des accords réglementaires permettent de faire respecter ces critères.
- La priorité entre opérateurs partageant ces fréquences porteuses est déterminée de façon dynamique à l'aide des valeurs seuils, ce qui permet de mettre en place une politique optimale de gestion de la charge de trafic et de limiter les brouillages. Le coût de l'utilisation des fréquences partagées peut être partagé entre les opérateurs, la part relative de chaque opérateur étant calculée à partir des valeurs de l'ensemble des seuils cibles.
- L'échange d'informations sur la charge de trafic, d'informations confidentielles ou sensibles concernant chaque opérateur, n'est pas nécessaire.

En bref, la méthode proposée rend possible un partage des fréquences porteuses en contrôlant de façon dynamique un ensemble de valeurs seuils ajustables pour l'admission et la terminaison des appels, ce qui se traduit par une meilleure utilisation des ressources spectrales limitées.

4.2 Partage souple du spectre, identification et gestion d'un mode de coopération

Un problème important posé par un partage dynamique du spectre est que les informations relatives aux fréquences porteuses et/ou modes de remplacement varient beaucoup en fonction du temps.

Ce dont on a alors besoin ce sont des méthodes plus dynamiques de collecte et de compilation des informations sur les modes et les fréquences porteuses de remplacement.

Une méthode «brute» qui consiste à simplement utiliser les trous (rares) dans les schémas de fréquences d'émission/de réception selon les normes existantes est non seulement difficile à programmer mais aussi très «gourmande» du point de vue des ressources; une telle méthode ramènerait la durée de vie des batteries des terminaux à un niveau jamais connu depuis plus d'une décennie.

Un système utilisant une base de données statique supposerait des frais généraux importants en raison des mises à jour fréquentes. A première vue, il semblerait que la mesure d'une porteuse donnée dans un mode donné ne soit pas affectée par le type d'opérateur qui l'utilise. Toutefois, dès que différents opérateurs commencent à utiliser cette fréquence porteuse, ils utiliseront leurs propres stations de base qui peuvent fort bien être situées à des emplacements différents par rapport aux stations de base de l'opérateur précédent, ce qui affecte les caractéristiques de propagation de cette fréquence porteuse.

Avec une gestion du mode de coopération (CoMM), plutôt que d'avoir un terminal multimode nomade qui doit (temporairement) se reconfigurer pour gérer des modes de remplacement, il est plus simple d'évaluer la couverture assurée par les terminaux «demandeurs» qui fonctionnent déjà dans ce mode pour effectuer leurs mesures ou de procéder à une extrapolation à partir d'autres mesures effectuées par des terminaux à cet endroit. Le fait que les mesures soient faites à la demande ou collationnées centralement sur une certaine période de temps dépendra de la charge résultante du réseau et de la rapidité avec laquelle les valeurs des mesures «expirent».

4.3 Conclusions et perspectives

De nouvelles solutions sont proposées pour résoudre deux problèmes fondamentaux posés par un partage souple du spectre: comment partager des fréquences porteuses entre différents opérateurs sans avoir à échanger des informations concernant la charge de trafic et comment détecter et contrôler les dispositifs RAT en aveugle ou sur un mode coopératif. La proposition présentée élargit le cadre nécessaire pour un partage souple du spectre. Par conséquent, les études devraient être axées sur l'évaluation de stratégies de négociation des services combinées à un partage efficace du spectre. L'adéquation de ces stratégies doit être évaluée car elles sont directement liées aux performances du réseau et à la satisfaction des utilisateurs.

4.4 Références bibliographiques

ARIYAVISITAKUL, S. et autres [mai 1996] Performance of simulcast wireless techniques for personal communication systems. *IEEE J. Select. Areas Comm.*, Vol. 14, 4, p. 632-643.

SPILLING, A. G. et autres [mai 1999] Adaptive networks for UMTS – An investigation of bunched base stations: *Proc. IEEE VTC*, p. 556-560.

4.5 Bibliographie

SPILLING, A. G. et autres [juin 2000] Self-organization in future mobile communications. *Electron. & Comm. Engin. J.* p. 133-147.

Annexe 2

Solutions technologiques permettant de prendre en charge l'asymétrie du trafic

1 Aspects techniques

Les différentes notions exposées au § 3.1.2 sont résumées dans les paragraphes qui suivent. D'autres précisions sont données dans la Recommandation UIT-R M.1036.

1.1 Asymétrie de bandes de fréquences

En mode DRF (duplex à répartition en fréquence) une quantité de spectre différente, dans des domaines fréquentiels différents, peut être attribuée aux liaisons montantes et aux liaisons descendantes.

On distingue trois cas (en règle générale, plusieurs utilisateurs partagent chaque fréquence porteuse):

- Dans le premier cas, les porteuses de liaison montante et de liaison descendante ont la même largeur de bande. Toutefois, un plus grand nombre de fréquences porteuses est attribué aux liaisons descendantes ou inversement afin d'offrir une capacité totale plus grande aux liaisons descendantes (ou inversement).
- Dans le deuxième cas, la largeur de bande de la porteuse de liaison descendante est plus grande que celle de la porteuse de liaison montante (ou inversement).
- Dans le troisième cas, on utilise la même technologie dans les deux sens de transmission mais on utilise des techniques d'accès multiple bien connues pour partager la porteuse de liaison montante et on continue d'utiliser une porteuse spécialisée de liaison descendante.

Pour ces différents cas, il faut faire une évaluation a priori raisonnable de l'asymétrie de trafic escomptée pour pouvoir attribuer et utiliser le spectre de façon efficace.

Afin de pouvoir disposer d'une capacité asymétrique souple (asymétrie de bandes de fréquences) en utilisant les deux premières méthodes décrites ci-dessus, l'équipement doit avoir la fonction distance variable en mode duplex.

Dans la troisième méthode, on utilise la même largeur de bande de la porteuse dans les deux sens de transmission mais sur les multiples canaux en liaison descendante, la limite de blocs de spectre est la même. Les blocs inférieurs permettant de disposer d'un mode symétrique classique et, parfois, d'un mode asymétrique alors que les blocs supérieurs additionnels avec séparation de la porteuse fixe par rapport aux blocs de liaison descendante inférieurs servent à assurer le mode asymétrique (pour plus de précisions se reporter à la Recommandation UIT-R M.1036). Le même équipement peut donc être partagé par tous les opérateurs. L'espacement duplex pour l'équipement utilisant les mêmes blocs est le même et au lieu d'une capacité duplex variable on a besoin de plusieurs espacements duplex fixes, ce qui simplifie la complexité du terminal.

L'ouverture des blocs de spectre supérieurs peut être programmée au fur et à mesure que des fréquences supplémentaires et des équipements à plus grande largeur de bande deviennent disponibles. A noter qu'il n'est pas nécessaire que les blocs supérieurs soient adjacents les uns par rapport aux autres. Il peut y avoir superposition avec les technologies 2G ou IMT-2000 «existantes» pour lesquelles il y a déjà des bandes symétriques.

1.2 Asymétrie d'attribution des intervalles de temps

Le DRT (duplex à répartition dans le temps) est une technique duplex dans laquelle les trafics de liaison montante et de liaison descendante sont acheminés sur la même porteuse. Les canaux de liaison descendante et de liaison montante sont séparés dans le domaine temporel par subdivision de la trame temporelle en différents intervalles de temps. Chaque intervalle de temps peut être attribué au trafic de liaison montante ou de liaison descendante. En attribuant un nombre d'intervalle différent aux liaisons montantes et aux liaisons descendantes, on obtient une capacité asymétrique.

Une trame comprend N intervalles de temps dont n intervalles de temps sont utilisés pour la liaison descendante et $N-n$ intervalles de temps pour la liaison montante. Une autre possibilité consiste à utiliser des intervalles de temps de taille variable et non pas des intervalles de temps multiples.

Pour qu'un système DRT fonctionne correctement et soit performant, il faut éviter qu'une cellule ait une configuration liaison descendante/liaison montante différente de celle des cellules cocanal ou des cellules fonctionnant dans les canaux adjacents, en particulier lorsque le facteur de réutilisation des fréquences est égal à 1 pour éviter des brouillages importants. Ce problème peut, dans une large mesure, être résolu si tous les opérateurs synchronisent leurs réseaux et se mettent d'accord sur la configuration liaison descendante/liaison montante dans toutes les cellules.

Dans le cas d'un seul opérateur et avec un facteur de réutilisation des fréquences supérieur à 1, différentes configurations liaison descendante/liaison montante dans différentes cellules sont réalisables grâce au découplage supplémentaire obtenue par un espacement géographique plus grand entre les mêmes fréquences porteuses. Il faudra une certaine planification et une certaine coordination des fréquences.

1.3 Arrangement duplex DRF ou DRT associé à d'autres technologies

L'asymétrie de modulation est une technique générale, applicable aux systèmes fonctionnant en mode DRF ou DRT et où on peut utiliser différents schémas de modulation sur les canaux de liaison montante et de liaison descendante pour obtenir différents débits de données et avoir ainsi une

certaine asymétrie de trafic. Le degré maximal ainsi que le sens de l'asymétrie sont en principe limités par le type d'équipement et par les schémas de modulation qui sont mis en oeuvre dans des systèmes réels.

Toutefois, des schémas de modulation d'ordre supérieur ou un codage avec préfixe réduit nécessitent des rapports S/I plus élevés que ceux sur les autres liaisons. Par conséquent, l'application de ces concepts suppose un compromis entre la capacité de liaison et la couverture pour les services par paquets dans un mode d'adaptation de liaison. L'utilisation de techniques de modulation différentes permet d'accroître les débits maximums de données pour les utilisateurs pour lesquels les conditions radioélectriques sont bonnes.

Cette méthode pourrait être utilisée pour améliorer les caractéristiques des systèmes DRF et DRT et pour compléter par des extensions futures des normes relatives aux systèmes IMT-2000 et aux systèmes postérieurs aux IMT-2000. Cela signifie qu'il n'est pas nécessaire pour la question de nature réglementaire importante qui se pose, à savoir la réservation de nouvelles fréquences pour les systèmes DRT et DRF, de tenir compte de l'asymétrie de modulation.

Une autre méthode permettant d'améliorer la capacité d'asymétrie consiste à utiliser des antennes adaptatives ou des schémas de détection évolués afin d'accroître la capacité des liaisons sur une liaison. On disposerait ainsi d'une éventuelle asymétrie supplémentaire pour une attribution de fréquences donnée. Ces techniques utilisées seules ou en combinaison avec des systèmes DRF ou DRT offriront des possibilités nouvelles. Les propriétés de propagation des ondes radioélectriques étant les mêmes pour les liaisons montantes et les liaisons descendantes en mode DRT, il est intéressant d'utiliser des antennes adaptatives pour des applications mobiles à faible vitesse.

Des techniques de détection évoluées visant à limiter l'incidence du brouillage cocanal peuvent être utilisées pour les systèmes DRF et les systèmes DRT.

2 Comparaison des diverses méthodes permettant d'offrir une capacité de trafic asymétrique

En général, le schéma duplex est l'un des nombreux facteurs qui déterminent l'efficacité spectrale globale d'un système. En termes de prise en charge efficace du trafic asymétrique, le DRF ou DRT ont des avantages ou des inconvénients spécifiques.

2.1 DRF avec attribution symétrique de spectre

Le débit de données d'utilisateur maximal disponible par liaison est constant.

Le DRF présente les avantages suivants:

- Il permet une transmission continue (non saccadée) sur la liaison montante et la liaison descendante. Il permet également une signalisation plus rapide de l'information de retour, par exemple la commande de puissance et l'adaptation de liaison et la programmation rapide dépendante du canal.
- Pour une couverture sur zone étendue, elle est essentiellement limitée par la marge du système.
- Aucune condition particulière supplémentaire n'est nécessaire pour l'isolement du canal adjacent ou la coplanification des systèmes dans les canaux adjacents, par rapport au DRT.
- Il est possible d'implanter sur un même site des stations de base relevant de plusieurs opérateurs, cela dépend du type de système et la réutilisation des fréquences est indépendante de l'asymétrie de spectre globale.
- Contrairement au DRT, il n'y a pas de relation intrinsèque entre la gamme des débits de données de service maximaux disponibles et le degré de capacité asymétrique.
- Il offre une certaine souplesse, en matière d'asymétrie du trafic.

Les éventuels inconvénients à prendre en considération sont les suivants:

- Il est nécessaire de disposer de fréquences appariées symétriques avec une distance duplex minimale.
- L'efficacité spectrale dépend de la relation entre les fréquences symétriques et l'asymétrie réelle du trafic sur le réseau.

2.2 DRF avec attribution asymétrique de spectre

Le débit de données d'utilisateur maximal disponible par liaison est constant.

Le DRF présente les avantages suivants en plus de ceux indiqués au § 2.1:

- Souplesse d'appariement des fréquences porteuses de liaison montante et de liaison descendante permettant de disposer d'une capacité asymétrique. L'efficacité spectrale est maximale lorsque le rapport de largeur de bande retenu pour les deux bandes correspond à l'asymétrie de trafic. Les fréquences asymétriques peuvent être utilisées soit pour avoir davantage de porteuses dans un sens de transmission soit pour avoir des porteuses plus larges dans un sens de transmission ou pour une comparaison de ces deux possibilités.
- La solution avec plusieurs largeurs de bandes permet d'obtenir des débits de crêtes plus élevés dans le sens de transmission où la largeur de bande est la plus grande.
- Il suffit de disposer de fréquences supplémentaires non appariées.

Les inconvénients éventuels à prendre en considération sont les suivants:

- Exige des fréquences appariées asymétriques.
- Exige une estimation de la demande future de spectre par sens de transmission, ce qui peut être difficile à prévoir à l'avance. Une adaptation immédiate peut être difficile à réaliser, mais des indications laissent penser que l'on a besoin de davantage de spectre sur les liaisons montantes et descendantes, ce qui rend possible une adaptation ultérieure.
- Nécessité de disposer d'un espacement duplex souple pour les méthodes qui en ont besoin, ce qui augmente légèrement la complexité de mise en œuvre du terminal.
- L'efficacité spectrale dépend de la relation entre le degré effectif d'asymétrie du trafic sur le réseau et le degré d'asymétrie spectrale.
- Il faut plusieurs débits et plusieurs largeurs de bandes pour des canaux de différente largeur lorsque les porteuses de liaison montante et de liaison descendante ont, par conception, des largeurs de bandes différentes.

2.3 Mode DRT

Le débit de données de service maximal disponible par liaison dépend du degré d'asymétrie.

Le DRT présente les avantages suivants:

- Il suffit de disposer de fréquences non appariées. L'identification de blocs de fréquences peut être plus facile que dans le cas de fréquences appariées.
- On dispose d'une certaine souplesse en ce qui concerne le degré d'asymétrie du trafic, selon les conditions de brouillage cocanal et dans les canaux adjacents. L'utilisation du spectre ne dépend pas de l'emplacement du point de commutation entre la transmission sur les liaisons montantes et la transmission sur les liaisons descendantes.

- L'efficacité spectrale dépend moins de l'asymétrie réelle de trafic sur le réseau étant donné que le DRT permet de faire varier le degré d'asymétrie dans une fourchette spécifiée.
- Si les cellules/systèmes voisins disposent de la même configuration d'intervalles, selon le type du système et la réutilisation des fréquences, le degré d'asymétrie est déterminé par le nombre d'intervalles de temps.
- L'augmentation de la capacité grâce à l'utilisation d'antennes adaptatives peut être encore améliorée si l'on utilise la réciprocité des canaux radioélectriques pour des applications mobiles à faible vitesse.

Les éventuels inconvénients à prendre en considération sont les suivants:

- Les services dans des bandes adjacentes doivent pouvoir faire face aux brouillages associés aux liaisons descendantes et aux liaisons montantes.
- La synchronisation et la coordination des porteuses des liaisons montantes/descendantes des cellules voisines est nécessaire lorsque le facteur de réutilisation des fréquences est petit; dans le cas d'une réutilisation suffisamment importante des fréquences, aucune coordination n'est nécessaire pour les attributions de fréquences faites à un opérateur mais la coordination reste nécessaire entre opérateurs ayant des bandes de fréquences adjacentes les unes aux autres.
- L'implantation sur un même site de stations de base relevant de plusieurs opérateurs dépend du type de système, du coefficient de réutilisation des fréquences et de l'espacement en fréquence des stations relevant de différents opérateurs et implantées sur un même site.
- L'isolement entre canaux adjacents est nécessaire.

2.4 Comparaison des autres technologies permettant de disposer d'une capacité de trafic asymétrique

La modulation asymétrique présente les avantages suivants:

- Aucune attribution de fréquences ou d'intervalles de temps supplémentaires n'est nécessaire.
- Meilleur débit sur le même canal mais uniquement pour de faibles portées ou lorsque le rapport S/N est élevé (adaptation de liaison nécessaire).
- Cette méthode pourrait être utilisée pour améliorer les systèmes DRT et DRF dans les zones où les conditions radioélectriques sont favorables.

Les éventuels inconvénients à prendre en considération sont les suivants:

- Influence du sens de transmission sur la marge du système.
- Le degré d'asymétrie qu'il est possible d'obtenir est limité.
- Compromis entre la couverture et le débit de données disponible maximal.
- Adaptation de liaison nécessaire.
- Essentiellement applicable aux services en modes.
- Planification et mise en oeuvre plus complexes.
- S'il est possible d'améliorer la capacité sur une liaison, la même méthode permet aussi d'accroître la capacité sur l'autre liaison; par conséquent, il n'y a aucun avantage propre pour ce qui est de l'amélioration de fourniture d'un service asymétrique.

L'utilisation de techniques supplémentaires présente les avantages suivants:

- Des améliorations peuvent être apportées aux systèmes DRF et aux systèmes DRT.
- Amélioration de la capacité grâce à l'utilisation d'antennes adaptatives sur la liaison descendante et uniquement avec des antennes d'émission pour les terminaux simples.
- Les antennes d'émission adaptatives sont plus performantes avec les systèmes DRT qu'avec les systèmes DRF.

Les éventuels inconvénients à prendre en considération sont les suivants:

- Il faudra davantage de capacité sur la liaison descendante, ce qui augmentera la complexité du récepteur du terminal par rapport à la station de base pour des schémas de détection évolués.
- Avec ces méthodes la complexité du terminal serait plus grande que celle de la station de base.

Le choix d'un arrangement duplex approprié dépend de l'application (courte portée, zone étendue, souplesse, etc.). L'arrangement duplex n'est qu'un des multiples aspects à prendre en considération (sensibilité aux brouillages, souplesse pour le choix du point de commutation, etc.).

2.5 Comparaison de l'utilisation de spectre normalisé pour le DRF et le DRT

L'utilisation de spectre peut être caractérisée par le débit moyen total sur les liaisons descendantes et sur les liaisons montantes rapporté à la largeur de bande totale attribuée aux liaisons descendantes et aux liaisons montantes (débit normalisé) pour une attribution de spectre et une asymétrie de trafic données. L'attribution de spectre est constante alors que l'asymétrie de trafic peut varier. En mode DRF, on suppose une attribution de spectre symétrique.

En mode DRF le débit sur les deux types de liaisons peut être réglé de manière indépendante pour que $0 < a_{\uparrow} < 100\%$ et $0 < a_{\downarrow} < 100\%$. L'utilisation de spectre pour une asymétrie de trafic est optimisée si l'une des liaisons est utilisée à 100% avec a_{\uparrow} ou a_{\downarrow} , l'autre paramètre pouvant varier en fonction du degré d'asymétrie tout en étant inférieur à 100%. Dans le cas où a_{\uparrow} et $a_{\downarrow} < 100\%$, le spectre est utilisé moins efficacement.

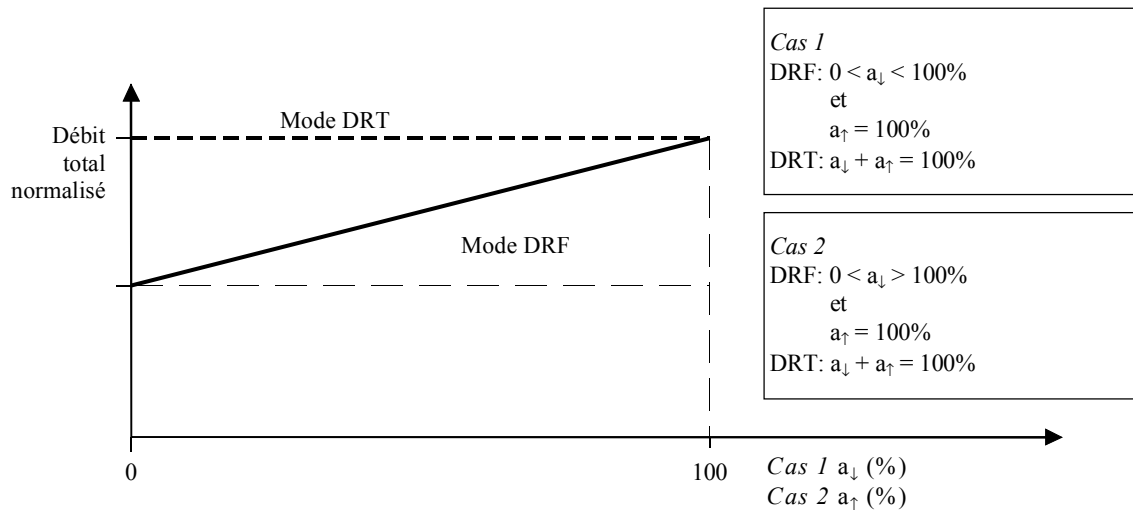
En mode DRT, a_{\uparrow} et a_{\downarrow} ne peuvent pas être réglées de façon indépendante car, dans des conditions optimales, la somme des taux d'utilisation des deux types de liaison est égale à 100%. Si les intervalles de temps peuvent être adaptés en fonction de l'asymétrie du trafic et si tous les intervalles de temps sont utilisés, l'utilisation du spectre est alors optimale.

Dans ces hypothèses optimales, en mode DRF et DRT, la Fig. 12 compare l'utilisation de spectre pour les deux arrangements duplex en fonction de a_{\uparrow} et a_{\downarrow} . L'adaptation de l'emplacement du point de commutation entre la transmission sur la liaison montante et la transmission sur la liaison descendante, en mode DRT, peut être limitée (par exemple pour maintenir la synchronisation avec d'autres cellules, l'asymétrie de trafic provenant d'autres utilisateurs dans la même cellule). Dans ce cas, le débit d'un système DRT se rapprocherait de celui d'un système DRF.

Le choix d'un arrangement duplex approprié dépend de l'application (courte portée, zone étendue, souplesse, disponibilité d'éventuelles nouvelles fréquences appariées ou non appariées). L'arrangement duplex n'est qu'un des multiples aspects à prendre en considération (par exemple, sensibilité aux brouillages, souplesse pour le choix du point de commutation, etc.). La présente Annexe donne des informations sur le compromis à faire entre une utilisation efficace du spectre et un débit maximal par sens de transmission, ainsi que d'autres avantages et inconvénients qui ont des incidences différentes selon les besoins. Le spectre disponible ne sera pas connu avant la CMR-07. Par conséquent, aucune ligne directrice générale ne peut encore être donnée.

FIGURE 12

Comparaison de l'utilisation de spectre normalisé en mode DRF et en mode DRT



2038-12

Annexe 3

Innovations apportées aux systèmes évolués grâce au DRT

Des améliorations techniques importantes ont été apportées grâce au DRT.

L'utilisation de canaux réciproques, caractéristique propre aux systèmes DRT, offre des avantages. La réciprocité des canaux pour une fréquence porteuse unique utilisée en partage par la liaison montante et la liaison descendante permet d'accéder plus facilement aux informations d'état du canal dans le cas des techniques de traitement du signal évoluées. Par exemple, la réciprocité des canaux garantit une forte corrélation entre les évanouissements sur la liaison montante et ceux sur la liaison descendante. Etant donné que les caractéristiques de canal sont les mêmes dans les deux sens de transmission, les ressources de traitement du signal nécessaires pour effectuer le traitement spatial/temporel/fréquentiel/d'égalisation peuvent être partagées entre l'émetteur et le récepteur. Par conséquent, le DRT est la technique tout indiquée pour un traitement du signal évolué dans des conditions de commande de puissance en boucle ouverte, de combinaison nouvelle de trajets multiples et d'antennes et de techniques de traitement spatio-temporel, pour un supplément de coût moindre.

On peut par exemple ajouter des antennes-réseaux adaptatives en effectuant un traitement du signal évolué au niveau de la station de base et en partageant avec les unités d'abonné les informations de pondération du canal, ce qui permet de multiplier par dix l'efficacité spectrale du système sans faire augmenter le coût de l'équipement dans les locaux d'abonné. Les réseaux maillés sont un autre exemple. Le DRT permet de mettre en oeuvre plus facilement ces systèmes novateurs en utilisant une architecture plus courante pour les systèmes militaires en ondes décimétriques. La planification du réseau et des fréquences dans un système maillé (multipoint-multipoint) DRF important est beaucoup plus difficile que dans un système point à point ou point-multipoint (zone coordonnée), multiliaissons classique.

La commande MAC est un autre domaine d'innovation. Le DRT permet des configurations très variées et très dynamiques pour la trame temporelle de la couche physique. Les systèmes DRT peuvent avec beaucoup plus de souplesse traiter le trafic dynamique en liaison montante/liaison descendante étant donné que la limite entre le cycle d'utilisation en liaison montante et celui en liaison descendante peut être réglée de façon adaptative pour répondre aux besoins du service. Les systèmes DRT dynamiques sont beaucoup plus efficaces en termes de largeur de bande que les systèmes DRT classiques pour ce qui est du futur trafic multimédia à forte concentration de données. En utilisant les protocoles MAC intelligents (sensibles à l'état du canal) et l'architecture évoluée fournie par le mode DRT, on peut obtenir une multiplication du débit, un gain de multiplexage statistique et une réduction des retards dans la transmission des paquets.

1 Introduction

Le DRT constitue une solution pour des services à haut débit de données asymétriques et offre une certaine souplesse pour l'implantation des réseaux dans des environnements très divers: (environnements urbains à forte densité de trafic, points d'accès publics, intérieur de bâtiments, et aussi applications avec couverture sur une zone étendue) à moindre coût. Le DRT permet d'offrir toutes les applications de données et toutes les applications vocales, assurant ainsi une utilisation efficace du spectre pour la plupart des services à forte concentration de données. Il constitue l'interface radioélectrique la plus efficace pour des applications de données asymétriques, «saccadées», en mode «continu». Cette fonctionnalité est essentielle car le nombre d'applications hertziennes Internet et de services multimédias pour particuliers et pour entreprises professionnels va augmenter au cours des quelques prochaines années. La technique DRT donne aux opérateurs la possibilité d'avoir suffisamment de capacité et de fonctionnalités pour accroître leur revenu moyen par utilisateur (ARPU) en offrant des services de données asymétriques et gourmands en largeur de bande.

Avec le DRT l'émission et la réception se font sur la même fréquence, ce qui signifie que les canaux en liaison montante et les canaux en liaison descendante présentent plus ou moins les mêmes caractéristiques pour ce qui est du canal radioélectrique. On peut tirer parti de cette réciprocité entre liaisons montantes et liaisons descendantes pour mettre en oeuvre des techniques nouvelles et novatrices où la plus grande partie du traitement du signal, opération lourde, peut être effectuée au niveau de la station de base ou du terminal d'utilisateur; par ailleurs la station de base pourra utiliser les informations provenant du canal au mieux pour le système. Ces techniques (décrites dans les paragraphes ci-après) peuvent être utilisées pour améliorer à la fois la couverture et la capacité.

Le DRT est par ailleurs rentable en termes de déploiement du réseau car il tire parti de l'infrastructure d'un déploiement uniquement DRF pour offrir une capacité extensible adaptée aux points d'accès publics lorsque le trafic vocal et le trafic de données combinés seront pris en charge par une architecture multicouches de macro, micro et picocellules.

Globalement, le DRT offre une plate-forme pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000. Cela est décrit plus avant dans les paragraphes qui suivent.

2 DRT évolué – une plate-forme essentielle pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000

Plusieurs des caractéristiques essentielles inhérentes au DRT et les travaux actuellement entrepris par les commissions d'études et groupes de travail chargés de la normalisation font du DRT une plate-forme idéale pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000. Les principales caractéristiques sont les suivantes:

2.1 Prise en charge d'un débit de données élevé

Le DRT évolue pour accepter des débits de données de plus en plus élevés, ce qui se situe dans la perspective de l'utilisation accrue de services à forte concentration de données. Grâce aux modulations

d'ordre supérieur conjuguées à une adaptation de liaison rapide, on aura des techniques de codage et de modulation adaptatives qui réduisent les exigences en matière de rapport S/N et autorisent des communications de données plus efficaces ce qui, concrètement, accroît la capacité de transport de données des systèmes. Par ailleurs, l'utilisation de techniques de diversité améliorée et d'antennes intelligentes facilitera la prise en charge d'un trafic à haut débit de données. En outre, le recours à des techniques comme l'H-ARQ et ses variations rendra la transmission des données plus efficace du point de vue de l'interface radioélectrique. Ces caractéristiques et d'autres sont actuellement mises en oeuvre pour que le DRT puisse accepter des débits de données toujours plus élevés.

Etant donné qu'il offre un multiplexage temporel et un multiplexage par code, le DRT est plus intéressant pour des techniques d'accès grande vitesse car il permet une utilisation plus souple et plus efficace des ressources de canaux physiques ce qui facilite l'intégration de différents types de services (voix, données, etc.). La capacité et l'efficacité spectrale sont accrues.

Par ailleurs la réciprocité des canaux de liaison montante/liaison descendante propre aux systèmes DRT permettra de mettre en oeuvre plus facilement des techniques comme les antennes intelligentes ou les techniques de diversité qui acceptent un trafic à haut débit de données.

2.2 Amélioration de l'efficacité spectrale

En dehors des techniques de traitement du signal et des schémas de modulation dont on vient de parler, il existe des algorithmes d'affectation des ressources très performants qui confèrent aux systèmes DRT une grande efficacité spectrale, en particulier lorsque ces systèmes prennent en charge des données asymétriques, par exemple pour des services liés à l'Internet. Grâce aux algorithmes d'attribution dynamique lente ou rapide des canaux, on est sûr que les ressources sont attribuées de façon optimale pour les transmissions sur la liaison montante et sur la liaison descendante.

2.3 Amélioration de la planification des cellules et de la couverture

Le DRT apporte une seconde «dimension» à la planification des cellules lorsqu'il est utilisé conjointement avec des systèmes DRF. Pour les points d'accès publics, en cas de subdivision des cellules ou pour la desserte de zones où l'on utilise des services à forte concentration de données, on pourrait déployer des systèmes DRT et DRF de façon à tirer parti de leurs avantages respectifs. Lors de la planification des cellules, les zones de couverture assurées par les systèmes DRF et les systèmes DRT peuvent être considérées comme pratiquement indépendantes et offrent à l'opérateur un nouveau «plan» de cartes de couverture si les pratiques de coexistence sont suivies.

2.4 Mise en oeuvre souple d'applications IP à forte concentration de données

Etant donné que les débits de données demandés sont de plus en plus élevés, les cellules deviennent de plus en plus petites et évoluent vers des micro ou picocellules. Le DRT peut être mis en oeuvre avec des picocellules et concerne les utilisateurs de débit de données élevés pour les applications centrées IP qui exigent une grande largeur de bande. Avec le DRT l'architecture des stations de base et des terminaux d'utilisateur devrait tirer pleinement parti des algorithmes de détection multi-utilisateurs, des techniques de diversité et des techniques de traitement d'antenne qui sont nécessaires pour de tels environnements.

2.5 Offres multimode intégrées

Compte tenu du dynamisme des organismes de normalisation et de leurs activités, on peut penser que les normes concernant les systèmes postérieurs aux IMT-2000 vont se multiplier avec des chemins d'évolution divers. Le DRT sera intégré à des produits polyvalents acceptant plus d'une norme. Les caractéristiques propres au DRT évolué permettent la mise en place d'une architecture commune rentable parallèlement à d'autres systèmes postérieurs aux IMT-2000.

3 Innovation apportée aux systèmes actuels et émergents par le DRT

Le DRT, en raison de ses caractéristiques propres, est un excellent moyen d'innovation pour les systèmes futurs. L'une de ses principales caractéristiques est la possibilité d'émission et de réception sur la même fréquence, ce qui permet à des techniques novatrices de tirer parti de la réciprocité des canaux de liaison montante et de liaison descendante. Des exemples importants de techniques novatrices sont examinés ci-après.

3.1 Détection et réciprocité des canaux

Les caractéristiques d'un canal hertzien varient dans le temps et en fréquence. Les canaux de liaison montante et les canaux de liaison descendante d'un système de communication hertzien sont dits réciproques si la réponse impulsionnelle du canal ne varie pas dans des proportions importantes entre les transmissions en liaison montante et les transmissions en liaison descendante. Pour les systèmes DRF, en raison de l'espacement duplex nécessaire pour la séparation des fréquences des liaisons montantes et descendantes, il n'y a plus de réciprocité de canal. L'utilisation de canaux réciproques, caractéristique unique des systèmes DRT, offre toutefois des avantages pour les systèmes. La réponse du canal en liaison montante et celle du canal en liaison descendante d'un système DRT sont réciproques si le temps d'attente est raisonnablement court. La réciprocité de canal pour une fréquence porteuse unique utilisée en partage par la liaison montante et la liaison descendante permet d'avoir accès plus facilement aux informations concernant l'état du canal dans le cas de techniques de traitement du signal évoluées. Par exemple, la réciprocité de canal garantit une forte corrélation entre les évanouissements sur la liaison montante et ceux sur la liaison descendante. Etant donné que les caractéristiques de canal sont les mêmes dans les deux sens de transmission, les ressources de traitement du signal nécessaires pour assurer le traitement spatial/temporel/d'égalisation/fréquentiel peuvent être partagées entre l'émetteur et le récepteur. Le DRT est la technique toute indiquée pour un traitement du signal évolué dans des conditions de commande de puissance en boucle ouverte, de combinaison nouvelle de trajets multiples et d'antennes et de techniques de traitement spatio-temporel, pour un surcoût moindre.

Exemple des avantages qu'offre la technique de détection de canaux, une station de base équipée d'antennes-réseaux adaptatives à formation de faisceaux peut détecter l'environnement sur la liaison montante mais doit extrapoler les conditions du canal pour la liaison descendante à moins d'utiliser la technique DRT. Les techniques de formation de faisceaux apportent certes des améliorations aux systèmes DRT et DRF mais il est en général plus difficile d'utiliser l'antenne-réseau pour améliorer les performances sur la liaison descendante d'un système DRF que sur la liaison montante, faute de mesures directes de la réponse du canal de liaison descendante. Dans les méthodes classiques de formation de faisceaux en liaison descendante de systèmes DRF comme les méthodes basées sur la direction d'arrivée, on utilise les signaux en liaison montante pour construire la réponse du canal de liaison descendante. De telles techniques nécessitent des calculs très complexes et ne donnent pas de bons résultats lorsque la propagation par trajets multiples est importante. Par ailleurs, avec une technique de formation des faisceaux en liaison descendante aveugle qui utilise les caractéristiques du canal spatial en liaison montante, les performances ne sont pas optimales en raison du décalage angulaire direction d'arrivée-direction de départ imputable au canal qui subit la propagation par trajets multiples. Par ailleurs, en raison de la décorrélation des canaux dans un système DRF, les techniques aveugles de combinaison optimale des canaux de liaison descendante ne fonctionnent pas de façon optimale lorsque l'espacement duplex dépasse les quelques MHz. Grâce à la réciprocité des canaux dans les systèmes DRT, véritable rétroaction, les antennes adaptatives fonctionnent de façon optimale sur la liaison montante comme sur la liaison descendante.

3.2 Antennes adaptatives

Il est possible d'ajouter des antennes-réseaux adaptatives en effectuant un traitement du signal évolué au niveau de la station de base et en partageant les informations de pondération du canal

avec les terminaux d'utilisateur. Dans les systèmes DRT, on peut ainsi multiplier par dix l'efficacité spectrale sans accroître le coût du terminal d'utilisateur.

3.3 Détection multi-utilisateurs

Dans les systèmes AMRC, plusieurs utilisateurs simultanément actifs sur le même canal sont différenciés par leur code orthogonal propre. L'orthogonalité de ces codes protège les utilisateurs contre les brouillages liés à l'accès multiple. Cette orthogonalité est toutefois perdue dans une certaine mesure en présence d'évanouissements sélectifs en fréquence. On peut utiliser des techniques de détection multi-utilisateurs pour lutter contre les effets des brouillages liés à l'accès multiple. Pour toutes ces techniques, il faut connaître la réponse impulsionnelle du canal. Avec le DRT, l'évaluation du canal, en particulier en liaison descendante, peut être beaucoup plus simple et beaucoup plus efficace (voir le § 3.1).

Annexe 4

Antennes adaptatives et principales caractéristiques techniques

1 Introduction

La présente Annexe définit les principales notions liées aux antennes adaptatives et décrit brièvement 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.

Dans la présente Annexe, on examine les diverses notions liées aux antennes adaptatives, et notamment la notion de «canaux spatiaux»; les possibilités offertes par cette technologie sont analysées théoriquement et les principales caractéristiques sont définies.

2 Antennes et antennes adaptatives

2.1 Antenne et couverture

Adaptées à des environnements radiofréquence simples où l'on ne connaît pas précisément l'emplacement de l'utilisateur, les antennes équidirectives diffusent les signaux et une fraction minimale seulement de l'énergie globale rayonnée 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.

Avec les systèmes d'antennes sectorielles la zone couverte par une cellule classique est subdivisée en secteurs qui sont desservis par plusieurs antennes directives qui semblent situées sur le site de la station de base. Du point de vue de l'exploitation, chaque secteur est traité comme une cellule différente. 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 Antennes et propagation par trajets multiples

Plus proches des antennes «intelligentes», les systèmes d'antenne à diversité spatiale comportent deux (ou plus de deux) éléments dont la séparation physique est utilisée 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 (SWD)*: 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 SWD 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 SWD, 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 instantanées de faisceau. 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 adaptatifs

L'arrivée de processeurs de signaux numériques puissants et peu coûteux, de processeurs polyvalents et de circuits ASIC 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.

Les termes couramment utilisés aujourd'hui qui couvrent divers aspects de la technologie des systèmes d'antenne «intelligents» sont notamment les suivants: antennes intelligentes, antennes-réseaux à commande de phase, traitement spatial, formation de faisceaux numériques, systèmes d'antenne adaptatifs, etc. Les systèmes d'antenne adaptatifs sont habituellement divisés en systèmes «à commutation de faisceaux» et systèmes «d'antennes-réseaux adaptatifs». Toutefois, ces deux types de systèmes partagent de nombreuses caractéristiques pour ce qui est du matériel et se distinguent essentiellement par leur intelligence adaptative.

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.

2.4.1 Antennes à commutation de faisceaux

Les systèmes d'antenne à commutation de faisceaux sont constitués de 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 de sortie sur 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 technologie la plus évoluée à ce jour. 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

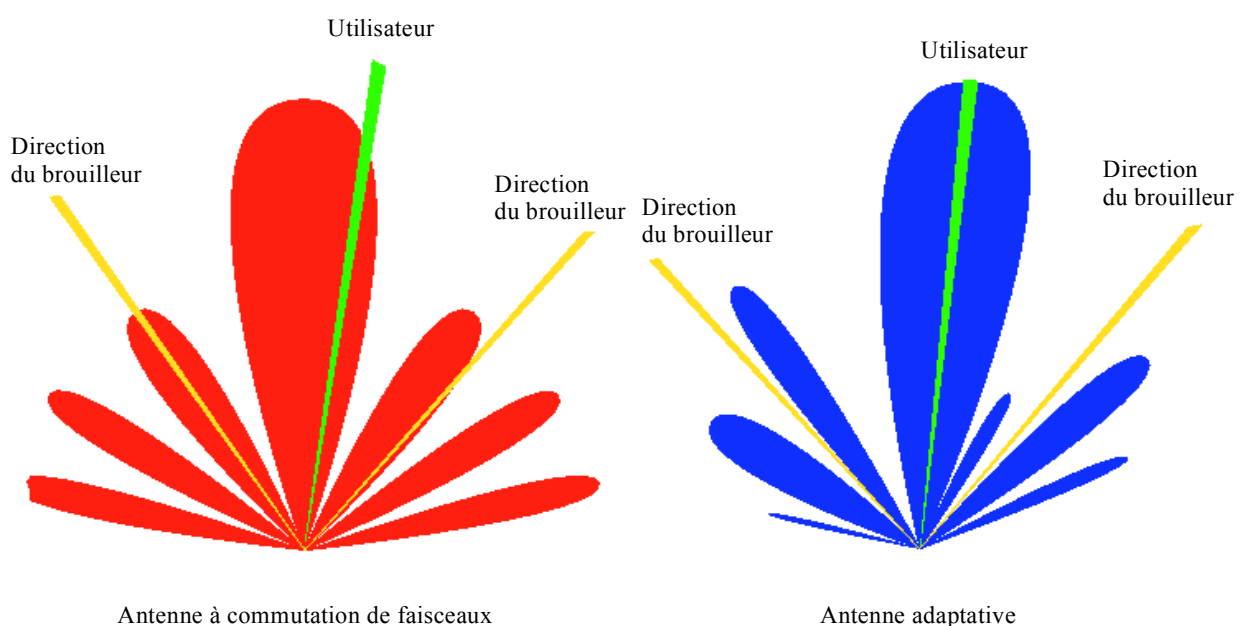
du réseau d'antenne. Toutefois, seul le système adaptatif assure un gain optimal tout en réduisant les brouillages. La technique de combinaison en diversité adapte en permanence le diagramme d'antenne à l'environnement. La différence entre cette technique et un système d'antenne adaptatif est essentiellement 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 S/I 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, le bilan de liaison est constamment optimisé car ce type de système permet de suivre les utilisateurs à l'aide des lobes principaux de l'antenne et d'atténuer les effets des brouilleurs grâce aux zéros. 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. 13 qui montre comment les algorithmes adaptatifs se comportent par rapport aux signaux brouilleurs et au signal utile.

FIGURE 13

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



2.4.3 Traitement spatial: la méthode entièrement adaptative

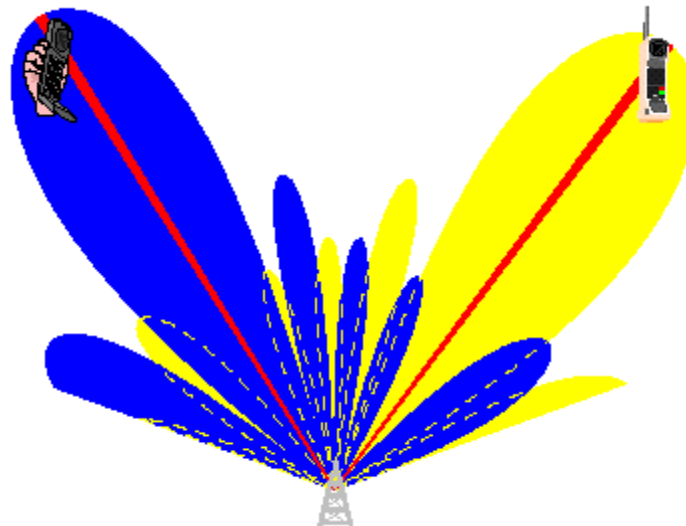
A l'aide d'algorithmes sophistiqués ainsi que d'un équipement de traitement et de microprocesseurs puissants, le «traitement spatial» tire parti de la réutilisation des fréquences résultant de la suppression sans précédent des brouillages. Très schématiquement, le traitement spatial crée dynamiquement un faisceau différent 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. 14 illustre une telle situation pour deux utilisateurs. Des canaux spatiaux ou des techniques de réutilisation intracellulaire sont utilisés dans des systèmes cellulaires actuellement en exploitation. La notion de réutilisation intracellulaire peut paraître inhabituelle mais elle est déjà utilisée lorsque la sélectivité spatiale de la distribution et de la collecte de l'énergie radioélectrique de la cellule est suffisante. Selon l'interface radioélectrique, même une faible sélectivité ou une discrimination spatiale (10 dB) pour différents emplacements dans la cellule peut suffire.

L'efficacité spectrale globale exprimée en bits/s/Hz/cellule peut être multipliée par un facteur compris entre 20 et 40 fois ou plus dans des systèmes opérationnels grâce à l'utilisation d'antennes adaptatives (PHS, GSM par exemple). A l'échelle mondiale, plus de 140 000 systèmes d'antenne adaptatifs ont déjà été mis en place pour divers systèmes cellulaires hyperfréquences, systèmes mobiles ou systèmes fixes (accès hertzien fixe).

FIGURE 14

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



2038-14

3 Incidences des antennes adaptatives sur la coexistence des systèmes DRT et DRF

L'incidence directe de la coexistence de ces deux types de systèmes est due 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, en particulier en cas de déploiements mixtes de

systèmes DRT et DRF. Dans l'absolu, le cas défavorable peut sembler impossible à résoudre mais le facteur statistique introduit par l'utilisation d'antennes adaptatives détermine le pourcentage de temps pendant lequel se produit ledit cas. Si ce pourcentage est suffisamment faible, les règles de coexistence qui ont éventuellement été définies peuvent par exemple être assouplies, ce qui facilite le déploiement des systèmes en termes économiques. On peut utiliser la méthode de Monte Carlo pour l'analyse statistique pour étudier les améliorations que l'on peut obtenir avec des antennes adaptatives. Dans des simulations réalistes de systèmes IMT-2000, on a constaté des améliorations très importantes en termes de distance de coexistence en toute sécurité (considérablement réduite) ou de réduction de la discrimination RF à obtenir pour les stations de base. Dans certains cas, une faible discrimination supplémentaire suffit, laquelle est facile à obtenir si l'on adopte des pratiques d'implantation des sites facilitant la coexistence; dans d'autres situations des cas de coexistence autrefois impossibles deviennent possibles.

4 Considérations relatives à la conception de l'interface radioélectrique

4.1 Liaison montante

L'alignement de synchronisation ou l'écart de synchronisation entre signaux binaires peut changer en raison des variations de phase et la fréquence de réception peut être décalée par rapport à la fréquence d'émission en raison des différences dans les oscillateurs locaux et des signaux subissant une propagation par trajets multiples qui font varier le niveau du signal reçu. Il en résulte des taux d'erreur binaires élevés ou un signal irrécupérable. On peut essayer de corriger ces anomalies au niveau de l'antenne en utilisant une diversité d'antenne à commutation ou une combinaison optimale des rapports de variation. Toutefois, on obtient les meilleurs résultats en analysant le signal de sortie du démodulateur et en utilisant des mécanismes de rétroaction qui corrigent en permanence le signal.

Le degré de liberté pour corriger ces anomalies augmente si différents échantillons du même signal peuvent être analysés à partir de plusieurs antennes ou chaînes de réception étant donné que le même signal arrivant sur différents éléments d'antenne a des caractéristiques légèrement différentes (déphasage et amplitude). Ces caractéristiques et d'autres paramètres temporels peuvent être analysés séparément ou ensemble pour optimiser le signal qui est transmis au réseau de commutation. Un autre coefficient de qualité qui peut être sensiblement amélioré lorsque l'on analyse ainsi les signaux est le rapport porteuse/rejet du brouillage; en d'autres termes, le brouillage causé par des signaux non utiles peut être isolé et éliminé pour nettoyer le signal utile, ce qui conduit à une meilleure couverture cellulaire et une meilleure qualité des communications.

Pour arriver à ces améliorations, le coût lié à l'adjonction d'amplificateurs de puissance dans une station de base à plusieurs antennes peut être inférieur au coût de l'amplificateur de puissance d'une station de base classique à une seule antenne. Le coût des amplificateurs augmente fortement avec la puissance de sortie et le coût de plusieurs amplificateurs à faible puissance qui peuvent être intégrés à l'antenne est inférieur aujourd'hui au coût d'un amplificateur de forte puissance dont la puissance apparente rayonnée est équivalente.

4.2 Liaison descendante

En utilisant la réciprocité, il est possible de réaliser les mêmes gains de performance sur la liaison descendante. L'opération est simple avec le DRT mais plus complexe dans un environnement DRF, même si le problème n'est pas insurmontable. Les canaux de signalisation de radiodiffusion posent aussi des problèmes particuliers mais peuvent être intégrés dans le cadre de solutions novatrices.

4.3 Unité d'abonné

Pour certaines applications, on peut intégrer de façon économique un traitement d'antenne adaptative au niveau de l'unité d'abonné, ce qui permet d'accroître le gain sur la liaison montante et de réduire le brouillage sur la liaison montante dans l'ensemble du système. On obtient aussi des avantages importants avec des stratégies plus simples sur la liaison descendante uniquement lorsque la station de base est équipée d'antennes adaptatives. La mise en oeuvre de la commande de puissance sur la liaison montante améliorera les performances globales du réseau étant donné que la diminution des brouillages permet d'augmenter la capacité. Intégrer étroitement la commande de puissance au niveau de l'abonné dans une stratégie globale d'amélioration des performances a un effet très positif sur la qualité de fonctionnement du réseau.

4.4 Nouvelles interfaces radioélectriques optimales

Au cours de la dernière décennie, de nombreux efforts ont été faits pour améliorer l'efficacité des réseaux hertziens. Ces efforts ont essentiellement porté sur les types de modulation, le codage du canal et les méthodes d'accès. Dans certains domaines, une conception soignée intégrant des antennes adaptatives permettrait de se rapprocher beaucoup de la solution optimale globale.

4.5 Méthodes de duplexage

Comme cela a déjà été dit plus haut, les avantages du DRT par rapport au DRF sont évidents en raison de la décorrélation beaucoup moins grande entre les canaux de liaison montante et les canaux de liaison descendante. Au départ, un des inconvénients du DRT tenait aux problèmes liés à la commutation rapide entre l'émission et la réception, ce qui limitait la p.i.r.e. d'une station de base DRT. Toutefois, avec la combinaison des signaux provenant des différents éléments d'émission indépendants, la puissance globale qui peut être rapidement activée ou désactivée est sensiblement augmentée. Pour ce qui est des systèmes de Terre à large zone de couverture et à mobilité rapide, l'utilisation de bandes appariées et d'une transmission DRF pourrait être avantageuse, alors que pour les systèmes à plus courte portée et à mobilité plus lente une transmission DRT dans des bandes non appariées peut être avantageuse dans le cas d'un trafic asymétrique.

4.6 Largeur de bande des porteuses

La décision d'intégrer des antennes adaptatives aura une incidence sur le choix de la largeur de bande des porteuses. Les systèmes d'antenne adaptatifs assurent la meilleure maîtrise de l'environnement RF lorsque le nombre d'utilisateurs cocanal dans la cellule ou en dehors de la cellule (vu depuis une station de base donnée) est faible. Il vaut mieux subdiviser les utilisateurs par tranche de spectre que d'avoir un grand nombre d'utilisateurs qui se partagent «l'ensemble» du spectre. Il faudra peut-être aussi examiner la variation de la corrélation du signal sur la largeur de bande, laquelle tend à diminuer lorsque la largeur de bande du canal augmente, ce qui rend le traitement avec antennes adaptatives plus complexe.

4.7 Méthodes de modulation

Dans la conception d'une interface radioélectrique utilisant des antennes intelligentes, les méthodes de modulation doivent être choisies de façon à optimiser le débit du système si l'on tient compte du brouillage au niveau du réseau et de la capacité des antennes adaptatives à éliminer ce brouillage. Cette conception donne une structure de modulation à débit variable qui fonctionne efficacement pour un certain nombre de valeurs du rapport C/I .

4.8 Méthodes de signalisation, de commande et de diffusion

Un point souvent examiné est le comportement des antennes intelligentes avec les canaux de diffusion qui sont courants dans de nombreuses interfaces radioélectriques existantes. Il s'agit d'un bon exemple dans lequel l'intégration d'antennes adaptatives dans la conception de l'interface radioélectrique permet d'élaborer des structures de diffusion adaptées à une structure à plusieurs antennes. Bien sûr, l'interface radioélectrique peut contenir des informations de diffusion mais il faut concevoir avec soin cette structure sinon un bon nombre des avantages apportés par les antennes adaptatives en termes de coût de la station de base ne seront pas pleinement réalisés.

Il en va de même pour les canaux «aveugles», par exemple, les canaux de radiomessagerie où l'information est envoyée à un seul utilisateur (par opposition à l'information de diffusion) sans connaître les coordonnées de cet utilisateur.

4.9 Structures en salves

L'utilisation d'antennes adaptatives aura aussi une incidence sur la structure des salves. Les structures de la salve peuvent intégrer des données «de calage» pour faciliter le traitement des antennes adaptatives. Il faudra trouver un équilibre entre les avantages en termes d'efficacité spectrale et le volume de données supplémentaires nécessaires pour obtenir un débit optimal.

4.10 Structure des trames

Si l'on n'envisage pas d'utiliser des antennes adaptatives, l'élément principal pour la structure des trames est l'inertie et le partage des ressources. Si l'on prévoit d'utiliser des antennes adaptatives, on pourra peut-être examiner la fréquence de mise à jour des informations spatiales. Cela peut avoir une incidence sur l'efficacité spectrale au fur et à mesure que la mobilité de l'utilisateur augmente. En général l'efficacité spectrale sera d'autant plus grande que, si la mobilité augmente, les mises à jour des informations spatiales seront fréquentes. Cela tend à ramener la durée des trames à moins de 10 ms.

4.11 Contrôle MAC

L'utilisation d'antennes adaptatives peut avoir des incidences importantes sur l'ensemble de la chaîne de protocole. Cela comprend les éléments du protocole qui interviennent dans la conception, indépendamment du système RF. L'un de ces éléments est l'accès au support où il est de plus en plus important pour les interfaces radioélectriques de prendre en charge des données à commutation par paquets et à accès aléatoire tout en assurant une qualité de service garantie pour laquelle une inertie acceptable est de l'ordre de quelques dizaines de ms.

L'adjonction de la technologie des antennes adaptatives dans le système permet de résoudre le problème des collisions spatiales dans l'accès MAC, ce qui réduit les problèmes d'accès et améliore les performances par rapport aux systèmes d'antennes non adaptatifs classiques.

5 Conclusions

L'intégration de systèmes d'antennes adaptatifs dans la conception des futurs systèmes IMT-2000 et des systèmes postérieurs aux IMT-2000 améliorera sensiblement l'efficacité spectrale de ces nouveaux systèmes radioélectriques. Les gains d'efficacité spectrale que permettent d'obtenir les systèmes d'antenne adaptatifs peuvent être utilisés non seulement pour réduire le nombre de stations de base (cellules) nécessaires pour déployer un réseau IMT-2000 mais aussi pour obtenir des débits de données sensiblement plus élevés avec une quantité de spectre limitée.

6 Bibliographie

- COMPTON [1988] *Adaptive antennas: Concepts and performance*. Prentice Hall.
- ETSI [septembre 2001] ETSI TR 125 942 V4.0.0 (2001-09) Technical Report. Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS); RF System Scenarios. European Telecommunications Standards Institute.
- FARINA [1991] *Antenna based signal processing techniques for radar systems*. Artech House, Boston, Etats-Unis d'Amérique.
- HAYKIN, S. (Ed.) [1991] *Advances in spectrum analysis and array processing*. Vol. II. Prentice Hall.
- HAYKIN, S. [1991] *Advances in array processing*. Prentice Hall.
- HAYKIN, S. [1991 y 1996] *Adaptive filter theory*. Prentice Hall.
- HUDSON [1981] *Adaptive arrays principles*. Peter Peregrinus.
- KIM, K. et autres [2000] *Handbook of CDMA System Design, Engineering and Optimization*. Prentice Hall.
- LAIHO J. et autres [2002] *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. Wiley.
- LIBERTI, J. C. et RAPPAPORT, T. S. [1999] Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications. *Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies*.
- LITVA, J. [1996] *Digital Beam forming in Wireless Communications*. Artech House.
- MOZINGO et MILLER [1980] *Introduction to adaptive arrays*. Wiley Interscience.
- RAPPAPORT, T. S. Smart Antennas: adaptive arrays, algorithms and wireless position location: Selected Readings IEEE.
- RAPPAPORT, T. S. [1996] *Wireless communications*. Wiley.
- WIDROW, B. y STEARUS, S. D. [1985] *Adaptive signal processing*. Prentice Hall.

Annexe 5

Techniques MIMO (entrées multiples, sorties multiples)

1 Introduction

Les techniques MIMO utilisent des antennes à plusieurs éléments aux deux extrémités de la liaison avec des algorithmes de traitement du signal qui font une utilisation positive des canaux subissant la propagation par trajets multiples associés aux systèmes de communications mobiles de Terre. Pour la propagation dans un environnement urbain typique, il a été montré que ces techniques permettent d'augmenter la capacité de la liaison au-delà de celle qui est réalisable avec des techniques classiques de formation de faisceaux.

Parmi les configurations d'antenne possibles très diverses qui peuvent être prises en considération les ouvrages et organismes de normalisation ont l'habitude de classer les divers schémas multi-antennes selon deux paramètres, à savoir le nombre d'antennes d'émission et le nombre d'antennes de réception utilisées. Ainsi une combinaison d'antennes pour une liaison est décrite comme $[M_{Transmit}, N_{Receive}]$ type ou plus simplement comme $[M,N]$ type.

Les systèmes 2G actuels ont des terminaux avec une seule antenne et utilisent donc en général:

[1,2] – par exemple, diversité de réception utilisant une combinaison maximale des rapports de variation sur la liaison montante,

[2,1] – par exemple, diversité d'émission sur la liaison descendante.

Par ailleurs, pour certains systèmes IMT-2000 de la troisième génération les éléments suivants sont actuellement définis:

[1,4] – diversité de réception supplémentaire sur la liaison montante,

[4,1] – diversité d'émission sur la liaison descendante basée sur une rétro-information adaptative provenant du terminal mobile.

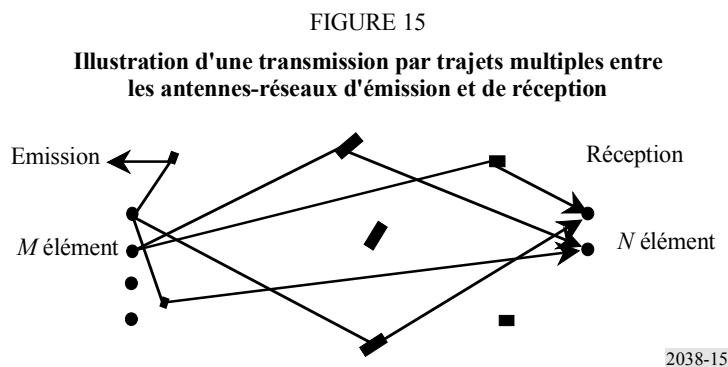
Les systèmes de formation de faisceaux actifs classiques sont généralement de la forme:

[N ,1] – liaison descendante,

[1, N] – liaison montante.

2 Systèmes d'antennes MIMO

Dans un environnement de propagation type dans les bandes utilisées pour les systèmes mobiles, l'énergie RF emprunte bien sûr de nombreux trajets pour circuler entre les éléments d'antenne de l'émetteur et du récepteur. Dans une liaison MIMO les trajets distincts seront nombreux entre les différentes paires d'éléments d'antenne et la Fig. 15 illustre certains des trajets qui peuvent exister entre les réseaux d'éléments d'antenne d'émission et de réception.

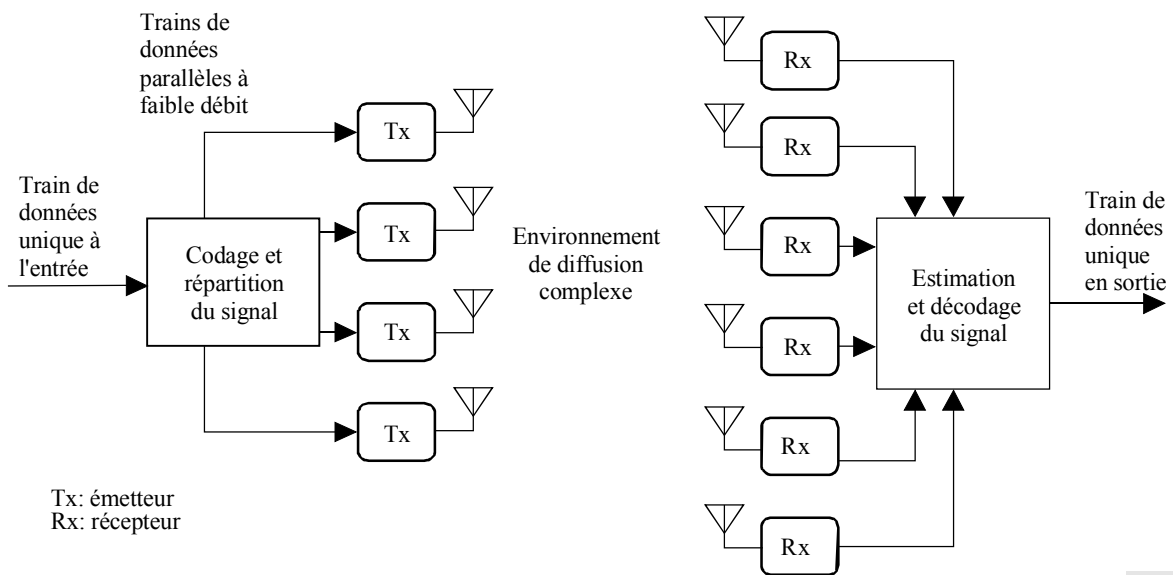


Pour les techniques de formation de faisceaux adaptatives, les signaux à destination ou en provenance des éléments d'antenne sont adaptés en phase et en amplitude pour former un faisceau afin de sélectionner le meilleur trajet entre l'antenne-réseau d'émission et l'antenne-réseau de réception tout en minimisant le gain d'antenne dans la direction des signaux brouilleurs non désirés. Avec plusieurs éléments d'antenne aux deux extrémités de la liaison, il est également possible de transmettre différents trains de données sur certains, voire tous les éléments d'émission et de répartir les différentes émissions entre plusieurs récepteurs, chacun maximisant un signal tout en minimisant les autres. On peut ainsi beaucoup améliorer la capacité par rapport à la méthode simple de formation de faisceaux pour des environnements de diffusion complexes. Les limites à la capacité qu'il est possible d'obtenir avec ce type de configuration dans un environnement de propagation mobile type sont calculées dans [Foschini et Gans, 1998].

Le traitement du signal dans ces systèmes MIMO se fera généralement comme indiqué à la Fig. 16. Les trains de données peuvent être codés de façon indépendante, ce qui simplifie le décodage au niveau du récepteur [Foschini et autres, 1999] ou la méthode peut être pleinement utilisée si on inclut tous les trains de données dans un schéma de codage bidimensionnel [Foschini, 1996]. La capacité maximale est obtenue lorsqu'on utilise les informations en retour provenant du récepteur pour adapter la répartition de puissance, le codage et la modulation au niveau de l'émetteur.

FIGURE 16

Schéma des fonctions d'un émetteur-récepteur MIMO



2038-16

Ces techniques MIMO font actuellement l'objet de beaucoup d'activités de recherche et les paragraphes qui suivent donnent des indications générales sur les gains qu'il est possible de réaliser et sur le type d'environnements de propagation dans lesquels ces techniques ont le plus de chance d'accroître la capacité d'un réseau. Il ne s'agit pas de résultats définitifs et des analyses plus détaillées sont disponibles dans les références données.

3 Efficacité spectrale des systèmes MIMO dans des liaisons isolées

La capacité bit/s/Hz d'une liaison MIMO $[M,N]$ est donnée par:

$$C = B \log_2 (\mathbf{I}_N + r\mathbf{H}\mathbf{H}^H/M)$$

où:

B : largeur de bande,

\mathbf{I}_N : matrice d'identité $N \times N$,

r : rapport S/N moyen

\mathbf{H} : matrice $M \times N$ où (m,n) ^{ème} élément: amplitude complexe entre le m ^{ème} émetteur et le n ^{ème} récepteur.

On est parti de l'hypothèse que les informations concernant l'état du canal sont parfaites au niveau du récepteur en d'autres termes que les entrées de la matrice H sont connues avec exactitude. Dans un environnement de diffusion diversifié, les entrées de H sont des variables aléatoires indépendantes obéissant à la même distribution complexe de Gauss. Avec cette condition et la condition supplémentaire que r est bien supérieur à un, plus le nombre d'antennes augmente et si $M = N$, plus la capacité se rapproche de:

$$C = BM \log_2(r/e)$$

Par ailleurs, en utilisant la formation de faisceaux, la directivité de l'antenne-réseau augmente, ce qui se traduit par une augmentation linéaire du rapport S/N . Par conséquent, la capacité est donnée par la formule:

$$C = B \log_2 \left[1 + Mr \sum_{n=1}^N |h_n|^2 \right]$$

où:

h_n : amplitude complexe au niveau du $n^{\text{ième}}$ récepteur.

Dans un environnement de diffusion suffisamment complexe, la capacité est donc directement proportionnelle au nombre d'antennes à chaque extrémité de la liaison pour le système MIMO $[N,N]$ en exploitation, mais seulement proportionnelle au logarithme du nombre d'antennes dans le cas de techniques de formation de faisceaux par réseau déphaseur.

(Voir la note de bas de page pour une explication très simplifiée de la base de ce phénomène.)⁴

⁴ Les avantages en matière de spectre qu'offre la méthode MIMO sont plus facilement démontrables avec un modèle très simplifié:

On considère que la limite de capacité d'un canal unique est représentée par l'expression classique de Shannon:

$$C = B \log_2(1 + SNR_{Omni})$$

où:

SNR_{Omni} : rapport S/N au niveau du récepteur pour un canal unique entre deux antennes équidirectives classiques.

Si la puissance d'émission est répartie de façon égale entre M éléments d'émission et si M éléments de réception sont utilisés avec des techniques de formation de faisceaux classiques par réseau déphaseur aux deux extrémités de liaison, la capacité est voisine de:

$$C_{beams} = B \log_2(1 + M^2 SNR_{Omni}) \Rightarrow B \{ 2 \log_2(M \cdot SNR_{Omni}) \}$$

pour un rapport S/N raisonnable.

Toutefois, si dans des conditions idéales analogues la puissance est répartie entre M canaux *indépendants* distincts avec le même affaiblissement sur le trajet, la capacité peut devenir presque égale à M fois la capacité de chaque liaison $[1,M]$:

$$C_{MIMO} = MB \log_2(1 + SNR_{Omni}) \Rightarrow MB \log_2(SNR_{Omni})$$

pour un rapport S/N raisonnable.

Il s'agit là bien sûr d'une simplification extrême afin d'illustrer les effets et elle suppose que les signaux séparés provenant des canaux subissant la diffusion sont indépendants et ne sont pas affectés les uns par les autres.

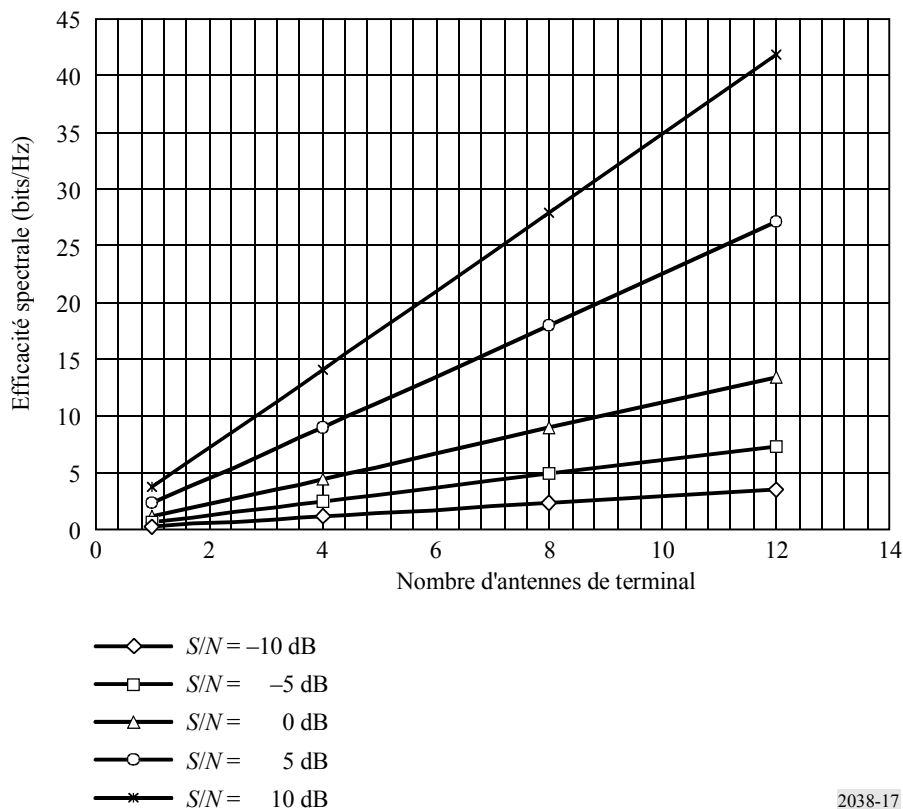
4 Gains d'efficacité spectrale dans un système cellulaire limité par les brouillages

La Fig. 17 montre l'efficacité spectrale qu'il est possible d'obtenir avec la capacité de Shannon [Telatar, 1999]. Le nombre d'antennes au niveau de la station de base et au niveau de chaque terminal est le même.

On obtient des résultats analogues pour un réseau mobile limité par le brouillage [Catreux et autres, 2001].

FIGURE 17

Résultats de simulations pour le gain d'efficacité spectrale que permettraient d'obtenir les techniques MIMO



2038-17

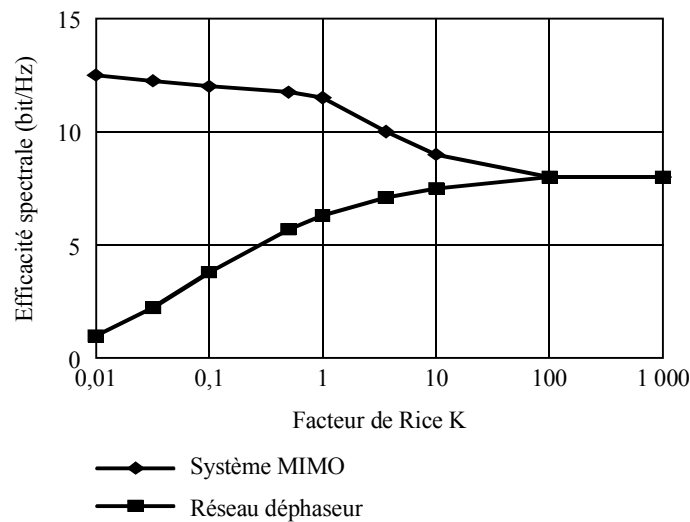
5 Variation des gains d'efficacité spectrale obtenus à l'aide des techniques MIMO pour différents environnements de diffusion

Les gains d'efficacité que peuvent apporter les systèmes MIMO ne sont réalisables que dans un environnement de diffusion complexe et il est donc essentiel de quantifier ces gains pour différents environnements de diffusion. Une démonstration simple des gains réalisables est donnée à la Fig. 18 qui montre les résultats de quelques simulations de l'efficacité spectrale réalisable pour une liaison unique d'un système mobile fonctionnant dans divers environnements de diffusion. Les environnements simulés sont modélisés comme des canaux de Rice avec une fourchette de facteurs K afin de couvrir les cas allant d'une visibilité quasi directe ($K > 10$) à des environnements de diffusion diversifiés ($K < 0,1$).

Ces résultats ont été obtenus dans les conditions idéalisées d'informations d'état du canal parfaites au niveau de l'émetteur et du récepteur pour un rapport S/N de 10 dB.

FIGURE 18

Efficacité spectrale d'une liaison utilisant un schéma d'antenne* avec des techniques MIMO et une technique de formation de faisceaux par réseau déphaseur pour différentes conditions du canal de diffusion



* [Raleigh et Cioffi, 1998; Foschini et autres, 1999]

2038-18

6 Variation de la capacité de liaisons MIMO à l'intérieur d'un réseau cellulaire

Pour pouvoir planifier les réseaux qui utilisent des techniques MIMO, il faut avoir des modèles de distribution de la capacité pour les liaisons vers les différents terminaux afin de pouvoir faire des évaluations techniques de la capacité du système, du débit total et de la probabilité d'effondrement de la capacité.

Ce problème est au centre d'un grand nombre de travaux de recherche, par exemple dans [Smith et Shafi, 2001 et 2002b] qui montrent que la distribution de la capacité MIMO pour des canaux de Rayleigh classiques se rapproche d'une distribution gaussienne au fur et à mesure qu'augmente le nombre d'antennes d'émission et de réception. Des simulations font apparaître qu'une approximation gaussienne de la capacité est raisonnablement précise même pour des systèmes ayant trois ou plus de trois antennes à chaque extrémité de la liaison; les expressions exactes de la moyenne et de la variance de la capacité gaussienne pour un nombre donné d'antennes d'émission et de réception sont calculées dans [Smith et Shafi, 2001].

On montre [Shafi et Smith, 2002] que la distribution de la capacité MIMO dans des conditions d'évanouissements de Rice peut aussi s'exprimer comme une variable aléatoire gaussienne présentant la même dépendance vis-à-vis du nombre d'antennes d'émission et de réception.

Ces sujets sont développés plus avant dans [Smith et Shafi, 2002a] où l'on examine le comportement de la capacité MIMO sous l'influence de divers algorithmes d'attribution de puissance au niveau de l'émetteur. On démontre que l'approximation gaussienne reste bonne pour ces différentes stratégies d'attribution de puissance étudiées. Parmi ces stratégies il y avait l'attribution d'une puissance égale à chaque antenne, la technique classique du «water filling» avec une connaissance parfaite de l'état du canal et une nouvelle stratégie donnant une meilleure capacité que les deux premières pour des estimations moins qu'idéales des conditions du canal. On démontre que toutes ces méthodes d'attribution de puissance donnent une capacité de liaison pour laquelle on peut toujours faire une approximation à l'aide d'une variable aléatoire de Gauss pour des canaux de Rayleigh ou de Rice subissant des évanouissements.

7 Problèmes de mise en oeuvre

L'introduction des techniques MIMO dans les systèmes de communication hertziens pose un certain nombre de problèmes de mise en oeuvre. Au niveau de la station de base, la conséquence la plus importante sera le durcissement des contraintes RF et de câblage en raison de l'augmentation du nombre d'éléments d'antenne d'émission/de réception tant qu'il n'y aura pas de structures d'émetteur, de récepteur et d'antenne plus intégrées, mais les problèmes les plus importants se situent au niveau du terminal pour lequel il faudra surmonter les obstacles liés à la taille, à la puissance et au coût.

Les travaux de recherche doivent porter sur la viabilité des terminaux utilisant des techniques MIMO ou des techniques de diversité et mettre tout particulièrement l'accent sur l'optimisation des performances du système d'antenne du terminal dans des scénarios de déploiement à macrocellules réalistes et compte tenu de la miniaturisation des terminaux de demain que sont les portables, les assistants personnels ou les combinés. Il faudra notamment concevoir des antennes présentant une faible corrélation dans un espace très restreint et fonctionnant bien dans des environnements de propagation nomades ou mobiles réalistes, en intérieur ou en extérieur. Il faudra aussi minimiser les interactions entre les différentes fonctions à l'intérieur du terminal (compatibilité électromagnétique).

Diverses antennes de terminal ont déjà été étudiées du point de vue de différents facteurs liés à la forme, notamment les unités de base à picocellules [Smith et autres, 1997 et 1999] et les terminaux d'accès hertzien fixes [Kitchener et Smith, 1998]. Dans les deux premiers cas, les antennes sont à l'intérieur d'un local normalisé et dans le troisième cas, on a adapté la forme du terminal pour obtenir les meilleures performances de l'antenne. Ces deux méthodes sont des solutions possibles pour les mises en oeuvre futures d'antennes de terminal diverses/MIMO. Pour un terminal autonome, par exemple un portable, un aspect important est de savoir si les éléments de l'antenne de ce terminal sont à plat sur une table (par exemple dans l'unité de base) ou orientés verticalement (dans le dispositif d'affichage) et une partie du problème [Smith et autres, 1997 et 1999] est d'avoir une configuration robuste dans plusieurs déploiements.

Il importe d'optimiser la conception des systèmes d'antenne MIMO afin que ces systèmes puissent fonctionner dans les canaux de propagation MIMO associés aux scénarios de déploiement sélectionnés. Les canaux de propagation MIMO sont actuellement étudiés par les organismes de normalisation du 3GPP et du 3GPP2 et diverses sociétés ont soumis des présentations. L'équipe du projet de recherche COST 259 ⁵ [18] a utilisé divers résultats de mesures de la propagation pour élaborer un modèle de canal extérieur-extérieur et on prévoit, dans le cadre du projet COST 273 ⁶, de prolonger ces travaux avec des activités de sous-groupes portant notamment sur les systèmes MIMO, les antennes de combinés, les mesures de canal et les modélisations des canaux.

Les activités de recherche actuellement menées par l'industrie devraient donner les résultats suivants dans les domaines suivants:

- des modèles de canal de propagation MIMO pour des scénarios de déploiement à macro, micro et picocellules qui sont suffisamment détaillés pour permettre une évaluation théorique des configurations d'antenne de terminal MIMO/à diversité;
- des types de systèmes d'antenne génériques pour portables, assistants personnels, unités autonomes et combinés;

⁵ SMITH, M. S., KITCHENER, D. K., DALLEY, J. E. J. et THOMAS, R. R. [avril 1997] Low cost diversity antennas for low power wireless base stations. Proc. ICAP 97, p. 1.445, Edimbourg, Royaume-Uni.

⁶ SMITH, M. S., BUSH, A. K., GWYNN, P. G. et AMOS, S. V. [septembre 1999] Microcell and Picocell base station internal antennas. Proc. WCNC 99, p. 708, Nouvelle-Orléans, Etats-Unis d'Amérique.

- une compréhension de l'interaction entre la conception des antennes multi-éléments et l'environnement de propagation localisé complexe;
- la conception d'algorithmes de traitement du signal efficaces et de schémas de codage associés qui permettent de réaliser dans une grande mesure les gains de capacité théoriquement réalisables mais qui peuvent être mis en oeuvre avec une puissance de traitement bien moindre [Ariyavisitakul, 2001].

Il faut manifestement résoudre des problèmes de mise en oeuvre importants avant de pouvoir utiliser les techniques MIMO pour accroître la capacité des réseaux de communication mobiles. Toutefois, il est utile de savoir qu'il est difficile avec les schémas de modulation d'ordre supérieur classiques d'obtenir des débits de données élevés dans la même largeur de bande de canal. Pour une liaison MIMO utilisant [4,4] antennes et une modulation à quatre états, la liaison de canal équivalente aurait besoin d'utiliser une constellation de modulation à 256 points pour obtenir le même débit de symboles. Avec une modulation à 16 points qui n'est pas déraisonnable pour un système MIMO [4,4], il faudrait mettre en oeuvre une modulation à 4 096 points, quelque peu irréaliste, sur le canal unique à grande vitesse.

8 Conclusions

Les techniques d'antenne MIMO peuvent accroître considérablement la capacité des systèmes mobiles. En particulier, elles ouvrent de grandes possibilités pour fournir des liaisons à grande vitesse et une capacité accrue dans les environnements urbains très denses où la demande de capacité est à son maximum. En tant que telles, ces techniques sont complémentaires des techniques classiques de diversité et de formation des faisceaux qui sont utilisées avec des antennes-réseaux similaires. Par conséquent, on prévoit que les réseaux évolués adapteront le traitement des signaux en provenance et à destination des antennes pour pouvoir fonctionner simultanément dans tous les modes sur le site d'une seule et même station de base. La capacité totale des cellules, ainsi que les débits de données vers les terminaux seront ainsi optimisés pour différentes configurations d'antennes et différents environnements radioélectriques.

9 Références bibliographiques

- ARIYAVISITAKUL, S. L. [août 2001] Turbo Space-Time Processing to improve Wireless Channel Capacity. *IEEE Trans. Comm.* Vol. 49, **8**, p. 1347.
- CATREUX, S., DRIESSEN, P. F. et GREENSTEIN, L. J. [août 2001] Attainable Throughput of an Interference-Limited Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Cellular System. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 49, **8**, p. 1307-1311.
- FOSCHINI, G. J. [automne 1996] Layered Space-Time Architecture for Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas. *Bell Labs Tech. J.* p. 41-59.
- FOSCHINI, G. J. y GANS, M. J. [1998] On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas. *Wireless Personal Comm.*, **6**, p. 315-335.
- FOSCHINI, G. J., GOLDEN, G. D., VALENZUELA, R. A. et WOLNIANSKY, P. W. [novembre 1999] Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. *IEEE J. Selected Areas in Comm.* Vol. 17, p. 1841-1851.
- KITCHENER, D. et SMITH, M. S. [24 février 1998] Low cost antennas for mobile communications. Proc. IEE Colloquium 1998/206 on «Low cost antenna technology».

- RALEIGH, G. G. et CIOFFI, J. M. [mars 1998] Spatio-Temporal Coding for Wireless Communications. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 46, **3**, p. 357-366.
- SHAFI, M. et SMITH, P. J. [janvier 2002] MIMO Capacity in Rician Fading Channels and its Relationship to the K-Factor. *IEEE Trans. Lett. Comm.*
- SMITH, M. S., BUSH, A. K., GWYNN, P. G. et AMOS, S. V. [septembre 1999] Microcell and Picocell base station internal antennas. Proc. WCNC 99, p. 708, New Orleans, Etats Unis d'Amérique.
- SMITH, M. S., KITCHENER, D. K., DALLEY, J. E. J. et THOMAS, R. R. [avril 1997] Low cost diversity antennas for low power wireless base stations. Proc. ICAP 97, p. 1.445, Edinburgh, Royaume Uni.
- SMITH, P. J. et SHAFI, M. [août 2001] On a Gaussian Approximation to the Capacity of Wireless MIMO Systems. *IEEE Trans. Comm.*
- SMITH, P. J. et SHAFI, M. [2002a] Water Filling Methods for MIMO Systems. Proc. of 3rd AusCTW (4-5 février 2002), Canberra, Australia.
- SMITH, P. J. et SHAFI, M. [2002b] On a Gaussian Approximation to the Capacity of Wireless MIMO Systems. Conference Proc., ICC 2002, (avril 2002) New York, Etats-Unis d'Amérique.
- TELATAR, E. I. [novembre 1999] Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels. *Euro Trans. Telecom.* Vol. 10, p. 585-595.

10 Bibliographie

- NAGUIB, A. F., TAROHK, V., SESHADRI, N. et CALDERBANK, A. R. [octobre 1998] A Space-Time Coding Modem for High-Data-Rate Wireless Communications. *IEEE JSAC*, Vol. 16, **8**, p. 1459-1477.
- DRIESSEN, P. F. et FOSCHINI, G. F. [février 1999] On the capacity Formula for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Channels: A Geometric Interpretation. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 47, **2**, p. 173-176.
- JEFFRIES, A. et SMITH, M. [mars 2002] Multiple Antenna Terminals Incorporating MIMO and Diversity Technologies, WWR5 Research Submission, Tempe, Arizona, Etats-Unis d'Amérique.

Annexe 6

Systèmes radioélectriques définis par logiciel

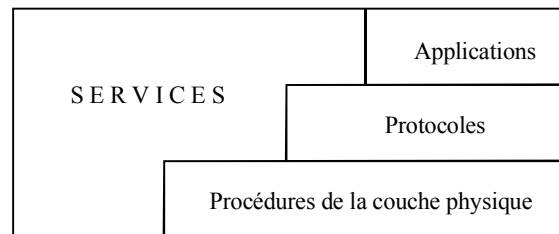
1 Introduction

La présente Annexe donne des précisions sur l'architecture des SDR (systèmes radioélectriques définis par logiciel). Elle vient compléter le § 3 (Aperçu des principales nouvelles technologies) qui donne une définition de ces systèmes et décrit les prescriptions qui leur sont associées.

La présente Annexe décrit les fonctionnalités ainsi qu'une architecture de système permettant de respecter les exigences fixées au § 3.

Les systèmes SDR concernent donc en principe toutes les couches de communication (depuis la couche physique jusqu'à la couche application) de l'interface radioélectrique (voir la Fig. 19) et ont des incidences sur le terminal mobile et sur le réseau.

FIGURE 19
Couches de communication touchées par les systèmes SDR



2038-19

Il est essentiel que les systèmes SDR fournissent des moyens pour:

- adapter l'interface radioélectrique à la diversité des environnements de déploiement/des normes relatives aux interfaces radioélectriques;
- fournir des applications et des services potentiellement nouveaux;
- mettre à jour les logiciels;
- permettre d'exploiter pleinement les services de réseaux radioélectriques hétérogènes et souples.

L'architecture logique SDR doit pouvoir offrir les fonctions suivantes:

- gestion des profils de terminal, d'utilisateur et de service dans les entités de réseau et dans le terminal;
- gestion efficace des téléchargements et gestion de reconfiguration pour les terminaux et les entités de réseau;
- fonctionnalités de négociation et d'adaptation pour les services et les technologies RAT (par exemple, transfert vertical);
- garantie du respect des normes.

Ces fonctions sont des fonctions logiques, c'est-à-dire qu'elles peuvent être mises en oeuvre en des points différents du réseau. Elles peuvent en outre être réparties à l'intérieur du réseau ou entre le réseau et le terminal.

2 Architecture système de terminal

Autrefois, les terminaux d'utilisateur pour communications mobiles interagissaient généralement avec un serveur de réseau intelligent situé dans une architecture de réseau répartie. Les services de communication se trouvaient essentiellement côté réseau, ce qui signifiait que la plupart des opérations, par exemple l'établissement d'une connexion, devaient être réalisées par le serveur du réseau. Depuis, les fonctionnalités des terminaux mobiles se sont multipliées et elles sont aujourd'hui suffisamment perfectionnées pour pouvoir prendre en charge de façon acceptable des services d'application et d'échange de données à grande vitesse à tout moment et en tout lieu. Cela étant, les terminaux ont des ressources différentes et pour pouvoir utiliser les différents services, on a besoin d'interfaces souples à l'intérieur d'une architecture de terminal assurant une reconfiguration du terminal. En particulier, les interfaces API du terminal et du réseau doivent fournir des mécanismes permettant d'ajouter, de remplacer ou de supprimer des modules ou des composants logiciels pour les couches de protocole et d'application.

2.1 Eléments du terminal et architecture API pour la reconfiguration du terminal

2.1.1 Définition d'une interface API et exigences liées à cette interface

Une interface API peut être définie comme suit:

- un ensemble de moyens grâce auquel un élément de logiciel communique avec un autre;
- une méthode d'abstraction, habituellement (mais pas nécessairement) entre le logiciel de couche inférieure et le logiciel de couche supérieure;
- souvent des ensembles de fonctions de procédures, de variables, de structures, etc.

Une interface API peut alors être considérée comme la définition abstraite d'une interface, c'est-à-dire la description des relations entre les modules logiciels et matériels associés, par exemple le flux bidirectionnel de données et les informations de commande. Elle décrit la relation entre les modules et non pas la mise en oeuvre de ces relations. Les interfaces devraient être indépendantes de la mise en oeuvre.

2.1.2 Eléments du terminal

Sur la base de l'architecture illustrée à la Fig. 20, on a besoin essentiellement de quatre interfaces API et de quatre couches pour que l'opération de reconfiguration soit efficace et souple:

Interfaces API:

- *Interface API du terminal:* interface vers le «monde extérieur» notamment toutes les interactions avec les services du fournisseur ou de tierces parties, la connexion avec le réseau de l'opérateur, la connexion de zone locale et les interactions avec les utilisateurs.
- *Interface API centrale:* interface qui prend en charge et réalise le processus de reconfiguration entre la couche configuration radio et la couche logicielle centrale.
- *Interface API de la couche abstraction matérielle:* interface qui permet à un système d'exploitation (OS, *operating system*) informatique d'interagir avec un dispositif matériel à un niveau général ou à un niveau abstrait.
- *Interface API OS(RT):* Interface contrôlant et gérant tout type d'application qui tourne ainsi que le statut du dispositif et les fonctionnalités du terminal.

Couches:

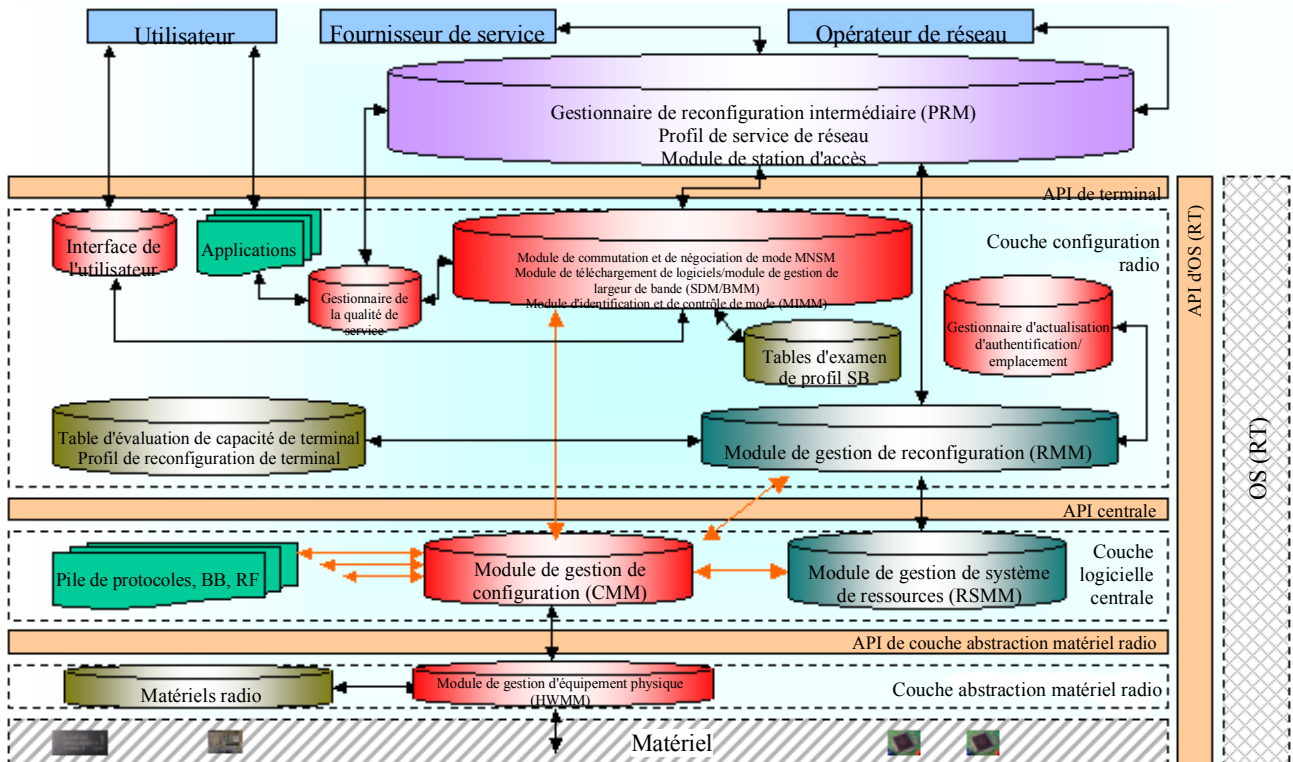
- Couche configuration radio
- Couche logicielle centrale
- Couche abstraction matériel radio
- Couche OS (temps réel (RT, *real-time*))

La couche configuration radio comprend toutes les composantes logicielles chargées des interactions avec le «monde extérieur». Ainsi, on utilise le module de commutation et de négociation de mode (MNSM), le module téléchargement de logiciels (SDM), le module gestion de largeur de bande (BMM) et le module d'identification et de contrôle de mode (MIMM) pour communiquer avec le serveur de réseau du fournisseur de services ou de l'opérateur de réseau ainsi qu'avec la couche logicielle centrale de niveau inférieur grâce à des tables, des profils et le module gestion de reconfiguration (RMM). Ainsi, l'interface API du terminal permet d'avoir des interfaces avec le monde extérieur qu'il s'agisse d'un utilisateur, d'un réseau, d'un fournisseur ou d'une connexion avec un réseau local (par exemple, Bluetooth, réseau LAN, etc.). Un gestionnaire de reconfiguration intermédiaire (PRM) devrait réduire la largeur de bande, les ressources du terminal et la durée de connexion en prenant en charge des services autonomes et en effectuant des

négociations comme le fait un service web ou un courtier d'informations. Une interface d'utilisateur personnalisée facilite l'interaction de l'utilisateur avec toutes les fonctionnalités du terminal auxquelles il est autorisé à accéder. Cela comprend le traitement des applications utilisateur (par exemple, PIM, Office, etc.) ainsi que l'édition des préférences et des configurations pour les communications du réseau et les services.

FIGURE 20

Interface API et architecture structurée en couches de terminaux reconfigurables



2038-20

La couche structure centrale SDR (SDR-CF) contient le module CMM chargé de l'instanciation de la gestion et du contrôle des composantes logicielles radio centrales. L'interface API centrale prend en charge et exécute le processus de reconfiguration entre la couche logicielle configuration radio et la couche logicielle centrale.

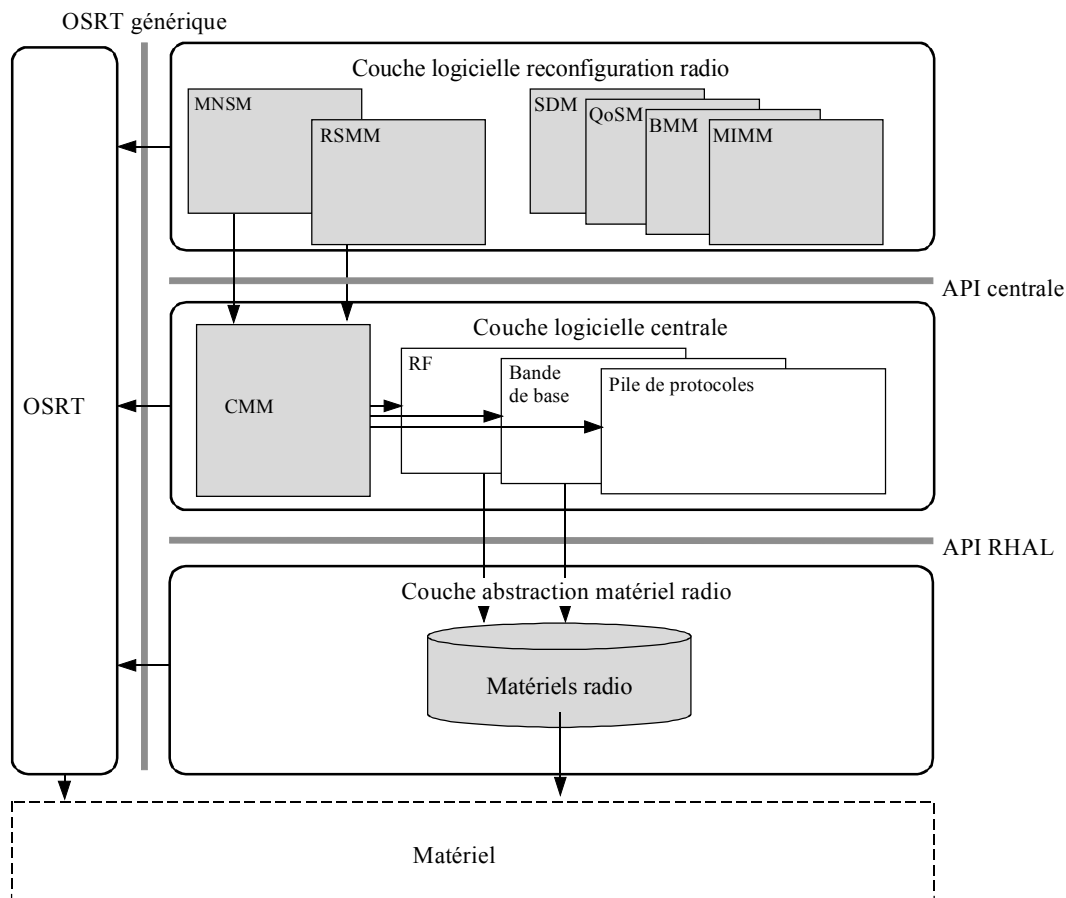
La couche OS contrôle les configurations de terminal actuelles/futures, prend en charge les gestionnaires de domaine et les agents de terminal, fournit l'accès entre la couche SDR-CF et les couches inférieures et assure la gestion des ressources et des données (tables, capacités, profils, ...).

Pour une visualisation simple, les deux figures qui suivent illustrent sous une forme condensée l'architecture API susmentionnée. On ne s'est pas attardé sur l'interface API du terminal car elle contient un grand nombre d'interfaces normalisées pour lesquelles il n'y a pas beaucoup de possibilités d'évolution. Les deux figures, la Fig. 21 utilisant une couche abstraction matérielle radio contrairement à la Fig. 22, servent de point de départ pour expliquer le processus et les interactions entre les interfaces API et les composants connexes (logiciel et matériel) de façon abstraite.

En partant du bas de la Fig. 21 et en remontant vers le haut, on trouve tout d'abord les éléments matériels du terminal: matériel de traitement, par exemple les processeurs de signaux numériques et les microcontrôleurs, matériel propre aux fonctions comme les ASIC, les mixeurs et les oscillateurs, le matériel reconfigurable et les dispositifs d'entrée/sortie. Tout ce qui se trouve au-dessus est la partie logicielle. Il y a quatre progiciels: les trois progiciels horizontaux sont les couches logicielles,

le quatrième apparaît verticalement et peut être assimilé à une tranche logicielle. Cette tranche est le système d'exploitation, lequel, dans un système intégré en temps réel, sera un système d'exploitation en temps réel (RTOS). Le système RTOS fournit des services normalisés (par exemple, programmation des tâches, gestion de la mémoire, traitement des interruptions, etc.) à l'ensemble des couches logicielles. La mise en oeuvre de ces services varie d'un système RTOS à l'autre, qu'il soit commercialisé ou développé en interne. L'objectif est d'avoir une interface commune pour ces services normalisés, quel que soit le système RTOS donné. Cette interface API est représentée sur la Fig. 21 comme la barre verticale en sandwich entre les couches logicielles et le système RTOS.

FIGURE 21
Architecture de niveau inférieur (y compris RHAL)

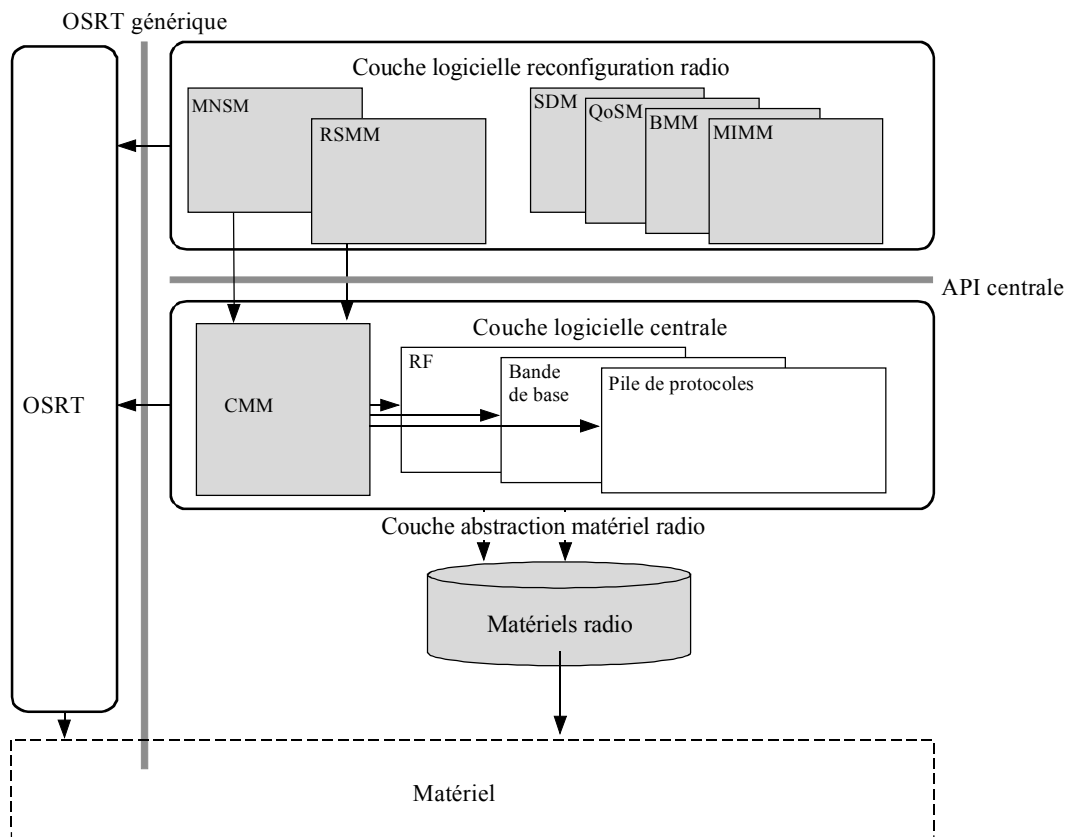


RSM: Module de gestion de système de ressources (*resource system management module*)

2038-21

Un système RTOS peut aussi offrir d'autres services, notamment un dispositif entrée/sortie utilisant des *circuits de commande* de dispositif pour les éléments matériels normalisés. Dans un terminal reconfigurable, un grand nombre des éléments matériels seront associés aux fonctionnalités radio, par exemple les mixeurs et les oscillateurs dans le domaine RF et les accélérateurs ASIC dans le domaine bande de base. Par ailleurs, des dispositifs matériels reconfigurables activeront des accélérateurs matériels radio souples. Etant donné que le nombre et le type de ces dispositifs varieront d'une classe de terminal à une autre, il est peu vraisemblable qu'un système d'exploitation générique puisse tous les prendre en charge. L'accès matériel radio direct sera assuré par une couche abstraction radio spécialisée (voir la Fig. 21), première couche logicielle au-dessus des éléments matériels.

FIGURE 22
Autre architecture de niveau inférieur



2038-22

Cette couche contient une bibliothèque d'équipements pilotes radio, qui renvoient chacun à une interface logicielle avec les services assurés par l'équipement radio pour lequel il est fourni. Les applications logicielles des couches supérieures ont accès à ces services via l'interface API de la couche abstraction matérielle radio (RHAL). Ce mécanisme d'accès direct au matériel radio sans système d'exploitation intermédiaire est essentiel pour obtenir une rapidité et des caractéristiques de puissance optimales.

On peut voir que l'interface API de la couche RHAL dépendra de la classe de terminal en raison des variantes du matériel pris en charge. On pourrait donc faire valoir qu'il ne s'agit pas d'une interface API, qu'elle n'est pas générale au niveau conceptuel d'un terminal reconfigurable. Si l'on pousse le raisonnement à l'extrême, on obtient une autre architecture illustrée à la Fig. 22. Cette architecture ne contient pas de couche RHAL et d'interface API. On peut avoir accès directement aux équipements pilotes radio depuis une bibliothèque située à l'intérieur du terminal. On préfère toutefois la première architecture parce que certains composants matériels peuvent être normalisés au niveau d'un terminal reconfigurable générique et aussi parce que le mécanisme logiciel d'accès aux équipements pilotes matériels peut lui aussi devoir être normalisé.

Si l'on continue à remonter l'architecture illustrée à la Fig. 22, on arrive à la couche logicielle centrale. Cette couche contient les composantes logicielles radio centrales pour la configuration radio considérée, à savoir les composantes RF, les composantes en bande de base et les composantes de piles protocolaires. Par ailleurs, le CMM est chargé de l'instanciation, du contrôle et de la gestion du logiciel radio central. Une interface API, *l'interface API centrale*, est fournie pour que la couche immédiatement supérieure, c'est-à-dire la couche logicielle reconfiguration radio puisse avoir accès aux services fournis par la couche centrale.

La couche reconfiguration radio concerne tous les aspects de la reconfiguration et contient les éléments suivants:

- module gestion de reconfiguration (RMM);
- module téléchargement de logiciels (SDM);
- gestionnaire de qualité de service;
- module de commutation et de négociation de mode (MNSM);
- module d'identification et de contrôle de mode (MIMM);
- module gestion de largeur de bande (BMM).

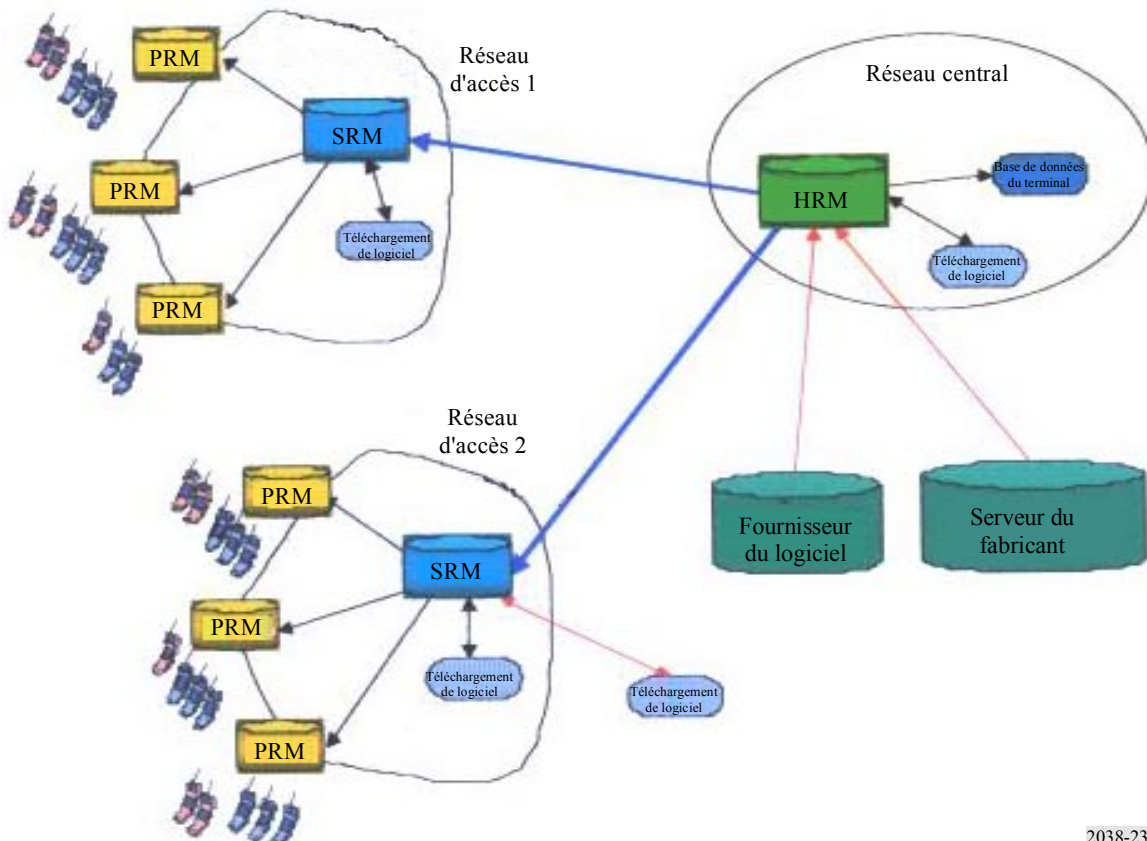
Les modules MNSM et RMM sollicitent les services du module CMM via l'interface API centrale, le premier pour modifier la configuration logicielle centrale et le second pour obtenir des chiffres concernant l'utilisation des ressources. Dans une architecture structurée en couches ouverte, une couche pourra avoir accès aux services de n'importe quelle couche inférieure, si nécessaire. Par exemple, il pourrait être intéressant que le module RMM puisse obtenir directement les chiffres concernant l'utilisation des ressources, en utilisant l'interface API de la couche RHAL.

3 Architecture de réseau acceptant des terminaux reconfigurables

Un modèle hiérarchique d'architecture de réseau prenant en charge des terminaux reconfigurables est basé sur une approche dans laquelle le réseau est l'élément central (voir la Fig. 23). Ce modèle suppose l'association d'un gestionnaire de reconfiguration de rattachement (HRM), d'un gestionnaire de reconfiguration serveur (SRM) et d'un gestionnaire PRM. Cette architecture permet d'étendre les réseaux d'accès radioélectrique cellulaires classiques.

FIGURE 23

Gestionnaire de reconfiguration permettant d'élargir les réseaux cellulaires classiques



Dans le cas où le logiciel de mode nécessaire pour une autre technologie d'accès radioélectrique n'est pas déjà stocké dans le terminal, les modules logiciels nécessaires doivent être fournis par le module PRM. En raison du grand nombre de schémas d'accès radioélectrique différents et de la multiplicité des terminaux, le module PRM ne contient pas en mémoire tous les modules logiciels possibles. Par conséquent, cette architecture de reconfiguration comprend une architecture hiérarchique de gestion de reconfiguration. Pour accélérer le processus de reconfiguration, chaque module PRM met en antémémoire dans son réseau d'accès les modules les plus fréquemment utilisés.

Un problème se pose pour l'accélération du processus de reconfiguration si les modules logiciels nécessaires ne sont pas disponibles auprès du module PRM existant ou auprès d'un module PRM nouveau. En pareil cas, le module PRM prend contact avec son module SRM et lui indique le logiciel approprié. Le module SRM est alors chargé de fournir le logiciel et de le communiquer au module PRM demandeur.

Les interactions entre le terminal et le réseau sont essentielles étant donné que la largeur de bande disponible sur la liaison hertzienne est une ressource limitée qu'il convient d'utiliser pour les services et non pour les négociations. Par ailleurs, les ressources au niveau du terminal lui-même sont habituellement elles aussi limitées. Pour affranchir le terminal du poids que constituent les interactions fréquentes avec les entités de réseau, les informations provenant du réseau pourraient être obtenues en règle générale auprès du module PRM qui est situé dans le réseau d'accès radioélectrique. Le terminal sert d'intermédiaire pour les négociations avec d'autres entités de réseau, en particulier le module SRM et le module HRM.

Les entités principales du processus de reconfiguration sont les modules PRM situés dans chaque réseau d'accès radioélectrique. Les modules PRM sont, pour ce qui est de la reconfiguration, les points de contact pour tout terminal raccordé au réseau d'accès radioélectrique.

Le module PRM est chargé de négocier et d'obtenir toutes les informations utiles en provenance du réseau pour minimiser les interactions sur la liaison hertzienne et aussi pour éviter de gaspiller les ressources du terminal dans ces processus de négociation et de recherche d'information. Le module PRM agit pour le compte des terminaux reconfigurables gérés; on trouvera ci-après une liste de certaines fonctions du module PRM:

- Agent d'information pour le terminal.
- Recherche autonome du service et négociation de mode (fonction nécessaire pendant la négociation de mode).
- Gestion des téléchargements (en interfonctionnement avec d'autres fonctions RRM).
- Détermination de la catégorie de terminal.
- Enregistrement de la catégorie de terminal et des informations relatives aux fonctionnalités.
- Mise en antémémoire des résultats des mesures relatives aux terminaux fonctionnant dans un mode spécifique (fonction nécessaire pendant la supervision de mode).
- Mise en antémémoire des informations concernant les négociations auxquelles procèdent les terminaux pour demander les mêmes services support (fonction nécessaire pendant la négociation de mode).

Dans le cas d'un téléchargement de logiciels déclenché par un terminal, ce dernier indique au module PRM du réseau d'accès radioélectrique qu'une reconfiguration est nécessaire et après quoi, ce module est chargé de la remise du module logiciel approprié. Pour la prise en charge de la commutation de mode, le module PRM effectue en outre différentes mesures et en informe le terminal ainsi que les modules PRM voisins.

S'agissant du téléchargement de logiciels, le module PRM met en mémoire locale les modules logiciels nécessaires, mais la capacité totale de l'espace mémoire du module PRM n'est pas si grande. Il s'agit en effet d'avoir un accès rapide aux modules les plus fréquemment utilisés. Pour les demandes de logiciels moins fréquentes, il existe une interface entre le module PRM et une base de données serveur intermédiaire, le gestionnaire SRM. La demande est donc transmise à ce module SRM qui la traite.

L'interface entre modules PRM est une autre fonctionnalité possible de reconfiguration. Les modules PRM voisins sont donc connectés les uns aux autres et activés pour échanger des informations sur la situation actuelle de l'accès radioélectrique associé ou sur un changement de mode en cours d'un terminal.

La reconfiguration d'un terminal doit non seulement être déclenchée par le terminal mais elle peut aussi être déclenchée par une entité extérieure. Dans le cas d'une nouvelle version de l'équipement pilote, il ne sert à rien d'informer chaque terminal séparément.

L'utilisation de la multidiffusion faciliterait l'optimisation de la remise du contenu. Pour une mise à niveau générale des terminaux, on pourrait utiliser le mécanisme de multidiffusion pour éviter une surcharge du réseau. L'idée est que chaque fabricant de terminal, chaque concepteur d'applications a son propre serveur. Si un terminal est enregistré avec son profil dans le module PRM, ce module sait à quels composants du terminal pourrait s'appliquer une mise à niveau générale. Après l'enregistrement du terminal, le module PRM se connecte à une session de multidiffusion pour chaque composant possible. Si la mise à niveau globale se poursuit, laquelle a été déclenchée par un certain serveur, les éléments logiciels ne sont remis qu'aux modules PRM qui se sont associés au groupe de multidiffusion.

3.1 Rôle et implantation des modules SRM et HRM

L'idée principale est d'avoir une architecture hiérarchique décentralisée qui minimise la charge du réseau et accélère le téléchargement de logiciels.

Le module HRM est implanté dans le réseau de rattachement du terminal et il est informé par les fournisseurs des nouvelles mises à niveau des logiciels. Dans ce cas, le module HRM informe le module SRM du réseau d'accès radioélectrique de la disponibilité d'un nouveau logiciel et lui transmet ce logiciel en cas de mise à niveau générale. Si une demande de téléchargement de logiciels parvient à un module HRM, ce module est aussi chargé de délivrer une autorisation pour le terminal en cas de demande de téléchargement d'un logiciel sous licence. Un autre point à examiner est l'aspect comptable du téléchargement de logiciels. A cette fin, le module HRM utilise un fichier des droits à percevoir qui est mis à jour si le logiciel approprié est téléchargé.

Les modules SRM sont implantés entre les modules PRM et le module HRM. Un module SRM est connecté à plusieurs modules PRM et il est chargé de fournir le logiciel de reconfiguration aux modules PRM qui lui sont rattachés. Ainsi, le module SRM gère une base de données importante de modules logiciels pour le processus de reconfiguration et peut en outre obtenir un logiciel non disponible, par exemple auprès de serveurs extérieurs ou d'un module HRM.

Comme indiqué plus haut, les modules SRM sont informés par le module HRM de la disponibilité de nouveaux logiciels et ces modules les diffusent aux modules PRM qui leur sont rattachés. En raison de l'hétérogénéité possible des technologies d'accès radioélectrique dans un réseau mobile IP, la taille des différents réseaux d'accès radioélectrique peut varier. Si le logiciel doit être acheminé vers un grand nombre de modules PRM, les gestionnaires de reconfiguration serveurs permettent de minimiser la charge. Par ailleurs, tous les logiciels disponibles ne sont pas nécessaires dans chaque réseau d'accès ou à chaque point d'accès. Par conséquent, les modules PRM essaient de réduire les délais et la mémoire nécessaires et ne mettent en antémémoire qu'un petit nombre de fichiers; par ailleurs les modules SRM ont accès à des stocks importants de logiciels et mémorisent un bien plus grand nombre de fichiers.

En outre, les modules SRM pourraient être impliqués dans la gestion de la mobilité, l'attribution des ressources et la sécurité des terminaux en déplacement. Cela comporte les procédures nécessaires pour les transferts verticaux, la mise à jour des données de localisation et l'interfonctionnement entre différentes technologies d'accès radioélectrique pour assurer la qualité de service souhaitée.

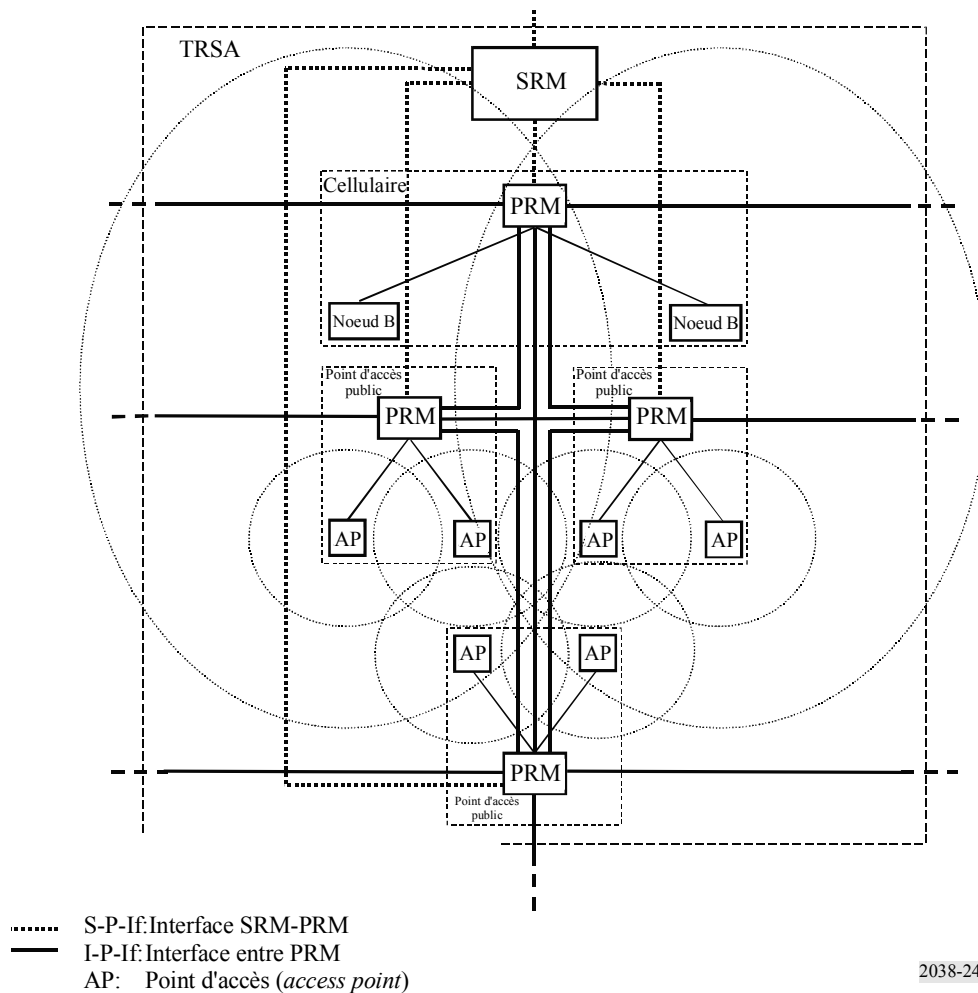
3.2 Zone de reconfiguration de terminal (TRSA)

La zone des modules PRM desservis par un module SRM est appelée zone de reconfiguration de terminal (TRSA). La zone TRSA peut être différente de la zone d'un réseau d'accès radioélectrique.

La Fig. 24 donne un exemple de zone TRSA. Dans cette zone sont situées différentes technologies d'accès radioélectrique. Trois points d'accès publics (par exemple IEEE 802.11 ou Hiperlan2) caractérisés par une faible portée mais une largeur de bande disponible maximale importante et un point d'accès cellulaire appartiennent à la même zone TRSA. Les modules PRM voisins dont les zones de couverture se chevauchent sont couplés les uns aux autres par l'interface entre modules PRM et chaque module PRM a une connexion avec le module SRM local.

FIGURE 24

Exemple d'entités et d'interfaces d'une TRSA
avec différentes technologies d'accès radioélectrique



3.3 Interface entre modules PRM

Les chapitres précédents ont déjà montré que les fonctionnalités globales du module PRM vont au-delà des fonctionnalités habituelles d'un intermédiaire. Une extension du module PRM pourrait être une connexion à des modules PRM voisins ou l'échange d'informations supplémentaires via une interface entre modules PRM. Il pourrait tout d'abord y avoir des informations à long terme comme

la qualité de service générale assurée dans l'autre réseau d'accès radioélectrique (par exemple les priorités des différentes classes de trafic, le débit binaire maximal, le retard maximal, etc.). Le module PRM pourrait ainsi décider à l'avance quel mode voisin est utile et quel mode le terminal devrait rechercher. Après avoir trouvé un mode de remplacement avec une qualité de service générale prometteuse, le module PRM pourrait demander que soient réalisées des mesures à court terme au niveau du module PRM voisin. La décision finale devrait être prise après examen de tous les résultats de mesure.

Après le déclenchement d'une commutation de mode, l'ancien module PRM pourrait communiquer les informations utiles concernant le terminal au nouveau module PRM, via l'interface entre modules PRM. Le nouveau module PRM peut ainsi préparer, pour le nouveau terminal, les informations concernant les réseaux d'accès radioélectrique voisins qui lui sont rattachés et les lui communiquer rapidement.

Pour ce qui est des informations concernant les mesures et les ressources, chaque réseau d'accès radioélectrique offrant une certaine qualité de service doit fournir un mécanisme de réserve des ressources. Si un gestionnaire des ressources est disponible, le module PRM peut demander les informations à long terme et à court terme à ce gestionnaire via l'interface entre modules PRM et le module PRM voisin et informer en retour le gestionnaire à l'avance si une commutation de mode est déclenchée. S'il n'y a pas de gestionnaire de ressources ou d'autres entités d'information sur les ressources dans un réseau, le module PRM doit effectuer des mesures et mettre en mémoire les résultats généraux par ses propres moyens.

3.4 Intermédiaires dans les réseaux IP

Pour répondre aux exigences liées à l'architecture de réseau RAN IP, on part du scénario A11 tout IP suivant qui prend en charge des terminaux reconfigurables. Le module PRM est fonctionnellement subdivisé en un serveur plan utilisateur et un serveur plan commande selon la méthode propre aux réseaux RAN IP. L'architecture de réseau RAN IP est basée sur les paradigmes suivants.

Suppression de la structure en couches

Il s'agit de la séparation logique et physique des éléments de réseau en trois plans fonctionnels:

- le plan commande;
- le plan utilisateur et;
- le plan transport.

Le *plan utilisateur* traite les données d'utilisateur échangées entre le terminal et le réseau central. Sa principale tâche est de transformer ces données en trames radioélectriques qui seront transmises par la station de base radioélectrique et inversement. En raison des exigences liées au traitement radioélectrique en temps réel, les fonctions du plan utilisateur seront mises en oeuvre par une plate-forme matérielle très spécialisée, le *serveur plan utilisateur (UPS)*.

Le *plan commande* gère les ressources radioélectriques et supervise le traitement radioélectrique qui intervient au niveau du plan utilisateur. Ses fonctions sont groupées dans le *serveur commande radioélectrique (RCS)* qui est une plate-forme polyvalente standard. Une conséquence est que les fonctions de commande (dans le plan commande) peuvent gérer et contrôler les ressources radioélectriques dans le plan utilisateur même si les technologies radioélectriques sont différentes.

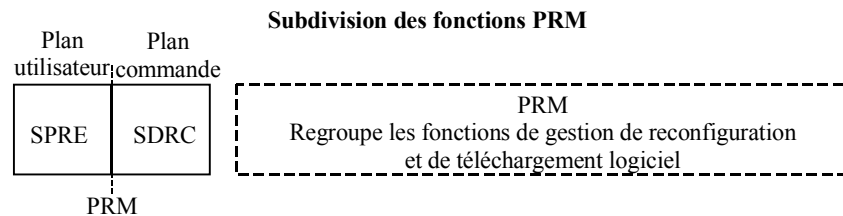
Protocole de transport IP

L'acheminement de tout le trafic dans l'ensemble du réseau est basé sur des datagrammes IP. Par conséquent, le réseau fournit une connectivité IP de bout en bout et prend en charge pratiquement tous les services IP. Les stations de base radioélectriques (station de base, noeud B) sont directement connectées au réseau de transport IP. En d'autres termes, les stations de base radioélectriques (BS) sont connectées au reste du réseau via le protocole de transport IP.

fonctions de contrôle. Selon le principe de la suppression de la structure en couches, les fonctions PRM peuvent être subdivisées en fonctions du plan utilisateur et fonctions du plan commande. Les fonctions du plan utilisateur accueillent tous les profils et toutes les informations nécessaires pour effectuer le téléchargement de logiciels. Les fonctions du plan commande accueillent toutes les fonctions nécessaires pour effectuer les opérations de commande.

- *SPRE*: stock de profils et de téléchargement de logiciels (plan utilisateur): entité logique qui accueille:
 - le profil du terminal de l'utilisateur et du service;
 - les modules logiciels.
- *SDRC*: contrôleur de reconfiguration et de téléchargement de logiciels (plan commande): entité logique qui accueille les fonctions de commande PRM, en particulier:
 - les fonctions de commande de téléchargement de logiciels;
 - les fonctions de commande de reconfiguration.

FIGURE 26



2038-26

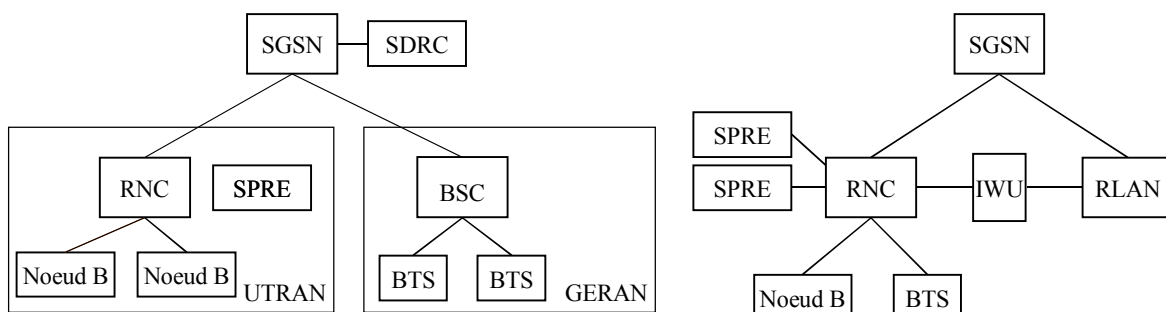
Le module PRM du plan utilisateur (SPRE) devrait être situé dans le réseau RAN car les informations suivantes doivent être disponibles et mises à jour le plus rapidement possible:

- Charge du système et des canaux
- Profils des services d'utilisateur
- Qualité de service des applications
- Fonctionnalités du terminal
- Protocole et adresse de réseau

Selon le type de couplage entre les différentes technologies RAT, en fonction des contraintes de temps et de la nécessité ou non d'effectuer un transfert transparent, le module PRM du plan commande (SDRC) pourrait être situé dans le réseau RAN (à proximité du réseau RNC ou intégré à ce réseau) ou dans le réseau principal (à proximité du réseau SGSN ou intégré à celui-ci). Lorsque le SPRE et le SDRC sont situés tous les deux dans le réseau d'accès, l'interaction avec le module RRM est plus directe et la gestion de micromobilité pourrait se faire à l'aide d'une fonction SDRC spécialisée. Les figures ci-après illustrent l'emplacement du SPRE et du SDRC dans les deux scénarios.

FIGURE 27

Exemple de fonctions de commande intermédiaires dans le réseau principal (gauche) et dans le réseau RAN (droite)



2038-27

Annexe 7

Noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (HDRPN)

1 Le téléphone cellulaire cherche à égaler les fonctionnalités du téléphone filaire classique

Dans le passé, l'objectif avec le téléphone cellulaire était de se rapprocher le plus possible du service fourni à l'utilisateur par un téléphone filaire type. Il fallait que l'utilisateur d'un téléphone puisse utiliser un téléphone cellulaire comme un téléphone normal et les fournisseurs du service de téléphonie cellulaire pourraient utiliser le réseau téléphonique pour l'interconnexion longue distance. Le téléphone cellulaire était ainsi beaucoup plus facile à vendre, en particulier au début. Or, pour utiliser le réseau téléphonique pour fournir l'élément longue distance du service cellulaire, il fallait avant tout simuler la partie accès local du réseau téléphonique ce qui, techniquement, n'était pas trop difficile. Par contre, le problème était d'offrir des solutions peu onéreuses à grande efficacité spectrale. La formule qui consistait à réaffecter les équipements de station de base coûteux et le spectre, appel par appel, a donné de bons résultats pour le trafic vocal de type téléphonique.

2 Le réseau téléphonique classique devient partie intégrante d'un réseau de données

Depuis, les utilisations du téléphone se sont multipliées rapidement. A l'ère de l'informatique, il est devenu évident que l'ordinateur serait plus utile s'il permettait d'avoir accès à des bases de données distantes et s'il pouvait communiquer avec d'autres ordinateurs. Là aussi, le réseau téléphonique était le support le mieux interconnecté. On a donc décidé d'utiliser ce réseau ainsi que les lignes d'accès locales qui lui sont associées pour établir cette interconnectivité à l'échelle mondiale. Il en est résulté l'Internet. Les lignes d'accès locales ont elles aussi posé des problèmes aux ingénieurs de l'Internet. Elles ne pouvaient pas en effet transporter de données à des débits qui inciteraient les utilisateurs à télécharger de gros fichiers. Les ingénieurs ont donc tout fait pour accroître la capacité de transport de données des lignes locales, notamment en utilisant des modems de ligne grande vitesse, mais il fallait encore que les lignes puissent être connectées, pendant de longues périodes de temps, en fait beaucoup plus longtemps que pour un appel téléphonique. Les utilisateurs se sont habitués à avoir ce type de service Internet sur leur téléphone vocal et ils attendaient donc que le téléphone cellulaire offre le même service Internet. Il existe des téléphones filaires pour assurer la connexion au réseau à tout moment, même lorsqu'il n'y a pas de communication en cours. Par conséquent, la connexion d'accès aux lignes filaires locales ne coûte pas plus cher au fournisseur de service même si la durée de connexion est plus longue. Le fournisseur de téléphonie cellulaire verra ses coûts diminuer proportionnellement s'il peut desservir de nombreux utilisateurs avec le même équipement. Le partage des mêmes fréquences par de nombreux utilisateurs est aussi un élément important pour les opérateurs mais les utilisateurs de lignes filaires n'ont pas de problèmes de partage de spectre pour la boucle locale.

3 Le réseau d'accès téléphonique classique doit être mis à niveau pour pouvoir prendre en charge les services Internet évolués

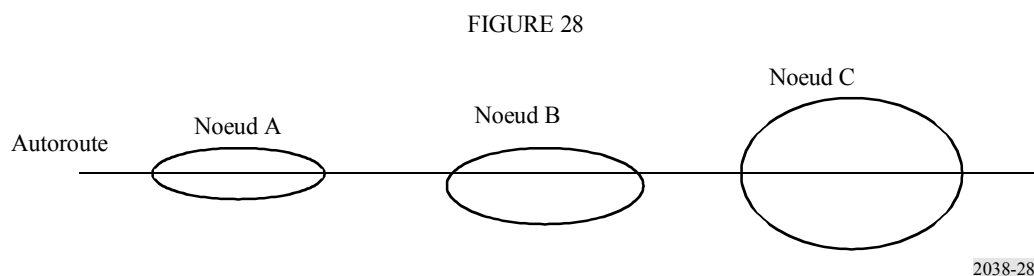
Compte tenu de ce qui précède, les débits de données qu'un futur système cellulaire devra pouvoir accepter universellement vont jusqu'à 56 kbit/s car c'est le débit de données fourni par le service téléphonique local qu'une ligne filaire peut normalement accepter. En fait, dans une grande partie du monde, on ne peut même pas atteindre 28 kbit/s. Les fournisseurs de lignes filaires peuvent offrir des débits de données plus élevés, mais il faut pour cela prendre des mesures particulières et ces

débits ne sont pas disponibles partout et à tout moment. Dans de nombreux cas, il faut attendre des semaines pour obtenir une ligne d'abonné numérique, une ligne T1 ou un raccordement RNIS auprès des fournisseurs de lignes filaires locaux. Par conséquent, un service hertzien à haut débit de données disponible en des endroits bien précis et dans de bonnes conditions cadre avec les conditions dans lesquelles les fournisseurs de lignes filaires offrent des services de données à haut débit. Un fournisseur de téléphonie cellulaire peut proposer un débit de 144 kbit/s, voire plus dans toute la région, mais il doit réfléchir au coût et à la disponibilité de spectre.

4 Les noeuds HDRPN offrent des débits de données large bande asymétriques

Demain, un système offrant des débits pouvant aller jusqu'à 56 kbit/s dans la totalité de la zone de service avec des noeuds de transmission de données par paquets à haut débit (plusieurs centaines de mégabits de données) dans certaines régions spécifiques peut être une solution rentable et intéressante. Ces noeuds HDRPN sont conçus pour émettre à faible puissance même lorsque les débits de données sont élevés, ce qui réduit les brouillages causés dans les bandes adjacentes ou aux sites cofréquence distants. Le spectre peut ainsi être réutilisé plusieurs fois, à l'aide de noeuds peu coûteux.

Examinons tout d'abord le cas où les noeuds HDRPN sont situés le long d'une grande autoroute. Avec de tels noeuds les zones de couverture seraient petites (voir la Fig. 28). Ces zones de couverture ne doivent pas nécessairement avoir les mêmes dimensions que celles indiquées dans la Fig. 28. Ces supercellules de petite taille peuvent être retenues pour couvrir des points de péage, de grands carrefours, des «points noirs» permanents ou elles peuvent être espacées périodiquement pour réguler les délais de transmission des messages. Avec ce type de structure pour les transferts de paquets, on constate que le débit moyen des données augmente considérablement et peut être multiplié par 9⁷. Le délai de transmission est aussi un facteur important et l'analyse montre que les résultats sont meilleurs lorsque les cellules sont petites, car le noeud peut émettre à des débits plus élevés⁷. Lorsque l'utilisateur est un piéton ou un véhicule susceptible d'emprunter un trajet plus aléatoire, il se peut que le trajet ne passe pas à côté d'un noeud HDRPN (comme défini ci-dessus), pendant un certain temps. Dans ce cas, il est important d'avoir un grand nombre de noeuds économiques. Le fait de placer des noeuds à des intersections, sur des places, dans des gares ferroviaires et d'autoriser les entreprises pour lesquelles une grande ligne d'alimentation aboutit dans leurs installations, à monter des antennes extérieures pour le public permettra d'offrir une couverture importante. L'expérience dira si et où il faut implanter des noeuds supplémentaires. L'analyse de ce cas bidimensionnel montre aussi les avantages⁷ que peuvent offrir les noeuds HDRPN.



⁷ FRENKIEL, R., BADRINATH, B. R., BORAS, J. et YATES, R. [avril 2000] The Infostation Challenge: Balancing Cost and Ubiquity in Delivering Wireless Data. IEEE Personal Comm., Vol. 7, 2, p. 66. Rutgers University, Etats-Unis d'Amérique.

5 Les services de localisation et la commande spécifique de messages constituent une solution pratique

Les services de localisation sont un complément important pour bien utiliser les noeuds HDRPN. Ces services permettent à l'utilisateur, avec l'aide du système, de prévoir le moment où il entrera dans la zone de couverture d'un noeud HDRPN. En utilisant ces services, le système peut informer l'utilisateur qu'il a un message en attente, lui donner des précisions sur ce message, par exemple quand il peut être remis et quel sera le coût de cette remise. Sur la base de ces informations, l'utilisateur peut choisir s'il souhaite recevoir le message ou s'il préfère attendre d'être à la maison pour l'ouvrir. Les informations concernant l'appel peuvent être affichées sur un écran ou être annoncées oralement. Les coordonnées de l'utilisateur peuvent être déterminées de plusieurs façons, selon les possibilités offertes par le système. L'utilisateur peut aussi utiliser les informations provenant d'un GPS puisqu'il a la possibilité de transmettre les coordonnées de son GPS au système cellulaire⁸. Le système peut aussi aider le terminal de l'utilisateur à entrer sa dernière position calculée dans son fichier mémoire où cette position peut être utilisée comme un ensemble de coordonnées GPS⁸. L'utilisateur peut aussi lancer l'envoi de gros fichiers de données tout en surfant sur l'Internet. Alors qu'il est en train de surfer, il peut demander un gros fichier et, là aussi, si la taille du fichier est excessive, le système envoie le même message que lorsqu'un message important est en attente, à savoir notamment des éléments qui indiquent la taille du fichier demandé, le moment auquel ce fichier peut être remis et le prix de la remise. Si l'utilisateur n'accepte pas la demande, le fichier de données n'est pas remis. L'opérateur déterminera quelle est la taille raisonnable du fichier à partir du débit de transmission de données requis pour la remise. Les débits qui ne dépassent pas les débits des modems de ligne Internet normaux devraient être considérés comme des débits raisonnables. Les services de localisation et la transmission des informations nécessaires pour assurer le transfert des paquets à grande vitesse se font sur le réseau cellulaire d'appui universel à faible vitesse.

Le système déterminera comment la transmission par paquets à haut débit se fera. S'il reste suffisamment de capacité dans le système cellulaire, l'un des noeuds de ce système pourra servir de noeud HDRPN lorsque le terminal d'utilisateur se rapproche de la station de base du réseau cellulaire^{9, 10}. Si cela n'est pas possible, le système peut identifier un noeud HDRPN particulier pour effectuer le transfert de données à haut débit. De même, un système à satellites à faible débit de données peut utiliser un noeud HDRPN pour transférer de gros fichiers de données. Dans les zones éloignées, les délais peuvent être plus longs en raison de la distance entre les noeuds de transmission de données par paquets à haut débit. Toutefois, étant donné que dans ces zones les voies d'acheminement possibles sont beaucoup moins nombreuses, on peut penser que le nombre de noeuds de transmission de données par paquets à haut débit nécessaires pour couvrir ces zones sera raisonnable.

⁸ RIDGELY BOLGIANO, D. et LaVEAN, G. [25 mars 1997 – Enregistré le 6 septembre 1994] Wireless Telephone Distribution System With Time and Space Diversity Transmission for Determining Receiver Location. United States Patent No 5,614,914. InterDigital Technology Corporation, Etats-Unis d'Amérique.

⁹ FURUSKAR, A., MAZUR, S., MULLER, F. et OLOFSSON, H. [juin 1999] Edge: Enhanced Rates for GSM et TDMA/136 Evolution. *IEEE Personal Comm. Mag.*, Vol. 6, 3.

¹⁰ CHUANG, J., QUI, X. et WHITEHEAD, J. [septembre 1999] Data Throughput Enhancement in Wireless Packet Systems by Improved Link Adaptation with application to the EDGE System. Proc. IEEE VTC '99-FALL, Amsterdam, Pays-Bas.

6 Technologie permettant d'utiliser des noeuds HDRPN

Etant donné que le débit de transfert de données par paquets devient très élevé, les caractéristiques de transmission du canal radioélectrique peuvent être différentes de celles qui seraient optimales pour un système cellulaire universel. Ces canaux de transmission à haut débit, vraisemblablement asymétriques, seraient tout indiqués pour une mise en oeuvre DRT (voir l'Annexe 3) où la distorsion de canal du signal reçu peut être utilisée pour conditionner les signaux de transmission à haut débit. Pour ce type de transmission de paquets de données à haut débit, il faudra peut-être une interface radioélectrique modifiée adaptée (voir l'Annexe 9). La structure DRT est par ailleurs très souple et peut offrir simultanément plusieurs débits de données différents ou reconfigurer rapidement la totalité de la capacité dans un seul canal. Cette souplesse est importante étant donné que de nouveaux utilisateurs entrent et quittent très rapidement les zones de couverture. La structure DRT permet aussi à la liaison montante mobile d'avoir accès à un canal reconfiguré pour transmettre de gros fichiers au réseau. Dans le cadre d'une telle reconfiguration, on peut attribuer un grand nombre des intervalles de temps à la transmission sur la liaison montante mais lorsque cette transmission est terminée, ces intervalles de temps peuvent être immédiatement attribués à d'autres utilisateurs, vraisemblablement sur la liaison descendante. Etant donné que la liaison montante ne sera pas vraisemblablement utilisée aussi fréquemment que la liaison descendante, il est intéressant du point de vue de l'efficacité spectrale d'avoir cette souplesse permettant de réattribuer le même spectre entre la liaison montante et la liaison descendante. Avec une structure DRF, le spectre pour les liaisons montantes devrait être réservé pour assurer des transferts de données à haut débit même si ce spectre n'est utilisé que de façon occasionnelle. Les réservations facilitent ces reconfigurations et les services de localisation peuvent fournir des informations précises concernant les réservations. Les antennes jouent quant à elles un rôle essentiel pour la transmission de données à haut débit. L'énergie rayonnée par le noeud doit être concentrée sur une petite zone pour accroître l'intensité du signal destiné au récepteur cible et pour réduire les brouillages causés au reste de la région. Il existe plusieurs systèmes d'antenne – antennes adaptatives, (voir l'Annexe 4 et l'Annexe 5) antennes réparties¹¹, (voir aussi l'Annexe 1) et cellules intelligentes¹² – pour concentrer l'énergie rayonnée sur de petites zones.

Une solution possible pour contrôler le processus nécessiterait l'utilisation d'un algorithme de réseau qui recherche le destinataire du fichier de paquets de données, détermine l'emplacement approximatif et quadrille la région à la recherche du destinataire, (voir l'Annexe 9). Le résultat de cette recherche donnera une position géographique et déclenchera l'envoi d'une deuxième réponse environ 10 secondes plus tard. Les deux transmissions sont nécessaires pour déterminer la direction et la vitesse de l'acheminement. Avec le vecteur de position et de vitesse du mobile visé, le système calcule le temps qu'il faut à ce mobile pour atteindre le noeud HDRPN. Ce système envoie, via le réseau cellulaire, un message donnant diverses informations au destinataire, par exemple combien de temps il lui faudra attendre avant de recevoir le message, d'où vient le message, la longueur du message et combien il paiera pour la remise de ce message. On demande au destinataire s'il veut recevoir le message. Dans l'affirmative, une réservation¹³ est faite, le paquet est remis par le noeud

¹¹ RIDGELY BOLGIANO, D. et LaVEAN, G. [12 janvier 1999 – Enregistré le 29 août 1997] Wireless Telephone Distribution System With Time and Space Diversity Transmission. United States Patent No 5,859,879. InterDigital Technology Corporation, Etats-Unis d'Amérique.

¹² LEE, W. C. Y. [1995] *Mobile Cellular Telecommunications – Analog and Digital Systems*. Air Touch Communications Inc., Second Edition, Publisher McGraw Hill Inc, p. 563.

¹³ GANGULY, S., NATH, B. et GOYAL, N. [février 2002] Optimal Reservation Schedule In Multimedia Cellular Networks. Tech. Report. Rutgers University, Etats-Unis d'Amérique.

à haut débit suivant et la remise du message est facturée au destinataire. Le système doit aussi mettre en oeuvre un algorithme particulier pour synchroniser et transférer rapidement les paquets. Une technique de correction d'erreurs particulière sera vraisemblablement nécessaire pour ce canal de transmission de données unique¹⁴.

Le terminal mobile devra être un terminal adaptatif pour pouvoir fournir ce service à supplément et interagir avec le noeud HDRPN, mais il aura toujours la possibilité de fonctionner efficacement dans le réseau cellulaire. Heureusement, beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine des systèmes de radiocommunication définis par logiciel (voir l'Annexe 6 et l'Annexe 11). Ces systèmes bénéficieront aussi des travaux consacrés aux systèmes MEMS RF (voir l'Annexe 12), systèmes qui constituent des moyens technologiques pour le futur terminal. Cela ne devrait pas avoir beaucoup d'incidence sur le coût du terminal par rapport à un terminal IMT-2000 normal.

Annexe 8

Technologies Internet et prise en charge d'applications IP par des systèmes mobiles

1 Introduction

Dans les systèmes IMT-2000 actuels, les services de conversation IP sont acheminés sur des réseaux IP connectés aux technologies d'accès radioélectrique associées. La base d'un service de conversation IP est de fournir au terminal IMT-2000 un support IP, et notamment un adressage IP. Cette couche IP fonctionne au-dessus des services supports IP dans les réseaux IMT-2000 (réseau central et réseaux d'accès radioélectrique).

Il faut tenir compte de ce qui précède lorsqu'on examine les exigences propres au protocole IP pour ne pas mélanger la prise en charge d'un service conversationnel tout-IP et des applications susmentionnées et les exigences internes propres au réseau liées à l'utilisation du protocole Internet. Il ne faut pas oublier que les réseaux sont conçus pour utiliser au mieux les technologies radioélectriques IMT-2000.

Compte tenu de l'évolution des systèmes IMT-2000, une architecture conversationnelle tout-IP a été choisie comme base de la définition d'un service conversationnel tout-IP pour plusieurs des technologies d'accès radioélectrique. Cela signifie que l'adaptation nécessaire des protocoles IETF est en cours pour que ces protocoles puissent prendre en charge efficacement les applications tout-IP mises en oeuvre dans l'environnement radioélectrique d'un système mobile. Le protocole de compression d'en-tête actuellement en cours d'élaboration dans le Groupe de travail (GT) ROHC du Groupe d'étude sur l'ingénierie Internet (IETF) est un exemple de ces activités.

Les services multimédias tout-IP ne sont pas le prolongement des services à commutation de circuits mais représentent une nouvelle catégorie de services, de terminaux mobiles, de fonctionnalités de service et d'attentes pour les utilisateurs. Un nouveau service multimédia peut avoir un nom ou une fonctionnalité analogue à celui ou celle d'un service normalisé comparable mais il n'a pas nécessairement, pour l'utilisateur, le même aspect que le service normalisé. Les communications vocales (téléphonie IP) sont un exemple de service en temps réel qui serait fourni sous forme d'une application multimédia IP.

¹⁴ MAO WU, H., EVANS, J. et CAGGIANO, M. [avril 1999] Improvement of IP Packet Throughput with an Adaptive Radio Link Protocol for Infostations' Technical Report WINLAB-TR-178.

2 Technologies permettant aux systèmes mobiles de prendre en charge des applications IP plus efficaces

Plusieurs des technologies IMT-2000 prennent déjà en charge des applications IP de bout en bout grâce aux supports d'accès radioélectrique définis. Par ailleurs, une compression d'en-tête IP plus évoluée a été ajoutée pour pouvoir encore mieux prendre en charge les applications IP, conformément aux travaux en cours dans le GT ROHC de l'IETF. Actuellement, des travaux sont en cours pour améliorer encore la prise en charge de signalisation SIP des applications IP en optimisant le transport de la signalisation des applications IP, éventuellement avec un support RAB spécialisé.

2.1 Compression d'en-tête robuste

La compression d'en-tête IP est une technique qui permet de réduire sensiblement la taille de l'en-tête IP sans rien perdre du contenu informationnel. Il existe aujourd'hui plusieurs techniques de compression pour l'Internet. Toutefois, pour un environnement mobile, ces techniques ne suffisent pas car elles sont basées sur un taux de perte d'en-tête très faible. Or, un environnement mobile est caractérisé par un taux de perte relativement élevé, et on a besoin d'une compression d'en-tête plus solide. L'IETF a reconnu cette nécessité dans les travaux du GT-ROHC qui a mis au point un mécanisme de compression d'en-tête robuste.

2.2 Compression de la signalisation

La signalisation nécessaire pour des applications tout IP sera vraisemblablement une signalisation SIP/SDP qui n'est pas optimisée pour un environnement mobile puisque c'est une signalisation ASCII. Il en résulte des retards de signalisation importants et une perte de performance. La compression de la signalisation est donc essentielle pour pouvoir prendre en charge des services tout IP.

3 Réutilisation des technologies Internet dans les réseaux d'accès radioélectrique

Même si les réseaux d'accès radioélectrique des technologies IMT-2000 existantes utilisent, dans une large mesure, d'autres moyens de transport entre leurs noeuds internes que le transport IP, des travaux sont actuellement en cours pour pouvoir utiliser la technologie de transport IP. Il est très important que l'introduction du protocole IP comme technologie de transport dans le réseau d'accès radioélectrique ne nuise pas à l'opérabilité, aux performances et à la qualité de service de bout en bout. Les mécanismes nécessaires pour assurer un transport IP entre les noeuds d'un réseau d'accès radioélectrique sont actuellement mis au point compte tenu de l'évolution des systèmes IMT-2000. Le mécanisme IPv6 en particulier est actuellement examiné.

4 Réseau d'accès radioélectrique (RAN) IP

4.1 Architecture et réseau de transport

4.1.1 Indépendance vis-à-vis de la technologie d'accès hertzien

- un réseau RAN IP doit, à tout le moins, pouvoir accepter les technologies radioélectriques 2G et 3G actuelles, telles que l'AMRC-LB et l'AMRC2000. Pour cela, le réseau devra prendre en charge la compatibilité vers l'arrière et l'interopérabilité.

Ainsi on est certain que l'architecture de réseau RAN IP utilisant l'accès UTRA peut prendre en charge l'architecture de réseau RAN IP utilisant l'accès AMRC2000 en remplaçant simplement la fonction spécifiquement radio et en passant de l'accès UTRA à l'accès AMRC2000 IP;

- l'architecture de réseau RAN IP peut être souple pour accepter une autre technologie hertzienne non cellulaire, par exemple un réseau LAN hertzien ou la technologie Bluetooth. Pour cela il faudra une architecture souple acceptant la fonction spécifiquement radio en mode «plug and play»;
- le réseau RAN IP doit prendre en charge l'interfonctionnement et l'interexploitation pour assurer le transfert entre différentes technologies d'accès hertzien.

4.1.2 Compatibilité vers l'arrière

- l'architecture de réseau RAN IP et l'ensemble de protocoles associé doivent avoir la compatibilité vers l'arrière avec l'architecture RAN actuelle;
- du point de vue du service, il ne devrait pas y avoir de dégradation du service ou des performances avec une architecture de réseau RAN IP par rapport à l'architecture RAN actuelle. Il faudra quelques critères pour vérifier la compatibilité vers l'arrière;
- l'architecture de réseau RAN IP et l'ensemble de protocoles associé doivent fournir au moins des fonctionnalités équivalentes à celles des architectures RAN actuelles. Les principaux changements dans une architecture de réseau RAN IP par rapport à l'architecture de réseau actuelle doivent être facilement identifiés.

4.1.3 Interopérabilité avec les anciens réseaux (2G/3G) et les terminaux mobiles

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir assurer l'interopérabilité entre le réseau principal 2G/3G existant (y compris les réseaux GSM MAP ou ANSI-41) et le réseau RAN IP;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir assurer l'interopérabilité entre les réseaux d'accès radioélectrique 2G/3G existants et le réseau RAN IP;
- l'architecture de réseau RAN IP doit également pouvoir prendre en charge les anciens terminaux mobiles (2G/3G).

4.1.4 Compatibilité vers l'avant

- l'architecture de réseau RAN IP et l'ensemble de protocoles associés doivent assurer une compatibilité vers l'avant avec l'architecture prenant en charge les nouvelles technologies radioélectriques;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir s'adapter facilement aux changements liés à l'introduction de nouveaux services (radiodiffusion IP/multidiffusions).

4.1.5 Interopérabilité avec un réseau tout IP et avec des terminaux mobiles IP

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir assurer l'interopérabilité entre le réseau principal tout IP et le réseau RAN IP;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir assurer l'interopérabilité entre les réseaux d'accès radioélectrique 2G/3G de la prochaine génération et le réseau RAN IP;
- l'architecture de réseau RAN IP doit également pouvoir accepter les terminaux mobiles IP.

4.1.6 Architecture indépendante structurée en couches

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir accepter l'architecture structurée en couches;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir accepter la séparation entre la fonction plan utilisateur, la fonction plan commande et la fonction plan transport.

4.1.7 Interfaces ouvertes

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir accepter des interfaces ouvertes entre les entités de réseau d'un réseau RAN IP qui peuvent être mises en oeuvre par des opérateurs/des fournisseurs de services Internet et des fabricants comme systèmes, sous-systèmes ou entités de réseau distincts;
- les protocoles IETF doivent être envisagés, chaque fois que cela est possible et adoptés dans ces interfaces ouvertes. Par exemple, le mécanisme IP mobile peut être une autre solution pour la mobilité IP dans le réseau RAN.

4.1.8 Qualité de service

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir les moyens permettant d'assurer une qualité de service de bout en bout au moins dans le réseau RAN;
- l'architecture de réseau RAN IP doit respecter les exigences de qualité de service définies dans le cadre d'une politique. D'où éventuellement le problème de savoir où est le point d'application de la politique et le point de décision de la politique;
- la qualité de service dans un réseau RAN IP doit être conforme à la qualité de service «extrémité à extrémité» (ETE) dans le réseau principal;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir simultanément plusieurs niveaux de qualité de service statique (négociation des paramètres avant l'établissement de la session) ainsi qu'une qualité de service dynamique (négociation des paramètres pendant la session), y compris dans les scénarios de transfert;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir prendre en charge la procédure d'acheminement/de transfert associée à la qualité de service, c'est à dire qu'il doit être possible de choisir le meilleur trajet d'acheminement/trajet de transfert, compte tenu des exigences de qualité de service fixées par l'utilisateur;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir la configuration avec équilibrage de charge pour pouvoir satisfaire les exigences de qualité de service différentes pour chaque utilisateur;
- l'architecture de réseau RAN doit prendre en charge les résolutions de qualité de service IPv6;
- l'architecture de réseau RAN IP peut prendre en charge les résolutions de qualité de service IPv4.

4.1.9 Transport IP

- l'architecture de réseau RAN IP doit acheminer le trafic support et le trafic de commande/de signalisation avec la technologie IP;
- le transport IP dans le réseau RAN doit être indépendant des technologies L1, L2;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir les mécanismes d'adressage IPv6/IPv4.

4.1.10 Configuration dynamique répartie

- l'architecture de réseau RAN IP doit assurer la configuration dynamique multiple entre entités fonctionnelles. Par exemple, la fonctionnalité du noeud B peut sélectionner une fonctionnalité RNC appropriée pour assurer la qualité de service voulue et une certaine fiabilité (pas d'abandon d'appel) pendant la communication;

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir les fonctions réparties de commande support et de commande radio;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir assurer la décentralisation des fonctions de commande radio et de commande support dépendantes des cellules vers les points d'accès radio.

4.1.11 Gestion des ressources radioélectriques

- l'architecture de réseau RAN IP doit assurer une gestion efficace des ressources radioélectriques (attribution, maintenance et libération) pour respecter la qualité de service demandée par l'utilisateur et la politique fixée par l'opérateur;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir la fonction permettant d'optimiser et de négocier les ressources radioélectriques entre les différentes technologies d'accès hertzien qui sont prises en charge.

4.1.12 Performances

- les performances d'une architecture de réseau RAN IP pour ce qui est de l'utilisation des liaisons, de la qualité de service, du taux d'abandon d'appel, de la souplesse des transferts, etc., doivent être égales ou supérieures à celles de l'architecture de réseau RAN actuelle;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir accepter des augmentations de capacité sans incidence sur l'architecture.

4.1.13 Architecture extensible

- l'architecture de réseau RAN IP doit donner aux opérateurs de réseau la possibilité d'élargir des entités fonctionnelles du réseau RAN spécifiques indépendamment d'autres entités;
- l'architecture de réseau RAN IP doit donner aux opérateurs de réseau la possibilité de déployer progressivement des entités de réseau et d'élargir leurs réseaux.

4.1.14 Sécurité

- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir offrir des fonctions permettant de protéger ses ressources de réseau et le trafic contre tout accès non autorisé;
- l'architecture de réseau RAN IP doit pouvoir traiter plusieurs protocoles d'authentification de liaison radioélectrique (par exemple, CAVE pour IS-95, A5/1 pour GSM);
- l'architecture de réseau RAN IP doit autoriser AAA à être présent dans le réseau RAN ou dans le réseau central pour l'authentification et l'autorisation de l'accès.

4.2 Réseau radioélectrique

- L'architecture de réseau RAN IP doit optimiser l'utilisation de la largeur de bande pour le transport IP de bout en bout, pour certaines classes d'applications en temps réel.
 - Les protocoles IP sont caractérisés par un grand nombre de préfixes qui vont réduire l'efficacité spectrale, en particulier lorsqu'ils sont utilisés pour les applications vocales. Des retards peuvent être intolérables car les largeurs de bande pour les applications mobiles hertziennes sont encore limitées et parfois chères à obtenir. Dans le cas de la pile de protocoles IP/UDP/RTP la plus courante, les en-têtes occupent globalement au moins 40 octets pour l'IPv4 et au moins 60 octets pour l'IPv6, alors que les données vocales sont en général plus courtes que l'en-tête IP/UDP/RTP; on peut donc utiliser diverses techniques d'adaptation ou de multiplexage d'en-têtes (par exemple, compression d'en-tête ou PPPmux).

- Le réseau RAN IP doit pouvoir assurer une attribution très souple des ressources entre les différentes cellules ainsi qu'une attribution dynamique entre liaisons montantes et liaisons descendantes, compte tenu de l'évolution imprévisible de la charge de trafic IP dans l'ensemble du réseau d'accès.
- Le réseau RAN IP doit pouvoir assurer l'interfonctionnement/l'interopérabilité du mécanisme de qualité de service élaboré pour le réseau d'accès radioélectrique et du mécanisme de qualité de service utilisé dans le réseau central IP (par exemple, MPLS, DiffServ).
 - De nouveaux paramètres peuvent, si nécessaire, être introduits dans le mécanisme de qualité de service du réseau d'accès radioélectrique ou du réseau central IP.
- Le réseau RAN IP doit maximiser l'efficacité spectrale.
 - Un multiplexage statistique amélioré devrait être fourni pour pouvoir offrir des services mixtes (débit binaire variable en temps réel et train de données par salves pas en temps réel).
 - Le codage optimal de la source et du canal devrait être amélioré pour diverses applications multimédias IP.
- L'architecture de réseau RAN IP doit fournir des piles de protocoles pouvant offrir dans le réseau d'accès toute une série de services avec des exigences de qualité de service différentes.
- Le réseau RAN IP doit améliorer la commande d'accès au support (MAC) et la commande de liaison radioélectrique (RLC) pour différentes applications multimédias IP.
 - Une technique d'allocation de ressources et d'accès radioélectrique améliorée devrait être mise en oeuvre pour différentes applications IP dans la commande MAC. Des procédures d'accès rapide peuvent, par exemple, être fournies sur la liaison montante et sur la liaison descendante pour un certain type de service.
 - Les fonctions de commande de liaison radioélectrique devraient être distinguées pour chaque flux, par une classification plus subtile des flux (prise en charge du trafic IP par le support radioélectrique approprié dans le réseau d'accès).
- Le réseau RAN IP doit optimiser les mécanismes de couche physique pour garantir la qualité de certaines applications comme la téléphonie sur Internet.
 - Les exigences propres aux applications IP en temps réel peuvent par exemple être appliquées pour l'optimisation des mécanismes de couche physique afin de garantir la qualité de service. Dans ce cas, un couple de paramètres pour le service de téléphonie sur Internet (par exemple, type de codec, commande d'écho, taille des paquets de données vocales et retard lié à la suppression de gigue) peut être utilisé pour fixer le débit de codage, l'intervalle d'entrelacement dans la couche physique; ainsi, il est possible d'améliorer encore la qualité de la téléphonie sur l'Internet.
- Le réseau RAN IP doit tenir compte des interactions avec les fonctionnalités des protocoles structurés en couche pour une transmission optimale des paquets IP. Les interactions entre protocoles IP (par exemple TCP) et protocoles radioélectriques (par exemple commande de liaison radioélectrique) doivent dans cette optique faire l'objet d'une étude particulière.
 - Les protocoles IP dans les réseaux filaires classiques peuvent être modifiés pour pouvoir être utilisés dans les réseaux d'accès hertzien. Par exemple, un protocole TCP type interprète une perte de paquets comme un encombrement et, à tort, réduit le débit; certaines solutions peuvent donc être appliquées au réseau RAN IP.
 - Il existe diverses boucles de commande qui fonctionneront simultanément avec des protocoles de couche supérieure, de couche inférieure (par exemple, commande de flux TCP et contrôles d'erreur RLC). Ces fonctions dans la même pile de protocoles devraient donc être optimisées pour assurer une transmission efficace des paquets de données.

- Les mécanismes de commande de liaison radioélectrique peuvent inclure l'interaction avec la fonction de détection et de récupération d'erreur d'autres protocoles radioélectriques de couche inférieure.
- La mise en oeuvre optimale des méthodes d'adaptation de la largeur de bande dans un codec audio et vidéo extensible devrait être examinée dans un souci d'efficacité spectrale du réseau d'accès.
- Le réseau RAN IP doit offrir des technologies radioélectriques (par exemple, protocoles radioélectriques et mécanismes physiques) permettant d'assurer divers services de radiodiffusion et de multidiffusion (par exemple, service de messagerie multimédia et service de radiodiffusion Internet).
- Le réseau RAN IP doit avoir une fonction de différenciation du support au niveau du réseau d'accès pour multiplexer différents types de trafic IP sur l'interface radioélectrique afin d'utiliser ainsi au mieux le spectre.
 - Les technologies radioélectriques devraient être optimisées pour différents supports au niveau du réseau d'accès. Par exemple, différentes techniques de codage et d'accès peuvent être appliquées à différents canaux radioélectriques.
- Le réseau RAN IP doit optimiser l'admission de connexion pour une utilisation efficace des ressources radioélectriques sur la liaison montante et sur la liaison descendante, dans le cas d'un ensemble de flux de données avec une qualité de service différente par adresse IP.
 - La caractérisation des différents trains de paquets de données peut être appliquée à la fonction d'admission de connexion en termes d'exigences de service (par exemple, largeur de bande et temps de propagation).
 - Il convient de tenir compte des effets des différents scénarios de déploiement (par exemple, disponibilité du spectre) et de la composition du trafic (voix, données) sur l'efficacité spectrale.
- Le réseau RAN IP doit offrir divers états de protocoles et divers canaux radioélectriques ainsi qu'un passage rapide et dynamique de l'un à l'autre pour pouvoir prendre en charge toute une série de services pour différentes applications multimédias IP (signalisation, services en temps réel, pas en temps réel, orientés connexion ou sans connexion ou des combinaisons de ces services).
 - Il est possible de changer dynamiquement le type des canaux radioélectriques pour pouvoir accepter différents types de trains de données par paquets IP pour la même connexion.
- Le réseau RAN IP doit offrir un mécanisme rapide d'assignation et de libéralisation des ressources sur la liaison montante et sur la liaison descendante pour certaines des applications IP qui sont assimilées à du trafic intermittent (par exemple, navigation sur le web et FTP).
 - Avec cette caractéristique, l'utilisation des liaisons peut augmenter en raison de la gestion non continue de la largeur de bande.
- Le réseau RAN IP doit offrir des mécanismes de transfert qui minimisent la perte de paquets et les retards en vue d'une transmission par paquets IP fiable et transparente.
 - Des mécanismes de transfert de données sans perte devraient être mis en oeuvre pour que la transmission des paquets IP soit fiable pendant les procédures de transfert des trains de paquets IP.

- Le réseau RAN IP devra accepter les technologies radioélectriques évoluées qui verront le jour dans l'avenir, par exemple les antennes adaptatives, l'adaptation de liaison, le multiplexage MRFO, les systèmes de radiocommunication définis par logiciel et la détection multi-utilisateurs.

5 Internet hertzien pour réseaux hétérogènes

5.1 Exigences

Un gros problème avec l'Internet hertzien de demain, c'est que l'architecture devra être très souple et ouverte et pouvoir accepter divers types de réseaux, de terminaux et d'applications. L'objectif essentiel est de faire en sorte que les réseaux hétérogènes soient transparents pour les utilisateurs. Un autre objectif est de concevoir une architecture de système qui soit indépendante de la technologie d'accès hertzien. Compte tenu de ce qui précède, les réseaux hétérogènes ont un ensemble d'exigences qui leur sont propres. Les principaux éléments sont les suivants:

- a) un terminal d'utilisateur multiservices (multimodule/basé SDR) pour avoir accès à différents réseaux RAN;
- b) la définition du système hertzien;
- c) la sélection du système hertzien;
- d) la mise à jour unifiée de la localisation et la radiomessagerie;
- e) le transfert entre systèmes;
- f) la simplicité, l'efficacité, l'extensibilité, la modicité du prix;
- g) l'efficacité énergétique;
- h) la sécurité;
- i) la qualité de service; et
- j) la mobilité personnelle/l'identité universelle.

5.2 Description générale du concept

5.2.1 Entités de base

Pour respecter les exigences ci-dessus, une architecture de réseaux hétérogènes pour futurs systèmes hertziens se présente comme suit [Wu et autres, 2002; Inoue et autres, 2002]. Elle se compose de trois grandes entités.

A) Le réseau central commun (CCN): il peut s'agir d'un réseau géré IPv6 fournissant une plate-forme commune par l'intermédiaire de laquelle tous les terminaux d'utilisateur multiservices (MUT) communiqueront avec les noeuds correspondants sur l'Internet. En principe, tous les points d'accès des réseaux RAN sont connectés à ce réseau. Le réseau assure un acheminement avec qualité de service garantie et un transfert transparent entre réseaux RAN, ce qui permet une intégration naturelle de divers réseaux hétérogènes.

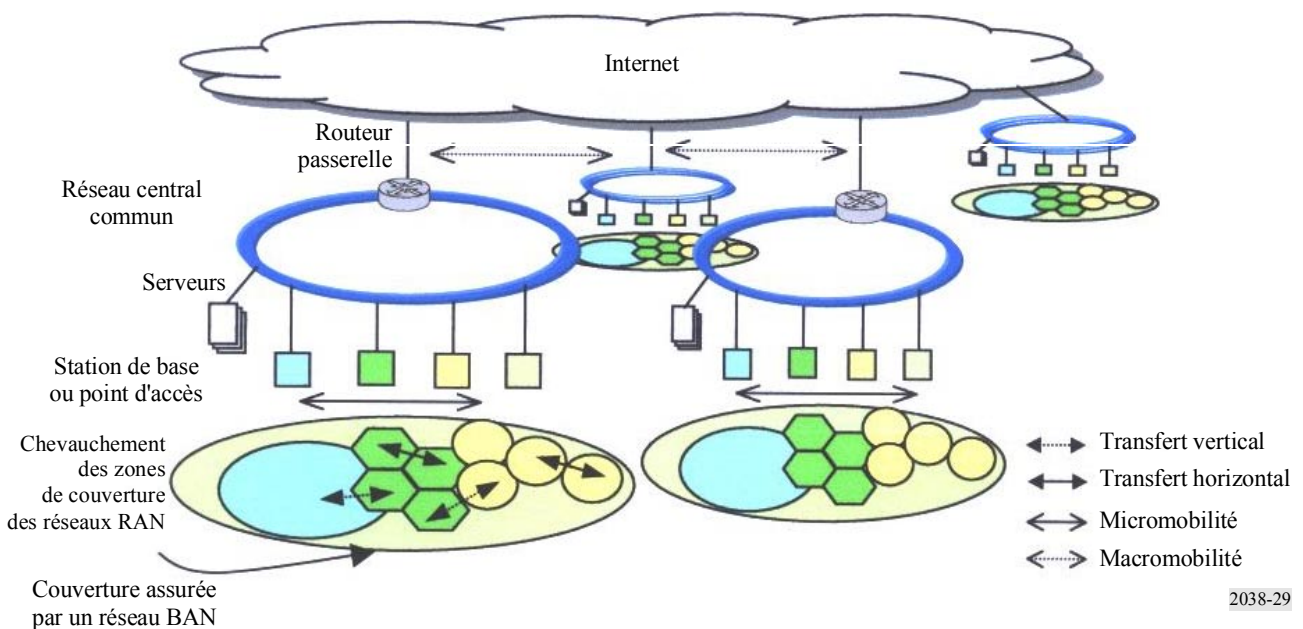
B) Le réseau d'accès de base (BAN): ce réseau fournit un canal de commande/de signalisation commun permettant à tous les terminaux MUT d'avoir accès à la plate-forme commune (CCN). Le réseau est essentiellement utilisé pour assurer la mise à jour de la localisation, la radiomessagerie, l'identification du système hertzien et le transfert vertical (intersystèmes) pour tous les autres systèmes hertziens. Se composant de stations de base et de composants d'accès de base, le réseau BAN aura une zone de couverture étendue, de préférence plus importante que celle des réseaux RAN qu'il prend en charge.

C) *Le terminal d'utilisateur multiservices (MUT)*: le terminal MUT est équipé d'un système multiradio. Tous les terminaux ont une composante d'accès de base (BAC) pour communiquer avec le réseau BAN. En dehors de ce système radioélectrique, un terminal MUT est équipé d'un ou de plusieurs sous-systèmes radioélectriques (de préférence définis par logiciel) pour accéder au réseau CCN.

5.2.2 Modèle de réseau

La Fig. 29 illustre la configuration du réseau. Les réseaux CCN sont connectés à l'Internet par l'intermédiaire de routeurs passerelles. Un réseau CCN fournit des services pour plusieurs réseaux RAN. En général, les réseaux RAN se chevaucheront et un serveur mobile peut avoir accès à plusieurs réseaux RAN situés sur le même site.

FIGURE 29
Réseau hétérogène



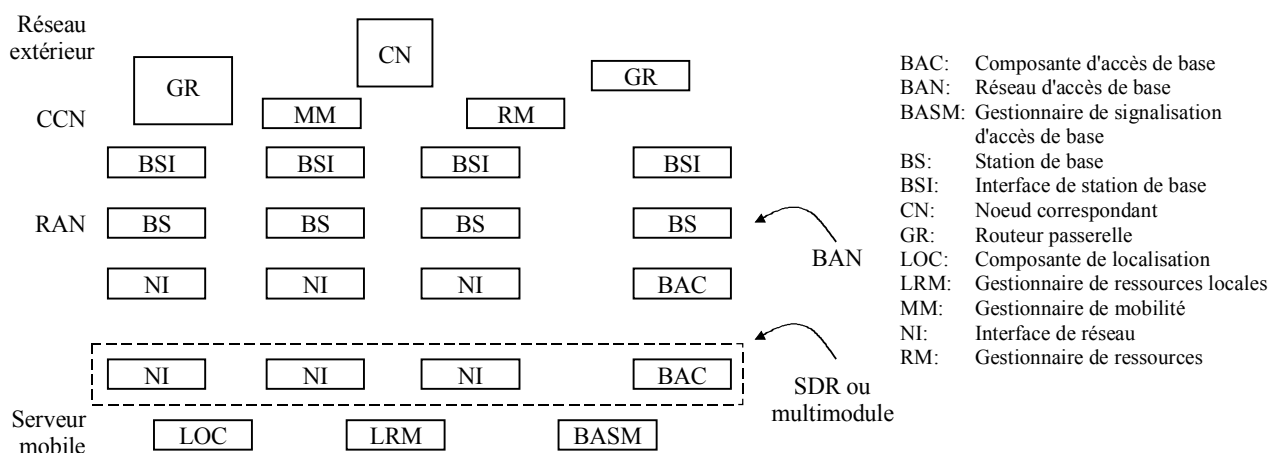
Le protocole IP mobile peut être utilisé pour connecter les réseaux CCN et pour assurer une gestion mondiale de (macro) mobilité. Dans une zone gérée par un réseau CCN, un transfert rapide entre stations de base relevant souvent de réseaux RAN différents avec accès hertzien grande vitesse nécessite une gestion locale de (micro) mobilité. Les stations de base sont connectées (ou intégrées) à une machine de retransmission IP ordinaire. Ces machines sont connectées selon une topologie de réseau qui permet la transmission des paquets entre les stations de base et la passerelle. Différents réseaux RAN se chargent uniquement de ces tâches qui concernent spécifiquement une technologie d'accès radioélectrique. En général, l'accès hertzien fait intervenir uniquement la couche physique et la couche liaison de données. La communication entre réseaux RAN relevant du même réseau CCN est basée sur les couches de réseau inférieures (couche liaison ou couche réseau).

En général, les termes liés à la mobilité qui sont utilisés dans le présent paragraphe ont la même signification que celle donnée dans les définitions de l'IETF [Manner et Kojo, 2003]. Toutefois, on note une différence importante pour les réseaux hétérogènes. La micromobilité n'est pas limitée à un seul réseau d'accès. Au contraire, elle est limitée uniquement à un domaine IP et les points d'accès relevant de réseaux d'accès radioélectrique différents peuvent être connectés au domaine. Le transfert entre réseaux d'accès ne nécessitera pas nécessairement une macromobilité.

5.2.3 Architecture des réseaux hétérogènes

Dans ce paragraphe, on présente les entités fonctionnelles de l'architecture d'un réseau hétérogène ainsi que les protocoles nécessaires. L'architecture, illustrée à la Fig. 30, se compose de quatre grands modules: un serveur mobile, des réseaux RAN, un réseau CCN et un réseau extérieur. Il y a des noeuds correspondants dans le réseau extérieur. Un ou plusieurs routeurs passerelles connectent le réseau extérieur au réseau CCN. Le gestionnaire de ressources et un gestionnaire de mobilité sont deux unités fonctionnelles importantes dans le réseau CCN. Elles sont essentiellement chargées des problèmes de répartition du trafic et de mobilité.

FIGURE 30
Architecture du système



2038-30

Le réseau CCN assure la communication avec les stations de base et donc avec les réseaux RAN. Une interface de station de base (BSI) est essentiellement utilisée pour fournir un mécanisme d'accès uniforme permettant aux stations de base d'avoir accès au réseau CCN. L'interface BSI peut être une composante d'une station de base. Les stations de base se chargent des problèmes d'accès hertzien au niveau de la couche liaison normale et collectent les informations relatives au statut du réseau hertzien qu'elles supportent. Elles utilisent une interface de réseau pour avoir accès au réseau.

A Entités fonctionnelles du réseau central commun

Le principal objectif est d'intégrer différentes technologies d'accès dans une seule et même architecture. Dans cette optique, cette architecture a deux tâches principales à savoir la gestion des ressources pour coordonner la répartition du trafic dans le système et la gestion de mobilité pour prendre en charge des serveurs mobiles en déplacement.

Le gestionnaire de ressources est donc chargé de l'attribution des ressources et de la commande d'admission pour assurer la distribution du trafic dans le réseau CCN. Il sélectionne un réseau RAN capable de fournir le service demandé par le serveur mobile de la façon la plus efficace. Essentiellement, il combine plusieurs systèmes d'accès hertzien et tire parti de leurs avantages spécifiques pour fournir des services caractérisés par une grande efficacité spectrale. Le gestionnaire de ressources est aussi chargé de dialoguer avec les architectures de qualité de service IP (par exemple Intserv et Diffserv) susceptibles d'être utilisées dans le réseau extérieur.

Le gestionnaire de mobilité s'occupe de toutes les questions de mobilité. Il suit le déplacement des mobiles et détermine les réseaux d'accès qui sont disponibles pour un serveur mobile à un endroit donné. Le gestionnaire de ressources utilise ces informations. Le gestionnaire de mobilité est aussi chargé d'assurer les transferts, à la fois au niveau local dans le réseau CCN et pour le réseau extérieur. Pour ce faire, il doit dialoguer avec le gestionnaire de ressources. Si un serveur mobile se déplace à l'intérieur du réseau central, la mobilité est transparente pour la couche réseau et le système essaie de maintenir les flux IP et les paramètres de qualité de service IP.

B Entités fonctionnelles du réseau d'accès de base

Les principales fonctionnalités ou utilisations du réseau BAN sont les suivantes [Mahmud et autres, 2002].

Le réseau BAN est essentiellement utilisé pour assurer une radiomessagerie hétérogène. Dans un environnement mobile, les systèmes doivent avoir une grande efficacité énergétique étant donné que les terminaux fonctionnent avec des accumulateurs. Il est prévu que les communicateurs IP hertziens pourront être «atteints» en permanence (c'est-à-dire qu'ils seront toujours sous tension) même s'ils ne sont pas nécessairement en communication la plupart du temps. Essentiellement, les serveurs mobiles seront «au repos» mais passivement connectés à l'infrastructure de réseau. Il n'est donc pas du tout efficace de devoir «analyser» tous les réseaux RAN et d'attendre un message de radiomessagerie. Bien plus, étant donné que les réseaux hertziens sont optimisés pour des services particuliers, ils risquent de ne pas être très efficaces pour la radiomessagerie. Un réseau hertzien optimisé pour ce type de trafic est plus efficace.

Le réseau BAN peut assurer l'identification du système hertzien. Le réseau BAN offre un accès commun; chaque serveur mobile peut l'utiliser. Le réseau communique au terminal les informations concernant les réseaux hertziens actuellement disponibles de sorte que le terminal n'a pas à «analyser» tous les réseaux RAN possibles.

Le réseau BAN est utilisé comme réseau de signalisation, en particulier pour les transferts verticaux. Un réseau spécialisé de ce type peut offrir ce service de façon efficace et sûre.

Le réseau BAN est utilisé comme support pour la plupart des messages de commande et de signalisation. La conception des nouveaux services d'accès hertzien est ainsi simplifiée étant donné que la signalisation est prise en charge par une autre entité (BAC) ou un autre réseau.

C Entités fonctionnelles des serveurs mobiles

Les serveurs mobiles comprennent tous les protocoles de transport normalisés et des services de commande spécifiques hertziens. Les messages de commande sont acheminés en toute transparence entre le réseau central et les entités fonctionnelles des serveurs mobiles.

Comme l'illustre la Fig. 30, un serveur mobile contiendra une entité BAC et une interface de réseau SDR ou plusieurs interfaces de réseau intégrées ou enfichables. L'entité BAC est utilisée essentiellement comme composante primaire pour communiquer avec le réseau BAN. Grâce à une fonction de positionnement intégrée – la composante de localisation (LOC) – l'entité BAC envoie des données de mise à jour de localisation pour la radiomessagerie (mise à jour grossière) lorsque le serveur mobile franchit la frontière de la zone de radiomessagerie et pour l'identification du système (mise à jour fine) lorsque le serveur mobile initialise un appel ou demande un transfert vertical.

Le gestionnaire des ressources locales (LRM) se charge des ressources locales du terminal et dialogue avec le gestionnaire de ressources du réseau CCN pour déterminer quel réseau il conviendrait d'utiliser et quand ce réseau sera opérationnel. Le gestionnaire de signalisation d'accès de base (BASM) travaille en coordination avec le gestionnaire de ressources locales et le gestionnaire de mobilité pour gérer la signalisation dans le réseau BAN.

6 Terminologie de l'IETF relative à la mobilité

Pour faciliter la compréhension de la présente Annexe, on trouvera dans le présent paragraphe la terminologie utilisée par l'IETF pour la mobilité. Au moment où le présent Rapport a été élaboré, toutes ces définitions n'avaient pas encore été alignées sur toutes les Recommandations de l'UIT relatives au Vocabulaire. Le champ d'application des définitions données dans le présent paragraphe est donc limité au texte de la présente Annexe.

Pour l'IETF [Manner et Kojo, 2003], la gestion de mobilité suppose la prise en charge de plusieurs options architecturales. Le point de vue de l'IETF sur la gestion de mobilité dans les réseaux mobiles IP est le suivant:

Différents types de gestion de mobilité pourront être exigés d'un système mobile. On peut donc distinguer la mobilité de l'utilisateur, la mobilité personnelle, la mobilité du serveur et la mobilité du réseau.

Mobilité de l'utilisateur

Possibilité pour un utilisateur d'avoir accès à des services depuis des serveurs physiques différents. Cela signifie généralement que l'utilisateur dispose d'un compte sur ces différents serveurs et qu'un serveur n'empêche pas les utilisateurs de l'utiliser pour avoir accès à des services.

Mobilité personnelle

Mobilité de l'utilisateur à laquelle s'ajoute la possibilité de suivre le déplacement de l'utilisateur et de donner la position de l'utilisateur à un moment donné pour que des sessions puissent être établies par l'utilisateur ou vers l'utilisateur par quiconque sur un autre réseau. La mobilité personnelle facilite la réalisation des opérations associées de sécurité, de facturation et d'autorisation d'abonnement au service entre différents domaines administratifs.

Mobilité du serveur

Permet à un serveur mobile de changer son point de rattachement au réseau sans interrompre la remise de paquets IP à destination ou en provenance de ce serveur. Il peut y avoir différentes sous-fonctions, selon le niveau de service qui est fourni; en particulier, la mobilité du serveur suppose généralement que le serveur a deux modes de fonctionnement (actif ou au repos) selon qu'il y a ou non des sessions en cours. Les procédures du réseau d'accès sont nécessaires pour suivre l'évolution du point de rattachement à un moment donné de tous les réseaux de gestion ou pour l'établir. Des procédures de localisation et d'acheminement précises sont nécessaires pour maintenir l'intégrité de la communication. La mobilité du serveur est souvent appelée mobilité du terminal.

Mobilité du réseau

On parle de mobilité du réseau lorsqu'un réseau tout entier modifie son point de rattachement à l'Internet et, donc, la possibilité d'être atteint dans la topologie appelée réseau mobile. On peut définir deux sous-catégories de mobilité à l'intérieur de la mobilité du serveur et de la mobilité du réseau:

Mobilité mondiale

Voir Macromobilité.

Mobilité locale

Voir Micromobilité.

Macromobilité

Mobilité sur une zone étendue, c'est-à-dire la mobilité et les procédures d'enregistrement d'adresse associées qui sont nécessaires lorsqu'un serveur mobile passe d'un domaine IP à un autre. Les transferts entre réseaux d'accès nécessitent habituellement des protocoles de macromobilité. Le protocole IP mobile peut être considéré comme un moyen de fournir une macromobilité.

Micromobilité

Mobilité sur une petite zone, c'est-à-dire habituellement, la mobilité à l'intérieur d'un domaine IP, en privilégiant le mode actif utilisant le transfert même les procédures du mode «repos» peuvent aussi être présentes. Les protocoles de micromobilité exploitent la localisation du mouvement en limitant la signalisation et les modifications relatives au mouvement au réseau d'accès.

Gestion de mobilité locale

La gestion de mobilité locale (LMM) est un terme générique qui désigne les protocoles chargés de la gestion de mobilité IP limitée au réseau d'accès. Les messages LMM ne sont pas acheminés en dehors du réseau d'accès même si un transfert peut déclencher l'envoi de messages IP mobiles aux noeuds correspondants et aux agents de rattachement.

7 Références bibliographiques

- INOUE, M. WU, G. MAHMUD, K. MURAKAMI, H. et HASEGAWA, M. [septembre 2002] Development of MIRAI System for Heterogeneous Wireless Networks. PMRC02, Lisbonne, Portugal.
- MAHMUD, K. WU, G. INOUE, M. et MIZUNO, M. [septembre 2002] Basic Access Network – the Signalling-only Network for Power-Efficient Mobile Multi-service Terminals in MIRAI Architecture. IEEE VTC automne 2002, Vancouver, Canada.
- MANNER, J. et KOJO, M. (Éds.) [avril 2003] *Internet Engineering Task Force Internet-Draft, Mobility Related Terminology*.
- WU, G. HAVINGA, P. et MIZUNO, M. [février 2002] MIRAI Architecture for Heterogeneous Network. *IEEE Comm. Mag.*, p. 126-134.

Annexe 9

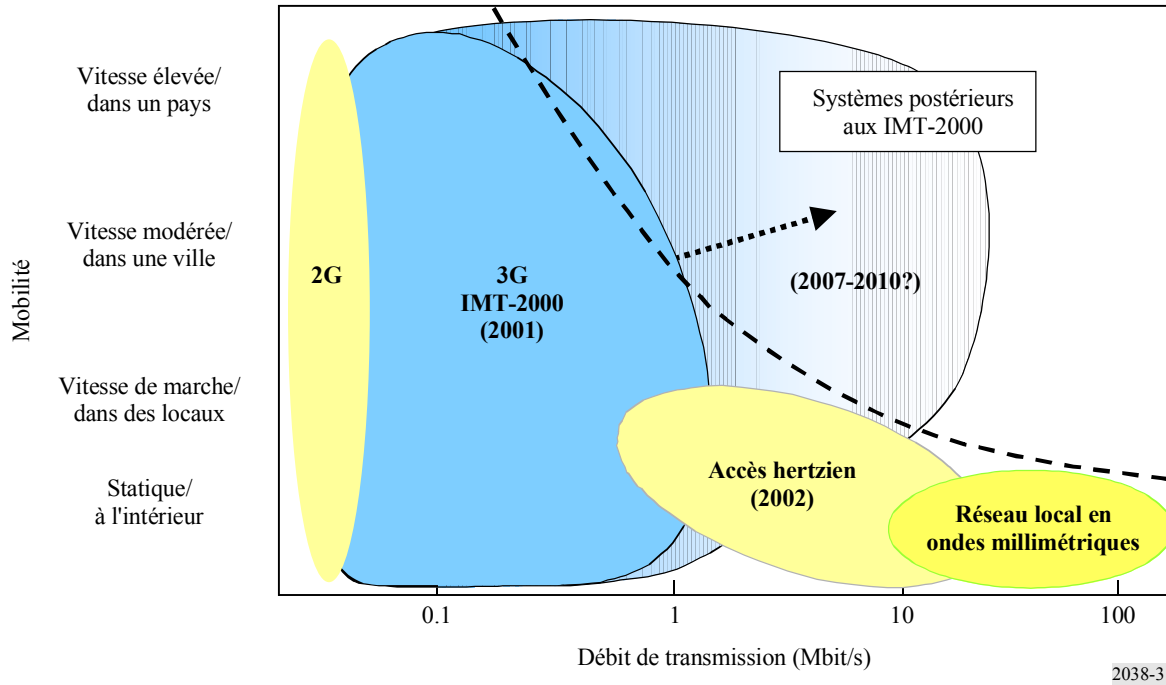
Technologies d'accès hertzien large bande IP

1 Introduction

Les demandes en communications mobiles ne cessant de croître, les systèmes existants doivent continuer à évoluer et de nouveaux systèmes doivent être développés lorsque c'est nécessaire, afin de prendre en charge des applications multimédias telles que la transmission à haut débit de données, de paquets IP et de vidéo. L'ajout, dans la famille des IMT-2000, d'une nouvelle norme sur l'accès hertzien large bande IP – offrant des largeurs de bande encore jamais proposées et un accès transparent à l'ensemble du contenu de l'Internet et à n'importe quel contenu, public ou privé, sur la base du protocole Internet – pourrait être déterminant pour la poursuite de la croissance du secteur des communications hertziennes.

Afin de déterminer et de préciser ce nouveau concept d'accès hertzien large bande IP, on utilise la Fig. 31 comme référence:

FIGURE 31



2038-31

D'après la Fig. 31, qui décrit les systèmes mobiles en fonction de deux paramètres fondamentaux, la mobilité et le débit de transmission, les capacités futures des systèmes mobiles devraient inclure à la fois une mobilité plus forte et des débits binaires plus élevés. Cette double évolution peut sembler quelque peu paradoxale au moins d'un point de vue purement technologique, comme représenté par la courbe en pointillés sur la Fig. 31, qui peut être interprétée comme une courbe de compromis ou de tendance. Par ailleurs, une description plus détaillée de l'évolution possible inclurait des paramètres additionnels, par exemple l'inclusion de techniques permettant d'utiliser plus efficacement le spectre (antennes adaptatives par exemple) dans les systèmes mobiles actuels ou prévus. Toutefois, même dans l'hypothèse de progrès techniques considérables, pour des raisons physiques fondamentales, on peut affirmer sans risque d'erreur qu'il est impossible de combiner de manière efficace ou de manière économique dans un seul et même système:

- a) une forte mobilité,
- b) une grande efficacité d'utilisation spectrale, et
- c) des débits de transmission élevés.

Il peut donc s'agir d'une mauvaise interprétation que de déduire de la Fig. 31 qu'une seule interface hertzienne devrait couvrir l'ensemble des paramètres a), b) et c) ci-dessus, sans parler de la complexité supplémentaire liée à la compatibilité amont avec les divers systèmes à commutation de circuits existants.

Cela conduit alors naturellement au concept de modules d'interface hertzienne optimisés pour des créneaux de marché ou plutôt pour des sphères de marché: on pourrait alors prévoir d'élaborer des produits conçus pour répondre de façon optimale à des profils d'utilisateur spécifiques, définis de façon suffisamment générale pour des marchés géographiques non négligeables et incorporant des sous-ensembles particuliers de ces modules.

Cette approche modulaire est compatible avec le développement technique actuel de terminaux multinormes/multimodes ainsi qu'avec les concepts SDR. Néanmoins, des questions d'implémentation et d'intégration continueront à se poser.

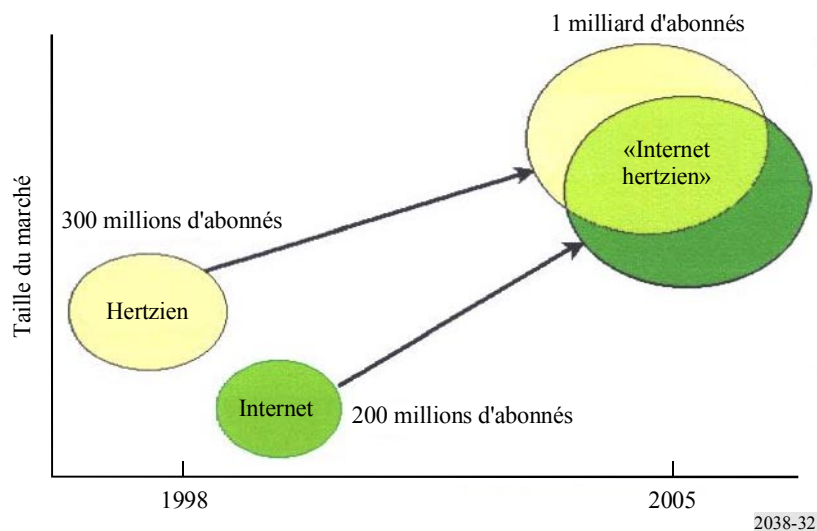
Dans le présent Rapport, on part du principe que le meilleur moyen d'élargir les performances des systèmes IMT-2000 centraux à la fois vers une plus grande largeur de bande et vers une mobilité plus forte est d'utiliser le concept de modules d'interface hertzienne destinés à des segments de marché spécifiques, ce concept pouvant être adopté dans le cadre de la famille des normes IMT-2000.

2 Exemple de domaine d'intérêt: l'accès hertzien large bande IP

Les communications hertziennes ont créé une génération d'utilisateurs qui dépendent entièrement de leurs portables pour ce qui est de leur connectivité personnelle. Les technologies sous-jacentes ont atteint un niveau de maturité tel que les portables sont universels et qu'un marché très vaste et dynamique s'est formé. La convergence transparente de l'Internet et des communications hertziennes conduit à un nouveau domaine prometteur: l'accès à l'Internet large bande depuis son portable.

L'introduction de l'Internet dans les communications privées et professionnelles engendre de nouvelles possibilités mais pose aussi de nouveaux problèmes aux planificateurs et opérateurs de systèmes de télécommunication ainsi qu'aux concepteurs et aux fabricants d'équipements. En particulier, il est admis que l'accès hertzien à l'Internet représentera bientôt un marché considérable (voir la Fig. 34). Satisfaire aux besoins des utilisateurs hertziens tout en continuant à répondre aux exigences des très nombreux fournisseurs de services qui offrent leurs services sur l'Internet fixe ou filaire crée des objectifs additionnels. Les fournisseurs de réseaux hertziens ne seront peut-être pas capables d'atteindre ces objectifs avec leurs offres actuelles et pourront même avoir du mal à les atteindre avec la prochaine génération de réseaux hertziens qui en sont à divers stades de planification. Toutefois, grâce à de nouvelles technologies de base (radiocommunications par paquets, systèmes d'antennes adaptatives, architectures fondées sur l'Internet, etc.), l'accès au riche contenu (transmission de vidéo en continu, etc.) de l'Internet pourra être aussi courant que la téléphonie cellulaire aujourd'hui.

FIGURE 32



La croissance enregistrée dans tout le secteur de l'Internet est due en partie au fait qu'une grande variété de contenus et de services peuvent être mis sur la Toile sans obstacle majeur. Mais, tandis que sur de nombreux marchés, les clients privés filaires ont pu passer de 9,6 kbits/s à plus de

1 Mbit/s à des prix abordables, il leur est toujours très difficile d'obtenir un accès à l'Internet lorsqu'ils abandonnent leurs connexions filaires fixes. Des systèmes hertziens large bande se développent, comme indiqué sur la Fig. 31, mais ces systèmes visent à assurer des connexions à haut débit dans des bâtiments et en des endroits fixes, mais pas aux personnes.

Historiquement, malgré les nombreuses tentatives faites par le secteur des communications hertziennes mobiles pour fournir des services de données hertziens, les clients ont souvent été réticents, même s'il existe maintenant des expériences à grande échelle réussies: par exemple, les nombreuses applications et les nombreux dispositifs d'utilisateur final présents dans les réseaux Personal Handiphone et i-Mode au Japon ou l'adoption par un très grand nombre d'utilisateurs du service de messages courts dans les réseaux GSM. Mais l'adoption de réseaux par paquets pour les systèmes hertziens a jusqu'à maintenant été subordonnée à la nécessité de fournir des services téléphoniques à commutation de circuits sur ces réseaux. L'adoption de réseaux par paquets de bout en bout a donc été ralentie dans le passé en raison de l'absence de demande des clients. Par ailleurs, la plupart des dispositifs d'utilisateur final sont fondés sur des concepts de téléphonie et ne sont pas conçus comme des équipements Internet. Ce n'est que récemment que des équipements Internet portables avec connectivité sans fil ont commencé à apparaître.

Les applications de données hertziennes mobiles peuvent être classées en différentes catégories, énumérées par ordre croissant de complexité, de largeur de bande requise et de transparence requise par rapport aux protocoles et aux contenus Internet:

- Le contenu Internet de base (par exemple la météorologie, la bourse et l'actualité) est largement disponible aujourd'hui dans la plupart des réseaux mobiles commerciaux – grâce au protocole d'applications hertzien (WAP, *wireless application protocol*) et à d'autres techniques de coupure web – et il est distribué aux téléphones mobiles sous forme textuelle.
- Au cours des prochaines années, les applications fondées sur un réseau amélioré – celles qui exigent un certain niveau d'intelligence et une capacité transactionnelle dans le réseau (par exemple les applications de géolocalisation) – seront disponibles sur ces dispositifs. Ces applications sont vraiment utiles et peu gourmandes en largeur de bande, elles nécessitent uniquement une certaine intelligence de réseau et une interaction préprogrammée entre le réseau et l'utilisateur.
- Il existe ensuite diverses applications qui nécessitent un certain niveau de sécurité et de fiabilité, comme le commerce électronique sécurisé et l'accès aux intranets d'entreprise. Dans ce cas, les problèmes sont plus complexes en ce sens que l'utilisateur final a des besoins spécifiques très exigeants, par exemple en termes de sécurité et de chiffrement; ces problèmes sont traités actuellement.
- Il est incontestable que la famille de systèmes IMT-2000 permettra d'améliorer considérablement l'accès à l'Internet. Toutefois, d'un point de vue pratique, on peut affirmer que, compte tenu des besoins toujours croissants en téléphonie, l'accès filaire continuera à devancer l'accès hertzien en termes de facilité d'accès transparent à l'Internet, de qualité et de prix, à moins que la VoIP sur réseau par paquets devienne disponible. Il existe donc des arguments en faveur de l'élaboration de spécifications et de normes sur des architectures de systèmes hertziens qui permettraient aux utilisateurs, à titre privé ou à titre professionnel, de bénéficier d'une connexion Internet permanente à très haut débit tout en ayant la possibilité de se déplacer. Parallèlement aux principaux composants de la famille des IMT-2000, l'une de ces normes pourrait porter essentiellement sur le créneau réellement large des mécanismes d'accès aux données uniquement et compléterait parfaitement les autres composants de la famille des IMT-2000.

C'est principalement la croissance de l'Internet qui est à l'origine du besoin d'une telle norme. Si l'Internet est beaucoup utilisé dans la vie quotidienne et qu'il existe un grand nombre d'applications sur l'Internet, auxquelles les utilisateurs accèdent en des emplacements fixes, il sera alors nécessaire

d'offrir aux utilisateurs un service qui leur permette de bénéficier du même accès sans restrictions lorsqu'ils se trouvent dans un endroit différent mais non desservi. L'un des objectifs de l'élaboration d'une telle norme serait d'offrir à tous un «accès multimédia autonome». Un nouveau type de développeurs d'applications étendront les applications large bande au domaine des portables et définiront des applications propres à ce domaine, par exemple un contenu et des services de géolocalisation large bande. Ces applications pourraient notamment être les suivantes: télétravail, télésanté, téléenseignement, loisirs, tourisme, jeux et éducation.

3 Rompre le goulot d'étranglement de l'accès hertzien: l'accès hertzien large bande IP

Les tendances décrites ci-dessus concourent à créer immédiatement dans les pays industrialisés et prochainement sur les marchés émergents, un besoin en systèmes de communication de données hertziens présentant les caractéristiques suivantes, spécifiées par les utilisateurs et les opérateurs de réseaux:

- accès par paquets à haut débit;
- applications synchrones et applications asynchrones;
- grande efficacité d'utilisation du spectre;
- grande efficacité pour le trafic asymétrique (DRT);
- connectivité «permanente»;
- possibilité de déplacement (avec faible mobilité);
- faible coût;
- interfaces intelligentes (transparentes) pour l'accès à un contenu riche.

Les nouvelles normes qu'il est proposé d'élaborer dans la présente contribution seraient fondées sur de nouvelles techniques évoluées de traitement du signal qui ont déjà été mises en oeuvre et testées dans divers systèmes de communication modernes présents sur le marché.

Dans le présent Rapport, on considère que le concept d'accès hertzien large bande IP est très important pour les raisons suivantes:

- un service de données large bande acheminant de manière transparente le contenu Internet doit pouvoir être offert à un prix abordable à de nombreux utilisateurs en tout lieu (pas uniquement à l'intérieur);
- la combinaison d'une large connectivité sans fil (systèmes mobiles) et d'une large connectivité Internet large bande (au bureau et à domicile par le biais de systèmes filaires) permettra dans une large mesure de tirer le marché vers des systèmes hertziens large bande, dont la normalisation en favorisera l'harmonisation et contribuera finalement à leur succès;
- le besoin des pays en développement en accès Internet large bande, susceptible d'accélérer considérablement l'activité économique, pourra être satisfait à bas coût et rapidement si la connectivité sans fil est universelle.

En résumé:

- Le secteur des communications hertziennes mobiles s'intéresse actuellement aux services à valeur ajoutée fondés sur un contenu et des applications, et non sur la technique IP large bande.
- L'offre d'une connectivité sans fil large bande IP universelle est un domaine d'intérêt nouveau et différent.

4 Conclusion

La présent Rapport donne les éléments de définition pour un exemple type, compte tenu des besoins du marché, afin de justifier l'élaboration de nouvelles normes sur l'accès hertzien IMT-2000. L'ajout, dans la famille des IMT-2000, d'une nouvelle norme sur l'accès hertzien large bande IP – offrant des largeurs de bande encore jamais proposées et un accès transparent à l'ensemble du contenu de l'Internet et à tout contenu, public ou privé, sur la base du protocole IP – pourrait être déterminant pour la poursuite de la croissance du secteur des communications hertziennes.

Conformément aux besoins des pays en développement mentionnés dans la Question UIT-R 77/8, le présent Rapport devrait être considéré comme la base qui servira à élaborer un avant-projet de nouvelle Recommandation sur l'établissement de nouvelles normes en matière d'accès hertzien IMT-2000.

Annexe 10

Radio sur fibre (RoF)

1 Introduction

La présente Annexe décrit un système générique de RoF comme défini au § 3.2.5 et contient les exigences et les spécifications fonctionnelles de ce système.

2 Description du système RoF

Le système RoF comprend les éléments suivants: un ou plusieurs répéteurs de station BTS, un réseau optique, un ou plusieurs répéteurs d'antenne et un module de commande.

Le système avec ses interfaces est représenté sur la Fig. 33. Un schéma simplifié est par ailleurs donné à titre d'exemple sur la Fig. 34.

FIGURE 33

Système RoF et interfaces

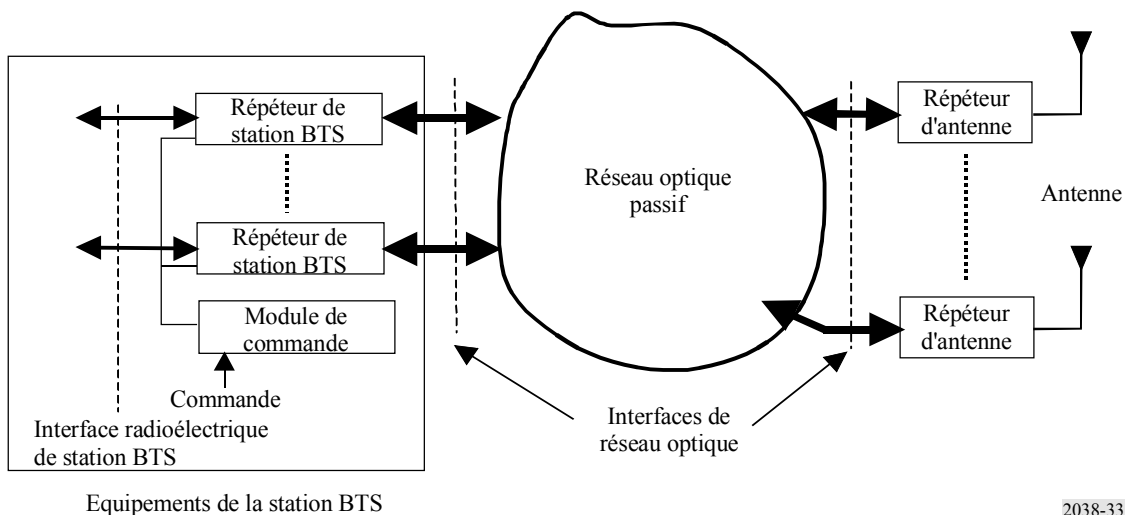
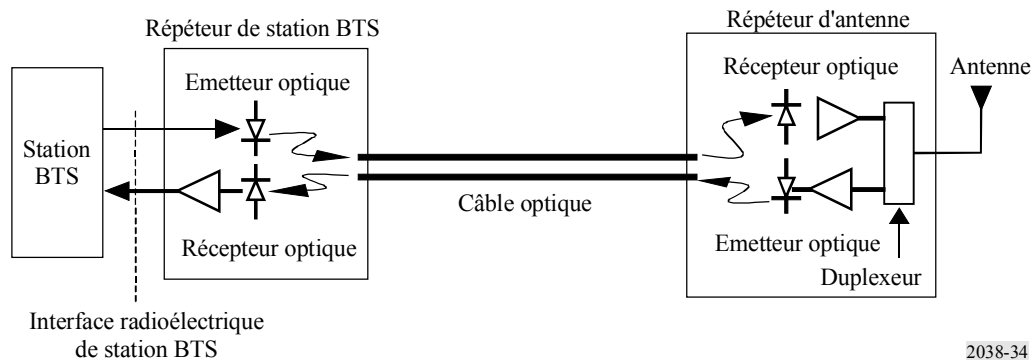


FIGURE 34

Schéma simplifié du système RoF



2038-34

2.1 Définition du répéteur de station BTS

Le répéteur de station BTS adapte l'interface RF de la station BTS à l'interface de réseau optique, côté réseau. Dans la version simplifiée illustrée sur la Fig. 34, une porteuse RF venant de la station BTS module l'intensité d'un émetteur optique dont la sortie est injectée sur une fibre optique (sens descendant). Dans l'autre sens, un autre signal optique, modulé en intensité par une porteuse RF dans le sens montant, est reçu en provenance d'une autre fibre et injecté dans un récepteur optique, dont la sortie amplifiée est injectée dans le port de réception de la station BTS.

2.2 Définition du réseau optique

Le réseau optique est passif, sauf indication contraire. Il raccorde les répéteurs de station BTS hébergés dans une même salle avec les répéteurs d'antenne, par le biais de leurs interfaces correspondantes avec le réseau optique. Outre une ou plusieurs fibres optiques, il peut inclure des connecteurs, des séparateurs, des multiplexeurs et des démultiplexeurs en longueur d'onde et, d'une manière générale, tout dispositif optique passif. Dans la version simplifiée illustrée sur la Fig. 34, le réseau optique comprend deux fibres optiques, l'une pour la transmission dans le sens descendant et l'autre pour la transmission dans le sens montant, raccordant un seul répéteur de station BTS à un seul répéteur d'antenne.

2.3 Répéteur d'antenne

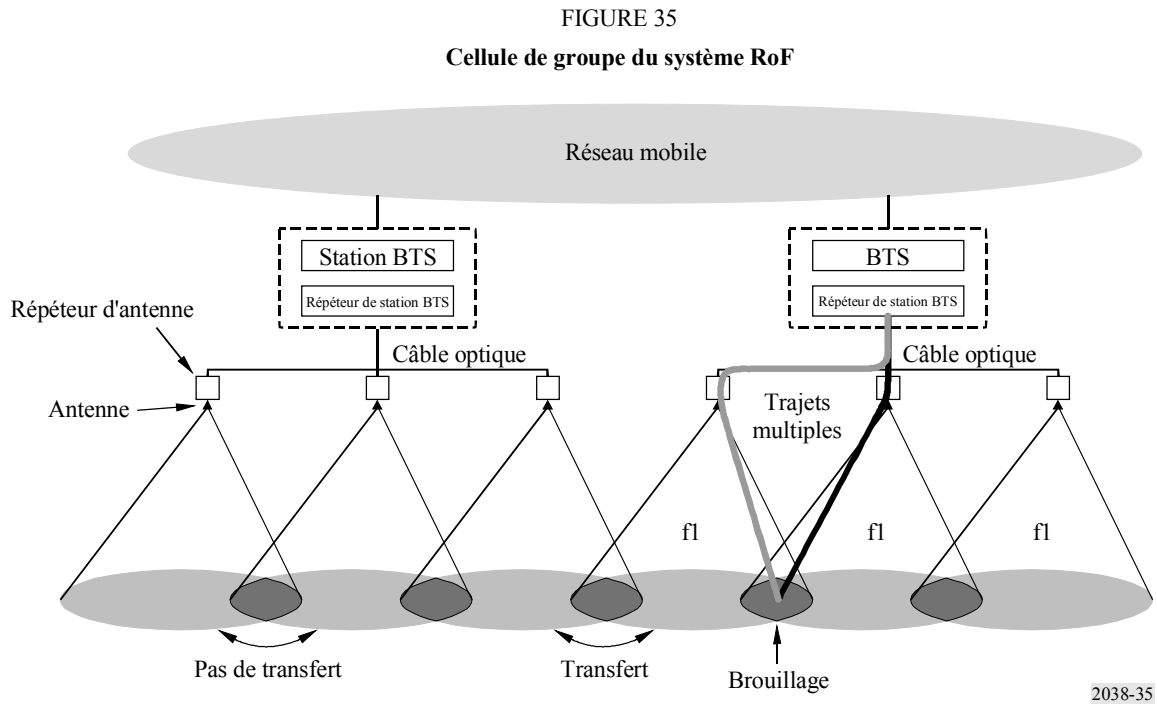
Le répéteur d'antenne adapte l'interface de réseau optique, côté antenne, aux antennes d'émission et de réception. Dans la version simplifiée illustrée sur la Fig. 34, une porteuse optique modulée en intensité par une porteuse RF dans le sens descendant, est injectée dans un récepteur optique, dont la sortie est filtrée, amplifiée et injectée dans une antenne d'émission. Dans l'autre sens, les signaux RF provenant de l'antenne de réception sont filtrés, amplifiés et injectés dans le port à modulation d'intensité d'un émetteur optique, dont la sortie est à son tour injectée sur une fibre optique dans le sens montant.

2.4 Module de commande

Il s'agit d'une entité logique, qui peut aussi être un module physique ou dont la fonctionnalité peut être incorporée dans le répéteur de station BTS. Chaque système RoF contient un module de commande et un seul, dont l'objet est de fournir une interface de commande à un système de gestion externe. Les communications avec le système de gestion peuvent être assurées au moyen du même système hertzien ou au moyen d'une connexion filaire.

2.5 Architecture de la cellule de groupe

L'architecture de la cellule de groupe du système RoF illustrée sur la Fig. 35 est très efficace pour une cellule de rue ou pour une cellule de zone sensible, car aucun transfert n'est requis entre les cellules relevant de la même station BTS. Une forte mobilité du terminal de l'utilisateur est donc possible dans les cellules relevant de la même station BTS, comme montré dans [Fujise, 2001; Harada et autres, 2001].



3 Exigences et spécifications fonctionnelles du système RoF

3.1 Capacité de transport

Pour un système hertzien donné, la capacité de transport d'un système RoF est définie par les paramètres suivants:

- nombre de porteuses RF bidirectionnelles que le système RoF peut transporter;
- nombre de répéteurs d'antenne que le système RoF peut desservir simultanément;
- nombre de porteuses RF par répéteur;
- capacité de diffusion dans le sens descendant, ou nombre de répéteurs d'antenne pouvant rayonner la même porteuse RF.

3.2 Paramètres d'entrée/sortie

- puissance maximale de sortie par porteuse;
- gain de puissance dans le sens descendant et dans le sens montant;
- paramètres de dégradation tels que le facteur de bruit équivalent dans le sens montant; l'erreur de fréquence/de phase, les caractéristiques d'intermodulation, etc.

3.3 Réseau optique

- valeur maximale de l'affaiblissement d'insertion du réseau optique;
- longueur maximale du trajet optique.

En outre, chaque système RoF fixe des valeurs maximales pour l'affaiblissement d'adaptation du réseau optique, qui dépendent de la technique de transport optique et des caractéristiques du système hertzien.

3.4 Fonctions de gestion

Un système RoF doit prendre en charge plusieurs types de fonctions de gestion, comme la configuration (répéteurs de station BTS et d'antenne) et la signalisation des dérangements.

4 Références bibliographiques

FUJISE, M. [août 2001] Radio over Fiber Transmission Technology for ITS and Mobile Communications. *IEICE Trans. Fundamentals*. Vol. E84, **8**, p. 1808-1814.

FUJISE, M., HARADA, H. et SATO, K. [décembre 2001] A Radio-on-Fiber Based Millimeter-Wave Road-Vehicle Communication System by a Code Division Multiplexing Radio Transmission Scheme. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 2, **4**, p. 165-179.

Annexe 11

Architecture des terminaux

Dans les IMT-2000, la combinaison et la convergence des technologies de l'information, du multimédia et des télécommunications permettront d'intégrer les télécommunications avec les technologies de l'information. Il s'ensuit que les communications mobiles conjointement avec les technologies de l'information pénétreront dans les divers domaines de la société. Les attentes des utilisateurs augmentent en ce qui concerne une grande variété de services et d'applications avec différents niveaux de qualité de service, liés aux conditions requises en termes de temps de transmission, de débit et d'erreurs binaires. En particulier, les utilisateurs souhaitent bénéficier sur leurs plates-formes mobiles non seulement de la même étendue d'applications et de capacités que celles dont ils disposent actuellement sur leurs plates-formes informatiques, mais aussi de la même vitesse d'évolution «conforme à la loi de Moore» des nouvelles applications et capacités.

Du point de vue des utilisateurs, les IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000 entraînent donc une modification fondamentale de leurs attentes. Au lieu de souhaiter simplement avoir un ensemble «nouveau et amélioré» mais «statique» d'applications et de services, les utilisateurs souhaiteront bénéficier d'un flux dynamique et continu d'applications, de capacités et de services nouveaux.

Ce flux continu reposera sur un ensemble robuste de plates-formes programmables polyvalentes prises en charge par une vaste et solide communauté dynamique de développeurs.

1 Plates-formes programmables polyvalentes

Comme cela est généralement défini dans les ouvrages portant sur le sujet, une technique polyvalente possède deux caractéristiques essentielles qui lui permettent d'engendrer des avantages économiques réels et durables:

- dynamisme technique; la performance de la technique peut sans cesse être améliorée;
- application large; la technique peut être utilisée à de nombreuses fins diverses.

A mesure que le coût de la technique diminue, les innovateurs peuvent l'appliquer à des domaines de plus en plus nombreux de l'activité humaine, ce qui permet de la déployer largement dans la population et d'augmenter ainsi son incidence sur la société tout entière.

Les nouveaux équipements des utilisateurs mobiles présentent ces caractéristiques. En effet,

- ils contiennent des processeurs polyvalents très puissants qui suivent la loi de Moore en termes d'évolution des prix et de la performance;
- ils offrent une plate-forme souple et programmable qui peut être utilisée à des fins toujours plus diverses.

2 Préoccupations de haut niveau concernant les équipements des utilisateurs mobiles

La convergence de la connectivité sans fil et d'une plate-forme programmable polyvalente accroît certaines préoccupations existantes et en crée de nouvelles. Ainsi certains facteurs environnementaux ainsi que certaines demandes du marché et certains catalyseurs techniques classiques auront une incidence sur l'architecture des équipements des utilisateurs mobiles.

2.1 Facteurs environnementaux

Côté environnemental, il s'agit de concilier les trois intérêts fondamentaux suivants:

- exigence économique: avantages d'un produit ou d'un service pour les entreprises, pour les utilisateurs et pour la société;
- sécurité: protection des ressources d'entreprise, d'utilisateur et publiques;
- confidentialité: protection des données sensibles contre tout accès non autorisé.

2.1.1 Exigence économique

Du point de vue des entreprises, il s'agit bien évidemment de créer des produits ou des services qui attirent les clients. Mais certains produits ou services peuvent aussi être destinés à satisfaire des besoins pour la société, même s'ils ne sont pas lucratifs.

2.1.2 Sécurité

La programmabilité offre des avantages considérables, mais comporte aussi des risques sur le plan de la sécurité. Ces risques peuvent être de différents types: virus endommageant le réseau, attaques de refus de service, utilisation frauduleuse du réseau, piratage de fréquences; accès à des données sensibles protégées par des pare-feu d'entreprise et dégradation de ces données; vol de contenu numérique; vol ou dégradation d'applications ou de données de clients.

2.1.3 Confidentialité

Outre la nécessité d'authentification pour combattre la fraude commerciale et les exigences légitimes d'application de la loi, il est également nécessaire de protéger les particuliers et les entreprises contre toute invasion abusive telle que l'accès non autorisé aux informations de réseau propres aux clients et aux données d'utilisateur locales sensibles telles que celles qui sont enregistrées dans une mémoire persistante ou générées par une technique qui dépend du contexte.

2.2 Demandes du marché et catalyseurs techniques fondamentaux

Conjointement avec les facteurs environnementaux, il existe des demandes du marché et des catalyseurs techniques classiques:

2.2.1 Demandes des utilisateurs

- déploiement de capacités de réseau de données par paquets robustes, permettant de prendre en charge de nouvelles applications logicielles à grand volume de données qui intègrent applications Internet et applications multimédias (transmission en continu de données vidéo, de données multimédias, de graphiques animés, m-commerce, connectivité de réseau, etc.). Bon nombre de ces applications peuvent être personnalisées ou rendues «dépendantes du contexte» au moyen d'informations d'utilisateur sensibles;
- souhait des abonnés mobiles, que ce soit à titre privé ou à titre professionnel, d'accéder à des applications à grand volume de données et sécurisées.

2.2.2 Exigences de sécurité

- algorithmes, mécanismes et techniques dynamiques assurant une certaine sécurité;
- technique d'authentification, notamment par des dispositifs biométriques;
- gestion des droits numériques pour une protection du contenu précieux.

2.2.3 Catalyseurs techniques

- l'apparition de microprocesseurs à faible consommation et très performants, à mémoires denses et à logique de bande de base efficace, offre la possibilité de mettre à la disposition des utilisateurs des capacités entièrement nouvelles;
- les serveurs peu onéreux et très performants qui sont mis en place dans l'infrastructure permettent de prendre en charge l'interface entre les sources d'information et les clients hertziens et d'offrir des capacités de bout en bout;
- des logiciels médiateurs de recherche de service permettent de mettre en oeuvre des techniques de communications réparties.

3 Tendances architecturales de haut niveau pour les équipements des utilisateurs mobiles

Pour répondre aux besoins de sécurité et d'intégrité des réseaux, les applications de la première génération conçues pour les dispositifs hertziens ont été développées et mises en oeuvre progressivement et lentement. Des matériels (dispositifs au silicium) ont d'abord été développés. Des applications ont ensuite été conçues pour des matériels et une interface hertzienne particuliers. Enfin, matériels et applications ont été testés ensemble afin de faire en sorte que chaque interface hertzienne particulière et chaque réseau fonctionnent correctement. Mais ce modèle n'est pas viable pour ce qui est de répondre aux attentes des utilisateurs concernant les IMT-2000 et les systèmes postérieurs aux IMT-2000.

- Le développement des applications ne pourra pas suivre le rythme de la croissance de l'Internet s'il continue à se faire progressivement.
- Pour le développement des applications, les techniques SDR permettent en outre à un nombre de plus en plus grand de fonctions d'interface hertzienne et de réseau d'être exécutées par logiciel.
- Par ailleurs, les algorithmes et techniques liés à la sécurité doivent être modifiés et améliorés en permanence afin de prévenir les mauvaises intentions et les infractions.

Afin de maintenir l'intégrité de l'espace réseau et de l'espace utilisateur, le logiciel de communications sera «découplé» et exécuté parallèlement aux applications d'utilisateur conçues pour un processeur polyvalent fonctionnant dans un environnement d'exécution polyvalent. Ce découplage maximise la viabilité économique en permettant aux applications de se développer indépendamment de l'évolution des normes de communication et permet d'améliorer la sécurité en offrant un espace réseau et un espace utilisateur autonomes.

La création de trois parties autonomes – sous-système radio, sous-système application, sous-système mémoire – permet de répondre aux triples exigences environnementales à prendre en considération pour pouvoir offrir des produits et des services viables économiquement, tout en maintenant la sécurité des réseaux et des entreprises et la souveraineté des utilisateurs pour ce qui est de la confidentialité des données et de l'espace des applications. Pour ainsi dire, «les bonnes clôtures permettent d'avoir de bons voisins».

Grâce à une forte réduction des interdépendances entre les trois facteurs (exigence économique, sécurité, confidentialité), la recherche de l'équilibre pourra aboutir beaucoup plus rapidement et pour un coût nettement moins élevé.

3.1 Caractéristiques essentielles pour une autonomie des sous-systèmes dans l'architecture des équipements d'utilisateur

Cette architecture doit notamment présenter les caractéristiques suivantes:

- L'architecture doit être ouverte, les sous-systèmes autonomes sont raccordés par des interfaces physiques ou logiques ouvertes et ils sont compatibles avec un grand nombre de systèmes d'exploitation, d'environnements d'exécution et d'interfaces hertziennes. Des interfaces ouvertes permettent et favorisent la concurrence entre fabricants de sous-systèmes et permettent aux fabricants de développer des matériels et des logiciels plus rapidement et de façon indépendante selon un rythme qui leur est propre, garantissant ainsi un flux continu de solutions novatrices au plus bas coût.
- L'architecture doit être souple et adaptable, une grande modularité est essentielle, chaque module devant pouvoir être testé indépendamment des autres et devant pouvoir être réutilisé dans de nombreux systèmes différents. Une conception modulaire permet d'intégrer de nouvelles fonctions matérielles ou logicielles en fonction de l'évolution des normes industrielles et des besoins du marché.

Annexe 12

Microsystèmes électromécaniques (MEMS) RF

1 Mise au point d'un module RF multinorme utilisant des composants MEMS RF

Comme des services IMT-2000 sont sur le point d'être lancés, il est nécessaire d'assurer une compatibilité amont avec les systèmes PCS, AMRC, etc. Des terminaux multibandes/multinormes apparaîtront ensuite sur le marché. Avec les techniques existantes, les terminaux multibandes/multinormes seront encombrants et onéreux. On peut donc utiliser la technologie MEMS pour mettre au point un module RF pouvant utiliser diverses fréquences et présentant une structure compacte et souple. Par ailleurs, les terminaux postérieurs aux IMT-2000 fondés sur la technique SDR auront besoin d'un module RF intelligent.

La technologie MEMS permet de mettre au point des composants RF passifs discrets qui soient petits, légers, à faible consommation et très performants afin de produire un module RF souple et compact pour les terminaux multibandes/multinormes.

Le Tableau 5 présente les caractéristiques de chaque composant lorsqu'on emploie la technologie MEMS RF.

TABLEAU 5

Caractéristiques d'un module RF utilisant la technologie MEMS RF

Duplexeur	13 mm d'épaisseur, utilise un filtre MEMS RF réglable
Commutateur	Faible affaiblissement d'insertion, faible consommation de puissance, programmable
Antenne	Volume très réduit Capacité de commutation (multibande) Risque lié aux ondes électromagnétiques réduit au minimum
Module d'entrée	Volume réduit par cinq grâce à l'intégration sur une seule puce des circuits intégrés RF et des composants MEMS passifs Facilité de recherche d'un plan permettant de réduire les brouillages causés par des activités multifréquences Coûts réduits (boîtier simple puce) Solution très efficace pour les systèmes postérieurs aux IMT-2000 fondés sur la technique SDR

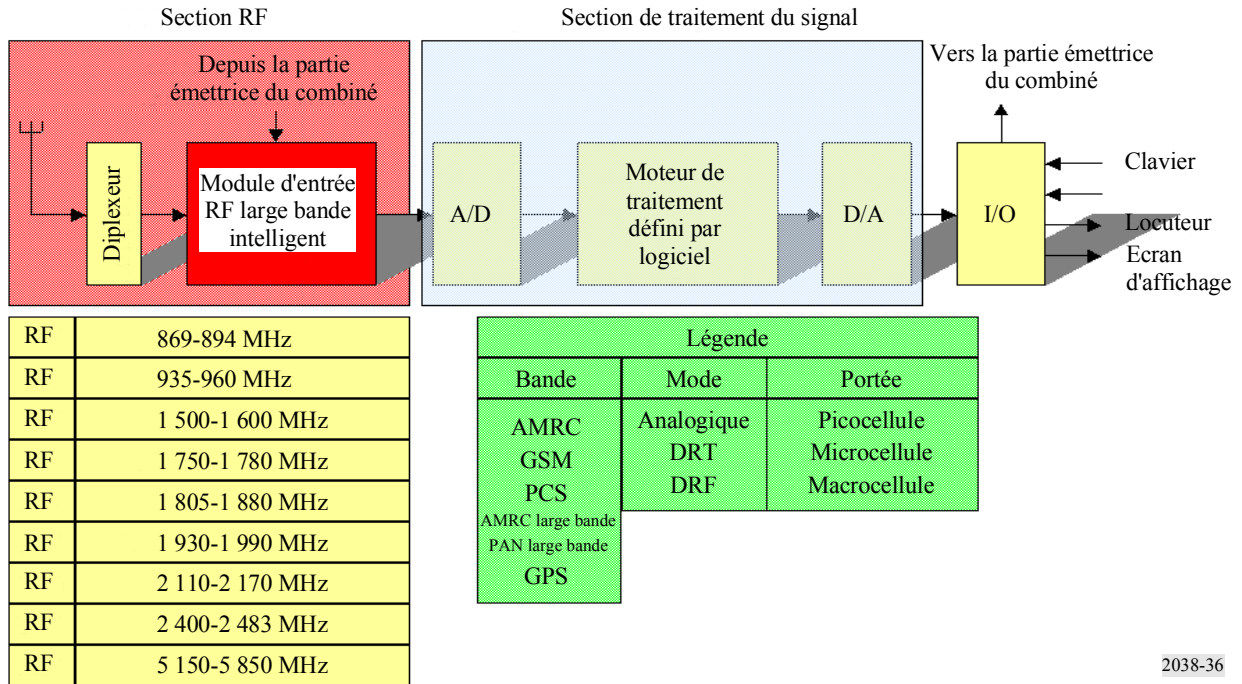
2 Nouvelle solution RF avec la technique SDR

Les terminaux postérieurs aux IMT-2000 fondés sur la technique SDR ont besoin d'un module RF multinorme plus complexe, utilisable dans les systèmes multinormes (GSM, DCS1800, PCS, PAN large bande de type DRT et AMRC, PCS, IMT-2000 de type DRF, etc.). La technique MEMS RF serait intéressante pour les terminaux multinormes.

La Fig. 36 montre le schéma d'un système SDR de base. Si ce système contient uniquement des composants existants, plusieurs modules RF seront nécessaires, entraînant un volume énorme, un poids important et un prix élevé. En revanche, des composants MEMS (amplificateur à faible bruit programmable, filtre réglable, commutateur programmable, etc.) permettent d'élaborer simplement un produit concurrentiel petit et léger qui pourra aussi être intégré dans les futurs terminaux et qui constituera une solution RF pour les futurs systèmes mobiles hertziens.

FIGURE 36

Schéma du système multibande/multinorme

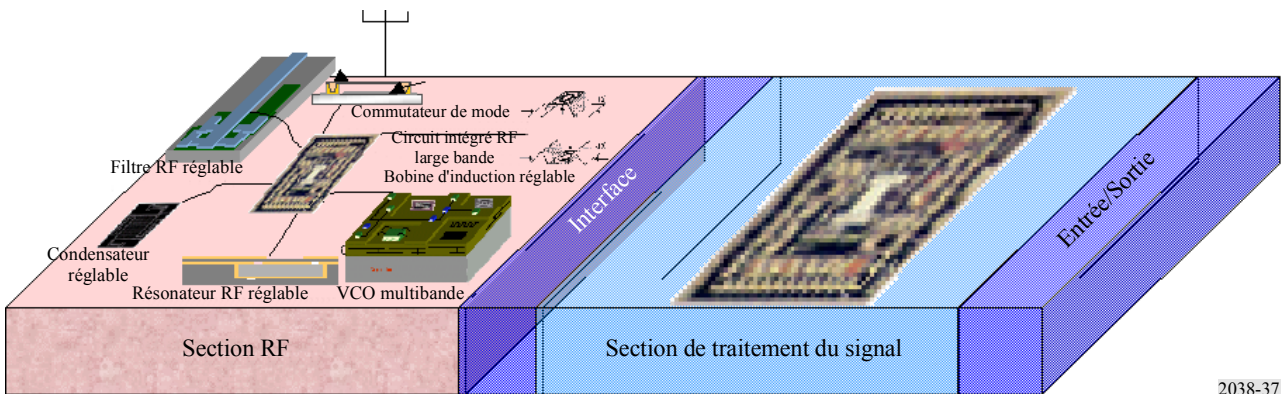


2038-36

La Fig. 37 montre un futur concept de terminal, fondé sur un boîtier simple puce, combinant la section RF avec la section de traitement du signal. Avec les technologies existantes, ce concept de terminal ne peut pas être concrétisé. En revanche, lorsqu'on pourra avoir un module RF multibande fondé sur la technologie MEMS RF, il sera possible d'élaborer un module RF avec la technique SDR comme indiqué sur la Fig. 37 (section RF). Qui plus est, on pourra réaliser un futur terminal sur un boîtier simple puce.

FIGURE 37

Futur concept de terminal avec la nouvelle solution RF



2038-37

Annexe 13

Nouvelles interfaces d'utilisateur novatrices pour les futurs terminaux hertziens multimédias

Un exemple de nouvelle interface d'utilisateur novatrice:

GKOS – le clavier mondial optimisé pour les petits terminaux hertziens (*global keyboard optimized for small wireless terminals*)

1 La nouvelle génération de terminaux

La bonne ou mauvaise expérience qu'un utilisateur fait avec une nouvelle technique de télécommunication dépend des services offerts ainsi que de la facilité d'utilisation, de la conception et de la qualité des terminaux. L'ordinateur vêtement fait l'objet de nombreuses études dans les universités du monde entier, conduisant à de nouvelles représentations des interfaces homme-machine qui s'appliquent aussi aux terminaux mobiles.

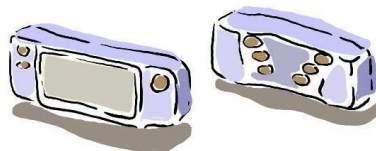
La messagerie textuelle est la principale application de données actuelle et la messagerie multimédia, y compris textuelle, devrait être la prochaine. L'écran doit être suffisamment grand pour pouvoir afficher des images et des vidéos de bonne qualité. Il est difficile de combiner un clavier et un écran suffisamment grand sur un petit terminal compact. Toutefois, cette combinaison est obligatoire du point de vue de la facilité d'utilisation. Il convient par ailleurs de faire en sorte que la saisie de texte sur les portables puisse être plus rapide.

La plupart des solutions proposées jusqu'à maintenant pour la saisie de texte ne font pas l'objet de normes ouvertes mais sont des méthodes hors norme (y compris des méthodes reposant sur des droits de propriété intellectuelle). Les claviers physiques proposés ont tendance à comporter davantage de fonctionnalités et/ou de boutons que le clavier de numérotation classique alors qu'il conviendrait plutôt d'essayer de réduire le nombre de touches afin de réduire au minimum l'espace requis.

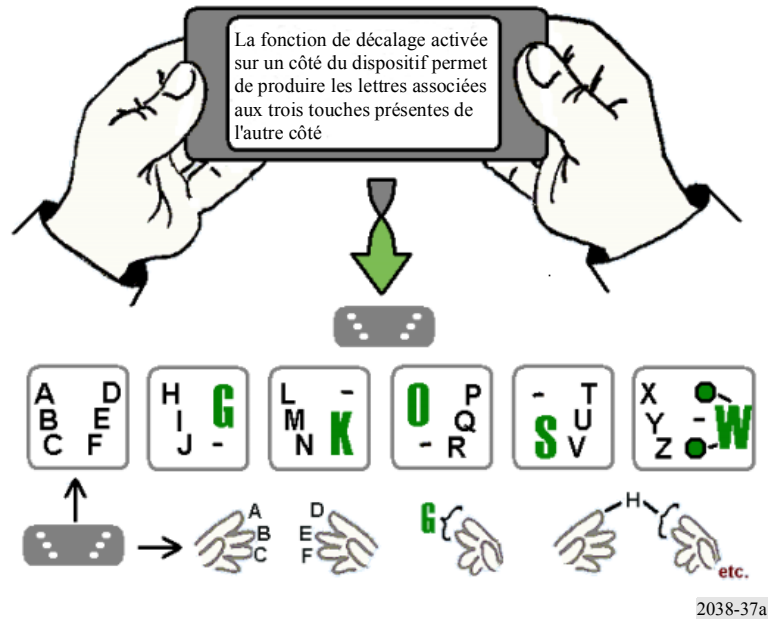
Par ailleurs, il est nécessaire d'harmoniser les normes ouvertes relatives aux interfaces dans ce domaine et de recommander l'utilisation de normes communes. En effet, si un utilisateur s'habitue à un type de clavier et devient un utilisateur fidèle et habile de ce clavier, il sera frustré si son téléphone suivant – qu'il s'agisse d'une nouvelle version ou d'un téléphone d'une autre marque – a une interface d'utilisateur différente ou légèrement différente, auquel cas il devra repasser par un stade d'apprentissage. La norme ouverte relative au clavier GKOS, décrite ci-dessous, apporte une solution aux problèmes qui viennent d'être exposés.

2 Touches à l'arrière – le clavier GKOS

Le clavier GKOS est constitué de six touches situées à l'arrière du terminal de l'utilisateur afin de laisser la face avant disponible pour l'écran d'affichage, de permettre une saisie rapide de texte et d'assurer toutes les fonctions présentes sur un clavier de PC de type QWERTY. Il est conçu pour les tout petits terminaux hertziens des IMT-2000 et des systèmes postérieurs mais peut également être utilisé dans de nombreuses autres applications (par exemple une télécommande PC complète). Il fait l'objet d'une norme ouverte, qui a été publiée pour la première fois le 5 octobre 2000. Pour plus de détails, on se reportera à l'adresse suivante: <http://gkos.com/>.



3 Comment se servir du GKOS



Comme décrit sur la Fig. ci-dessus, pour les lettres (et les chiffres), il suffit d'appuyer simultanément sur deux touches au maximum par main. Chaque fois qu'une main appuie sur deux touches (par exemple D+E), l'autre main appuie sur une seule touche (par exemple pour obtenir le «H») ou n'appuie sur aucune touche (ce qui donne alors le «G»). Les lettres de A à F correspondent chacune à une seule touche.

Espace: appuyer sur la «barre de droite» du GKOS, à savoir sur les 3 touches du côté droit.

Retour arrière: appuyer sur la «barre de gauche» du GKOS, à savoir sur les 3 touches du côté gauche.

Il est noté que les instructions ci-dessus suffisent pour la saisie de messages textuels simples. Le jeu de caractères complet est présenté ci-dessous, y compris tous les caractères d'un clavier de PC de type QWERTY:

Numérotation

1	4	7	+	0
2	5	8	Ⓜ	
3	6	9	*	#

Jeu de caractères du GKOS

Les zones en jaune sur la Fig. représentent deux touches sur lesquelles il faut appuyer simultanément pour obtenir le caractère correspondant, ou pour s'en servir comme fonction de décalage pour obtenir les trois autres caractères du groupe. Un groupe de caractères est réservé pour les lettres nationales.

Le principe de base est que, pour les caractères fréquemment utilisés, il suffit d'appuyer sur 1 à 3 touches simultanément alors que pour les fonctions, il faut appuyer sur davantage de touches. De cette façon, la frappe est plus aisée et on ne risque pas d'activer une fonction par erreur si on tape négligemment. Le changement de mode 123-ABC permet de faire une commutation entre les deux jeux de caractères présentés ci-dessus. La fonction SYMB permet de prendre des caractères uniques dans le jeu parallèle. Le point virgule est par exemple donné par SYMB + point. Deux SHIFT consécutifs activent la fonction de mise en majuscules et un seul SHIFT a un effet sur un seul caractère. Dans un souci de clarté, les chiffres sont représentés ici deux fois («Numérotation» ci-dessus). On prendra note de la forme suggestive des caractères de commande et du fait que les caractères en bleu destinés à la navigation, au défilement et au déplacement du curseur vont de soi.

4 Caractéristiques du GKOS

4.1 Avantages et inconvénients

Fondamentalement, le GKOS est un clavier par accords (clavier par combinaisons) mais comme il est réparti entre deux mains, le nombre de combinaisons différentes de touches enfoncées simultanément pour chaque main est très petit (3 accords pour les lettres et les chiffres, 4 au total, contre plus de 50 accords pour les claviers par accords classiques). Par ailleurs, comme ces accords sont extrêmement simples (par exemple appuyer simplement sur deux touches adjacentes), aucune habileté physique particulière n'est requise.

Pour pouvoir utiliser le clavier GKOS, il faut ses deux mains, comme c'est par exemple le cas aussi avec les assistants numériques personnels (PDA) avec stylet ou clavier QWERTY. On peut considérer qu'il s'agit d'un inconvénient du GKOS. En outre, le GKOS nécessite un certain temps d'apprentissage car la méthode de frappe est complètement nouvelle. Mais la liste des avantages est longue:

1. le clavier ne prend pas de place sur la face avant ni sur la zone d'affichage;
2. il est peu onéreux et facile à intégrer sur un petit terminal (seules 6 touches sont nécessaires);
3. la norme relative au clavier est une norme ouverte, que tout le monde peut utiliser gratuitement, éventuellement à d'autres fins;
4. le même matériel est adapté à la plupart des langues;
5. le clavier est suffisamment accessible aux débutants (si on le souhaite, on peut commencer avec un clavier virtuel à l'écran);
6. la vitesse de frappe peut être élevée (utilisateur expérimenté: 30 à 45 mots/min, expert: 45 à 60 mots/min);
7. le clavier ne nécessite pas la pleine attention de l'utilisateur (pas de table de caractères à regarder en permanence etc., peu d'efforts visuels);
8. il peut être utilisé également dans le noir ou les yeux fermés;
9. l'éclairage des touches n'est pas nécessaire (faible consommation de puissance du terminal);

10. en plus de la saisie de texte, le clavier inclut toutes les fonctions d'un clavier de PC de type QWERTY;
11. il peut être utilisé pour commander toutes les fonctions d'un téléphone mobile;
12. il fonctionne comme une entité de commande de jeux (voire comme une commande de pointeur dans certaines applications);
13. il offre des fonctions aisées de numérotation;
14. le défilement de l'affichage et le choix de menu sont faciles;
15. pour utiliser le clavier, il n'est pas nécessaire d'avoir un bureau ou une table mais le dispositif peut aussi être utilisé sur un bureau;
16. c'est un matériel entièrement intégré, qui ne nécessite pas d'outils distincts (mais il est facile de le combiner, par exemple avec un stylet);
17. il peut être combiné de manière transparente avec une souris ou un autre dispositif de pointage;
18. ceux qui le souhaitent peuvent l'utiliser comme un clavier de PC hertzien (ceux qui préfèrent la nouvelle méthode);
19. le clavier ne nécessite pas d'habileté physique particulière (combinaisons/accords triviaux pour chaque main);
20. les droitiers et les gauchers sont traités de la même façon (le matériel et le logiciel sont identiques pour les deux);
21. le clavier n'augmente pas nécessairement la taille physique du dispositif mobile;
22. l'habileté requise pour le GKOS n'interfère pas avec l'habileté requise pour un clavier QWERTY (les deux claviers sont suffisamment différents);
23. il est facile de combiner le clavier GKOS et un écran large sur un même terminal;
24. le principe de mise en correspondance des caractères du GKOS permet d'avoir un clavier virtuel compact sur l'écran d'affichage, que l'on peut utiliser avec un stylet ou avec les 6 touches situées à l'arrière.

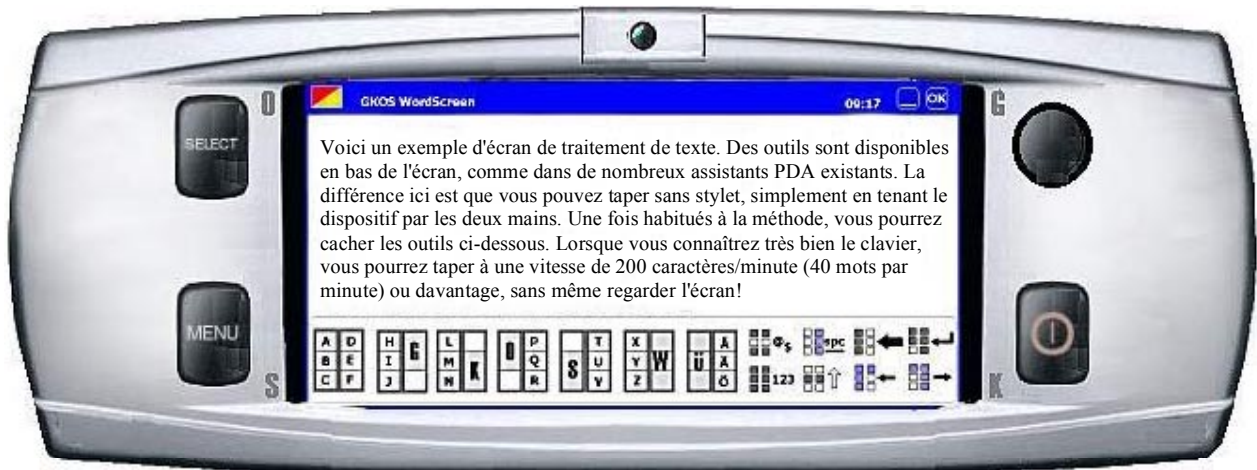
4.2 Vitesse de frappe sur le GKOS

Après un court entraînement, on obtient une vitesse de frappe supérieure à celle que l'on obtient sur le clavier numérique GSM (saisie de texte normale). Il est relativement facile d'atteindre une vitesse de frappe de 100 caractères/min (20 mots/min). Pour les personnes bien habituées au clavier, la vitesse de frappe est de 200 caractères/min (40 mots/min). Pour les experts, elle peut avoisiner les 300 caractères/min (60 mots/min). Elle dépend naturellement de l'implémentation physique du clavier et du type de touches (souples ou dures, etc.).

Un utilisateur GKOS expérimenté peut avoir une vitesse de frappe beaucoup plus élevée que s'il procède à une saisie de texte normale ou s'il écrit à la main. Par conséquent, il peut par exemple pendre des notes à une réunion, tout en étant capable de regarder autre chose que seulement son terminal.

4.3 Exemples d'implémentation du GKOS

Les dimensions du clavier GKOS dépendent de la forme, de la taille et du poids du terminal. Dans tous les cas, six touches sont présentes à l'arrière de l'équipement: trois pour la main gauche et trois pour la main droite. Les auriculaires ne servent que pour faciliter la préhension du terminal et les pouces sont maintenus sur les côtés de la face avant pour gérer le dispositif de pointage.



2038-37c

Le pouce gauche peut appuyer sur les touches correspondant aux touches de gauche et de droite de la souris (la touche supérieure «select» et la touche inférieure «menu») et le pouce droit permet alors de déplacer le pointeur. De cette façon, on peut commander entièrement les fonctions de la souris et du clavier, en gardant toujours les doigts à la même position. On peut cacher le clavier virtuel situé dans la partie inférieure de l'écran lorsqu'on commence à bien connaître la méthode.

Le tout petit dispositif mobile ci-dessous a un clavier GKOS dépliant qui peut être utilisé lorsque l'on tient le terminal ou lorsque le terminal est posé sur un bureau (clavier déplié et écran face à l'utilisateur).



Annexe 14

Processeurs reconfigurables

1 Contexte

Ces dernières années, des processeurs intégrés d'un nouveau type ont été développés. Leur principale caractéristique est que l'amélioration de leur performance ne découle pas simplement de l'augmentation de la vitesse d'horloge ou du volume de la mémoire, mais de la capacité de mettre en oeuvre un conduit personnalisé permettant de définir et d'exécuter des instructions personnalisées sur la base de ce qui est requis pour l'application considérée.

Il existe deux types d'approche pour mettre en oeuvre des instructions personnalisées d'utilisateur: par processeur configurable ou par processeur reconfigurable.

Les processeurs configurables sont susceptibles d'entraîner de bonnes performances car ils permettent de créer des instructions personnalisées et leurs unités d'exécution sont optimisées pour chaque application. Toutefois, on ne peut pas ajouter de nouvelles instructions personnalisées aux processeurs configurables après leur fabrication. Dans les systèmes de communication hertziens, les spécifications de système sont souvent modifiées ou varient légèrement d'un pays à l'autre. Il est donc nécessaire de disposer de processeurs qui peuvent mettre en oeuvre une grande variété d'instructions et auxquels on peut ajouter de nouvelles instructions personnalisées après leur fabrication et ce, pour pouvoir s'adapter aux diverses situations.

La deuxième approche permet de répondre à cette exigence. Les processeurs reconfigurables incluent des réseaux d'unités arithmétiques et logiques (ALU, *arithmetic-and-logic unit*) et d'autres unités opérationnelles. Dans ces processeurs, la configuration de connexion des unités d'exécution peut être modifiée afin de s'adapter au flux de traitement de données requis pour l'application considérée. La quantité d'informations de configuration requises est faible car, à la différence des réseaux de portes programmables par l'utilisateur (FPGA, *field programmable gate-array*), le circuit inclus dans le processeur n'est pas de faible granularité. Autrement dit, il est possible d'avoir plusieurs ensembles d'informations de configuration sur puce et de choisir dynamiquement l'un de ces ensembles à chaque cycle d'horloge. Ces processeurs reconfigurables seraient extrêmement rapides si les séquences de traitement pouvaient être projetées sur le réseau des unités d'exécution.

La présente Annexe contient l'exemple d'un processeur intégré fondé sur l'architecture VLIW [Suga et autres, 2000; Okano et autres, 2002]. Ce processeur, qui est conçu pour des applications médias, met en oeuvre des instructions d'opération sur les médias de type instruction unique, données multiples (SIMD). Il peut donc procéder à un traitement rapide des médias. L'unité d'exécution reconfigurable est telle que le processeur polyvalent peut traiter des instructions personnalisées définies par l'utilisateur. L'unité reconfigurable n'est pas de type réseau ALU. Le traitement des données étant opéré au niveau des bits, l'unité reconfigurable permet d'améliorer la performance du processeur avec un préfixe court.

La présente Annexe porte notamment sur les caractéristiques, les fonctions et la performance de l'unité reconfigurable conçue pour le processeur polyvalent donné comme exemple de processeur reconfigurable.

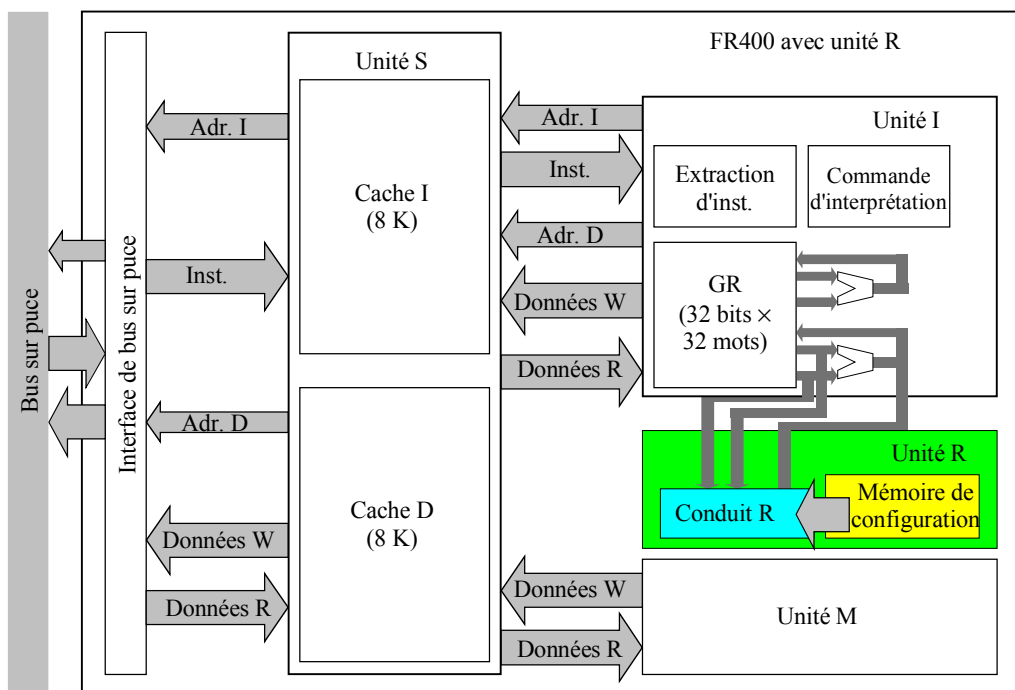
2 Architecture du processeur

2.1 Structure d'ensemble

La Fig. 38 donne un exemple de processeur reconfigurable incluant l'unité reconfigurable (unité R). L'unité de type entier (unité I) comprend un bloc d'extraction des instructions, diverses entités de commande, un registre d'entiers (GR: 32 bits \times 32 mots) et deux conduits d'entiers. L'unité de type média (unité M) comprend un registre de médias (FR: 32 bits \times 32 mots) et deux conduits de médias. L'unité de type cache (unité S) contient deux mémoires caches de 8 K – l'une pour les instructions et l'autre pour les données – pouvant être combinées dans les deux sens sur la base d'ensembles.

FIGURE 38

Schéma fonctionnel d'un processeur reconfigurable incluant une unité R



2038-38

L'unité R comprend un conduit d'exécution (conduit R), qui peut modifier dynamiquement la configuration interne sur la base de signaux d'information de configuration et de la mémoire de configuration, dans laquelle sont enregistrées les informations de configuration. Une configuration au sein du conduit R est définie par 256 bits d'information. La mémoire de configuration est une mémoire RAM de 1 K avec 32 éléments. Elle peut contenir des informations de configuration correspondant à 32 types d'instructions personnalisées. Les données présentes dans la mémoire de configuration peuvent être écrasées à l'aide d'une instruction de chargement de configuration. Il est donc possible de définir et d'exécuter plus de 32 instructions personnalisées.

Ce type de processeur polyvalent inclut un ensemble d'instructions puissantes pour l'opération sur les médias. Le traitement des instructions personnalisées opéré dans l'unité R ne vise donc pas à augmenter davantage la vitesse de traitement des médias, mais à améliorer l'efficacité du traitement pour lequel ce type de processeur polyvalent présente des faiblesses. Plus précisément, ce type de processeur polyvalent est efficace pour le traitement des données au niveau des mots, mais il l'est

moins pour le traitement des données au niveau des bits (par exemple le traitement lié au chiffrement). L'unité R est conçue pour exécuter plus efficacement le traitement des données au niveau des bits.

2.2 Instructions personnalisées

Les ensembles d'instructions utilisés dans les processeurs de la série FR-V attribuent certains codes d'instruction pour les instructions personnalisées, ce qui permet aux utilisateurs de définir des instructions personnalisées. Grâce à ces codes d'instruction, quatre types d'instructions, CONFIGLOAD, EXEC, LUT et RSRMOD, sont définis.

CONFIGLOAD charge les informations de configuration dans la mémoire de configuration. Lorsque le traducteur d'instructions incorporé dans l'unité I détecte que l'instruction suivante provenant du bloc d'extraction d'instructions est CONFIGLOAD, il convertit l'instruction en quatre instructions de chargement de deux mots (instructions de chargement de 8 octets) et les transmet au bloc d'exécution. Les données transférées à partir de la mémoire cache ne sont pas placées dans le registre, mais dans la mémoire de configuration. Le chargement des informations de configuration dans la mémoire de configuration est alors accompli.

EXEC exécute les instructions personnalisées. Afin de garantir qu'aucune restriction n'est imposée aux types d'instructions personnalisées qui peuvent être définis, on n'attribue pas de codes d'opération sous forme de combinaisons fixes aux instructions personnalisées. Le code d'opération inclut un champ dans lequel on peut spécifier un élément de la mémoire de configuration. EXEC exécute l'instruction personnalisée qui est stockée dans l'élément spécifié par ce champ. Autrement dit, si deux instructions personnalisées sont représentées par le même code d'opération, mais si les éléments de la mémoire de configuration qui leur sont associés contiennent des informations différentes, ces deux instructions sont exécutées comme deux instructions personnalisées différentes.

L'instruction LUT spécifie que les informations issues de la mémoire de configuration ne doivent pas être utilisées pour définir la configuration du conduit R, mais comme mémoire de table. Les 2^n ($n = 1, 2, 3$) bits de données stockés dans le registre GR spécifiés par le code d'opération sont remplacés par les 2^n bits inclus dans les 256 bits d'informations de configuration.

RSRMOD opère sur les registres spéciaux (SPR, *special-purpose register*) RSR0 et RSR1 qui ont été nouvellement prévus pour l'unité R.

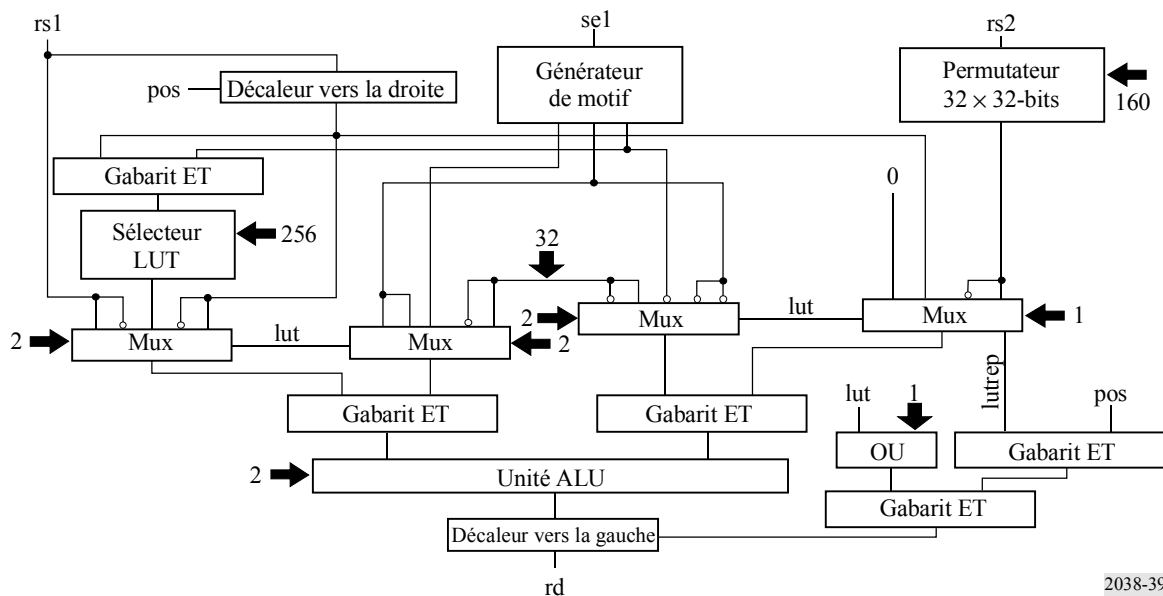
Si des instructions personnalisées différentes sont définies alors que le traitement qui leur est associé est pratiquement le même mais que seules certaines grandeurs varient (par exemple des décalages différents), une certaine zone de la mémoire de configuration est gaspillée. Pour éviter ce gaspillage, on procède comme suit. Les informations de paramètre, figurant dans les champs «sel» et «pos», sont obtenues auprès des registres spéciaux. En conséquence, lorsque la même instruction personnalisée comprend certaines informations de paramètre à un moment donné et d'autres informations à un autre moment, elle sera exécutée sous la forme d'instructions différentes aux deux moments. Ainsi, on améliore l'efficacité d'utilisation de la mémoire de configuration.

L'instruction RSRMOD peut servir à fixer les valeurs des champs «sel» et «pos» du registre RSR. Toutefois, une fonction de mise à jour automatique est également prévue et peut être utilisée lorsqu'il faut mettre à jour régulièrement les valeurs de ces champs. Elle supprime la nécessité de fixer les valeurs chaque fois à l'aide de l'instruction RSRMOD.

2.3 Structure de l'unité reconfigurable

La Fig. 39 montre la structure du conduit R. Les flèches en gras sur la Fig. 39 indiquent les informations de configuration. Le permutateur présenté en haut et à droite est un bloc qui permute les 32 bits de données d'entrée d'une façon spécifiée. Le générateur de motif présenté en haut et au centre génère des données de gabarit. En réalité, il peut générer trois types de données de gabarit en fonction du signal «sel». Le sélecteur LUT est un composant qui extrait des données lorsque l'instruction LUT utilise les informations de configuration comme table. Les autres composants du conduit R sont notamment les suivants: décaleurs, multiplexeurs, gabarits ET, unités ALU, etc. La structure interne de ces composants et la relation de connexion entre eux sont définies par les informations de configuration. Une configuration est définie par 256 bits.

FIGURE 39
Structure interne du conduit R



2038-39

Des exemples de définition d'instructions personnalisées sont donnés plus loin.

3 Amélioration de la performance de l'application DES

L'amélioration de performance a été évaluée dans le cas de la réalisation d'applications complètes avec ce processeur. Les applications utilisées étaient DES et triple DES, qui sont des algorithmes de chiffrement couramment utilisés.

DES est un algorithme de chiffrement par blocs, qui chiffre 64 bits de données d'entrée et produit 64 bits de données chiffrées. La procédure de chiffrement commence avec une permutation initiale, IP, au cours de laquelle les 64 bits de données d'entrée sont permutés. L'étape suivante, appelée fonction F, est répétée 16 fois. Enfin, la permutation inverse IP^{-1} est appliquée pour permuter les bits à nouveau. Le chiffrement est alors complet.

Triple DES est un algorithme de chiffrement dans lequel l'algorithme DES est exécuté trois fois.

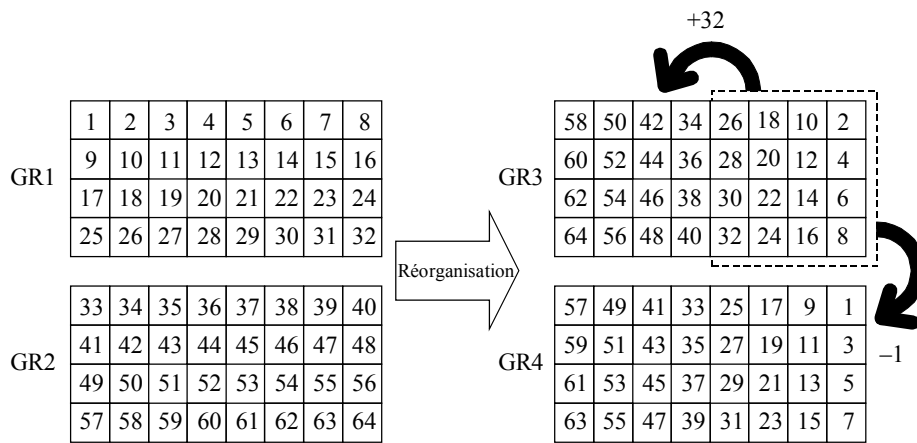
3.1 Permutation initiale

Le présent paragraphe explique comment mettre en oeuvre l'instruction personnalisée qui accomplit la permutation initiale.

La permutation initiale doit réaliser l'échange des bits présenté sur la Fig. 40. Les 64 bits de données d'entrée sont stockés dans les registres GR1 et GR2. Les données chiffrées sont supposées être stockées dans les registres GR3 et GR4. L'échange des bits semble aléatoire. Mais en réalité, les quatre morceaux de 16 bits suivent le même motif d'échange. Prenons le morceau de 16 bits de droite du registre GR3. Chaque bit du morceau de 16 bits de gauche du registre GR3 est décalé de 32 bits par rapport à chaque bit du morceau de 16 bits de droite. De même, chaque bit du morceau de 16 bits de droite du registre GR4 est décalé de 1 bit par rapport à chaque bit du morceau de 16 bits de droite du registre GR3. Chaque bit du morceau de 16 bits de gauche du registre GR4 est décalé de 1 bit par rapport à chaque bit du morceau de 16 bits de droite.

FIGURE 40

Echange des bits dans l'étape de permutation initiale

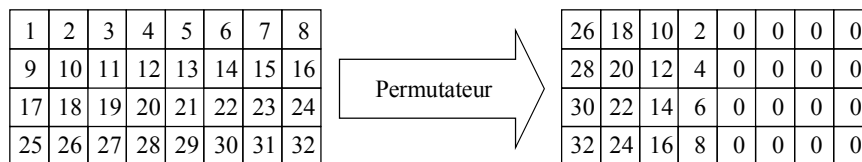


2038-40

Par conséquent, si le permutateur du conduit R est conçu pour échanger les bits comme indiqué sur la Fig. 41, une seule instruction personnalisée de permutation initiale peut être utilisée pour toute permutation initiale sous réserve qu'elle soit combinée à une instruction de décalage appropriée.

FIGURE 41

Permutateur utilisé pour l'instruction personnalisée de permutation initiale



2038-41

Plus précisément, le conduit R est configuré comme indiqué sur la Fig. 42. L'entrée issue du premier opérande, rs1, est décalée vers la droite de 4 bits par le décaleur vers la droite puis elle est soumise à l'opération ET 0xf0f0f0f0. L'entrée issue du deuxième opérande, rs2, est injectée dans le permutateur, qui procède à la permutation binaire présentée sur la Fig. 41, puis elle est soumise à l'opération ET 0x0f0f0f0f. Le résultat de l'opération OU appliquée aux sorties des deux portes ET constitue le résultat de l'opération.

Une simulation de niveau de transfert de registre (RTL, *register transfer level*) du traitement triple DES montre que le traitement est accéléré par un facteur six en cas d'utilisation de l'unité R par rapport au cas où l'unité R n'est pas utilisée.

Dans le cadre de la méthode présentée ci-dessus, des instructions personnalisées sont définies pour exécuter un traitement qui nécessiterait la combinaison d'un grand nombre d'instructions si l'unité R n'était pas utilisée. Autrement dit, le nombre d'instructions requises est réduit et le code des instructions est donc beaucoup plus court. Dans le cas du traitement triple DES, la taille du code de programme avec utilisation de l'unité R vaut moins de la moitié de la taille du code de programme sans utilisation de l'unité R.

4 Application au traitement numérique en bande de base

La version de l'unité R décrite ici est conçue pour accélérer le traitement binaire. Comme le traitement numérique en bande de base exige de nombreuses manipulations binaires, il semble que cette unité R sera aussi efficace pour ce type de traitement.

A titre d'exemple, dans le traitement en bande de base Bluetooth, la correction d'erreur est fondée sur une répétition binaire avec un taux de codage de 1/3 ou sur un code de Hamming raccourci (15,10) avec un taux de codage de 2/3. La première méthode consiste simplement à transmettre le même bit trois fois de suite. Si le permutateur de l'unité R est utilisé, les données envoyées sont créées efficacement. La vitesse devrait être de 20 à 30 fois plus élevée par rapport au cas où l'unité R n'est pas utilisée. Dans la deuxième méthode, la vitesse peut être environ quatre fois plus élevée si un traitement par registre à décalage avec retour linéaire (LFSR, *linear feedback shift register*) peut être exécuté. Une vitesse environ trois fois plus élevée sera également possible pour le traitement CRC, l'embrouillage et d'autres traitements.

Par ailleurs, ce processeur reconfigurable s'applique aux systèmes 3G et aux systèmes postérieurs aux IMT-2000, car ces systèmes nécessitent de nombreux traitements de données au niveau des bits.

5 Conclusion

L'unité reconfigurable décrite dans ce Rapport est conçue tout particulièrement pour des traitements pour lesquels les processeurs polyvalents présentent des faiblesses et elle est compacte en ce sens qu'elle comprend une mémoire de 1 koctets et un circuit logique constitué d'environ 20 000 portes. Par rapport à un processeur polyvalent, elle ne représente pas plus de 5% de l'ensemble. L'unité reconfigurable permet d'obtenir une grande amélioration de la performance pour les applications qui nécessitent une opération au niveau des bits (chiffrement par exemple), même si le préfixe de circuit est très court.

6 Références bibliographiques

OKANO, H. et autres [février 2002] An 8-Way VLIW Embedded Multimedia Processor Built in 7-Layer Metal 0.11um CMOS Technology. IEEE International Solid-State Circuits Conference.

SUGA, A. et autres [février 2000] A 4-Way VLIW Embedded Multimedia Processor. IEEE International Solid-State Circuits Conference.

Annexe 15

Réseaux radioélectriques multibonds

1 Introduction

Dans le cadre de l'évolution possible des IMT-2000 et des systèmes postérieurs, une forte augmentation des débits de données permettrait de fournir une grande variété de services et d'applications avec différents degrés de qualité de service. Mais pour pouvoir offrir des débits de transmission élevés, il faut une grande largeur de bande, qui n'est probablement disponible qu'aux fréquences élevées, d'où un rétrécissement de la zone de couverture des stations de base. Au lieu de mettre en place de nombreuses stations de base pour couvrir toute une zone donnée, il vaudrait mieux élargir la zone de couverture des stations de base au moyen de techniques de relais hertzien. Un réseau radioélectrique utilisant une fonctionnalité de relais hertzien est appelé réseau radioélectrique multibond. Il permet d'offrir des services de données à haut débit et une certaine souplesse dans des systèmes d'accès hertzien aussi divers que les systèmes cellulaires actuels améliorés, les systèmes postérieurs aux IMT-2000 et les systèmes hertziens non cellulaires (par exemple, réseau local hertzien et Bluetooth). Du point de vue des utilisateurs mobiles, ceux-ci bénéficieraient d'un environnement de communication universel et de communications voix/données non déconnectées. Un opérateur de réseau cellulaire ferait des économies en termes de coûts d'exploitation et de ressources hertziennes.

La fonctionnalité de relais hertzien nécessaire dans les réseaux radioélectriques multibonds peut être assurée soit par d'autres terminaux d'utilisateur – cette technique est utilisée dans les «réseaux multibonds ad hoc» – soit par des points d'extension fixes – cette technique est utilisée dans les «réseaux multibonds structurés».

Pour pouvoir réaliser un réseau hertzien multibond, il faut définir et implémenter d'autres éléments d'architecture et d'autres technologies, qui sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

2 Aspects techniques des techniques multibonds

La mise en oeuvre de techniques multibonds a une incidence sur différents aspects des systèmes:

a) *Techniques utilisées dans la couche physique:*

Comme la largeur de bande pour chaque canal est supposée être élevée, on suppose que les répéteurs considérés utilisent une seule fréquence. La méthode duplex utilisée doit assurer un fort isolement entre le trajet d'émission et le trajet de réception au niveau des points d'extension (EP, *extension point*) et des terminaux relais. La technique DRT semble être la méthode de duplexage la mieux adaptée pour faire face aux limitations causées par les restrictions de largeur de bande et par l'isolement requis.

b) *Techniques utilisées dans la couche MAC:*

La couche MAC contrôle la couche physique ainsi que l'établissement et la libération de trajets de transmission entre les terminaux mobiles, les points d'extension et les points d'accès (AP, *access point*). Elle contrôle en particulier la méthode duplex utilisée par la couche physique.

c) *Routage:*

Le routage des données entre les terminaux mobiles (MT, *mobile terminal*), les points d'extension et les points d'accès est une fonctionnalité essentielle dans les réseaux multibonds. Il comporte deux fonctions principales:

- choix des routes pour le couple origine – destination (MT-AP via des EP/MT);
- acheminement des messages vers leur destination correcte si une route devient indisponible sans perte de qualité de service.

Différentes techniques de routage peuvent être utilisées pour remplir ces fonctions. Elles peuvent être classées suivant la méthode de commande (routage centralisé ou réparti), le comportement dynamique (routage statique ou adaptatif) et le type d'informations sur lequel elles sont fondées (routage réactif ou proactif).

d) *Gestion des ressources radioélectriques:*

La gestion des ressources radioélectriques comprend des fonctions telles que le transfert, la commande de puissance, la gestion des encombrements, la programmation des paquets de données, etc. Une situation typique pour un terminal dans un réseau radioélectrique multibond est lorsque le terminal est hors de portée d'une station de base. Outre le fait que la signalisation des messages de commande sur plusieurs bonds est toujours sous le contrôle d'une station de base, il semble possible d'envisager une gestion répartie des ressources radioélectriques dans laquelle les tâches de gestion des ressources radioélectriques sont gérées de manière auto-organisée. Une autre solution qui peut apporter une aide efficace consiste à utiliser un réseau superposé, par exemple un réseau cellulaire existant bande étroite de longue portée auquel cas on a une structure de réseau hiérarchique. Le réseau superposé peut par exemple déterminer la bande de fréquences à utiliser, fixer la durée pendant laquelle une station est autorisée à occuper la fréquence attribuée et gérer la commande de flux et de paramètres de connexion et d'utilisation.

3 Architectures de réseau hertzien multibond

3.1 Réseaux hertziens multibonds ad hoc

La Fig. 43 illustre une architecture possible de réseau hertzien multibond ad hoc employant un système cellulaire et un système de réseau local hertzien comme réseau non cellulaire.

Dans un réseau classique et un réseau actuel, un terminal hertzien est directement raccordé à une station de base. Toutefois, dans le réseau multibond ad hoc, certains terminaux hertziens ne peuvent être raccordés à une station de base en raison d'un niveau de réception insuffisant et d'une occupation des canaux par d'autres terminaux. Dans ce cas, des terminaux voisins relaient le trafic de données de ce terminal d'utilisateur vers la station de base.

3.2 Réseau hertzien multibond structuré

La Fig. 44 illustre une architecture possible de réseau radioélectrique multibond structuré pouvant employer un système cellulaire et un système de RLAN comme réseau non cellulaire.

En raison de la zone de couverture restreinte des points d'accès, des points d'extension sont établis dans la zone de couverture cible. Ils sont raccordés à un point d'accès soit directement soit par l'intermédiaire d'autres points d'extension, au moyen de liaisons radioélectriques. Ils possèdent une fonctionnalité de relais qui leur permet de retransmettre les données/signaux en provenance ou à destination de terminaux mobiles, de points d'accès ou d'autres points d'extension. Les réseaux radioélectriques multibonds structurés peuvent utiliser la même technologie radioélectrique pour la

transmission de point d'extension à point d'extension et de point d'extension à point d'accès que celle qu'ils utilisent pour la transmission de terminal mobile à point d'accès (réseau multibond homogène). Une autre solution consiste à utiliser des technologies radioélectriques différentes d'une part pour la transmission de terminal mobile à point d'accès et d'autre part pour la transmission de point d'extension à point d'extension et de point d'extension à point d'accès.

FIGURE 43

Exemple d'architecture de réseau hertzien multibond ad hoc

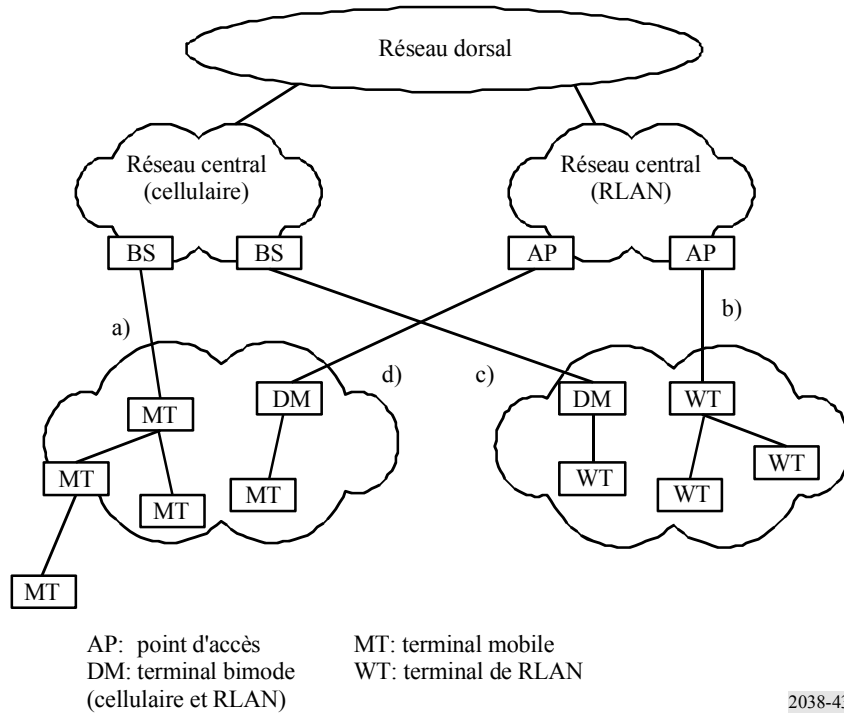
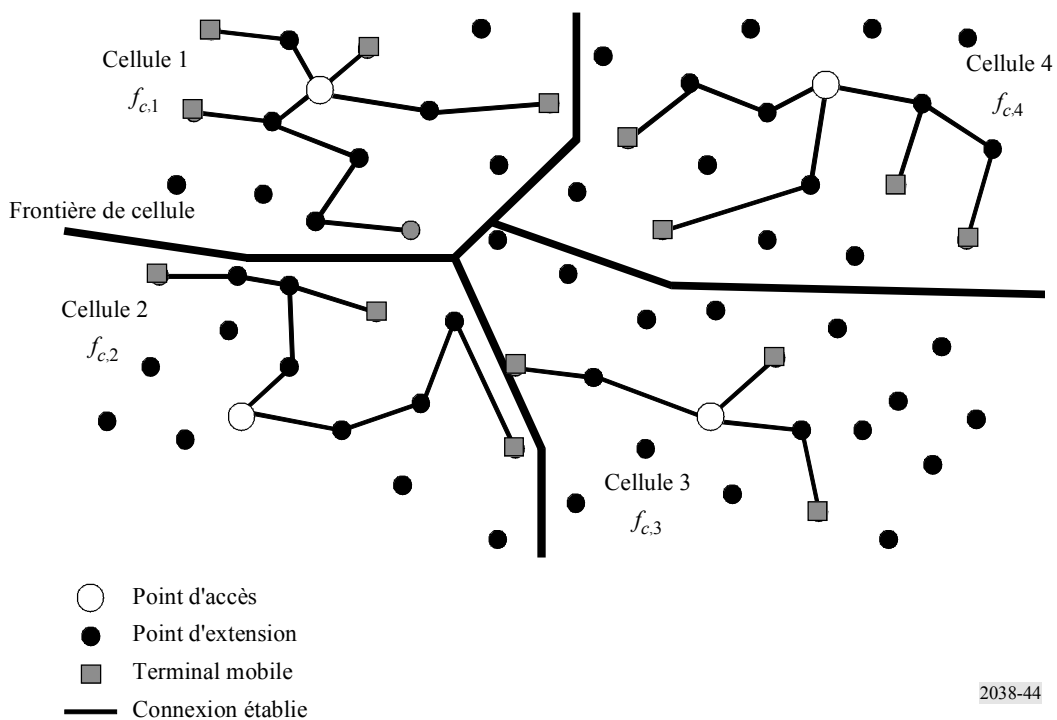


FIGURE 44

Exemple d'architecture de réseau hertzien multibond structuré



Comme les points d'extension n'ont besoin que d'une alimentation électrique (par exemple par panneaux solaires), leur installation est facile et bon marché. Comme les points d'extension sont installés dans des endroits bien définis et généralement avec des antennes directives, ils permettent d'élargir la zone de couverture d'un point d'accès de façon fiable et prévisible.

4 Accès multibond dans un système cellulaire

Les systèmes cellulaires actuels sont fondés sur un schéma de connexion directe entre un terminal cellulaire et une station de base. Lorsque le terminal cellulaire sort de la zone de service (par exemple lorsqu'il entre dans un bâtiment ou dans un tunnel), il n'a pas de moyen de communiquer avec la station de base dans le cadre de l'architecture cellulaire actuelle.

Le cas a) sur la Fig. 43 illustre l'un des schémas d'accès multibond pour un réseau hertzien constitué dans un système cellulaire. Les terminaux d'utilisateur qui sont capables de relayer le trafic généré en provenance (ou à destination) d'autres terminaux sont utilisés pour constituer un trajet multibond entre le terminal d'utilisateur cible et la station de base.

Dans les réseaux multibonds structurés (voir la Fig. 44), ce sont les points d'extension qui relaient le trafic.

4.1 MAC

Les terminaux cellulaires (éventuellement des terminaux relais) situés dans la cellule d'une station de base sont contrôlés par la station de base. Toutefois, les terminaux cellulaires situés en dehors de la cellule ne peuvent pas recevoir de paquets de commande en provenance de la station de base, auquel cas ils se trouvent dans une zone morte. Dans un réseau hertzien multibond, des terminaux relais ou des points d'extension contrôlent les terminaux qui sont hors de portée de la station de base et transmettent le trafic dans les deux sens: de la station de base au terminal d'utilisateur et dans le sens inverse.

Du point de vue de la qualité de service et d'autres critères de qualité, les terminaux hertziens y compris les terminaux relais ou les points d'extension doivent prendre en charge une méthode d'accès au support qu'utilisent les points d'extension/terminaux voisins appropriés.

4.2 Identification de l'utilisateur

Dans un réseau cellulaire classique, chaque terminal hertzien est distingué par un identificateur unique tel que l'identité internationale de station mobile (IMSI, *international mobile subscriber identity*). Cet identificateur qui est transmis au réseau (par exemple le serveur AAA) au début d'une phase d'établissement de connexion, est notamment utilisé pour le contrôle de la mobilité et la comptabilité.

Dans un réseau hertzien multibond ad hoc, les terminaux relais doivent transmettre ces informations en même temps que le trafic d'utilisateur à la station de base et au réseau. La station de base gère les terminaux d'utilisateur ainsi que les informations relatives au trajet multibond et aux terminaux voisins jusqu'au terminal de l'utilisateur. Une autre solution consiste à recourir à un réseau superposé existant pour ce type de fonctions.

Dans les réseaux radioélectriques multibonds structurés, les points d'extension environnants sont connus en permanence par les points d'accès après une phase d'établissement initial. Le mécanisme de routage implémenté dans les points d'accès et dans les points d'extension choisit le trajet approprié entre le terminal mobile et le point d'accès.

4.3 Transfert et routage

Lorsqu'un terminal hertzien raccordé directement à une station de base sort de la zone de couverture de la station de base, un mécanisme de transfert approprié est déclenché afin de maintenir une connexion hertzienne continue. Un terminal hertzien doit choisir des terminaux relais ou des points d'extension appropriés ainsi qu'une route jusqu'à la station de base. Dans le cas des réseaux multibonds structurés, le terminal doit simplement choisir le point d'extension qui offre la meilleure qualité de liaison. La route est alors donnée de façon inhérente par la structure de réseau considérée. Le transfert entraîne un reroutage.

5 Accès multibond dans un système de RLAN

Dans cette architecture, les terminaux d'utilisateur peuvent être des ordinateurs portables, des PDA et d'autres dispositifs équipés d'interfaces de RLAN.

5.1 MAC

Le système multibond peut adopter, comme protocole standard de commande d'accès au support, la méthode d'accès multiple avec détection de porteuse et avec évitement des collisions (CSMA/CA, *carrier sense multiple access with collision avoidance*). Les autres méthodes MAC appropriées sont fondées sur l'AMRT, crénelé ou non. Chaque terminal de RLAN envoie de façon autonome des données d'utilisateur. En un point d'accès, les données d'utilisateur sont converties dans un format de paquet filaire puis transmises à la destination finale.

Le cas b) de la Fig. 43 illustre l'accès multibond dans un système de RLAN. Les systèmes actuels de RLAN ne prennent pas en charge les connexions multibonds ou les mécanismes de relais de paquets, mais un mode de connexion ad hoc permet d'avoir une connexion directe entre deux terminaux.

5.2 Identification de l'utilisateur

Dans cette architecture, un terminal hertzien est identifié par l'adresse MAC de l'interface de RLAN.

6 Interfonctionnement de divers systèmes hertziens

Les cas c) et d) de la Fig. 43 illustrent des connexions multibonds faisant intervenir des systèmes hertziens hétérogènes dans le cas de réseaux multibonds ad hoc. Dans cette architecture, des terminaux bimode, équipés par exemple d'une interface cellulaire et d'une interface de RLAN, sont utilisés comme passerelles pour interconnecter deux systèmes.

Dans les réseaux multibonds structurés (voir la Fig. 44), il est possible également d'avoir des points d'extension qui soient équipés à la fois d'une interface cellulaire et d'une interface de RLAN. Dans ce cas, les transmissions entre terminal mobile et point d'extension ainsi qu'entre terminal mobile et point d'accès se font de préférence par l'intermédiaire d'une interface cellulaire, tandis que les transmissions entre point d'extension et point d'accès se font de préférence par l'intermédiaire d'une interface de RLAN. Une telle architecture présente les avantages suivants:

- des temps de transmission plus courts car des transmissions simultanées aux interfaces terminal mobile-point d'extension et point d'extension-point d'accès sont possibles;
- une plus grande capacité, notamment à l'interface terminal mobile-point d'extension/point d'accès, car les points d'extension jouent le rôle de concentrateurs de trafic.

7 Avantages des réseaux radioélectriques multibonds

Les avantages présentés par la technique multibond en font une technique importante pour les systèmes 3G améliorés et pour les systèmes postérieurs aux systèmes 3G. Cette technique permet notamment de réduire les problèmes rencontrés par les systèmes radioélectriques cellulaires à haut débit, qui sont principalement liés à la grande largeur de bande de transmission et au fonctionnement prévu dans des bandes de fréquences au-dessus de 3 GHz.

Les avantages sont les suivants:

- cette technique permet d'élargir considérablement la zone de couverture des points d'accès, qui est limitée en raison du fort affaiblissement sur le trajet et de la puissance d'émission restreinte des terminaux mobiles, des points d'extension et des points d'accès;
- comme des points d'extension peuvent être mis en place sous forme d'entités autonomes (ils n'ont besoin que d'une alimentation électrique, éventuellement de type solaire) moyennant des faibles coûts en termes d'infrastructure, les réseaux radioélectriques multibonds structurés permettent d'élargir la couverture et d'augmenter la capacité de façon très économique et permettent aux opérateurs d'utiliser de façon économique les ressources spectrales. Si on a recours à des terminaux relais plutôt qu'à des points d'extension, on n'a alors pas besoin du tout de mettre en place une infrastructure additionnelle. Toutefois, la couverture dépend dans ce cas de la disponibilité de terminaux relais dans le voisinage et de leur capacité. Il semble donc utile d'avoir une combinaison de terminaux relais et de points d'extension, dans laquelle la couverture de base est assurée par un réseau multibond structuré et des terminaux relais permettent d'accroître la performance dans le cas où les terminaux hertziens sont très nombreux;
- une adaptation fine et facile à obtenir entre la capacité de trafic offerte par zone unitaire d'un point d'accès et la capacité de trafic réellement requise par zone unitaire est possible, ce qui permet d'augmenter l'efficacité d'utilisation du spectre;
- dans le cas des réseaux radioélectriques multibonds structurés, la planification est facilitée. La couverture radioélectrique peut facilement être élargie;
- les terminaux mobiles ayant une puissance d'émission plus faible, leurs piles dureront plus longtemps et leurs rayonnements électromagnétiques seront plus faibles.

Pour une connexion multibond, il existe deux phases: la phase d'établissement de trajet multibond et la phase de transmission des données d'utilisateur. Dans la première phase, la séquence d'établissement de trajet multibond et la séquence de transfert qui est déclenchée par le déplacement du terminal d'utilisateur ou de terminaux relais appellent un complément d'étude. Une connexion sécurisée doit par ailleurs être offerte le long du trajet multibond, question qu'il faut aussi étudier. Dans la deuxième phase, les protocoles MAC et le mécanisme de relais qui doit être installé sur les terminaux relais font partie des éléments essentiels qu'il faut continuer à étudier.

8 Problèmes à résoudre en vue du développement et de l'exploitation de systèmes multibonds

En vue du développement et de l'exploitation de systèmes multibonds, il faut notamment étudier les points suivants:

- mécanisme de relais;
- protocole MAC;
- authentification d'utilisateur/de terminal et comptabilité;
- sécurité;
- séquence d'établissement de trajet multibond;
- séquence de transfert.

Des recherches complémentaires sont nécessaires afin de réduire les inconvénients des réseaux multibonds (par exemple augmentation du temps de transmission dans le cas de transmissions transitant par un ou plusieurs points d'extension et gaspillage possible d'une certaine capacité de transmission dans le cas d'un relais MAC). Le routage au sein d'un réseau multibond pose également des problèmes essentiels qu'il faut résoudre.

D'une manière générale, la technique multibond peut être considérée comme un complément utile au partage du spectre, mais elle peut aussi être utilisée en lieu et place du partage de spectre. Des concepts évolués (comme la coopération entre plusieurs points d'extension), actuellement à l'étude, devraient permettre d'améliorer la performance.
