

LES RESEAUX AD-HOC

PATRICK TORTELIER

FTR&D/DMR

INTRODUCTION

Malgré le développement de l'ADSL en France, de nombreuses communes ne sont pas (et ne seront peut-être pas dans un avenir proche) raccordées à l'ADSL, en particulier dans les zones rurales. Par exemple, la carte du déploiement de l'ADSL en Bretagne (Fig. 1) montre bien que, si les centres urbains sont raccordés, il y a encore beaucoup de zones non couvertes (plutôt rurales), sans doute pour des raisons de coût de déploiement. Or il y a une demande pour un Internet à haut débit dans ces zones rurales, aussi bien pour les particuliers que pour les professionnels, et on peut penser que les collectivités locales y voient un moyen d'y retenir les PME. Le même problème se retrouve hors de France, dans des pays très étendus (Australie, Chine...) ou des pays en voie de développement (Afrique, Inde...) qui ne disposent pas d'une infrastructure fixe couvrant toutes les zones habitées.

Il est alors intéressant de rechercher une alternative à un accès fixe haut débit dans les zones (semi-) rurales. Bien-entendu on pense tout de suite à un accès radio, mais le coût d'infrastructure joue encore, comme le montre le relatif échec de la boucle locale radio en France. Pour diminuer ce coût d'infrastructure une solution consiste à relâcher la contrainte de

visibilité directe entre le terminal de l'utilisateur et une station de base.

Il se trouve que, pour des raisons complètement différentes, un problème analogue a été abordé dès le début des années 80 dans le domaine des communications sur le champ de bataille: Déployer un réseau de communication radio entre des "mobiles" (c'est à dire fantassins, véhicules blindés, ...) disséminés sur un terrain qui, par nature, ne dispose pas d'une infrastructure de communications (et qui ne doit pas en avoir, car ce serait une des premières cibles de l'ennemi). Dans un tel contexte le schéma classique du réseau cellulaire (où les mobiles d'une même zone, la cellule, sont reliés à une station de base) est impossible.

La solution qui a émergé des contraintes ci-dessus est celle où chaque mobile utilise une interface radio pour émettre des données par paquets et joue le rôle d'un routeur (il transfère les paquets des autres utilisateurs) au sein d'un réseau maillé qui se reconfigure automatiquement (il tient compte de la mobilité des nœuds, de leur activité, de leur apparition ou disparition éventuelle). Plus précisément il s'agit d'un réseau dont l'infrastructure est constituée par les terminaux eux-mêmes.



Fig. 1 – Couverture ADSL en Bretagne (mars 2002)¹

L'IDEE DE RESEAU AD-HOC

La figure suivante (Fig. 2) illustre le concept: les points de couleurs répartis aléatoirement sont des nœuds (des terminaux mobiles), avec pour certains d'entre eux la portée de leur interface radio (les grands cercles en pointillés). Pour aller de A à B (qui est hors de portée de A) les paquets passent par les nœuds intermédiaires C₁, C₂ et C₃.

Malgré son origine militaire, l'idée a rapidement été jugée intéressante pour des applications civiles, pour les raisons suivantes:

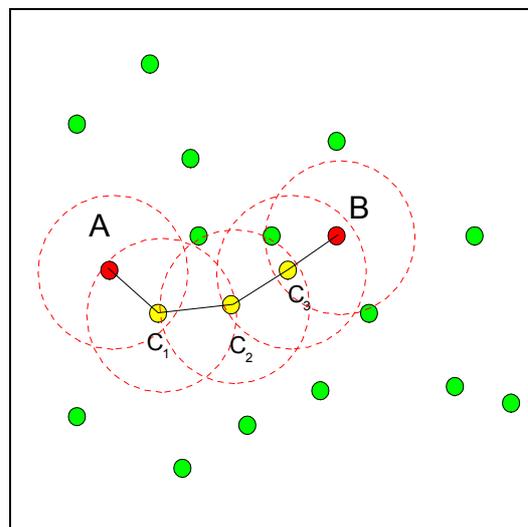


Fig. 2

¹ provenant du site http://bretagne.region.francetelecom.fr/villes_raccordées%20.htm. La page montre aussi l'évolution de la couverture en Ille-et-Vilaine entre 2000 et 2002

La facilité de déploiement est un avantage dans certaines circonstances où on ne dispose pas, ou plus, d'une infrastructure de communications: il suffit de penser aux zones victimes d'une catastrophe naturelle (tremblement de terre par exemple) ou non: un bon exemple en a été donné après les attentats du 11 septembre, où les sauveteurs ont pu utiliser comme réseau de communication d'urgence le réseau maillé « Ricochet » dont quelques relais (situés sur des lampadaires) subsistaient dans la zone dévastée; ce réseau est de type Ad-Hoc.

La capacité qu'ont les nœuds de servir de routeur provient de la nature du trafic généré en chacun de ces nœuds : ce type de réseau est intéressant en mode paquet, pour des trafics alternant périodes d'activités et périodes inactives où l'interface radio peut être utilisée pour router le trafic des autres nœuds.

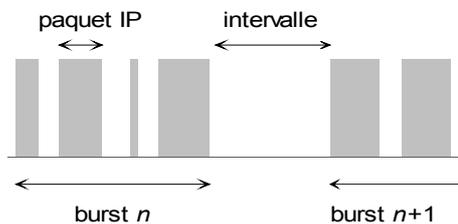


Fig. 3: modèle de trafic par bursts

Le concept de réseau Ad-Hoc est indépendant de l'interface radio utilisée. BT mène une expérimentation à Cardiff avec la solution "MeshWorks" de la société Radiant Networks, solution travaillant dans les bandes des 28 ou 40 GHz, les modulations utilisées étant la QPSK, les 16 ou 64 QAM. De la même manière, le système Ricochet de Metricom utilisait plusieurs bandes de fréquences : 900 MHz, 2.3 et 2.4 GHz, avec une GMSK comme modulation. D'autres solutions (dont Nokia Rooftop) utilisent les bandes sans licences à 2.4 GHz (bande ISM) ou 5 GHz (bande UNII) dans lesquelles opèrent les interfaces 802.11 (a

ou b). Les cartes radio mettant en œuvre cette norme sont peu chères, d'utilisation aisée.

Il y a enfin un autre avantage qui est d'origine plus physique et qu'on peut présenter sous la forme simplifiée suivante. On suppose tous les nœuds identiques et on note P_R la puissance moyenne reçue minimum dont chaque récepteur a besoin pour fonctionner correctement. La puissance qui doit être émise pour un lien de longueur d est alors de la forme

$$P_T = Cste \times P_R d^\alpha$$

où α est l'exposant de propagation ; égal à 2 pour une propagation en espace libre il est compris entre 3 et 4 pour des environnements plus réalistes. En supposant une distance L divisée en n « bonds » supposés de même longueur $d=L/n$, la puissance totale dépensée pour les n transmissions est:

$$P_{total}(n) = n \times Cste \times P_R \left(\frac{L}{n}\right)^\alpha$$

$$= \frac{Cste \times P_R L^\alpha}{n^{\alpha-1}}$$

ce qui montre une réduction d'un facteur $n^{(\alpha-1)}$ par rapport à une transmission en un seul bond de longueur L . La première idée qui vient est celle de diminuer la distance moyenne entre les nœuds du réseau ; cela revient à augmenter la densité d'utilisateurs (ce qui est séduisant) et pour chacun d'eux à diminuer la puissance émise. Mais il y a un écueil de taille au niveau du routage.

LE PROBLEME DU ROUTAGE

Lorsqu'on joint par une branche les nœuds qui sont réciproquement dans la portée de leur interface radio on dessine un graphe (aléatoire) qui a une forme comme celle illustrée par la Fig.4

Le problème du routage revient, donnés deux nœuds quelconques, à calculer le

« meilleur » chemin qui permet de les joindre. Il s'agit d'un problème de plus court chemin dans un graphe pour lequel existent plusieurs algorithmes performants (Ford-Bellman, Dijkstra, sont les plus connus), mais la vraie difficulté est ailleurs. Chaque nœud doit avoir sa table de routage **à jour**, il faut donc maintenir ces tables (les nœuds sont mobiles, ils peuvent apparaître ou disparaître, leur activité varie dans le temps). Cette contrainte est la cause d'un sur-débit non négligeable dans le réseau, les mobiles devant émettre des informations de mise à jour de ces tables. Ce sur-débit augmente avec la taille du réseau et la mobilité des nœuds. Les différents algorithmes de routage qui sont proposés (par exemple à l'IETF) ont pour objet la solution de ce problème.

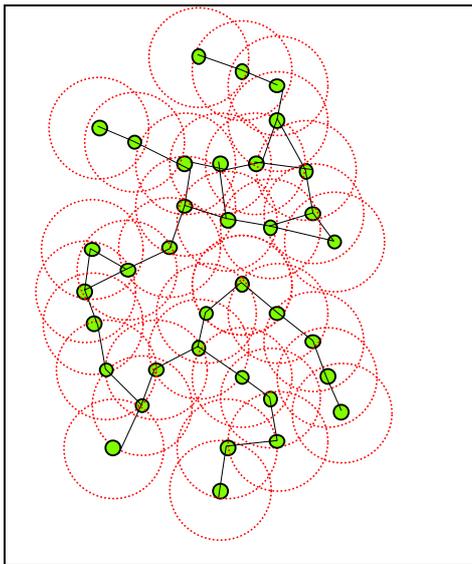


Fig.4 : maillage aléatoire

Il y a aussi une difficulté dans le choix du critère permettant de dire qu'une route est « meilleure » qu'une autre. Il s'agit d'affecter une métrique (« longueur ») à chaque arête du graphe, de sorte que la longueur d'un chemin est la somme des longueurs des branches qui le constituent. Plusieurs métriques sont possibles, en particulier :

- Le nombre de branches du chemin

- La qualité de chaque branche, afin de privilégier les liens de bonne qualité parce qu'on peut y faire passer plus d'information. De plus si un mécanisme de retransmission est prévu sur chaque lien, choisir un bon lien minimise le nombre de retransmissions et donc le retard de bout en bout.

On peut aussi pondérer plusieurs métriques.

UNE SOLUTION SIMPLIFIEE

Il est clair que la mobilité des nœuds est source d'une complexité accrue au niveau du routage. D'où l'idée (à première vue contradictoire avec l'idée de départ) de concevoir un maillage dont les nœuds sont fixes ! Se pose alors le problème de savoir à quelle situation cela correspond. Deux applications commerciales nous en donnent une idée :

La première provient de Nokia-Rooftop, originellement une start-up issue de travaux financés par le Darpa qui fait maintenant partie de Nokia². Il s'agit d'une alternative à la boucle locale radio, dans laquelle la contrainte de visibilité entre l'utilisateur et le point d'accès au réseau est relâchée : les différents utilisateurs ont chacun un modem/routeur sur le toit de leur habitation (d'où le nom du produit) et ils forment entre eux un maillage où chaque nœud sert de routeur à ses voisins vers les points d'accès au réseau fixe (Fig. 5).

Dans l'exemple précédent la mobilité des nœuds n'existe plus ; le deuxième exemple présenté introduit une mobilité des usagers, mais les usagers ne sont plus les nœuds du réseau Ad-Hoc. Le système Ricochet (développé initialement par la société Metricom, qui a fait faillite depuis, mais le réseau a été racheté) est un système micro-cellulaire dans lequel les stations de base

² <http://www.nwr.nokia.com/index.html>

La commercialisation est assurée par Tessco : http://www.tessco.com/nokia_rooftop

forment un réseau maillé (ce sont des boîtiers fixés sur les lampadaires) ; un usager est relié à un de ces nœuds avec une autre interface radio

que celle qui sert aux bornes entre elles, ou la même interface dans une bande de fréquences différente.

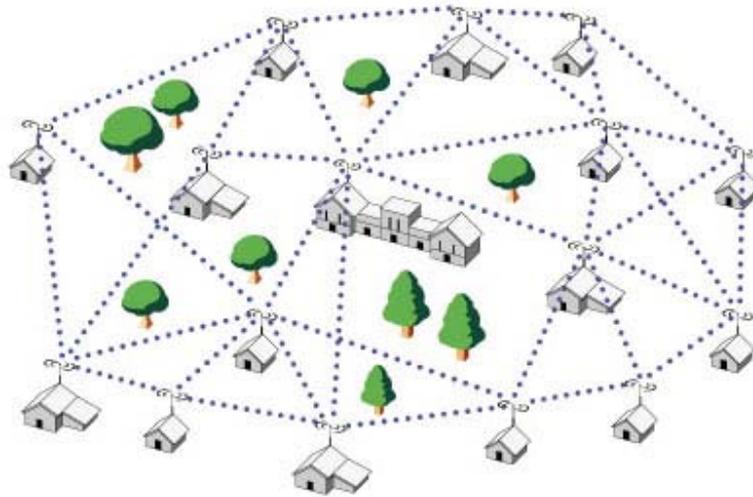


Fig. 5 – Réseau d'accès maillé

LA COUCHE PHYSIQUE

Comme indiqué plus haut l'interface radio utilisée est de type 802.11b. Une particularité de cette norme est de proposer plusieurs modes pour la couche physique : un mode à saut de fréquence que nous ne considérerons pas dans ce qui suit, deux modes à bas débit (1 et 2 Mbit/s) et deux modes à haut débit (5.5 et 11 Mbit/s), ces modes reposant sur des interfaces radio différentes comme l'indique le tableau suivant :

Débit(Mbit/s)	Modulation
11.0	CCK 11
5.5	CCK 5.5
2.0	DQPSK
1.0	DBPSK

Les 2 modes bas-débit ont en commun de reposer sur un étalement de spectre à l'aide d'une séquence de Barker de longueur 11. Dans les deux cas le débit symbole est de 11 Mbaud. La bande occupée est de 22 MHz car le filtrage émission est un racine de Nyquist dont le rolloff est de 1.0. On peut montrer que la détection optimale peut se faire avec un filtre adapté et les formules usuelles de taux d'erreur binaire sont applicables.

Lorsqu'on utilise la BPSK différentielle le symbole transmis d_n est relié aux symboles de données $d'_n \in \{-1,+1\}$ par

$$d_n = d_{n-1} d'_n$$

La variation de phase entre d_{n-1} et d_n porte donc l'information. La propriété est utilisée dans la démodulation (il n'est pas nécessaire d'estimer la phase de la porteuse), la

performance en canal Gaussien est donnée par [1] :

$$p_e = \frac{1}{2} \exp(-E_b/N_0)$$

De manière analogue, pour la DQPSK, les symboles complexes z_n transmis vérifient une relation de la forme

$$z_n = z_{n-1} e^{i\Delta\phi}$$

où $\Delta\phi$ dépend de deux bits d'information et prend ses valeurs dans $\left\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\right\}$. La performance en canal Gaussien est donnée par [1]

$$p_e = Q(a, b) - \frac{1}{2} I_0(ab) \times \exp\left(-\frac{a^2 + b^2}{2}\right)$$

$$a = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \left(1 - \sqrt{1/2}\right)$$

$$b = \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \left(1 + \sqrt{1/2}\right)$$

où $I_0(x)$ est la fonction de Bessel modifiée de première espèce et $Q(a, b)$ est la fonction de Marcum définie par:

$$Q(a, b) = \int_b^\infty x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx$$

la figure suivante montre les performances de ces deux modulations en canal Gaussien:

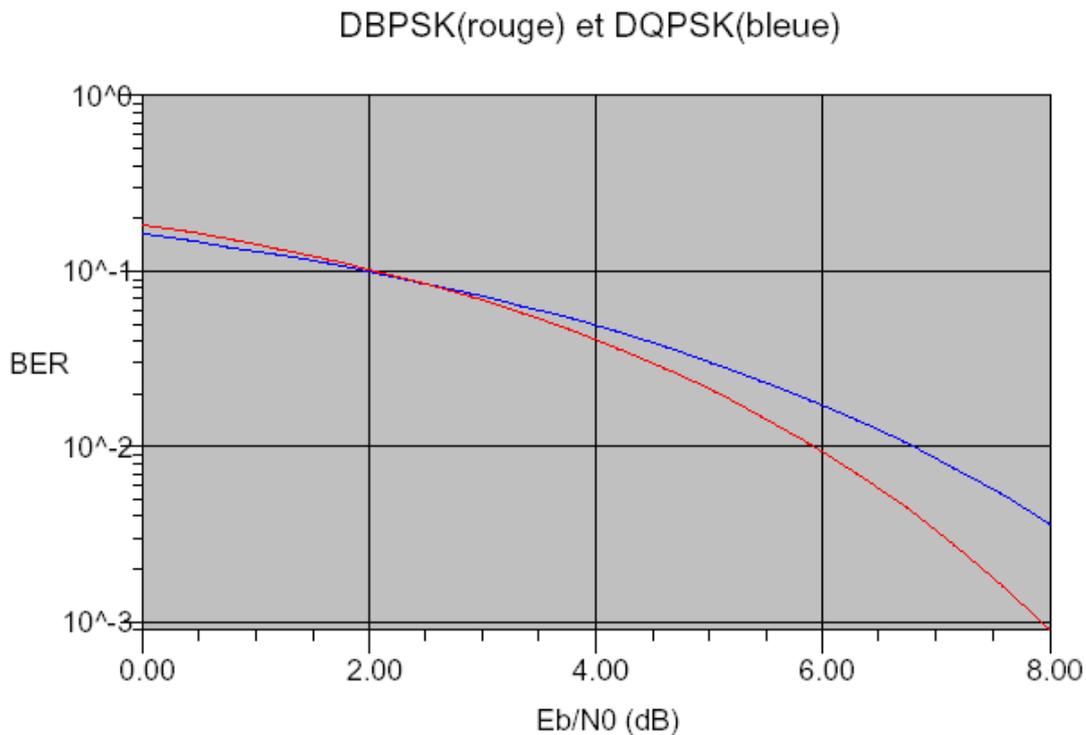


Fig. 6

les modulations CCK

Les débits élevés du 802.11b (5.5 Mbit/s et 11 Mbit/s) font appel à cette modulation. Une présentation unifiée des deux modulations à 5.5 et 11 Mbit/s consiste à les décrire comme des modulations codées en blocs. C'est à dire une suite de 8 symboles QPSK, de la forme

$$\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_n) = \left(e^{i\frac{\pi}{2}\psi_1}, e^{i\frac{\pi}{2}\psi_2}, \dots, e^{i\frac{\pi}{2}\psi_8} \right)$$

où les ψ_i sont dans Z_4 (le corps à 4 éléments), et forment un code de longueur 8. Dans le cas de la CCK à 11 Mbit/s ils sont calculés de la manière suivante: on passe tout d'abord de 8

bits d'information (d_1, \dots, d_8) à 4 nombres ϕ_1, \dots, ϕ_4 et les groupant par 2 selon la correspondance

d_i	d_{i+1}	ϕ
0	0	0
0	1	1
1	0	2
1	1	3

les ψ_i sont ensuite calculé de la manière suivante:

$$(\psi_1 \dots \psi_8) = (\phi_1 \dots \phi_4) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + (0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0)$$

On a donc un code linéaire sur Z_4 , de $256 = 4^4$ mots de code, plus exactement un translaté (coset) à cause du vecteur constant $(0, 0, 0, 2, 0, 0, 2, 0)$. Les performances d'un tel code dépendent des distances Euclidiennes entre mots de code, et il est possible de

calculer (ici par simple énumération) le polynôme qui recense les voisins d'un mot de code donnés par leur distance Euclidienne (variable X) et par le nombre de bits d'information par lequel ils en diffèrent (variable z):

$$\begin{aligned} \mathcal{A}(X, z) = & (3z + 3z^2 + 12z^3 + 3z^4 + 3z^5)X^{\sqrt{8}} + \\ & (4z^4 + 4z^5 + 6z^6 + 2z^7)X^{\sqrt{12}} + \\ & (4z + 19z^2 + 37z^3 + 53z^4 + 43z^5 + 15z^6 + 3z^7)X^4 + \\ & (z^3 + z^4 + 6z^5 + 4z^6 + 3z^7 + z^8)X^{\sqrt{20}} + \\ & (6z^2 + 6z^3 + 9z^4 + 3z^6)X^{\sqrt{24}} + zX^{\sqrt{32}} \end{aligned}$$

Un mot de code donné a donc 24 voisins à la distance $d_{\min} = \sqrt{8}$. 3 d'entre eux diffèrent par un bit d'information, 3 autres par 2 bits d'information, 12 par 3 bits d'information, et

ainsi de suite. Ce polynôme permet de calculer le taux d'erreur après décodage en appliquant la borne de l'union:

$$p_e \approx \frac{1}{8} \left\{ 72 Q(\sqrt{2 \times 2E_b/N_0}) + 86 Q(\sqrt{3 \times 2E_b/N_0}) + \right. \\ \left. 691 Q(\sqrt{4 \times 2E_b/N_0}) + 90 Q(\sqrt{5 \times 2E_b/N_0}) + \right. \\ \left. 84 Q(\sqrt{6 \times 2E_b/N_0}) + Q(\sqrt{8 \times 2E_b/N_0}) \right\}$$

où $Q(x)$ est la fonction d'erreur

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$$

Comparée au taux d'erreur binaire d'une QPSK non codée, égal à $Q(\sqrt{2 E_b / N_0})$, cette approximation indique un gain de codage de 3

dB car le terme dominant de la probabilité d'erreur est $pe \approx Q(\sqrt{2 \times 2 E_b / N_0})$.

De manière analogue la modulation CCK utilisée dans le mode à 5.5 Mbit/s est définie par un translaté d'un code correcteur sur Z_4 ; on passe de 4 bits d'information (d_1, \dots, d_4) aux symboles codés par:

$$(\psi_1 \dots \psi_8) = (\phi_1, \phi_2, \phi_3) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix} + (1, 0, 1, 2, 1, 0, 3, 0)$$

où ϕ_1 est défini par les deux bits (d_1, d_2) comme ci-dessus, $\phi_2 = d_3$ et $\phi_3 = d_4$. On peut facilement obtenir l'énumérateur de poids à deux variables :

$$\mathcal{A}(X, z) = (3z + 6z^2 + 4z^3 + z^4)X^4 + zX^{\sqrt{32}}$$

et l'approximation du taux d'erreur binaire:

$$p_e \approx \frac{1}{4} \left\{ 31 Q(\sqrt{2 \times 2E_b/N_0}) + Q(\sqrt{4 \times 2E_b/N_0}) \right\}$$

les performances respectives des deux modulations CCK qui viennent d'être décrites sont données par la figure (7). Pour conclure cette section on dira que les formules donnant le taux d'erreur pour les CCK à 11 et 5.5 Mbit/s sont des approximations (bornes de l'union), très précises pour des taux d'erreurs inférieurs à 10^{-3} . Elles correspondent à un décodage optimal de la CCK considérée comme un code correcteur. Dans la pratique les méthodes implantées par les constructeurs peuvent être sous optimales et entraîner une dégradation des performances.

CONCLUSION

Depuis son origine, principalement pour des applications militaires, l'idée de réseau Ad-Hoc est apparue comme une technique d'accès fixe radio. Il est plaisant de voir que cette possibilité a été considérée presque dès le début des études sur ce sujet par les équipes qui y travaillaient. En figeant les nœuds du maillage des simplifications apparaissent en effet, en particulier au niveau du routage, alors que les algorithmes de routage pour des réseaux ad-hoc mobiles sont encore en discussion dans le groupe Manet (Mobile Ad-Hoc Networks) de l'IETF. Bien que l'utilisation pour des zones rurales ait été mise en avant ici, des expérimentations de cette technique en milieu urbain sont en cours à l'étranger, en particulier celle de British Telecom à Cardiff. Quelques points cependant restent à valider: quelle est la capacité d'un tel réseau? Comment la ressource spectrale est elle utilisée? Les aspects sécurité sont aussi à

prendre en compte. Il reste donc beaucoup de travail sur cette technique séduisante.

RÉFÉRENCES

[1] J. Proakis, "Digital communications", McGraw-Hill, chap. 5-2-8 : Differential PSK (DPSK) and its performance.

[2] B. Pearson, "Complementary code keying made simple", Intersil Application note AN9850.2, nov. 2001.

[3] C. Heegard, J.T. Coffey et al., "High performance wireless ethernet", soumis à IEEE Comm.magazine, mars 2001, téléchargeable à l'adresse suivante:

<http://www.nativei.com/heegard/papers/>

[4] C. Heegard, "Range versus rate in 802.11g wireless local area networks", 802.11 Task Group G, juillet 2001, téléchargeable à l'adresse

<http://www.nativei.com/heegard/papers/>

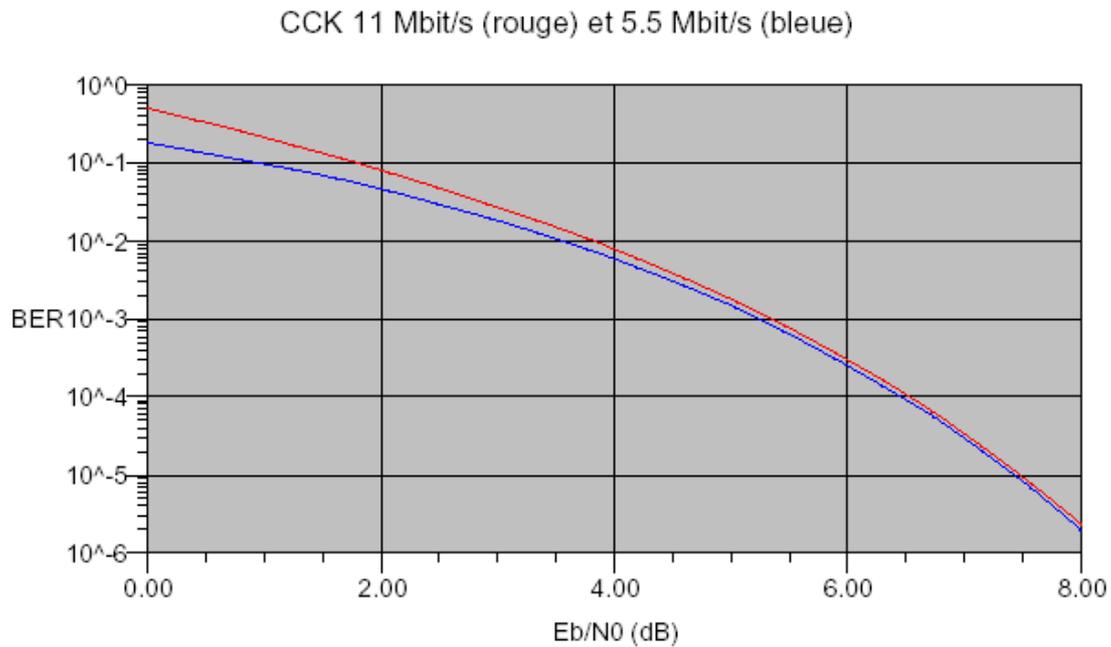


Fig. 7