

# Algorithmes de sélection d'utilisateurs à complexité réduite pour les systèmes MIMO multi-utilisateurs

Hajer KHANFIR<sup>1</sup> Didier LE RUYET<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Laboratoire Electronique et Communications  
292 rue Saint Martin, BP 75141 Paris Cedex 03, France  
hajer.khanfir@cnam.fr, leruyet@cnam.fr

**Résumé** – Pour la voie descendante des systèmes de radiocommunication MISO multi-utilisateurs avec précodage à l'émission, il est important de réduire le débit de la voie de retour. Dans cet article, nous étudions différents algorithmes et critères permettant de réduire significativement le débit de la voie de retour. Pour réduire ce débit, nous utilisons un premier critère sur les normes des canaux et un second sur la séparation spatiale des utilisateurs. Nous proposons, en absence de coopération entre les utilisateurs, une méthode de réduction de débit de la voie de retour opportuniste qui n'autorise que les utilisateurs orthogonaux entre eux à transmettre leurs canaux sur la voie de retour. Nous déterminons les seuils théoriques à appliquer et finalement, nous évaluerons les performances de ces différents critères de sélection par simulation numérique.

**Abstract** – For MISO multi-users downlink wireless communication system with precoding at the transmission, it is important to decrease the feedback rate. In this paper, we study different algorithms and criterions in order to significantly reduced the amount of feedback data. We associate the classical norm criterion with a criterion based on the users orthogonality. Without cooperation between the users, we only allow users that are orthogonal with the others to feedback their channel information to the base station. We calculate the theoretical thresholds and finally we evaluate the performance of the different criterions using numerical simulation.

## 1 Introduction

Dans un réseau de communication sans fil, les canaux des mobiles sont indépendants et varient différemment selon les vitesses des mobiles, les distances par rapport à l'émetteur (station de base pour les canaux descendants) ainsi que le milieu de propagation des signaux : urbain, rural.. Toutes ces caractéristiques permettent d'avoir une diversité entre les utilisateurs, appelée diversité multiutilisateurs qui peut être exploitée par différentes techniques de transmission afin d'augmenter la capacité des réseaux sans fil [1] [2]. Pour sélectionner le meilleur utilisateur, tous doivent transmettre l'estimation de leurs canaux à l'émetteur. Il est évident, qu'une telle quantité d'information est très importante et prend la place du trafic de données en voie montante.

Dans un contexte multiantennes, transmettre à plusieurs utilisateurs en même temps pour atteindre des capacités élevées, nécessite en plus de l'information sur les gains des canaux des utilisateurs, une information sur leurs séparation spatiale pour la réduction des interférences. Pour réduire une telle quantité d'information, les auteurs proposent dans [3] de ne renvoyer que les SINRs des utilisateurs et les indices des faisceaux. Dans [4], les auteurs diminuent le nombre des utilisateurs qui renvoient leurs gains des canaux en appliquant un seuil connu par tous les utilisateurs. Malheureusement, le renvoie d'une information permettant la sélection des utilisateurs les plus avantageux en terme de débit nécessite une coopération entre les utilisateurs ou le renvoie de la direction de leurs canaux. De telles techniques mettent en oeuvre des algo-

algorithmes de sélection des utilisateurs très complexes et la connaissance totale des canaux des utilisateurs. Nous proposons dans cet article de réduire l'information sur la voie de retour et la complexité des algorithmes à la station de base, grâce à la sélection des utilisateurs orthogonaux par les utilisateurs eux mêmes, selon une voie de retour opportuniste. Pour réduire l'information sur la voie de retour, nous utilisons un premier seuil sur les normes des canaux et un second sur leur séparation spatiale. Finalement, nous évaluerons les performances de ces différents critères de sélection.

## 2 Modèle du système

Nous considérons la transmission sur voies descendantes à partir d'une station de base (SB) équipée de  $N_t$  antennes vers  $K$  utilisateurs ayant chacun une seule antenne réceptrice. On suppose que tous les utilisateurs sont indépendants et distribués d'une manière homogène ( $S_1$ ) c.a.d qu'ils sont disposés uniformément à la même distance de la SB et donc le rapport signal à bruit moyen est le même pour tous les récepteurs. On suppose aussi que les récepteurs peuvent estimer leurs canaux sans erreurs. Généralement dans un système de radiocommunications  $K$  est très grand devant  $N_t$ . On suppose que le canal est à évanouissement par bloc et que la durée d'un bloc est inférieure au temps de cohérence du canal. A chaque bloc,  $N_t$  utilisateurs sont sélectionnés par la station de base à l'émission. Celle-ci précode les données des utilisateurs  $s_i \in \mathbb{C}$  ( $1 \leq i \leq K$ ) avec les vecteurs  $W = [\mathbf{w}_1 \cdots \mathbf{w}_{N_t}]$  asso-

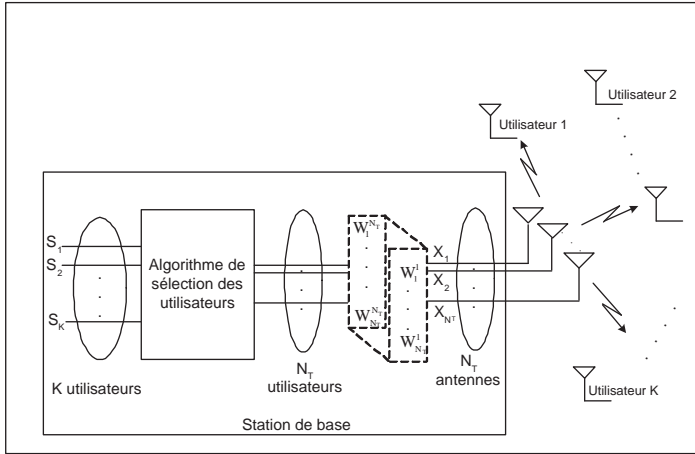


FIG. 1 – Stratégie de transmission par formation de voie dans un système MISO multiutilisateurs

ciés à chaque utilisateur sélectionné.

Le signal reçu par l'utilisateur  $k$  est donné par :

$$y_k = \sum_{i \in S} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i s_i + n_k \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

$S$  : ensemble des utilisateurs sélectionnés.

Les coefficients complexes du vecteur canal  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  et du bruit  $n_k \in \mathbb{C}$  sont i.i.d gaussiens de moyenne nulle et sont normalisés à une variance unitaire. Par ailleurs, une contrainte sur la puissance moyenne émise est appliquée  $E \{(w_i s_i)^H w_i s_i\} \leq P$ .

Le rapport signal sur interférence plus bruit au niveau de chaque utilisateur est donné par

$$SINR_k = \frac{P |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \in S, i \neq k} P |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2 + 1} \quad (2)$$

Le débit total moyen de la voie descendante du système de communication peut alors s'écrire comme la moyenne de la somme des débits des  $N_t$  utilisateurs sélectionnés.

$$\text{Débit} = E \left\{ \sum_{k \in S} \log(1 + SINR_k) \right\} \quad (3)$$

### 3 Critères pour la réduction du débit sur la voie de retour

Pour maximiser le débit transmis sous la contrainte d'une puissance moyenne émise  $P$  il faut tout d'abord choisir la meilleure combinaison de  $N_t$  utilisateurs. La recherche exhaustive qui consiste à évaluer  $C_K^{N_t}$  combinaisons devient vite prohibitive. Cependant, les utilisateurs ayant un canal médiocre (faible amplitude ou/et interférant avec d'autres bons utilisateurs) ne devraient pas participer à l'algorithme de sélection des utilisateurs ( temps de calcul coûteux et occupation de la voie de retour). En utilisant un critère d'auto-discrimination, il sera possible de réduire le débit sur la voie de retour et la complexité de l'algorithme de sélection au niveau de la SB. Considérons les ensembles suivants :

$\mathcal{R}$  : ensemble de tous les utilisateurs.

$\mathcal{T}_1$  : ensemble des utilisateurs dont les normes de leurs canaux sont supérieures à un seuil donné.

$$\mathcal{T}_1 = \{k \in \mathcal{R} : \|\mathbf{h}_k\|^2 > \gamma_{th}\} \quad (4)$$

$\mathcal{T}_2$  : ensemble des utilisateurs dont les vecteurs canaux normalisés sont presque orthogonaux.

Comme les utilisateurs ne peuvent pas coopérer, l'ensemble  $\mathcal{T}_2$  ne peut être formé qu'au niveau de la SB en connaissant les vecteurs de canaux normalisés de tous les utilisateurs. Dans cet article, nous proposons de générer au niveau de chaque utilisateur  $N_t$  vecteurs unitaires orthogonaux aléatoires  $\phi_i$  ( $N_t \times 1$ ),  $i=1, \dots, N_t$ . Les vecteurs  $\phi_i$  sont générés à chaque bloc de manière synchrone suivant une distribution isotropique identique pour chacun des utilisateurs [6]. Les utilisateurs doivent mesurer l'orthogonalité de leurs canaux les uns par rapport aux autres grâce à la formule :

$$d(\mathbf{h}_k, \phi_i) = 1 - |\bar{\mathbf{h}}_k^H \phi_i|^2 \quad (5)$$

où  $\bar{\mathbf{h}}_k = \frac{\mathbf{h}_k}{\|\mathbf{h}_k\|^2}$  est le vecteur de canal normalisé de l'utilisateur  $k$  et où

$$d(\mathbf{h}_k, \phi_i) = \begin{cases} 1 & , \quad \bar{\mathbf{h}}_k \perp \phi_i \\ 0 & , \quad |\bar{\mathbf{h}}_k^H \phi_i| = 1 \end{cases}$$

Soit  $\mathcal{F} = \{\phi_1, \dots, \phi_{N_t}\}$  l'ensemble de  $N_t$  vecteurs unitaires orthogonaux et  $\mathcal{B}_\epsilon(\phi_i)$  est la région centrée autour de  $\phi_i$  :

$$\mathcal{B}_\epsilon(\phi_i) = \{\mathbf{g} \in \mathbb{O}^{N_t} : d(\mathbf{g}, \phi_i) \leq \epsilon\} \quad (6)$$

où  $\mathbb{O}^{N_t}$  est la sphère de rayon unitaire définie dans  $\mathbb{C}^{N_t}$  et centrée à l'origine.

Nous proposons alors d'exprimer l'ensemble  $\mathcal{T}_2$  comme suit :

$$\mathcal{T}_2 = \{k \in \mathcal{R} : \bar{\mathbf{h}}_k \in \bigcup_{i=1}^{N_t} \mathcal{B}_\epsilon(\phi_i)\} \quad (7)$$

$$\mathcal{T}_2 = \{k \in \mathcal{R} : 1 - |\bar{\mathbf{h}}_k^H \phi_i|^2 \leq \epsilon \quad i \neq k \quad \text{et} \quad i = 1, \dots, N_t\} \quad (8)$$

$\mathcal{T}_3$  : ensemble des utilisateurs appartenant aux deux ensembles  $\mathcal{T}_1$  et  $\mathcal{T}_2$ .

$$\mathcal{T}_3 = \{k \in \mathcal{R} : \bar{\mathbf{h}}_k \in \bigcup_{i=1}^{N_t} \mathcal{B}_\epsilon(\phi_i) \quad \text{et} \quad \|\mathbf{h}_k\|^2 > \gamma_{th}\} \quad (9)$$

L'ajustement des seuils est déterminé soit analytiquement (cas de l'orthogonalité) soit par simulation afin de garantir un nombre moyen d'utilisateurs qui renvoient leurs canaux instantanés à la SB.

A partir de l'ensemble  $\mathcal{T}_3$  il faudra effectuer le choix des  $N_T$  utilisateurs qui maximiseront le débit total (3) par recherche exhaustive ou heuristique.

Il est également possible de simplifier la préselection si chaque utilisateur  $k$  de l'ensemble  $\mathcal{T}_3$  renvoie aussi l'indice  $i_k$  de son vecteur unitaire  $\phi_{i_k}$ .

Exprimons  $\mathcal{T}_3^\ell$  ensemble des utilisateurs ayant un même vecteur unitaire  $\phi_l$  :

$$\mathcal{T}_3^\ell = \{k \in \mathcal{T}_3 : i_k = \ell\} \quad (10)$$

La SB peut alors choisir à partir des  $N_t$  ensembles  $\mathcal{T}_3^\ell$  le groupe des utilisateurs sélectionnés  $\mathcal{S} = \{u_1 \dots u_{N_t}\}$ .

Parmi les utilisateurs d'un même ensemble  $\mathcal{T}_3^\ell$ , la SB sélectionnera l'utilisateur dont la norme du vecteur canal est maximum :

$$u_\ell = \arg \max_{k \in \mathcal{T}_3^\ell} \|\mathbf{h}_k\| \quad (11)$$

Cette approche permet de réduire la complexité de l'algorithme de sélection au niveau de la SB.

## 4 Détermination des seuils

Après avoir introduit les différents critères de sélection des utilisateurs, il est nécessaire de fixer les seuils pour limiter le débit sur la voie de retour. Pour cela nous devons choisir les valeurs des seuils pour les trois ensembles de manière à avoir un nombre moyen d'utilisateurs fixe. Soit  $\bar{K}$  le nombre moyen d'utilisateurs sur la voie de retour durant  $T$ .

Nous écrivons analytiquement le dernier ensemble qui englobe les deux autres. D'après ( $S_1$ ) et puisque la norme du canal et sa direction sont indépendantes on peut écrire :

$$\begin{aligned} \bar{K} &= K \mathcal{P}\{k \in \mathcal{T}_3\} \\ &= K \mathcal{P}\{k \in \mathcal{T}_1\} \times \mathcal{P}\{k \in \mathcal{T}_2\} \\ &= K \mathcal{P}\{\|\mathbf{h}_k\|^2 > \gamma_{th}\} \times \mathcal{P}\{k \in \mathcal{R} : \bar{\mathbf{h}}_k \in \bigcup_{i=1}^{N_t} \mathcal{B}_\epsilon(\phi_i)\} \end{aligned} \quad (12)$$

D'après [7]

$$\mathcal{P}\{k \in \mathcal{R} : \bar{\mathbf{h}}_k \in \bigcup_{i=1}^{N_t} \mathcal{B}_\epsilon(\phi_i)\} = \epsilon^{N_t-1}$$

Le théorème de la borne de l'union donne :

$$\bar{K} \leq K N_t \mathcal{P}\{\|\mathbf{h}_k\|^2 > \gamma_{th}\} \epsilon^{N_t-1}$$

L'ensemble  $\mathcal{T}_2$  est déterminé par la distribution  $\text{Gamma}(N_t, 1)$  incomplète qui peut être bornée par [3][5] :

$$[1 - e^{-\beta\gamma}]^{N_t} \leq \int_0^{\gamma_{th}} f_\gamma(\gamma) d\gamma \leq [1 - e^{-\gamma}]^{N_t}$$

avec  $\beta = (N_t!)^{-\frac{1}{N_t}}$  et  $f_\gamma(\gamma)$  est la fonction de densité de probabilité  $\chi_2^2(N_t)$ .

Sur la figure 2 nous présentons les courbes des paires  $(\gamma_{th}, \epsilon_{th})$  permettant d'obtenir une probabilité déterminée  $\mathcal{P}\{k \in \mathcal{T}_3\}$  (10% à 50%). Pour chaque probabilité, il faudra choisir cette paire en privilégiant soit le critère sur la norme soit le critère sur l'orthogonalité.

## 5 Résultats de simulation

Pour comparer les différents critères proposés, nous avons considéré un réseau comprenant une station de base avec  $N_T = 2$ ,  $SNR = 10dB$  et  $K = 100$  utilisateurs.

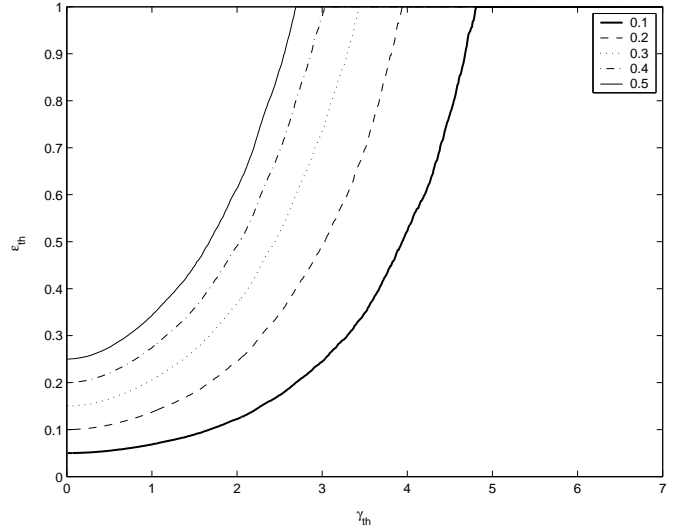


FIG. 2 – Les paires  $\epsilon_{th}$  et  $\gamma_{th}$  pour  $\mathcal{P}\{k \in \mathcal{T}_3\} = 0.1$  à  $0.5$

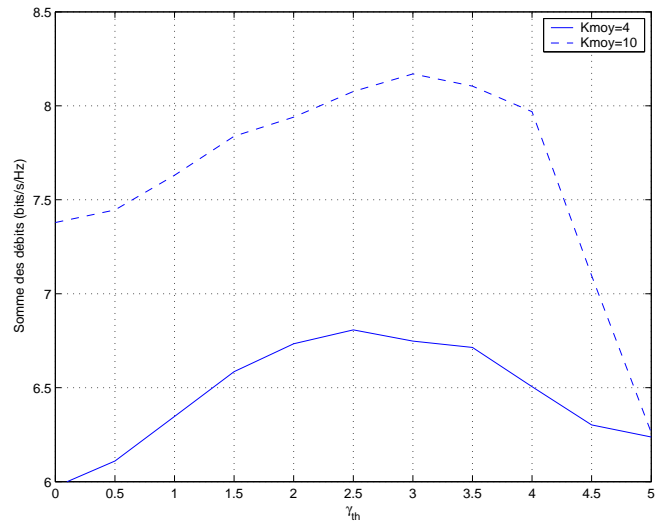


FIG. 3 – Débits en fonction des seuils combinés  $(\gamma_{th}, \epsilon_{th})$

Sur la figure 3, nous présentons les courbes de performances Débit en fonction du couple  $(\gamma_{th}, \epsilon_{th})$  pour un nombre moyen d'utilisateurs sélectionnés  $\bar{K} = 4$  et 10 utilisateurs. Les points à la gauche de la figure correspondent à l'utilisation de l'ensemble  $\mathcal{T}_2$  ( $\gamma_{th} = 0$ ). Les points à la droite de la figure correspondent à l'utilisation de l'ensemble  $\mathcal{T}_1$  ( $\epsilon_{th} = 1$ ). Entre ces deux points nous utilisons l'ensemble combiné  $\mathcal{T}_3$ . Nous pouvons noter qu'il existe une valeur optimale du couple pour laquelle le débit est maximum. Comme nous l'avons vu sur la figure 2, il faut augmenter la valeur de  $\gamma_{th}$  et par suite la valeur de  $\epsilon_{th}$  pour maintenir un nombre moyens d'utilisateurs sélectionnés. Pour  $\bar{K} = 4$ , le débit maximum ( $D = 6.8b/s/Hz$ ) est atteint pour la paire  $(\gamma_{th} = 2.5, \epsilon_{th} = 0.07)$ . Pour  $\bar{K} = 10$ , le débit maximum ( $D = 8.1b/s/Hz$ ) est atteint pour la paire  $(\gamma_{th} = 3, \epsilon_{th} = 0.25)$ . On peut noter que le critère d'orthogonalité est d'autant plus important que  $\bar{K}$  est faible. On vérifie que plus  $\bar{K}$  est élevée, plus le Débit augmente.

Sur la figure 4, nous présentons les courbes de performances Débit en fonction du nombre d'utilisateurs  $K$  pour un nombre moyen d'utilisateurs sélectionnés  $\bar{K} = 4$ . Ces

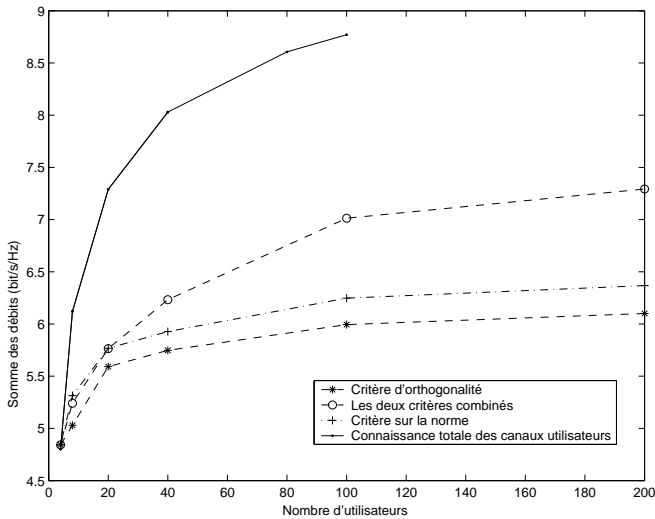


FIG. 4 – Evaluation des performances selon le choix du critère de sélection des utilisateurs

courbes mettent en évidence une amélioration des performances du système lorsque le nombre d'utilisateurs  $K$  croît. On remarque que l'utilisation du seul critère sur l'orthogonalité (ensemble  $T_2$  avec  $\epsilon_{th} = 0.02$ ) limite les performances même pour un grand nombre d'utilisateurs. En effet, ce critère ne permet pas d'exploiter le gain de diversité multi-utilisateurs. Le critère sur la norme avec (ensemble  $T_1$  avec  $\gamma_{th} = 6$ ) permet d'améliorer sensiblement les performances. Cependant, comme nous l'avons vu sur la figure 3, c'est la solution combinant les deux critères ( $(\gamma_{th} = 2.5, \epsilon_{th} = 0.07)$ ) qui permet de maximiser le débit en exploitant au mieux la diversité multi-utilisateurs. En effet, pour les valeurs de  $\gamma_{th}$  élevées (pour  $K$  élevé), l'interférence entre les utilisateurs devient très grande et diminue alors la capacité totale du système. Un critère combiné permet donc d'optimiser au mieux le choix des utilisateurs en fonction de leurs normes et de l'orthogonalité de leurs canaux.

## 6 Conclusion

Dans cet article, nous avons étudié l'impact de différents critères de sélection des utilisateurs sur les performances du système de communication en voie descendante. Nous avons étudié la réduction de débit sur la voie de retour et la réduction de la complexité des algorithmes de sélection. Nous avons montré qu'en plus d'un critère basé sur la norme du vecteur de canal, il est également important d'appliquer un critère sur l'orthogonalité entre les utilisateurs au niveau des mobiles. Nous étudierons dans des travaux futurs, le comportement de ces différents critères de sélection dans un système où les utilisateurs ont une répartition hétérogène.

## Références

- [1] Pramod Viswanath, David N. C.Tse, Rajiv La-roia. "Opportunistic Beamforming Using Dumb Antennas". *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 48,n°6,June 2002.
- [2] R. Knopp, P. Humblet. "Information capacity and power control in single cell multiuser communications". in *Proc.IEEE Int. Computer Conf. ICC'95*, Seattle, WA, June 1995.
- [3] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO Broadcast channels with partial side information" *IEEE Trans. on Information Theory*, vol.51, pp. 506-522, 2005.
- [4] D. Gesbert, M. Slim Alouini, "How much feedback is multi-user diversity really worth ? ", In *Proceedings of IEEE Intern. Conf. On Communications (ICC)*, 2004.
- [5] K. Huang, R. W. Heath, J. Andrews, "Multi-user aware limited feedback for MIMO systems"  *soumis à IEEE Trans. on Signal Processing*, janvier 2007.
- [6] B. Hassibi and T.L.Marzetta, "Multiple-antennas and isotropically random unitary inputs : the received signal density in closed form" *IEEE Trans. Info*, vol.48, no.6, pp. 1473-1484, June 2002.
- [7] K. K. Mukkavilli, A. Sabharwal, E. Erkip, and B. Aazhang, "On beamforming with finite rate feedback in multiple antenna systems," *IEEE Trans. on Info. Theory*, vol. 49, pp. 2562-2579, Oct. 2003.
- [8] C. Swannack, E.Uysal-Biyikoglu,and G W. Wornell, "Finding NEMO : Near Orthogonal Sets and Applications to MIMO Broadcast Scheduling," *Int Conf on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*", Volume 2, Page(s) :1035 - 1040, 13-16 June 2005.