

DETECTION ET LOCALISATION EN TEMPS REEL D'UN MOBILE FERROMAGNETIQUE

**Yanis CARITU, Bruno FLAMENT, François
VACHERAND, Roland BLANPAIN**

LETI (CEA - Technologie Avancées), 17 Avenue des Martyrs F-38054 Grenoble Cedex 9
E-mail : caritu@dsys.ceng.cea.fr

RÉSUMÉ

Cet article propose un traitement temps réel pour détecter et localiser le passage d'un mobile ferromagnétique à travers un réseau de magnétomètres scalaires. Moyennant certaines hypothèses sur la trajectoire et l'orientation de la source, un filtrage adapté multibase, appliqué sur chaque voie de mesure, réalise simultanément la détection et l'estimation de paramètres liés à la localisation. Malgré la dimension importante de l'espace de projection des signaux sur les bases, la récursivité de l'algorithme proposé autorise le temps réel sur une machine séquentielle. Compte tenu des hypothèses, une analyse d'évolution au cours du temps des estimées locales renseigne sur la confiance accordée à ces estimées. Une énergie maximale de détection conjointe à une bonne confiance d'estimation et sur un nombre suffisant de capteurs, déclenche l'étape de fusion des estimées par "triangulation élastique". Cette étape finale détermine la vitesse et retrouve la position de la source à chaque instant.

1. Introduction

Les progrès réalisés en magnétométrie durant ces vingt dernières années ont fait naître des capteurs de plus en plus sensibles. Par suite, des études sur la détection [1 à 5], la localisation et l'identification d'objet ferromagnétique [6 à 9] à distance ont vu le jour. Ces techniques passives ont trouvé leur intérêt dans des domaines aussi divers que la géophysique, l'archéologie, la localisation de véhicule terrestre ou marin et le déminage de terrain.

La question de la localisation magnétique se pose en terme de problème inverse : il s'agit toujours d'exploiter une mesure de la perturbation magnétique, causée par un objet ferromagnétique assimilable à un dipôle, afin d'extraire une estimée de sa position et de son moment.

Une technique d'inversion non récursive proposée par [6] permet de localiser un dipôle en mouvement à l'aide d'un dispositif constitué de gradientmètres et de magnétomètres SQUID. La mesure recueillie est vectorielle et fournit donc une information complète sur le champ et le gradient du champ magnétique. L'inversion s'appuie essentiellement sur le tenseur de gradients, ce qui réduit notablement la portée du système. Les limitations pratiques résident dans le fait que les capteurs utilisés, sensibles aux mouvements de rotation, sont d'un emploi peu commode en dehors des conditions de laboratoire.

ABSTRACT

In this paper, we propose a real-time processing system to detect and locate a ferrous vehicle traveling through a net of scalar magnetometers. Assuming certain hypotheses about the kinetics and orientation of the source, a multibased matched filter, applied to each channel, achieves both detection and estimation of localization parameters. In spite of the large dimensions of the basis projection space, the recursiveness of the proposed algorithm allows real-time calculation on a sequential machine. By considering the assumptions, an analysis-in-time of the estimated parameters provides a good criterion to decide if the estimation is reliable or not. A maximal energy of detection, together with a good estimation confidence and over a sufficiently large number of sensors activates the fusion stage applying « *elastic triangulation* ». This final stage computes the speed and position of the source at each acquisition step.

En outre, cette technique nécessite une information a priori sur la localisation de la source car elle aboutit à quatre solutions (dont trois « fantômes »).

L'intérêt des chercheurs s'est donc porté sur des capteurs utilisant le principe de la RMN. Ils sont omnidirectionnels et donc pratiques à mettre en oeuvre. En revanche, une part non négligeable de l'information magnétique est perdue puisque ces capteurs dits « à champ total » mesurent uniquement l'amplitude du champ magnétique selon la direction du champ terrestre local. Cette perte d'information est palliée par une stratégie de mesure en plusieurs points. Le problème inverse n'en demeure pas moins difficile et il faut souvent introduire des simplifications et une connaissance a priori pour réduire l'espace des solutions possibles. Les méthodes présentées dans [9] sont des méthodes classiques de résolutions itératives ou récursives qui ont l'avantage de faire peu d'hypothèses sur la source mais qui présentent des inconvénients majeurs tels que la nécessité d'une bonne initialisation de l'algorithme de recherche, ce qui revient à introduire de la connaissance a priori, une convergence parfois trop lente et une trop importante sensibilité au bruit.

Dans le contexte de la localisation d'objet enfoui [6], la source est supposée immobile et les capteurs sont déplacés librement de manière à quadriller la surface du sol ou, plus précisément, à trouver les points de champ extrémal. Dans le contexte de la surveillance d'une zone qui est le notre, les



capteurs sont dispersés en différents points de l'espace. ils forment un réseau et les déplacer lorsque le système est en veille est à proscrire. C'est donc le déplacement de la source magnétique qu'on enregistre à travers la variation des mesures du champ total sur le réseau et c'est ce déplacement qu'il nous faut retrouver. La deuxième partie de cet exposé montre que, avec certaines hypothèses sur la cinématique de la source, il est possible de caractériser simplement la forme des signatures temporelles.

Il n'est pas dans notre propos d'exposer les méthodes permettant de s'affranchir des effets magnétiques naturels (effets géomagnétiques et géologiques) qui sont les principales sources de bruit. Le lecteur intéressé trouvera dans [11] des solutions pertinentes à ce problème délicat de réduction de bruit. Notons simplement qu'un capteur de référence éloigné de la zone à surveiller permet une réduction correcte du bruit géomagnétique. C'est pourquoi, nous considérons par la suite les signaux observables comme des signatures magnétiques noyées dans du bruit propre au capteur. Aussi était-il naturel de penser à des techniques de filtrage adapté pour la détection et l'estimation des paramètres de localisation. C'est l'objet de la troisième partie.

La quatrième partie explique comment fusionner les estimées du filtrage adapté pour retrouver les paramètres caractérisant le dipôle (position et moment).

2. La signature magnétostatique dipolaire.

2.1. Forme générale

Dans toute la suite, nous supposons que la source se déplace dans le plan des capteurs. Cette hypothèse forte mais relativement bien vérifiée dans la réalité n'interdit pas une généralisation tridimensionnelle.

La modélisation dipolaire nous permet d'exprimer le champ magnétique en fonction de la source :

$$B(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{r}\mathbf{r}^t - r^2 \mathbf{Id}) \cdot \mathbf{M}}{r^5} \quad (1)$$

où \mathbf{r} dépend du temps et représente le vecteur position qui lie la source au capteur (voir figure 1).

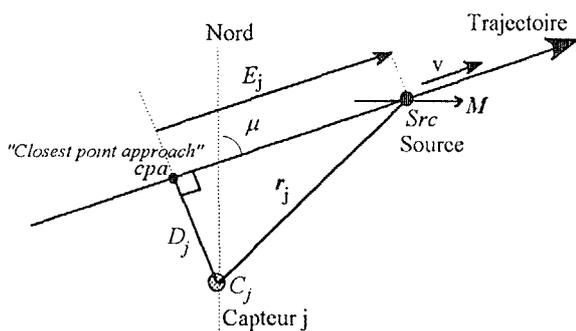


Figure 1 : Configuration géométrique du passage

La mesure effectivement réalisée par chaque magnétomètre à RMN s'obtient en projetant (1) sur la direction du champ terrestre.

2.1. Cas du mouvement rectiligne uniforme.

Dans le cas où le véhicule suit une trajectoire rectiligne de cap μ (voir Figure 1), il présente toujours la même orientation dans le champ terrestre. Son moment induit est donc constant. Ainsi, le moment total, somme du moment

permanent et du moment induit, est invariant dans le temps. Les signatures sur chaque capteur prennent la forme des « parallèles » liées à la surface de perturbation magnétique simulée sur la figure 2.

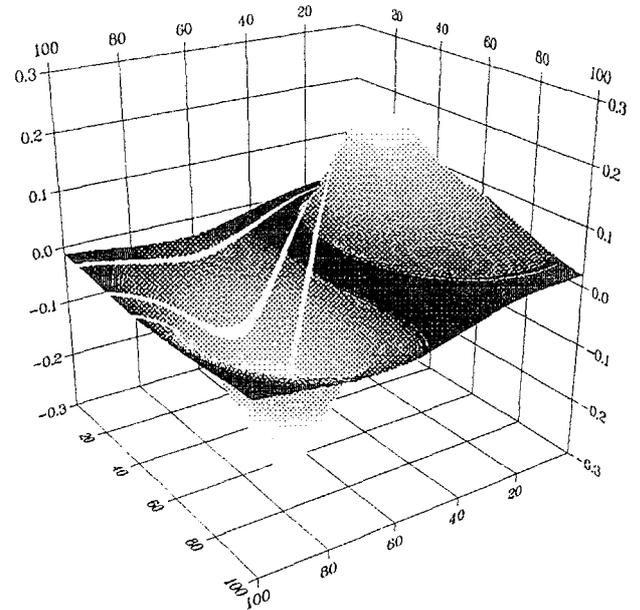


Figure 2 : Signatures particulières

Si le mouvement rectiligne est, en plus, uniforme, la vitesse v est une inconnue constante. A partir de ces hypothèses simplificatrices sur le mouvement de la source, on montre (voir [3]) que le signal utile peut se décomposer sur une base de trois fonctions rationnelles orthonormées $e_i(t)$ ($i=0, 1$ ou 2) connues sous le nom de fonctions de Anderson :

$$S_j(t) = \sum_{i=0}^2 s_{ji} e_i(\tau) \quad (2)$$

avec la variable réduite : $\tau = \frac{t}{D_j/v}$

où la date origine $t=0$ est prise comme date de passage au cpa, point minimal d'approche en même temps que point de symétrie pour les bases e_i . Lorsque la signature est incomplète, c'est-à-dire lorsque le véhicule se trouve à une distance E_j finie du cpa, l'instant correspondant s'écrit :

$$t = E_j/v \quad (3)$$

La signature incomplète se projette sur les e_i tronquées pour $t > E_j/v$. E_j/v paramètre donc une troncature des bases. Il faut préciser que les bases tronquées $e_i(t, D_j/v, E_j/v)$ ne sont plus orthonormées.

Les paramètres de localisation D_j et E_j caractérisent simplement une position d'éloignement de la source par rapport au capteur sans information sur le cap de la trajectoire. Il est clair que plusieurs solutions sont possibles selon l'orientation de l'équerre (C_j , cpa, Src) de la figure 1. L'information sur l'orientation de la trajectoire et sur le moment magnétique est contenue dans les coefficients s_{ji} . De plus, si N est le nombre de capteurs, cette approche met les signatures en relation avec $2N+1$ inconnues $\{D_j, E_j\}_{j=1, \dots, N}$ et la vitesse v . Il est important de souligner que $(E, D, \lambda v)$ donne la même forme de base que $(E/\lambda, D/\lambda, v)$. Cette propriété d'homothétie sera exploitée dans la quatrième partie de cet exposé.

La relation (2) linéarise le problème. Elle caractérise la forme de la signature par trois coefficients. Cette

décomposition est généralisable aux signaux de gradient du champ pour lesquels le nombre de coefficients passe à quatre.

La signature étant de forme connue mais dépendant de deux paramètres de localisation D_j/v et E_j/v , nous nous proposons d'estimer ces paramètres à l'aide d'une technique de filtrage adapté multibase paramétré.

3. Traitement pour l'estimation : un filtre adapté multibase paramétré.

3.1. Principe

Le filtre adapté est le filtre linéaire optimal au sens du rapport signal sur bruit pour la détection d'un signal de forme connue noyé dans du bruit blanc [12]. Sa réponse impulsionnelle est la copie du signal retournée. Il réalise en fait une opération d'intercorrélation entre le signal reçu et le signal paradigme. La connaissance précise de ce dernier est donc nécessaire. Au vu du signal paradigme décrit par la relation (2), le problème consiste à déterminer le mélange $\{s_{ji}\}_{ij=0,1,2}$ composant le signal S_j enregistré par le capteur j noyé dans du bruit additif $n_j(t)$:

$$S_j(t) = \sum_{i=0}^2 s_{ji} e_i(t, D_j/v, E_j/v) + n_j(t) \quad (4)$$

Une méthode généralement utilisée, notamment en transmission radio [13], consiste à traiter le signal reçu dans un jeu de filtres adaptés (trois dans notre cas) de réponse impulsionnelle respective :

$$h_i(t, D/v, E/v) = e_i(-t, D/v, E/v) \quad \text{pour } i = 0, 1, 2 \quad (5)$$

Les paramètres de localisation relatifs à chaque capteur D_j/v et E_j/v n'étant pas connus a priori, il est nécessaire de balayer leurs valeurs sur une zone de surveillance prédéterminée.

3.2. Cas de la non-orthogonalité des bases.

Un filtre passe-bande de préblanchiment est souvent placé en amont du bloc de filtres adaptés. Les relations (4) et (5) gardent leur forme mais les bases de projection doivent être remplacées par les fonctions de Anderson filtrées par le blanchisseur. Nous noterons cette nouvelle base $ef(t)$. L'orthogonalité n'est plus assurée et l'estimation des projections du signal sur les bases $ef(t)$ risque d'être biaisée. La sortie $z_i(t)$ (omettons l'indice capteur j et la dépendance des paramètres de localisation pour le moment) du i ème filtre adapté s'écrit :

$$z_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\sum_k s_k ef_k(t) + n(t) \right) ef_i(t) dt \quad (6)$$

$$\text{qui peut également s'écrire : } z_i = \sum_k s_k \gamma_{ki} + n_i \quad (7)$$

n_i est la composante de bruit en sortie du filtre adapté, autrement dit, le bruit d'entrée $n(t)$ projeté sur chaque base, et γ_{ki} sont les coefficients d'intercorrélation des bases filtrées :

$$\gamma_{ki} = \int_{-\infty}^{+\infty} ef_k(t) ef_i(t) dt \quad (8)$$

Si $\Gamma = \{\gamma_{ki}\}$ est la matrice d'intercorrélation des bases, on peut écrire, compte tenu de (7) :

$$z = \Gamma s + n \quad \text{où } z = \{z_i\}, n = \{n_i\} \quad (9)$$

On voit clairement que z donne une estimation correcte de s (à un facteur de normalisation près) si et seulement si la matrice Γ est diagonale, c'est-à-dire si les fonctions de base sont orthogonales. Dans le cas où les bases ne sont pas orthonormées (tronquées ou filtrées), il faut corriger les sorties des filtres adaptés par la transformation linéaire Γ^{-1} :

$$\hat{s} = \Gamma^{-1} z \quad (10)$$

Comme le bruit de sortie des filtres adaptés est centré ($E(n)=0$), compte tenu de (9) et (10), l'espérance de l'estimateur s'écrit :

$$E(\hat{s}/s) = E(\Gamma^{-1} \Gamma s + \Gamma^{-1} n) = s + E(n) \Gamma^{-1} = s \quad (11)$$

En conclusion, la correction Γ^{-1} en sortie des filtres adaptés permet une estimation non biaisée des coefficients dipolaires.

3.3. Estimation des paramètres D/v et E/v .

La matrice d'intercorrélation Γ étant symétrique, l'énergie dipolaire estimée est alors donnée par la relation suivante :

$$\mathcal{E} = \hat{s}' \hat{s} = z' (\Gamma^{-1})^2 z \quad (12)$$

Cette énergie nous sert de statistique suffisante pour la détection par comparaison à un seuil. Si on prend en compte le paramétrage temporel de D/v et E/v , l'énergie prise en compte à chaque pas de temps correspond à :

$$\mathcal{E}_{\max} = \text{Max}_{\{D/v, E/v\}} (\mathcal{E}(D/v, E/v)) \quad (13)$$

De même, l'estimée des paramètres de localisation les plus probables sur le capteur C_j correspond à l'énergie maximale :

$$(D_j/v, E_j/v)_{\text{est}} = \left\{ \begin{array}{l} (D/v, E/v) \text{ tel que} \\ \mathcal{E}_j(D/v, E/v) = \mathcal{E}_{\max_j} \end{array} \right. \quad (14)$$

La vitesse est fixée à une valeur arbitraire lors de la génération de la batterie de base. La gamme de balayage des paramètres de localisation doit être évaluée en fonction des dimensions de la zone et de la fourchette des vitesses possibles du véhicule :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{\min}/v_{\max} \leq D/v \leq D_{\max}/v_{\min} \\ E_{\min}/v_{\max} \leq E/v \leq E_{\max}/v_{\min} \end{array} \right. \quad (15)$$

3.4. Un calcul en temps réel.

En pratique, les calculs d'intercorrélation sont numériques et la dimension de la batterie de bases de projection peut être pénalisante. Typiquement, pour un problème plan, on a besoin : d'au moins 3 capteurs, de 50 x 50 valeurs (ou plus), de D/v et E/v , de 3 fonctions de base et d'une fenêtre de projection intégrant un passé de 300 échantillons. Au total, près de 7 millions de multiplications-additions doivent être réalisées en double précision à une cadence supérieure au Hertz. Nous proposons un moyen simple pour réduire considérablement ce nombre d'opérations. Comme le véhicule est supposé se déplacer à vitesse constante, il existe une dualité entre les retards temporels et les distances E . Si l'on fait correspondre le pas de balayage $\Delta E/v$ des paramètres de troncature E/v au pas d'échantillonnage Te pour une vitesse v donnée, on s'aperçoit que :



$$z_i(kTe, n \Delta E/v) = z_i((k-1)Te, (n-1)\Delta E/v) - S((k-L)Te) \cdot e((n-L)\Delta E/v) + S(kTe) \cdot e(n \Delta E/v) \quad (15)$$

k est le numéro du dernier échantillon acquis, n est l'index de la troncature considérée et L est la longueur de la fenêtre d'intercorrélation. Le traitement numérique peut être exécuté de manière récursive grâce à la relation (15). La méthode est valable pour tous les calculs d'intercorrélation lorsqu'on ne connaît pas la date d'occurrence du signal. Dans l'exemple précédent, le nombre d'opérations tombe à 90000.

Le filtrage adapté nous a fourni pour chaque capteur une estimée de D/v qui doit rester constante au cours du temps si le passage d'un véhicule est détecté ainsi qu'une estimée de E/v qui a une évolution linéaire avec le temps. Une analyse régressive sur les évolutions linéaires de ces paramètres permet d'accorder un critère de confiance à l'estimation selon la dispersion des valeurs. Elle permet en outre d'extrapoler les estimations relatives aux capteurs pour lesquels le véhicule est sorti de la zone de surveillance.

4. Localisation finale : La triangulation élastique.

La propriété d'homothétie évoquée dans la seconde partie de cet exposé nous conduit à faire le raisonnement suivant avec deux capteurs C_1 et C_2 : pour trouver la position *src* (voir Figure n°1), il s'agit de mettre en correspondance les axes (cpa_1, src_1) et (cpa_2, src_2) des équerres respectives (cpa_j, src_j, C_j) en appliquant une homothétie de centre C_j et de rapport λ . On montre facilement que cette mise en correspondance géométrique aboutit à la détermination de quatre solutions possibles pour le cap de la trajectoire. La figure 2 illustre ce principe. P1, P2, P3 et P4 sont les points de localisation possible.

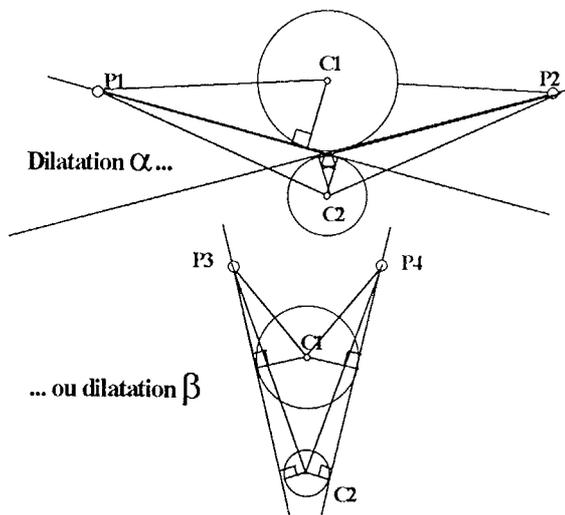


Figure 2 : Trajectoires possibles pour deux capteurs

Les rapports d'homothétie correspondants sont directement liés à la vitesse du véhicule. Avec trois capteurs (3 fois 4 trajectoires), cette « triangulation élastique » permet de déterminer la trajectoire commune et donc la position du véhicule. Connaissant le cap, la dépendance linéaire des coefficients s_j et du moment (voir [3]) permet de retrouver ce dernier. La figure 3 présente les résultats de la localisation sur des données réelles. Le véhicule réalise un passage du nord vers le sud avec un cap de 218° . Il faut souligner que la

localisation est correcte à partir du moment où le véhicule est bien engagé dans le réseau et que l'information sur tous les capteurs est suffisante.

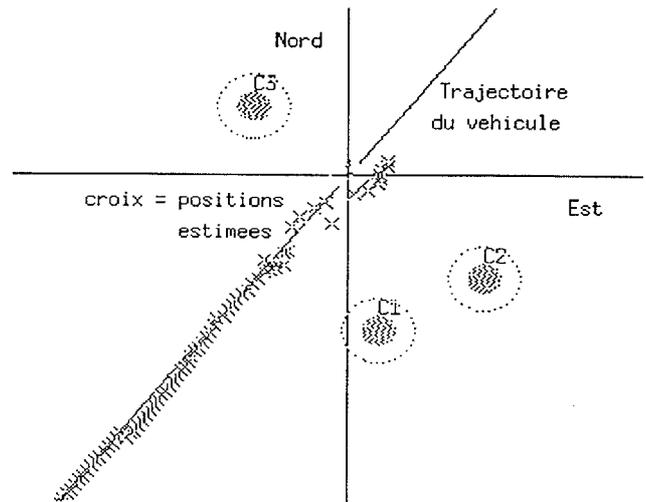


Figure : Localisation avec signaux réels.

5. Conclusions.

Dans cet article, nous avons montré qu'il est possible de retrouver la position et l'orientation d'un dipôle magnétique en mouvement rectiligne et uniforme. Une première étape de filtrage adapté multibase permet d'estimer deux paramètres géométriques d'éloignement au capteur considéré. Une deuxième étape réalise la fusion de ces estimées pour trouver la position du véhicule.

La méthode est mise en oeuvre pour un réseau de sondes magnétométriques RMN reliées à une chaîne d'acquisition et de traitement et donne des résultats très satisfaisants sur des données réelles.

REFERENCES

- [1] J. Scarzello, G. Usher, « A low power magnetometer for vehicle detection », *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-13, pp.1101-1103, 1977.
- [2] G. Ioannidis, « Identification of a ship or a submarine from its magnetic signature », *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-13, pp. 327-329, 1977.
- [3] R. Blanpain, « Traitement en temps réel du signal issu d'une sonde magnétométrique pour la détection d'anomalies magnétiques », Thèse de doctorat de l'INPG, 1979.
- [4] J. McFee, Y. Das, « The detection of buried explosive objects », *Can. J. Remote Sensing*, vol. 6, pp. 104-121, 1980.
- [5] F. Grant, G. West, *Interpretation theory in applied geophysics*.
- [6] W.M. Wynn, C.P. Frahm, P.J. Carroll, R.H. Clark, J. Wellhomer, M.J. Wynn. « Advanced superconducting gradiometer/magnetometer array and a novel signal processing technique », *IEEE Trans. on Magnetics*, vol MAG 11, n°2, mars 1975.
- [7] F.H. Raab, E.B. Blood, T.O. Steiner, H.R. Jones. « Magnetic position and orientation tracking system », *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol AES 15, 1979.
- [8] A.D. McAulay. « Computerized model demonstrating magnetic submarine localization », *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, mai 77.
- [9] E. Macioszczyk. « Problème inverse et localisation d'un dipôle à partir de mesures magnétiques scalaires (RMN) », *Projet de fin d'étude au LETI/CENG*, 1988.
- [10] J. McFee, Y. Das., « A total field magnetometer system for location and identification of compact ferrous objects », *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol 43, n°4, août 1994.
- [11] B. Flament, « Système de réduction de bruits pour réseau de magnétomètres haute sensibilité », Thèse de doctorat de l'INPG, 1992.
- [12] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory*. Wiley, Part III
- [13] T. Felhauer, A. Klein, P.W. Baier, « A low cost method for CDMA and other applications to separate non orthogonal signals », *IEEE Trans. on Communications*, vol 42, n°2/3/4, fev/mars/avr 1994.