

## METHODE ITERATIVE DE FILTRAGE DE POLARISATION: APPLICATION A LA GONIOMETRIE HF

L. BERTEL\*, A. EDJEOU\*, V. MASSOT\* et Y. ERHEL\*\*

\* Laboratoire Radiocommunications, URA CNRS 834- Université de RENNES 1

Campus de Beaulieu- 35042 Rennes Cedex- France

\*\* Ecoles de Coëtquidan - 56381 Guer Cedex- France

### RESUME

La goniométrie haute fréquence (3-30 MHz) est généralement effectuée en supposant que les ondes incidentes aux antennes sont polarisées circulairement. Les signaux utilisés sont construits à partir d'acquisitions en diversité de polarisation puis des algorithmes haute résolution sont mis en oeuvre. En réalité, la polarisation des ondes incidentes est elliptique. En partant de cette donnée, nous proposons une méthode de filtrage itératif adaptée à cette polarisation et qui améliore les performances de la goniométrie.

### ABSTRACT

The HF (3-30 MHz) goniometry is generally operated supposing that the incoming skywaves are circularly polarized. The used signals are built from the acquisitions in diversity polarization, hence the high-resolution algorithms are performed. Really, the polarization of incident waves is elliptic. Taking in account this fact, we suggest a reiterated method of filtering matched to this polarization and which improves the achievements of the direction finding.

#### 1. Introduction:

Les liaisons radioélectriques par voie ionosphérique se font par des trajets multiples auxquels sont associés deux modes de polarisation (O: ordinaire et X: extraordinaire). Les signaux correspondant à ces différents trajets ou modes sont généralement fortement corrélés. Des articles antérieurs [1]-[2] ont décrit un modèle de signal, qui s'appuie sur une connaissance a priori de la réponse des antennes utilisées.

Soit  $\chi_i$  le signal ramené en bande de base à la sortie du capteur  $i$ , on pose [2]:

$$\chi_i = \sum_k A_k \cdot e^{j\theta_k} \cdot F_{ik} + n_i$$

où  $A_k$  est l'amplitude relative au mode  $k$

$\theta_k$  la phase généralisée

$F_{ik}$  la réponse du capteur  $i$ , pour le mode  $k$

$n_i$  représente un bruit additif.

En bande étroite,  $\theta_k = \omega_k t + \phi_k$  où  $\omega_k$  est la pulsation correspondant au mode  $k$  et  $\phi_k$  la phase à l'origine.

Plus précisément, pour des ondes suivant des trajets différents, les signaux reçus sont affectés d'un doppler variable d'un mode à l'autre. Toutefois, pour un trajet donné, les deux modes appelés "O" et "X" peuvent être voisins. Aussi, pour séparer les signaux, est-il nécessaire d'appliquer un filtrage de polarisation avant tout traitement ultérieur. Nous présentons dans les paragraphes suivants ce type de filtrage.

#### 2. Filtrage de polarisation industriel:

Une évaluation des performances attendues de goniomètres HF haute résolution a été réalisée en supposant que la polarisation des modes de propagation était circulaire [2]. Ceci conduit à un filtrage de polarisation que nous dénommons "industriel" parce qu'il est utilisé dans de nombreux systèmes opérationnels. Ce filtrage nécessite l'utilisation de capteurs à diversité de polarisation. Dans nos applications, chaque capteur est constitué de deux cadres croisés verticaux placés dans les directions Est-Ouest (EW) et Nord-Sud (NS).

A partir des signaux  $\chi_{iEW}(t)$  et  $\chi_{iNS}(t)$  du capteur  $i$  et après transformée de Hilbert, on construit deux signaux analytiques filtrés  $S_{iO}(t)$  et  $S_{iX}(t)$  correspondant aux modes "O" et "X". Une pondération simple donne :



$$S_{iX,O}(t) = \chi_{iEW}(t) \pm j\chi_{iNS}(t)$$

De fait, la polarisation des ondes incidentes dépend des angles d'arrivée, de la fréquence et de la localisation de la station de réception [3]. Ce filtrage n'est alors efficace que pour certaines directions d'arrivée. De plus, le module de la réponse des capteurs n'est pas uniforme; il est fonction de la direction d'arrivée et de la nature du sol au voisinage des capteurs; cette pondération très simple limite les performances du filtrage "industriel" qui introduit donc des erreurs sur les estimations des angles d'arrivée et une incertitude sur la réelle présence des modes détectés. Pour illustrer ceci, nous appliquons cette méthode de filtrage de polarisation à deux types de goniomètres haute résolution:

- le premier s'appuie sur une technique de filtrage fréquentiel non linéaire associée à une procédure d'interférométrie (méthode 1 décrite dans [2] et [7]). Il utilise quatre capteurs disposés au sommet d'un carré. Cette procédure est appliquée sur un exemple de propagation par 3 modes: deux modes "X" (X1: azimut (az) =130°, élévation (el) =30°; X2: az=130°, el=60°) et un mode "O" (az=130°, el=62°). Dans cette simulation, nous introduisons une faible élévation pour le mode X1 et un doppler intermode entre X2 et O très réduit du fait des trajets voisins suivis, en accord avec le modèle de signal défini en [2].

La figure 1a alors obtenue montre que le système détecte 4 modes au lieu de 3. Ceci est dû à l'inadéquation filtrage-propagation.

- le second se base sur l'algorithme MUSIC utilisé en bande étroite (méthode 2) et s'appuie sur un réseau supposé linéaire constitué de huit capteurs équidistants et orienté Nord-Sud.

La figure 2a est relative à ce réseau sur lequel 4 ondes incidentes sont attendues (2 modes "X" el=30°, el=60° et 2 modes "O" el=32°, el=62°). L'algorithme MUSIC en détecte 4 mais avec des élévations estimées légèrement entachées d'erreurs. Dans cette dernière simulation, l'azimut estimé est supposé exact. La détermination des élévations pour des azimuts voisins de 90° ou 270° est impossible compte tenu de l'orientation du réseau.

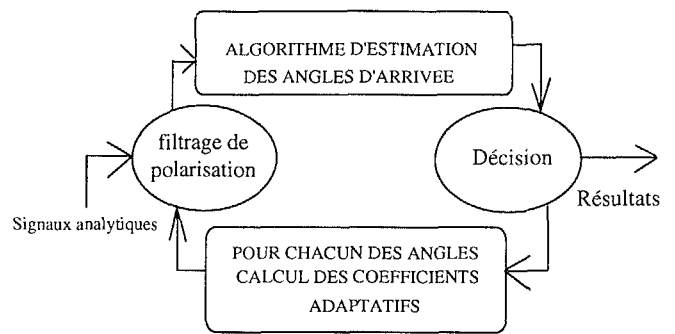
Ce filtrage "industriel" est réalisé techniquement en effectuant la somme de deux signaux réels après

déphasage de  $\pm \frac{\pi}{2}$  de l'un deux selon le mode filtré. Il nécessite donc un nombre réduit de récepteurs (un pour deux antennes à diversité). De cette technique, il résulte toutefois des estimations qui restent voisines des valeurs introduites en simulation malgré des erreurs et la détection de modes parasites par la méthode 1.

Ces imperfections nous conduisent à proposer un filtrage itératif qui s'appuie techniquement sur le même nombre d'antennes mais deux fois plus de récepteurs et sur l'introduction de pondérations en amplitude et en phase.

### 3. Filtrage de polarisation itératif:

En 1981 Compton [4] a déjà montré que l'on pouvait construire un filtre à partir de capteurs à diversité de polarisation si l'on connaît celle des ondes incidentes. Il a évalué les performances et limites de ce type de filtrage. En HF, cette méthode a déjà été appliquée [5] en calculant la polarisation des ondes incidentes à partir des prévisions de propagation et non des premières estimations d'angles comme nous le proposons dans cet article : nous déterminons la polarisation des ondes à partir des estimations des angles d'arrivée obtenues par filtrage "industriel" en utilisant les conditions aux limites de Budden [6]. Les calculs montrent alors que cette polarisation est généralement elliptique [3]. La procédure itérative ainsi initialisée, est décrite par le schéma suivant:



On calcule pour *chaque mode détecté* par filtrage "industriel" les coefficients complexes  $\alpha_O$  et  $\alpha_X$  qui vont filtrer les signaux correspondants à ces modes. Les signaux analytiques relatifs aux modes "X" et "O" sont alors construits:

$$S_{iX,O}(t) = \chi_{iEW}(t) + \alpha_{X,O} \cdot \chi_{iNS}(t)$$

avec  $\alpha_O = -\frac{F_{XEW}}{F_{XNS}}$ ,  $\alpha_X = -\frac{F_{OEW}}{F_{ONS}}$  où F représente la réponse du capteur considéré (EW ou NS) pour le mode (O ou X).

Dans cet article, cette méthode qui est optimum dans le cas de 2 modes d'élévation voisine et de polarisation différente, est utilisée même si le nombre de modes est supérieur à 2. Les deux techniques de goniométrie peuvent ensuite être appliquées sur ces signaux filtrés. Les figures 1b et 2b illustrent les résultats obtenus dans les cas déjà simulés précédemment.

La méthode 1 entraîne ainsi la disparition du mode parasite et une amélioration sensible de l'estimation des valeurs d'angle d'arrivée (figure 1b).

La méthode 2 fournit des estimations d'angles d'arrivée qui convergent rapidement vers les valeurs exactes (figure 2b) en deux itérations maximum.

En simulation, la procédure de filtrage itératif réduit donc notablement les erreurs d'estimation des angles d'arrivée voire de détection du nombre de modes incidents dans le cas de la méthode par analyse fréquentielle non linéaire.

**4. Exemples de résultats de traitement de données réelles:**

Un système expérimental implanté à la station de Monterfil (Rennes), permet d'acquérir des signaux sur 4 capteurs (8 cadres croisés) associés à 8 récepteurs. Plusieurs dispositions de capteurs sont possibles. Nous avons ainsi pu tester les 2 méthodes précédentes, le rapport signal sur bruit restant toujours supérieur à 40 dB. De façon générale, les résultats obtenus en employant la méthode 1 par filtrage itératif éliminent certains modes conformément aux calculs théoriques et améliorent les valeurs des azimuts et élévations; ce dernier point est confirmé par les prévisions de propagation qui sont valables uniquement pour des trajets isotropes (modes O et X confondus).

Pour illustrer l'action des filtrages industriel et itératif, une goniométrie est réalisée sur une liaison Lisbonne-Monterfil (distance = 1180 km, fréquence de l'émetteur = 9.74 MHz, azimut géométrique = 210°) et nous donnons deux exemples :

- exemple 1: l'enregistrement des signaux est fait le 13/03/93 à 10 h 30 TU. Par filtrage industriel, on obtient: (mode 1: az = 202.4°, el = 23.7° et mode 2: az = 207.5°, el = 16.6°). Par filtrage itératif après deux itérations sur les deux modes précédents, on trouve (mode 1: az = 205.4°, el = 22.8° et mode 2: az = 208.1°, el = 18.3°). Compte tenu de l'inclinaison des couches ionisées, l'azimut observé doit être inférieur à l'azimut géométrique; c'est ce qu'on constate ici avec des écarts raisonnables (<5°) et les élévations restent voisines de celles prévues (18° en mode isotrope).

- exemple 2: pour la même liaison ( le même jour mais à 7h 30 TU), apparaissent deux modes qui, en filtrage industriel, conduisent à : (mode 1: az =228°, el =20.7 ° et mode 2: az =198 °, el =3.5°). Après deux itérations, on obtient (mode 1: az =219.8°, el = 20.8° et mode 2: az =206.2°, el =18.6°); ce qui est conforme aux prévisions de propagation pour cette heure (élévation environ égal à 22°); on rectifie ainsi une valeur certainement erronée (élévation =3.5°).

Dans le cas de la seconde méthode, nous nous sommes limités à un nombre d'ondes incidentes égal à 2 ou 3 conformément aux conditions d'application de l'algorithme MUSIC.

Une goniométrie est faite sur un des modes reçus et la figure 5 montre le pseudo-spectre (fourni par l'algorithme MUSIC) obtenu dans deux cas:

- après filtrage de polarisation "industriel"
- après filtrage itératif.

Nous constatons sur la figure 3 une amélioration de la résolution par filtrage itératif.

**5. Conclusion:**

Les résultats théoriques et expérimentaux montrent que le filtrage de polarisation itératif améliore l'estimation des angles d'arrivée en goniométrie haute fréquence. Ce filtrage nécessite la connaissance a priori de la réponse des

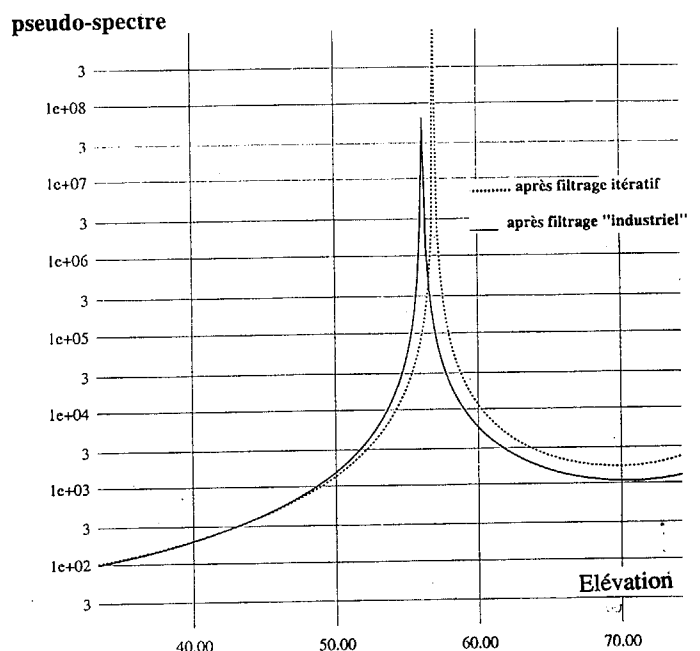
antennes. L'amélioration des performances d'un tel filtrage passe par une meilleure connaissance de cette réponse, par l'augmentation du nombre d'antennes par capteur, par la recherche d'algorithmes itératifs plus performants et par l'étude de l'influence du bruit dans cette technique.

**Remerciements:**

Ce travail a été soutenu par la DRET (contrat n° 90473). Les auteurs tiennent également à remercier J.L. ROGIER, C. DEMEURE et A. FERREOL (Thomson CSF/RGS/STS) pour leur aide au cours de cette étude.

**REFERENCES:**

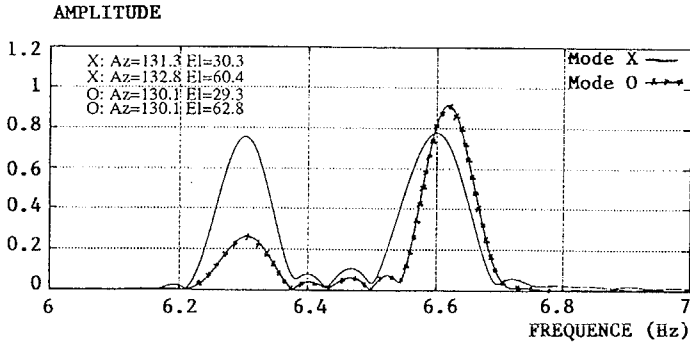
- [1] Rogier JL, Multedo G, Bertel L, Baltazart V, "Ionospheric multipaths separation with a high resolution direction finding algorithm mapped on an experimental system", IEE Proceedings, 339, juillet 1991.
- [2] Baltazart V, Bertel L, Fleury R, "Influence de la propagation sur la goniométrie haute fréquence et la localisation à station unique", AGARD, 50th symposium of the electromagnetic wave propagation panel on radiolocalization techniques, Londres, 1-5 juin 1992.
- [3] Bertel L., Rojas J. V., Cole D., Gourvez P. "Polarisation and ground effects on HF receiving antenna patterns", Annales des Télécommunications, 44, n°7-8, 1989.
- [4] Compton R.T. JR., "On the performance of a polarisation sensitive adaptative array", IEEE transactions on antennas and propagation, vol. AP-29, n° 5, September 1981.
- [5] Bertel L., Rojas J. V., "Antennes HF adaptées à la polarisation des signaux reçus: exemples de résultats", J.I.N.A., Nice, 1986.
- [6] Budden K. G., "Propagation of Radio Waves", Cambridge University Press, 1985.
- [7] EDJEU A., BERTEL L., MASSOT V., "Identification des modes et trajets de propagation sur des liaisons HF à l'aide d'un goniopolarimètre", à paraître dans AGARD, 53rd symposium and panel meeting on multiple mechanisms propagation paths, Rotterdam, 4-8 october 1993.



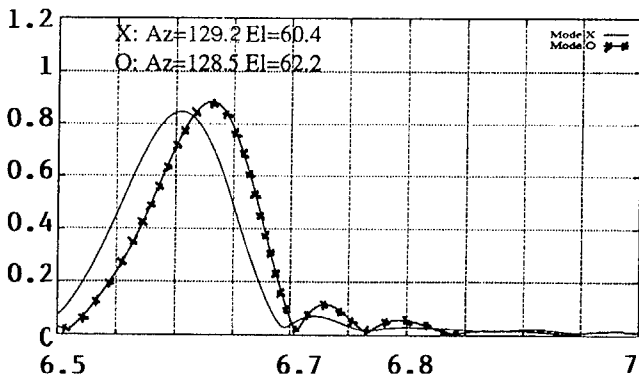
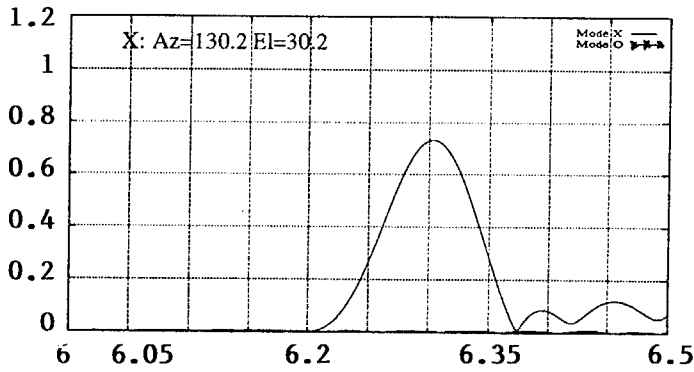
**[figure 3] pseudo-spectres fournis par MUSIC**



[figure 1]: Estimation par la méthode du filtrage fréquentiel non linéaire.

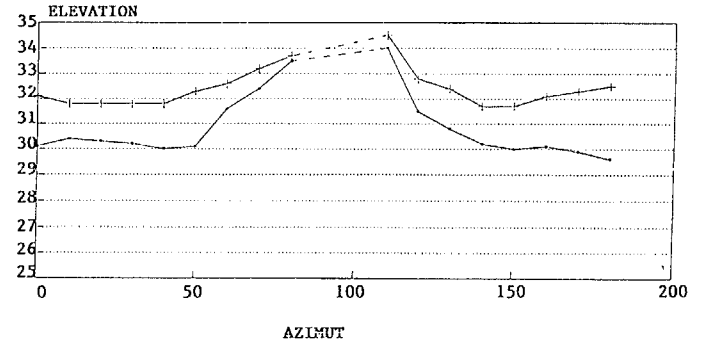
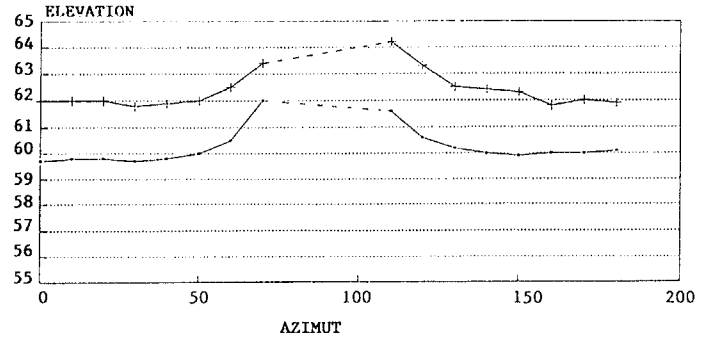


[figure 1a] Séparation des modes par filtrage de polarisation INDUSTRIEL.

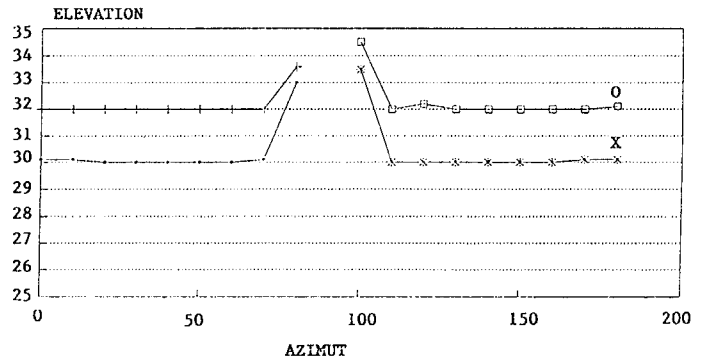
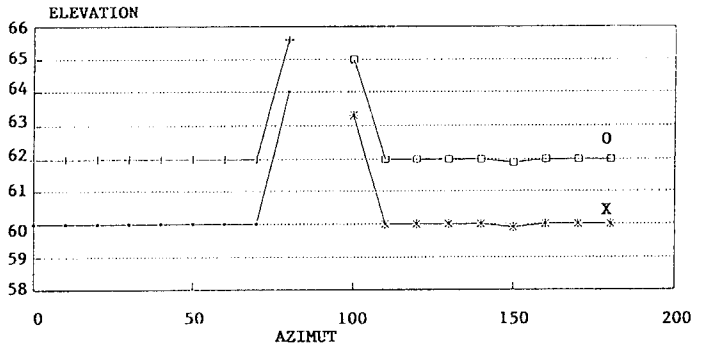


[figure 1b] Séparation des modes par filtrage de polarisation ITERATIF.

[Figure 2]: Estimation par l'algorithme MUSIC.



[figure 2a]: Elévation estimée après filtrage de polarisation INDUSTRIEL.



[figure 2b]: Elévation estimée après filtrage de polarisation ITERATIF (une itération).