

# Liaisons ionosphériques HF avec réception multi-antennes : Résultats expérimentaux avec et sans interférence

PASCAL CHEVALIER<sup>1</sup>, FRANÇOIS PIPON<sup>1</sup>, DIDIER LANDI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Thales-Communications, EDS/SPM, 160 Bd Valmy, 92704 Colombes

<sup>2</sup> CTSN, Avenue de la Tour Royale, BP 40915, 83050 Toulon cedex

<sup>1</sup> [pascal.chevalier@fr.thalesgroup.com](mailto:pascal.chevalier@fr.thalesgroup.com), [francois.pipon@fr.thalesgroup.com](mailto:francois.pipon@fr.thalesgroup.com), [gilles.rogerieux@fr.thalesgroup.com](mailto:gilles.rogerieux@fr.thalesgroup.com)  
<sup>2</sup> [didier.landi@dga.defense.gouv.fr](mailto:didier.landi@dga.defense.gouv.fr)

Résumé - Les radiocommunications ionosphériques HF (3 – 30 Mhz) permettent des liaisons à grande distance par réflexion des ondes sur les couches de l'ionosphère. La congestion spectrale élevée et l'étalement temporel important du canal HF, limitent le débit actuel des liaisons à des valeurs maximales comprises entre 9.6 et 19.2 Kbits/s. L'essor futur des radiocommunications HF, via la transmission multimédia ou IP, nécessite un accroissement des débits avec un objectif de 64 Kbits/s dans les prochaines années. Dans ce contexte, l'utilisation de plusieurs antennes en réception, couplées à un traitement d'antenne judicieux, constitue une solution très prometteuse aux problèmes posés par la montée en débit des liaisons HF. L'objectif de cette contribution est de présenter une synthèse des résultats relatifs à l'évaluation expérimentale du gain sur le bilan de liaison apporté par le traitement d'antenne en réception pour des liaisons ionosphériques HF de type STANAG 4285, brouillées et non brouillées, entre des points distants de 400 Km (Cholet – Gennevilliers) et de 900 Km (Toulon – Coulommiers).

Abstract - HF ionospheric radiocommunications (3 – 30 Mhz) allow to communicate over very high ranges by exploiting the reflection of waves on the ionosphere. The high spectral congestion jointly with the potential high delay spread of the propagation channel, limit the current bit rate of HF links to maximal values comprised between 9.6 and 19.2 Kbits/s. The future development of HF radiocommunications will be based on IP and multimedia transmission. In this context, the exploitation of several antennas at reception, coupled with a judicious array processing, represent a very promising solution to the problems associated with the bit rate increase of HF links. The aim of this contribution is to present a synthesis of the results related to the experimental evaluation of the gain on the link budget obtained from the exploitation of an array processing at reception for HF ionospheric links using STANAG 4285, both in the presence and in the absence of interferences. Both a middle range (400 Km from Cholet and Gennevilliers) and a long range (900 Km from Toulon and Coulommiers) of transmission are considered.

## 1 Introduction

Les radiocommunications ionosphériques HF permettent l'établissement de liaisons à grande distance (plusieurs milliers de kilomètres) par réflexion des ondes sur les couches de l'ionosphère. Toutefois, la congestion spectrale élevée de la bande HF conjointement à l'étalement temporel important du canal HF, pouvant atteindre plusieurs ms, limitent la bande et donc le débit actuel des liaisons HF à des valeurs maximales comprises entre 9.6 et 19.2 Kbits/s. L'essor futur des radiocommunications HF se basera sur le développement de nouveaux services tels que la transmission multimédia ou IP, lesquels nécessitent un accroissement des débits de transmission avec un objectif de 64 Kbits/s dans les prochaines années.

Dans ce contexte, l'utilisation de plusieurs antennes en réception, couplées à un traitement d'antenne judicieux, constitue une solution très prometteuse aux problèmes posés par la montée en débit des liaisons HF. En effet, le traitement d'antenne permet, à puissance émise et à bande passante constante, non seulement une amélioration du bilan de liaison par exploitation d'une diversité spatiale et/ou de polarisation en réception mais également un accroissement de la robustesse des liaisons face aux interférences, que celles-ci soient volontaires (brouillage hostile) ou involontaires (bruits industriels, atmosphériques ou liés à la congestion spectrale élevée). Cette amélioration du bilan de liaison permet donc non seulement l'augmentation des débits

de transmission, mais aussi la fiabilisation des liaisons, une diminution de la puissance émise ou encore une gestion plus souple de l'allocation de fréquences.

L'objectif de cette contribution est de présenter une synthèse des résultats relatifs à l'évaluation expérimentale du gain sur le bilan de liaison apporté par le traitement d'antenne en réception pour des liaisons ionosphériques HF de type STANAG 4285, brouillées et non brouillées, entre des points distants de 400 Km (Cholet – Gennevilliers) et de 900 Km (Toulon – Coulommiers). Le traitement met en œuvre une étape de synchronisation robuste aux interférences [1], suivie d'une étape de démodulation en sortie de variantes du modem ST introduit dans [2]. Les résultats présentés démontrent en vraie grandeur tout l'intérêt d'un traitement d'antenne en réception pour les liaisons ionosphériques HF ainsi que les meilleures performances obtenues avec la diversité de polarisation par rapport à la diversité d'espace.

## 2 Hypothèses pour les expérimentations

### 2.1 Contexte

On considère une liaison ionosphérique HF entre un point d'émission E et un point de réception R situé à grande distance de E, comme cela est illustré par la figure 1. La liaison est perturbée par un bruit global constitué de bruits thermique, atmosphérique, industriels et d'interférences potentielles. Au point de réception R, les observations sont collectées par une

antenne réseau comprenant  $N$  capteurs. L'objectif est de démoduler dans les meilleures conditions les symboles transmis.

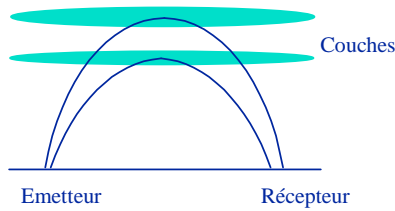


Figure 1 – Liaison ionosphérique entre E et R

## 2.2 Réseau de capteurs

Les capteurs élémentaires considérés pour les expérimentations sont des cadres croisés, notés A et B, polarisés orthogonalement (Figure 2), à partir desquels les sorties  $A + jB$  et  $A - jB$  peuvent être construites. Plusieurs réseaux de capteurs sont considérés et correspondent à des réseaux à  $N = 1, 2$  ou  $4$  sorties, respectivement à diversité d'espace, à diversité de polarisation et à diversité d'espace et de polarisation.



Figure 2 – 2 Cadres croisés

## 2.3 Forme d'onde

La forme d'onde exploitée est celle du standard 4285. Elle correspond à une forme d'onde mono-porteuse dont les symboles utiles sont modulés en QPSK et dont les symboles de synchronisation sont en BPSK.

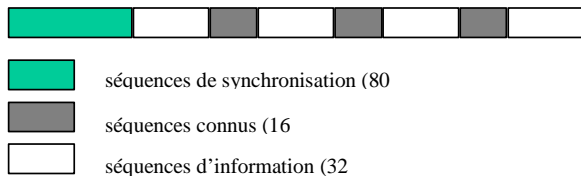


Figure 3 – Trame 4285

La structure d'une trame 4285 est présentée à la figure 3. Elle est composée d'une séquence de synchronisation de 80 symboles connus, de 3 ensembles de 16 symboles connus pour le suivi de canal et de 4 ensembles de 32 symboles d'information. Le débit vaut 2400 Bits/s. Il n'y a pas de codage pour les expérimentations.

## 2.4 Traitements

Les signaux reçus en entrée des CANs sont échantillonnés de manière synchrone, puis interpolés de manière à obtenir un nombre entier d'échantillons par symbole. Le traitement conventionnel de synchronisation multi-voies, robuste aux interférences, décrit dans [1] est d'abord mis en œuvre, suivi du traitement de démodulation ST décrit dans [2] et d'une variante de celui-ci. Après un filtrage adapté à la forme

d'onde, ce traitement ST met en œuvre un filtre spatial  $w$  dont les sorties,  $y(nT) = w^H x(nT)$ , où  $T$  est la durée symbole et  $x(t)$  le vecteur observation, sont les entrées d'un égaliseur MMSE DFE mono-capteur, adapté séparément du filtre. Le filtre  $w$  est tel que sa sortie minimise la distance en moyenne quadratique à la séquence de référence  $s(t)$  filtrée par un filtre  $u$  dont la réponse est optimisée conjointement au filtre spatial (Figure 4). On parle alors de Filtre Adapté Spatial à Référence Filtrée (FASRF). Pour éviter la solution triviale  $w = 0$  et  $u = 0$ , une contrainte sur  $u$  s'impose. Deux contraintes sont considérées et correspondent respectivement à la contrainte de norme  $u^H u = 1$  (FASRFN) et à la contrainte linéaire  $c_i^H u = 1$  où  $c_i = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$  où le 1 est en  $i$ ème position (FASRFPA pour pointage). La taille des filtres est optimisée en fonction de l'étalement maximal du canal.

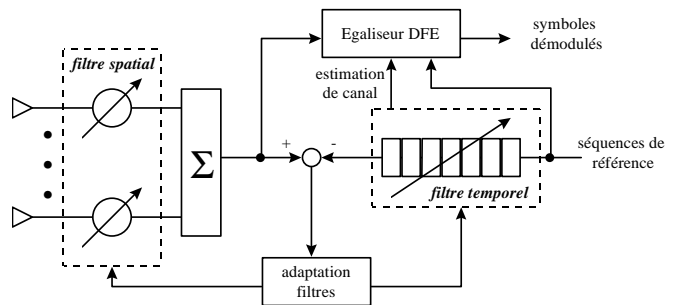


Figure 4 – Récepteur multi-capteurs MMSE à référence filtrée

## 3 Liaisons Cholet-Gennevilliers

### 3.1 Hypothèses

On considère des liaisons Cholet-Gennevilliers, soit une distance d'environ 400 Kms entre E et R. La fréquence porteuse est de 10.3106 MHz. Des acquisitions de signal + bruit, de brouilleur + bruit et de bruit seuls sont effectuées et combinées pour créer des niveaux arbitraires de rapport respectivement signal sur bruit et brouilleur sur signal. Deux antennes cadres croisés, disposées sur le toit d'un bâtiment de Gennevilliers et espacées d'environ 40 m, sont considérées, ce qui permet d'exploiter jusqu'à  $N = 4$  sorties.

### 3.2 Liaison sans interférence

La figure 5 montre, pour l'une de ces expérimentations, l'évolution au cours du temps de la fonction de synchronisation. On y décèle une propagation via un seul trajet. La Figure 6 montre l'évolution au cours du temps (sur une durée de 83 s) de la puissance moyenne, estimée sur 2s, des 4 sorties possibles (sorties  $A + jB$  et  $A - jB$  des deux antennes cadres). Cette figure met en évidence un changement permanent de la polarisation de l'onde reçue, probablement dû au fading des modes Ordinaires et Extraordinaires. La figure 7 montre l'évolution du TEB en sortie des différents traitements en fonction du rapport signal sur bruit moyen à la réception ( $E_s/N_0$ ), pour différentes configurations du réseau de capteurs. Les configurations traitement-réseau considérées correspondent au traitement mono-capteur

(mono), au FASRFPA à diversité spatiale à 2 voies (voies 1 et 3), au FASRFPA à diversité de polarisation à 2 voies (voies 1 et 2), au FASRFPA à diversité d'espace et de polarisation à 4 voies, au traitement FASRFN à diversité d'espace et de polarisation à 4 voies.

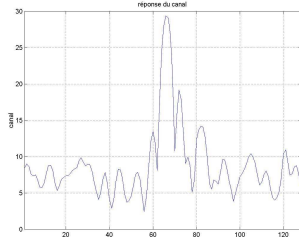


Figure 5 – Evolution temporelle de la fonction de synchronisation

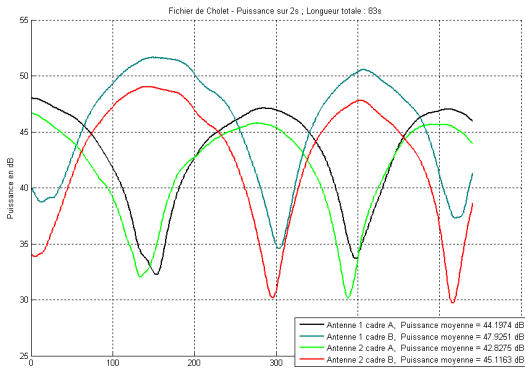


Figure 6 – Evolution de la puissance en sortie des différentes voies

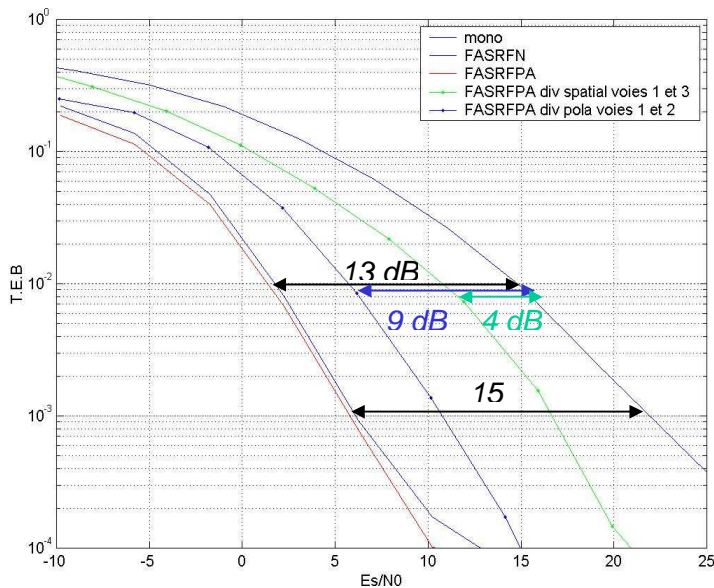


Figure 7 – TEB en fonction du Es/NO –  $N = 1, 2, 4$

Pour  $N = 2$  capteurs sélectionnés et un TEB de 0.01 sans codage, des gains de l'ordre de 4 dB sur le bilan de liaison sont obtenus pour une réception à diversité d'espace. Ils atteignent jusqu'à 9 dB pour une réception à diversité de polarisation. Pour des réseaux à 4 capteurs, exploitant les diversités d'espace et de polarisation, ces gains sont de l'ordre de 13 dB. La diversité de polarisation est donc plus importante que la diversité d'espace.

### 3.3 Liaison avec interférence

La figure 8 montre les mêmes variations que celles de la figure 7 mais pour une liaison brouillée pour laquelle

le brouilleur est 28.5 dB au dessus du signal utile. Cette figure montre une liaison passante dès que  $N = 2$  ainsi qu'une augmentation des performances avec le nombre de sorties considérées et lorsque la diversité de polarisation est exploitée.

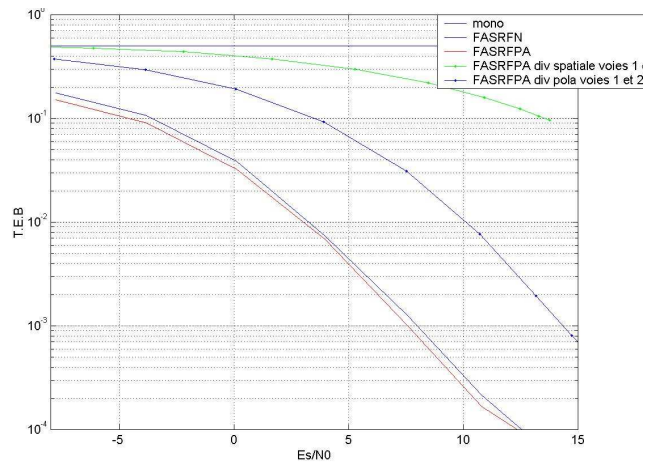


Figure 8 – TEB en fonction du Es/NO –  $J/S = 28 \text{ dB} - N = 1, 2, 4$

## 4 Liaisons Toulon-Coulommiers

### 4.1 Hypothèses

On considère des liaisons Toulon-Coulommiers, soit une distance d'environ 900 Kms entre E et R. La fréquence porteuse varie entre 6 et 11 MHz. Des acquisitions de signal + bruit et de bruits seuls sont également effectuées et combinées pour créer des niveaux arbitraires de rapport signal sur bruit. Quatre antennes cadres croisés sont exploitables et sont positionnées au sol selon le schéma de la figure 9. L'une des antennes s'est avérée défectueuse lors des expérimentations, ce qui a toutefois permis d'exploiter jusqu'à 6 voies de réception.

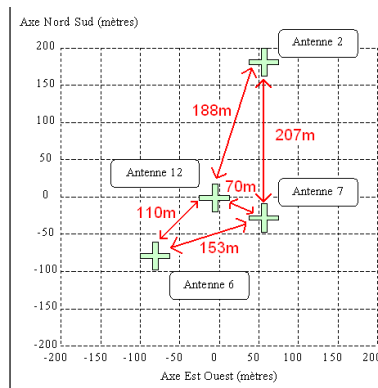


Figure 9 – Réseau de capteurs à Coulommiers

### 4.2 Liaison sans interférence

L'évolution au cours du temps de la fonction de synchronisation pour l'une de ces expérimentations montre une figure similaire à la figure 5. On y décèle une propagation via un seul trajet. La figure 10 montre l'évolution, sur une durée de 83 s, de la puissance moyenne, estimée sur 2s, des 6 sorties possibles (sorties A et B des trois antennes opérationnelles). On constate une variation lente au cours du temps de la puissance moyenne des signaux reçus sur chacune des 6

voies mais dans une même proportion, ce qui témoigne d'une part de la présence d'un fading lent sur les signaux reçus et d'autre part d'une absence de variation de la polarisation de l'onde reçue au cours du temps, ce qui n'était pas le cas pour les expérimentations Cholet-Gennevilliers. Ainsi, les cadres B des différentes antennes, plutôt adaptés à la polarisation inconnue de l'onde incidente, reçoivent plus que les cadres A de ces antennes, plutôt mal adaptés à la polarisation de l'onde incidente. Dans ces conditions, la figure 11 montre l'évolution du TEB en sortie du FASRFPA en fonction du rapport signal sur bruit moyen par capteur à la réception pour différentes configurations du réseau de capteurs. Les configurations de réseaux considérées correspondent respectivement à la voie qui reçoit le plus (sortie 2B), à celle qui reçoit le moins (sortie 12A), à une réception bi-voies en diversité d'espace plutôt adaptée (sorties 2B et 12B) ou plutôt non adaptée (sorties 2A et 12A) à la polarisation incidente, à une réception bi-voies en diversité de polarisation (sorties 2A et 2B), à une réception à 4 voies en diversité d'espace et de polarisation (sorties 2A, 2B, 12A et 12B).

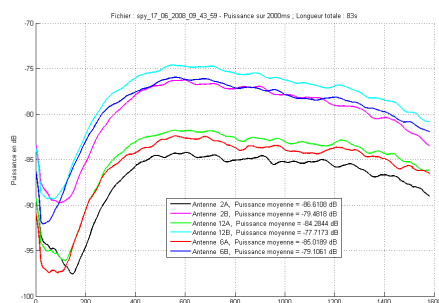


Figure 10 – Evolution de la puissance en sortie des différentes voies

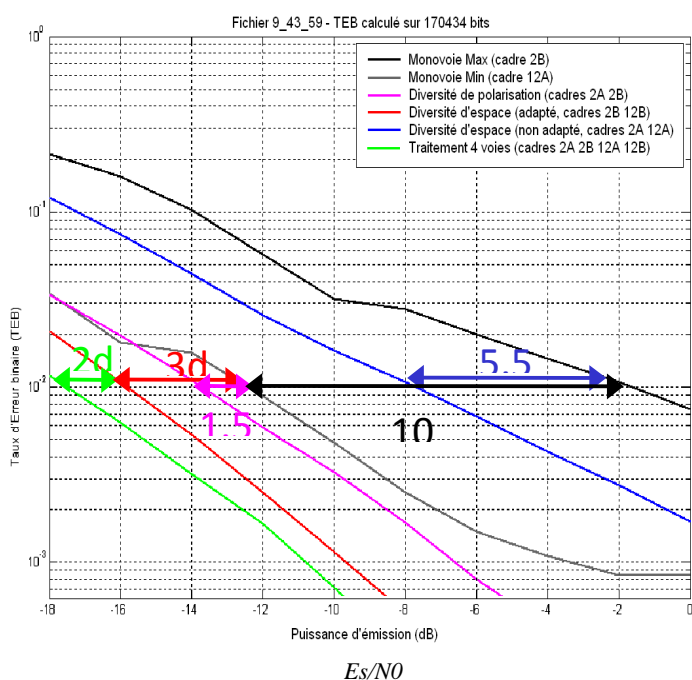


Figure 11 – TEB en fonction du  $Es/No - N = 1, 2, 4$

Pour un choix de type de cadres donné (A ou B) et pour un TEB de 0.01, une réception avec diversité d'espace génère des gains en SNR variant entre 3 et 5.5 dB, ce qui montre une relativement faible diversité d'espace

sur le fading. Par ailleurs, l'exploitation d'une diversité de polarisation en réception permet de récupérer les deux composantes de polarisation de l'onde incidente quelque soit la polarisation, constante et inconnue, de celle-ci. Ainsi, une réception bi-voies avec A et B est toujours meilleure qu'une réception avec deux voies non adaptées (A, A) mais s'avère moins bonne qu'une réception avec deux voies adaptées (B, B). Enfin, une réception avec 4 voies couplant diversité d'espace et de polarisation permet de récupérer les deux composantes de polarisation de l'onde incidente et de bénéficier en plus d'une diversité d'espace (gain de 2 dB) sur les capteurs les mieux adaptés.

## 5 Conclusion

Les résultats expérimentaux présentés dans cet article démontrent en vraie grandeur tout l'intérêt d'un traitement d'antenne en réception pour les liaisons ionosphériques HF. Les diversités d'espace et de polarisation permettent toutes les deux d'améliorer le bilan de liaison. Toutefois, la diversité de polarisation permet, dans le pire des cas, de récupérer systématiquement les deux composantes de polarisation, inconnue, de l'onde incidente. Dans les cas les plus favorables, relatifs à une onde incidente dont la polarisation change en permanence, elle permet l'obtention de gains en diversité avoisinant 9 à 10 dB à partir de 2 voies. En outre, la capacité de réjection d'interférences des modems ST mis en œuvre a été démontrée expérimentalement.

L'amélioration du bilan de liaison par traitement d'antenne peut être utilisée à des fins opérationnelles telles que l'augmentation du débit à bande et à puissance émise constantes ; la diminution de la puissance d'émission, et donc l'augmentation de la discrétion, à performances constantes ; la possibilité de liaisons dissymétriques entre des stations tactiques et des infrastructures à performances constantes dans les deux sens ; la fiabilisation des liaisons à puissance émise et à débit constants

La robustesse aux interférences des modems ST peut également être utilisée à des fins opérationnelles telles que la protection contre le brouillage hostile, l'augmentation du nombre de canaux utilisables en utilisant des canaux occupés (discrétion) ou en permettant une allocation de fréquences plus souple (procédures de recherche de canaux libres moins contraignantes).

## 6 Références

- [1] P. CHEVALIER, F. PIPON, F. DELAVEAU, "Second order optimal array receiver for synchronization of BPSK, MSK and GMSK signals corrupted by noncircular interferences", *Hindawi Publishing Corporation, Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, Vol 2007, Article ID45605, 16 pages, DOI 10.1155/2007/45605, 2007.
- [2] F. PIPON, P. CHEVALIER, P. VILA, J.J. MONOT, "Joint spatial and temporal equalization for channels with ISI and CCI - Theoretical and experimental results for a base station reception", *Proc. IEEE SP Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC*, Paris (France), pp. 309-312, April 1997.

