



**HAL**  
open science

# Développement d'un Réseau de Capteurs pour des Applications Aérospatiales : Topologie Réseau et Interface Radio

Julien Henaut, Daniela Dragomirescu, Robert Plana

► **To cite this version:**

Julien Henaut, Daniela Dragomirescu, Robert Plana. Développement d'un Réseau de Capteurs pour des Applications Aérospatiales : Topologie Réseau et Interface Radio. 2010. hal-00475639

**HAL Id: hal-00475639**

**<https://hal.science/hal-00475639>**

Preprint submitted on 22 Apr 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Developement d'un Réseau de Capteurs pour des Applications Aérospatiales : Topologie Réseau et Interface Radio

Julien HENAUT, Daniela DRAGOMIRESCU, Robert PLANA  
CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France  
Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

E-mail: jhenaut@laas.fr, daniela@laas.fr

## Résumé

*Ce travail vise à étudier et à développer des interfaces radio pour le développement de nouveaux réseaux de capteurs sans fils pour le secteur des essais aéronautiques et spatiaux. Il est démontré, notamment par plusieurs campagnes de mesure en conditions réelles, que le choix de la modulation MB-OFDM associé à une architecture réseau de type arbre permet de répondre aux spécifications. Le développement d'interfaces simplifiées et spécifiques sur FPGA permettent d'obtenir des débits de l'ordre de 100 Mbits.s<sup>-1</sup>.*

## 1. Introduction

Lors du développement d'un nouvel avion, la phase précédant l'obtention du certificat de navigabilité est basée sur de nombreux essais réalisés au sol ou dans les conditions de vol. L'une des formes d'essai les plus critiques est la mesure de la pression de l'air « autour » de l'aile. Ces mesures permettent à la fois de mesurer les deux composantes fondamentales de l'aérodynamisme : la portance et la trainée, et de valider les résultats de simulation et d'améliorer les données d'entrée des souffleries virtuelles pour les futurs développements.

Dans le domaine spatial, le lancement est l'une des phases les plus critiques pour les systèmes. En effet, les structures doivent faire face à des vibrations importantes et à un stress mécanique qui ne doivent endommager ni le satellite ni les instruments embarqués. Des essais sol particulièrement rigoureux sont donc réalisés préalablement au lancement afin de vérifier que la charge utile ne sera pas endommagée.

Des milliers de capteurs de pression ou des jauges de contrainte sont utilisés par les industriels du secteur pour ce type d'essais. Tous ces éléments sont aujourd'hui connectés entre eux par des fils. La première difficulté liée à ce type d'installation est le poids supplémentaire sur la structure. Ce dernier représentant une préoccupation importante en aéronautique, il est très délicat d'alourdir l'avion en ajoutant, le temps de l'essai, une quantité importante de câbles sur l'aile dans le seul but de connecter des capteurs entre eux. Il ne s'agit pas de la seule contrainte associée au déploiement de ces réseaux de capteurs. Le déploiement de ces systèmes de

mesure filaire, engendre un cout important à la fois en raison du prix des câbles mais surtout de la très longue immobilisation de l'appareil nécessaire à l'installation du système. Cette contrainte financière très lourde est de plus en plus difficile à supporter pour les industriels.

Le remplacement des réseaux de mesure par des réseaux de capteurs sans fil (figure 1) permet à la fois de limiter les difficultés d'installation, mais aussi d'augmenter le nombre de points de mesure. Malheureusement les verrous technologiques sont encore très nombreux.

Avec l'identification de sources d'énergie autonomes suffisamment efficaces dans les environnements concernés, le choix d'une topologie réseau et le développement d'interfaces radio basse consommation, fiables et répondant aux attentes en termes de débits constitue un défi majeur.



FIGURE 1. Exemple de réseau de capteur pour la mesure en vol du profil de pression d'une aile

Après le choix du type de modulation et d'une architecture du réseau, les résultats des campagnes de mesures en conditions réelles sont présentés. Avant de conclure, le développement de la partie numérique d'une interface radio reposant sur une technologie MB-OFDM est détaillé.

## 2. Choix de l'architecture du réseau et de la modulation

### 2.1. Une modulation OFDM haut-débit

L'une des principales attentes des aérodynamiciens vis-à-vis du passage aux réseaux sans fil est la possibilité d'accroître le nombre de points de mesure (objectif de plus de 400 capteurs par aile). Ce point, associé

à l'exigence d'un fort taux de rafraîchissement des mesures, engendre le besoin d'interface radio haut débit ( $100 \text{ Mbits.s}^{-1}$ ). Le réseau de capteurs étant un système embarqué et auto alimenté, il est impératif d'utiliser des architectures d'émetteurs-récepteurs aussi simples que possible.

Mais, dans l'industrie aérospatiale où la sécurité est l'impératif premier, il est extrêmement difficile d'obtenir l'ouverture d'une nouvelle bande de fréquence autorisant un niveau d'émission compatible avec les modulations bande étroite classiques de type FSK ou PSK [1]. C'est pourquoi il est impératif de considérer des modulations de type Ultra Large Bande (ULB). L'utilisation d'une bande large permet en effet une réduction de la puissance d'émission à des niveaux extrêmement bas (inférieur à  $-41,3 \text{ dBm.MHz}^{-1}$ ) qui ne perturberont pas les éléments utilisant la même bande de fréquence comprise entre 6 GHz et 8,5 GHz.

Dans le domaine de l'ULB, il existe deux candidats pour les interfaces radio : la technologie par impulsion (IR-UWB) et la méthode à porteuse orthogonale (MB-OFDM). La technologie par impulsion, présente de très nombreux avantages dont une consommation très faible. Mais la nécessité de disposer de convertisseurs numériques analogiques puissants [1] et sa faible efficacité spectrale font qu'une approche basée sur une technologie multi porteuse à porteuses orthogonales (MB-OFDM) est préférable [2].

## 2.2. Une architecture en arbre

La topologie la plus courante dans le déploiement de réseau de capteur est dite en « grille ». Tout noeud peut échanger avec n'importe quel autre noeud du réseau. Un noeud émettant les informations récoltées vers l'élément central du réseau (appelé concentrateur dans l'application visée et situé à l'intérieur de la cabine ou du poste opérateur) peut choisir de les transmettre vers n'importe quel autre noeud intermédiaire. Ce dernier les transmettra vers un autre noeud. L'opération est ainsi répétée jusqu'au concentrateur. Cette technique offre l'avantage d'un lien systématique entre l'élément communicant et le concentrateur ainsi que la redondance du lien de communication. Mais, dans le contexte d'un réseau où la synchronicité de la prise de mesure est un élément clé, la quantité de données gérée par un noeud à un instant précis doit être la somme de toutes les mesures des noeuds à portée radio. Dans ces conditions, la consommation d'énergie d'un noeud est très importante.

La topologie en anneau, n'est jamais considérée dans les réseaux de capteur car la défaillance d'un seul noeud romprait la structure et empêcherait toute communication.

La topologie en étoile où les noeuds ne peuvent communiquer qu'avec l'élément central (ici le concentrateur) pose le problème de la portée radio. En effet, il faut dans cette situation que la puissance d'émission de tous les noeuds soit suffisamment grande pour permettre à un capteur situé en bout d'aile de communiquer avec l'élément situé à l'intérieur de la cabine (maximum 30 mètres). La consommation est alors très grande et le

risque de dépasser la puissance maximale d'émission réglementaire est très fort.

La configuration offrant le meilleur compromis est la topologie en arbre (figure 2) où le réseau est divisé en trois niveaux. Le sommet (le concentrateur) est connecté à plusieurs éléments de niveau inférieur, appelés ici répéteurs. Ces répéteurs sont situés au niveau des prises 28 V de l'aile. Par conséquent, ils peuvent disposer d'une alimentation électrique et ainsi d'une puissance de calcul et d'une portée radio plus importantes. Les répéteurs sont connectés à plusieurs éléments de niveau inférieur, appelé noeuds et contenant chacun huit éléments sensibles. Les noeuds sont auto alimentés et ne disposent ainsi que de peu d'énergie. Mais ils sont toujours suffisamment proche d'un répéteur pour que les portées radio et donc la consommation soient faibles.

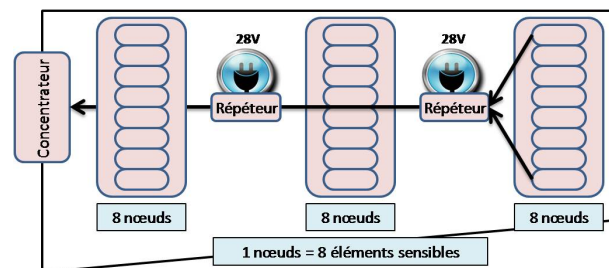


FIGURE 2. Topologie du réseau de communication

## 3. Mesure en conditions réelles

L'existence de kits de développement basé sur la modulation OFDM ultra large bande a permis la mise en place de nombreuses campagnes de mesure en conditions réelles pour évaluer le choix de cette modulation dans le contexte particulier de ce développement. Le kit de développement utilisé ici est le kit DV9110M (figure 3) de la société israélienne Wisair. Il se compose de deux cartes émettrice-réceptrice respectant la couche physique définie par le standard MB-OFDM (ECMA 368 [3]). La plupart des tests ont consisté à mesurer les taux d'erreur paquets dans différentes conditions.



FIGURE 3. Cartes utilisées pour les tests

### 3.1. Mesure sur avion

Une première campagne [4] de tests en laboratoire et en extérieur ayant pour objectif de valider le protocole

de mesure a permis de retrouver en environnement « bureau » les valeurs de simulation annoncées par les concepteurs de la norme MB-OFDM.



FIGURE 4. Campagne de mesure sur A340-600 : liaison Routeur - Noeud

La campagne réalisée sur A340-600 (figure 4) a permis d'évaluer les distances maximum atteignables dans la configuration avion. De nombreuses configurations physiques et différents types d'antenne ont été testés. Les résultats sont présentés en [4] et résumés en figure 5 pour la liaison répéteur-concentrateur.

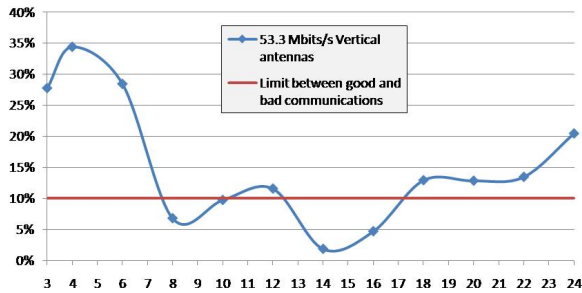


FIGURE 5. Taux d'erreur paquet enregistré sur l'aile en fonction de la distance

Pour un débit fixé à  $60 \text{ Mbits.s}^{-1}$ , la communication est correcte (taux d'erreur binaire inférieur à  $10^{-5}$ ) pour des distances entre le concentrateur (antenne cornet dans la cabine) et le répéteur (antenne patch sur l'aile) comprises entre 7 m et 17 m.

### 3.2. Mesure sur satellite

La campagne réalisée sur une structure Eurostar-3000, a eu pour objectif l'évaluation du débit maximum atteignable dans la situation satellite. L'émetteur et le récepteur sont situés de part et d'autre de la structure

métallique, comme présenté en figure 6.

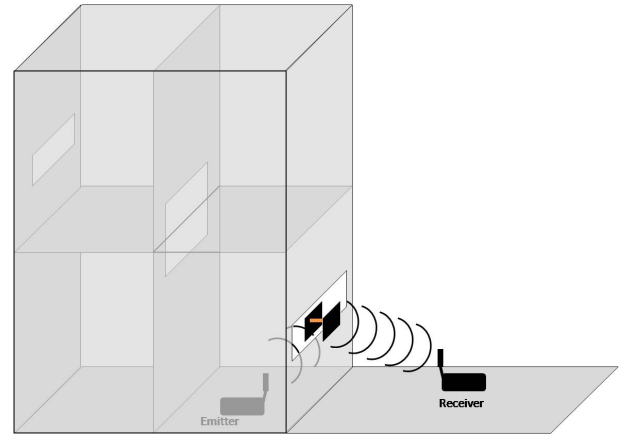


FIGURE 6. Représentation schématique de la structure Eurostar-3000

Cette structure étant métallique, elle agit comme une cage de Faraday empêchant toute communication entre l'intérieur et l'extérieur. Il est donc indispensable d'utiliser un répéteur passif [5]. Les résultats détaillés sont présentés en [6] et résumés en figure 7.

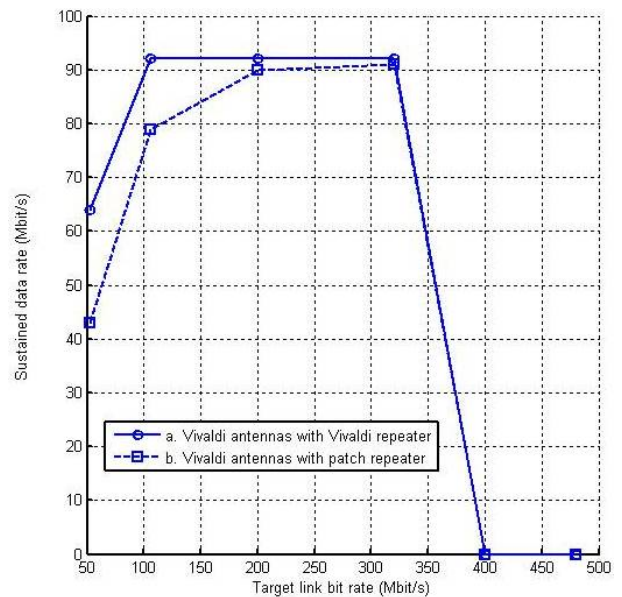


FIGURE 7. Débits atteignables en MB-OFDM dans un contexte satellite

Dans cette configuration on peut obtenir des débits tout a fait compatibles avec l'application visée (jusqu'à  $93 \text{ Mbits.s}^{-1}$ ).

## 4. Interface radio adaptée

Les différentes campagnes de mesures réalisées ont permis de valider l'utilisation du standard MB-OFDM (utilisation jusqu'à 17 mètres sur l'aile et jusqu'à



90 Mbits.s<sup>-1</sup> dans le satellite). Par contre, de nombreuses limitations à l'utilisation d'un kit commercial ont été relevées; la principale étant une consommation excessive. Cette dernière découle principalement de l'implémentation dans le standard ECMA-368 de nombreux mécanismes très gourmands en ressources de calcul et non indispensables dans le contexte des réseaux de capteurs. Il est important de développer une interface radio simplifiée et spécifique mais basée sur le MB-OFDM.

Des prototypes d'émetteurs et de récepteurs, ont été réalisés sur une plateforme FPGA Virtex5. La connexion avec une antenne Vivaldi a été réalisée par l'intermédiaire de convertisseurs analogiques numériques et numériques analogiques et de mixeurs et VCOs commerciaux en attendant le développement d'une tête RF spécifique. L'architecture de la partie émission est présentée en figure 4.

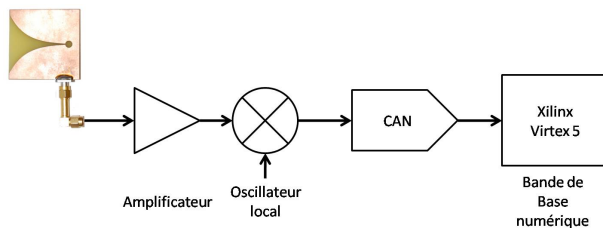


FIGURE 8. Architecture de l'émetteur

Les convertisseurs n'étant pas compatible avec la gestion de signaux I/Q, le débit physique est défini par la formule (1).

$$D_b = \frac{2 \times \text{Nb\_crenaux}}{\text{Taille\_FFT}} \times f \quad (1)$$

La figure 9 présente le spectre de sortie de la voie I de l'émetteur développé. La bande occupée est aujourd'hui de 150 MHz (de -75 MHz à +75 MHz en bande de base), ce qui donne un débit atteignable de 94 Mbits.s<sup>-1</sup>. Avec des convertisseurs adaptés, il est possible d'atteindre un débit double (188 Mbits.s<sup>-1</sup>). Les mesures de taux d'erreur sur la liaison sont en cours de réalisation.



FIGURE 9. Spectre bande de base de sortie de l'émetteur

## 5. Conclusion

L'exigence industrielle de mise au point de réseaux de capteurs sans fil permettant la description précise du comportement d'avion ou de satellites avant commercialisation a conduit à considérer pour la première fois l'utilisation d'interfaces radio haut débit dans le domaine des réseaux de capteur. Le choix de la modulation MB-OFDM et d'une structure en arbre ont été dictés par les contraintes énergétiques et de débits. Un prototype, atteignant plus de 150 Mbits.s<sup>-1</sup> a été développé sur FPGA. Il doit, désormais, être couplé avec les algorithmes de synchronisation des noeuds entre eux, et les choix architecturaux doivent être validés par une campagne de mesure des taux d'erreur sur la liaison.

## Références

- [1] Aubin LECOINTRE, Daniela DRAGOMIRESCU, and Robert PLANA. Mixed and mostly digital implementation impact on the IR-UWB channel capacity. *ROMJIST*.
- [2] Julien HENAUT, Aubin LECOINTRE, Daniela DRAGOMIRESCU, and Robert PLANA. Radio interface for high data rate wireless sensor networks. In *IMETI*, volume 2, pages 104–109, Orlando, FL (USA), July 2008. IIIS.
- [3] A. Batra. Multi-band OFDM physical layer proposal for IEEE 802.15 task group 3a. Technical Report IEEE P802.15-03/268r2, IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), November 2003.
- [4] Julien HENAUT, Antony Coustou, Daniela DRAGOMIRESCU, and Sebastien BERHOUE. Projet SACER : Transmission UWB MB-OFDM. mesure de la qualité du lien de communication sur aile A340/600WB. Technical Report LAAS-09154, LAAS-CNRS, Toulouse (France), April 2009.
- [5] A. Ali, A. Coustou, and H. Aubert. Wide band passive repeaters : Design and measurements. In *AP-SURSI*, pages 1–4, 2009.
- [6] Julien HENAUT, Daniela DRAGOMIRESCU, Florian PERGET, and Robert PLANA. Validation of the MB-OFDM modulation for high data rate WSN for satellite ground testing. In *ICONS*, page To Be Published, Mennieres (France), April 2010. IARIA.