

Réseaux de capteurs sans fil pour l'instrumentation : une application aéronautique

Pascal BERTHOU,
Thierry Gayraud, Yann Labit, Roxana Albu
Daniela Dragomirescu, Antony Coustou
LAAS-CNRS,
Université de Toulouse

Université de Toulouse

LAAS-CNRS

Université Paul Sabatier TOULOUSE III

Plan de la présentation

- Le projet SACER
- Les essais avioniques et spatiaux
  - Techniques, contraintes et dimensionnement
- Architecture du réseau
- Test d'une solution sur étagère
  - Wimedia / synchronisation
- Réduction de la consommation énergétique
  - IEEE 1588-PBS hybride / Antennes directives
- Autres innovations du projet

Le projet SACER

- SACER : « Système Autonome Communicant En Réseau »
- Projet DGE - 2006-2011. 5 thèses financées.

  – Entreprises Régionales

  ALYOTECH DATUS SUD-OUEST DELTA SUD-OUEST TECHNOLOGIES EPSILON ingénierie

  – Laboratoires de Recherche

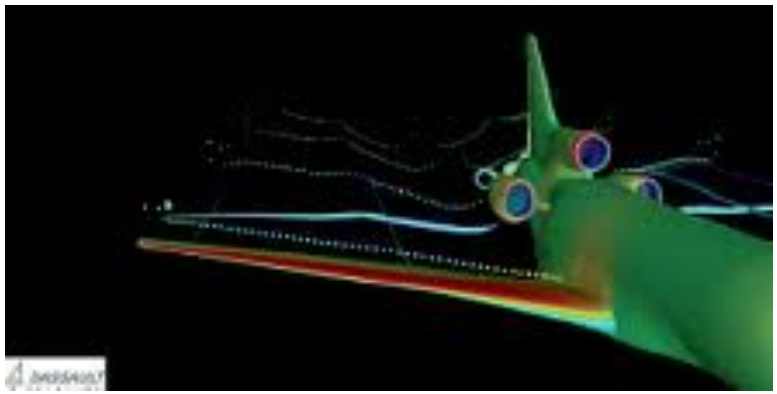
  LAAS-CNRS

  – Industriels Partenaires

  AIRBUS Intespace

Les industriels partenaires

- Service des essais en vol
  - Mesure de pression sur la structure de l'avion
  - Entrée pour les modèles de simulation numérique



- Aujourd'hui systèmes filaires
  - Capteurs de pression / température
  - Installation fastidieuse
  - Risque d'endommagement de la structure ou de perturbations

Exemple de « glove » de mesure ==>



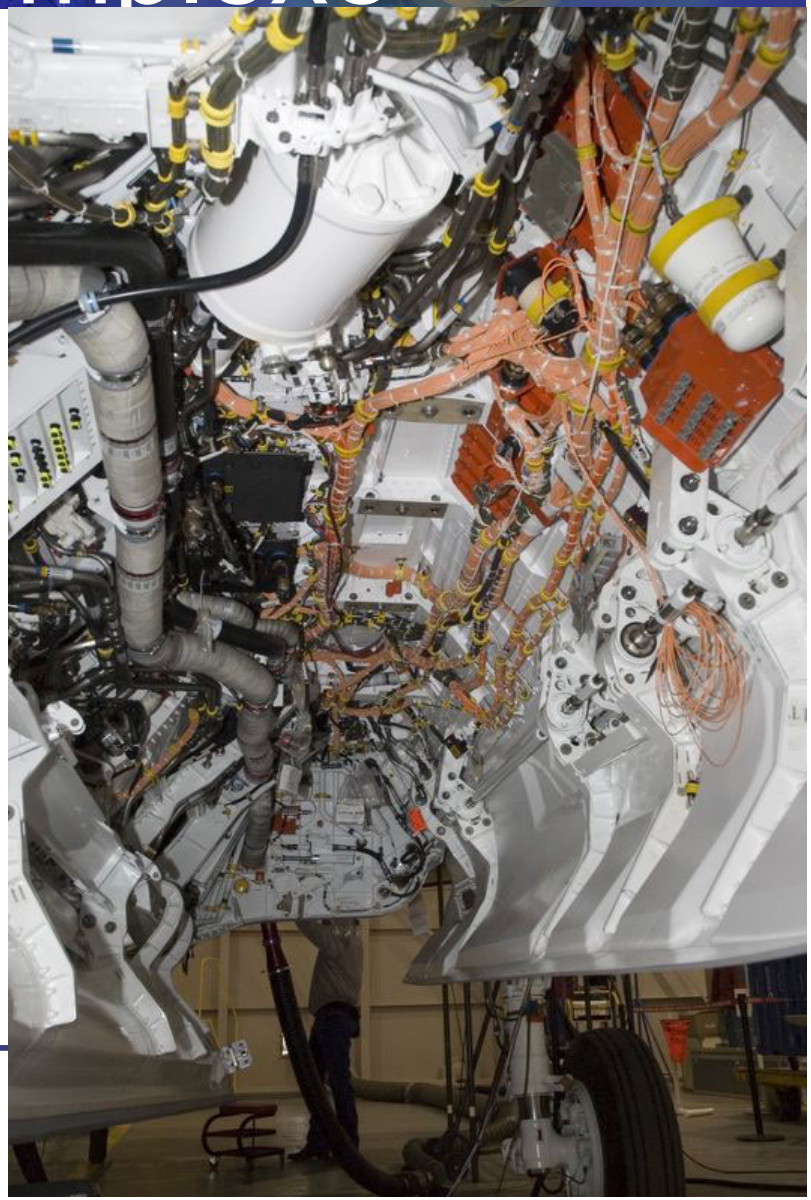
Essais en vol Airbus : Installation complexe

Exemple de câblage (orange) pour l'équipement d'un avion avant les essais en vol !

Nécessite de perforer la structure pour passer les câbles

Intéresse aussi le CEAT (Centre Essais Aéronautiques de Toulouse) pour les tests de fatigue





Les industriels partenaires

Intespace

Essais au sol des satellites avant lancement

- Tests vibratoires, température, vide, communications, etc …

Tests vibratoires :

- Des centaines de capteurs pour un satellite
- Principalement jauges de contraintes
- Câblage contraignant

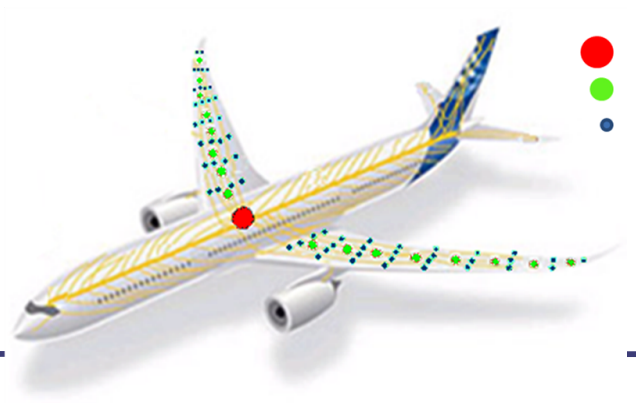
Exemple de satellite sur un pont vibrant



Enjeux

- Introduire la communication sans fil dans les systèmes embarqués
  - Des centaines de km de câbles à ce jour
  - Limite physique du nombre de capteurs
  - Des centaines de points connectés

- Les réseaux sans fil de capteurs intelligents pour
  - Repousser la limite du nombre de capteurs
  - Supprimer le coût du câblage
  - Rendre le processus plus souple





Dimensionnement et Contraintes

Réseau dense et haut débit

I) Contraintes Intespace

Nombre	*Type capteur*	*Application*	*Freq. Echant. Hz*	*Précision bits*	*Synchro Mesure us*	*Délai max. us*
2000	Jauge Contrainte S	statique	200	16	0,5	30000
2000	Jauge Contrainte D	Vibration	200	16	0,5	30000
50	Jauge Contrainte D	Vibration	20 000	16	0,5	30000
2000	Jauge Contrainte C	Choc	50 000	16	0,5	30000
2000	Jauge Contrainte C	Choc	150 000	16	0,5	30000
100	Acoustique	Acoustique	65 000	16	100,0	30000
300	Accelerомètres	Vibration	20 000	16	100,0	30000
400	Temperature		2,000	16	100 000,0	30000

II) Contraintes Airbus

Nombre	*Type capteur*	*Freq. Echant. Hz*	*Précision bits*	*Synchro Mesure us*	*Délai max. us*
	Acoustique				
800	Pression	21 333	16	1	25 000
100	Temperature	0,1	16		

Réseau dense et haut débit

Débit brut capteur 16 bits à 20 kHz: 320 kbps

Débit avec encapsulation : 1 Mbps

III) Calculs de débits par capteurs / Nœuds / Concentrateur

nb: l'encapsulation réseau n'est pas prise en compte

Application	*Type capteur*	*Nombre*	*Nombre Capteurs / Nœuds*	*Fréquence*	*débit / capteur kbit/s*	*débit / nœuds kbit/s*
Intespace	Jauge Contrainte D	50	8	20 000	320	7 660
Intespace	Acceleromètres	300	8	20 000	320	7 660
Airbus	Pression	760	8	21 333	341	8 170
Airbus	Temperature	100	8	0,1	0	0

Soit avec une spécifications de 800 capteurs par avion (200 par surface d'aile),
le débit total atteint les 800 Mbps.

Réseau haute fidélité

- Fiabilité
  - Le spécifications initiales demandaient :
    - Une fiabilité totale pour la remontée des mesures et la descente des configurations
    - Avec une contrainte de durée : < 30 ms

    => Possibilité d'effectuer des retransmissions

- Synchronisation
  - Les mesures doivent pouvoir être datées (datation)
  - Les mesures doivent être effectuées au même moment (synchronisation)
  - Ordre de grandeur de la contrainte :
    - Capteurs pression airbus : 1 uS
    - Capteurs de vibration intespace : 500 nS

Réseau « longue portée » et canal RF particulier

- Portée :
  - mesures depuis la cabine (antenne cornet) sur les ailes (antennes planaires)
  - Longueur des ailes d'un A380 : environ 35 m !
  - Déplacement du bout d'aile selon les contraintes : env. 7 m
    - Difficile de couvrir dans ces conditions le réseau en un seul saut

- Canal de propagation RF :
  - Le besoin en débit de transfert implique un bon SNR au niveau des récepteurs radio.
  - Les environnements physiques dans lesquels les ondes vont se propager ont été peu étudiés dans le cas AIRBUS; peu courant dans le cas INTESPACE.
  - Besoin de connaître les caractéristiques de l'environnement de propagation pour établir les bilans de liaison radio.

Bilan de liaison radio

- Pour le cas AIRBUS, une campagne de mesure a été effectuée sur site (A340).
- Des mesures de pertes par propagation, en fonction de l'éloignement, ont été faites.

- Une comparaison mesures – modèle théorique – mesures en laboratoire a montré que :
  - L'environnement de propagation peut se ramener à un plan conducteur (sol) au dessus duquel est disposé à une hauteur de 2.5 m mètres un cornet et une antenne planaire posée au sol.
  - Modélisation théorique simple.
  - Les pertes par diffraction au niveau du hublot sont négligeables dans la mesure où le cornet reste à proximité du hublot (10-20 cm).

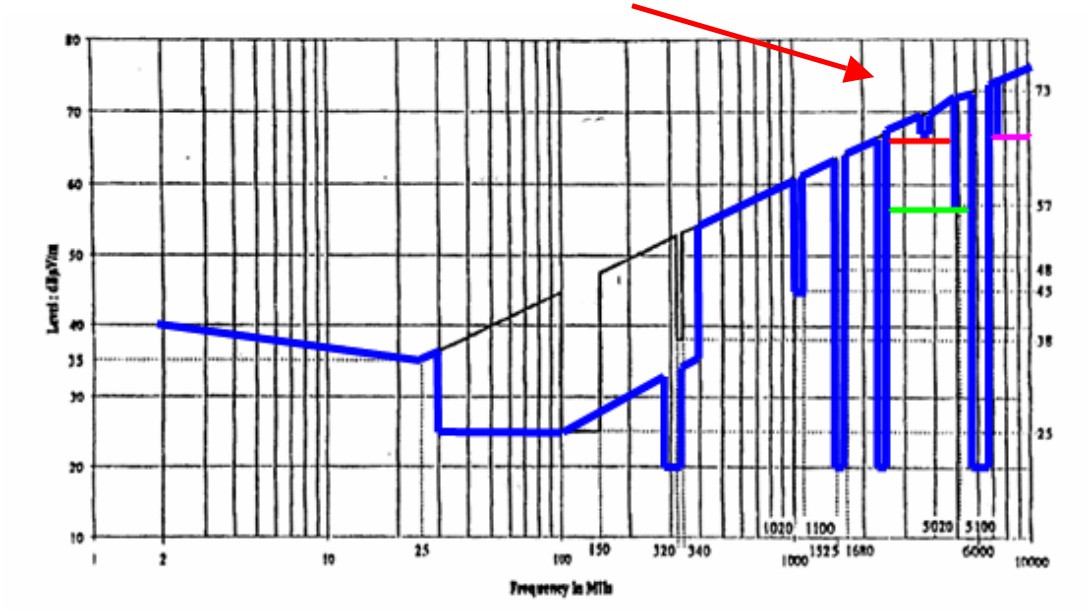
Bilan de liaison radio





Contraintes réglementaires

Fréquences choisies pour SACER



Aerospace Frequency Regulation

Limitation des fréquences imposées en aéronautique

Pour obtenir des hauts débits avec des puissances d'émission faibles, une communication UWB a été choisie dans la gamme des 3-6 GHz

Transmetteur UWB MB-OFDM

Contraintes mécaniques

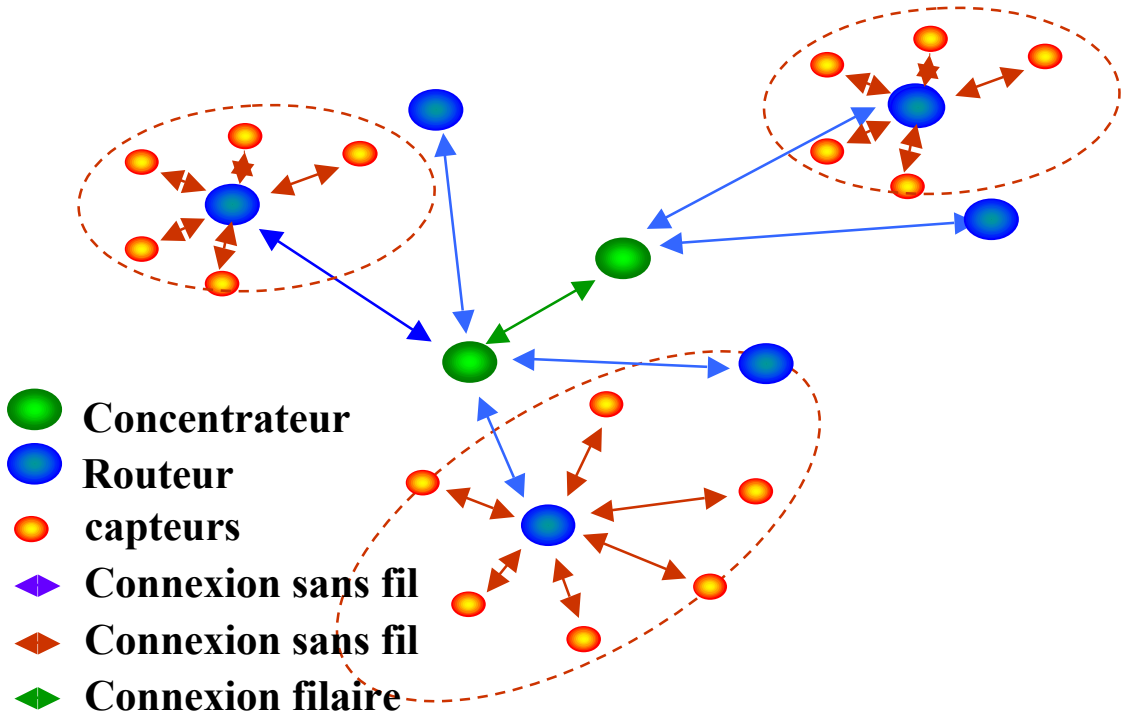
- Taille (airbus) :
  - Le capteur de pression et le système de communication doit être < 2,2 mm de hauteur
  - Pas de contrainte sur la surface
- Poids (intespace) :
  - Le système doit être < 20 g et dans un cube de 10x10x20 mm
  - Afin de ne pas perturber les essais mécaniques
- Condition de vol :
  - De -50°C en altitude à près de 100°C sur le tarmac en plein soleil
  - Peu de batteries résistent dans ces conditions



Architecture du réseau

Topologie en grappe

- Notion de répéteurs pour améliorer bilan de liaison
- Notion de concentrateurs pour diviser la BP nécessaire



Topologie du réseau

Dimensionnement :

- 1 concentrateur / face d'aile
- 2 routeurs / concentrateur
- 8 nœuds / routeurs
- 8 capteurs / nœuds

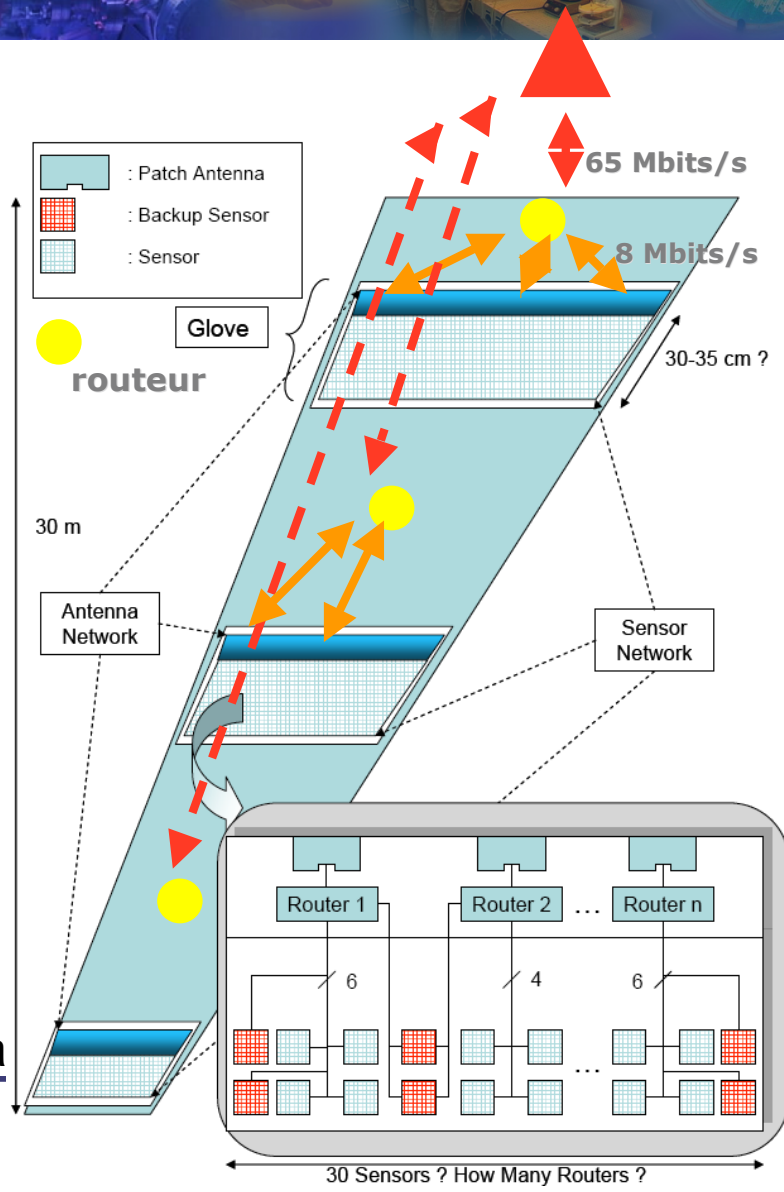
Soit : 512 capteurs / ailes

Transmission :

- MB-OFDM sur 3-6 GHz
- TDMA pour la MAC des Nœuds
- FDMA pour la MAC des routeurs

Alimentation :

- Concentrateur / routeurs : alimentés
- Nœuds : photovoltaïque / super-capa



Test d'une solution sur étagère



Wimedia (802.15.3a)

Wimedia

- Couche Physique :
  - Bande de fréquence: 3-10 Ghz
  - Modulation: MB-OFDM
  - Débit: jusqu'à 480 Mbits/s sur 3 mètres
  - Débit: 200 Mbits/s sur 7 mètres
  - Durée d'un symbole 364 ns
- Couche MAC :
  - TDMA avec support trafic synchrone / asynchrone
  - Organisation en super trames de 65 ms et slots de 256 us
- Intérêt pour SACER :
  - Performances satisfaisantes pour les communications routeur/concentrateur
  - Utilisation du protocole d'accès Wimedia pour la synchronisation de données

Kit Wisair



Wisair DV9110 dev kit

Respecte les contraintes :

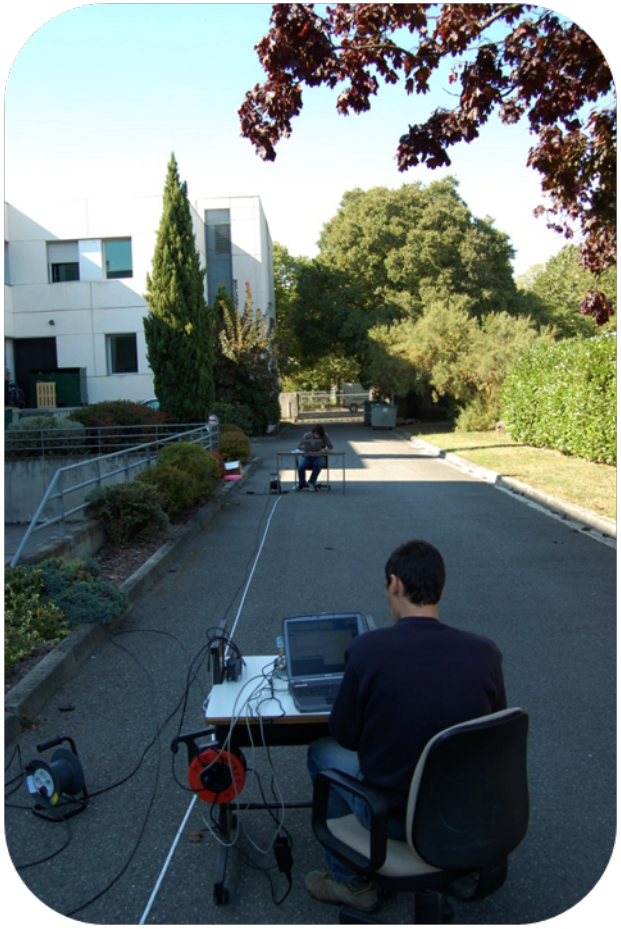
- Encombrement (puce)
- Débits / bandes
- Isochronisme

Plus limité sur :

- Consommation énergie
- Fiabilisation comm. RF

Evaluation

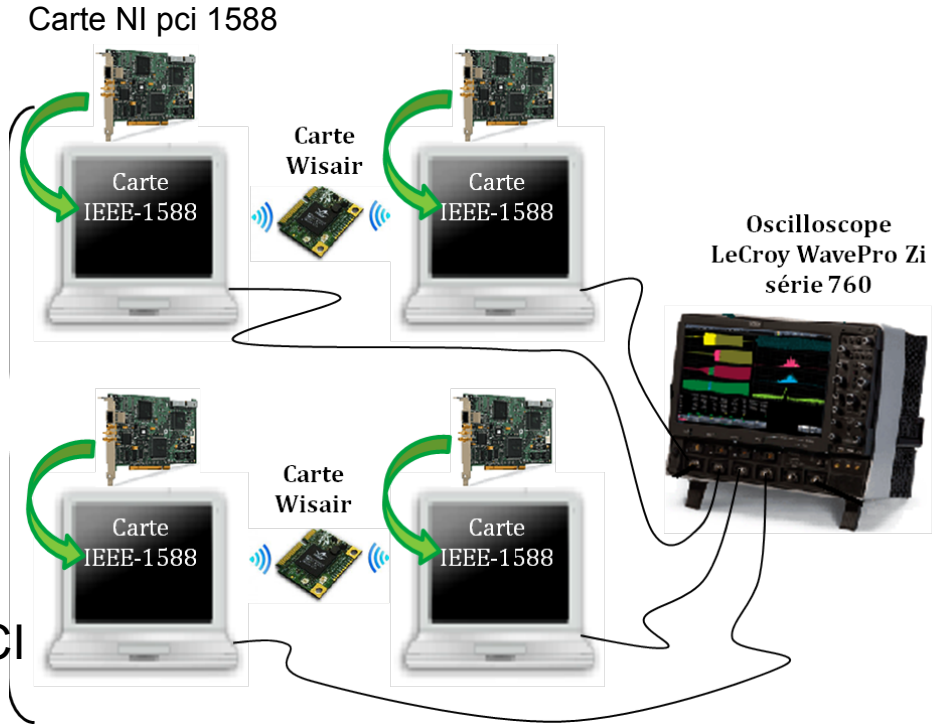
- Mesure point à point
- Propagation proche aile
- Distance 1 à 15 m
- 97 Mbps obtenu
- Test d'antennes directives



Problèmes de synchronisation

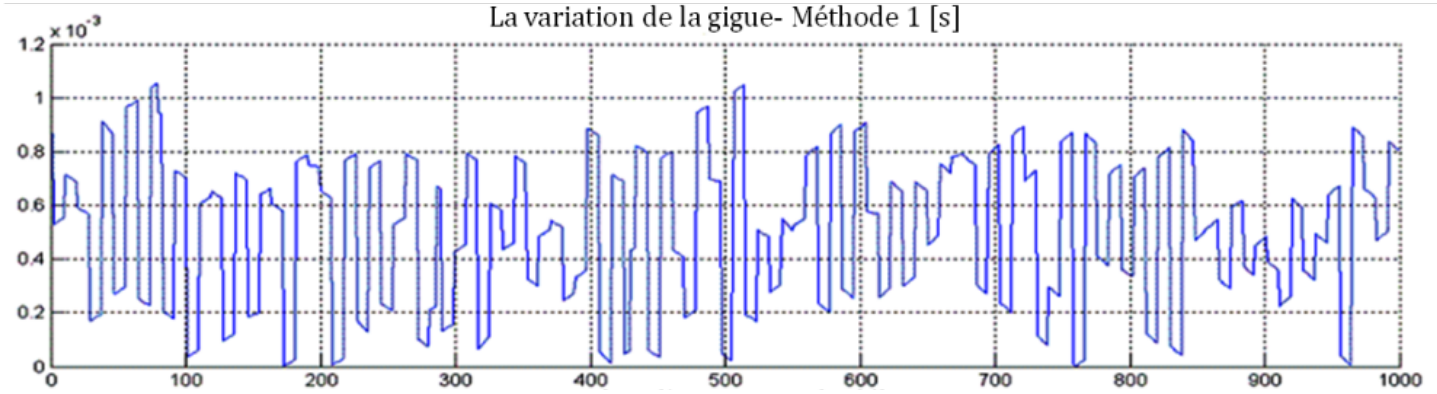
- Protocole IEEE 1588 :
  - Utilisé dans l'industrie et à airbus pour la synchro d'horloge
  - Conçu pour un environnement Ethernet switché
  - Performances : précision < 50 ns avec matériel adapté

- Déploiement d'une plateforme de mesure de la synchronisation:
  - Cartes National Instrument 1588 PCI
  - Au dessus des cartes wimedia / wisair
  - Mesures dans des grandeurs de la nanoseconde : complexe ! Oscilloscope Lecroy 6GHz BP.

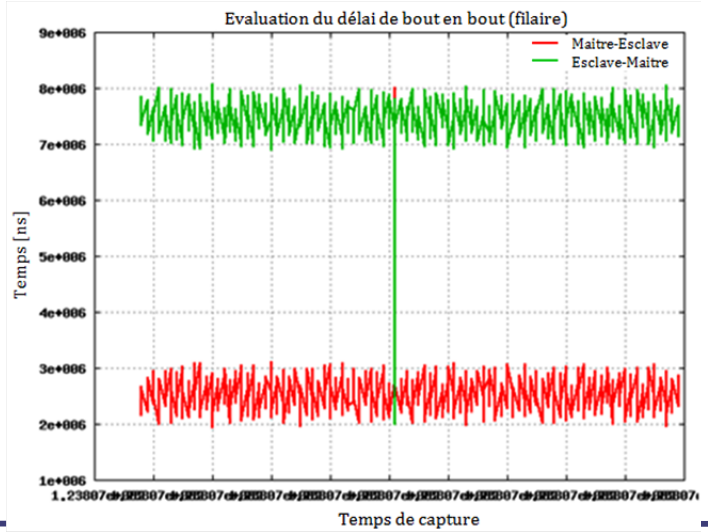


Plateforme de test Synchro Wimedia

Problèmes de synchronisation



Valeur de la synchronisation sur Wimedia: > 100 uS ! (pour 500 ns requis)



(a)

Explication : IEEE 1588 fait l'hypothèse d'une symétrie des délais

Notre maquette se base sur un bridge Wimedia / Ethernet qui de par sa conception intègre un délai sur le retour, d'où l'asymétrie mesurée

Asymétrie de 6 ms des délais : Incompatible avec IEEE 1588

Conclusion Wimedia

- Pro :
  - Wimedia à beaucoup d'avantages sur le papier
  - Les mesures effectuées en débits étaient concluantes
- Cons :
  - La synchronisation mesurée n'est pas suffisante, mais le problème aurait pu trouver une solution avec :
    - Une interface des cartes plus ouverte et une pile totalement implantée (pas de service isochrone !).
    - En évitant la conversion Ethernet/Wimedia (complexe)
  - Wimedia à été victime de la guerre W-USB et Highspeed BT : Abandon de la normalisation
  - **IEEE 1588 est gourmant en énergie**, ce n'est pas une solution à long terme pour les réseaux de capteurs

=> Développement d'un SOC pour la transmission



Réduction de la consommation énergétique

Protocole hybride IEEE1588 / PBS

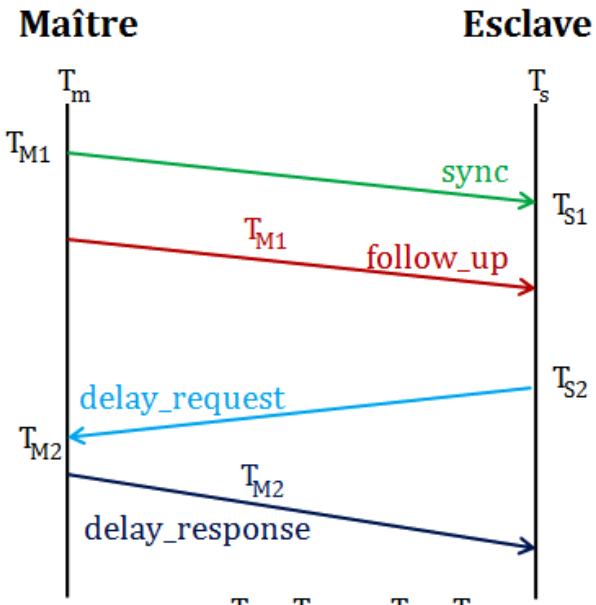
La synchronisation et l'économie d'énergie

- Protocole de synchronisation : IEEE 1588
  - Capable d'offrir des performances si support réseau adéquat
  - Dans la littérature annoncé < 200 ns sur réseau sans fil (802.15.4)
  - Mais gourmant en énergie
- Pairwise Broadcast Synchronization (PBS)
  - Moins performant que IEEE 1588
  - Annoncé a < 30 uS pour du sans fil dans la littérature
  - Très peu gourmant
- Idée :
  - SACER à une architecture multi niveaux
  - La partie alimentée implantera IEEE 1588
  - La partie autonome implantera PBS (sur un seul niveau)

La synchronisation et l'économie d'énergie

PROPOSITION D'UN NOUVEAU PROTOCOLE DE SYNCHRONISATION

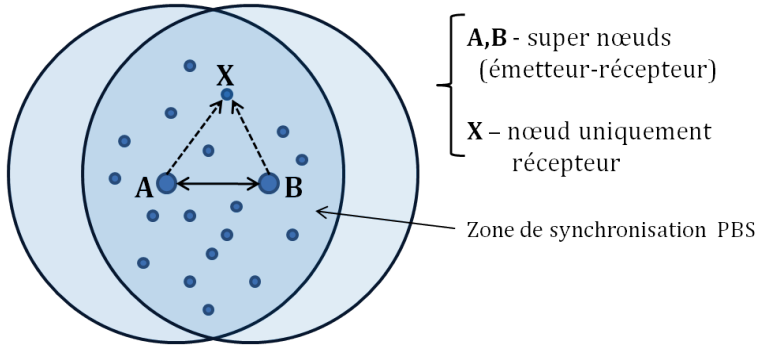
Le protocole IEEE-1588

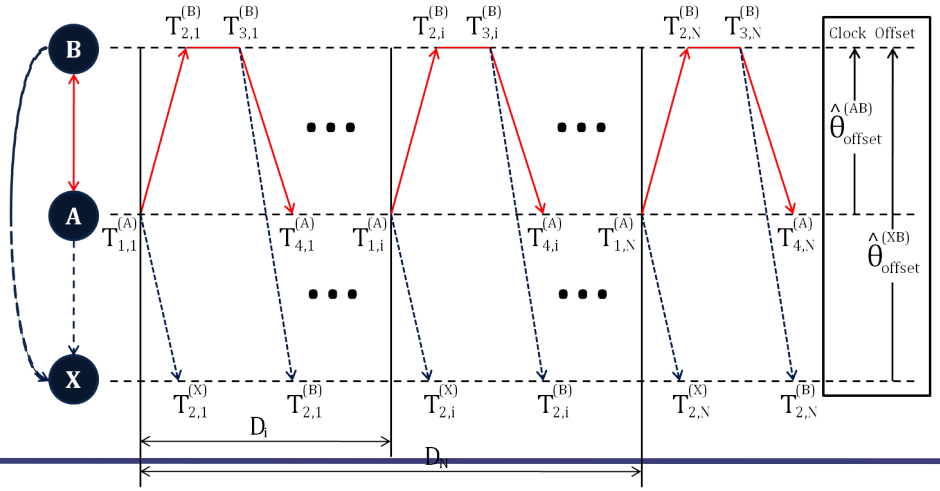


$$\text{Délai} = \frac{(T_{S2} - T_{M2}) + (T_{M3} - T_{S3})}{2}$$

$$\text{Offset} = T_{S4} - T_{M4} - \text{Délai}$$

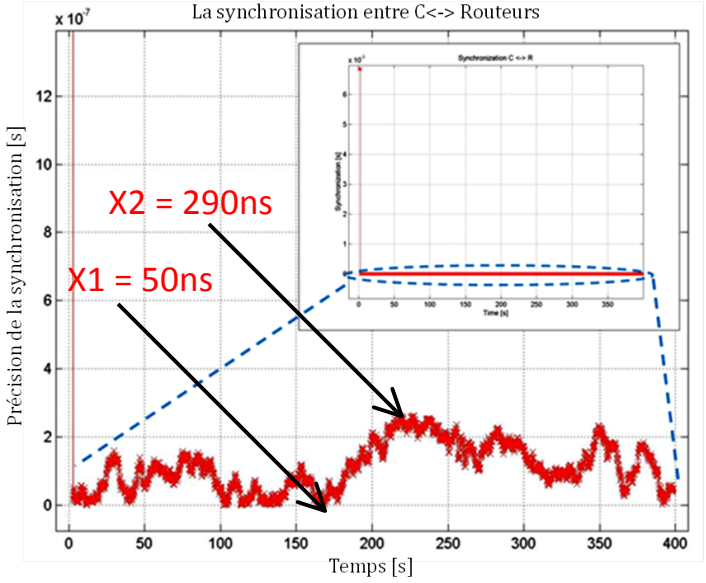
Le protocole de synchronisation PBS



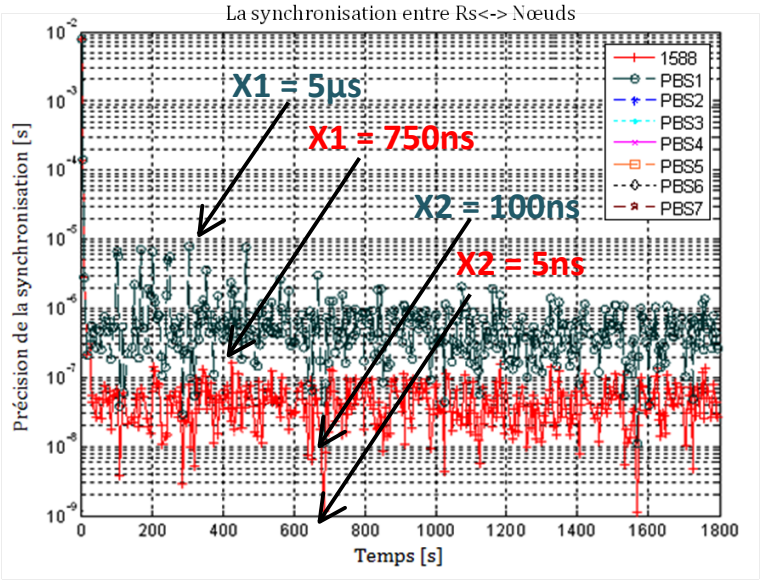


Résultats de simulation

Evaluation de performance du protocole 1588-PBS hybride (synchronisation)



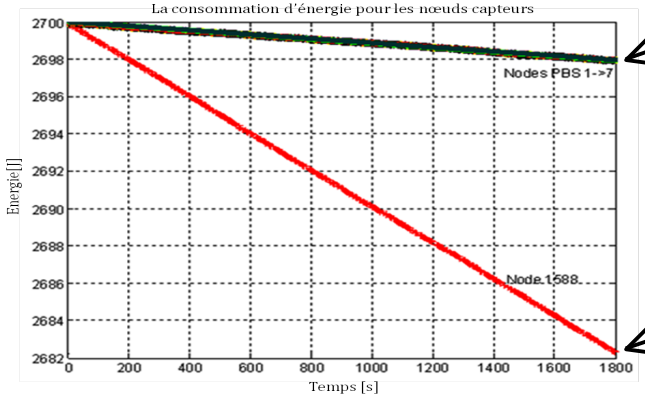
Niveau élevé de synchronisation, entre 50 et 290ns.



Pour la paire **Routeur-Node1588** - une valeur moyenne de 180 ns;
Pour les paires **Routeur-NodePBSs** - la valeur varie entre 5µs et 600 ns.

Protocole IEEE 1588-PBS Hybride

Evaluation de performance du protocole 1588-PBS hybride (consommation)



$N_{PBS} = 2697.94$ J

$N_{1588} = 2682.33$ J

La durée de vie de la batterie d'un nœud PBS est prolongée avec 75% par rapport à la batterie d'un nœud 1588.

Bilan :

- Objectif des 500 ns non atteint, néanmoins performances acceptables (<5us)
- Tout à fait adapté à l'architecture hiérarchique de SACER
- Nécessiterait une validation expérimentale (complexité ?)



Réduction de la consommation énergétique

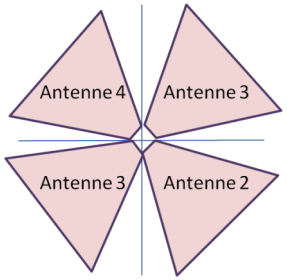
Utilisation d' antennes directives

Intérêt des antennes intelligentes

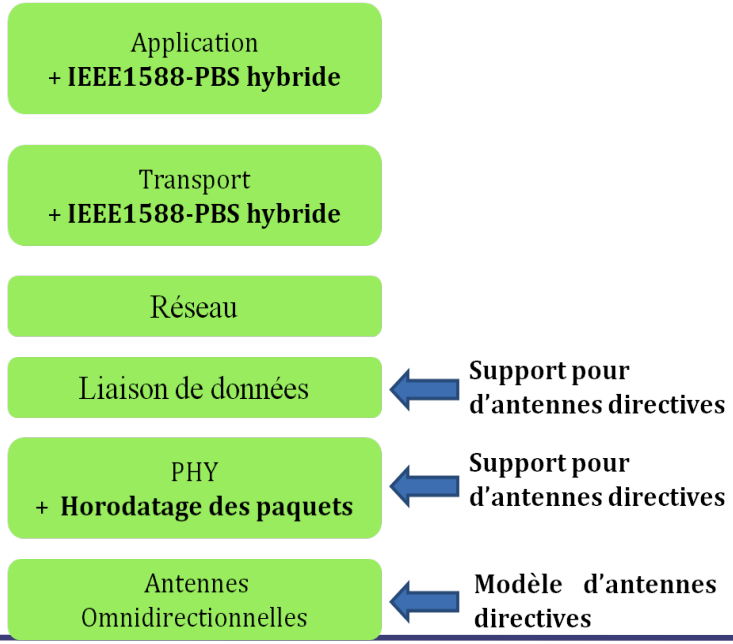
- Plusieurs technologies disponibles :
  - Antennes reconfigurables :
    - Repointables avec par déphasage
    - Puissance d'émission modulable
  - Multi-antennes avec circuit de sélection
- Intérêts :
  - Limite les interférences
  - Limite la consommation énergétique (pointage+puissance modulable)
- Difficultés :
  - Nécessite l'adaptation de la couche MAC
  - Eventuellement l'adaptation des protocoles de routages (pour optimisation).
  - Temps de commutation non négligeable pour les multi-antennes

Les antennes directives et l'économie d'énergie

Intégration d'un modèle d'antennes directives dans NS-2



Chaque nœud est équipé de quatre antennes directionnelles et d'une cinquième isotrope



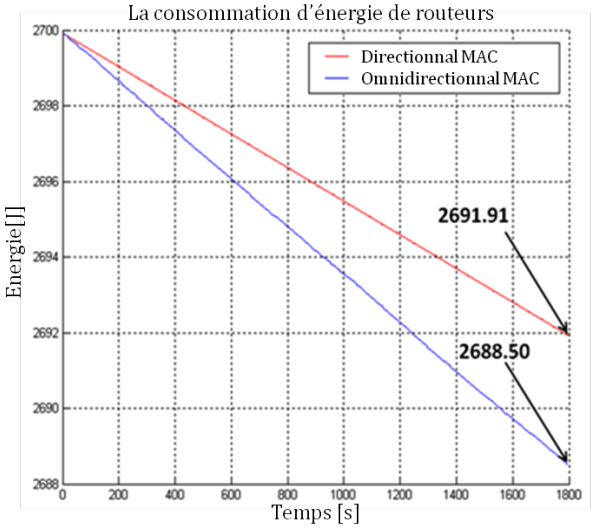
Les nouvelles fonctionnalités :

- La commutation entre les cinq antennes (les antennes directionnelles et l'antenne isotrope) selon la position du nœud destination et le type de trafic (broadcast ou autre type de trafic);
- L'enregistrement de la position des nœuds voisins ou de l'angle d'arrivée (AOA) des paquets, ce qui est essentiel pour choisir l'antenne de transmission appropriée;
- La mobilité des éléments (déterminé leur position).

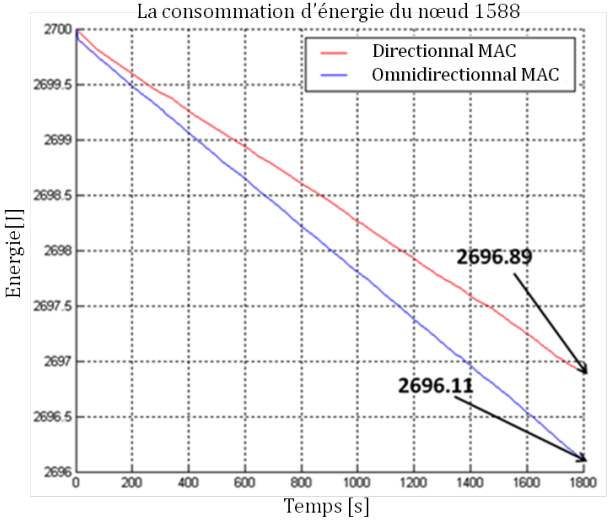
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

Les antennes directives et l'économie d'énergie

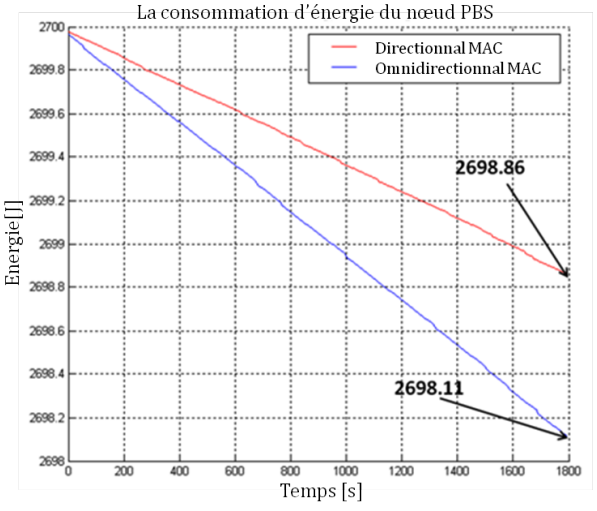
EVALUATION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DU SYSTÈME



La durée de vie de la batterie est étendue de 45% dans le cas ou nous utilisons des antennes directionnelles.



Pour un nœud 1588, une augmentation de 25% de la durée de vie est réalisée.



Pour un nœud PBS les simulations ont montré que la durée de vie est alors augmentée de 64%.



Autres innovations du projet

Autres Réalisations

- Capteurs passifs (Hervé Aubert, thèse F. Chebila)



Capteurs de pression passif par une technique d'interrogation radar. Le capteur renvoie un écho radar dont la signature dépend sensiblement de l'état de celui-ci, donc de la grandeur physique à mesurer.

Identification possible de plusieurs capteurs passifs par une technique de ligne à retard.

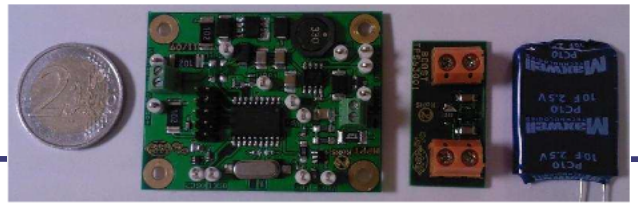
Portée jusqu'à 40m

- Gestion de l'alimentation (JM. Dilhac, thèse D. Meekhun)

Photovoltaïque : Cellules CIGS assez souples répondant aux contraintes de T°

Super capacité : PC10 Maxwell (3,2 mm ep.), répondant aux contraintes de T° extrêmes.

Le système peut alimenter un nœud pendant 50s (sans ensoleillement)





Merci.