

ÉTUDE ET OPTIMISATIONS D'UNE COMMUNICATION À HAUT DÉBIT PAR COURANT PORTEUR EN LIGNE POUR L'AUTOMOBILE

TANGUY Philippe
Thèse dirigée et encadrée par Fabienne Nouvel

INSA, IETR, UMR 6164

Soutenance de thèse, 25 juin 2012



Augmentation des fonctions électroniques dans l'automobile



Augmentation de l'électronique

Nouvelles applications & fonctions

- ▶ Application de type X-by-Wire : direction électrique, freinage électrique, ...
- ▶ Application d'aide à la conduite : régulateur, détection ligne blanche, ...
- ▶ Application de type Infotainment : GPS, vidéo, musique

Augmentation des fonctions électroniques dans l'automobile



Augmentation de l'électronique

Nouvelles applications & fonctions

- ▶ Application de type X-by-Wire : direction électrique, freinage électrique, ...
- ▶ Application d'aide à la conduite : régulateur, détection ligne blanche, ...
- ▶ Application de type Infotainment : GPS, vidéo, musique

Augmentation des fonctions électroniques dans l'automobile



Augmentation de l'électronique

Nouvelles applications & fonctions

- ▶ Application de type X-by-Wire : direction électrique, freinage électrique, ...
- ▶ Application d'aide à la conduite : régulateur, détection ligne blanche, ...
- ▶ Application de type Infotainment : GPS, vidéo, musique

Réseaux de communication existants

Bus de communications multiplexés

- ▶ LIN : protocole série bas coût, 20 kb/s.
- ▶ CAN : bus de communication série, 1 Mb/s.
- ▶ MOST : bus de communication sur fibre optique ou paires torsadées, 25 à 150 Mb/s.
- ▶ FlexRay : protocole haut débit robuste et tolérant aux fautes, 10 Mb/s.

Exemple

Voiture haut de gamme (2004) jusqu'à **2500** échanges de signaux entre **70** ECU.

Problèmes

- ▶ Plusieurs réseaux de communications dans un seul véhicule
- ▶ Augmentation des interfaces de communications
- ▶ Engorgement des faisceaux de câbles
- ▶ Problèmes de maintenance & réparation

Problèmes

- ▶ Plusieurs réseaux de communications dans un seul véhicule
- ▶ Augmentation des interfaces de communications
- ▶ Engorgement des faisceaux de câbles
- ▶ Problèmes de maintenance & réparation

Problèmes

- ▶ Plusieurs réseaux de communications dans un seul véhicule
- ▶ Augmentation des interfaces de communications
- ▶ Engorgement des faisceaux de câbles
- ▶ Problèmes de maintenance & réparation

Exemple



Un véhicule peut avoir **3 km** de câbles pesant alors environ **50 kg**.

Problèmes

- ▶ Plusieurs réseaux de communications dans un seul véhicule
- ▶ Augmentation des interfaces de communications
- ▶ Engorgement des faisceaux de câbles
- ▶ Problèmes de maintenance & réparation

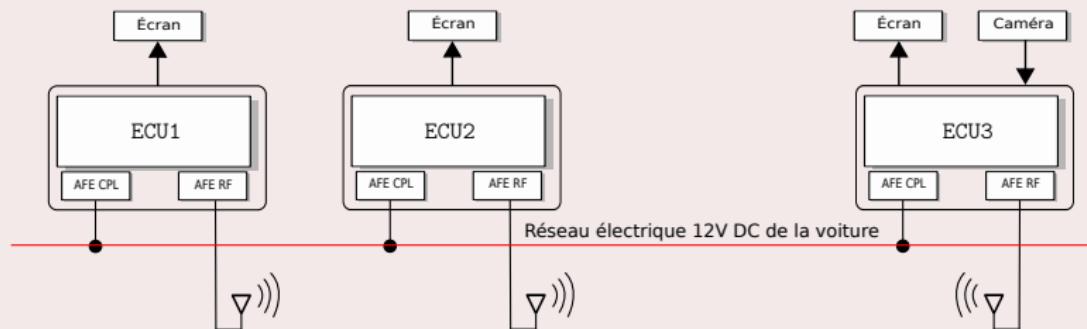
Le projet ANR CIFAER

Objectifs du projet

- ▶ Définition d'une architecture tolérante aux fautes
- ▶ Étude d'une communication flexible entre les différents calculateurs d'une voiture

Cas d'étude proposé

Transmission d'une vidéo issue d'une caméra pour la détection de lignes blanches



Le courant porteur en ligne (CPL)

Définition

Permet de transmettre de l'information sur les réseaux électriques

Avantages

- ▶ Pas de nouveaux câbles
- ▶ Réseau déjà installé
- ▶ Efficace en Indoor : standards HPAV & HD-PLC

Inconvénients

- ▶ Réseau électrique non dédié à la transmission d'information
- ▶ Compatibilité électromagnétique (CEM)
- ▶ Canal de propagation « sévère »

Le courant porteur en ligne (CPL)

Définition

Permet de transmettre de l'information sur les réseaux électriques

Avantages

- ▶ Pas de nouveaux câbles
- ▶ Réseau déjà installé
- ▶ Efficace en Indoor : standards HPAV & HD-PLC

Inconvénients

- ▶ Réseau électrique non dédié à la transmission d'information
- ▶ Compatibilité électromagnétique (CEM)
- ▶ Canal de propagation « sévère »

Le courant porteur en ligne (CPL)

Définition

Permet de transmettre de l'information sur les réseaux électriques

Avantages

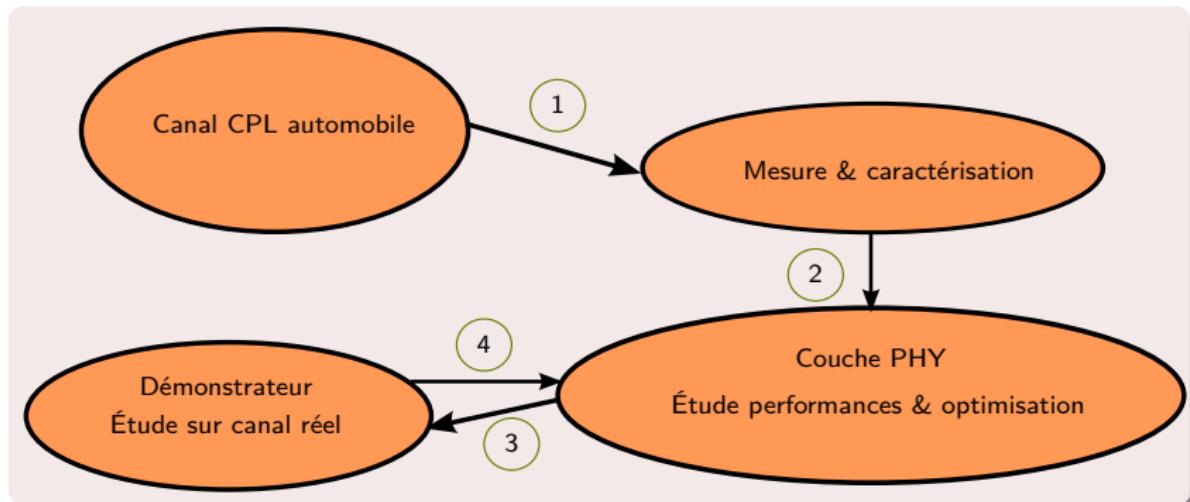
- ▶ Pas de nouveaux câbles
- ▶ Réseau déjà installé
- ▶ Efficace en Indoor : standards HPAV & HD-PLC

Inconvénients

- ▶ Réseau électrique non dédié à la transmission d'information
- ▶ Compatibilité électromagnétique (CEM)
- ▶ Canal de propagation « sévère »

Objectifs de notre étude

Débit supérieur à 10 Mb/s



Sommaire

- 1 Mesures et caractérisation du canal CPL**
- 2 Étude et optimisation d'une communication CPL automobile**
- 3 Démonstrateur CPL**
- 4 Conclusions & perspectives**

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ Windowed-OFDM (1536 sous-porteuses)
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ Wavelet-OFDM (512 sous-porteuses)
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ Windowed-OFDM (1536 sous-porteuses)
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ Wavelet-OFDM (512 sous-porteuses)
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ **Windowed-OFDM (1536 sous-porteuses)**
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ **Wavelet-OFDM (512 sous-porteuses)**
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ **Windowed-OFDM** (1536 sous-porteuses)
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ **Wavelet-OFDM** (512 sous-porteuses)
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ **Windowed-OFDM** (1536 sous-porteuses)
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ **Wavelet-OFDM** (512 sous-porteuses)
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

Étude de deux standards CPL Indoor

Transmission multi-porteuse

PHY/MAC parameters :

HPAV :

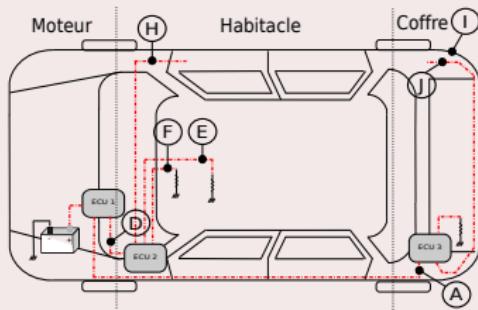
- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ QAM 2–1024
- ▶ **Windowed-OFDM** (1536 sous-porteuses)
- ▶ Intervalle de garde (CP)
- ▶ Temps symbole = $40.96 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

HD-PLC :

- ▶ [2 ; 28] MHz
- ▶ PAM 2–32
- ▶ **Wavelet-OFDM** (512 sous-porteuses)
- ▶ Pas de CP
- ▶ Temps symbole = $8.192 \mu s$
- ▶ CSMA/CA & TDMA
- ▶ Masque DSP –50 dBm/Hz

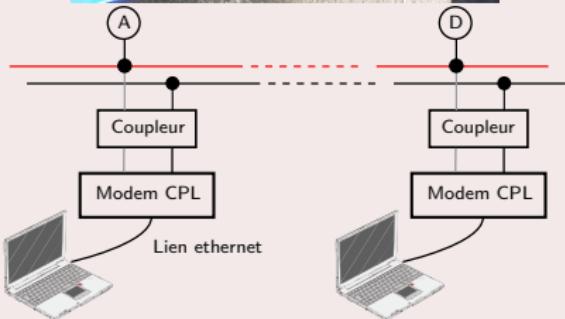
Mesure de débits : scénario statique

Config. mesures



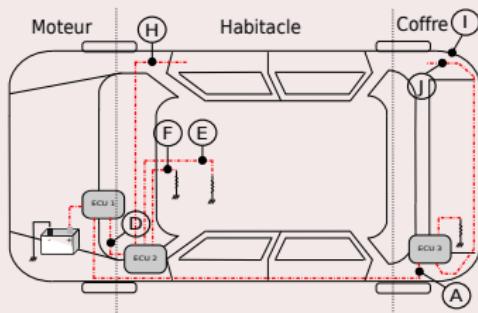
- ▶ (1) : moteur éteint
- ▶ (2) : moteur allumé
- ▶ (3) : (2) + équipements

Débits > FlexRay (ligne rouge)



Mesure de débits : scénario statique

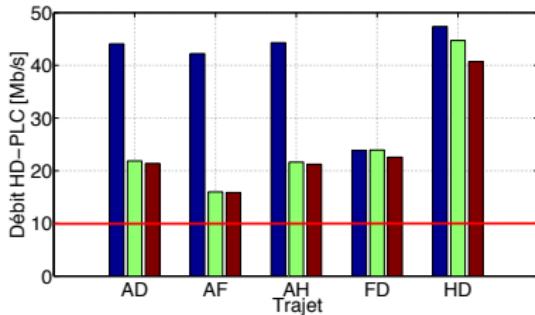
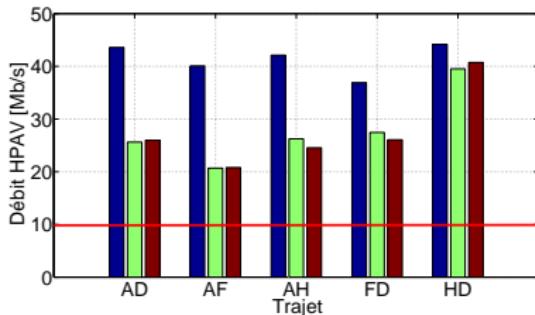
Config. mesures



- ▶ (1) : moteur éteint ■
- ▶ (2) : moteur allumé ■
- ▶ (3) : (2) + équipements ■

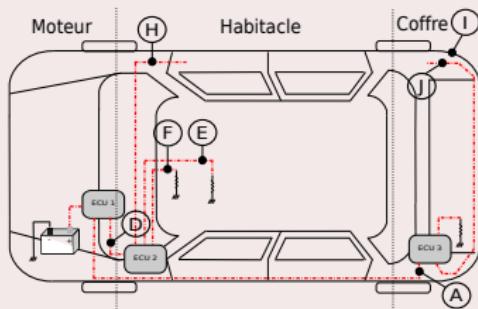
Débits > FlexRay (ligne rouge)

Figures : débits TCP/IP HPAV (haut) et HD-PLC (bas)



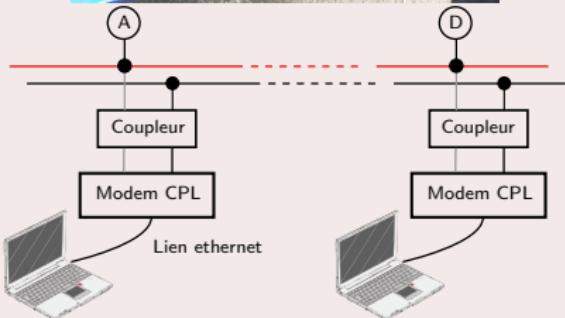
Mesure de débits : scénario dynamique

Config. mesures



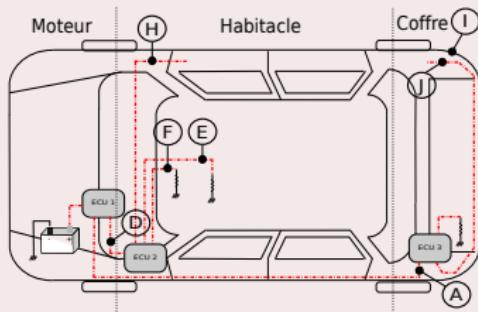
- ▶ (1) : moteur allumé
- ▶ (2) : déplacement
- ▶ (3) : (2) + équipements

Débits > FlexRay (ligne rouge)



Mesure de débits : scénario dynamique

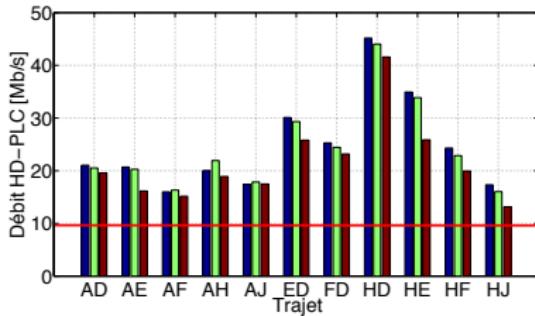
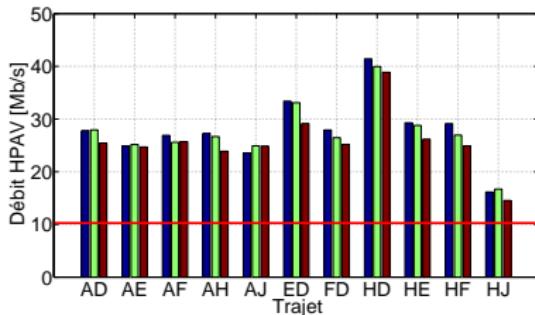
Config. mesures



- ▶ (1) : moteur allumé ■
- ▶ (2) : déplacement ■
- ▶ (3) : (2) + équipements ■

Débits > FlexRay (ligne rouge)

Figures : débit TCP/IP HPAV (haut) et HD-PLC (bas)



Conclusion de l'étude de faisabilité

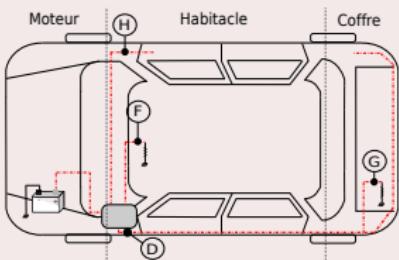
Constat

- ▶ Étude de faisabilité \Rightarrow débit élevé
- ▶ Débits variables en fonction des scénarios et des trajets
- ▶ Difficile d'interpréter chacun des mécanismes des standards CPL
- ▶ Masque d'émission de -50 dBm/Hz trop élevé

Trajets & scénario

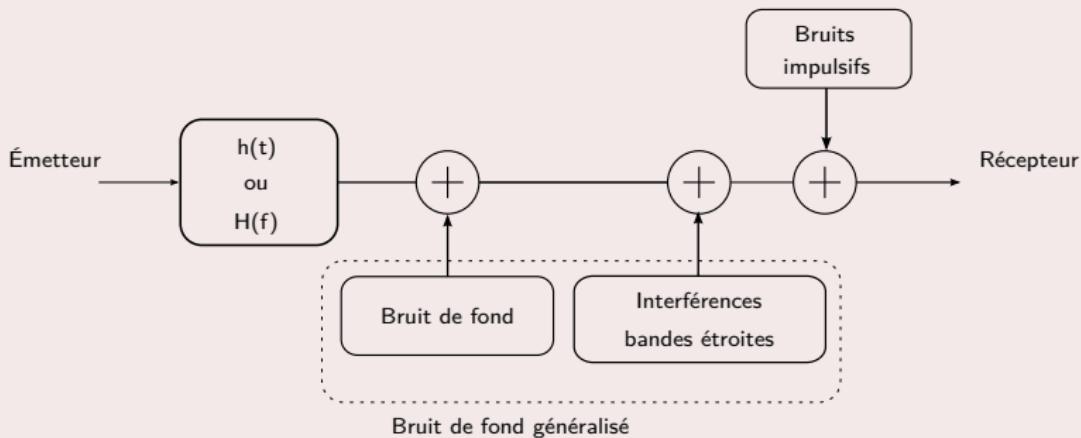
- ▶ Quatre voitures différentes : Peugeot 407SW (essence & diesel), Renault Laguna II (essence) et une citroën C3 (essence)
- ▶ 3 trajets différents : GF, GH et HD
- ▶ 4 points (mesure de bruits) : G, H, F et D
- ▶ Un seul scénario : voiture en déplacement avec action d'équipements (clignotants ...)

Illustrations : voitures & points de mesures



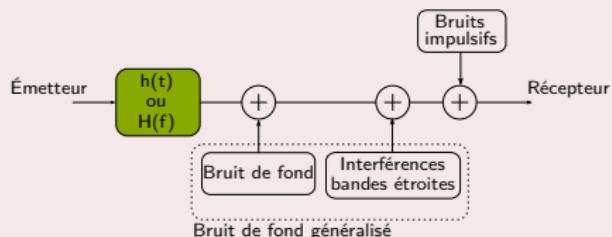
Représentation générale du canal CPL

Schéma canal



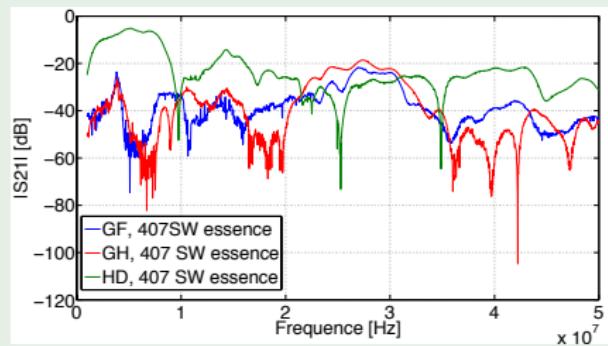
Fonction de transfert

Schéma canal



- ▶ Sélectif en fréquence
- ▶ Forts évanouissements

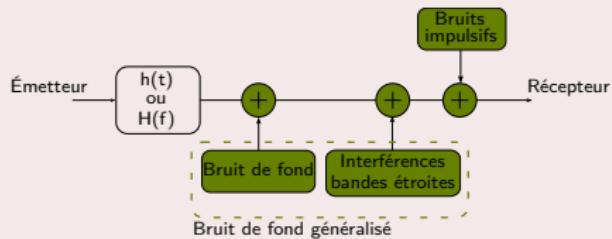
Fonction de transfert : mesure & exemple



- ▶ Analyseur de réseau vectoriel (VNA)
- ▶ Mesure des 4 paramètres S
- ▶ 60 mesures par trajets

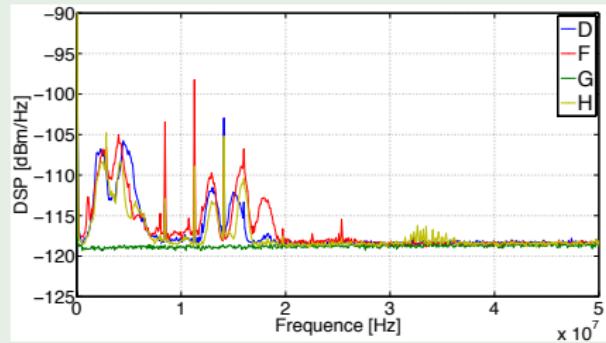
Bruit dans le domaine fréquentiel

Schéma canal



- ▶ Bruit fond coloré
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateurs)
- ▶ Impulsion isolée, périodique ou rafale

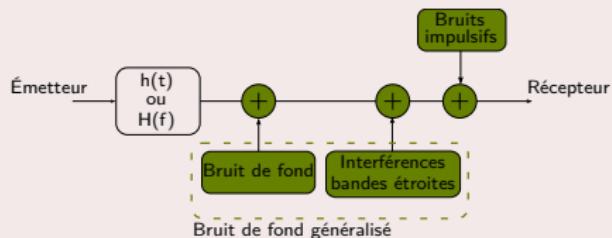
Bruit domaine fréquentiel : mesure et exemple



- ▶ Mesure à l'analyseur de spectre
- ▶ 60 mesures par point

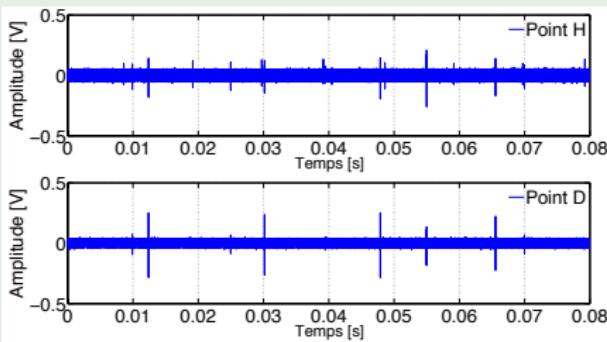
Bruit dans le domaine temporel

Schéma canal



- ▶ Bruit fond coloré
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateurs)
- ▶ Impulsion isolée, périodique ou rafale

Bruit domaine temporel : mesure et exemple



- ▶ DSO
- ▶ 10 mesures par point
- ▶ Enregistrement de 80 ms
- ▶ Enregistrement de deux points simultanément

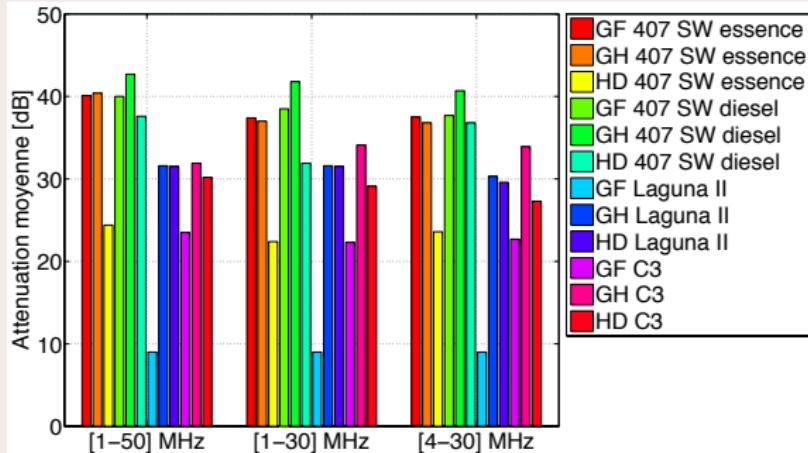
Atténuation moyenne du canal

Calcul gain moyen

$$G_m(dB) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H_m(n)$$

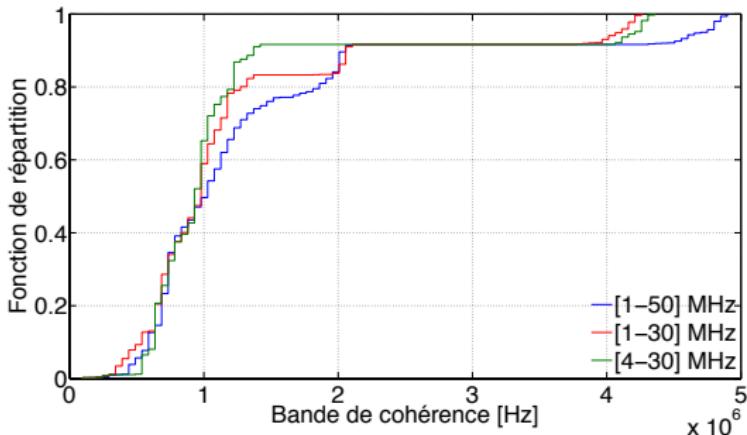
- ▶ m : point de fréquence
- ▶ N : nombre de mesures
- ▶ H_m : S_{21} & S_{12} (dB)

Figure : Atténuations moyennes



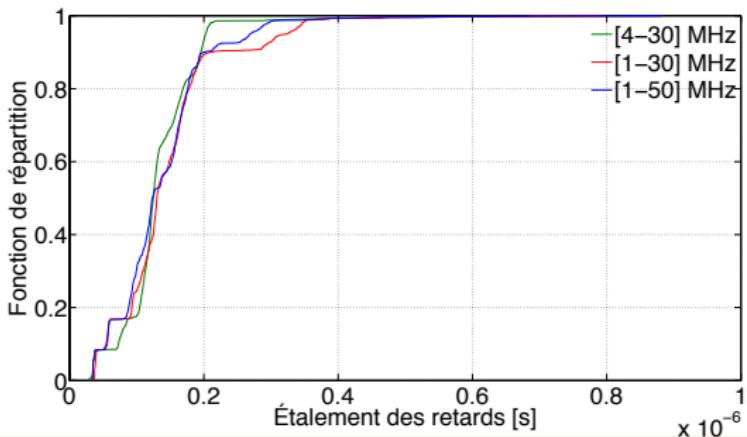
- ▶ Atténuation moyenne du canal : max de 42 dB et min de 9 dB
- ▶ Peu de variation selon la bande

Bande de cohérence (BC)



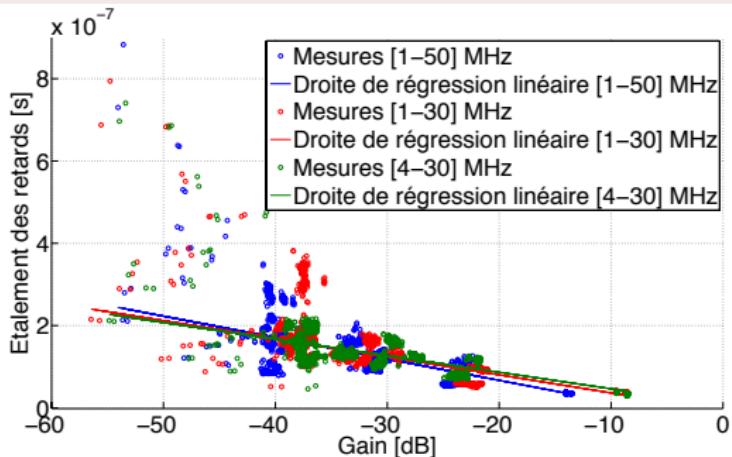
- ▶ 50% des cas : BC est inférieure à 1 MHz
- ▶ BC min : 533.8 kHz
- ▶ Vallejo-Mora *et al.* [1] : BC de 482.92 kHz (cas moteur à 2000 rpm et bande de 100 MHz)
- ▶ Lienard *et al.* [2] : BC inférieure à 800 kHz (cas trajet direct)

Étalement des retards



- ▶ 90% des cas : τ_{RMS} est inférieur à 200 ns
- ▶ τ_{RMS} max : 259.9 ns
- ▶ Vallejo-Mora et al. [1] : τ_{RMS} de 130 ns (cas moteur à 2000 rpm)
- ▶ Lienard et al. [2] : τ_{RMS} est inférieure à 380 ns

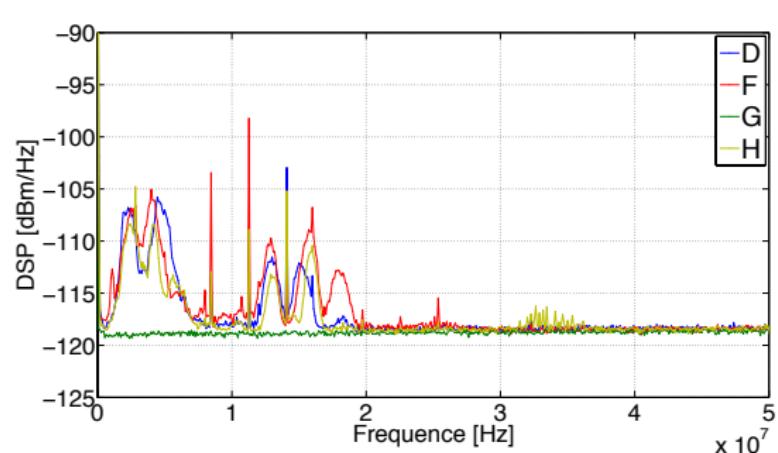
Relation τ_{RMS} vs gain moyen



- Corrélation négative entre le gain du canal et l'étalement des retards

Résultats préliminaires du bruit : domaine fréquentiel

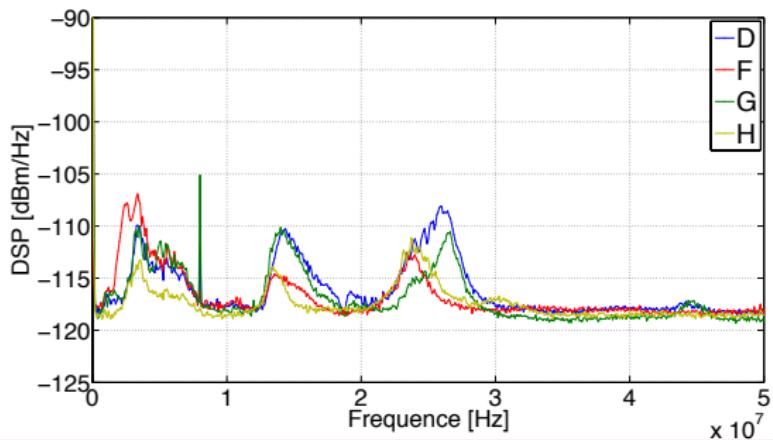
DSP bruit : 407 SW essence



- ▶ Bruit moyen entre -115 et -120 dBm/Hz
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateur, ...)
- ▶ Dépendance de la topologie (trajet et point de mesure)

Résultats préliminaires du bruit : domaine fréquentiel

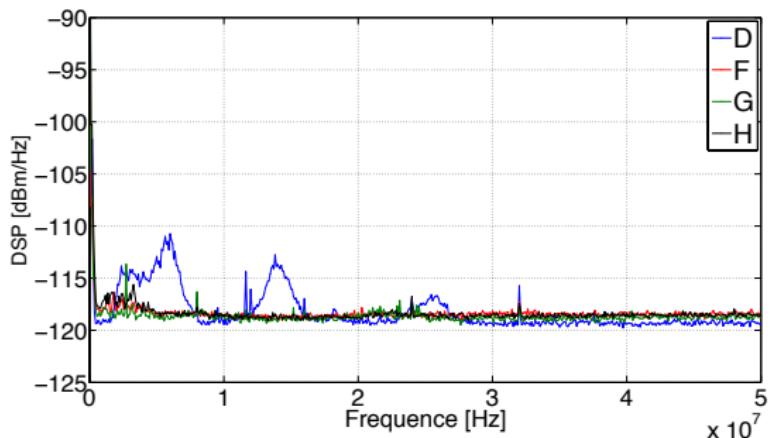
DSP bruit : 407 SW diesel



- ▶ Bruit moyen entre -115 et -120 dBm/Hz
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateur, ...)
- ▶ Dépendance de la topologie (trajet et point de mesure)

Résultats préliminaires du bruit : domaine fréquentiel

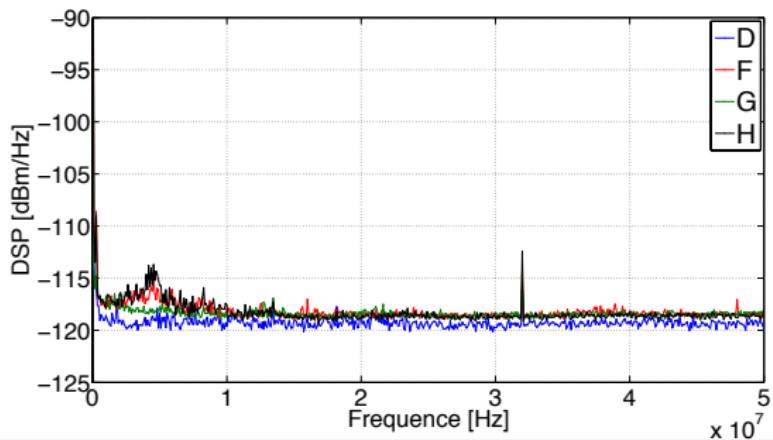
DSP bruit : Laguna II



- ▶ Bruit moyen entre -115 et -120 dBm/Hz
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateur, ...)
- ▶ Dépendance de la topologie (trajet et point de mesure)

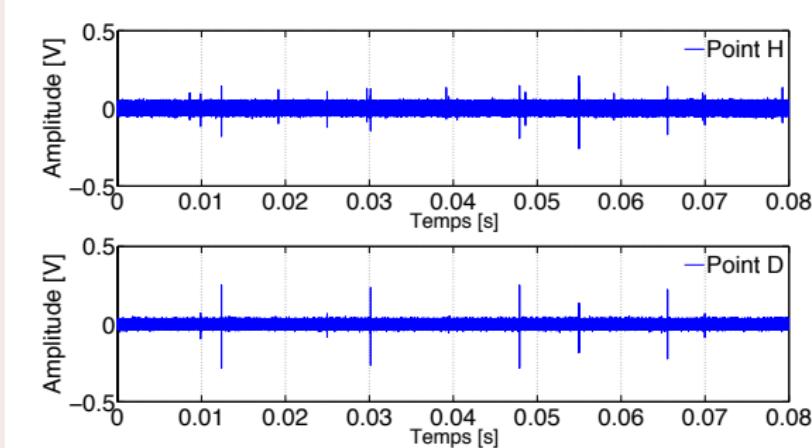
Résultats préliminaires du bruit : domaine fréquentiel

DSP bruit : Citroën C3



- ▶ Bruit moyen entre -115 et -120 dBm/Hz
- ▶ Interférences bandes étroites (radio amateur, ...)
- ▶ Dépendance de la topologie (trajet et point de mesure)

Résultats préliminaires du bruit : domaine temporel



- ▶ Bruits impulsifs différents selon le point au même instant
- ▶ Impulsion isolée
- ▶ Impulsion périodique

Extraction des bruits impulsifs périodiques : Cortès *et al.* [5]

Étude temps-fréquence : méthode de Welch

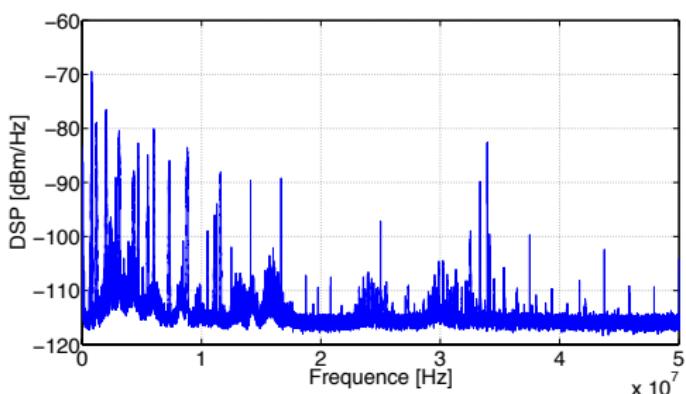
$$P(f) = \frac{1}{KLU} \sum_{i=0}^{K-1} \left| \sum_{n=0}^{L-1} w(n)x(n+iD)e^{2i\pi fn} \right|^2$$

- ▶ $x(n)$: enregistrement temporel
- ▶ $w(n)$: Hanning
- ▶ L : taille de la fenêtre de Hanning
- ▶ D : paramètre d'entrelacement ($D \leq L$)
- ▶ U : puissance moyenne de $w(n)$
- ▶ K : nombre de périodogrammes de taille L

Extraction des bruits impulsifs périodiques : Cortès *et al.* [5]

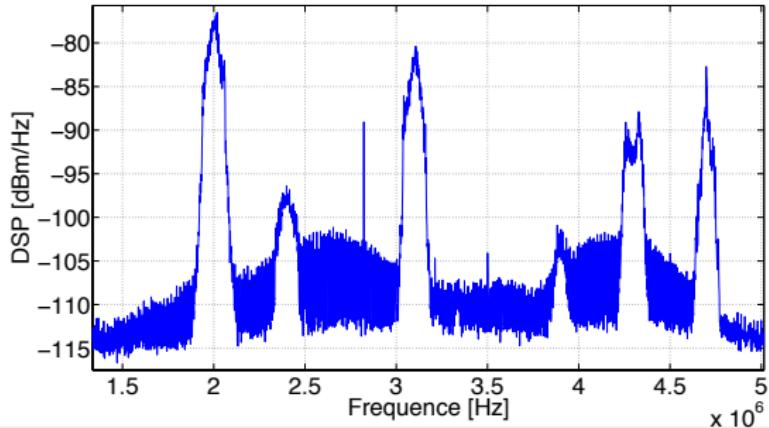
Paramètres	Valeurs
Nb periodogrammes	64
Fenêtre	Hanning
Taille FFT	125000 points
Résolution temporelle	1.25 ms
Résolution fréquentielle	800 Hz

DSP du bruit



Extraction des bruits impulsifs périodiques : Cortès *et al.* [5]

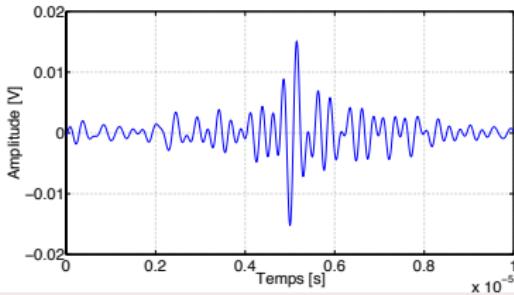
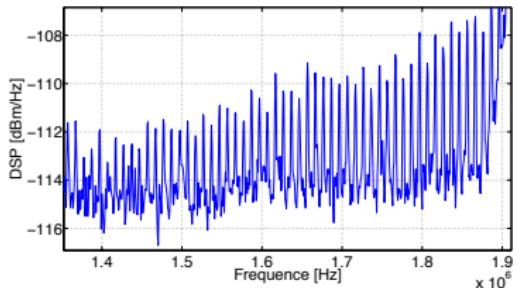
Zoom de la DSP



- ▶ Présence d'harmonique \Rightarrow bruit impulsif périodique
- ▶ Interférences bande étroites

Extraction des bruits impulsifs périodiques : Cortès *et al.* [5]

Zoom de la DSP & impulsion élémentaire



- ▶ Présence d'harmonique \Rightarrow bruit impulsif périodique
- ▶ Fréquence de répétition de 9.9 kHz
- ▶ Impulsion élémentaire extraite \Rightarrow noyé dans le bruit de fond

Conclusion de la partie mesure

Caractéristiques d'un canal

- ▶ Sélectif en fréquence avec de forts évanouissements
- ▶ Bruits de fond coloré
- ▶ Interférences bandes étroites
- ▶ Bruits impulsifs périodiques et non périodiques

Canal automobile

- ▶ dépend de la topologie
- ▶ dépend des trajets
- ▶ dépend des scénarios

Sommaire

1 Mesures et caractérisation du canal CPL

2 Étude et optimisation d'une communication CPL automobile

- Simulation du système de transmission et du canal
- Performance de la couche PHY sur canal CPL automobile
- Dimensionnement de l'intervalle de garde et de l'espace inter-porteuses
- Conclusion

3 Démonstrateur CPL

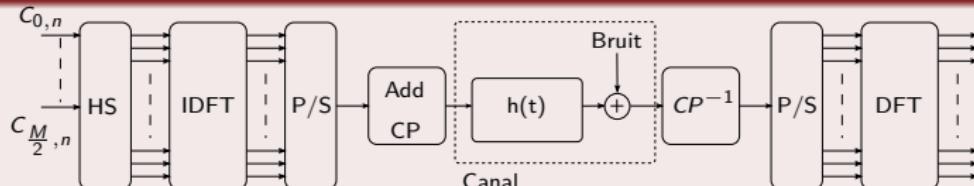
4 Conclusions & perspectives

Objectifs

- ▶ Performances des paramètres HPAV en terme de débits atteignables
- ▶ Étude pour différents canaux
- ▶ Étude des paramètres d'une modulation multi-porteuse (DMT) : intervalle de garde & espacement inter-porteuses

Couche PHY : modulation multi-porteuse DMT

Schéma de modulation



Paramètres

- ▶ $C_{m,n}$ symboles complexes : BPSK à 1024QAM
- ▶ IDFT & DFT : transformée de Fourier rapide (algorithme FFT)
- ▶ HS : symétrie hermitienne
- ▶ CP : intervalle de garde

Couche PHY : un besoin de s'adapter au canal ?

Problème

- ▶ Canal : sélectif, fort évanouissement
- ▶ Bruit : bruit de fond coloré, interférence bande étroite, bruit impulsif
- ▶ Contrainte couches supérieures (QoS) : débit, taux d'erreur binaire, temps de réponse (retransmission)

Solution : algorithme d'allocation de bits (bit-loading)

Il faut s'adapter en fonction des conditions du canal estimées et d'une QoS :

- ▶ algorithme maximisant le débit pour une marge de bruit donnée
- ▶ algorithme maximisant la marge de bruit pour un débit donné

Couche PHY : un besoin de s'adapter au canal ?

Problème

- ▶ Canal : sélectif, fort évanouissement
- ▶ Bruit : bruit de fond coloré, interférence bande étroite, bruit impulsif
- ▶ Contrainte couches supérieures (QoS) : débit, taux d'erreur binaire, temps de réponse (retransmission)

Solution : algorithme d'allocation de bits (bit-loading)

Il faut s'adapter en fonction des conditions du canal estimées et d'une QoS :

- ▶ algorithme maximisant le débit pour une marge de bruit donnée
- ▶ algorithme maximisant la marge de bruit pour un débit donné

Couche PHY : algorithme de bit-loading

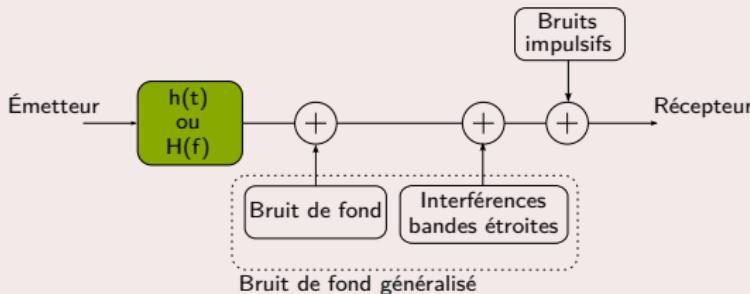
Algorithme de bit-loading : Decreasing BER-constrained, Guerrini *et al.* [4]

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{b_m} \sum_{m=0}^{M-1} b_m \\ \overline{P_{eb}} = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} b_m P_{ebm}}{\sum_{m=0}^{M-1} b_m} \leq P_T \end{array} \right.$$

- ▶ b_m le nombre de bits à la sous-porteuse m
 - ▶ $\overline{P_{eb}}$ le taux d'erreur binaire moyen
 - ▶ P_T le taux d'erreur cible
 - ▶ P_{ebm} le taux d'erreur par sous-porteuses
- ▶ Avec respect contrainte de densité spectrale de puissance à l'émission

Simulation du canal

Modélisation du canal

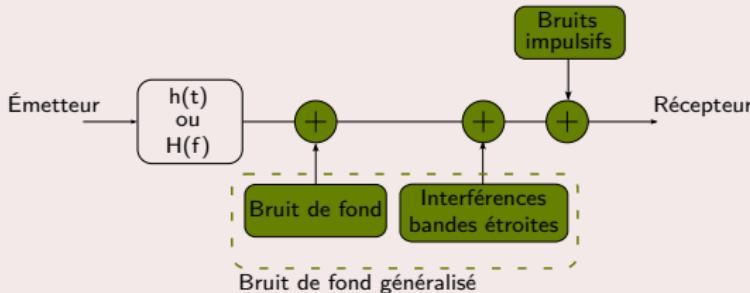


Fonction de transfert

- ▶ Hypothèse : invariant dans le temps
- ▶ Paramètres S_{21} : base de données de mesures
- ▶ Réponse impulsionnelle estimée à partir des S_{21}

Simulation du canal

Modélisation du canal



Bruit du canal

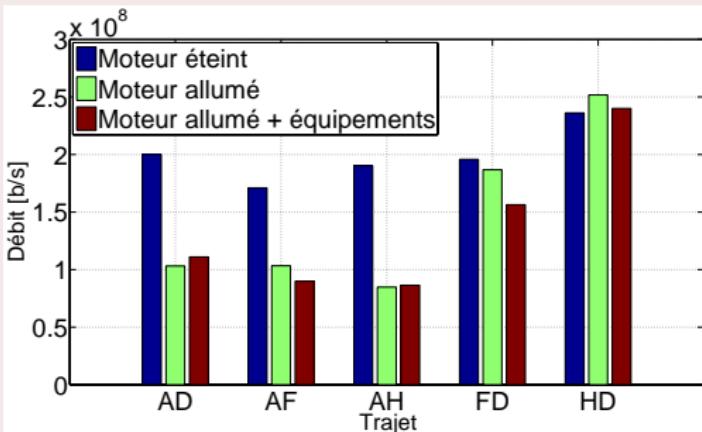
- ▶ Bruit blanc additif gaussien : -110 dBm/Hz ou -120 dBm/Hz

Impact de l'état du moteur

Paramètres & résultat débit : Peugeot 407SW essence

Paramètres :

- ▶ HPAV
- ▶ $P_e = -60 \text{ dBm/Hz}$
- ▶ $P_N = -110 \text{ dBm/Hz}$
- ▶ $[4 ; 30] \text{ MHz}$
- ▶ $P_T = 10^{-3}$



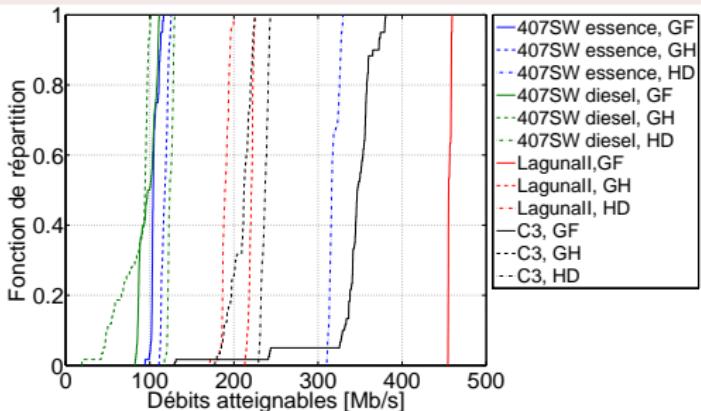
- ▶ Confirme mesure étude de faisabilité
- ▶ Débit couche PHY supérieur à 80 Mb/s
- ▶ Confirme étude Sanchez-Martinez *et al.* [3]

Impact de la topologie

Paramètres & résultats débit : toute les mesures

Paramètres :

- ▶ HPAV
- ▶ $P_e = -60 \text{ dBm/Hz}$
- ▶ $P_N = -110 \text{ dBm/Hz}$
- ▶ $[1 ; 50] \text{ MHz}$
- ▶ $P_T = 10^{-3}$
- ▶ SNR parfait



- ▶ Variabilité des débits : trajets et topologie
- ▶ Valeur médiane minimum : 94 Mb/s

Dimensionnement des paramètres de la DMT

Objectifs

- ▶ Dimensionnement de l'intervalle de garde
- ▶ Dimensionnement de l'espacement inter-porteuse

Canal

- ▶ Utilisation des mesures de S_{21} et/ou estimation de la réponse impulsionnelle
- ▶ Hypothèse : bruit de fond blanc additif Gaussien

Calcul du terme d'interférence

$$N_{ISI+ICI}(m) = 2\sigma_x^2 \sum_{l=L_{CP}+1}^{L_h-1} \left| \sum_{\mu=l}^{L_h-1} h(\mu) e^{-j\frac{2\pi}{M}\mu m} \right|^2$$

- ▶ L_{CP} : longueur de l'intervalle de garde
- ▶ h : réponse impulsionnelle du canal de longueur L_h

Calcul du débit

$$R_{DMT} \# \frac{M}{M + L_{CP}} \Delta_f \sum_{m=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{|H_m|^2 \sigma_c^2}{\Gamma(\sigma_n^2 + N_{ISI+ICI}(m))} \right)$$

- ▶ M : taille FFT
- ▶ N : le nombre de sous-porteuses utiles
- ▶ Δ_f : taille espacement inter-porteuses
- ▶ Marge de SNR : $\Gamma = (1/3)[Q^{-1}(P_{es}/4)]^2$ pour $P_{es} = 10^{-3}$

Calcul du terme d'interférence

$$N_{ISI+ICI}(m) = 2\sigma_x^2 \sum_{l=L_{CP}+1}^{L_h-1} \left| \sum_{\mu=l}^{L_h-1} h(\mu) e^{-j\frac{2\pi}{M}\mu m} \right|^2$$

- ▶ L_{CP} : longueur de l'intervalle de garde
- ▶ h : réponse impulsionnelle du canal de longueur L_h

Calcul du débit

$$R_{DMT} \# \frac{M}{M + L_{CP}} \Delta_f \sum_{m=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{|H_m|^2 \sigma_c^2}{\Gamma(\sigma_n^2 + N_{ISI+ICI}(m))} \right)$$

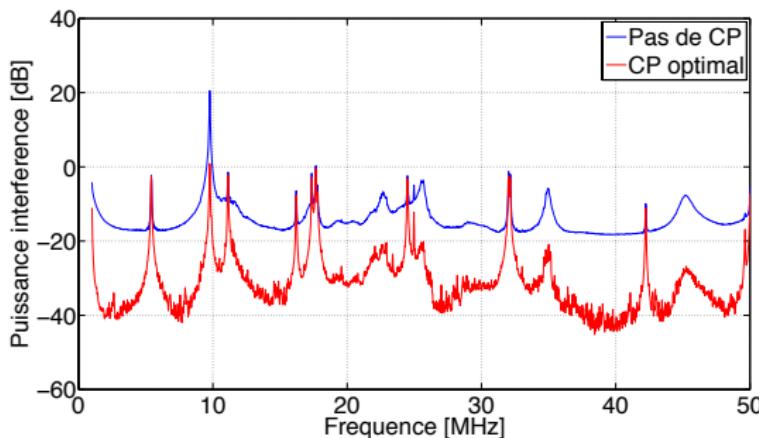
- ▶ M : taille FFT
- ▶ N : le nombre de sous-porteuses utiles
- ▶ Δ_f : taille espacement inter-porteuses
- ▶ Marge de SNR : $\Gamma = (1/3)[Q^{-1}(P_{es}/4)]^2$ pour $P_{es} = 10^{-3}$

Résultat : interférence pour un CP optimum

Décision du CP optimum

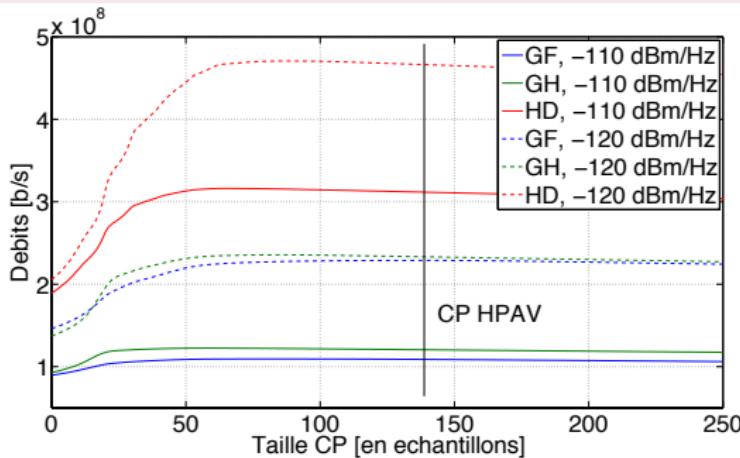
$$CP_{opt} = \arg \max_{L_{CP}} \{R_{DMT}(L_{CP})\}.$$

Figure : interférence



Taille de l'intervalle de garde

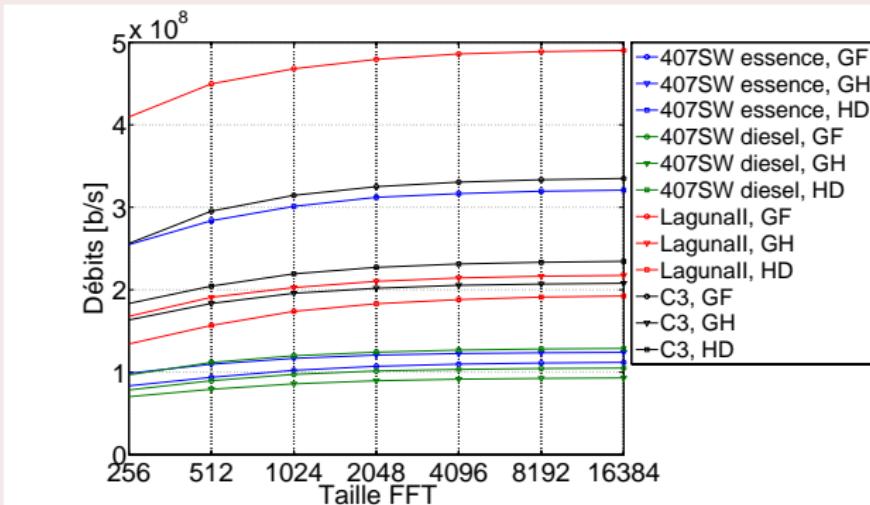
Figure : débit vs CP



- ▶ Intervalle de garde surdimensionné est contre productif \Rightarrow réduction de l'efficacité spectrale
- ▶ Intervalle de garde très inférieur à celui de l'HPAV
- ▶ SNR moyen vs terme d'interférence

Taille de l'espace inter-porteuses

Figure : débit vs taille de FFT



- ▶ Plusieurs tailles de FFT possibles ⇒ dépend de la complexité

Conclusion de la partie étude des paramètres

Impact du canal

- ▶ Impact scénario
- ▶ Impact topologie et trajet

Dimensionnement des paramètres multi-porteuse

- ▶ Tailles de l'intervalle de garde inférieures à l'HPAV
- ▶ Plusieurs FFT possibles : choix vs complexité

Sommaire

- 1 Mesures et caractérisation du canal CPL**
- 2 Étude et optimisation d'une communication CPL automobile**
- 3 Démonstrateur CPL**
 - Un démonstrateur flexible ?
 - Couche PHY logicielle
 - Transmission sur canal réel : résultats préliminaires
 - Conclusion
- 4 Conclusions & perspectives**

Introduction

Objectifs

- ▶ Confrontation résultats de simulation et résultats en environnement réel
- ▶ Montrer l'intérêt d'un démonstrateur utilisant une plateforme radio logicielle

Problèmes lors de la réalisation d'un démonstrateur

- ▶ Temps de développement long
- ▶ Complexité des algorithmes vs implémentation
- ▶ Besoin d'un spécialiste : implémentation FPGA, DSP, ...
- ▶ Plateforme et outil de développement à connaître

Introduction

Objectifs

- ▶ Confrontation résultats de simulation et résultats en environnement réel
- ▶ Montrer l'intérêt d'un démonstrateur utilisant une plateforme radio logicielle

Problèmes lors de la réalisation d'un démonstrateur

- ▶ Temps de développement long
- ▶ Complexité des algorithmes vs implémentation
- ▶ Besoin d'un spécialiste : implémentation FPGA, DSP, ...
- ▶ Plateforme et outil de développement à connaître

Introduction

Objectifs

- ▶ Confrontation résultats de simulation et résultats en environnement réel
- ▶ Montrer l'intérêt d'un démonstrateur utilisant une plateforme radio logicielle

Problèmes lors de la réalisation d'un démonstrateur

- ▶ Temps de développement long
- ▶ Complexité des algorithmes vs implémentation
- ▶ Besoin d'un spécialiste : implémentation FPGA, DSP, ...
- ▶ Plateforme et outil de développement à connaître

Introduction

Objectifs

- ▶ Confrontation résultats de simulation et résultats en environnement réel
- ▶ Montrer l'intérêt d'un démonstrateur utilisant une plateforme radio logicielle

Problèmes lors de la réalisation d'un démonstrateur

- ▶ Temps de développement long
- ▶ Complexité des algorithmes vs implémentation
- ▶ Besoin d'un spécialiste : implémentation FPGA, DSP, ...
- ▶ Plateforme et outil de développement à connaître

Introduction

Objectifs

- ▶ Confrontation résultats de simulation et résultats en environnement réel
- ▶ Montrer l'intérêt d'un démonstrateur utilisant une plateforme radio logicielle

Problèmes lors de la réalisation d'un démonstrateur

- ▶ Temps de développement long
- ▶ Complexité des algorithmes vs implémentation
- ▶ Besoin d'un spécialiste : implémentation FPGA, DSP, ...
- ▶ Plateforme et outil de développement à connaître

Solution rapide et flexible

- ▶ Utilisation d'une plateforme radio logicielle : carte USRP2

Schéma banc de test général

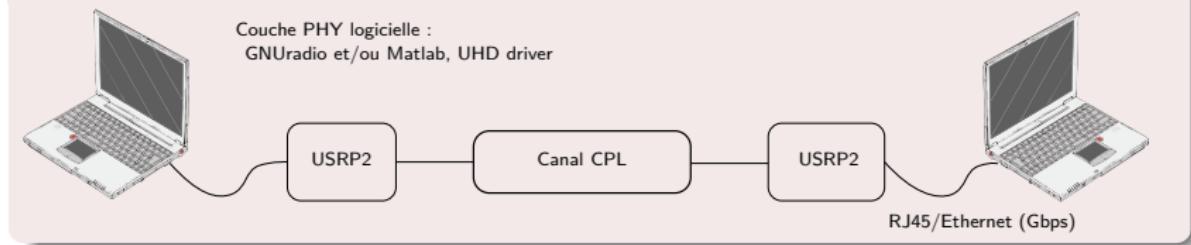


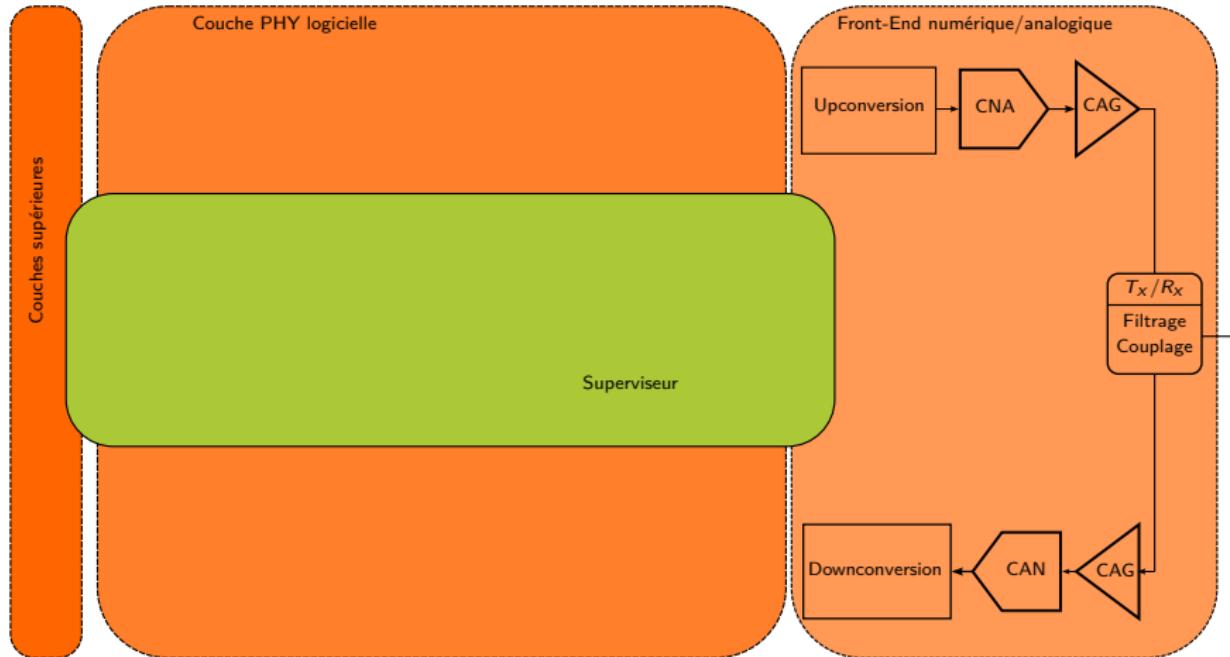
Photo carte USRP2



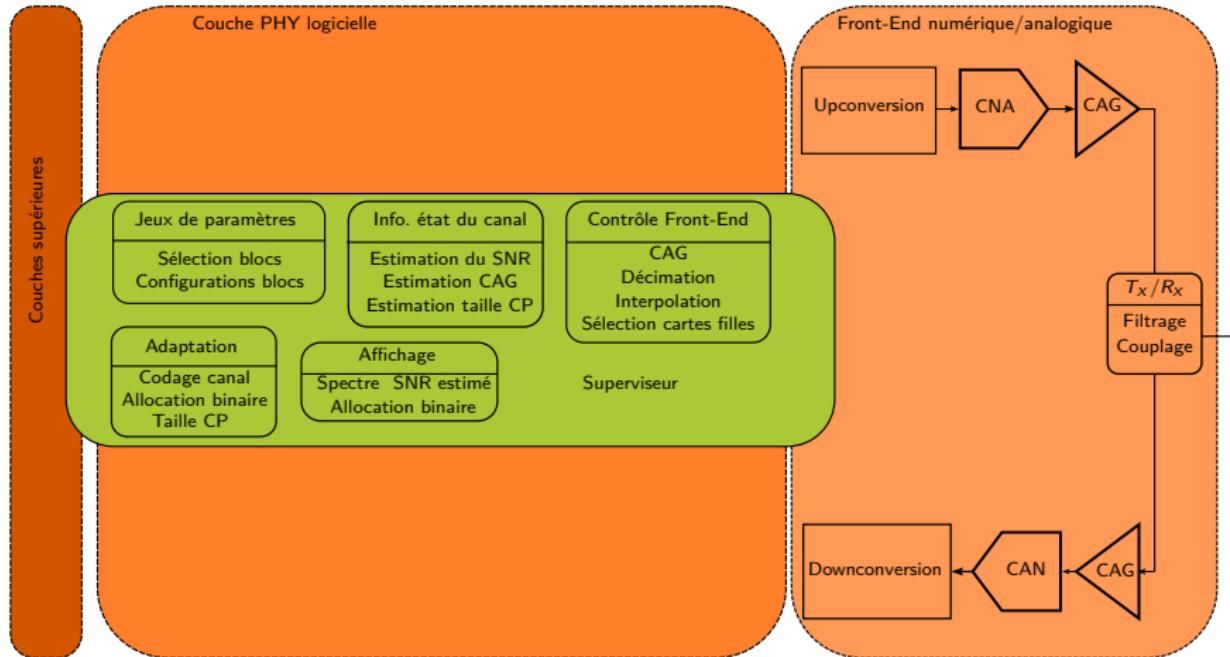
Photo carte fille LFTX [0 ; 33] MHz



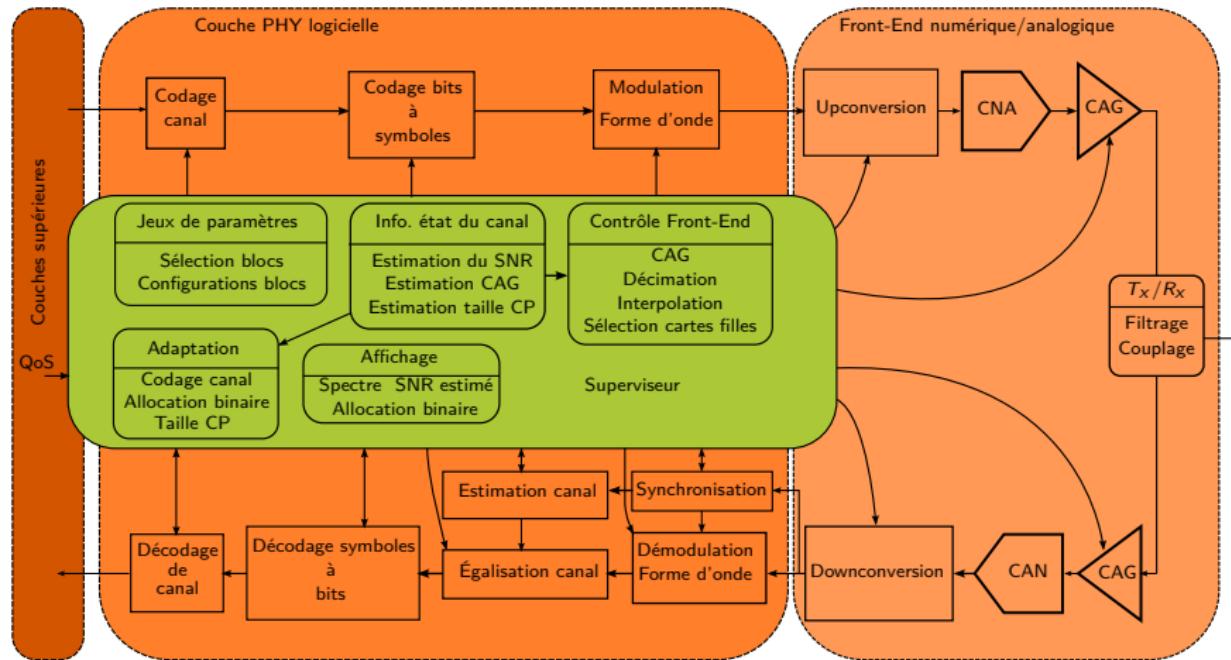
Synoptique du démonstrateur



Synoptique du démonstrateur



Synoptique du démonstrateur



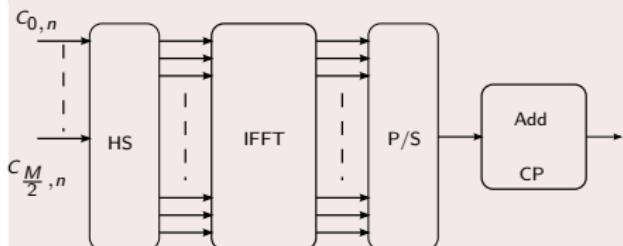
Couche PHY logicielle : émetteur & format de trame

Trame PPDU (PHY Protocol Data Unit)



- ▶ PPDU données : transmission des données utiles avec allocation binaire ou non
- ▶ PPDU sondage de canal : estimation canal, estimation SNR, estimation allocation de bits

Émetteur DMT

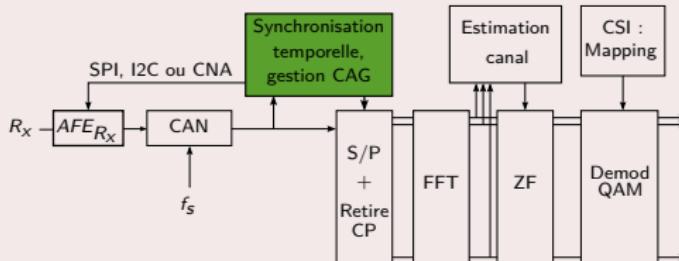


Paramètres d'intérêts :

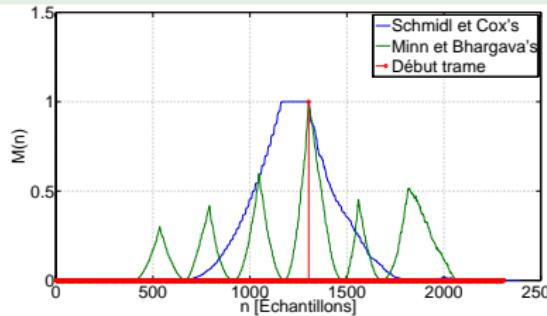
- ▶ Taille CP, IFFT
- ▶ Constellations ($C_{m,n}$: BPSK à 1024QAM)

Couche PHY logicielle : traitement en réception

Récepteur

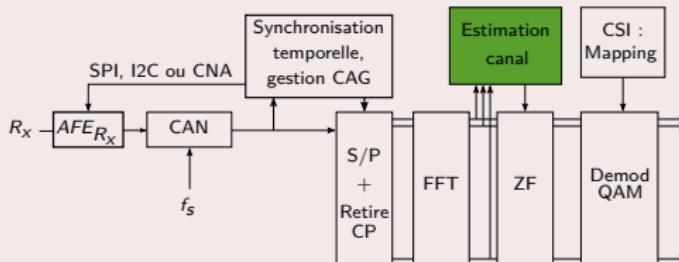


Synchronisation temporelle : Minn et Bhargava [6]



Couche PHY logicielle : traitement en réception

Récepteur



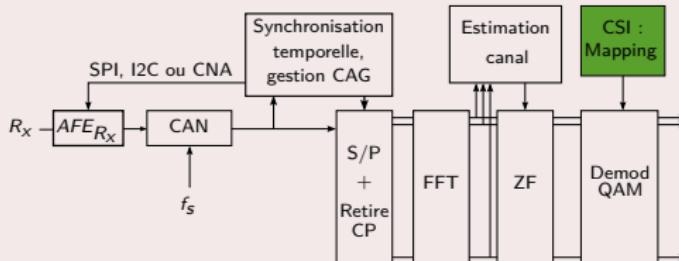
Estimation de canal fréquentielle

$$\hat{H}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{Y_{m,n}}{B_{m,n}}$$

- $B_{m,n}$ symbole connu du récepteur
- $Y_{m,n}$ le signal reçu après FFT à la sous-porteuse m et l'instant n

Couche PHY logicielle : traitement en réception

Récepteur



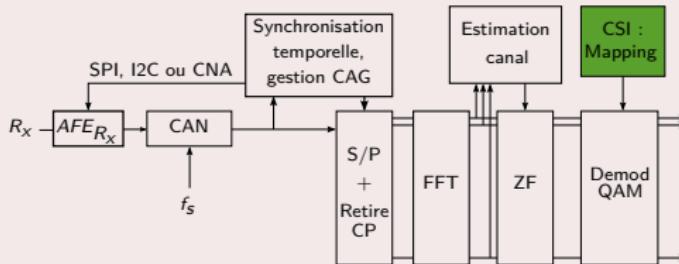
Estimation du SNR

$$\widehat{SNR}_m = \frac{|\hat{H}_m|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |Y_{m,n}|^2 - \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=0}^{N-1} \frac{Y_{m,n}}{B_{m,n}} \right|^2}$$

- ▶ $B_{m,n}$ symbole connu du récepteur
- ▶ $Y_{m,n}$ le signal reçu après FFT à la sous-porteuse m et l'instant n

Couche PHY logicielle : traitement en réception

Récepteur



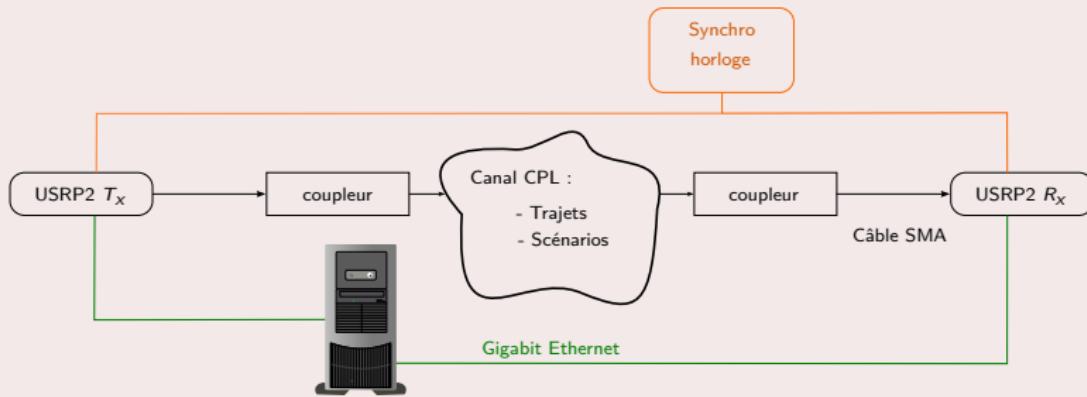
Estimation débit : algorithme d'allocation binaire, Decreasing BER-constrained, Guerrini *et al.* [4]

Paramètres :

- ▶ SNR estimé
- ▶ Taux d'erreur binaire cible (QoS) : $P_T = 10^{-3}$

Banc de test

Schéma du banc de test



Description condition du canal CPL

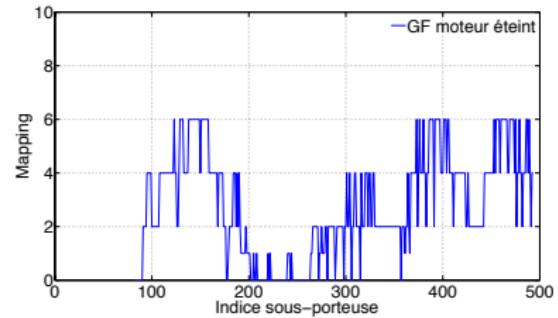
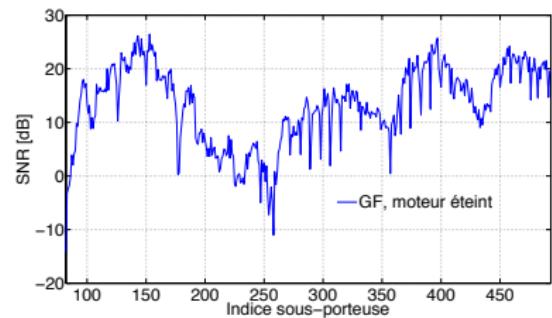
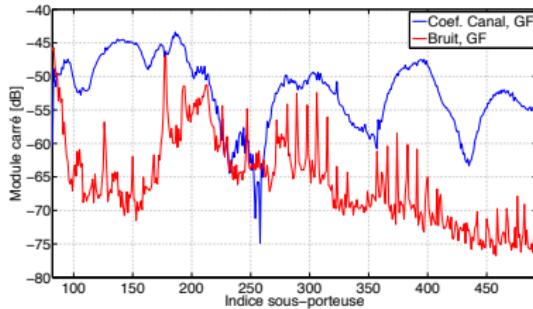
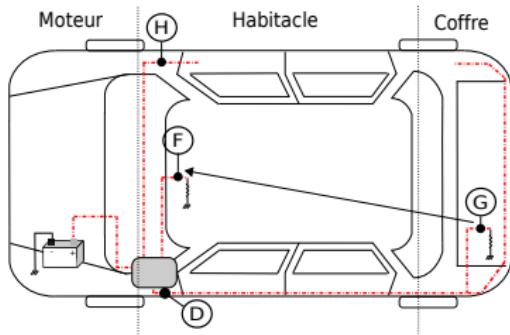
- ▶ Trajets : GF, GH et HD
- ▶ Scénario statique (1) : moteur éteint
- ▶ Scénario statique (2) : moteur allumé

Paramètres de la couche PHY

Paramètres de test

Paramètres	PHY (1)	PHY (2)	PHY (3)
Bandé passante utile	[2 ; 12] MHz	idem PHY (1)	idem PHY (1)
Taille FFT	1024	idem PHY (1)	512
N_{utiles} sous-porteuses utiles	412	idem PHY (1)	207
Fréquence d'échantillonnage	25 MS/s	idem PHY (1)	idem PHY (1)
N_{CP} (échantillons)	139 (5.56 μ s)	60 (2.4 μ s)	20 (800 ns)
Espace inter-porteuse	24.414 kHz	idem PHY (1)	48.82 kHz
Mapping	BPSK à 1024 QAM	idem PHY (1)	idem PHY (1)
$N_{ sounding}$	20	idem PHY (1)	idem PHY (1)
P_T	10^{-3}	idem PHY (1)	idem PHY (1)
N_{data} (échantillons)	20	idem PHY (1)	idem PHY (1)
N_{est} (échantillons)	2	idem PHY (1)	idem PHY (1)
Débit max théorique	$\simeq 100.5$ Mb/s	$\simeq 100$ Mb/s	$\simeq 101$ Mb/s

Illustrations : GF, moteur éteint & couche PHY (1)



Résultats GF, GH & HD : couche PHY (1)

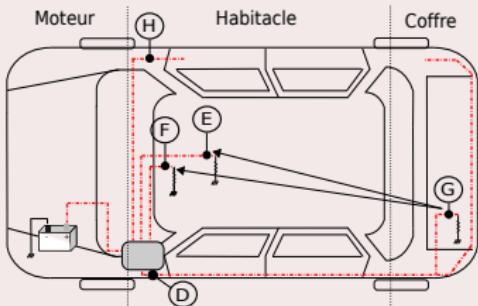
Débits atteignables estimés

Débits [Mb/s]		min	max	moy.	écart type	PPDU détectés	Fausse détection
GF	Statique (1)	15.5	32.5	30.1	2.6	117	0
	Statique (2)	2.95	11.4	7.14	2.29	69	2
GH	Statique (1)	9.2	24.4	21.9	3.2	121	5
	Statique (2)	10.22	11.49	11	2.6	86	3
HD	Statique (1)	0.46	75.8	72.8	7	121	9
	Statique (2)	49.92	74.16	68.9	3.48	120	3

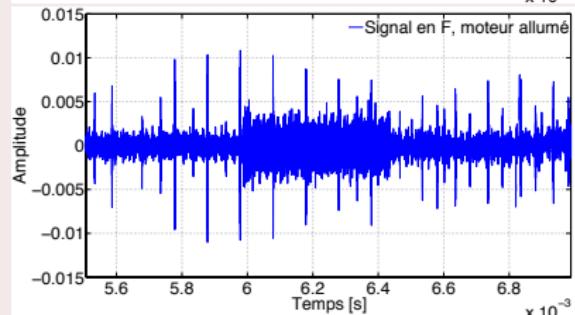
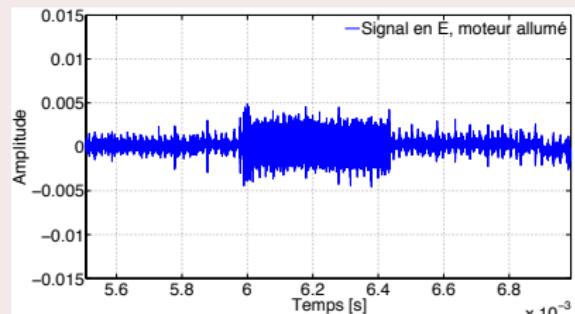
- ▶ Chute du débit lors du passage au scénario statique (2)
- ▶ Problème synchronisation pour le scénario statique (2)
- ▶ Trajet HD : débit élevé peu importe le scénario

Cas d'étude : transmission de type diffusion

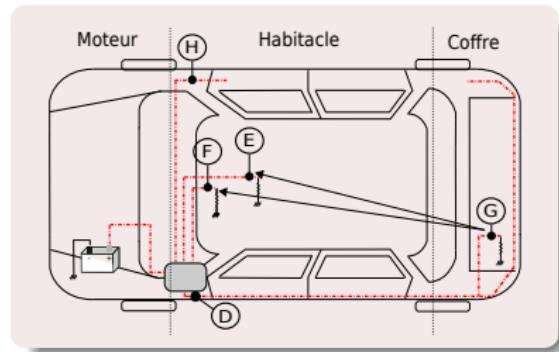
- ▶ Application : serveur vidéo, caméra de recul, ...
- ▶ Diffusion de G vers E & F
- ▶ Scénario statique (1) & (2)
- ▶ Comparaison couche PHY (1), (2) et (3)



Figures : point E (haut), point F (bas)



Cas d'étude (démonstrateur CIFAER) : résultats



Débits [Mb/s]	Statique (1) (1 PPDU)
GF	PHY (1) 30.7
	PHY (2) 33.6
	PHY (3) 33.2
GE	PHY (1) 32.6
	PHY (2) 35.7
	PHY (3) 35.7

- ▶ Débits atteignables supérieurs à 30 Mb/s
- ▶ scénario statique (1) : peu de variation entre les débits estimés
- ▶ scénario statique (2) : pas de résultats (taux de détection trame très faible)

Conclusion de la partie démonstrateur

Avantages

- ▶ Performance d'une chaîne dans son ensemble
- ▶ Tous les blocs de la chaîne sont « maîtrisables »
- ▶ Traitement couche PHY logicielle : Matlab
- ▶ Banc de test facile à embarquer dans l'automobile

Inconvénients

- ▶ Pas d'amplicateur à l'émission et à la réception
- ▶ Bande passante maximum : 12.5 MHz
- ▶ Traitement couche PHY logicielle : Matlab

Conclusion de la partie démonstrateur

Avantages

- ▶ Performance d'une chaîne dans son ensemble
- ▶ Tous les blocs de la chaîne sont « maîtrisables »
- ▶ Traitement couche PHY logicielle : Matlab
- ▶ Banc de test facile à embarquer dans l'automobile

Inconvénients

- ▶ Pas d'amplicateur à l'émission et à la réception
- ▶ Bande passante maximum : 12.5 MHz
- ▶ Traitement couche PHY logicielle : Matlab

Sommaire

- 1 Mesures et caractérisation du canal CPL**
- 2 Étude et optimisation d'une communication CPL automobile**
- 3 Démonstrateur CPL**
- 4 Conclusions & perspectives**
 - Bilan
 - Perspectives

Bilan

- ▶ CPL automobile ⇒ débits supérieurs au FlexRay (10 Mb/s) envisageable
- ▶ Base de donnée de mesures du canal et du bruit
- ▶ Méthode pour dimensionner l'intervalle de garde et l'espacement inter-porteuses
- ▶ Intérêt d'utiliser un démonstrateur avec une couche PHY logicielle

Perspectives

- ▶ Statuer sur un masque d'émission : étude CEM
- ▶ Travail sur la fiabilité et la robustesse de la transmission
- ▶ Démonstrateur
 - ▶ améliorer l'étage de réception : CAG, filtrage, ...
 - ▶ étendre la bande à 25 MHz (maximum possible)
 - ▶ amplificateur à l'émission

Références |



[1] Vallejo-Mora, A. B. and Sanchez-Martínez, J. J. and Canete, F. J. and Cortés, J. A. and Díez, L.

Characterization and Evaluation of In-Vehicle Power Line Channels
the IEEE Global Telecommunications Conference, 2010.



[2] Lienard, M. and Carrion, M.O. and Degardin, V. and Degauque, P.

Modeling and Analysis of In-Vehicle Power Line Communication Channels
IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008.



[3] Sanchez-Martinez, J. J. and Vallejo-Mora, A. B. and Cortes, J. A. and Canete, F. J. and Diez, y. L.

Performance analysis of OFDM modulation on in-vehicle channels in the frequency band up to 100 MHz
the International Conference on Broadband and Biomedical Communications, 2010



[4] Guerrini, E. and Dell' Amico, G. and Bisaglia, P. and Guerrieri, L.

Bit-loading algorithms and SNR estimate for HomePlug AV
IEEE International Symposium on, Power Line Communications and Its Applications, 2007.



[5] Cortes, J. A. and Cerdá, M. and Diez, L. and Canete, F. J.

Analysis of the periodic noise on In-vehicle broadband Power Line Channels
IEEE International Symposium on, Power Line Communications and Its Applications, 2012.



[6] Minn, H. and Bhargava, V.

A simple and Efficient Timing Offset Estimation for OFDM Systems
Vehicular Technology Conference, VTC 2000-Spring, 2000.

Merci.