

Traitement de signaux radiofréquences sur FPGA

A.G. First-TF

P.-Y. Bourgeois

FEMTO-ST Time & Frequency dpt, Besançon, France

Lundi 16 mars 2015



Contexte / Contributeurs

Contexte/Challenges

- ▶ Maîtriser le traitement de signaux rf en temps réel → FPGA
- ▶ Analyse d'oscillateurs (ultrastables/faible bruit de phase)
 - ▶ $\nu_0 \rightarrow 100$ MHz, bande d'analyse (sub-Hz \rightarrow 10MHz) voire plus
 - ▶ $\mathcal{L}(f) < -160$ dBc/Hz (10-10kHz) [1]
 - ▶ palier de bruit blanc de phase < -185 dBc, méthode interférométrique [1]
- ▶ Radio définie par logiciel (SDR) : applications aux systèmes de positionnement et de datation par satellites
- ▶ Investir les terrains *Recherche, Radio-Amateurs, Enseignement et Vulgarisation*

Contributeurs

- ▶ Digital Geeks : P.-Y. Bourgeois, J.-M. Friedt, G. Goavec-Merou, T. Imaike
- ▶ 'Analog' Geeks : E. Rubiola, F. Vernotte, G. Cabodevila

Financement

- ▶ PIA Oscillator-IMP
- ▶ Région FC
- ▶ LabeX First-TF : stagiaires Carolina Cárdenas & Sara Martinez Gutierrez

Radio définie par logiciel (SDR)

Applications aux systèmes de positionnement et de datation par satellites

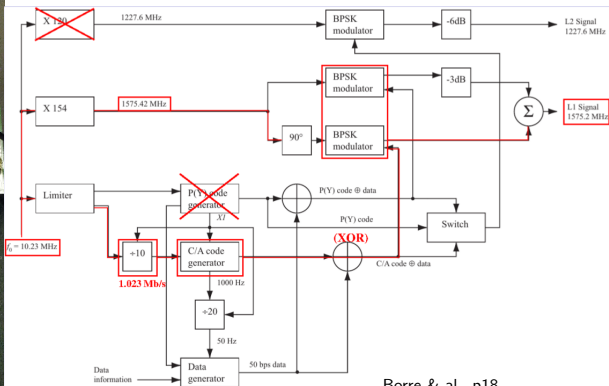
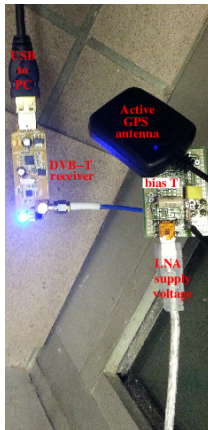
but: implémenter en logiciel le 'phase tracking' du signal acquis de plusieurs satellites GPS afin de reconstruire au sol une copie de temps GPS pour l'asservissement d'oscillateurs (GPS phase recovery)

GNSS

- ▶ Horloges C_S embarquées
- ▶ TF, marégraphes, concentration eau atmosphère ...

Récepteur GPS bas-côût

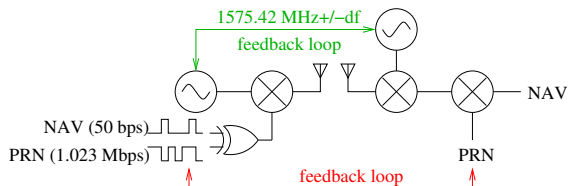
- ▶ résolution : 8 bits, bande passante 2,4 MHz (USB)
- ▶ traitement : `gnss-sdr/GNURadio/octave`



Radio définie par logiciel (SDR)

Applications aux systèmes de positionnement et de datation par satellites

- ▶ Le modulateur génère l'information
- ▶ L'information est encodée dans la phase de la porteuse
- ▶ Elle est contenue dans un signal dont la fréquence varie par effet Doppler¹, dérive et stabilité de l'OL²
- ▶ la puissance du signal reçu est sous le bruit thermique
- ▶ On retrouve l'information utile
 - ▶ par démodulation cohérente
 - ▶ par intercorrélations pour identifier le message contenu dans 1 satellite (on reçoit tout en même temps)
 - ▶ soit 2 boucles de contrôle (carrier & code tracking)

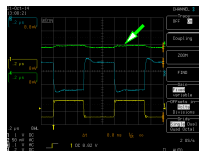
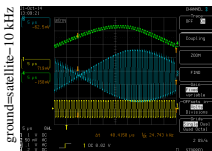
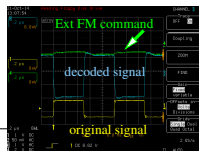
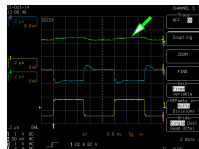
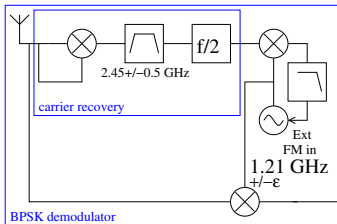
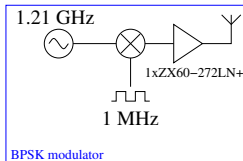


¹ $\sim \pm 4$ kHz, d'horizon à horizon

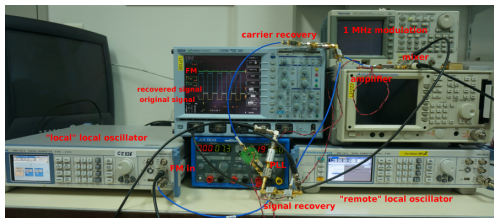
² on considère les effets ionosphériques et autres du second ordre

Approche Matérielle

Démodulation BPSK



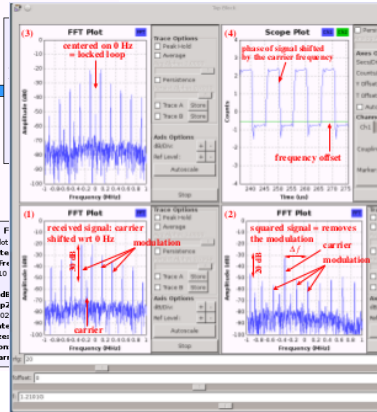
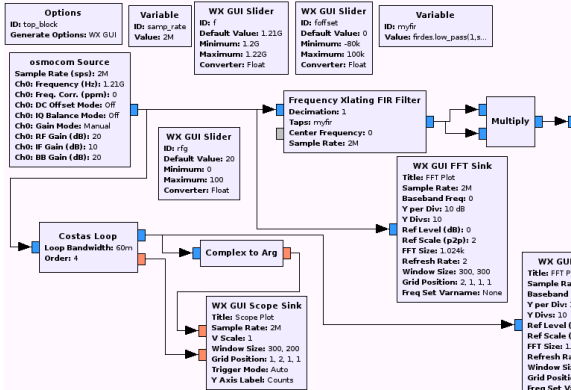
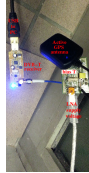
output if PLL is omitted



Approche Logicielle

SDR avec Gnu-Radio, Démodulation par boucle de Costas

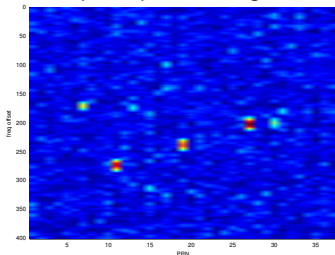
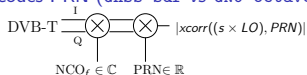
Seules des boucles internes (implémentées sous forme de blocs) sont autorisées par GNURadio



Approche Logicielle

Identification des satellites par intercorrélation s_{demod} et codes PRN (Gnss-sdr vs GNU octave)

- ▶ Principe du CDMA : chaque bit utile transmis (*navigation data*) est encodé par l'identifiant du satellite.
- ▶ Tous les satellites émettent sur la même fréquence (1574,2 MHz), leur identifiant les différencie.
- ▶ Chaque identifiant est répété chaque milliseconde, NAV est à 50 bps donc 20 points/bit.
- ▶ Temps de calcul proportionnel au décalage Doppler (nombre et résolution FFT)
- ▶ Augmenter la résolution en ajustant la fréquence d'échantillonnage³ peut limiter les performances logicielles → FPGA
- ▶ gnss-sdr : $f_{N_{\text{lim}}} = 2 \text{ MHz}$
- ▶ pas de phase-tracking



ID = PRN, ici 7,11,19,27,30, octave

```
GPS TDW: 299662 23972.960000
~ UTC: Wed Oct 22 13:14:23 2014
Current TDW obtained from SUPL assistance = 299662
Reference location (defined in config file):
Latitude=47.3 []
Longitude=6 []
Altitude=10 [m]
Doppler analysis results:
SV ID Measured [Hz] Predicted [Hz]
7 89250.00 -1745.40
11 93875.00 3382.16
19 91625.00 1541.05
27 90000.00 -209.33
30 90000.00 -244.43
Parameters estimation for Elonics E4000 Front-End:
Sampling frequency =1999885.36 [Hz]
IF bias present in baseband=90302.65 [Hz]
Reference oscillator error =-57.32 [ppm]
Corrected Doppler vs. Predicted
SV ID Corrected [Hz] Predicted [Hz]
7 -1052.65 -1745.40
11 3572.35 3382.16
19 1322.35 1541.05
27 -302.65 -209.33
30 -302.65 -244.43
GNSS-SDR Front-end calibration program ended.
```

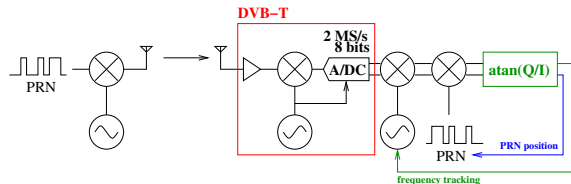
sortie gnss-sdr

³NB: la résolution dépend directement de la bande passante d'analyse

Approche Mixte

Phase tracking of the local oscillator

- ▶ Implémentation d'un correcteur de suivi de la fréquence de l'OL pour compenser les effets Doppler, dérives ...
- ▶ Un asservissement sur le code PRN peut-être souhaitable (permettrait de réduire la contrainte sampling hf + temps de calcul)

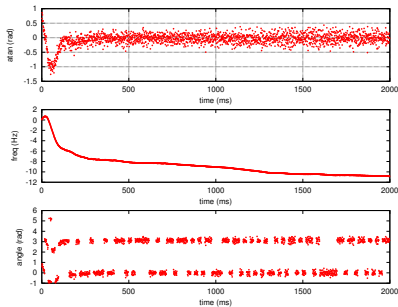


Quick reminder on implementing a feedback loop control:

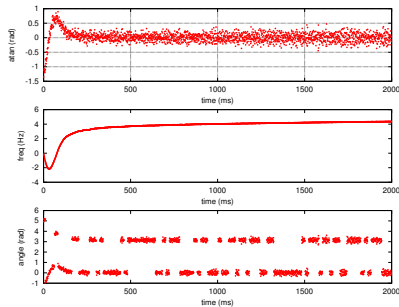
$$C(z) = \frac{O(z)}{I(z)} = \frac{a.z + b}{c.z + d} = \frac{a + b.z^{-1}}{c + d.z^{-1}} \rightarrow c.O_k + d.O_{k-1} = a.I_k + b.I_{k-1}$$

$$\text{or } \boxed{O_k = a/c.I_k + b/c.I_{k-1} - d/c.O_{k-1}}$$

Test 'offline' de l'asservissement de phase



Tracking phase avec le quartz du dongle



Tracking phase avec un R&S SMA100

- ▶ Construction d'un récepteur GPS bas coût : Antenne + DVB-T + gnss-sdr + GNURadio
 - ▶ Démodulation par boucle de Costas
 - ▶ Identification des satellites par intercorrélation
 - ▶ Correcteur de suivi de fréquence
- ▶ Démonstrateur générateur de code pseudo-aléatoire sur FPGA
- ▶ Démonstrations et sessions à l'EFTS 2015
- ▶ En cours : implantation d'un correcteur permettant d'asservir
- ▶ A venir : implémentation d'une chaîne de traitement complète à base de FPGA/CPU
 - ▶ Etage d'entrée, ADC haute vitesse
 - ▶ FPGA : démodulation, intercorrélation et tracking
 - ▶ post-traitement GNURadio

¹ J.-M. Friedt, *La réception de signaux venus de l'espace par récepteur de télévision numérique terrestre*, OpenSilicium 13, Dec2014/Jan-Fev 2015

² S. Martinez Gutierrez, J.-M Friedt, G. Cabodevila, P.Y Bourgeois, E. Rubiola, *Software Defined Radio for processing GNSS signals*, FOSDEM 2015

L'analyse métrologique d'oscillateurs ultrastables

Constats (2015)

- ▶ Outils d'analyse (Analogiques, Semi-numériques, Tout-numériques)
 - ▶ Instruments propriétaires (**Black-boxes**) et chers
 - ▶ Mesures Poddar/Rohde : 12 dB de dispersion à 10 kHz entre instruments !
 - ▶ Les compteurs de fréquences montrent des bizarreries / limitations
 - ▶ Les bancs de mesure de bruit de phase embarquent des artefacts non expliqués, cachent des informations
 - ▶ L'accès aux samples et filtres utilisés est limité ou interdit
- ▶ Variances :
 - ▶ Code disséminé/propriétaire, peu de code libre (SigmaTheta, avis aux contributeurs !)
- ▶ Analyse spectrale de bruit
 - ▶ Code absent

un des challenges pour First-TF : Mesures de haute précision de l'espace-temps⁴

Notre approche

- ▶ Comprendre et maîtriser tous les aspects liés au traitement numérique des signaux rf
- ▶ Utiliser la puissance de l'open-source pour propager nos solutions, garantir un code sain, faciliter la reproductibilité et le contrôle des expériences métrologiques
- ▶ Procurer un dispositif temps-réel maîtrisé et adaptatif (**White Box**)

⁴et de ses applications, N. Dimarcq, AG First-TF 2014

Banc d'analyse de performances d'oscillateurs ultrastables

Les raisons du tout numérique



- ▶ Multi-référence
- ▶ Cycles de mesures courts
- ▶ Temps-réel
- ▶ Tous les samples sont traités
- ▶ Fréquence porteuse plus élevée
- ▶ Bande d'analyse élevée
- ▶ Planchers de bruits améliorés
- ▶ Calcul simultané et discriminé AM/PM
- ▶ Contrôle total de la chaîne de mesure
- ▶ $\sigma_y(\tau)$ et analyse Tricorner

Points bloquants

- ▶ Calcul de l'arctan
- ▶ FFT
- ▶ résolution encore limitée des ADC

Les FPGA modernes sont à fortes capacités, permettent de lourds traitements parallèles et temps-réel dans le flux (plusieurs Gops) :

- ▶ +de 6 M de portes logiques
- ▶ 0.5 M flip-flop
- ▶ plusieurs TMACs

Couplé efficacement à un CPU, le couple FPGA/CPU devient redoutable. Depuis peu, le couple peut siéger dans le même SoC (et en multi-coeurs). Nous avons pris la résolution de nous tourner vers ce nouveau type d'outil, même si la courbe d'apprentissage est rude.

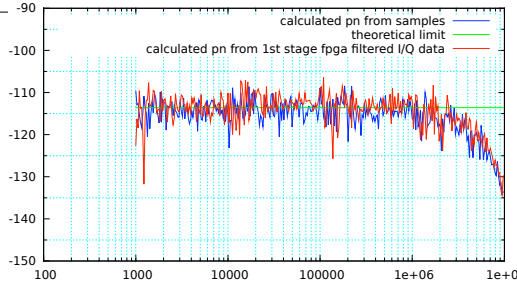
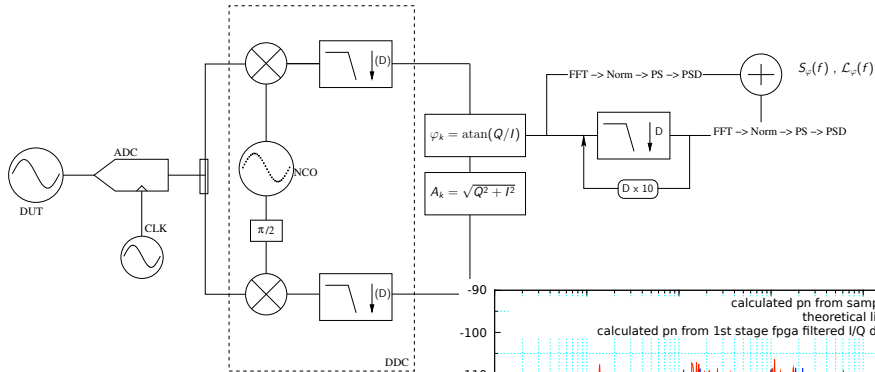
A noter que l'implémentation de calcul en double précision devient possible.

Architectures under test at FEMTO-ST

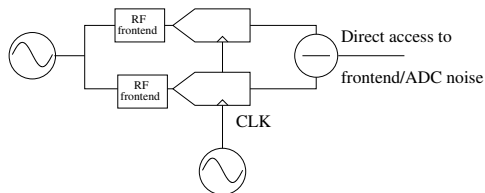
- ▶ Alazartech 9625, 2x Stratix III (main/coprocessor FPGAs), Pcie, 250 Msps, 16bits (12 effectifs) 2 cartes 2 voies (4ch) synchronisées
- ▶ Zynq (2cores), ZC706 + 4x ADC LT2158 (14 bits 310 Msps, tests 250Msps)
- ▶ Zynq (2 cores), Redpitaya, 2x ADC LTC2145 (14 bits 125 Msps)

On attend l'APF6 d'Armadeus Systems, (i.MX6, quad core, FPGA Cyclone V)

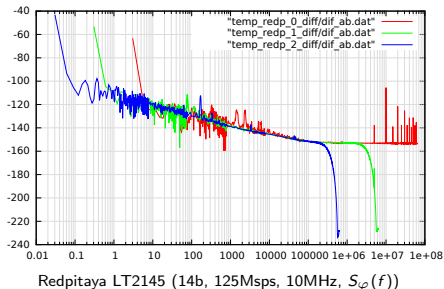
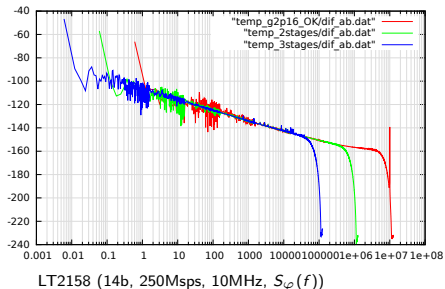
Principe d'un banc numérique de mesure de bruit



Bruit de phase d'ADC/frontend

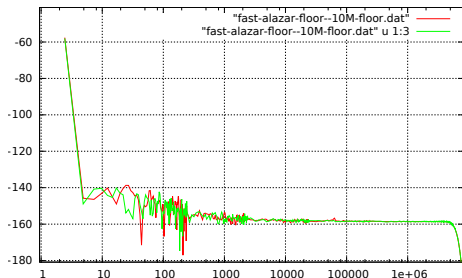
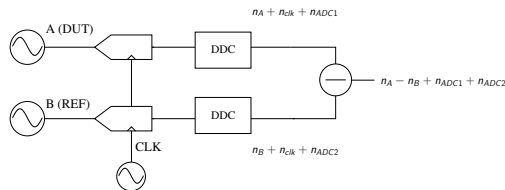


- ▶ Succession d'étages filtrage/décimation (de 1 à 3) dans le FPGA⁵
- ▶ Mesure $S_{\varphi}(f) \sim S_v(f)$ car P est normalisé
- ▶ Seuls subsistent une partie du jitter clock (split clk → ADC) + frontend rf



⁵ résolution maximale dans le 1^{er} étage

Single Channel noise measurement



$L(f) = -158.6 \text{ dBV}^2/\text{Hz}$ is the single channel Alazar noise limit (3 dB deduction from 2ch taken into account).

- ▶ n_{CLK} are removed
- ▶ n_{ADC} are added
- ▶ if $n_{DUT} < n_{PNM}$ and $n_{REF} < n_{PNM}$ then we have a n_{PNM} noise measurement.
- ▶ if $A = B$ and $n_{A/B} < n_{PNM}$, only ADCs added noise remains (as shown in preceding slide)

▶ $q = \frac{v_{fsr}}{2M} \sim 6 \cdot 10^{-4}$

▶ $\sigma^2 = \frac{q^2}{12} = 3.1 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2$

▶ total noise = $\mathcal{N}_t = \frac{\sigma^2}{FPBW}$ if $FPBW > f_N = fs/2$ else $\mathcal{N}_t = \frac{\sigma^2}{f_N}$.

Here, $FPBW = 150 \cdot 10^6$ so $\mathcal{N}_t = 2 \cdot 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz}$.

▶ $S_{floor} = -158.6 \text{ dBV}^2/\text{Hz}$

▶ Measurement indicates $-158.6 + 3 = -155.6$.

▶ From this we deduce $ENOB =$

$$\log_2 \left(1 + \frac{v_{fsr}}{\sqrt{12 \cdot f_N \cdot 10 \frac{S_{floor}}{10}}} \right) =$$

11.93bits matching the datasheet $ENOB \dots$

Application : mesure du bruit de phase de CSO

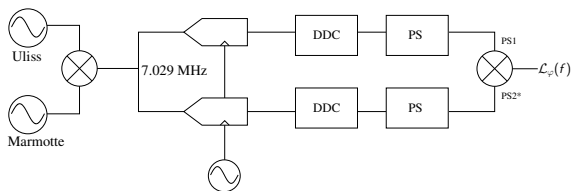
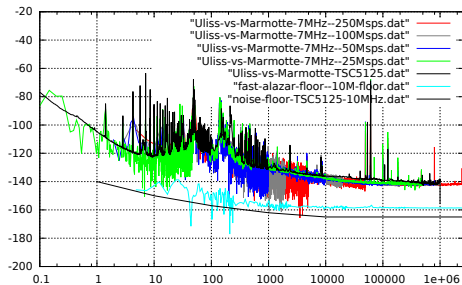
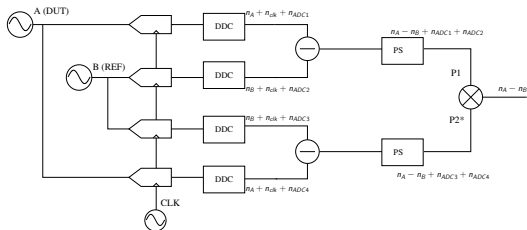


Schéma de mesure par intercorrélation à 2 canaux suffisant
Comparaison avec le système de référence (état de l'art) Symmetricom TSC5125



1000 corr (n_corr / 10 each decade / 10)

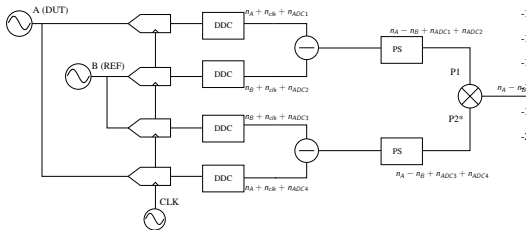
The magic of 4-ch digital Cross-spectrum



Uncorrelated terms vanishes at a rate of $\frac{1}{\sqrt{n_{corr}}}$!

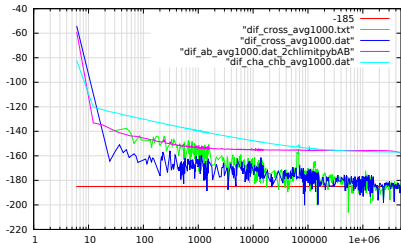
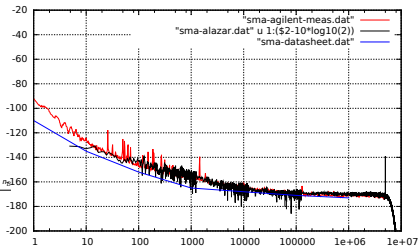
The magic of 4-ch digital Cross-spectrum

Limite (1000 corr) / Application à la mesure d'un synthé commercial à faible bruit de phase



Uncorrelated terms vanishes at a rate of $\frac{1}{\sqrt{n_{corr}}}$!

- ▶ Results shown are comparable to state-of-the-art devices
- ▶ Potentially high (very ?) resolution counter



- ▶ Un banc d'analyse de bruit de phase à l'état de l'art entièrement numérique
 - ▶ Palier de bruit blanc pour l'instant à -185 dBc, porteuse 10 MHz
 - ▶ $\mathcal{L}(f) < -160$ dBc à 10 kHz

et dont :

- ▶ la chaîne de traitement est maîtrisée (et chaque étage est optimisé)
- ▶ NCO square validé (avec restrictions)
- ▶ Filtrage décimateurs à convolution sinc 128 coefficients avec fenêtre d'apodisation
- ▶ Calcul de l'arctan, point encore bloquant (notre tentative à base de CORDIC non encore validée, et solutions alternatives à l'étude)
- ▶ FFT pas encore dans le FPGA
- ▶ Transfert CPU externe par Gb ethernet validé à 20 Msps (merci la DMA)
- ▶ Première mesure de bruit de phase d'ADC rapides (sic!)
- ▶ En cours : validation phasemètre en mode compteur haute sensibilité (Π, Λ, Ω)
- ▶ En cours : modélisation complète des sources de bruit (quantif) à chaque étage
- ▶ A faire : se greffer sur GNUradio pour boucler la boucle et profiter de son ordonnanceur et gestion de threads = s'assurer un 'vrai' temps-réel à haute vitesse, sans pertes
- ▶ A faire :

G. Bres-Saix, C. Nelson, A. Hati, G. Goavec-Merou, P.-Y. Bourgeois, E. Rubiola and D. Howe, *A Zynq-based digital phase and amplitude measurement system*, IFCS 2015

P.-Y. Bourgeois, T. Imaike, G. Goavec-Merou and E. Rubiola, *Noise in high-speed Analog to Digital Converters*, IFCS 2015

P.-Y. Bourgeois, T. Imaike, G. Goavec-Merou, F. Vernotte and E. Rubiola, *All-digital high-sensitivity realtime oscillator instability measurement system*, to be pub.

A table!