

Récepteurs numériques pour la radioastronomie basse fréquence

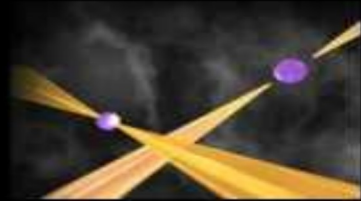
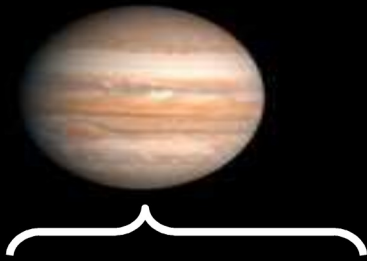


Cédric Dumez-Viou
Station de Radioastronomie de Nançay

Déroulement de la présentation

- Contraintes sur les chaînes de réceptions
- Traitements numériques
 - Filtrage
 - Analyse spectrale
 - Dédispersion
 - Corrélation
 - Traitement des interférences
- Plateformes d'implémentation
 - Traitement du signal et systèmes sur FPGA
 - Traitement du signal sur GPU (GPGPU)
- Transport du signal
 - PCB
 - Switch
 - Temps-fréquence

Exemple de sources observées



10 MHz



100 MHz



1 GHz

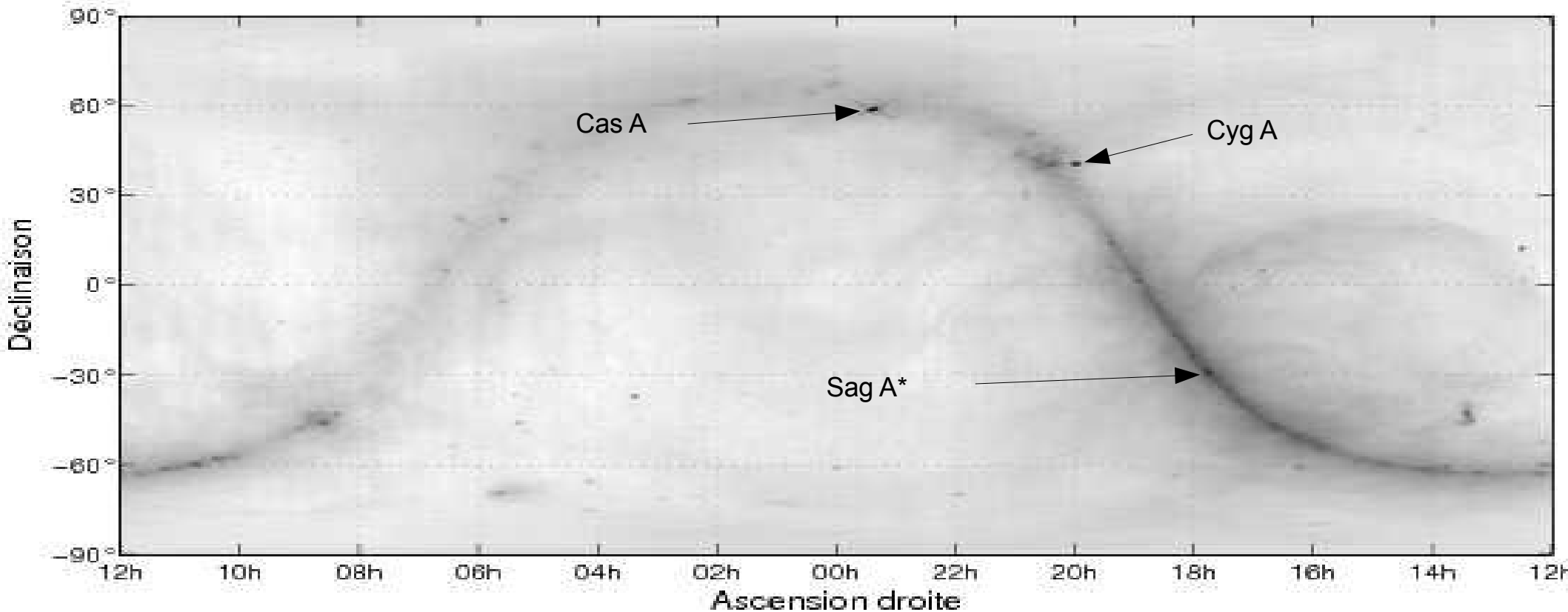
3,5 GHz



• Émissions *continuum*
(Soleil, Jupiter, Pulsars, ...)

Émissions de raies
(Comètes, Galaxies, ...)

Carte de l'émission continuum mesurée à 408 MHz



Le signal utile



Onde électromagnétique

Domaine radio : 3 kHz
à 300 GHz

Radiotélescope décimétrique de Nançay (1-3 GHz)

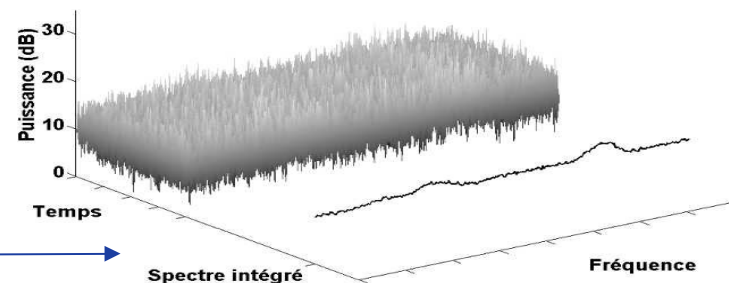


Signal observé :

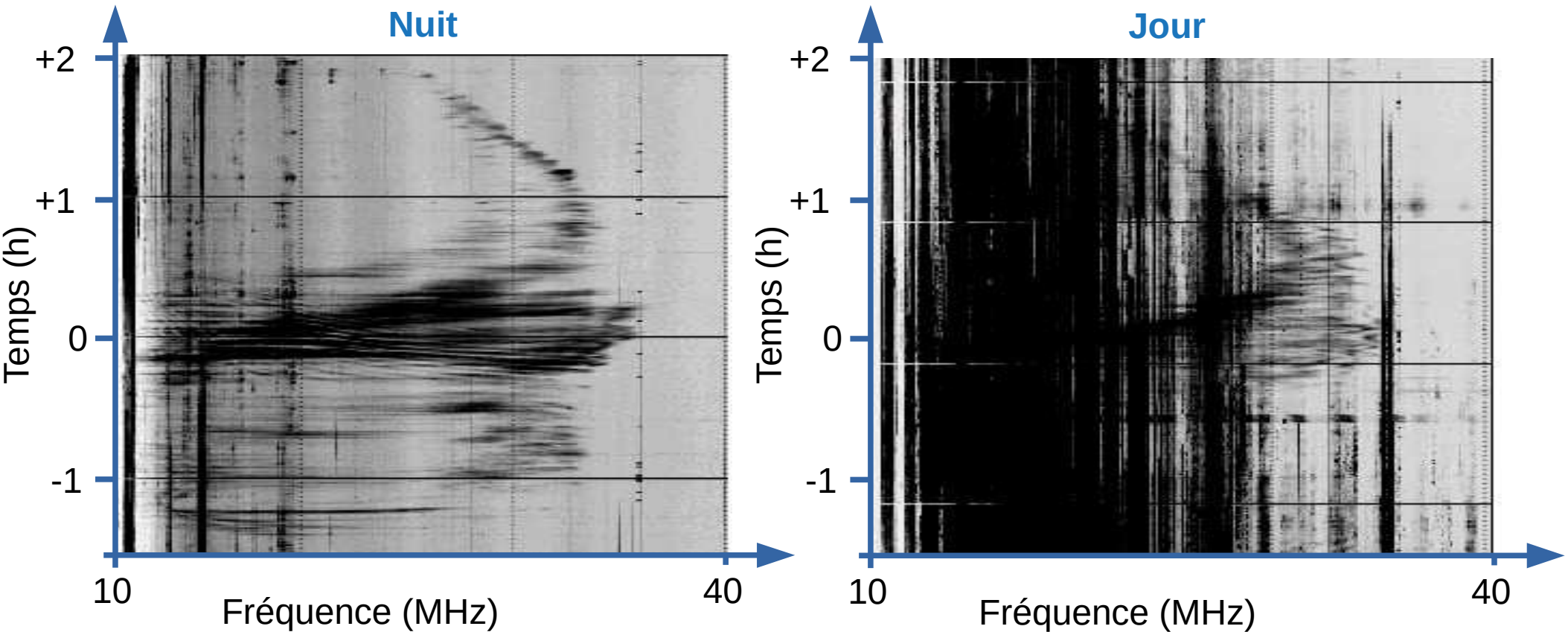
$$s(t) = u_{\text{sys}}(t) + u_{\text{source}}(t)$$

Gaussien

(Localement)
Stationnaire



Les interférences radio (RFI : Radio Frequency Interference)



Les interférences



Radars



Téléphonie mobile, média

Domaine radio :
3 kHz à 300 GHz

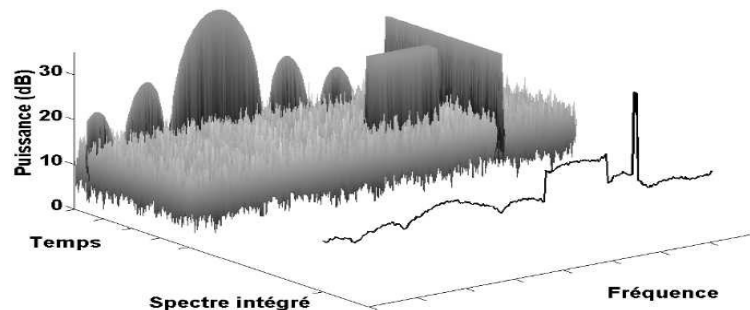


Satellites
(communication, télémétrie...)



Signal observé :

$$s(t) = u_{\text{sys}}(t) + u_{\text{source}}(t) + rfi(t) \\ = u(t) + rfi(t)$$



Les interférences

Éclairs d'orage
Soleil
Grandes ondes
CB

Radar
Téléphonie
satellitaire
TV satellitaire



10 MHz

FM
Balises
Moteurs électriques
Allumages
Télévision
Télécommandes
...

100 MHz

1 GHz

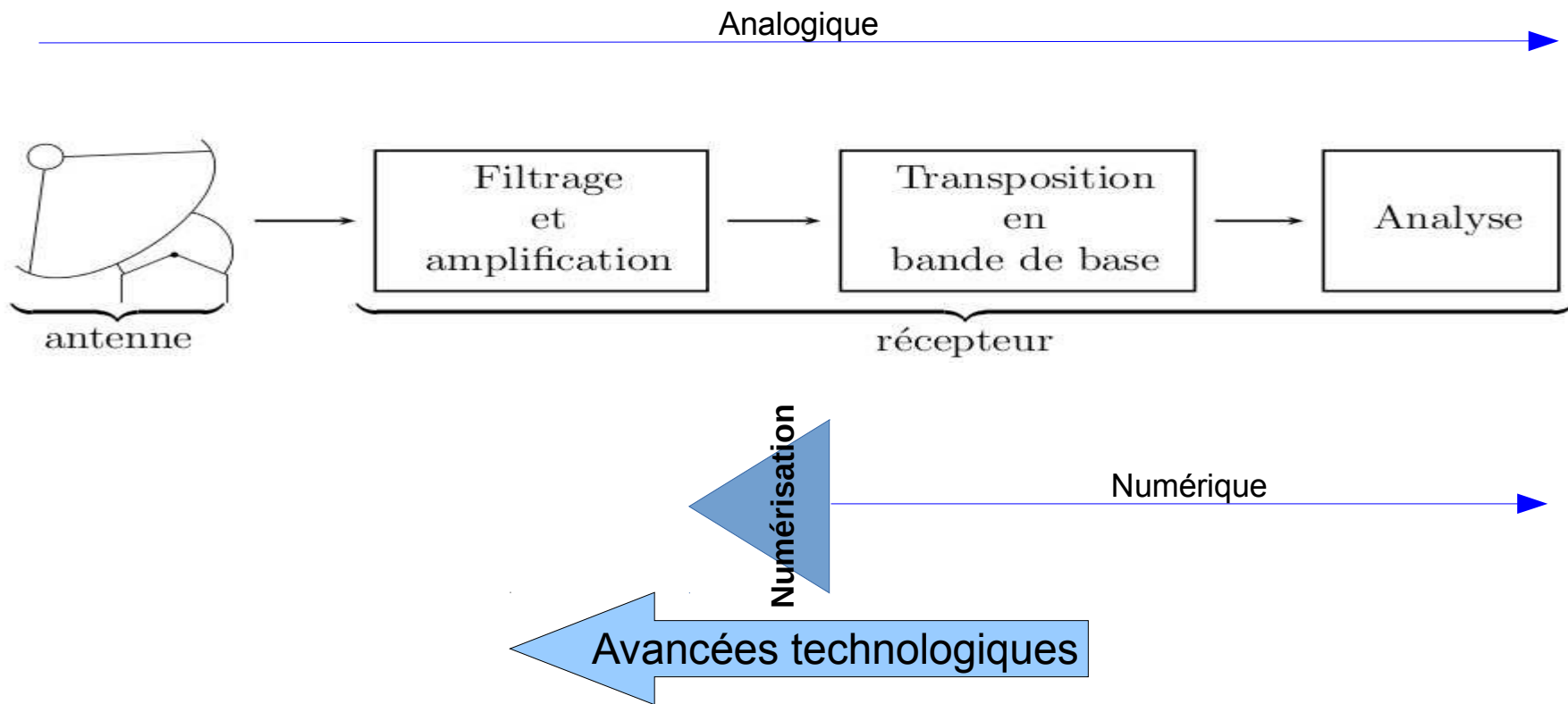
GSM
Inmarsat
GPS
GLONASS
DAB
Wifi
Bluetooth
...

3,5 GHz

Contraintes sur les chaînes de réceptions

- Observation de **signaux faibles**
 - Faible bruit système
 - Grande stabilité (gain et/ou phase) pour intégrer
 - Large bande
- En présence de **signaux forts** (Naturels et artificiels)
 - Grande dynamique

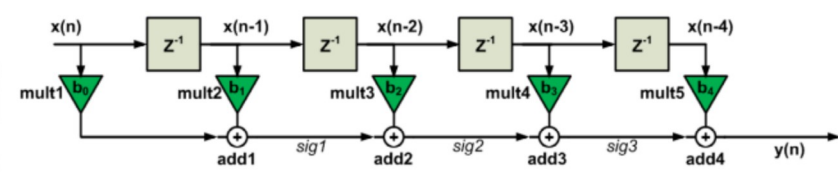
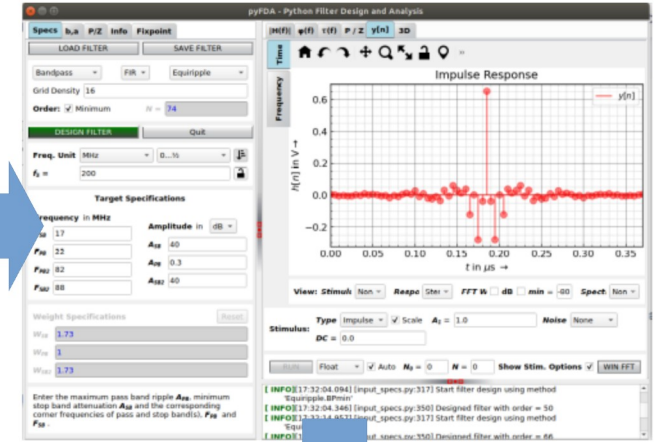
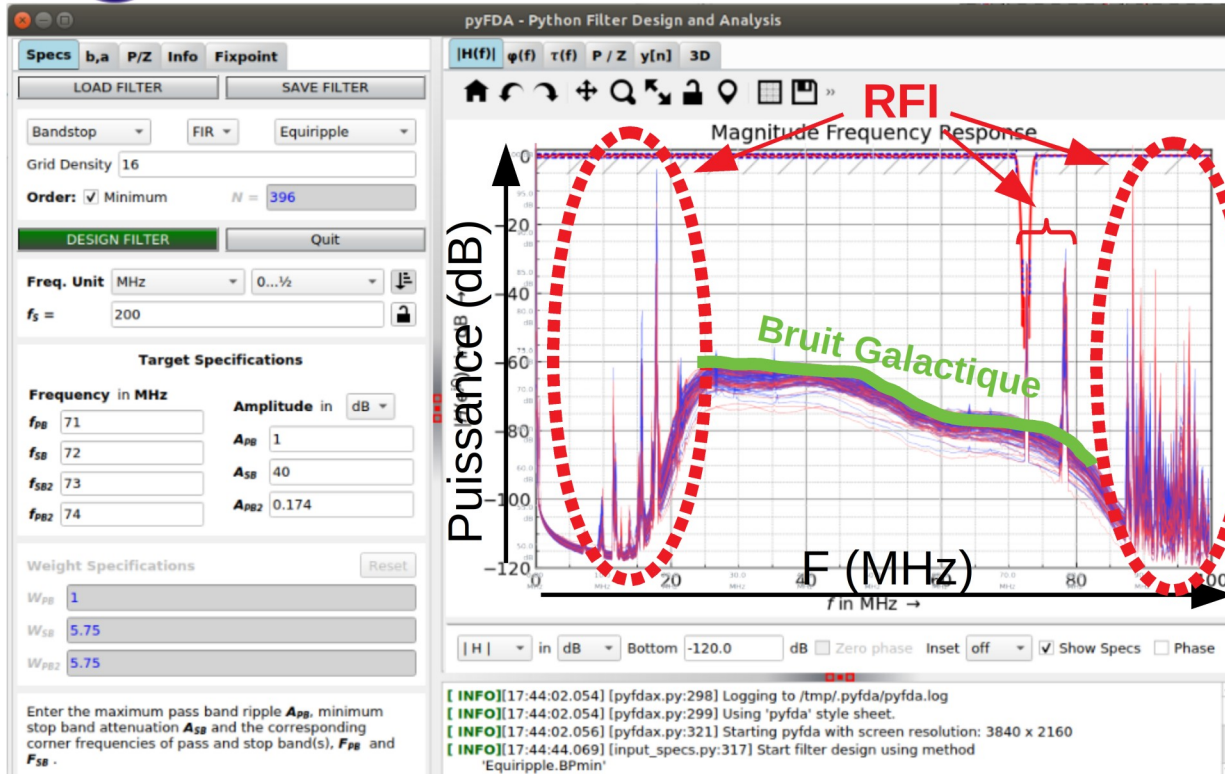
Frontière analogique-numérique



Traitements numériques

- Déport en numérique des traitements analogiques classiques
- Pourquoi ?
 - Re-configurable
 - Pas de calibration
 - Reproductible (t, f, feed)
- Fonctions :
 - Filtrage
 - Analyse spectrale
 - Banc de filtres
 - Dédispersion
 - Corrélation
 - Traitement des interférences

Filtrage



- Filtres FIR principalement
- Implémentés en arithmétique virgule fixe

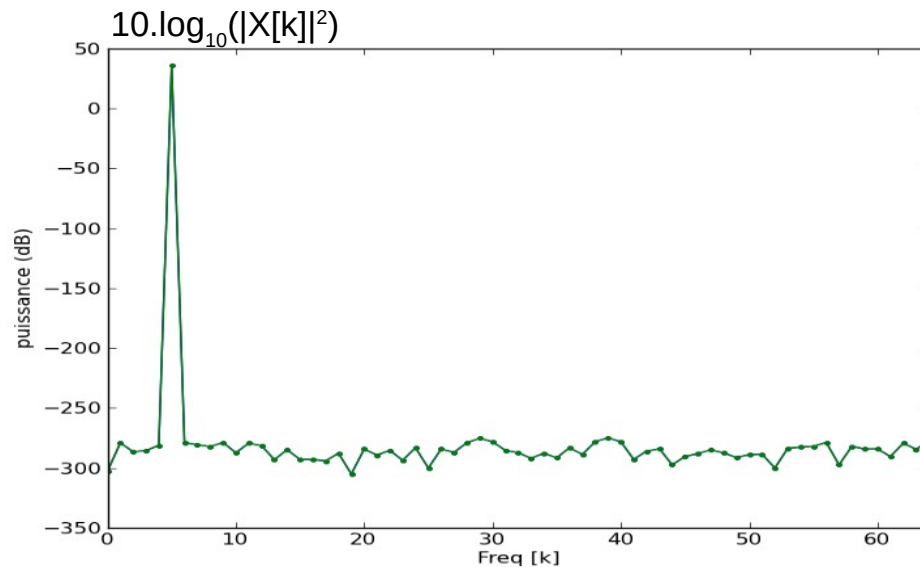
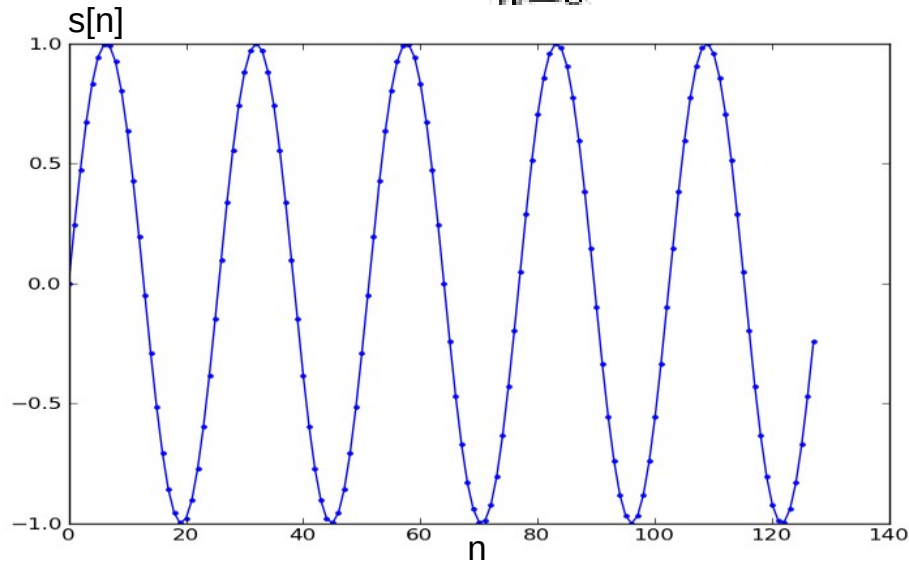
Implémentations en virgules fixes

- Modélisation arithmétique ou en virgule flottante
- **MAIS** implémentation en virgule fixe (FPGA, DSP)
 - Nécessaire pour limiter les ressources utilisées → compromis à faire :
 - Clipping → risque de saturation
 - Rounding → risque de faire disparaître le bruit
- Besoin d'étudier les effets de quantification
- Avec les bons choix pour la radioastronomie
 - Télécoms :
 - Bruit → gêne → mal considéré par les outils
 - Signaux intenses, cohérents → **à préserver**
 - Astronomie :
 - Bruit → Contient très probablement notre signal utile → **à préserver**
 - Signaux intenses → gêne → à saturer si non-problématique

Analyse spectrale

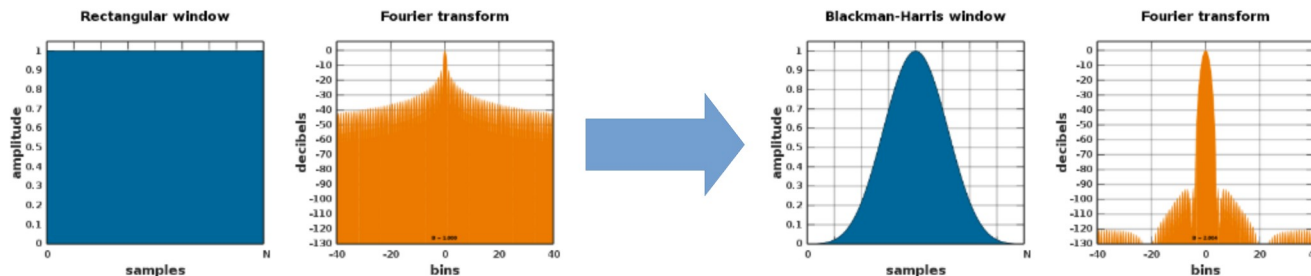
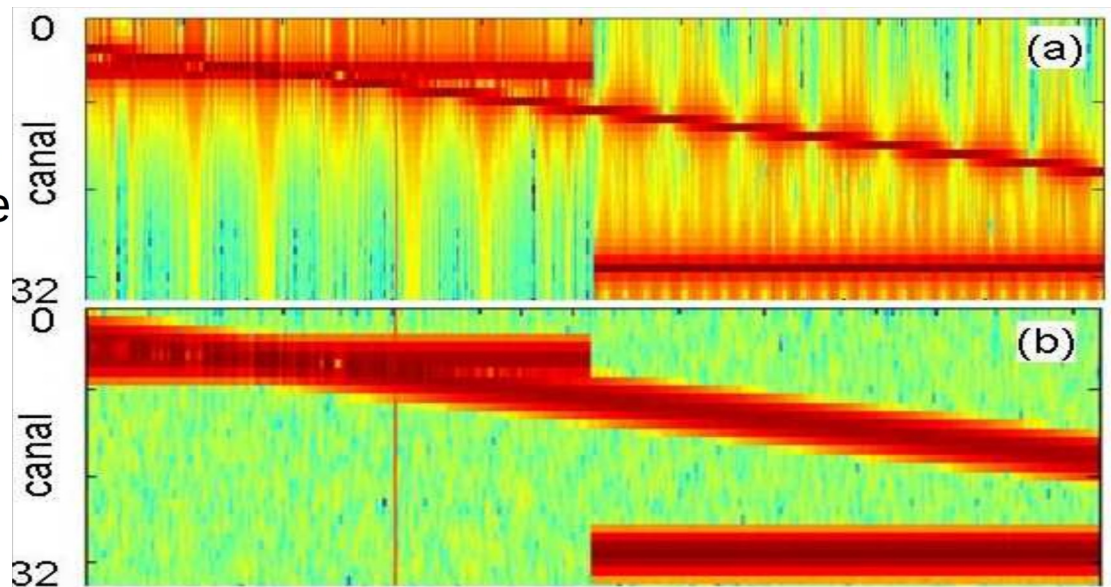
- FFT : Algorithme rapide de la TF discrète.

$$S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-2i\pi k \frac{nl}{N}} \quad \text{pour} \quad 0 \leq k < N$$



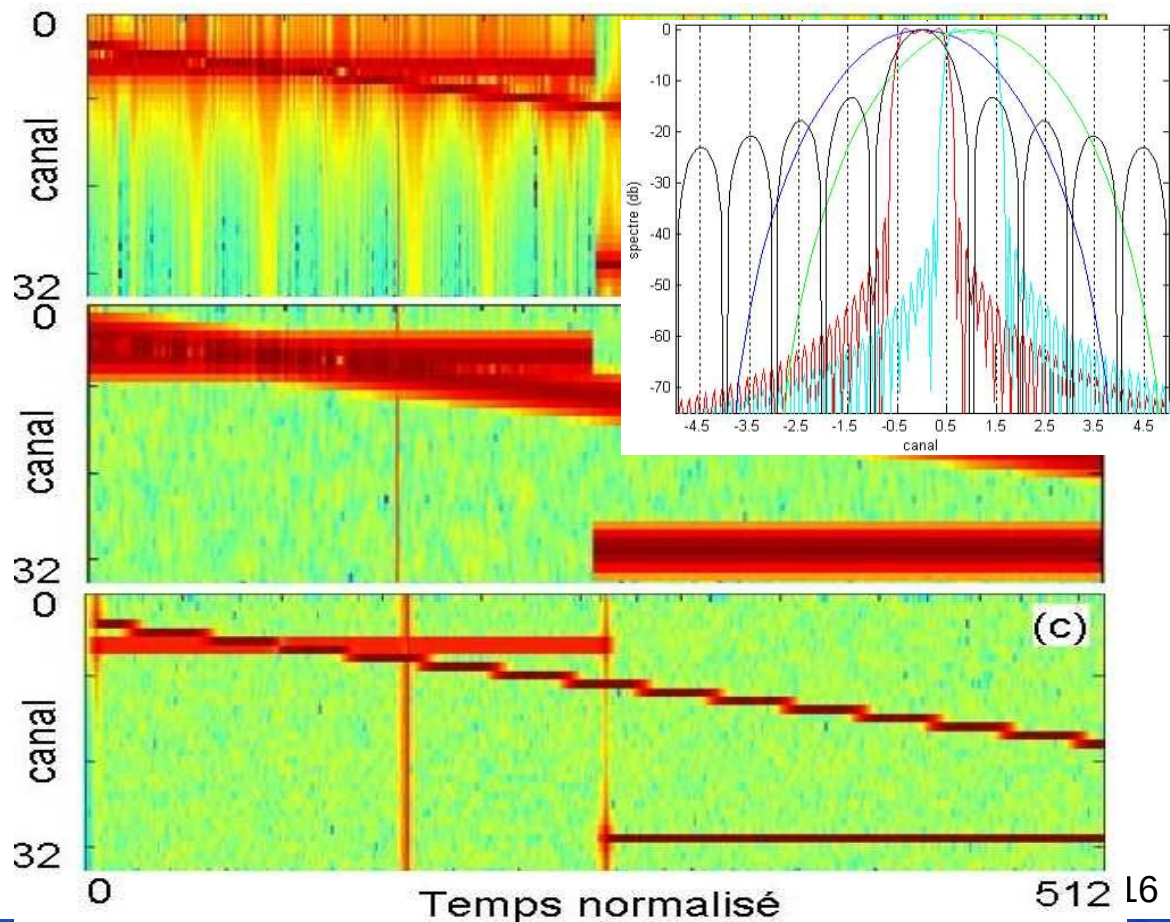
Analyse spectrale

- Spectral leakage (a)
 - 1 interférence forte va masquer une bande large contenant potentiellement du signal astro
- Apodisation (b)
 - Fenêtre Blackman-Harris
 - Lobes secondaires $< \text{SNR}_{\text{ADC14Bits}}$
 - Lobe central très élargit
→ perte de bande utile



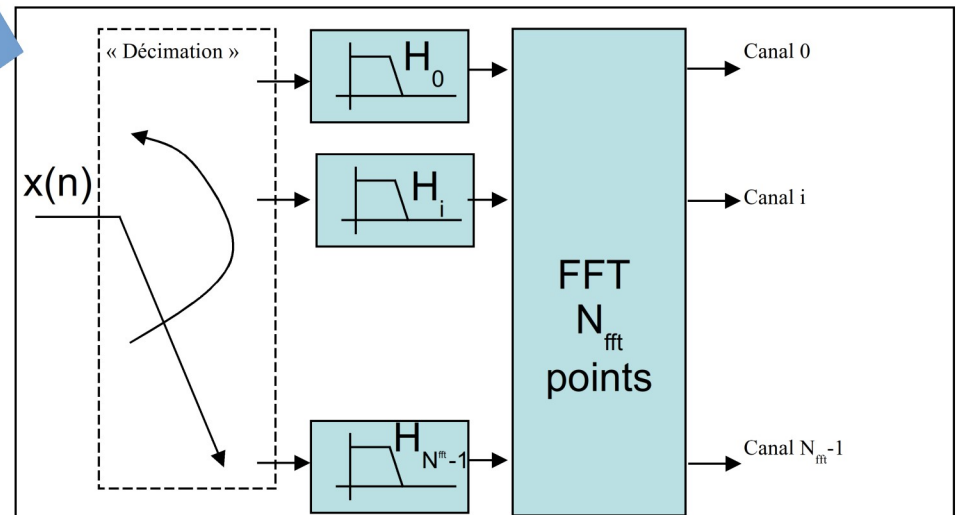
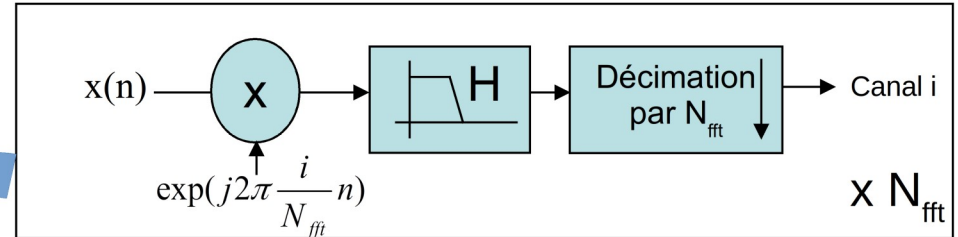
Implémentation polyphase de bancs de filtres

- PFB = « Super »
fenêtre d'apodisation
- $N_{WIN} > N_{FFT}$
- Réjection inter-canal améliorée et configurable
- Mais comportement dégradé en transitoire



Implémentation polyphase de bancs de filtres

- Équivalence mathématique
- Mais implémentation plus légère et adaptée à nos calculateurs



Les H_i sont des sous-filtres à $2K$ coefficients extraits de H :

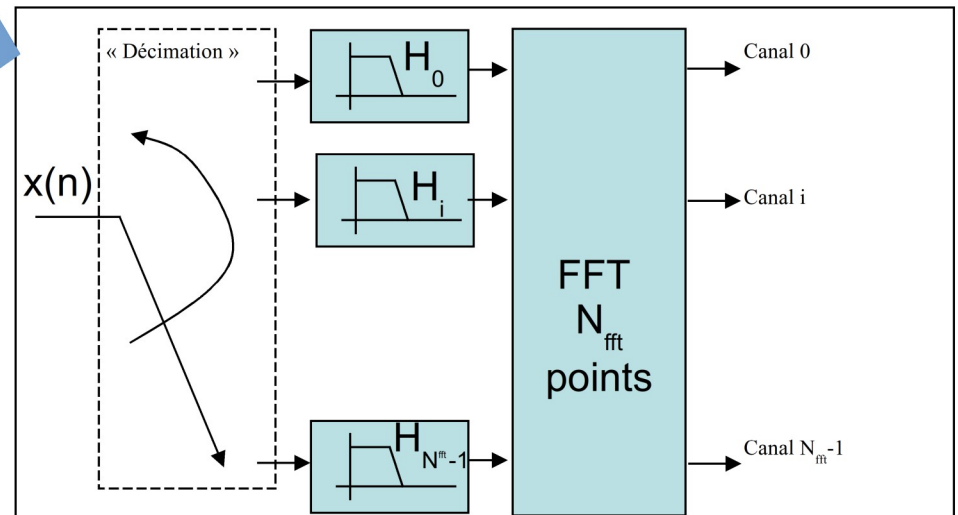
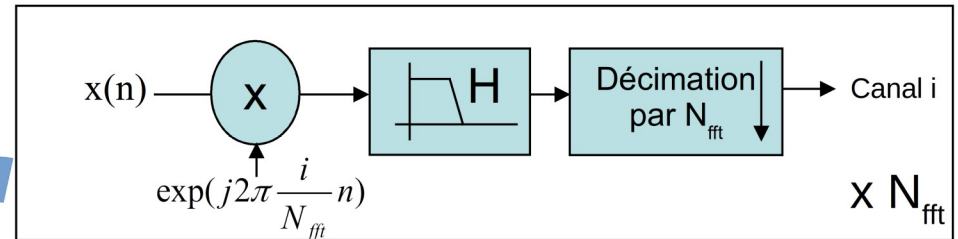
- H_0 : $\{a_0, a_{N^{m^0}}, a_{2N^{m^0}}, \dots, a_{(2K-1)N^{m^0}}\}$

- H_i : $\{a_i, a_{N^{m^i}}, \dots, a_{(2K-1)N^{m^i}+i}\}$

- $H_{N^{m^i}-1}$: $\{a_{N^{m^i}-1}, a_{2N^{m^i}-1}, \dots, a_{2KN^{m^i}-1}\}$

Implémentation polyphase de bancs de filtres

- Observation de plusieurs GHz de bande
 - Difficile de traiter un flux de qqes GB/s
 - Découpage de la bande en sous-bandes distribuables à plusieurs calculateurs



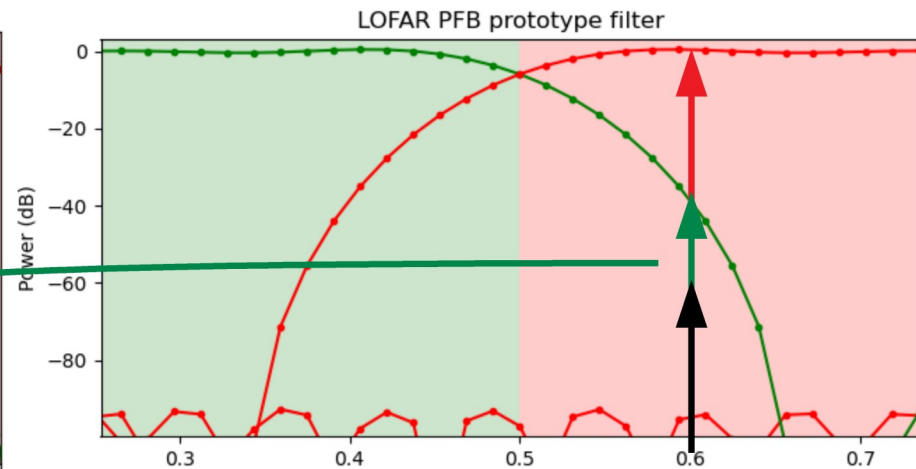
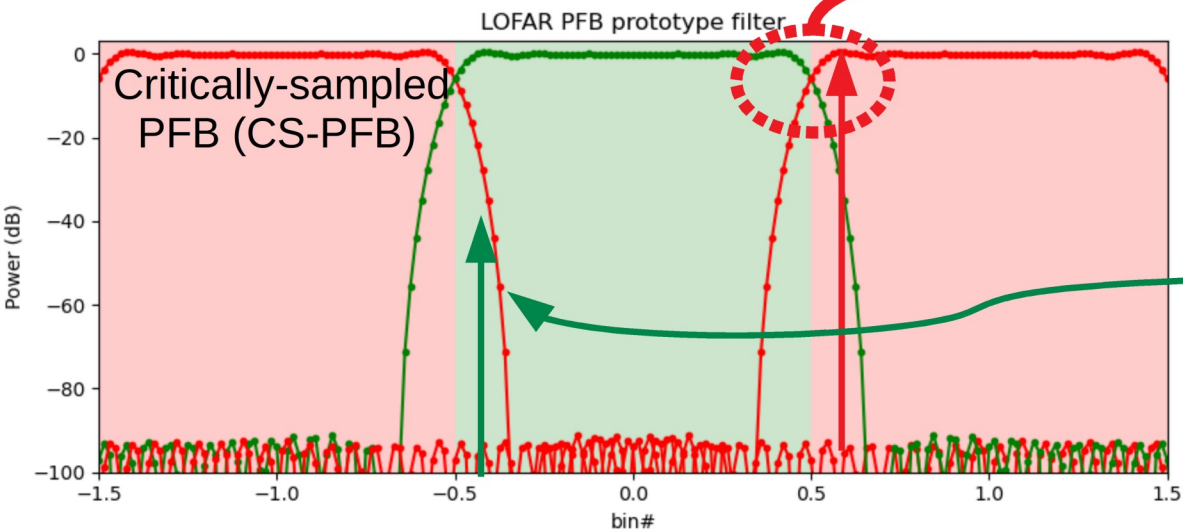
Les H_i sont des sous-filtres à $2K$ coefficients extraits de H :

- H_0 : $\{a_0, a_{N^m}, a_{2N^m}, \dots, a_{(2K-1)N^m}\}$

- H_i : $\{a_i, a_{N^m+i}, \dots, a_{(2K-1)N^m+i}\}$

- H_{N^m-1} : $\{a_{N^m-1}, a_{2N^m-1}, \dots, a_{2KN^m-1}\}$

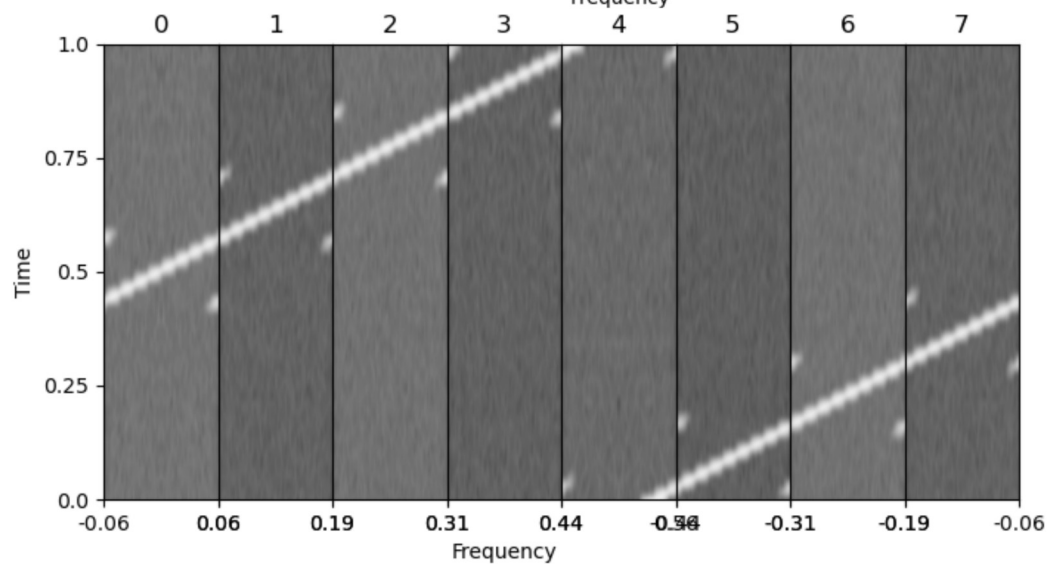
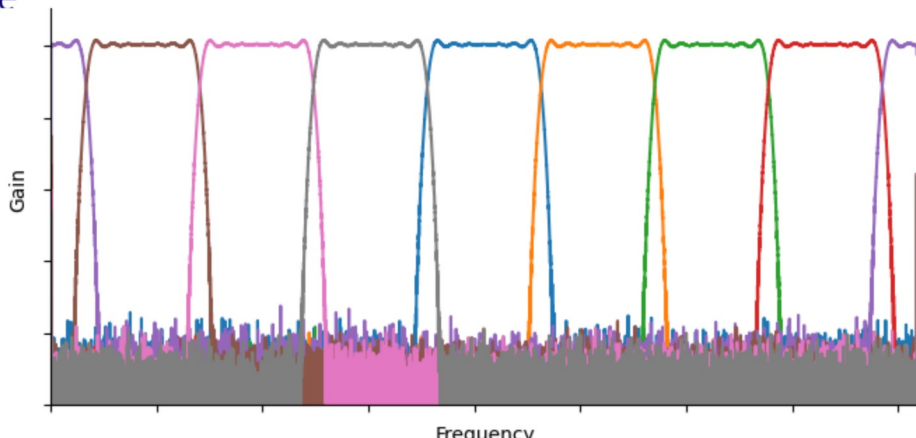
Critically-sampled PFB : limitations



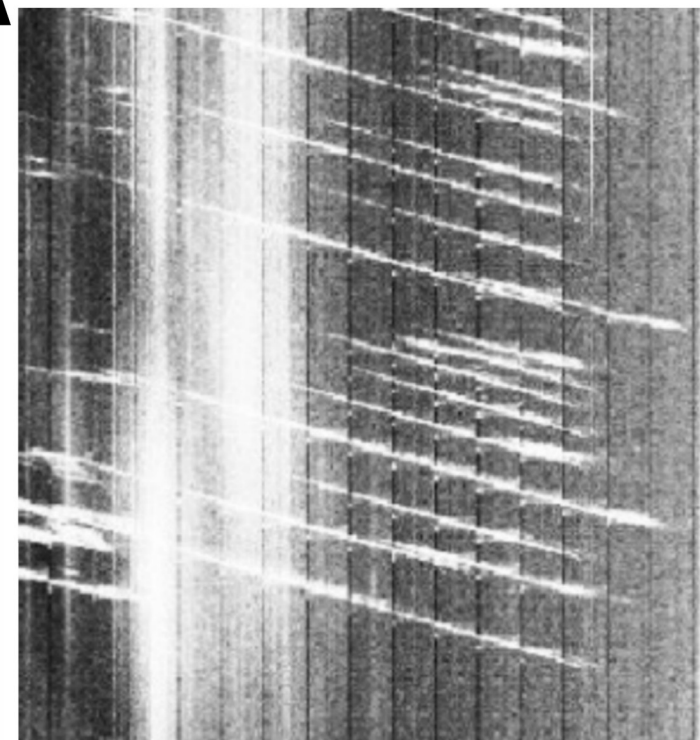
- Difficile de choisir un filtre avec :
 - $|G|=1$ pour la bande passante
 - $|G|\approx 0$ pour la bande rejetée
 - Et une bande de transition étroite

Critically-sampled PFB : limitations

Chirp →



↑ Temps (qques ms)



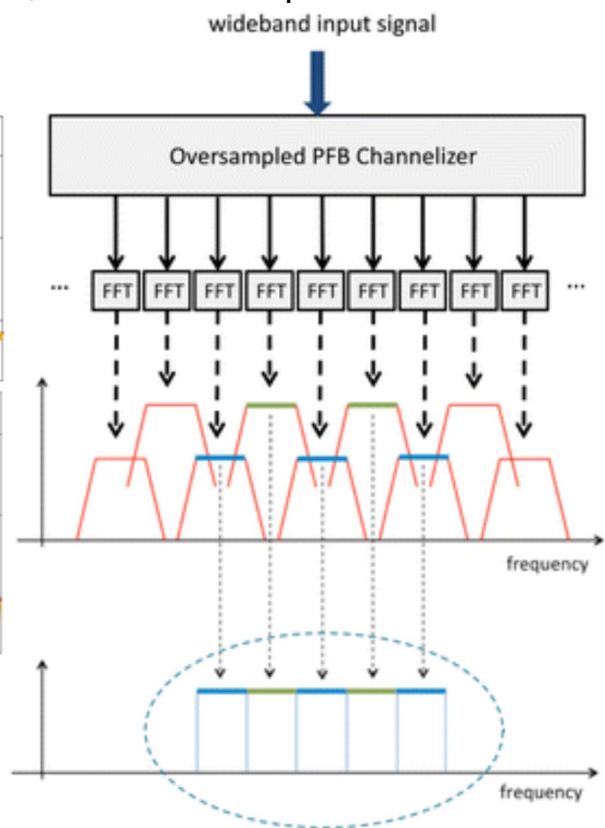
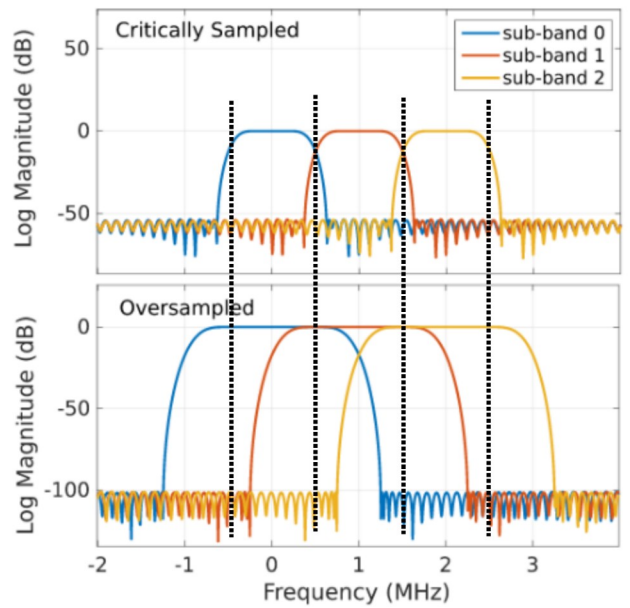
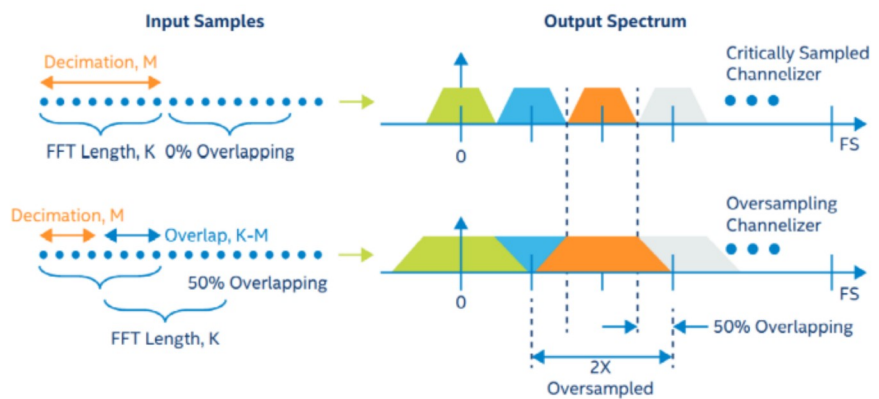
← Largeur de bande (3-4 MHz) →

Structures fines Joviennes

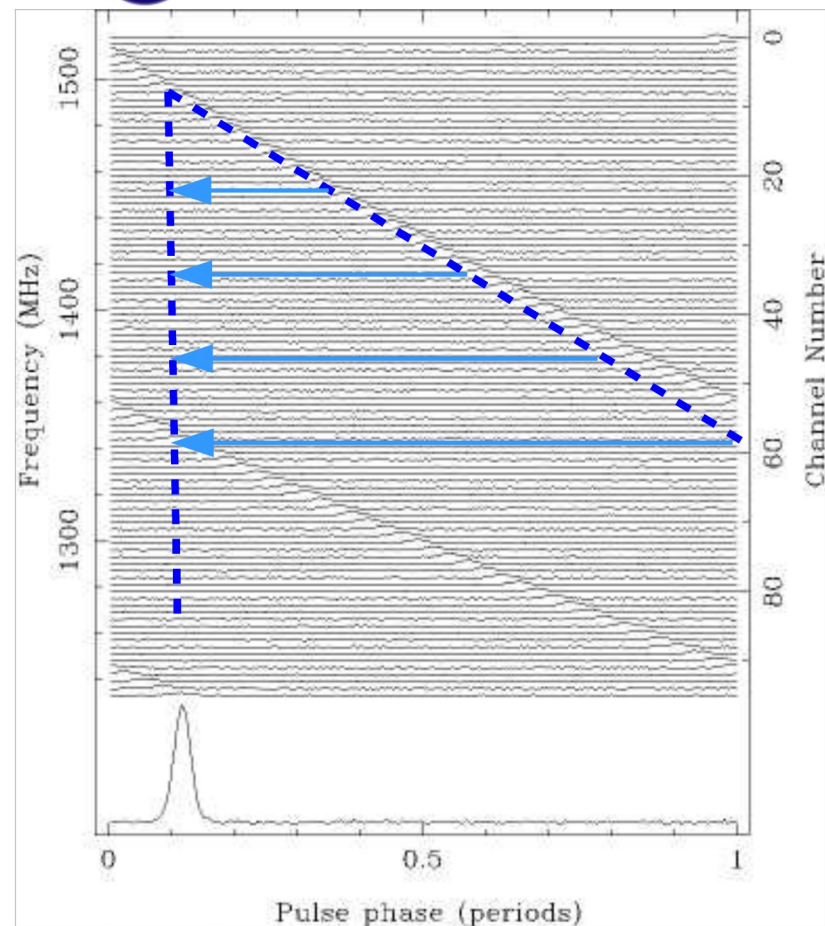
Over-sampled PFB

- Décimons moins pour obtenir des sous-bandes à échantillonnage plus rapide, donc plus large.
- Ce qui permet d'implémenter un filtre avec :
 - $|G|=1$ pour la bande passante
 - $|G|\approx 0$ pour la bande rejetée
 - Avec une bande de transition implémentable
- Mais flux de sortie plus important...

- De chaque sous-bandes, on extrait des parties utiles adjacentes



Dédispersion (Pulsars, FRBs)



- Faible intensité → besoin d'intégration (fréquentiel et temporel)
- Correction avant intégration fréquentielle
=> Dédispersion
- Intégration temporelle (folding) phasée avec la période du pulsar
- Dédispersion

- Retard chromatique à compenser :

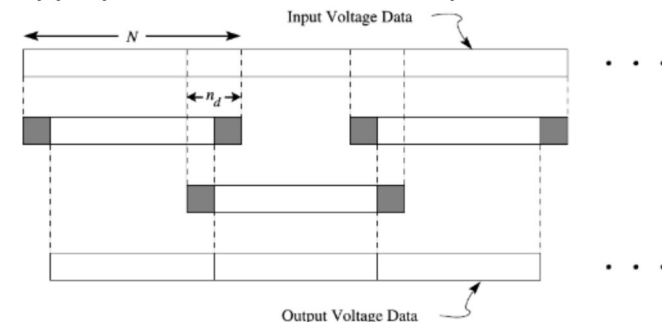
$$H(\nu + \nu_0) = \exp\left(i 2 \pi D \frac{\nu^2}{\nu_0^2 (\nu + \nu_0)}\right)$$

- Convolution plus facile à appliquer dans le domaine spectral

$$X[k] = \mathbf{TF}(x[n])$$

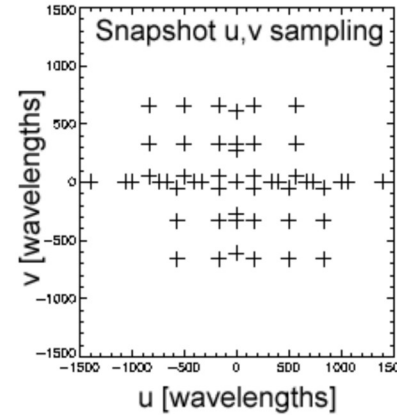
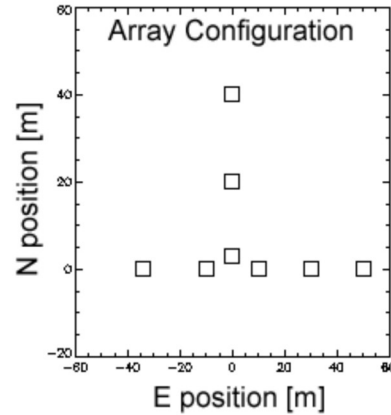
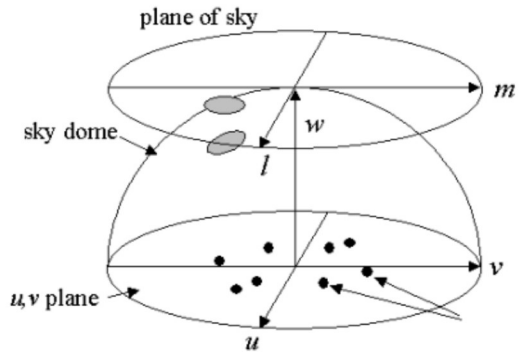
$$X_{dedis}[k] = X[k] \cdot H[k]^{-1}$$

$$x_{dedis}[n] = \mathbf{TF}^{-1}(X_{dedis}[k])$$

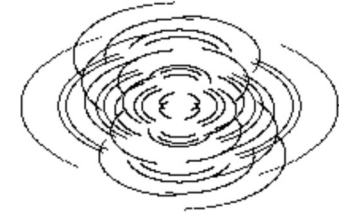


Corrélation

Interférométrie radio pour l'imagerie

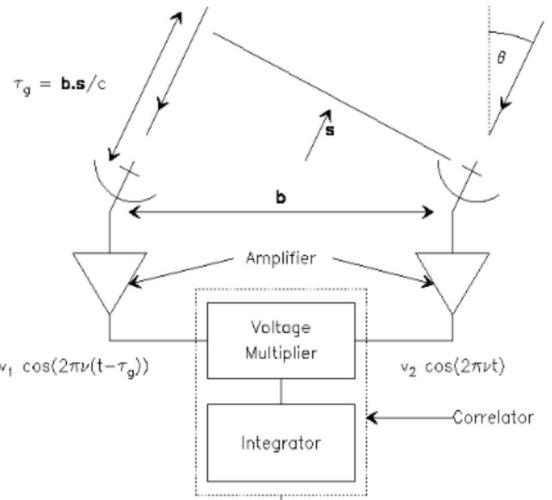


u, v sampling after 12 hour synthesis



$$I(l, m) = \iint V(u, v) e^{i2\pi(u l + v m)} du dv$$

Transformée de Fourier-2D inverse

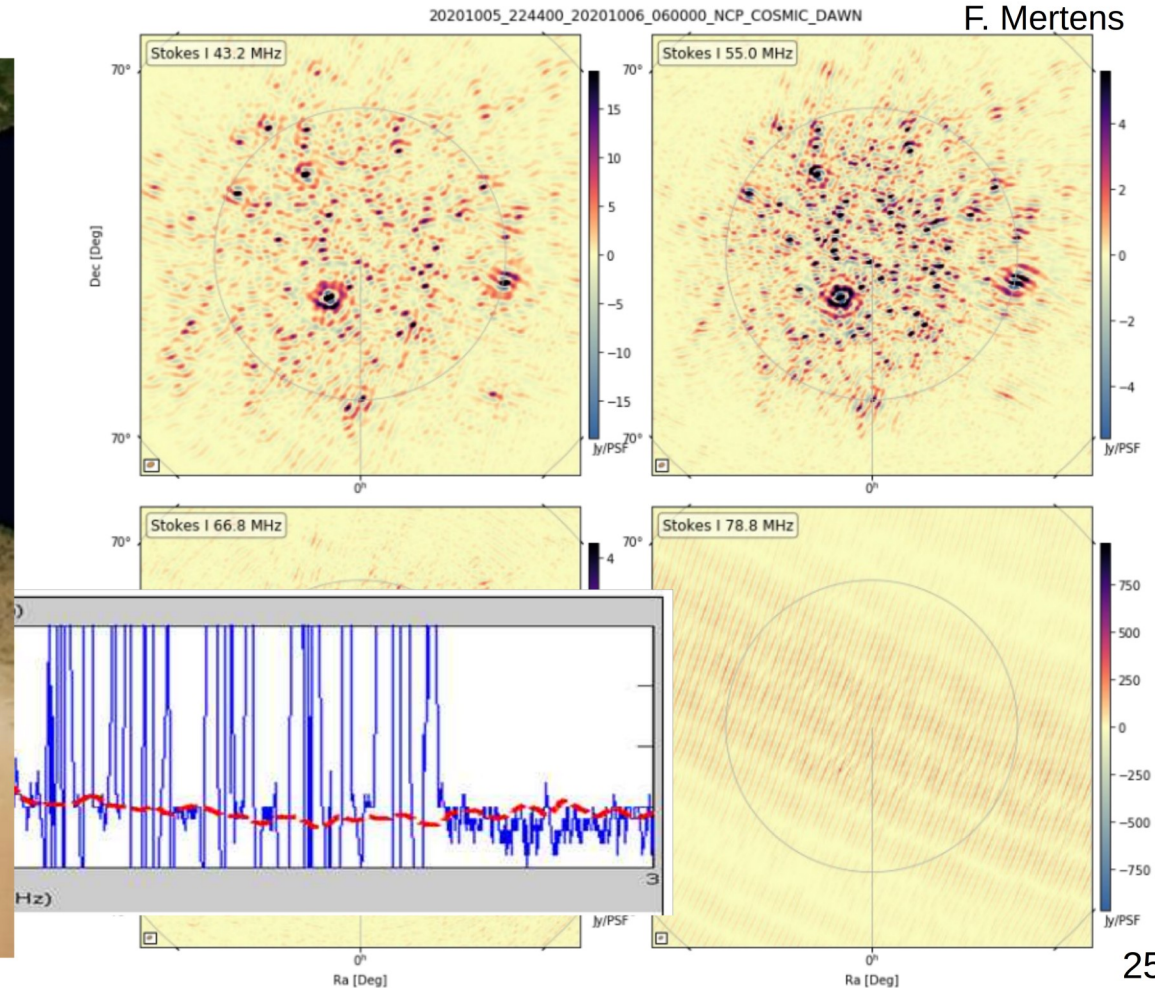
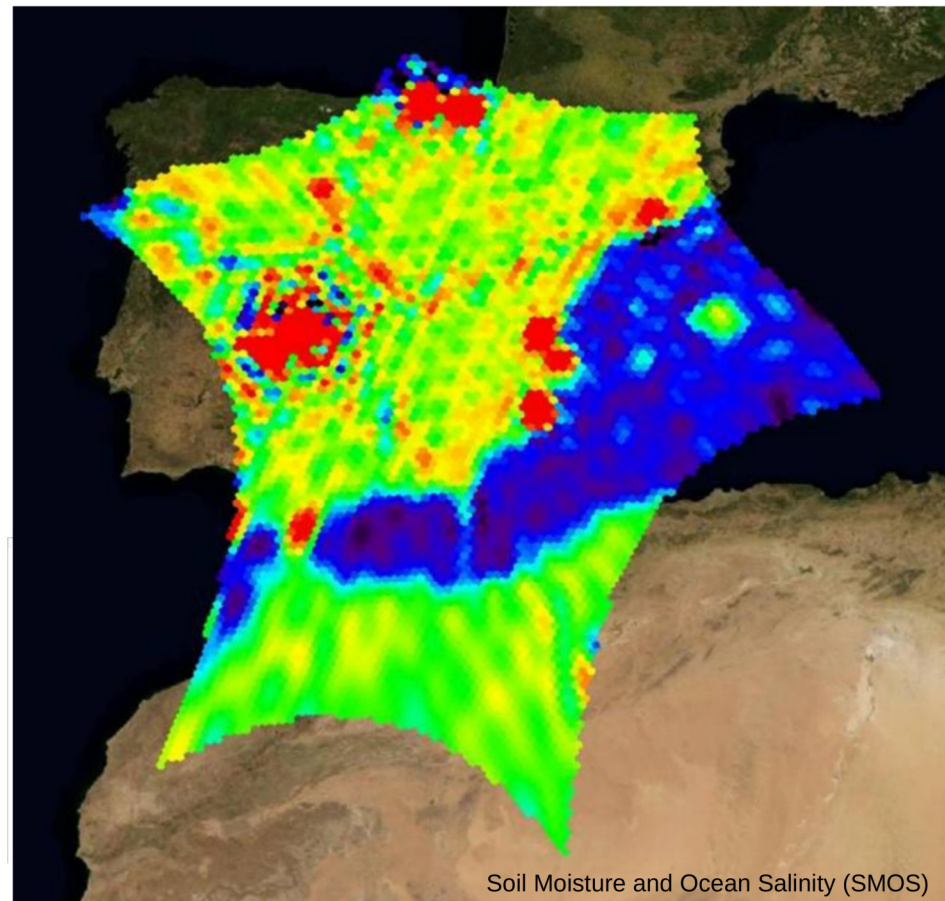


- Corrélation → Calcule les valeurs à distribuer dans u-v
- Mesure d'un déphasage entre des paires d'antennes
- Difficultés :
 - Stabilité instrumentale
 - N antennes → N(N+1)/2 visibilités
 - Ex : 96 MRs polarisés → 18528 visibilités
 - Transposition Antennes VS Bande coûteuse

$$V = \langle v_1^{(1)} v_2^{(2)} \exp(-i2\pi \nu \tau_g) \rangle = |v_1^{(1)} v_2^{(2)}| \exp(i2\pi \nu \tau_g)$$



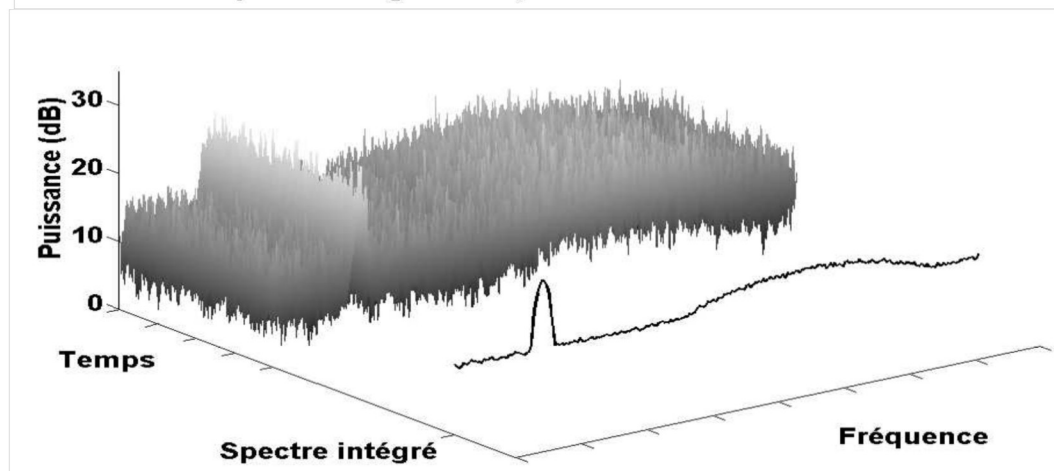
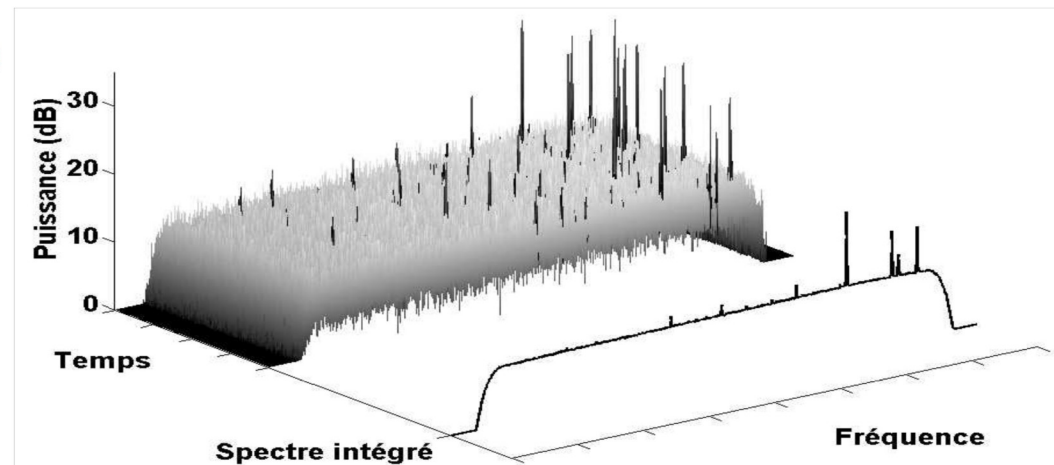
Effets sur les observations



Le couple (RFI, méthode)

Les différentes classes de méthode

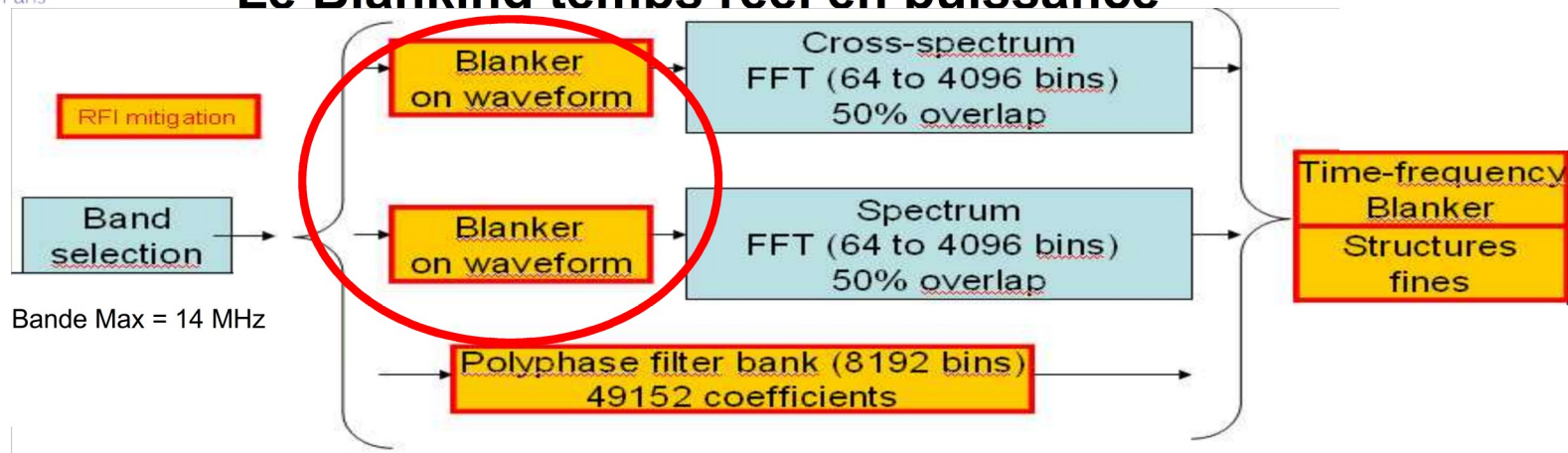
- Interférences intermittentes
Détection → *Blanking*
- Interférences continues
 - Réduction/Annulation
 - Estimation
- Protection juridique



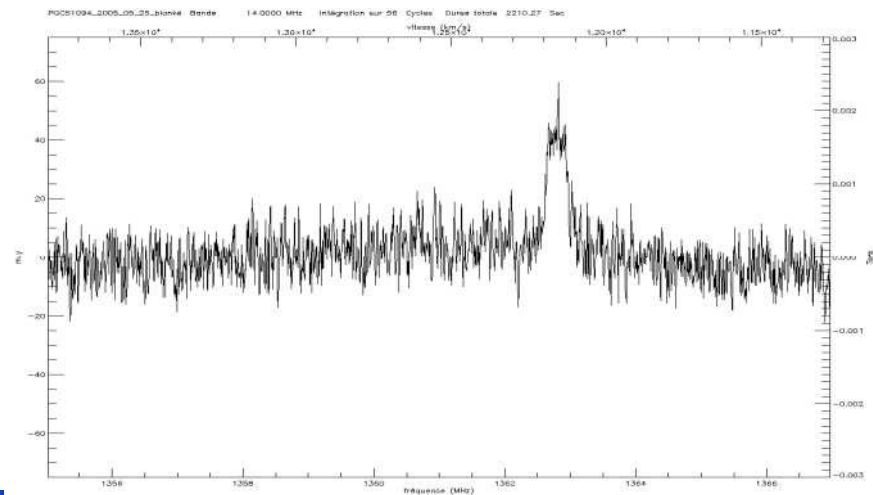
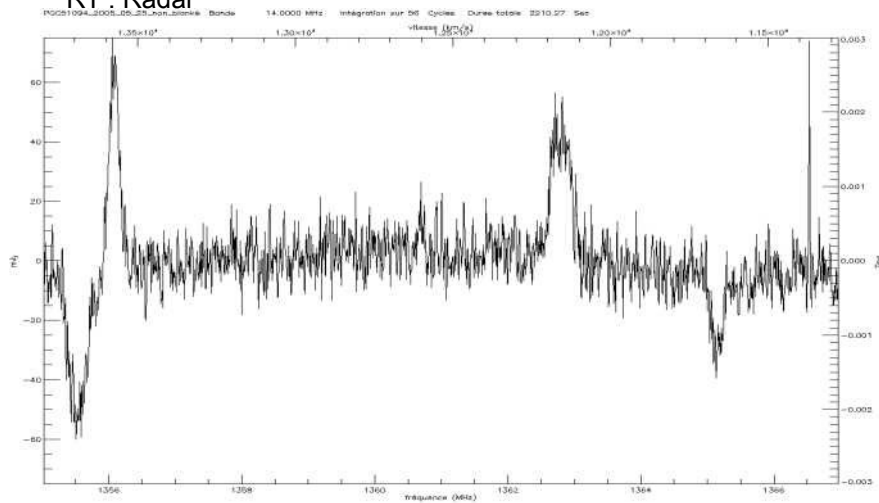
Détecteur temporel



• Le Blanking temps réel en puissance

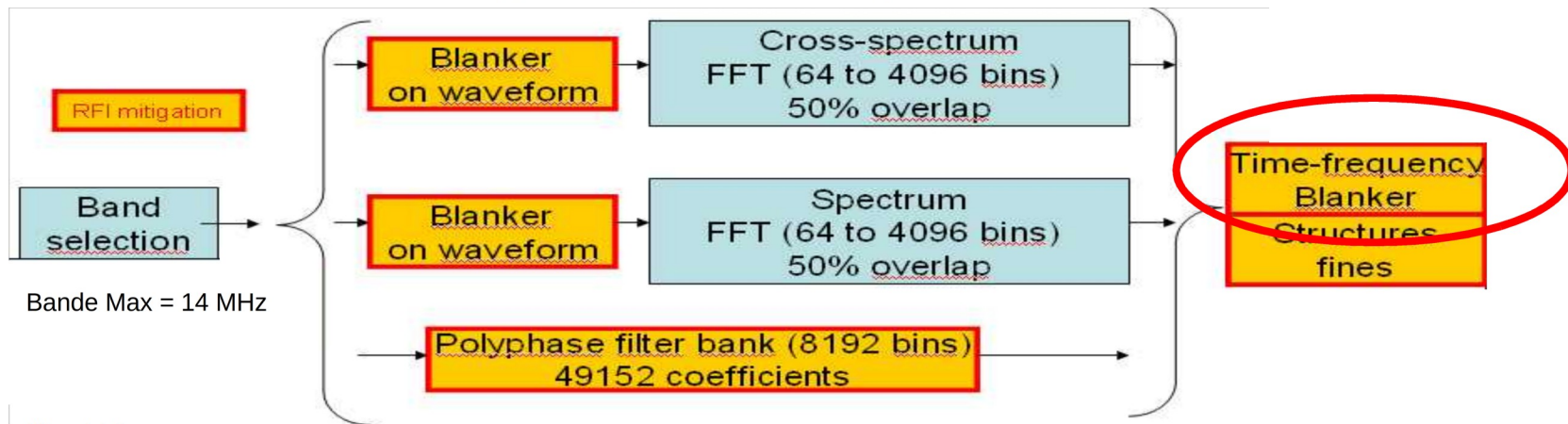


RT : Radar

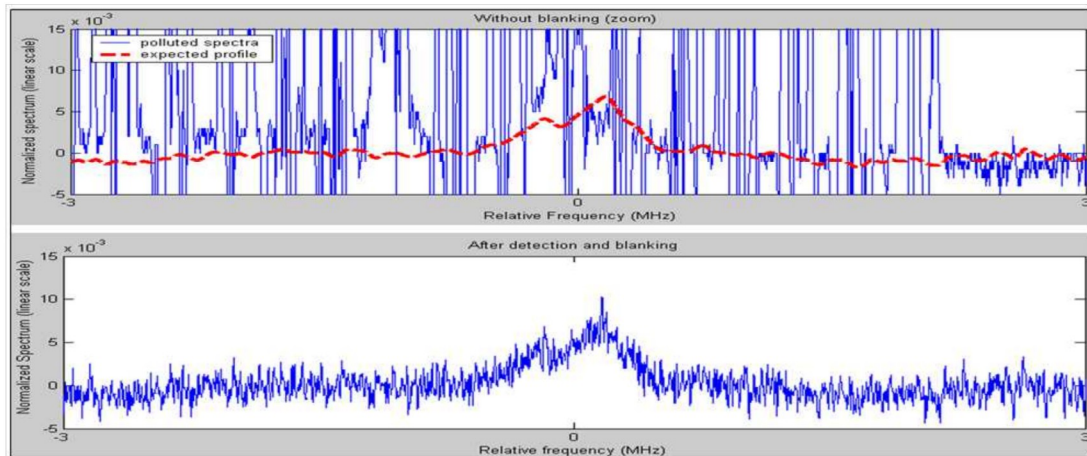
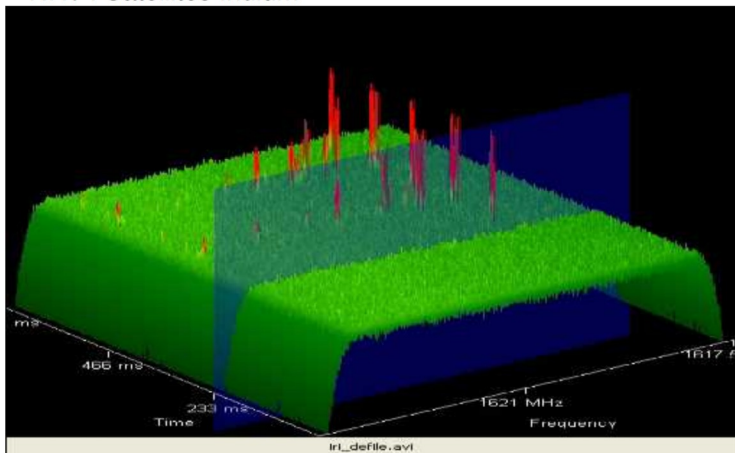


Détecteur T-F

• Le Blanking temps réel en puissance

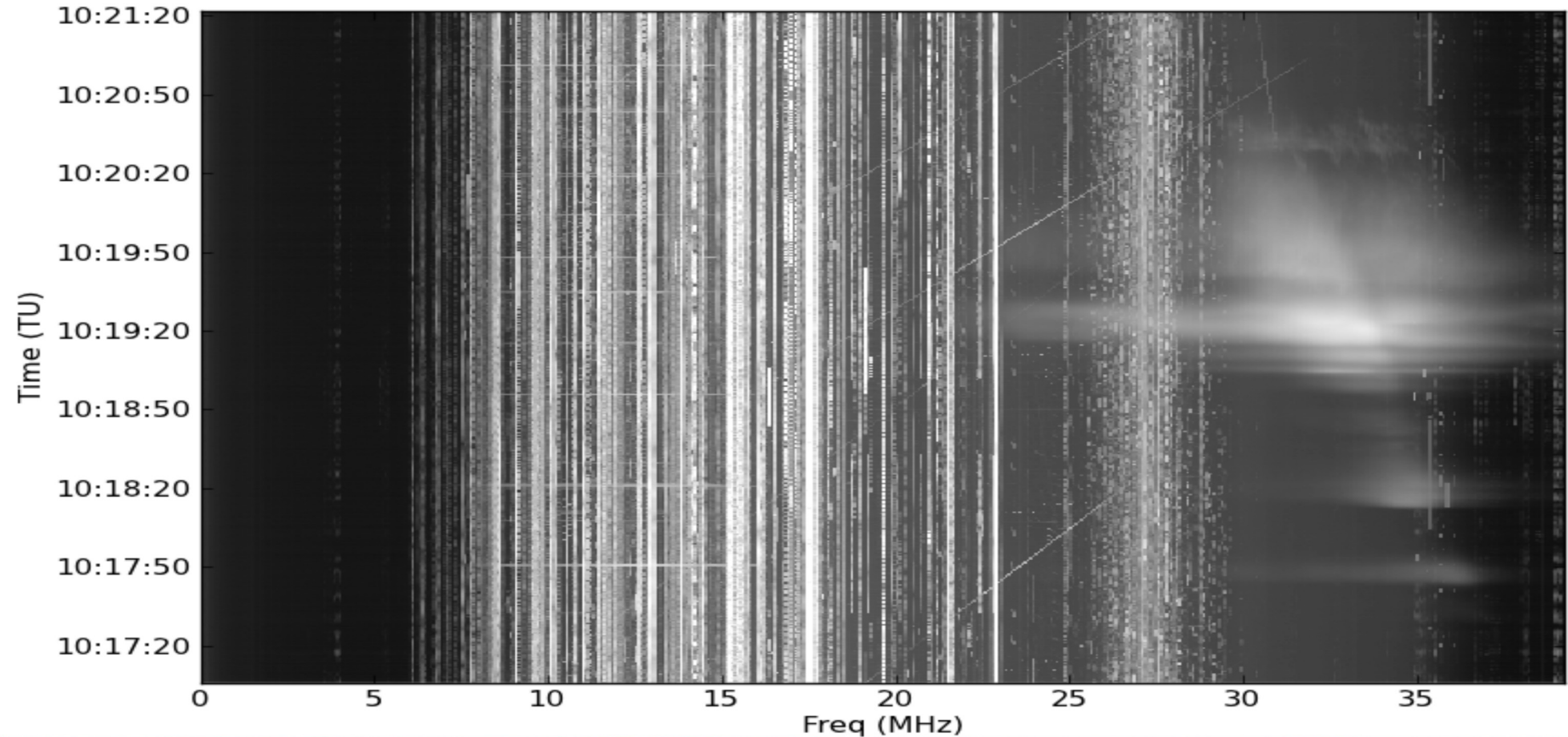


NRT : Satellites Iridium



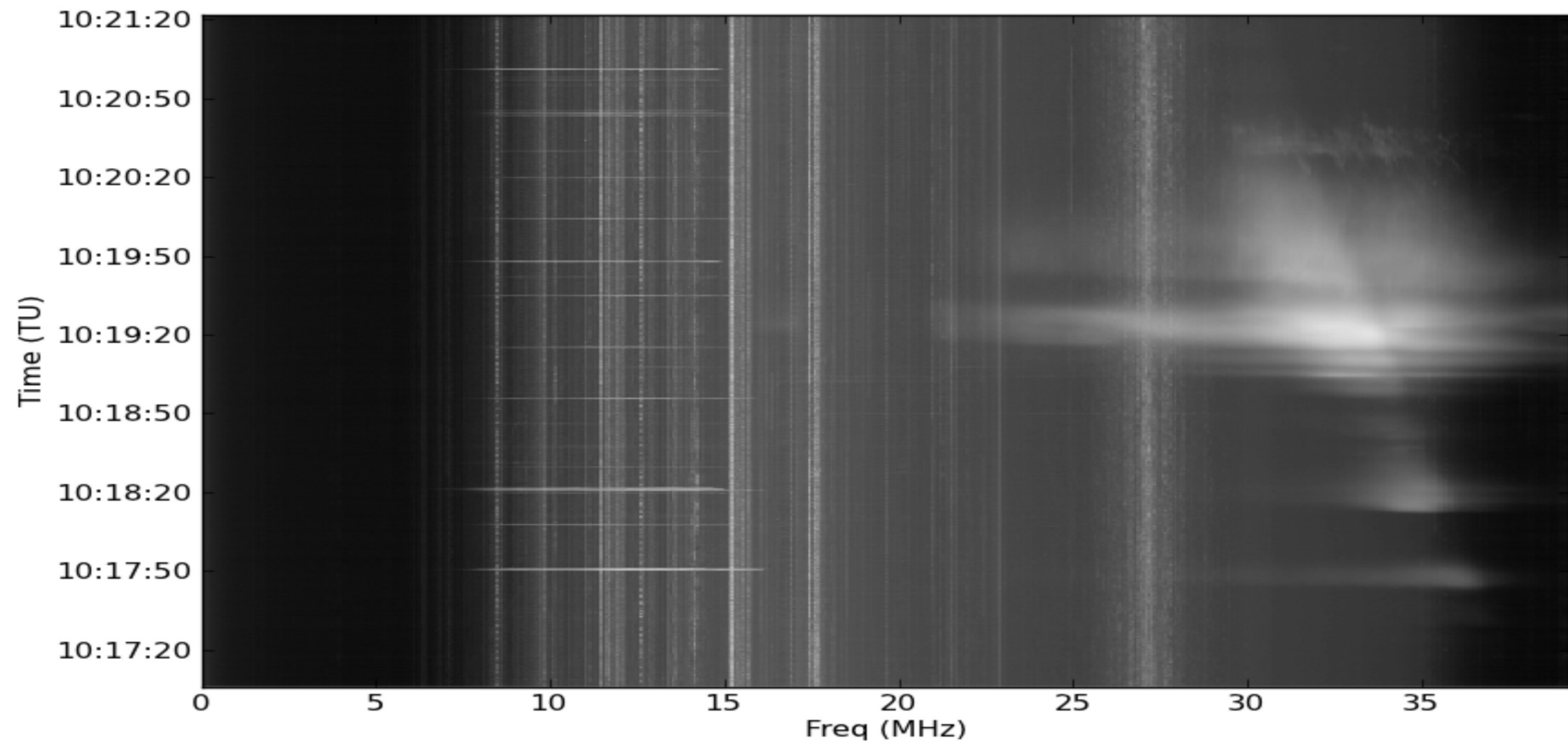
Observations avec MeFiSto

Mean 2012/11/12



Observations avec MeFiSto

Median 2012/11/12



Traitement des interférences

RFI2004

Workshop on Mitigation of Radio Frequency Interference
held at DRAO (Penticton, BC, Canada)

RFI2010 - RFI Mitigation Workshop

29 - 31 March, 2010, Groningen
A scientific workshop organized by
ASTRON / NAIC / IUCAF

RFI 2016



Coexisting with Radio Frequency Interference



Hosted by the
National Radio Astronomy Observatory (NRAO)
in Socorro, New Mexico, USA
October 17-20, 2016

Sponsored by



Radio Interference with Low Power Receivers

This meeting is the unique opportunity for radio observatory operators. It is targeted at

RFI 2019












Coexisting with Radio Frequency Interference

Toulouse, France
September 23-26, 2019

radio observatories. This provides a unique opportunity for interaction between engineers, scientists and operators. It is targeted at

Plateformes d'implémentation

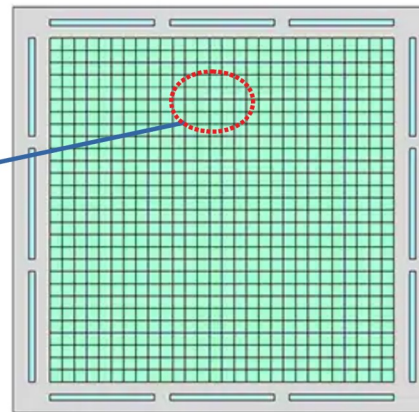
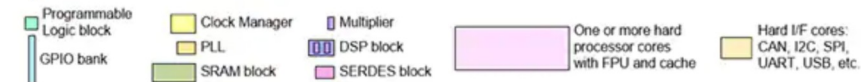
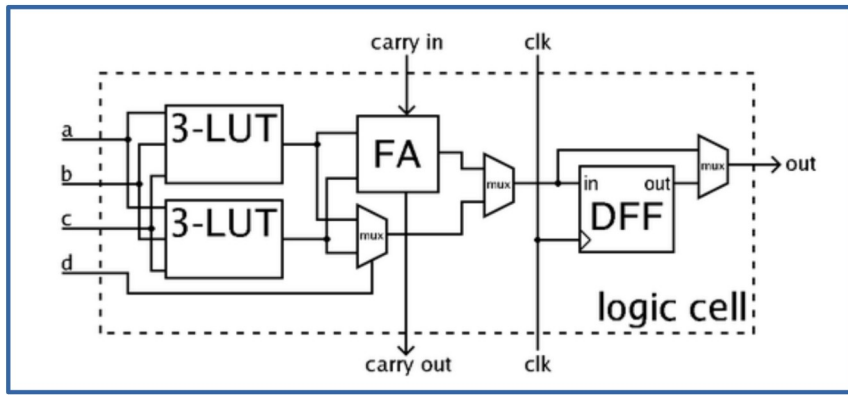
- Calculateur :

	MIPS/FLOPS	Determinism	Memory	T _{dev}
FPGA				
GPU				
CPU				

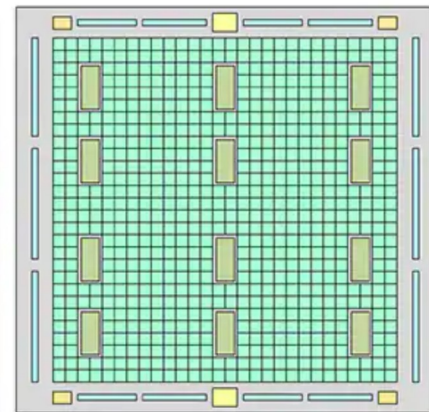
- Transport des signaux

- PCB
- Switch Ethernet / Infiniband
- Transport de références de temps-fréquence

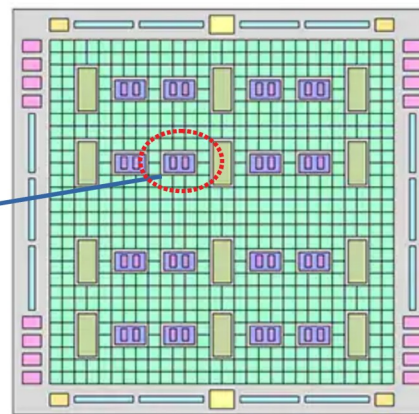
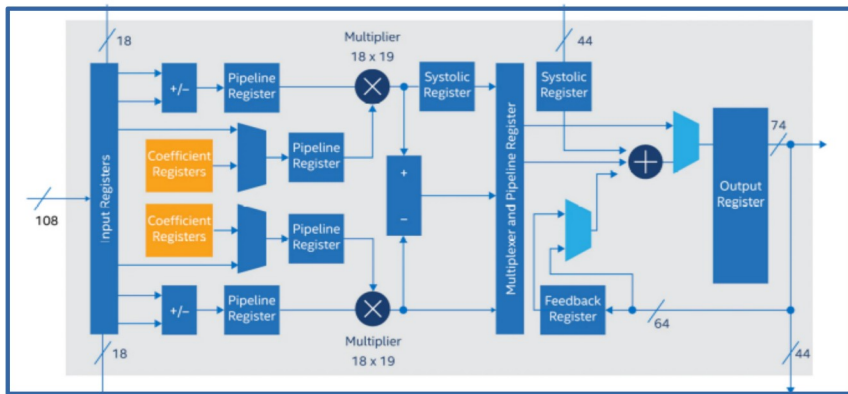
Traitement du signal et systèmes sur FPGA



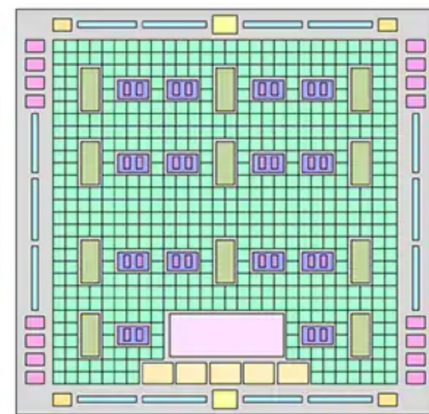
(a) Programmable fabric and programmable GPIO banks



(b) Add SRAM blocks, PLLs, and Clock Managers



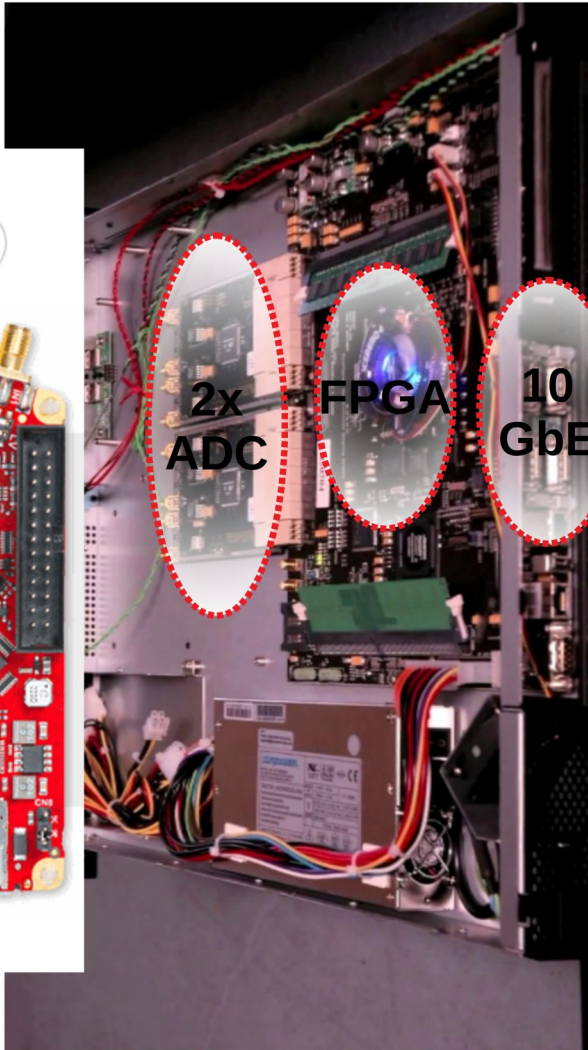
(c) Add DSP slices and SERDES blocks



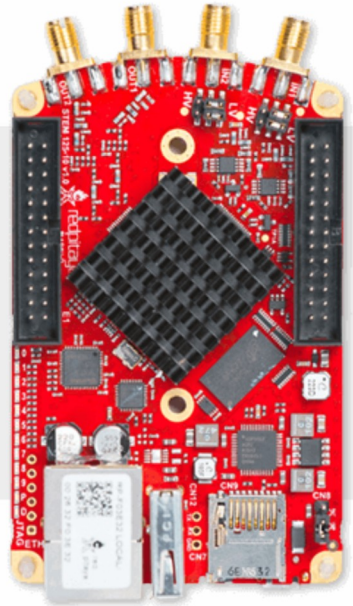
(d) Add hard processor core(s) and peripherals

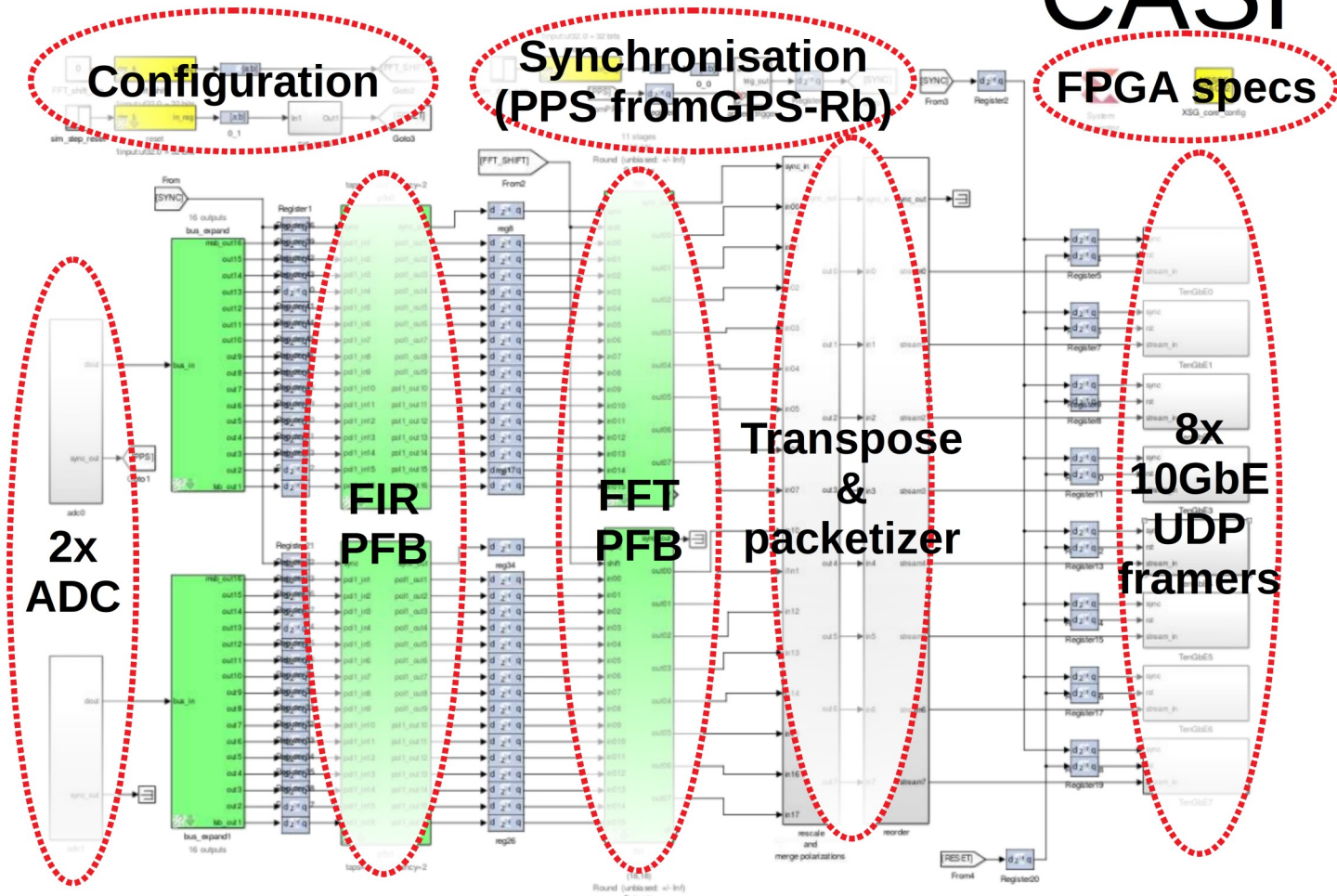
CASPER

- Berkeley + Communauté Astro
- FPGA Xilinx (Virtex 5,6,7, Kintex, Zynq)
- ADC TI, National, AnalogDevice, E2V, ...
 - Qques MS/s à 10GS/s, 8 à 14 bits
- Interfaces 1GbE, 10-40GbE
- Quelques 100 € à quelques k€
- Développement sous Matlab-Simulink → python



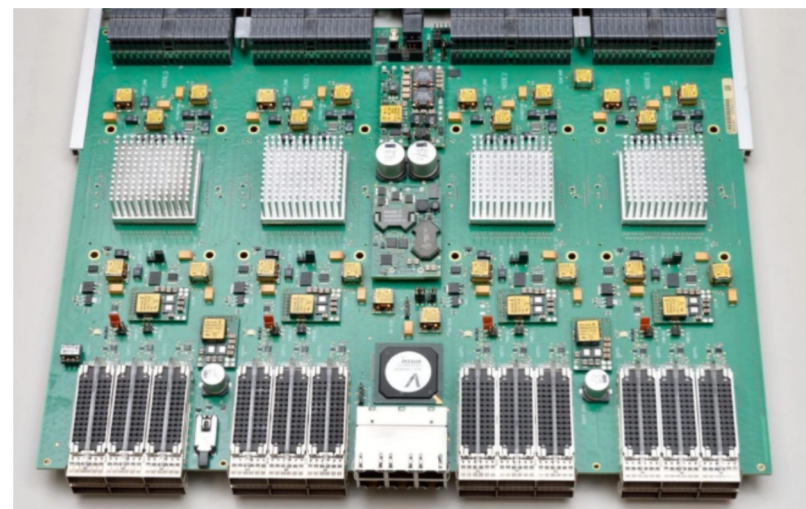
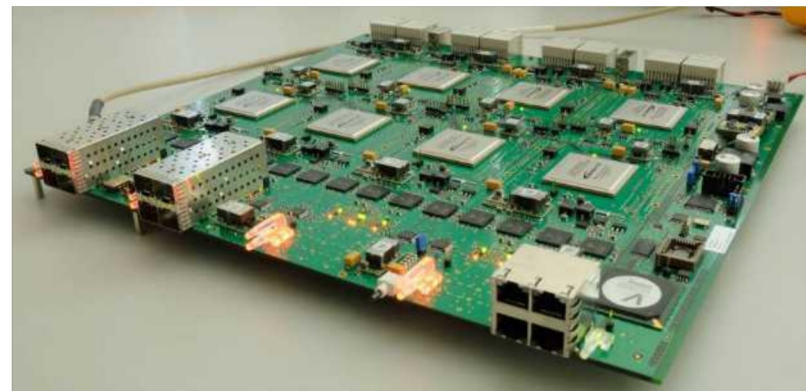
STEMlab 125-10





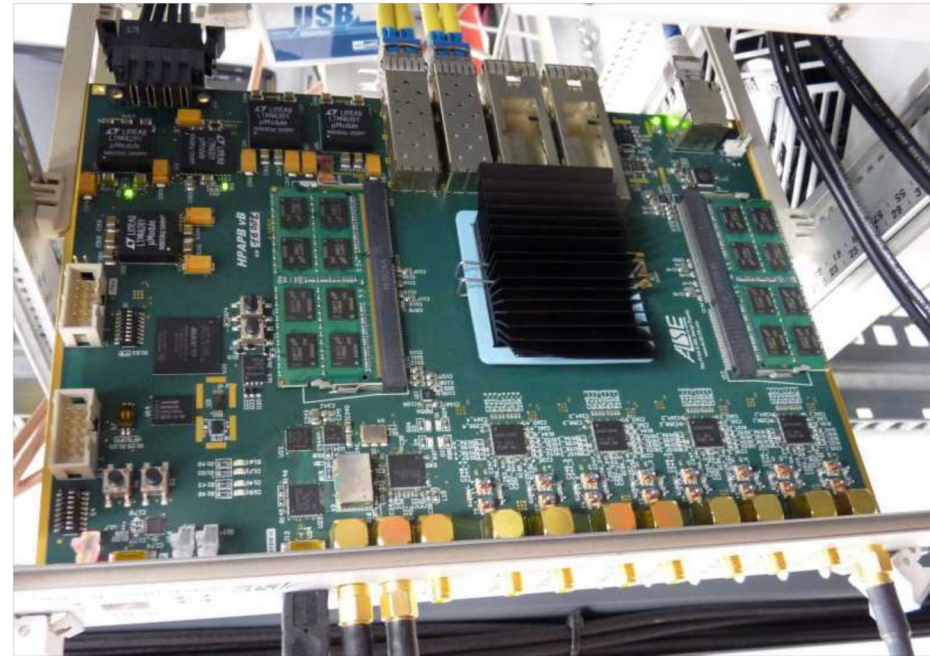
Uniboard / Uniboard²

- RadioNet FP7
 - Jive, ASTRON, KASI, INAF, Bordeaux, Orléans/Nançay, Manchester, Oxford
- FPGA Intel Arria/Stratix 10
 - Grosse puissance de calcul
- Interfaces 1GbE, 24x 40 GbE
- Pas d'ADC
 - Système à concevoir
- Code VHDL opensource
 - OpenCores.org / RadioHDL

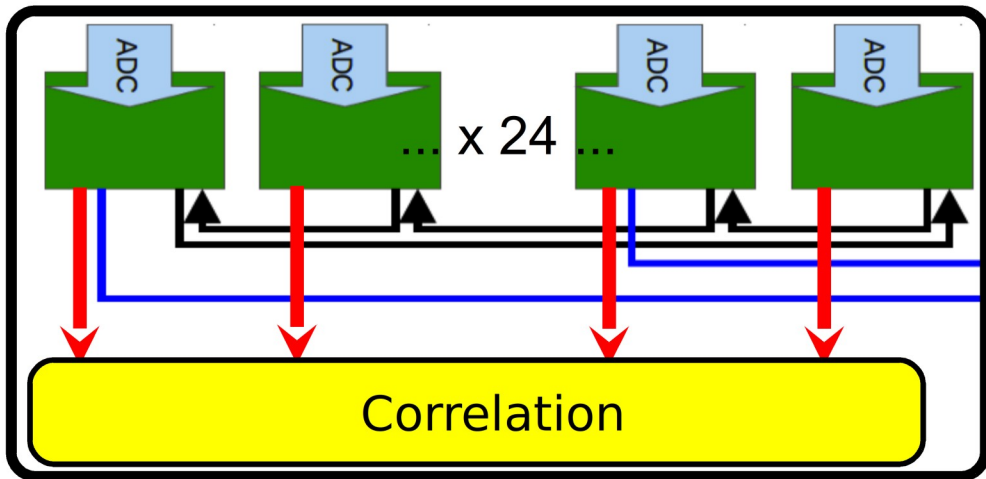


ALSE

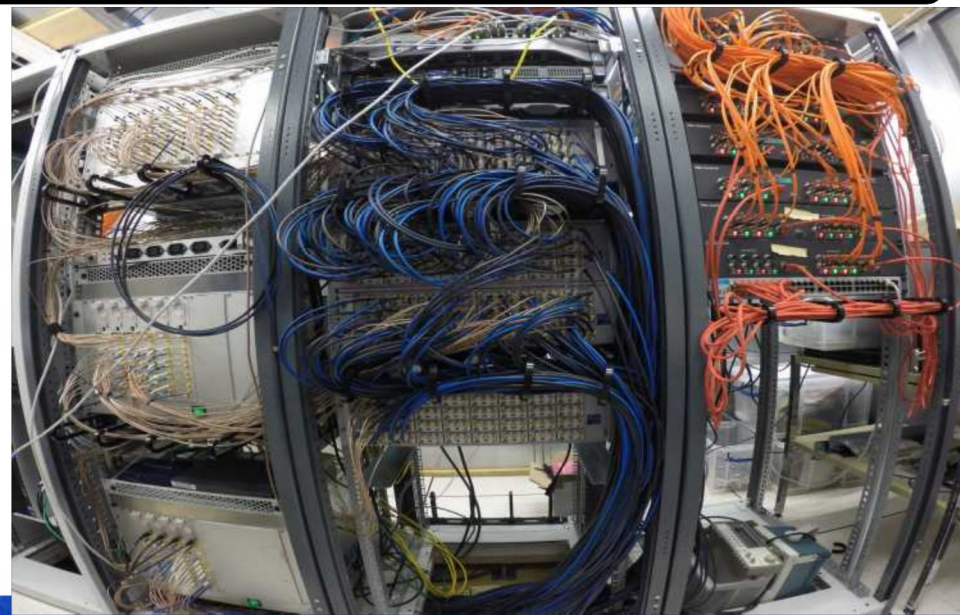
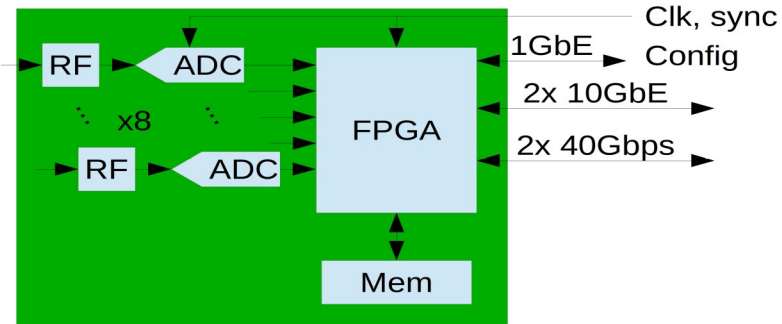
- Sous-traitance
 - Hardware
 - FPGA Stratix V
 - 8x ADC 200MS/s, 14 bits
 - IP 10GbE, ADC
 - Mémoires externes, Liens intercartes
- Code VHDL
- Récepteurs numériques du NDA
 - Fonctionnement stable 24/7, sans intervention
 - Juno-Nançay (2016), Mefisto (2014), NewRoutine (2012)
- NenuFAR (2016), RadioGAGA (2021)



Calculateurs NenuFAR

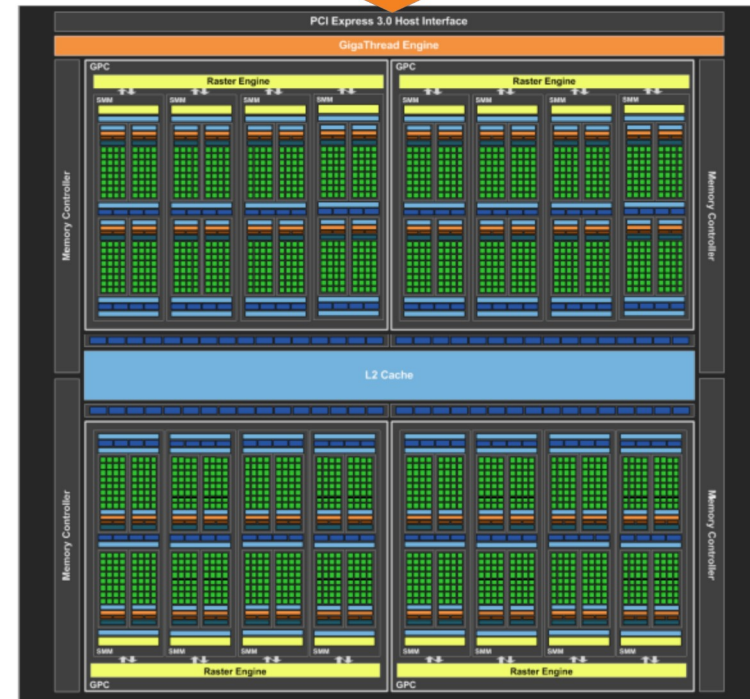
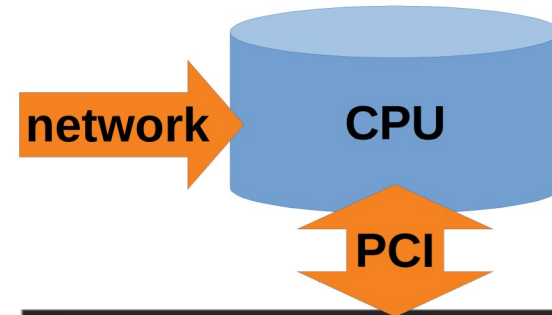


2 beams full-band (~10-85 MHz), full-polar.

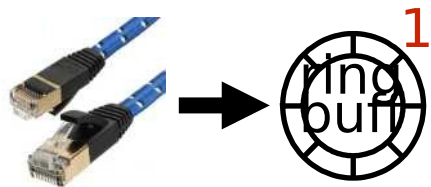


Traitement du signal sur GPU (GPGPU)

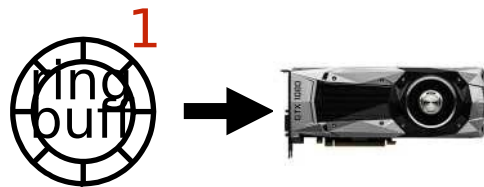
- GPU
 - Graphics Processing Units
 - Produits à l'origine pour calculer les polygones 3D des jeux vidéos
 - Calculs simples mais massivement parallèles
- GPGPU
 - General-Purpose computing on Graphics Processing Units
 - Réutilisation de ces calculateurs « grand public » pour le calcul scientifique
 - Professionnalisation des outils (HPC, AI, ...)



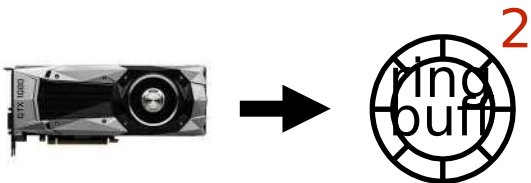
Dédispersion / analyse spectrale fine sur GPU UnDysPuted



- net_thread
 - copies data from UDP ip on the first ring buffer



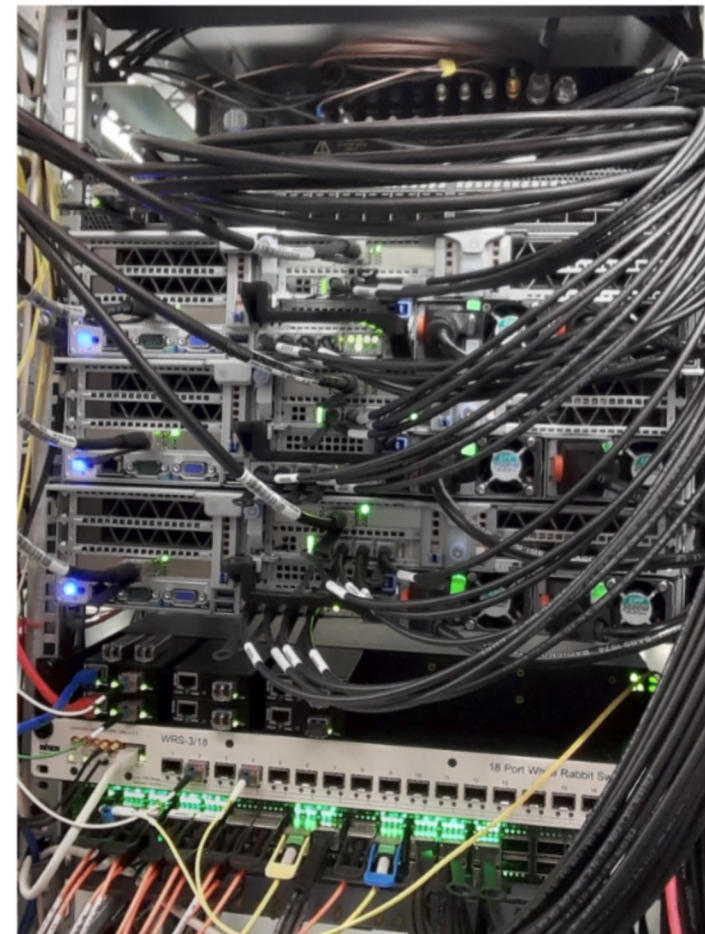
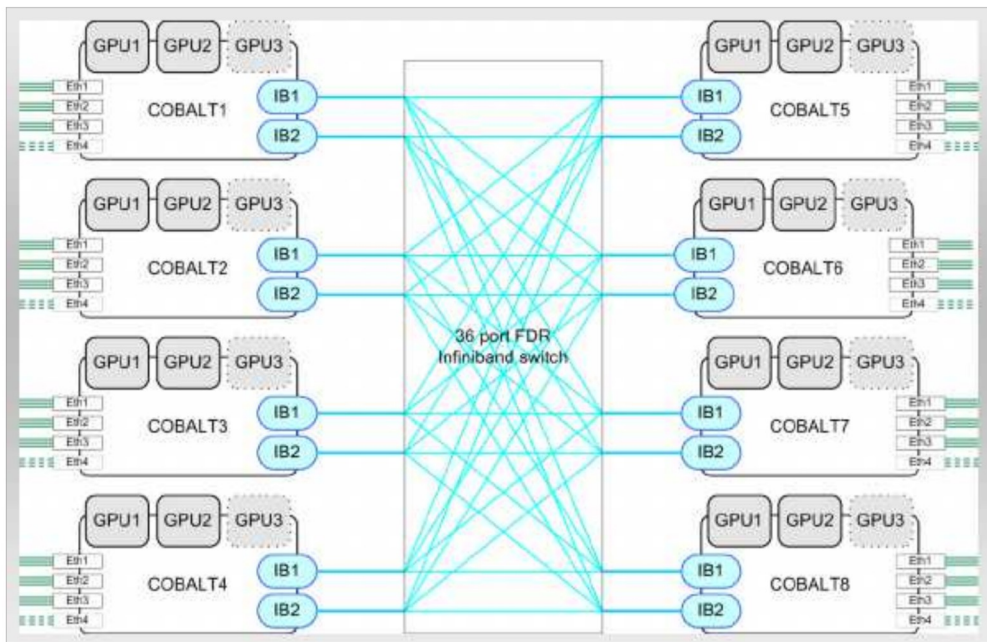
- GPU_thread
 - load data from the circular buffer to the GPU
 - coherent dedispersion for all channels
 - channelization (in construction)
 - Folding to the period of the pulsar (if required)
 - downsampling in time (if required)
 - copies output data on the second ring buffer



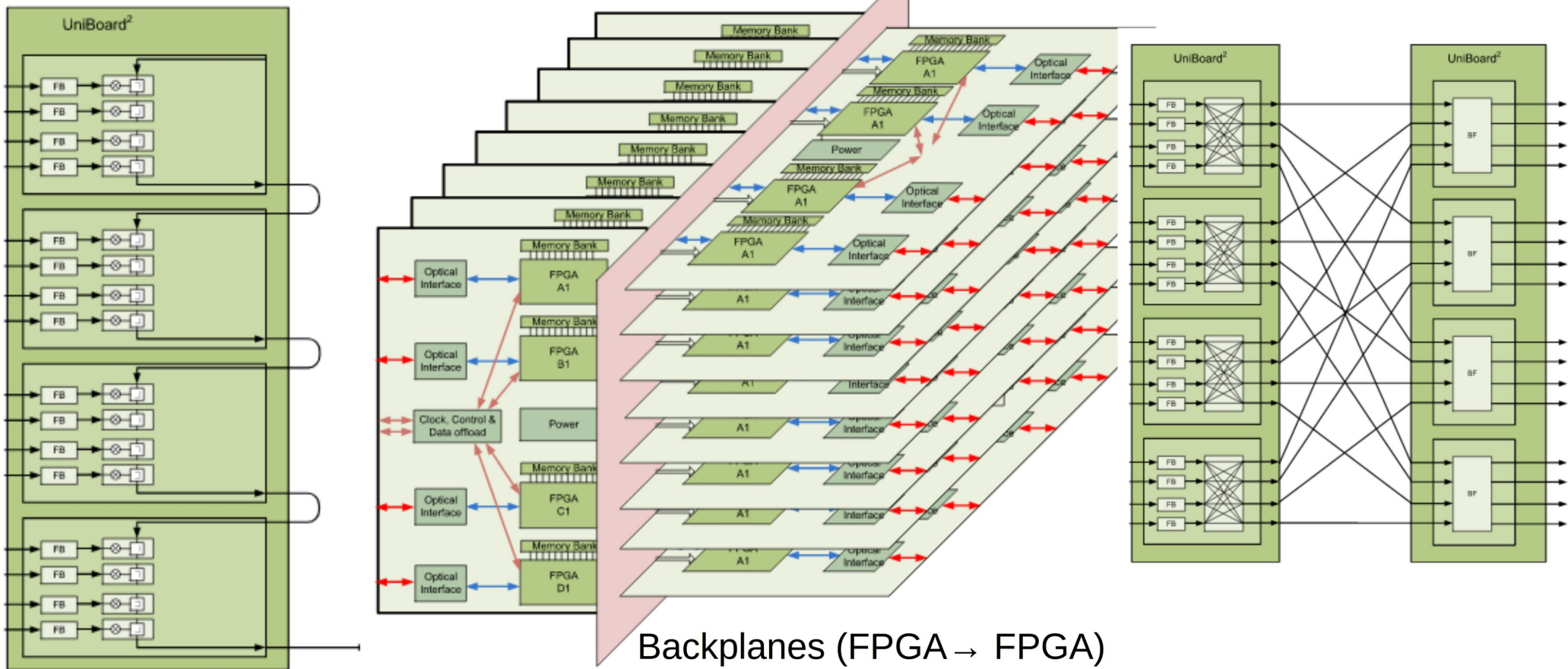
- psrfits_thread
 - copies data on the raid

Corrélateur NenuFAR

- Ingérera 204 flux réseaux pour 30 GB/s
- Corrélation de 102 feeds polarisés
- Transposition Feeds-Sousbandes par switch InfiniBand
- « Seulement » 1-2 GB/s de données de sortie



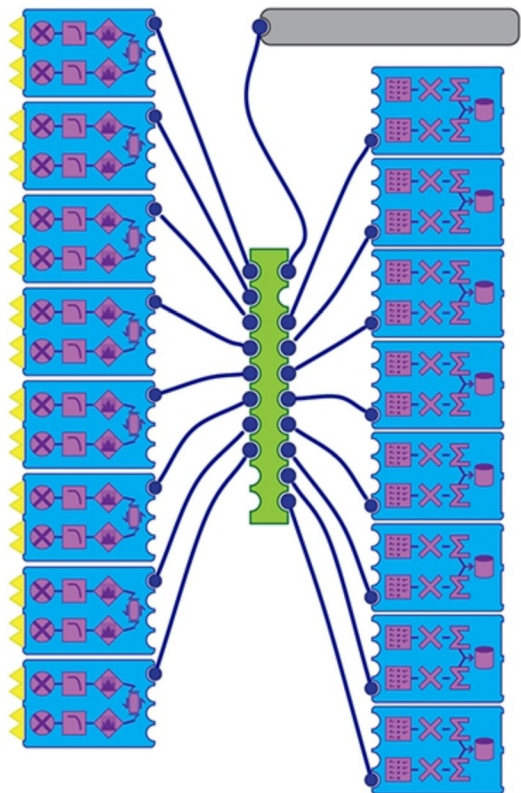
Transport de données (PCB)



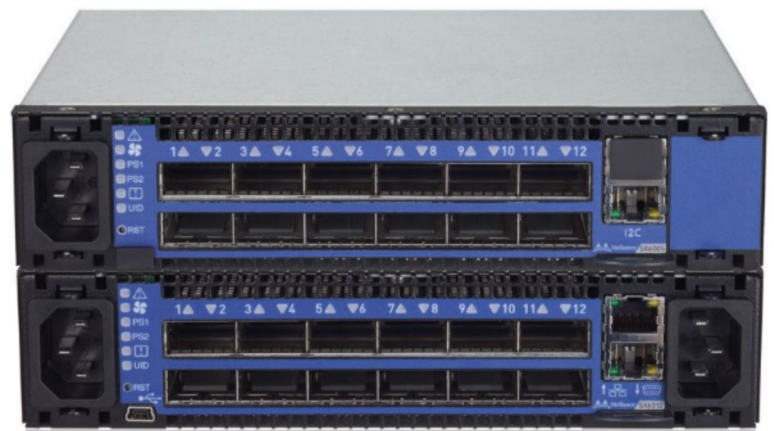
Backplanes (FPGA → FPGA)

Beamformer

Transport de données (Switch)



	Sum / Integrate		Data Reorder / Transposer
	Data Select / Route		Cross - Correla
	Polyphase Filterbank		To Memory Buffer
	FIR Filter		Mix / Multiply
	Single ADC		Dual ADC
	10 GbE Switch		
	Commodity CPU		
	ROACH Board		



Transport de données... et de temps-fréquence !

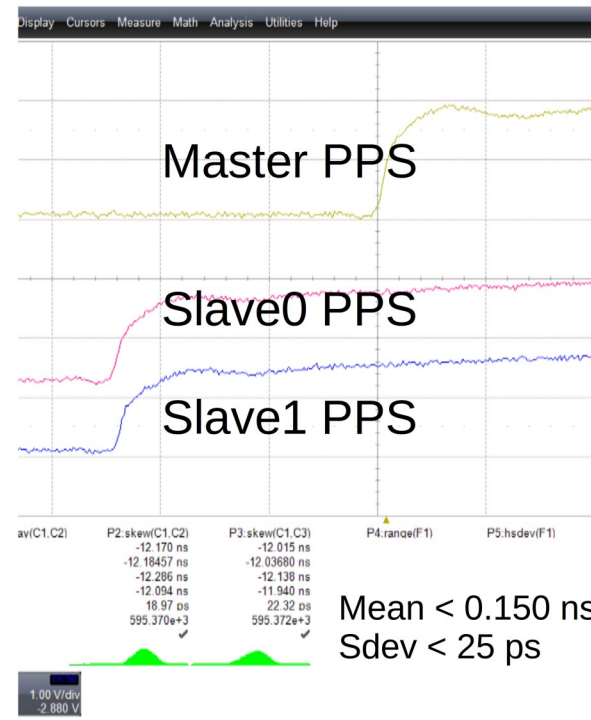
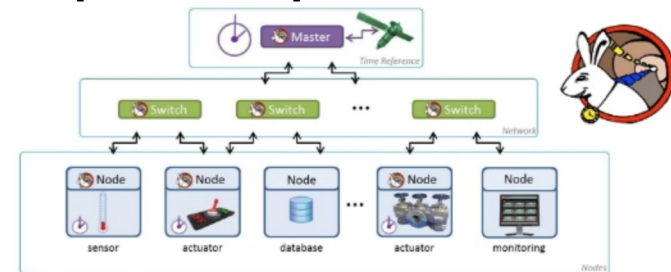
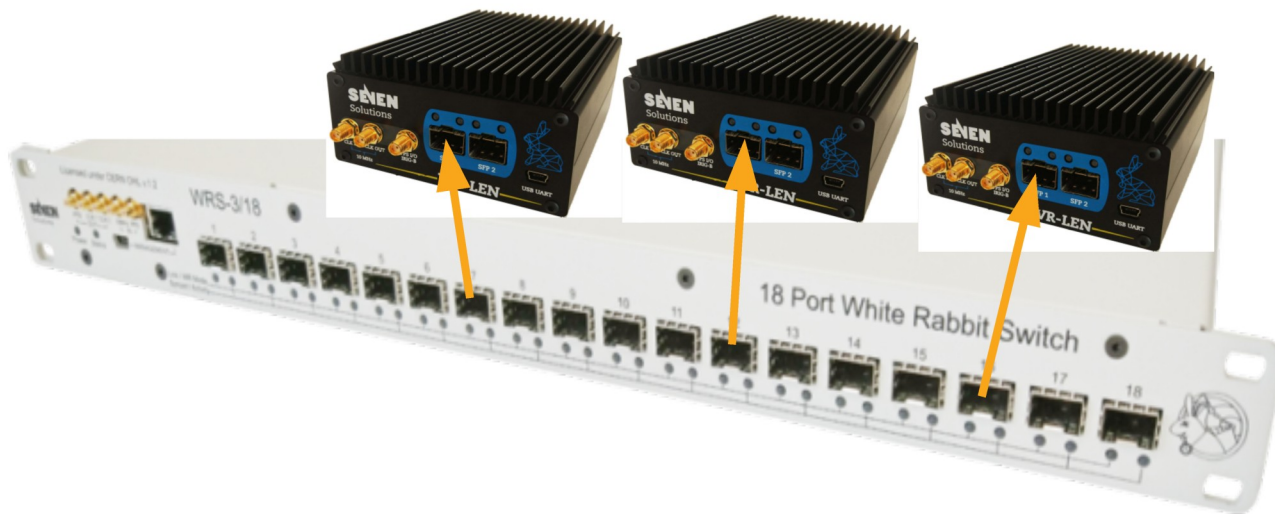


Transport de données... et de temps-fréquence !

- Le transport de larges bandes RF sur de longues distances détériore le signal.
- Numérisation proche des antennes et transport sur fibre optique numérique.
- Mais les applications de beamforming et corrélations nécessitent une bonne stabilité en **fréquence** et en **phase** des ADC !!!

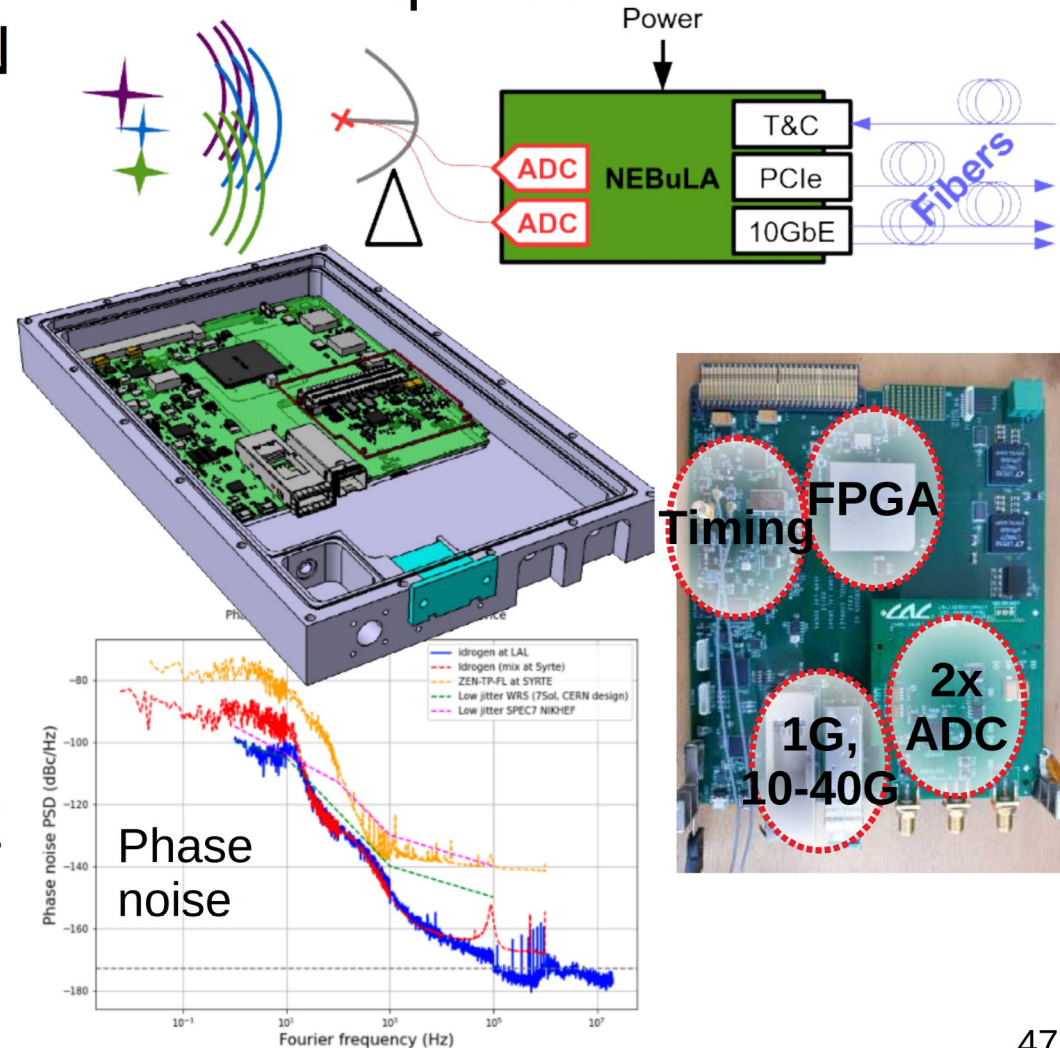
Transport de données... et de temps-fréquence !

- WhiteRabbit network
 - CERN, opensource/openHW
 - Sub-ns fiber-based timing distribution (next IEEE 1588)
 - PPS and 10 MHz refclock regenerated on-site



Numérisation distribuée d'un télescope multi-antennes NEBuLA / IDROGEN

- R&D transverse de l'IN2P3
- Intègre les développements initiés dans NEBuLA
 - Numériseurs/récepteurs radio pour l'astronomie
 - Synchronisé par WhiteRabbit
- Collaboration USN-LAL-SYRTE



Questions ?

