

La détection des transitoires EM et

des formes d'ondes

Une fenêtre d'observation quasi inconnue

&

une discipline pluridisciplinaire

Peu d'expériences dans le monde

- CODALEMA (MHz)
- LOPES & LOFAR (MHz)
- 4 Tests RADIO sur AUGER-sud (MHz)
- ARECIBO Obs. (GHz)
- Satellite FORTE (kHz)

& donc une méthodologie en devenir...

PLAN

1. Potentialité de l'approche « formes d'ondes »

- L'analyse simultanée de toute l'information
- L'identification des transitoires: le trigger

2. Thématiques physiques

- Cosmiques
- Pulsars
- Atmosphère...

3. Exemples de Trigger

- Trigger de Cosmiques en BF
 - CODALEMA
 - Exemple d'analyse des formes d'ondes CODALEMA
 - LOPES-LPDA
- Trigger de Pulsars en HF

4. Utilisation dans d'autres thématiques

Potentialité de l'approche « formes d'ondes » 1/3

=> L'analyse simultanée de toutes les informations

1. **Analyse de la forme d'onde: Amplitude, Spectre en fréquence, forme du transitoire,...=> Structure du signal temporel => Mécanismes d'émission => physique de la source**

Technique en évolution accélérée : Numériseurs jusqu'à 2 GS/s facilement disponibles (voir 8 GS/s & 128 Mpoints...)

– **Analyse par TF**

- Signature du transitoire: composantes larges bandes
- Méthode on/off instantanée
- Fit du spectre de fréquence => par TF^{-1} => forme d'onde

– **Autres Méthodes**

- Filtre LPC
- Ondelettes

Potentialité de l'approche « formes d'ondes » 2/3

L'analyse simultanée de toutes les informations

1. Étiquetage temporel de l'onde

- **Direction d'arrivée de l'onde**
 - Par temps d'arrivée sur la forme d'onde
 - Par corrélation

2. Trajectoire & Localisation spatiale de la source d'émission par triangulation

3. Phasage numérique des formes d'onde post-enregistrement, interférométrie ?

Potentialité de l'approche « formes d'ondes » 3/3

Position du problème: repérer les transitoires

Le TRIGGER

Détection de l'émission => Enregistrer uniquement l'information recherchée

1. Réponse du Trigger

- Instantanée sur tout signal présentant une variation temporelle de son contenu en fréquence (dans un temps de l'ordre de la période)
- Efficace dans des plages de fréquences non polluées par des émetteurs (stationnaires)

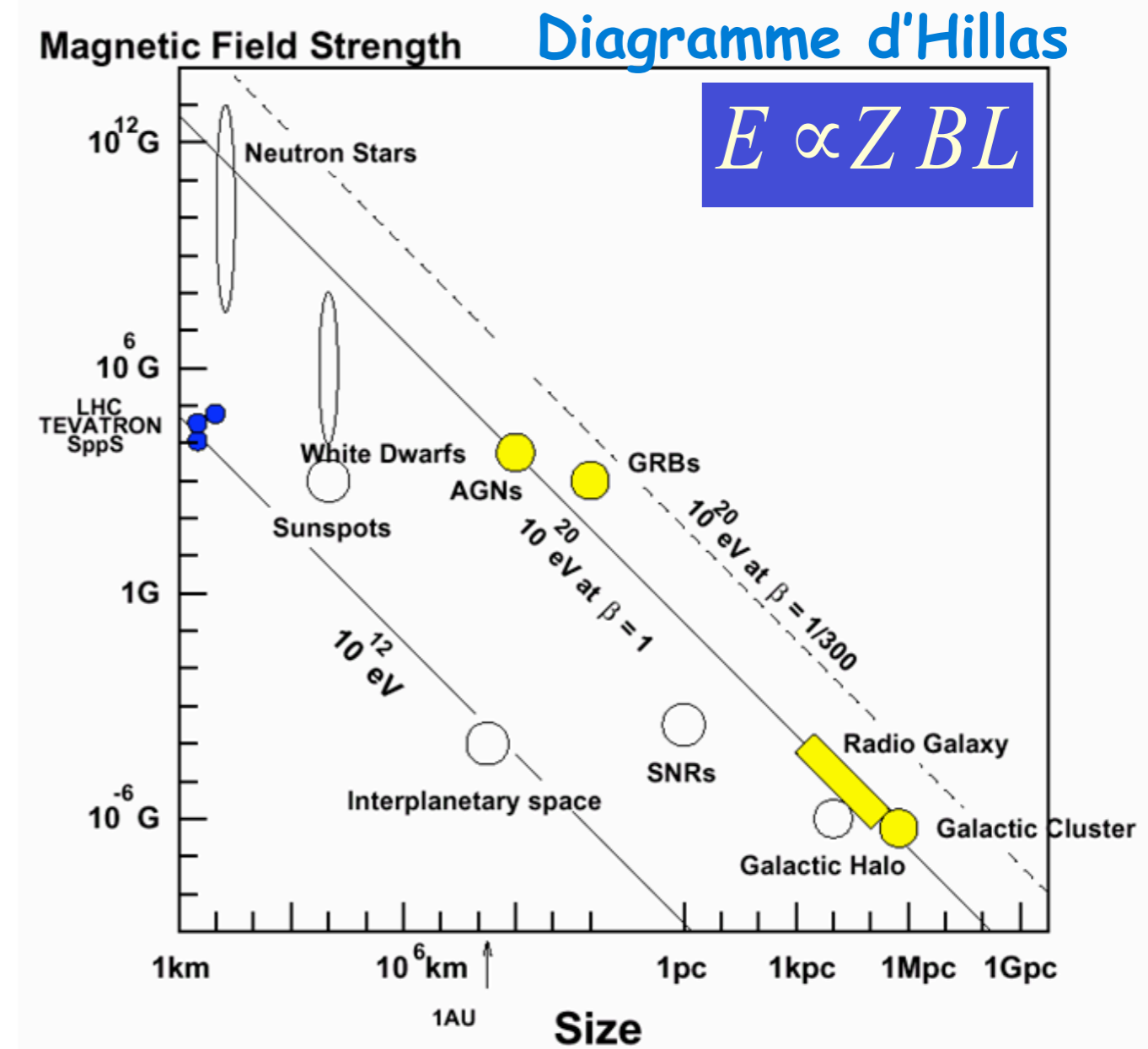
2. Evolution du Trigger radio

- CODALEMA (1^{re} génération)
- LPDA (2^{me} génération)
- Pulsars

Thématiques physiques 1/3

En Astroparticules

1. Détection des grandes gerbes cosmiques atmosphériques (de 10^{17} à 10^{20} eV)
2. Perspectives possibles ?
 - Détection γ « à la HESS » (pulse Cerenkov radio $\sim 10^{15}$ eV \Rightarrow radio-détecteur pointé)?,
 - Détection ν UHCR (gerbe $\tau \sim 10^{17}$ eV)? Cible?
 - atmosphère à l'horizon \Rightarrow détecteur étendu
 - glace \Rightarrow détecteur étendu
 - lune \Rightarrow détecteur pointé



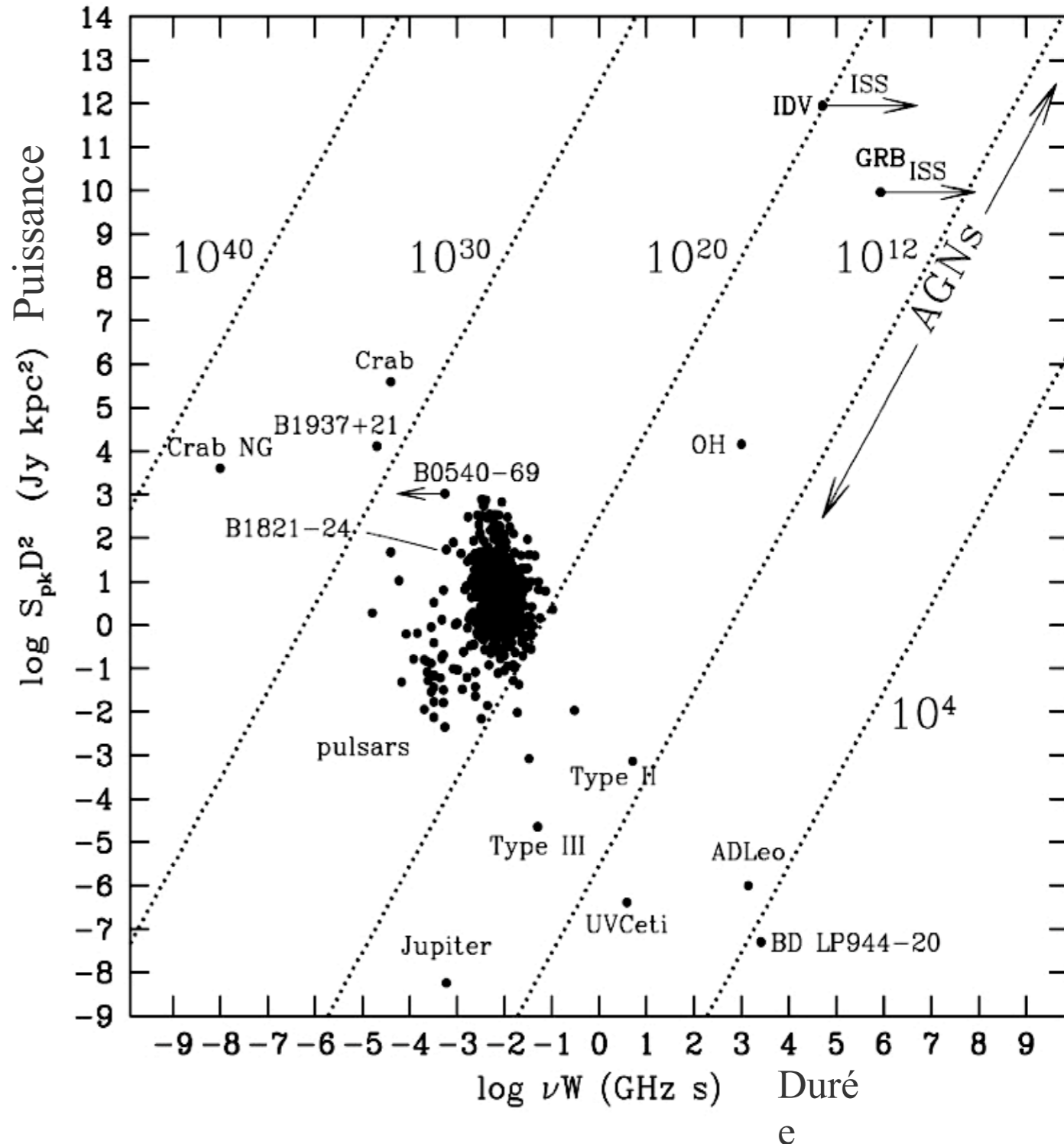
Origine & nature des Cosmiques
distribution isotrope? sources ?)

Thématiques physiques 2/3

En radio-Astronomie

- Emissions impulsionnelles**
 - soleil, Jupiter (MHz)?
 - Pulsar giant pulse (GHz)?
 - γ ray burst?...
 - Astronomie haute énergie?
- Imagerie décimétrique impulsionnelle ?**
 - (snapshot pour s'affranchir de la turbulence)?

Fast radio transients
Cordes & McLaughlin, ApJ 596, 2003



Thématiques physiques 3/3

En Physique de l'atmosphère

- Orage, Elfe, Sprite, Blue jet, X ray flash,...

En Détection des signaux anthropiques

- Télécom large bande, Guerre électronique, tracking de cible (avion, sat.)

La détection des transitoires EM dans le domaine MHz

- Gerbes, syst. solaire, atmosphère, anthropiques...

=> ILLUSTRATION avec la détection des Gerbes

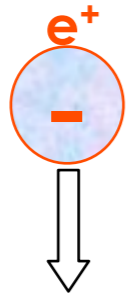
(Pour les gerbes la détection des particules est indirecte)

- Onde EM peut être sphérique
- Signal fort: $> \mu\text{V/m}$
- Durée finie: 10-1000 ns
- Arrivée stochastique
- Détection dans 2π str

Le champ électrique des gerbes

Identifiés en 1970

- Excès de charge $\sim 10\% e^- /$

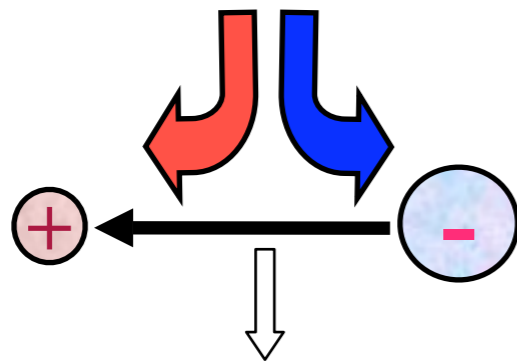


- Effet géomagnétique $F=qV \times B$

→ moment dipolaire



→ Courant transverse d'alimentation du dipôle



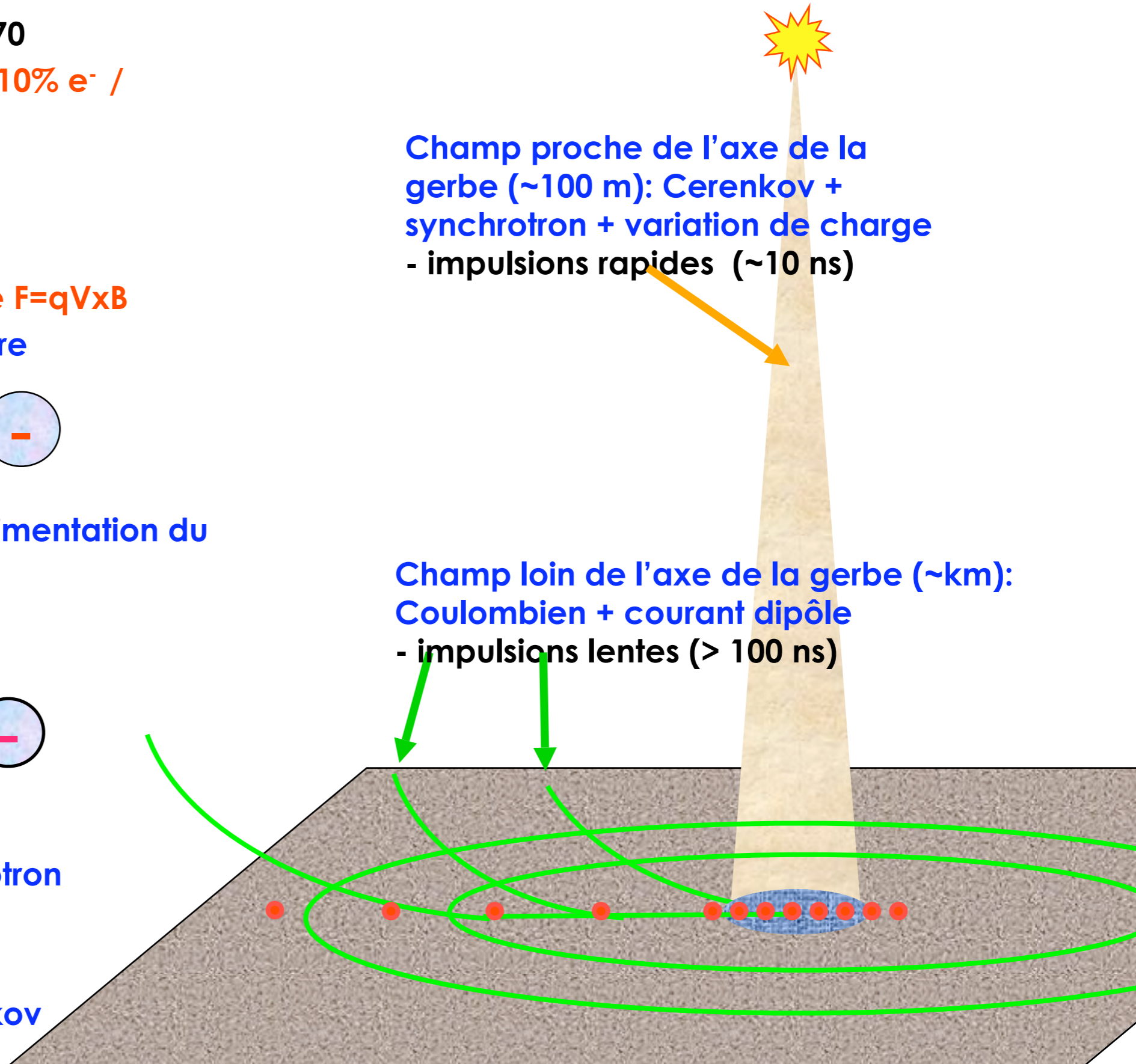
→ Emission Synchrotron

- $v_e > c$

→ Emission Cerenkov

Champ proche de l'axe de la gerbe (~ 100 m): Cerenkov + synchrotron + variation de charge
- impulsions rapides (~ 10 ns)

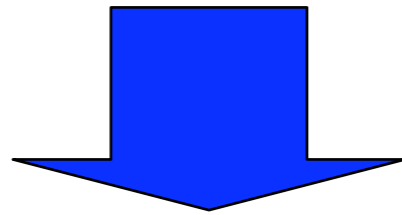
Champ loin de l'axe de la gerbe (\sim km): Coulombien + courant dipôle
- impulsions lentes (> 100 ns)



La démarche expérimentale

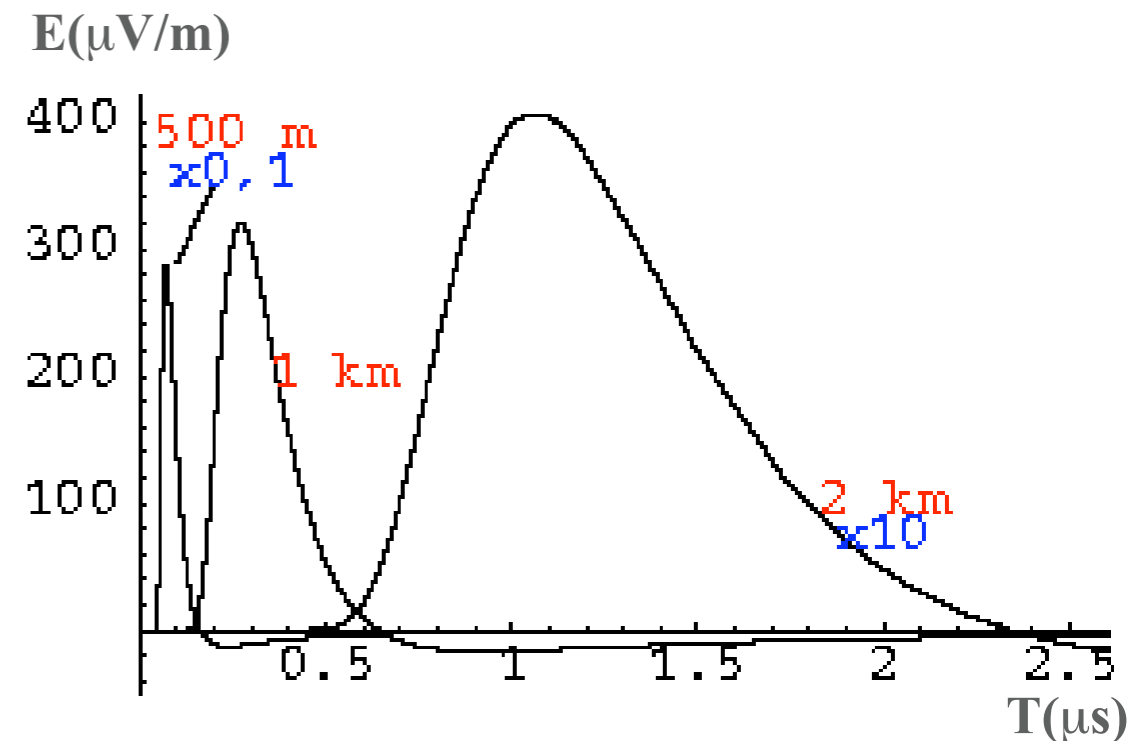
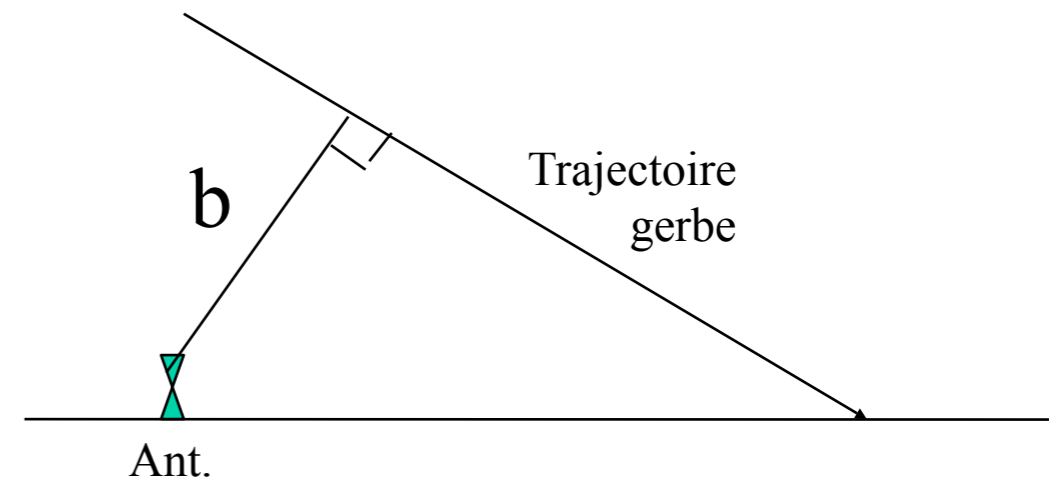
• Simulation théorique: Informations contenues dans la forme du signal

- Amplitude ($>1\mu\text{V/m}$) \Rightarrow énergie
- Durée ($\sim 100\text{ ns}$) \Rightarrow paramètre d'impact (b)
- Forme d'onde \Rightarrow nature des particules



• Mesures expérimentales:

- Evts rares (trigger $\sim 10^{-3}\text{ Hz}$)
- Analyse temporelle du signal \Rightarrow Reconstitution de la trajectoire par triangulation entre plusieurs antennes
- Analyse de l'amplitude \Rightarrow Extraction de l'énergie du primaire



La Recherche des impulsions

- **Impulsion => Signal à durée finie**

- $x(t)=t.\exp(-t/\tau)$

=> spectre large bande

- **Filtre 0.5-5MHz**

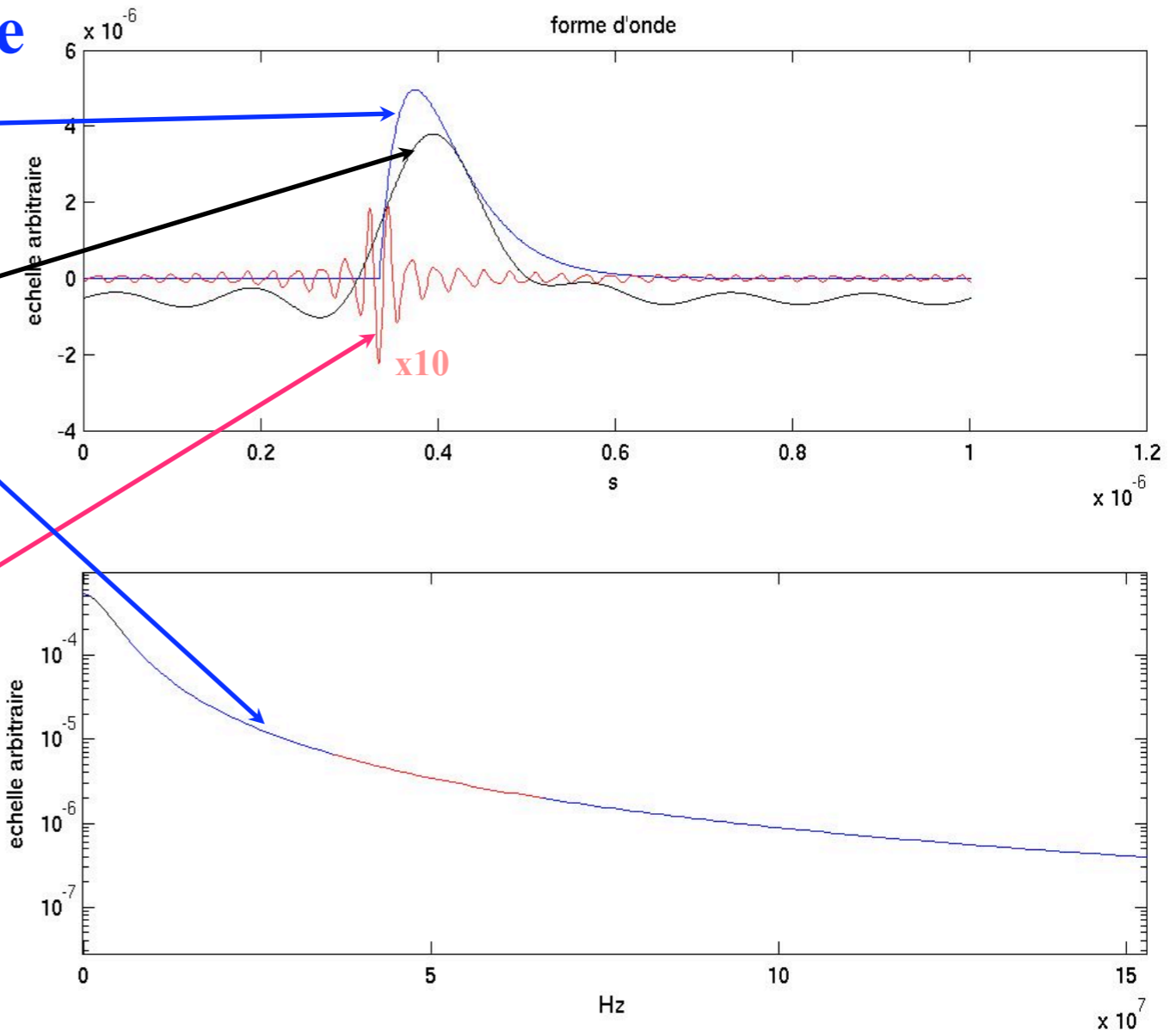
- Forme du transitoire
 - beaucoup de puissance

=> énergie

- **Filtre 35-65MHz**

- front de montée
 - peu de puissance

=> information temporelle



**Mais le signal réel est dans du bruit:
capteur, RFI, signal galactique, etc...**

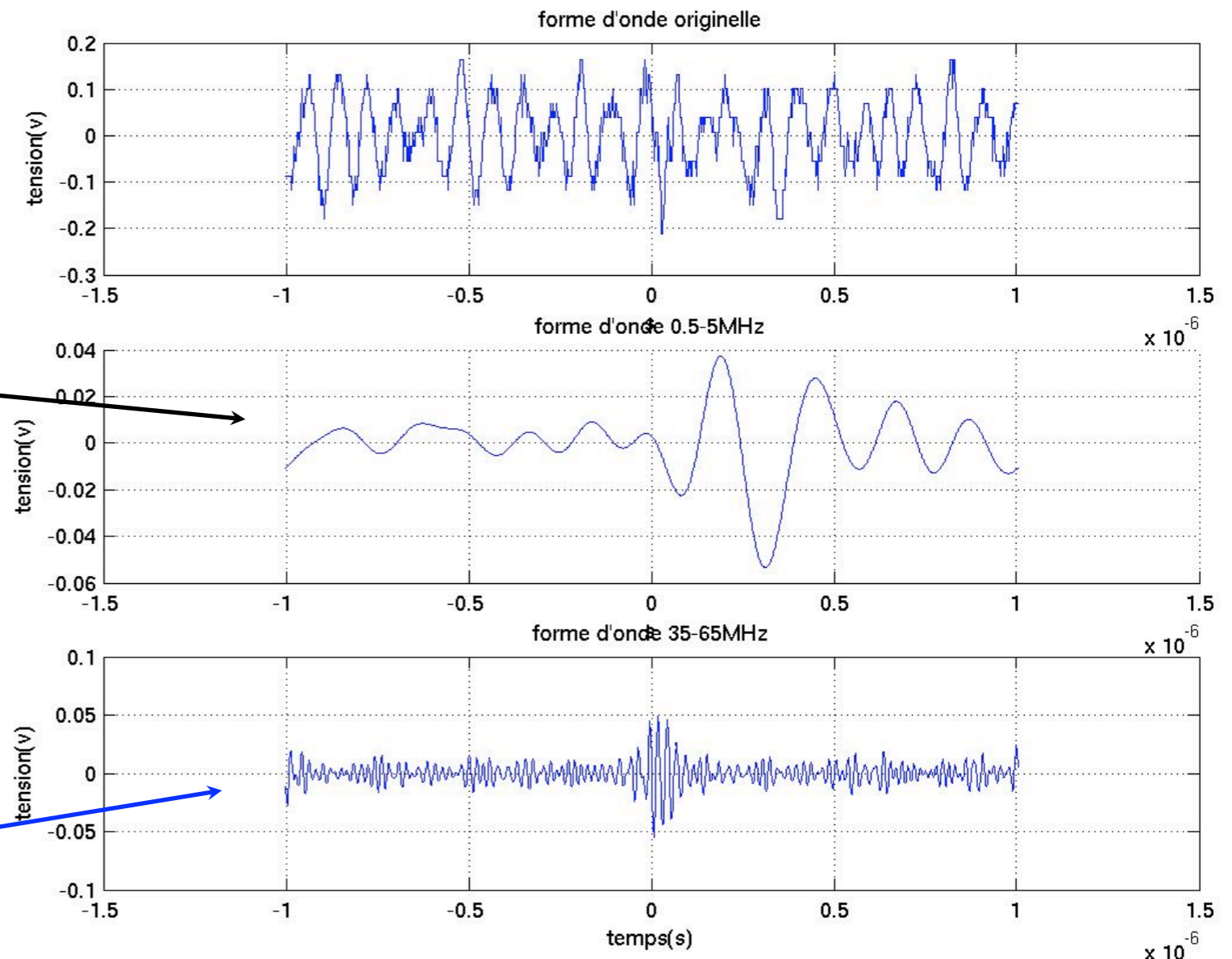
Signature du transitoire par l'analyse multi-bande

Filtrage "rectangulaire"
numérique



• Bande 0.5-5MHz

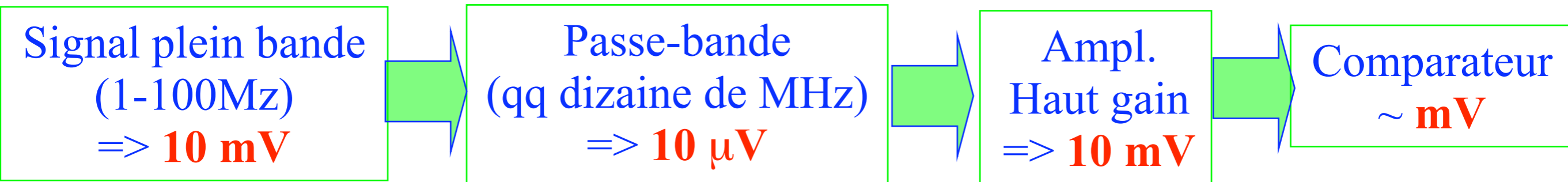
• Bande 35-65MHz
(trigger)



Antenne DAM

Principe du trigger

Identifier une impulsion (signal de durée finie & spectre large) dans un bruit quasi stationnaire => comparaison de la forme d'onde filtrée à un seuil en amplitude déterminée par le bruit quasi stationnaire dans cette bande

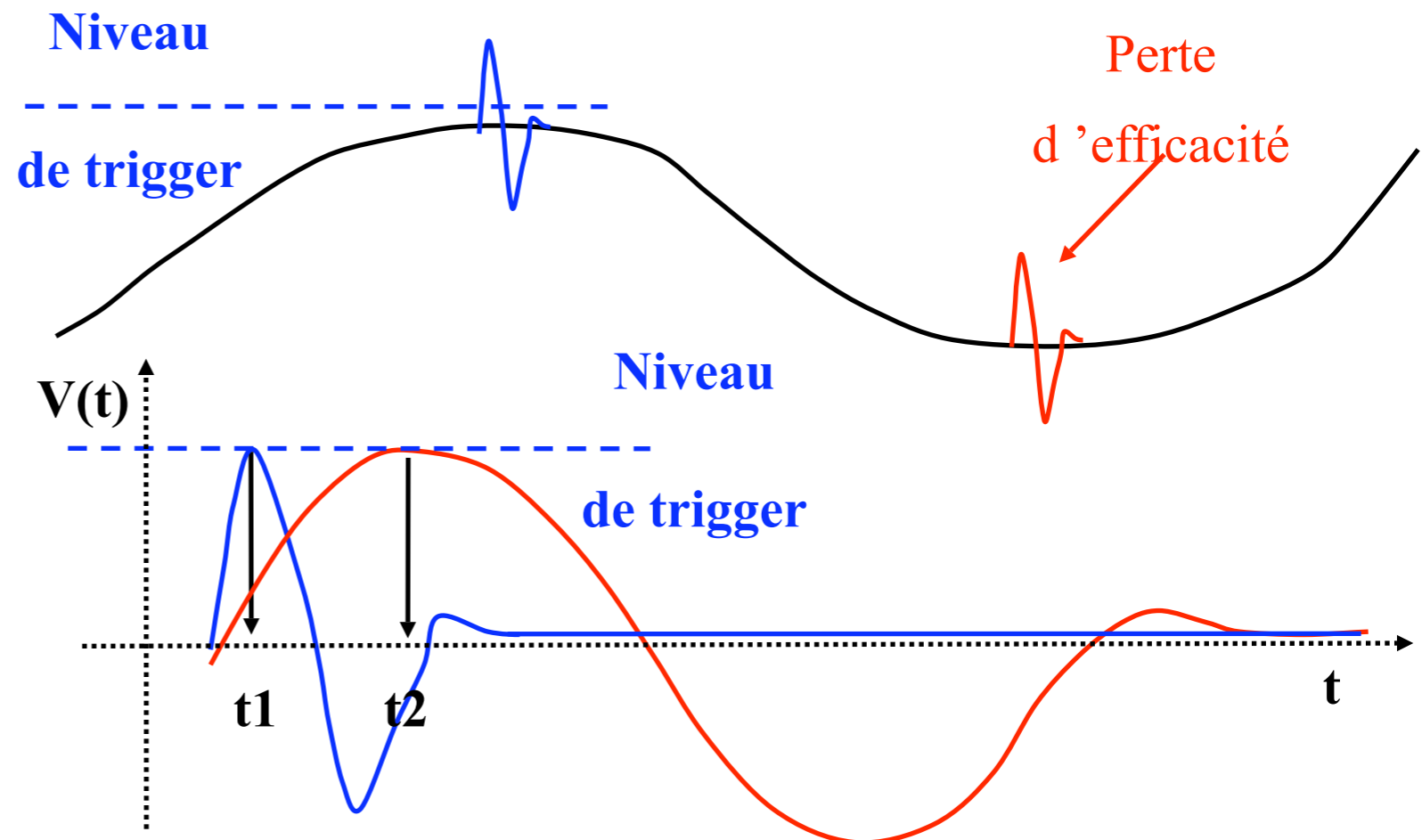


Difficultés

- définition de la Ligne de base a cause des **Résidus d'oscillations BF**

- Jitter dépend de la bande de fréquence

=> **Erreur $\Delta t \sim T/2$**



Le Trigger CODALEMA @ Nançay

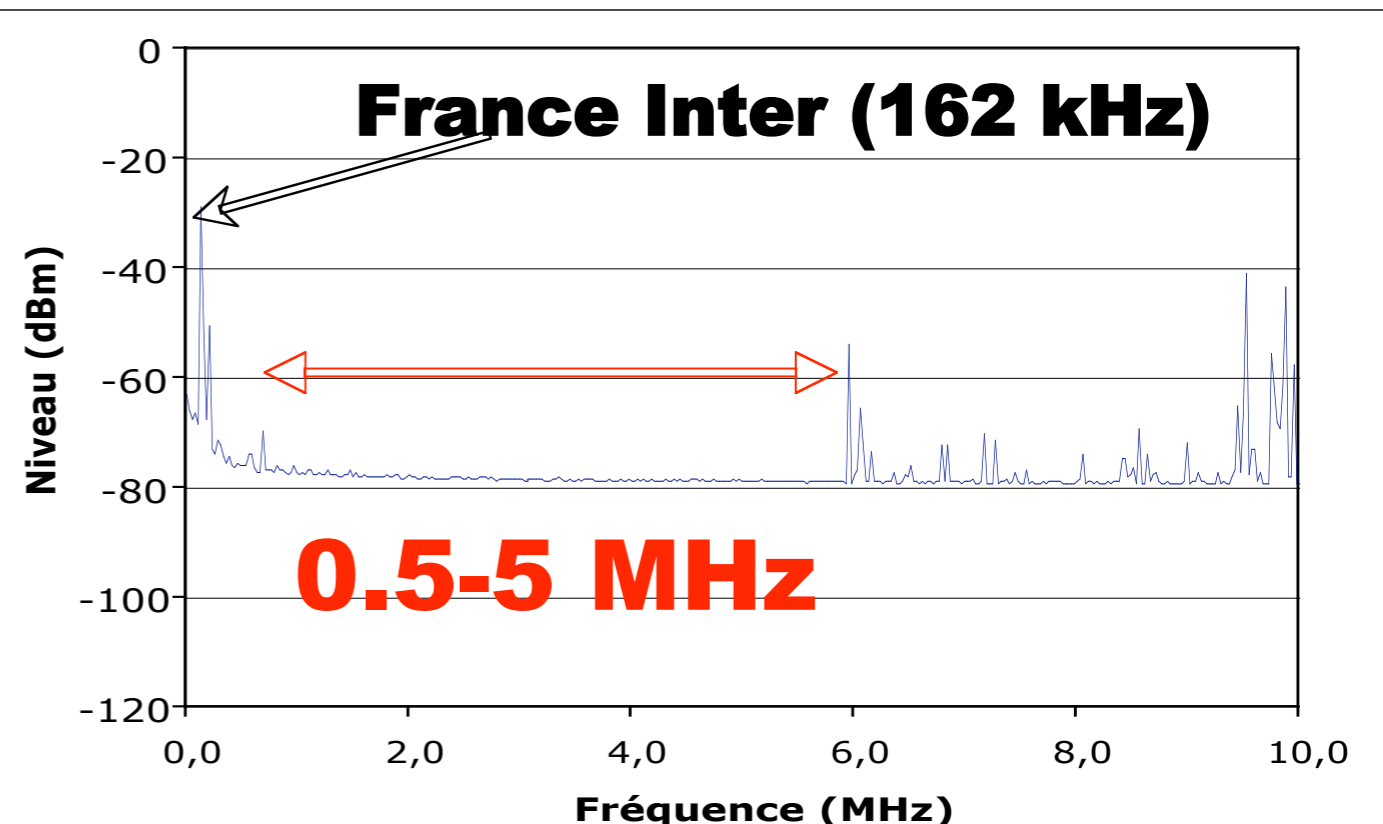
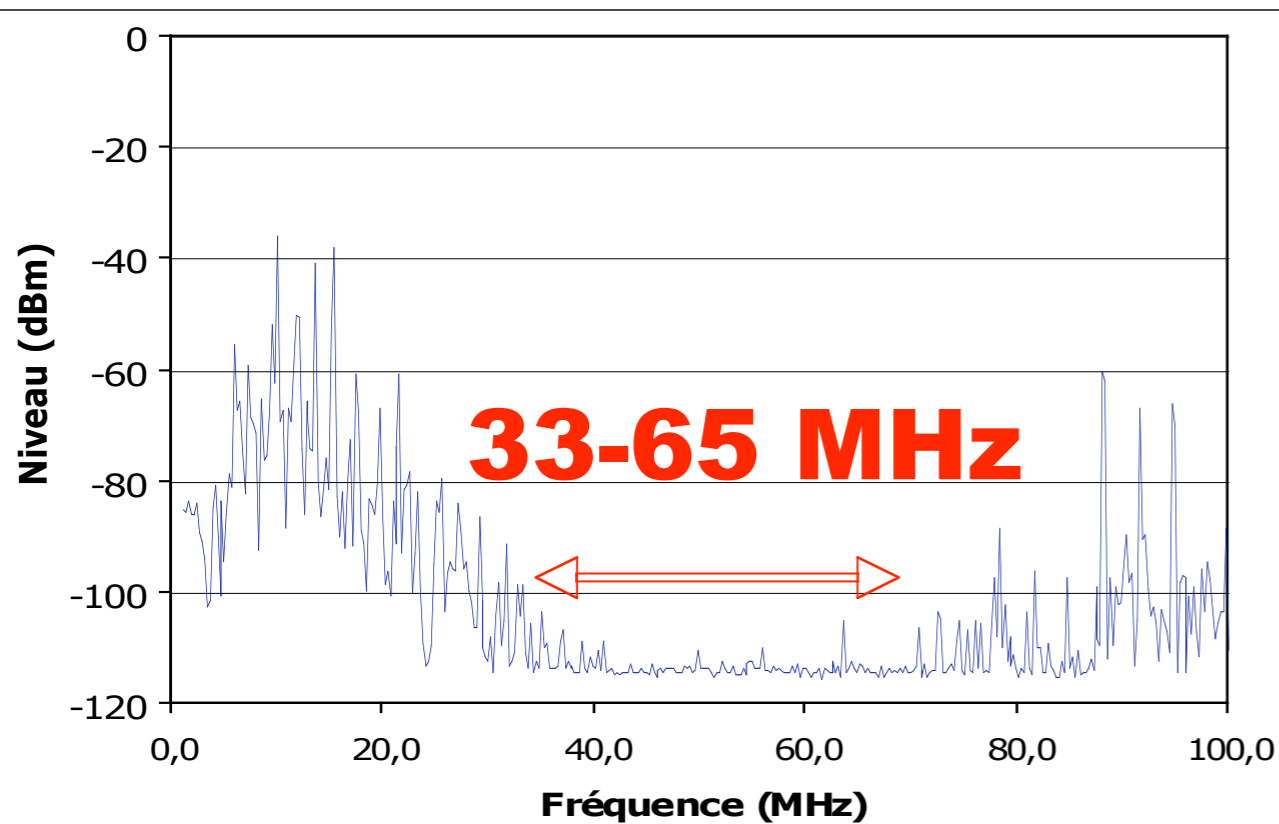
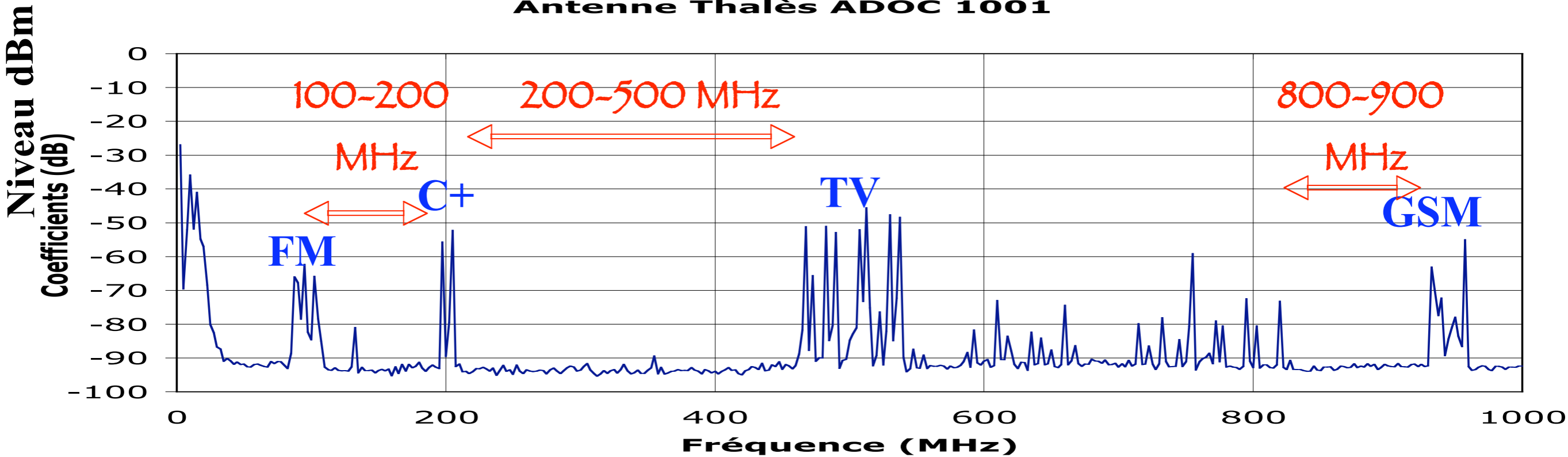


BUT: Étiqueter un transitoire avec un Trigger minimal (min-biais trigger)

- **Minimiser la perte de physique**
 - **Minimiser le coût**
 - **MAIS**
 - **Mais grand taux de comptage**
 - **Tirer partie de l'environnement radio de Nançay**
- => Sélection de la physique intéressante off-line**

Zones utilisables de trigger @ nançay

Spectre fond radio à Nançay • 1 kHz - 1 GHz
Antenne Thalès ADOC 1001



Le On-line trigger CODALEMA

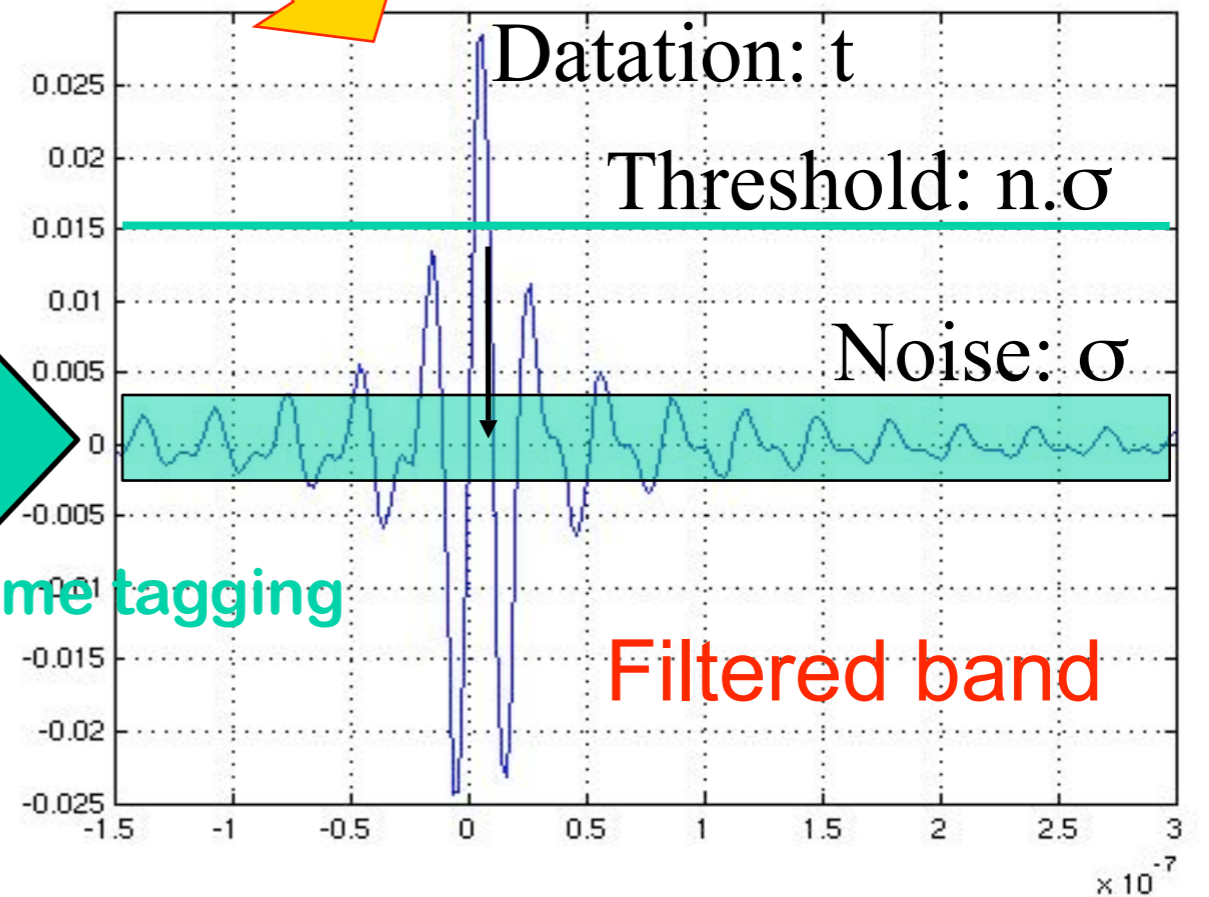
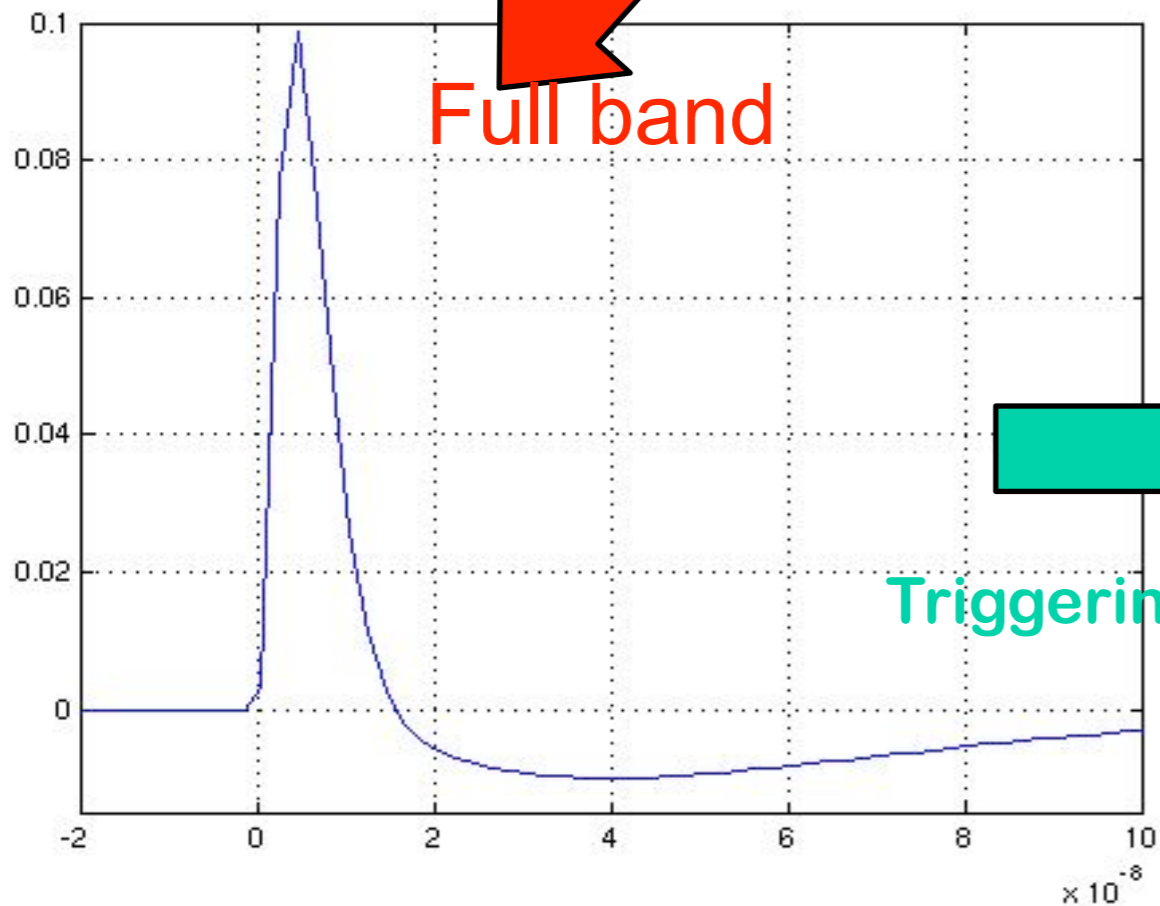
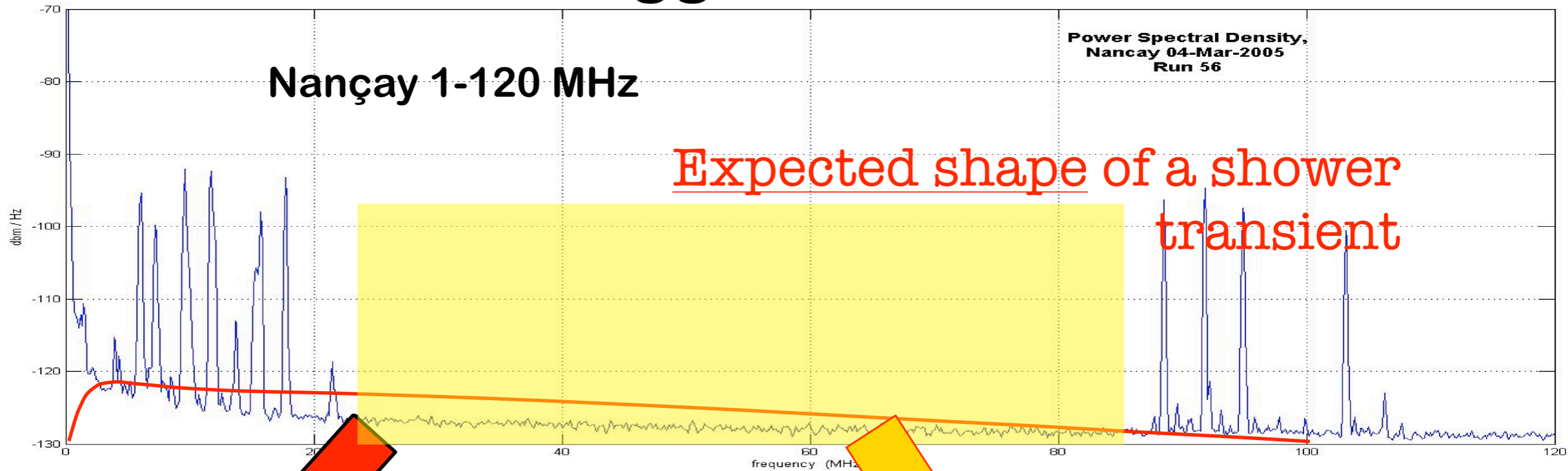
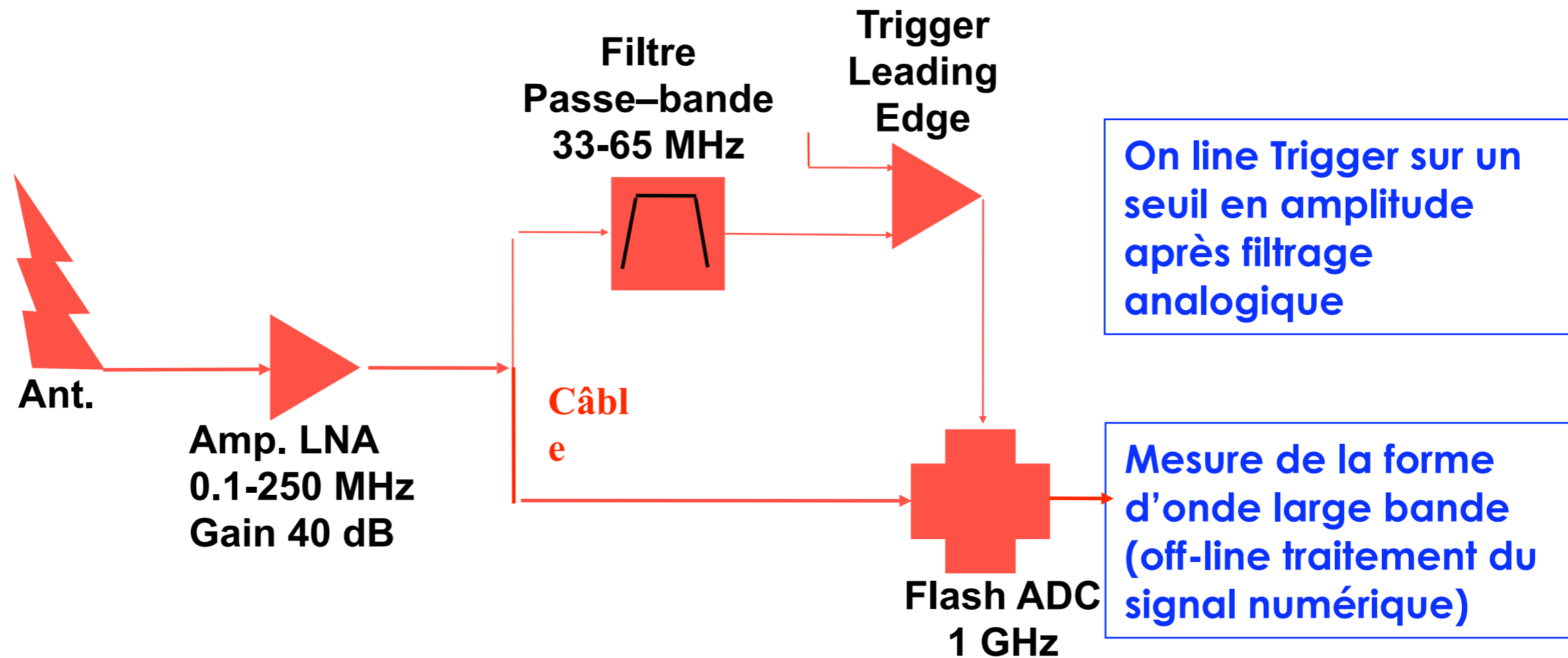


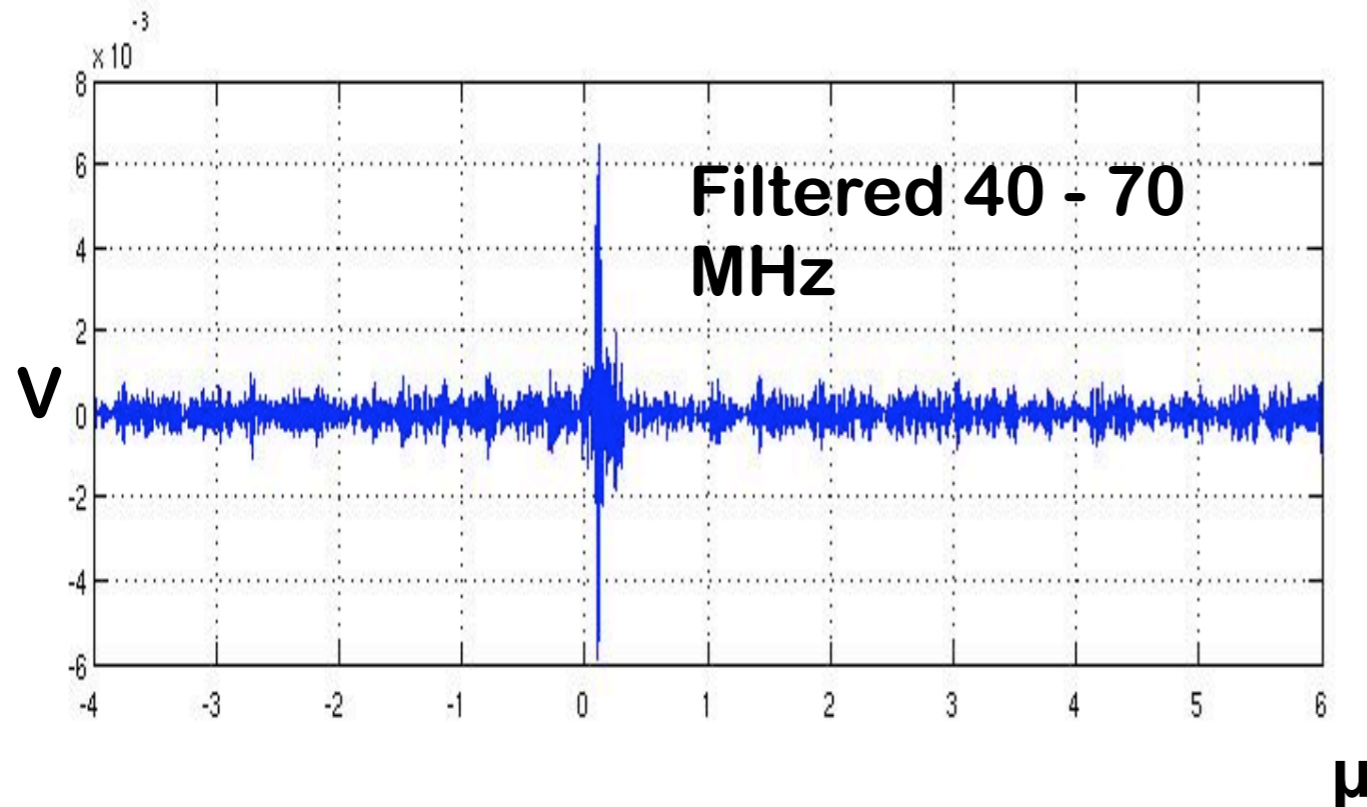
Schéma du Trigger CODALEMA @ Nançay



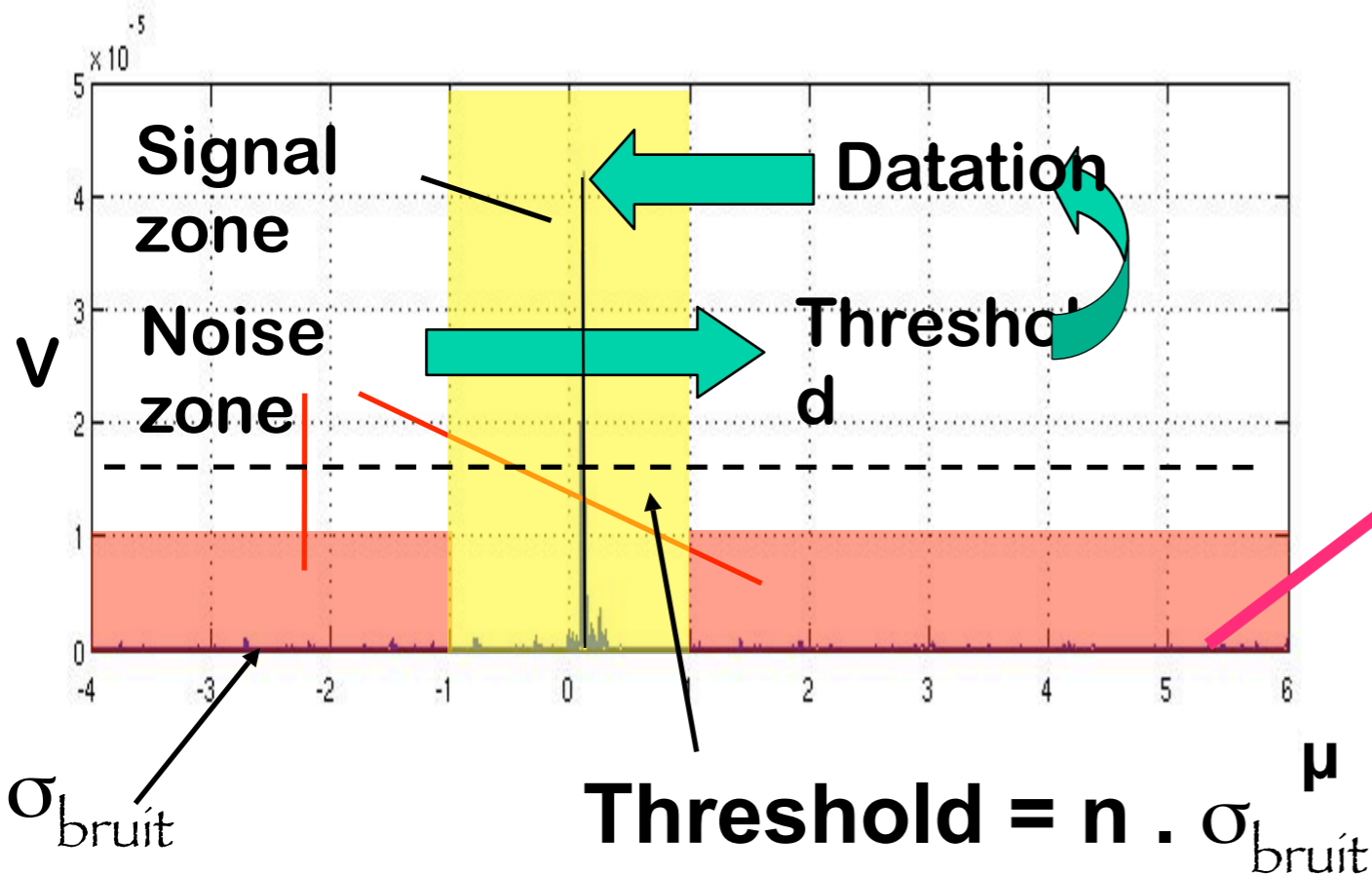
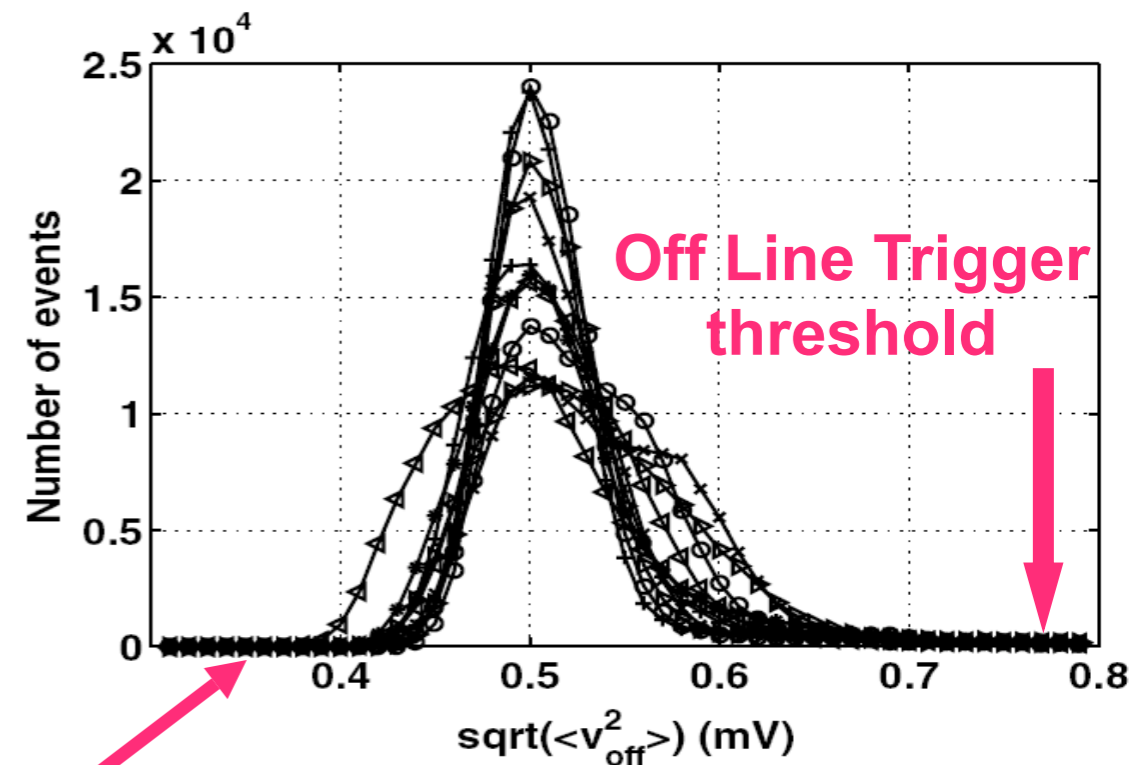
Stratégie en 2 étapes:

**=>Taux de trigger On-line >> Taux de vrais transitoires...
qui sont identifiés off-line par analyse de la forme d'onde et par
Un critère de sélection en utilisant le nombre d'antennes touchées**

The Off-line Transient detection (and datation)

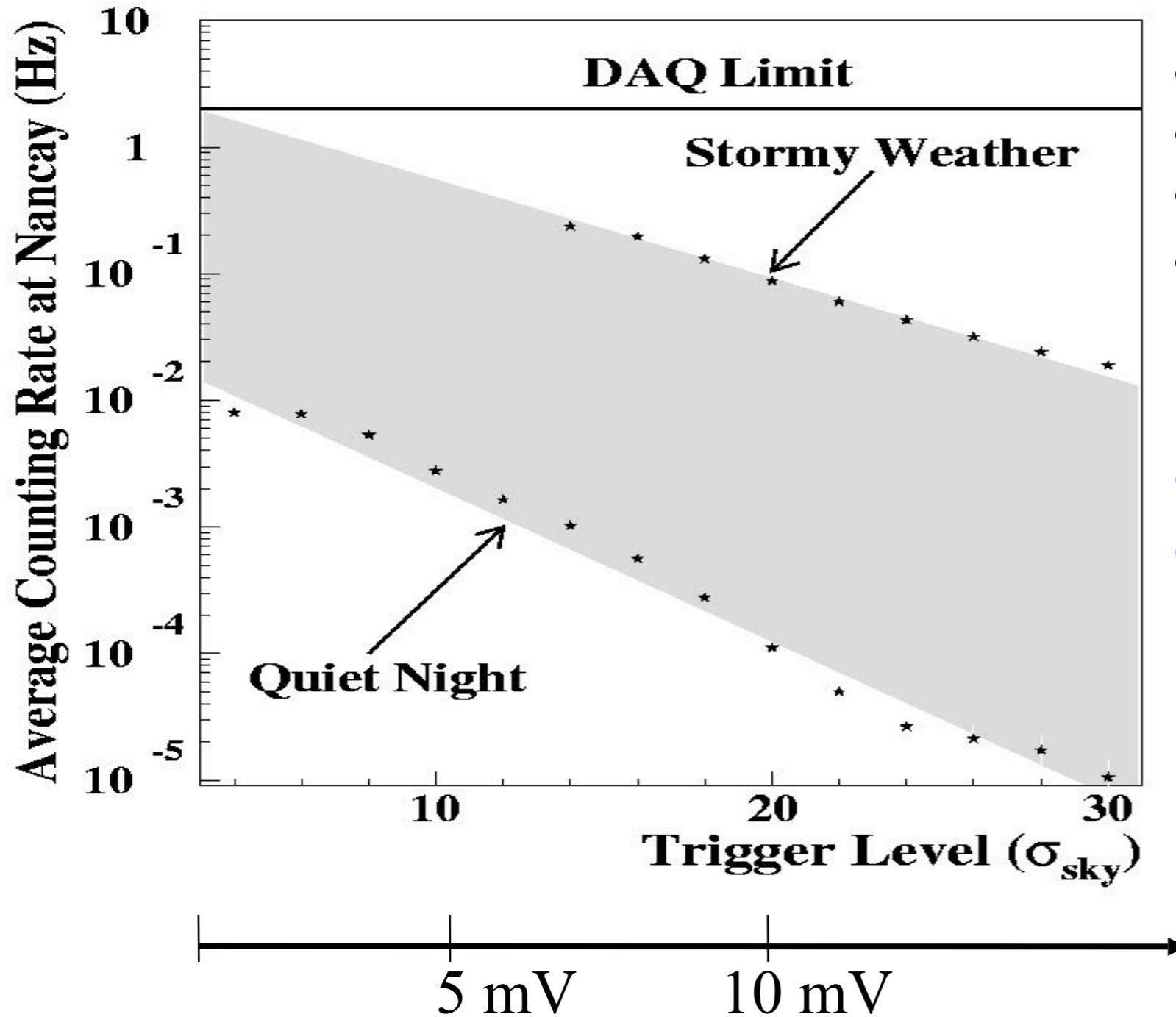


Distributions of the ground floor signal in the 40-70 MHz band after cross calibration of the antennas gains



Trigger rate in 33-65 band with 1 antenna

Knowledge of the transient radio background



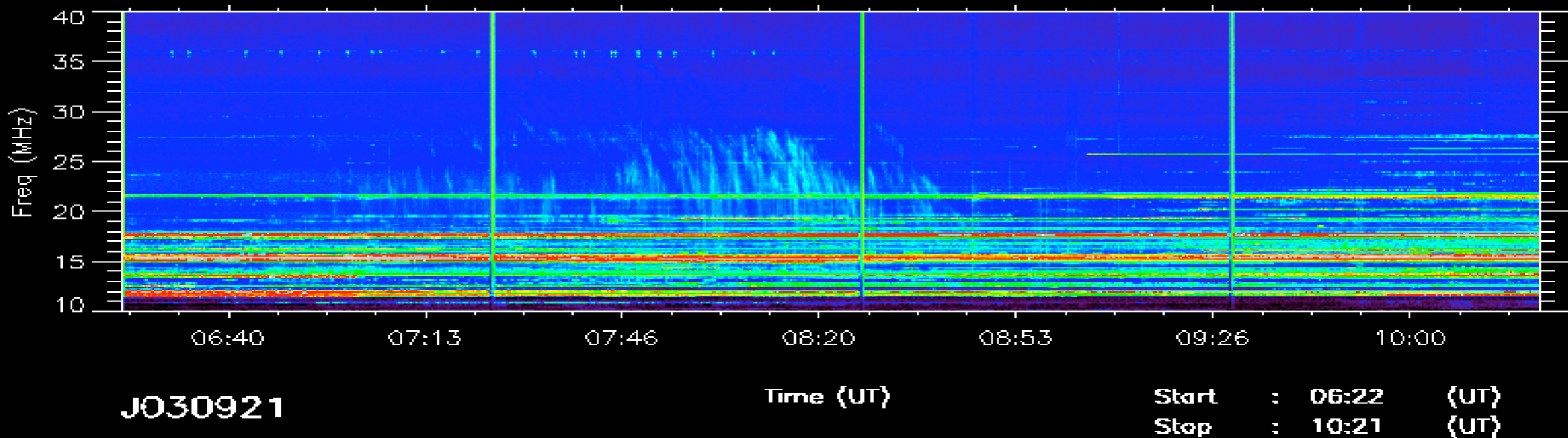
- Atmospheric conditions
- Day-Night modulations
- Human activities
- Solar activities

- Low rate < 1 Hz
- 100 % duty cycle

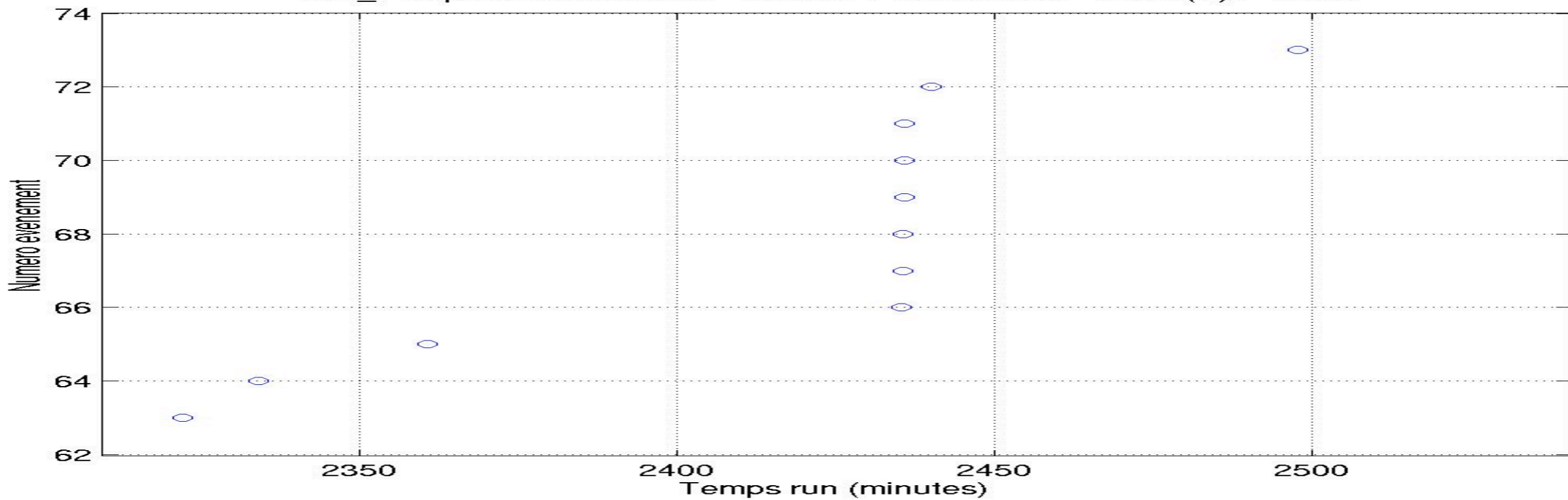
Trigger with antenna
is possible
in stand alone mode

Corrélations CODALEMA-DAM: evt. impulsif de Jupiter

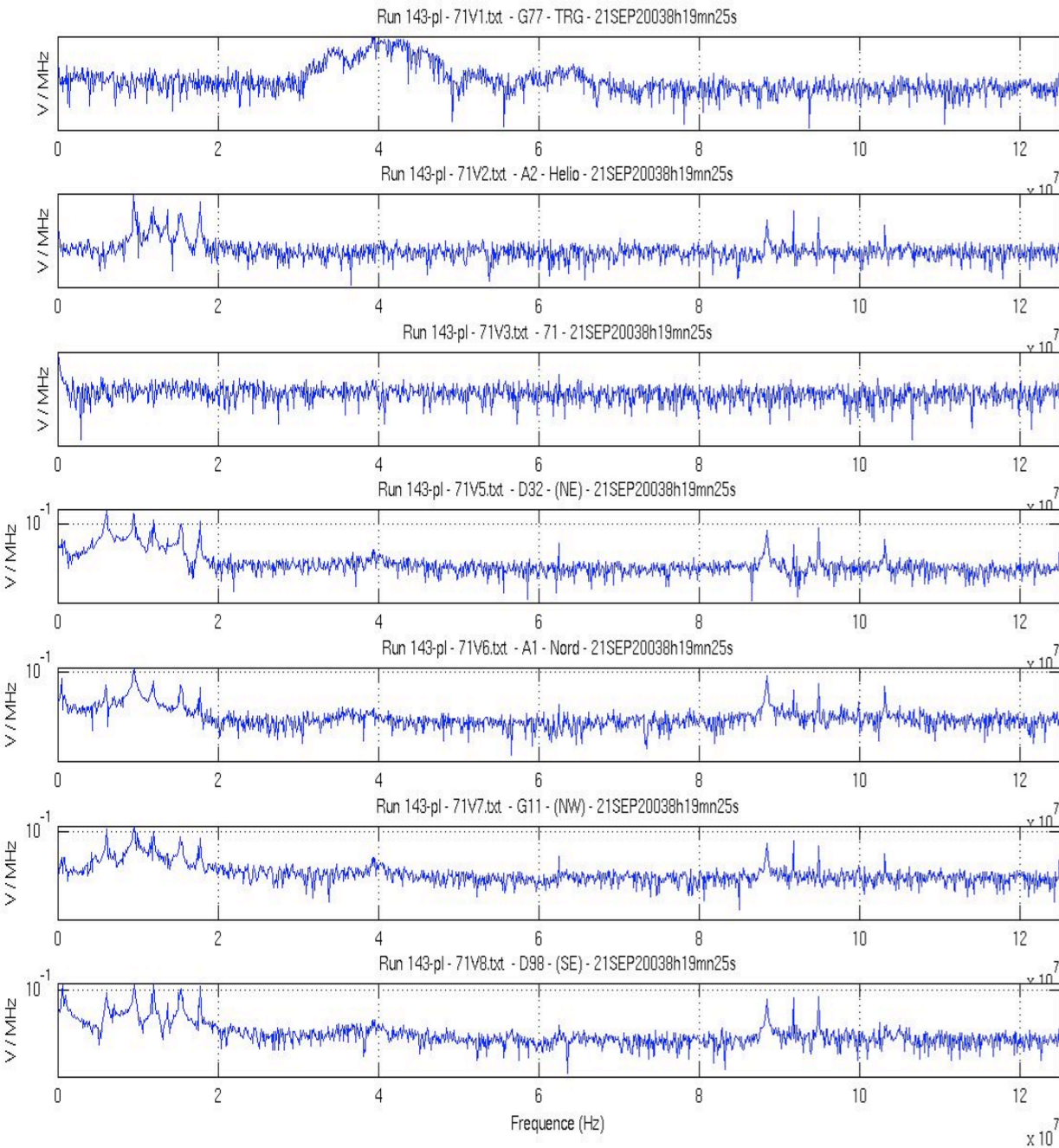
RIP ?



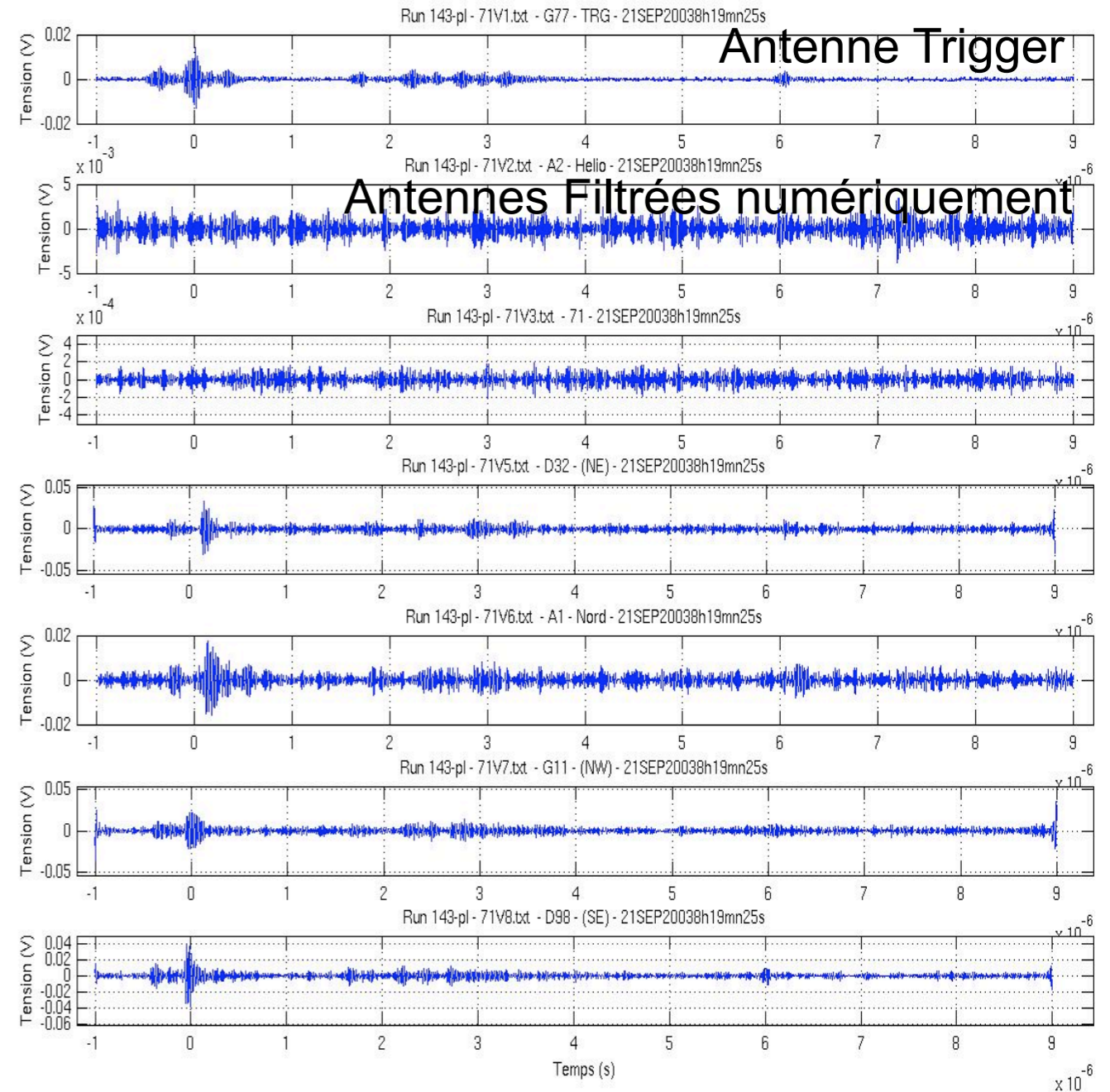
run_143-pl du 19SEP2003 - Debut a : 15h43m38s - Seuil (V) : -10E-3



Candidat d'évènement Jupiter impulsional?



Spectres de Fourier des signaux avant filtrage numérique. L'impulsion trigger se voit dans la bande 35 – 45 MHz.



Mise en évidence des transitoires en coïncidences après filtrage numérique 33-65 MHz.

Exemple d'analyses des formes d'onde sur CODALEMA

1. **Performances du tracking de l'onde**

2. **Analyse de la forme du transitoire via**
 - un filtrage FFT + une méthode On-Off
 - un filtrage FFT + un modèle de transitoire
 - un filtrage FFT + modèle + contrainte à basse fréquence
 - via un filtre LPC

Question: quelle technique d'analyse des formes d'ondes?

Étiquetage temporel

- Maximum de $V(t)$ sur chaque antenne

- Produit de corrélation entre les antennes

$$C_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_1^*(t) \cdot s_2(t + \tau) \cdot d\tau$$

Expected time resolution:

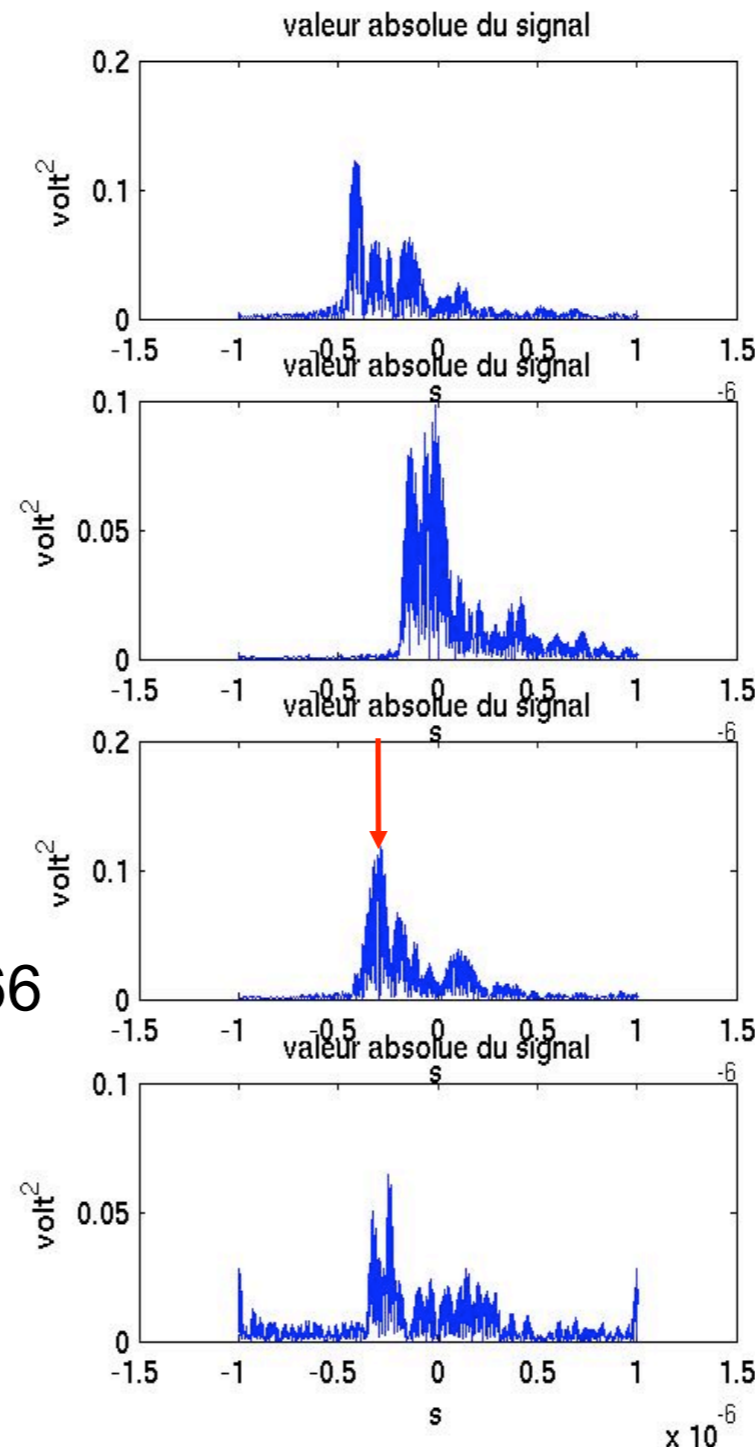
- Intrinsically: 500 Ms/s $\Rightarrow \Delta t \sim 2\text{ns}$

But

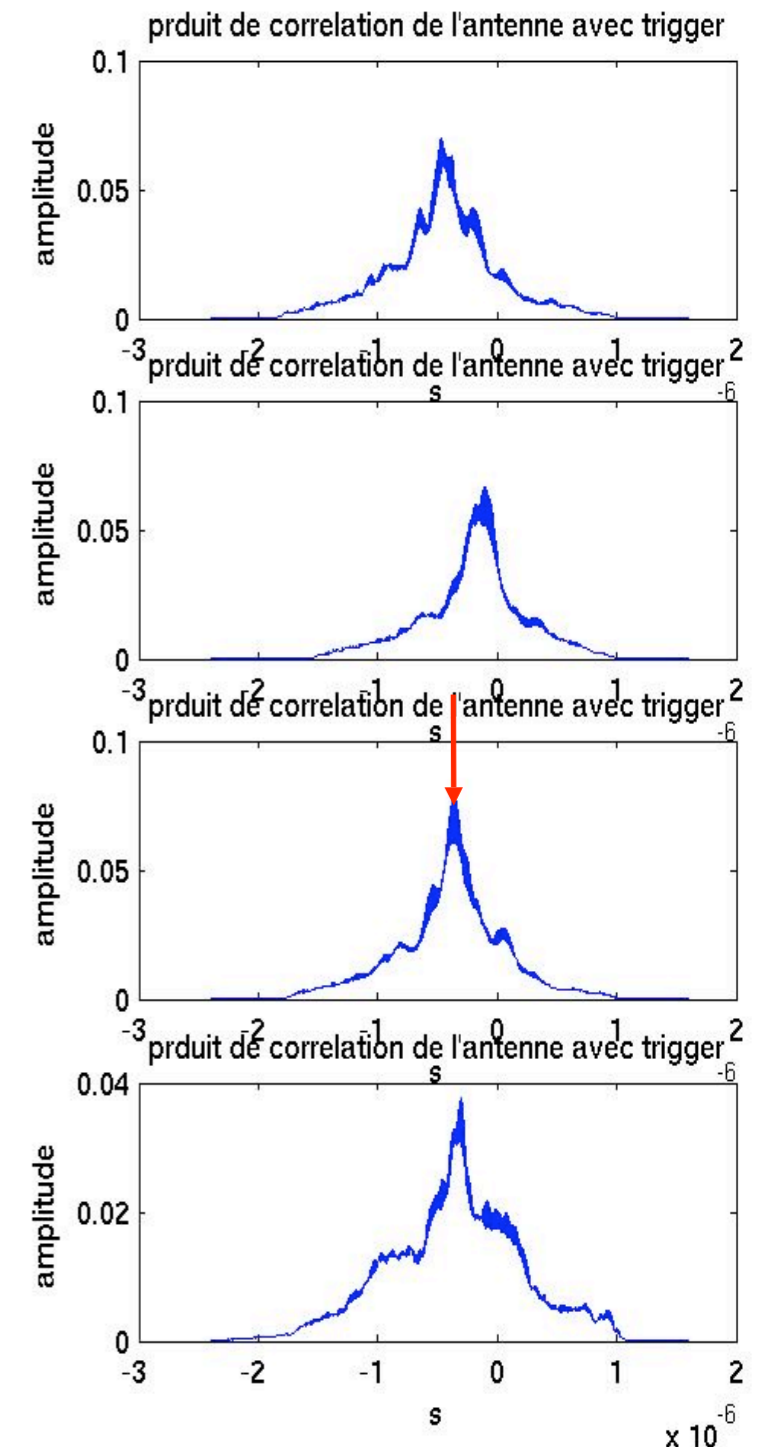
- Filter low cut-off: 33 MHz $\Rightarrow V^2(t) \sim 66$ MHz

$\Delta t \sim T/2 \sim 15 \text{ ns} \sim 4 \text{ light meters}$

Maximum of $V^2(t)$
(35-65 MHz)



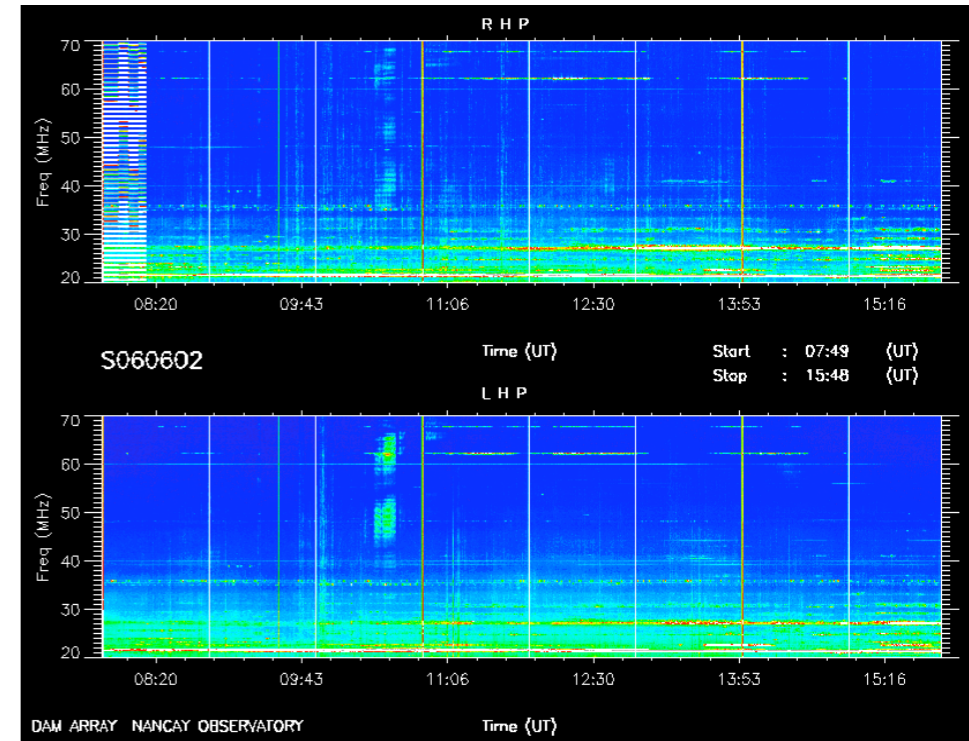
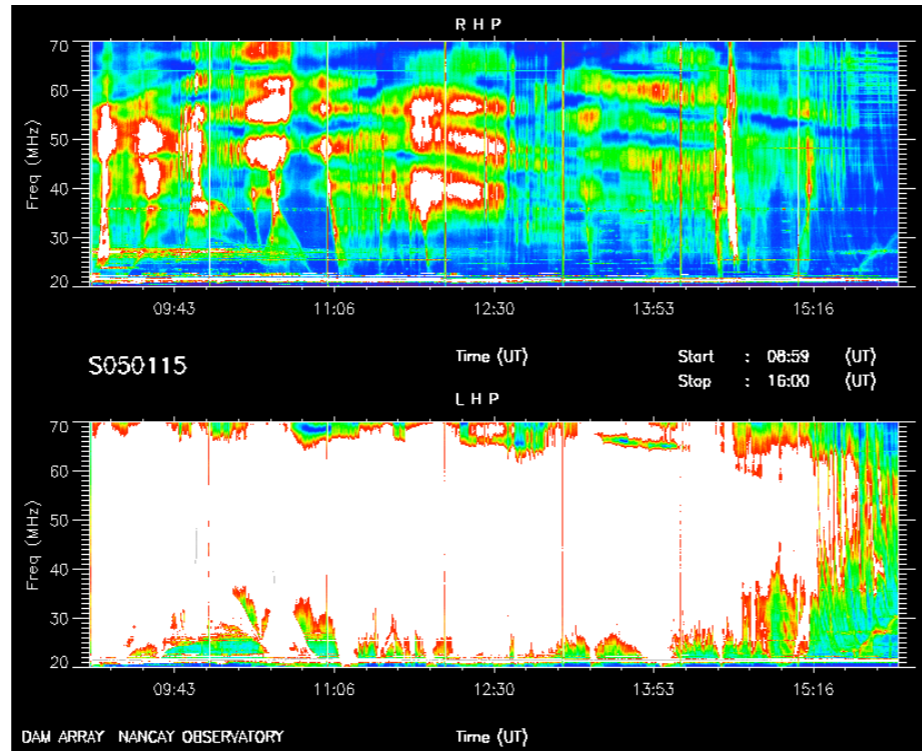
Antenna-Antenna
correlation function



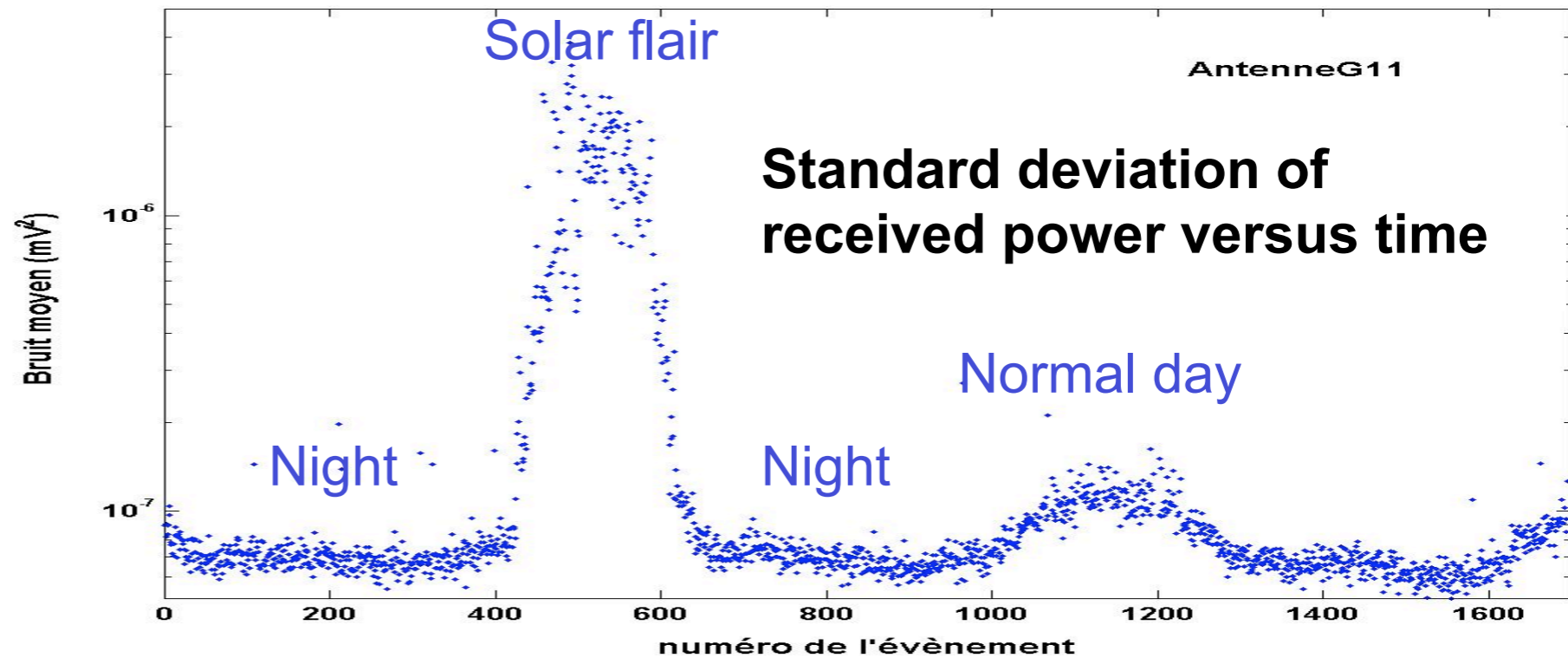
Triangulation performances (1)

(using Solar bursts)

DAM sun survey
15/01/05
&
02/06/06

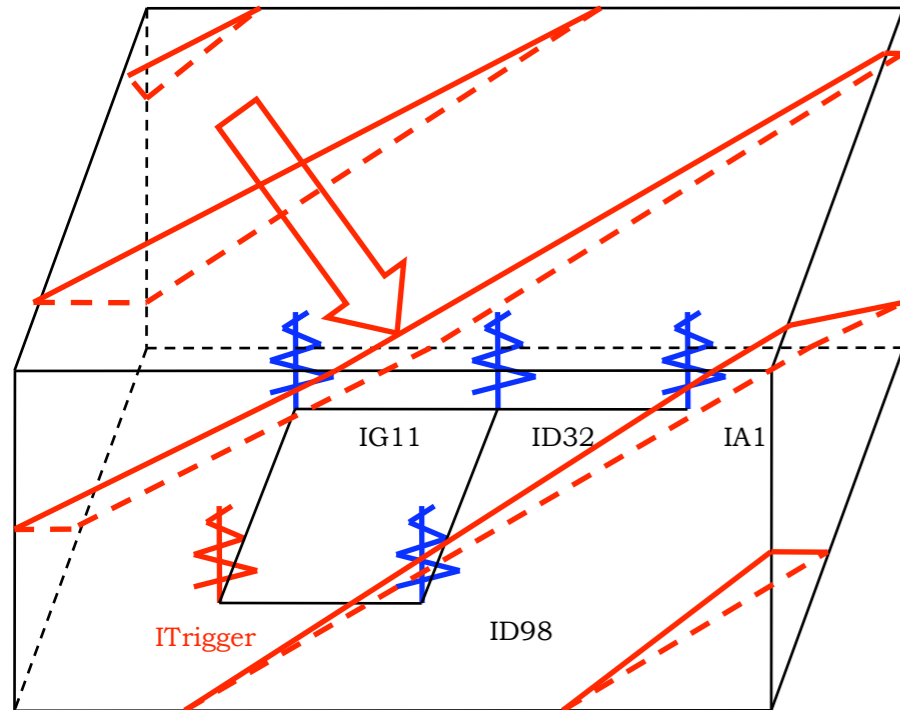


solar flare in active region
AR10720 on 2005 Jan. 15



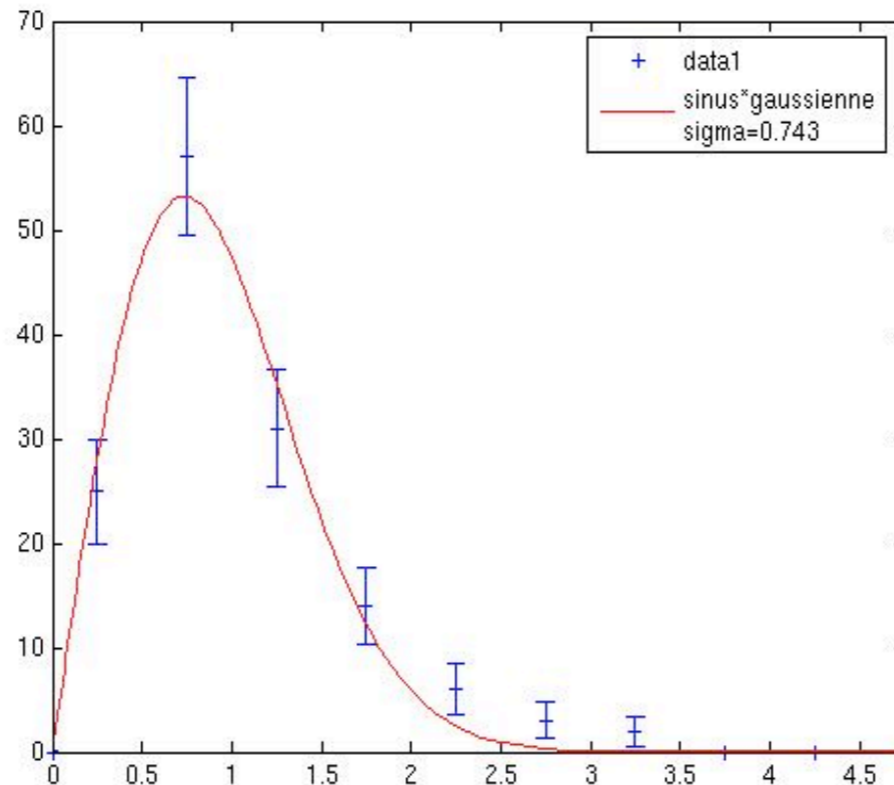
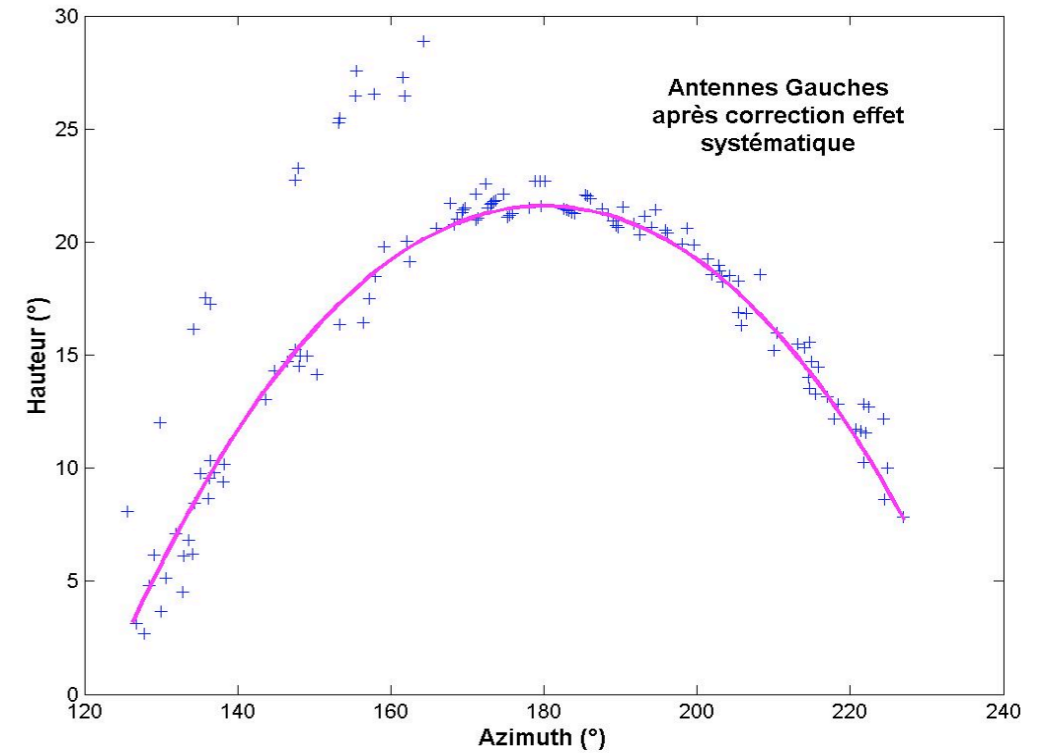
Triangulation performances (2)

(using Solar bursts)



Principle of the triangulation

Reconstructed directions versus sun ephemerids

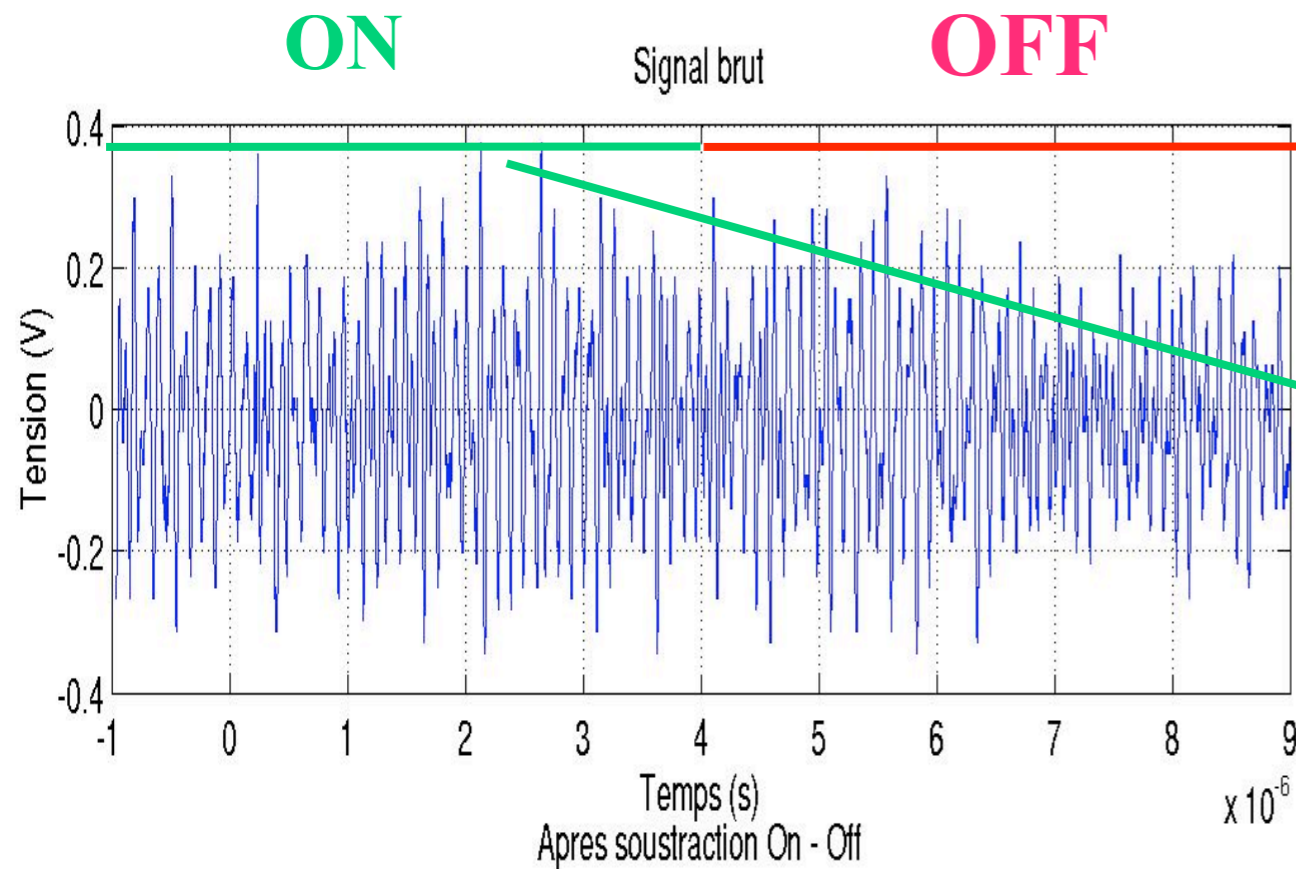


Distribution of the Residues

Direction accuracy

$$\sigma = 0.74^\circ$$

Principe d'extraction de la forme d'onde large bande via un filtrage FFT + une methode On-Off



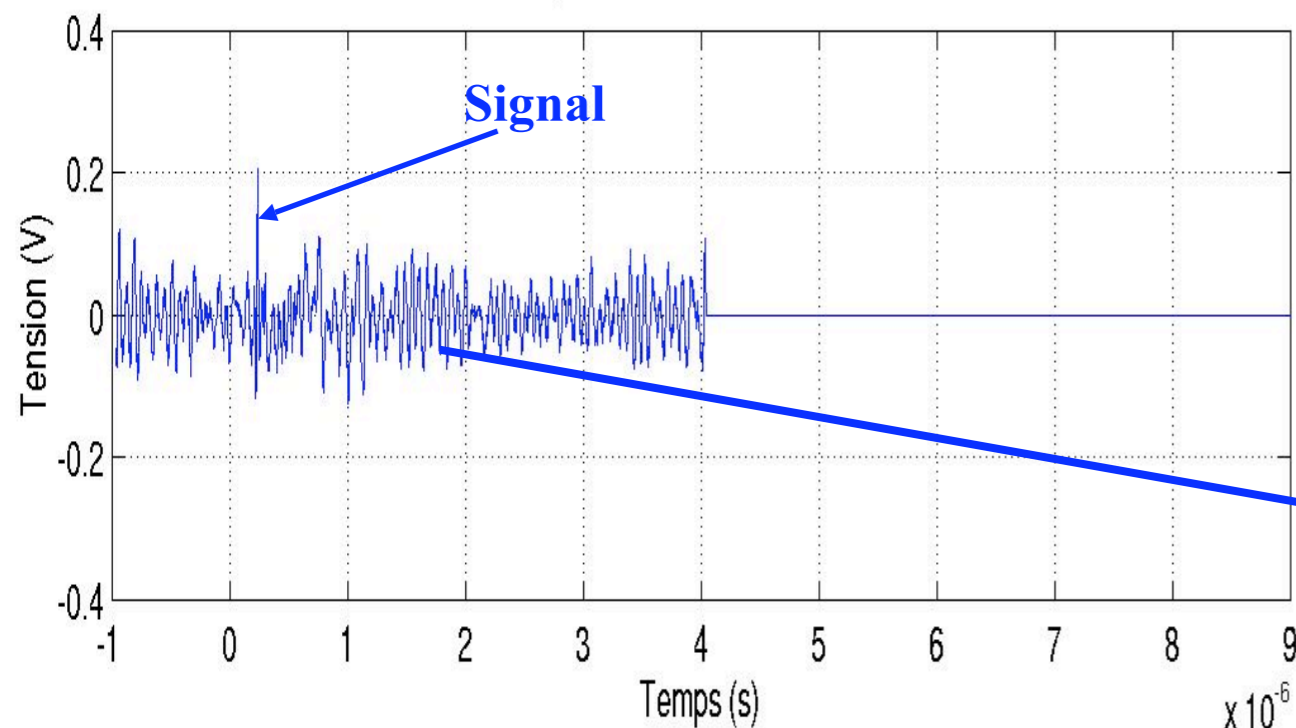
• Par fft sur la partie OFF :
 $R_{off}(f)$ e $j\Phi_{off}(f)$

• Par fft sur la partie ON :
 $R_{on}(f)$ e $j\Phi_{on}(f)$

Hypothèse:

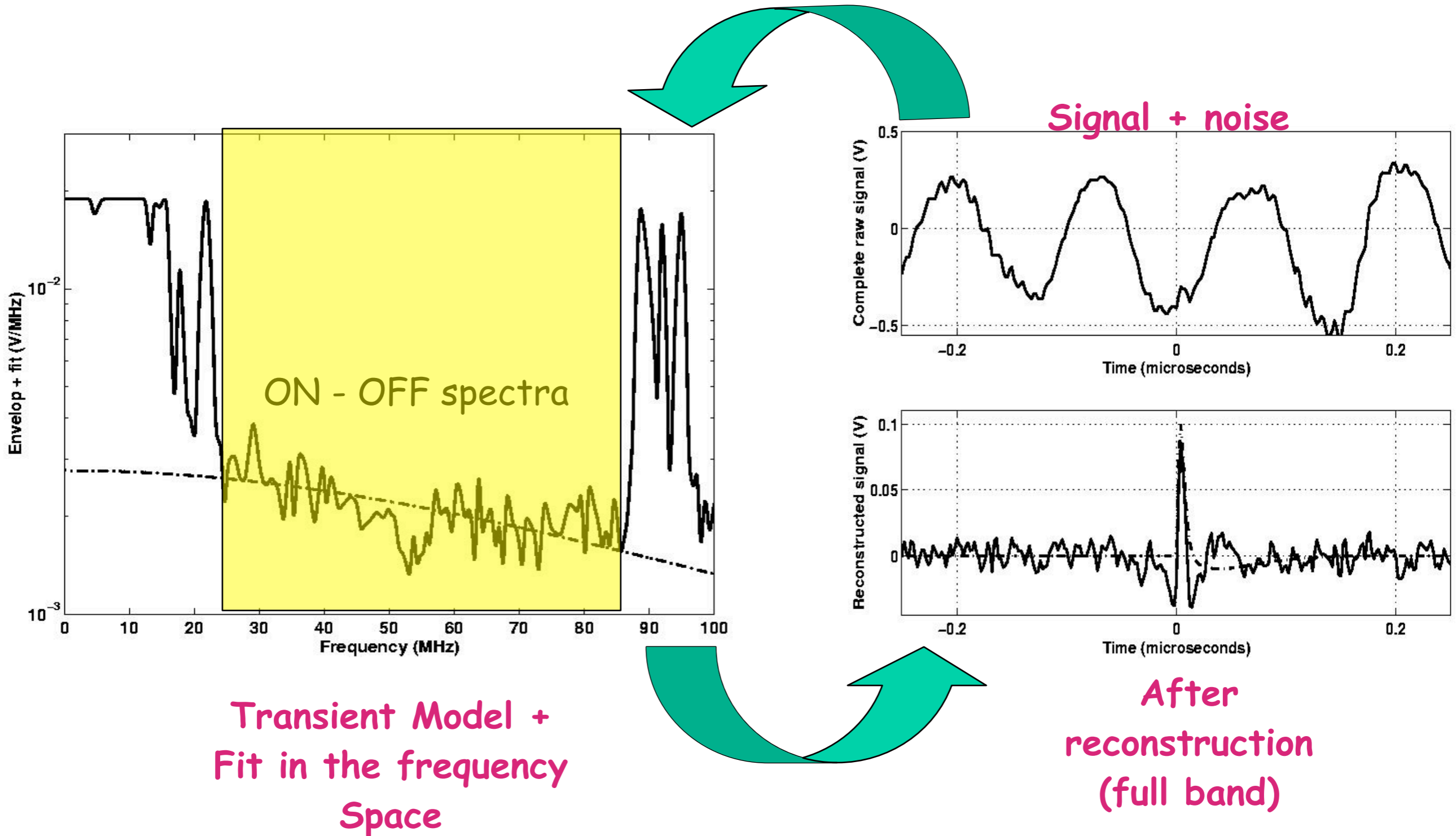
- Émetteurs RF stationnaire
- Signal recherché faible

$$\Rightarrow R_{on/off}(f) = R_{on}(f) - R_{off}(f)$$



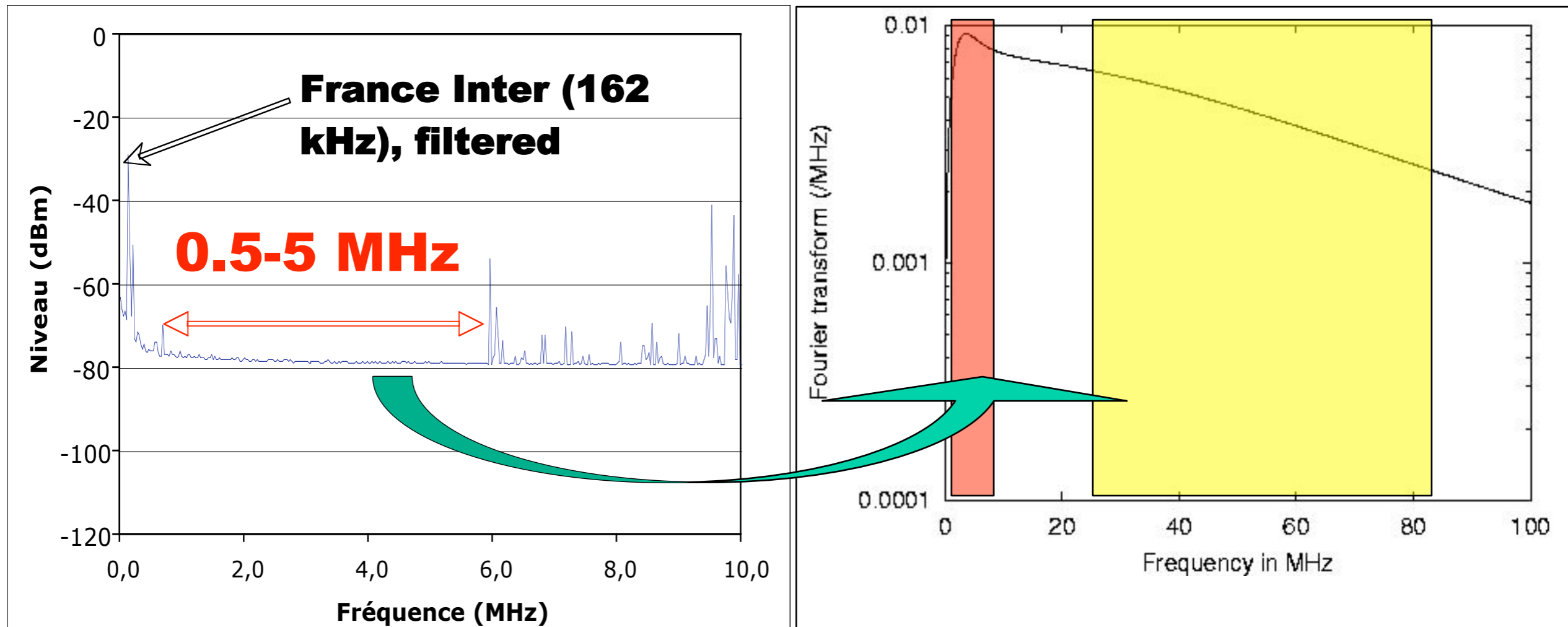
Principe d'extraction de la forme d'onde large bande

via un filtrage FFT + un modèle de transitoire



Principe d'extraction de la forme d'onde large bande via un filtrage FFT + modèle + contrainte à basse fréquence

Nécessite une antenne très large bande (0.2-100 MHz)



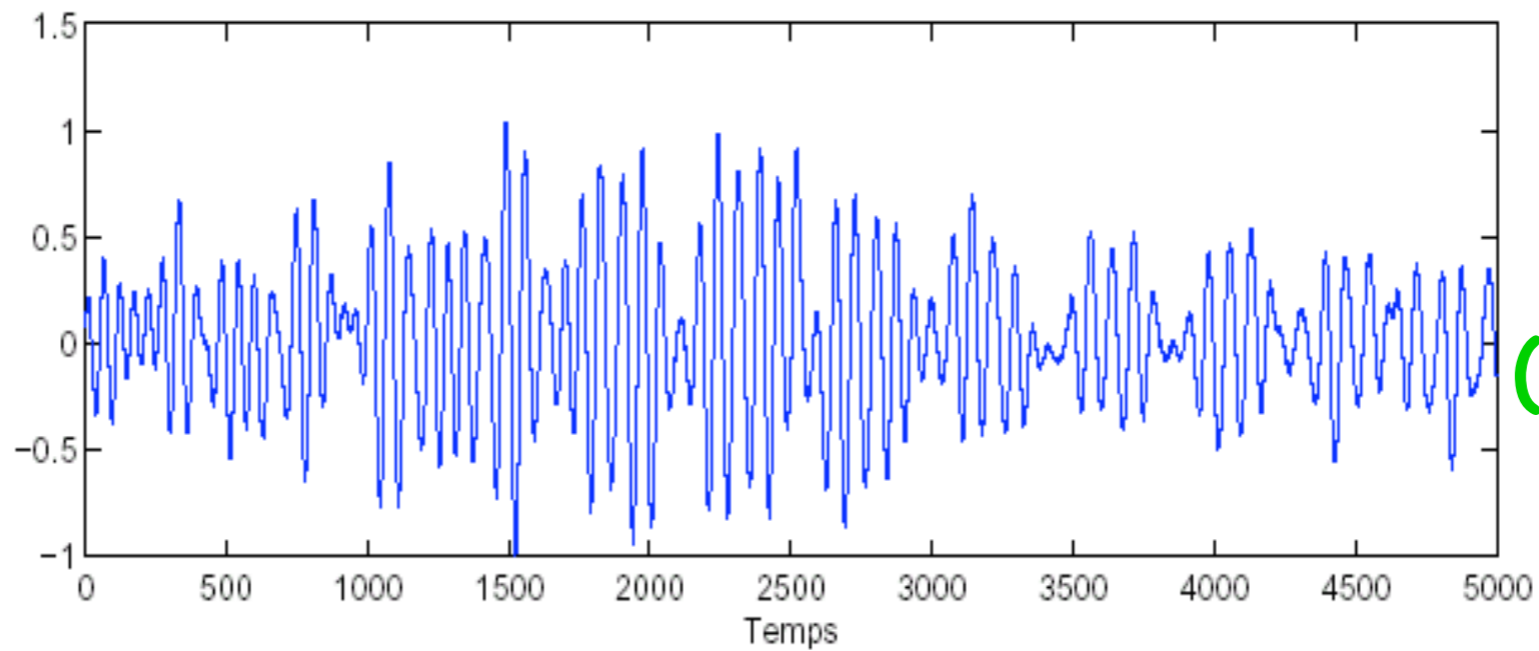
Mais la contribution basse fréquence n'est pas systématiquement accessible (alternance jour/nuit)

Principe d'extraction de la forme d'onde large bande

via un filtre LPC

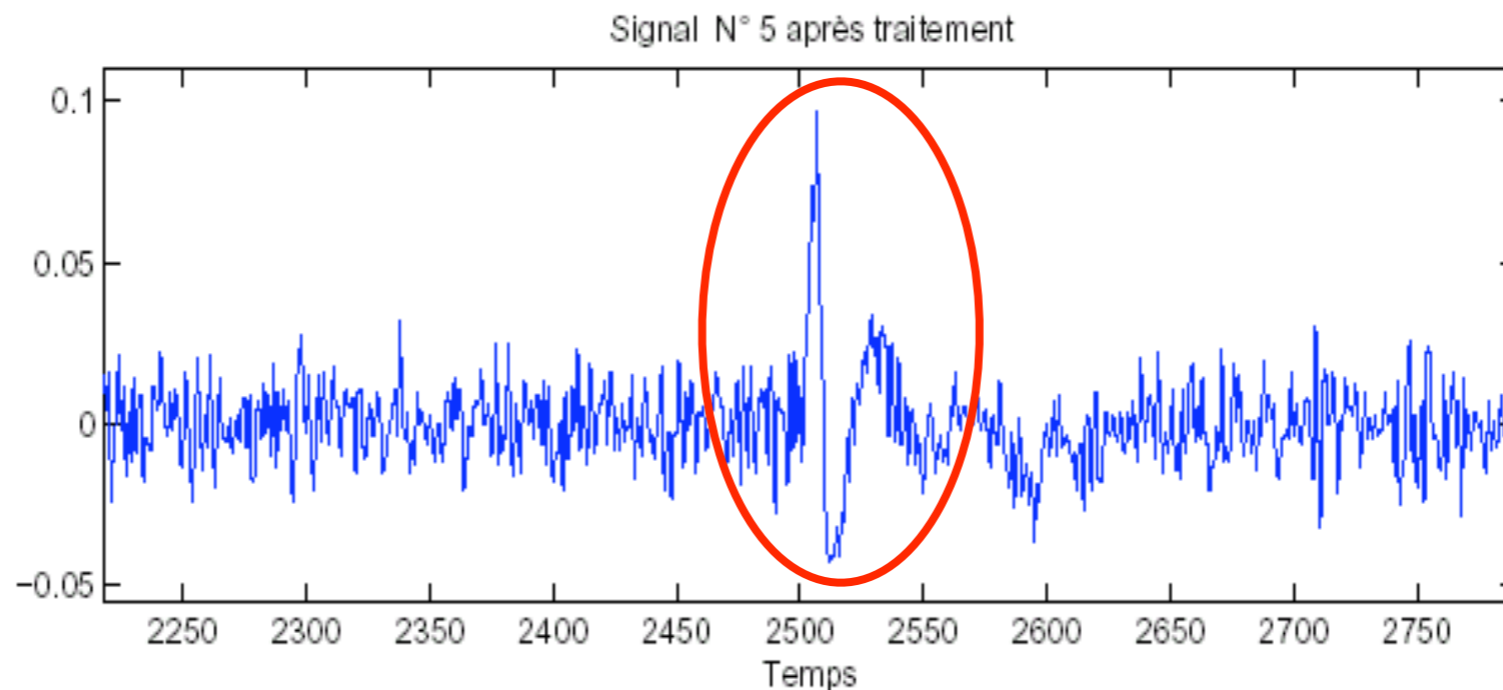
Adaptative optimal filtering + wavelet analysis

=>Partial shape:
full band
recovery need
complet filter ...



Signal
(noise+ pulse)

=>Time
resolution: ~ns
adding Wavelet
Analysis



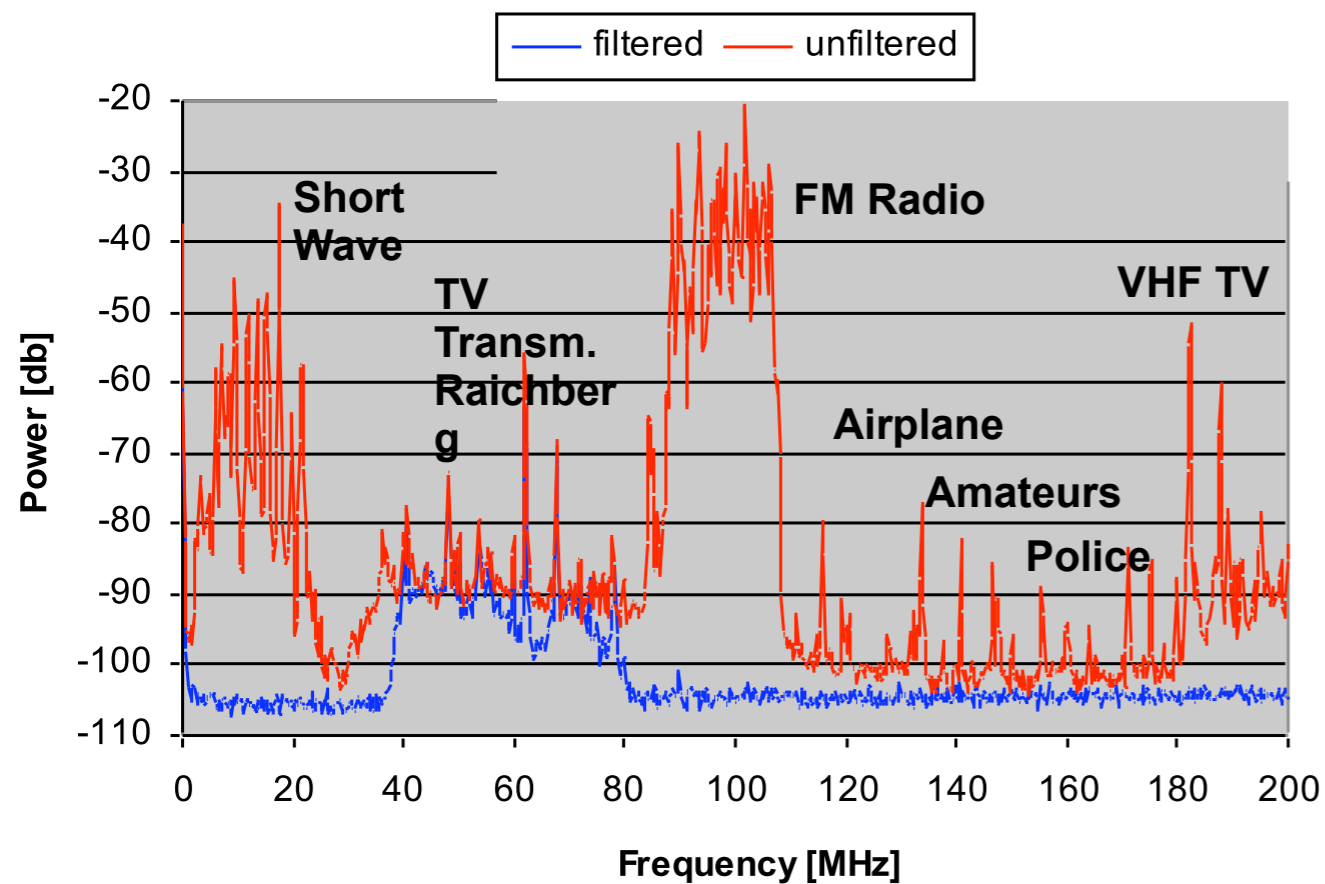
Remaining
signal

Self-Triggered Receiver Concept of LOPES^{STAR}

H. Gemmeke & O. Kroemer

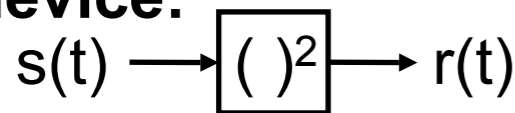
GOAL: Tagging transients inside RFI
=> Removing RFI in the band
of interest of the shower signal

Interference rejection by filtering



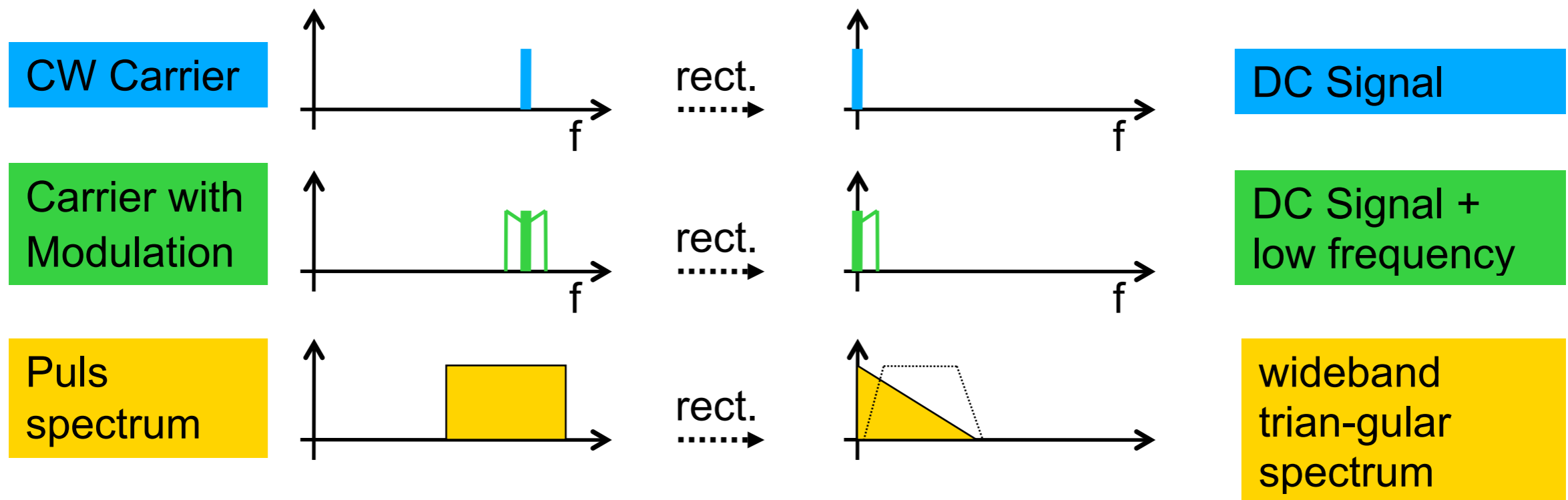
Why driving the trigger with rectified RF ?

The rectifier is a squaring device:



Multiplikation (time domain) → Convolution (frequency domain)

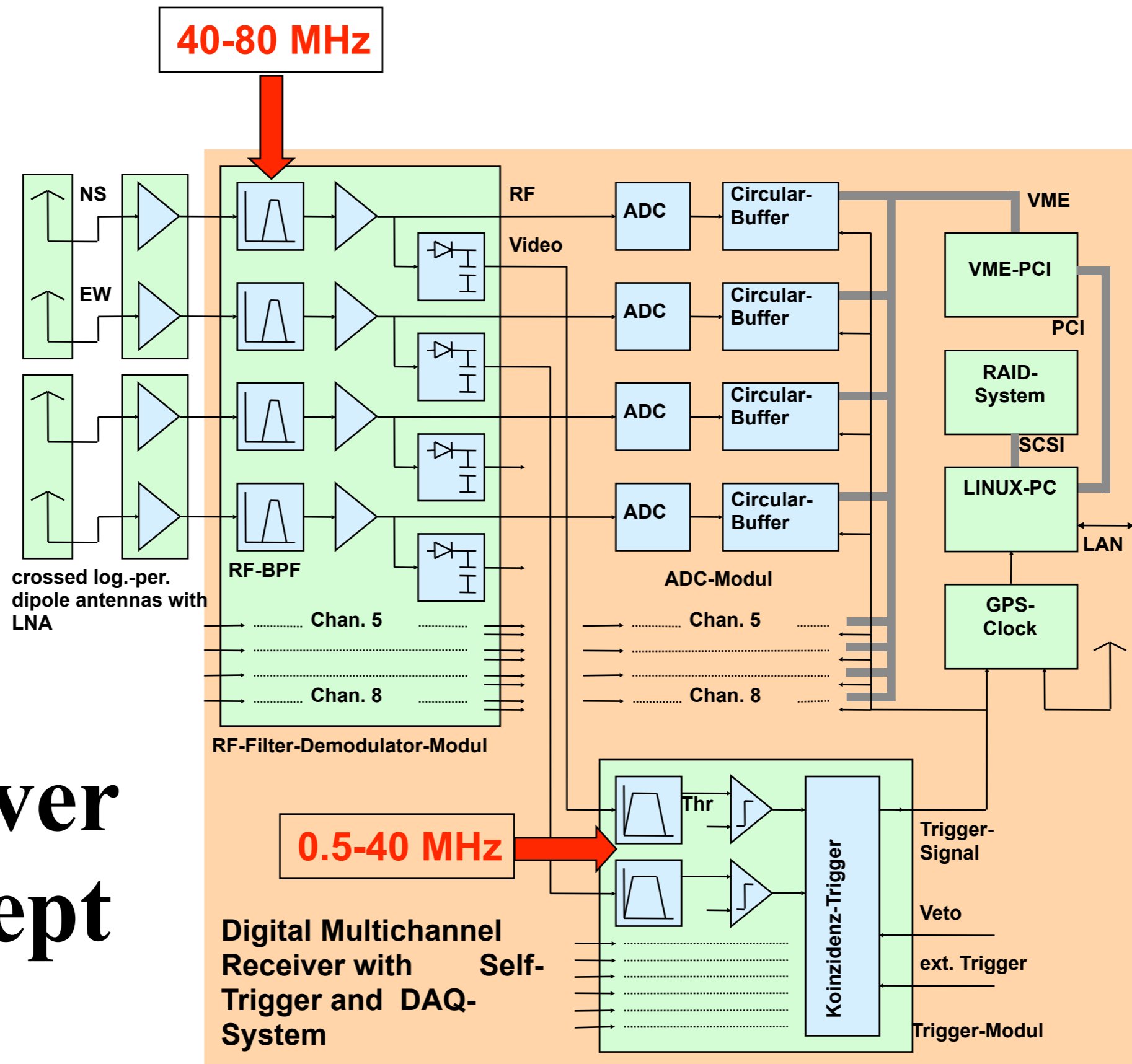
$$r(t) = s(t) \times s(t) \text{ ® } R(j\omega) = S(j\omega) * S(j\omega)$$



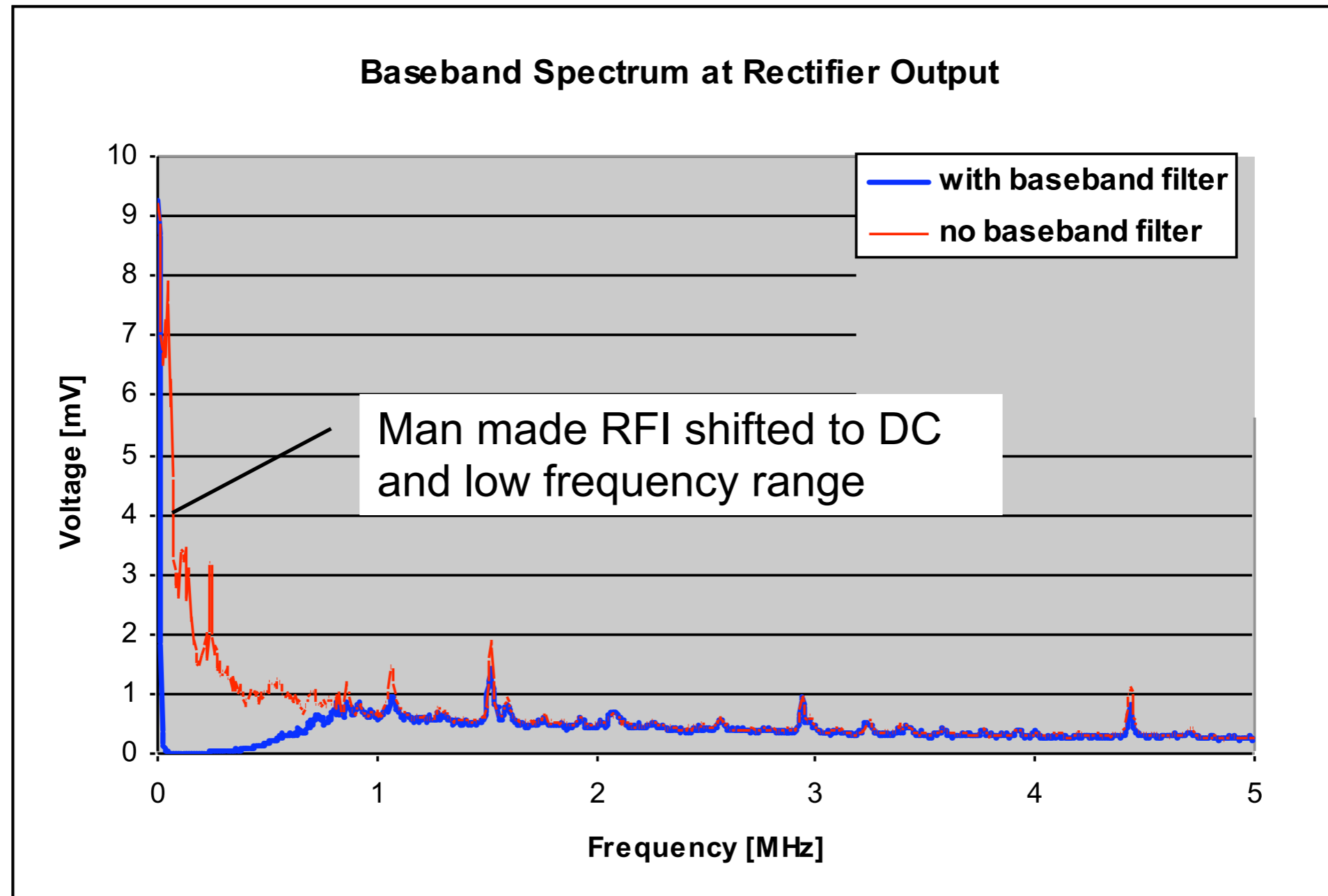
At Rectifier output:
filtering

Man made RFI are DC or low frequency and may be seperated from puls spectrum by baseband

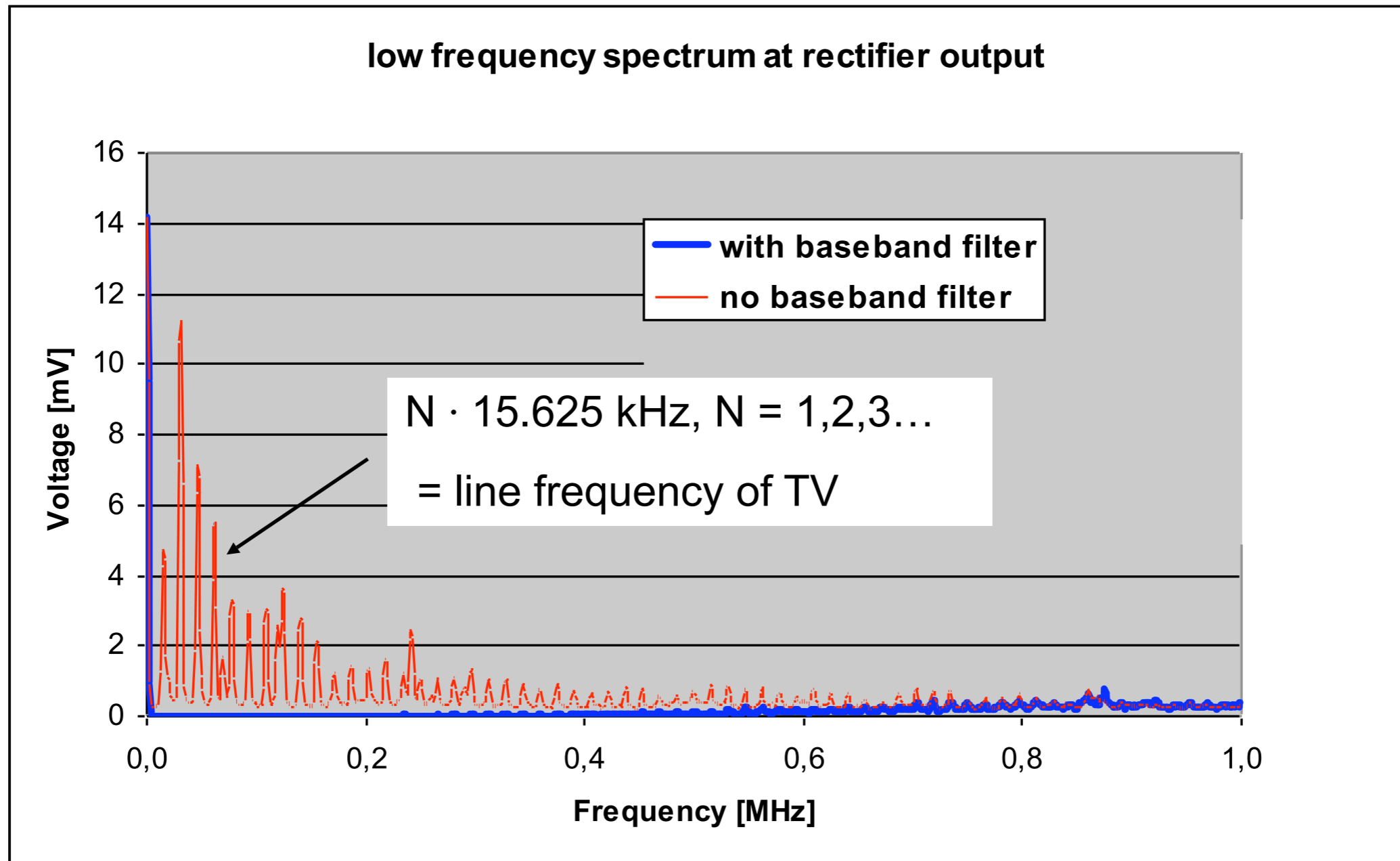
Receiver Concept



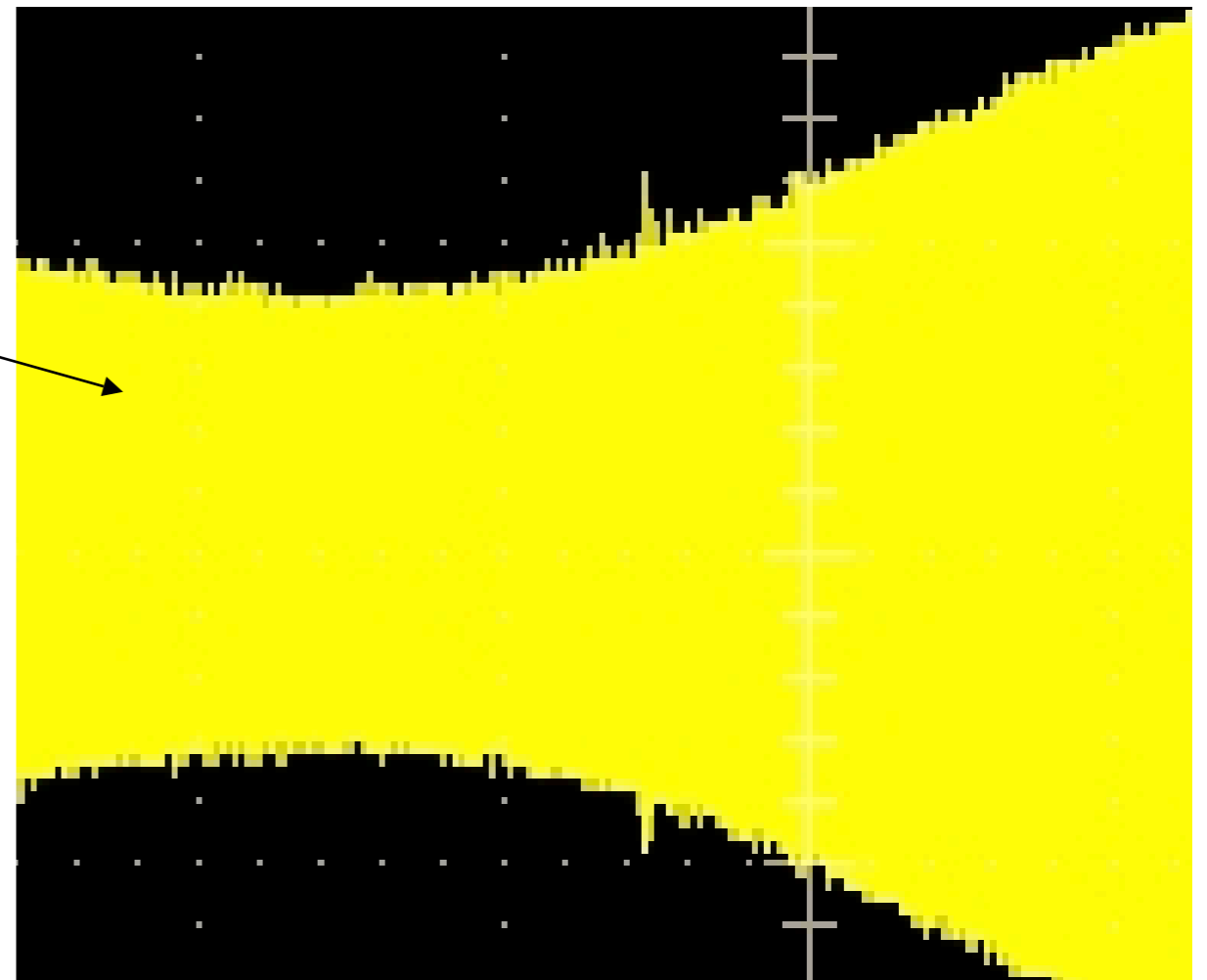
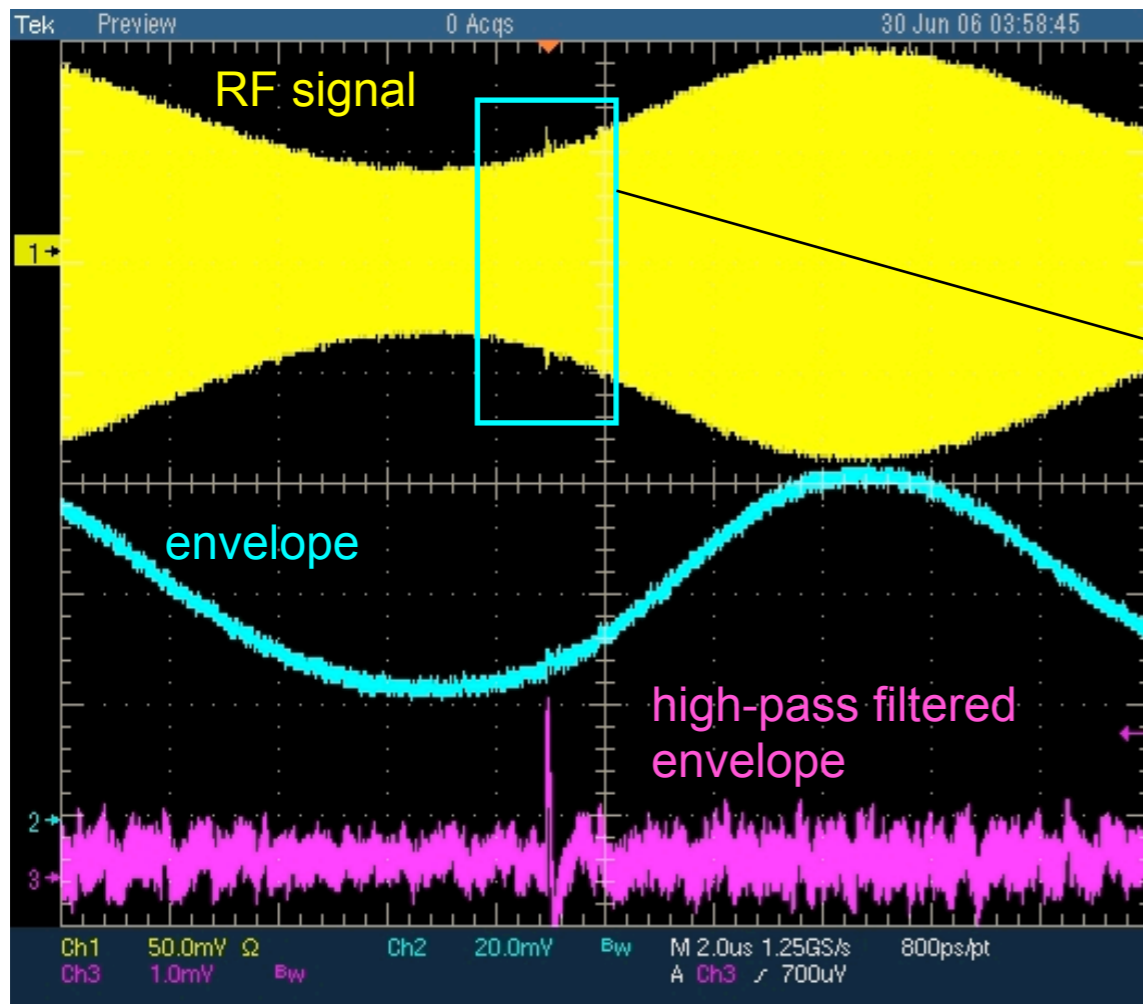
Baseband spectrum at rectifier output



Baseband spectrum at rectifier output

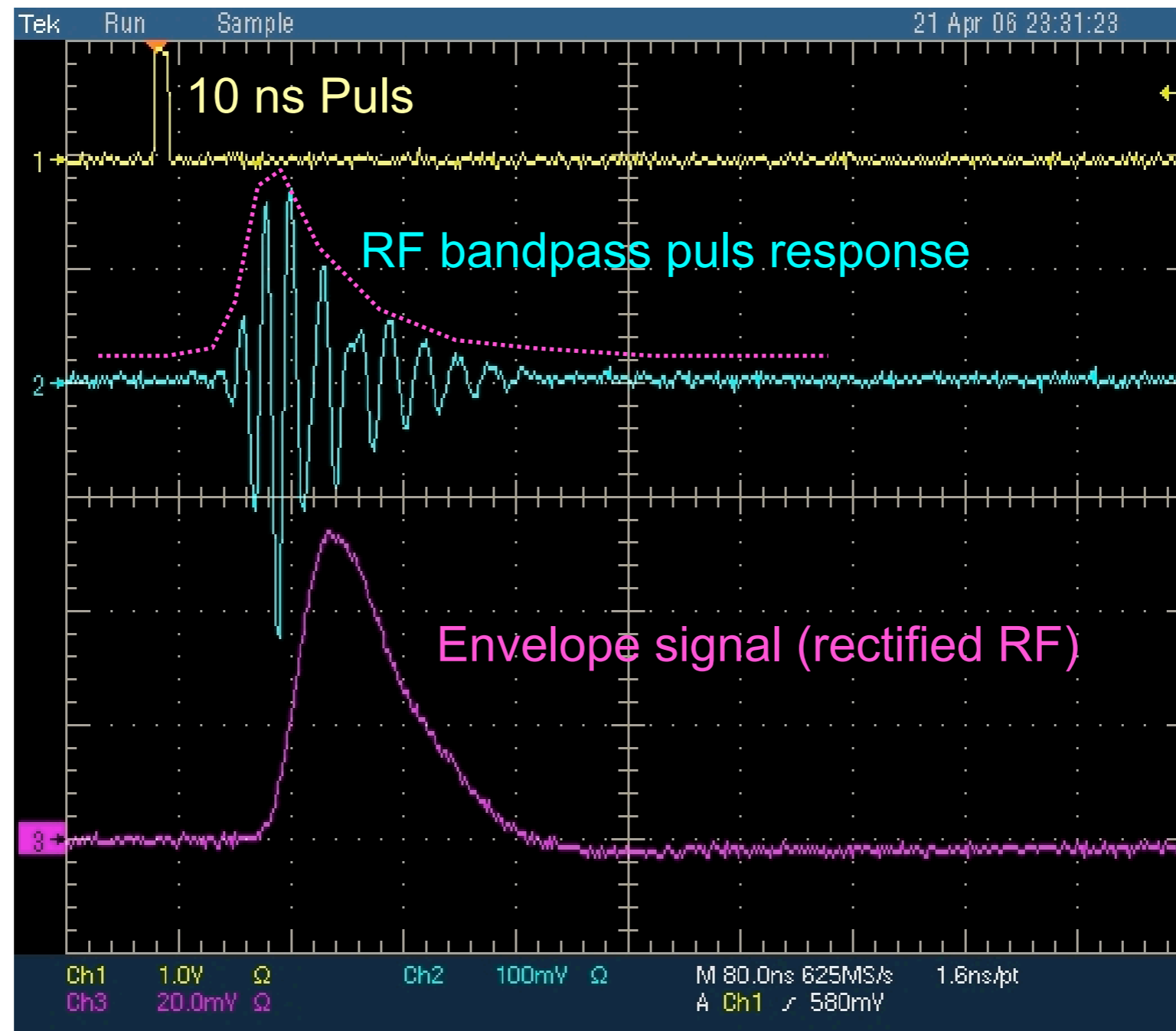


Example of narrow band RFI rejection

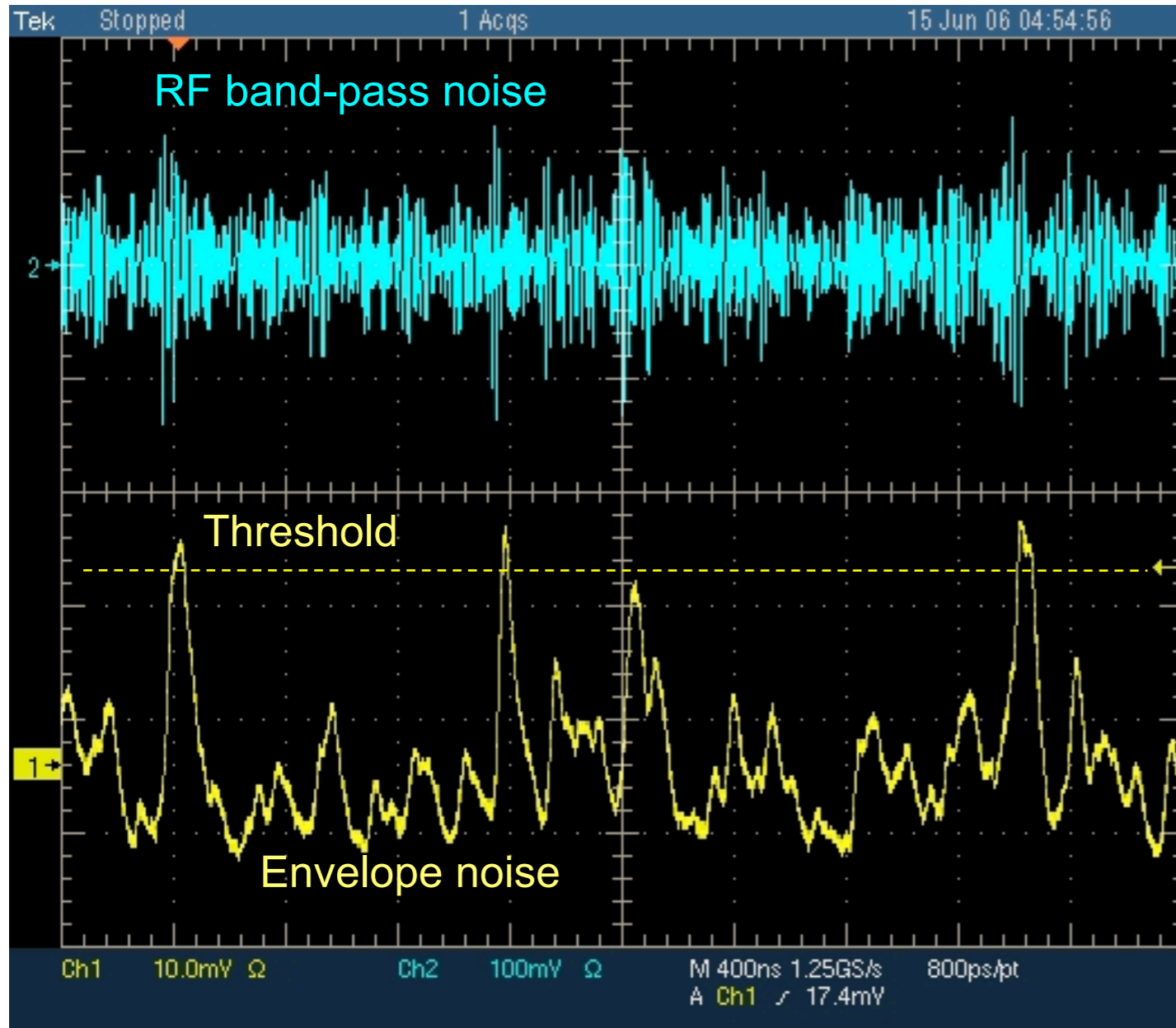


50%-AM-modulated carrier with pulse

Driving the trigger with envelope signals (rectified RF)



Limits of self trigger



Noise distributions ?

Probability that the envelope noise overtops the threshold ?

False trigger rate ?

Signal / Noise ?

Detection probability ?

Detectable energies ?

Noise distributions

If RFIs are rejected as shown or in radio quiet environment the receiver noise is dominated by external natural noise sources (< 30 MHz atmosphere, > 30 MHz galactic)

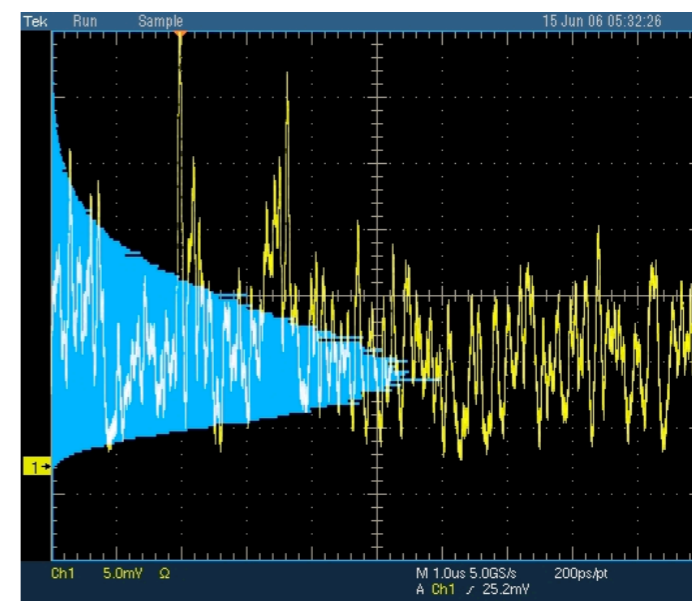
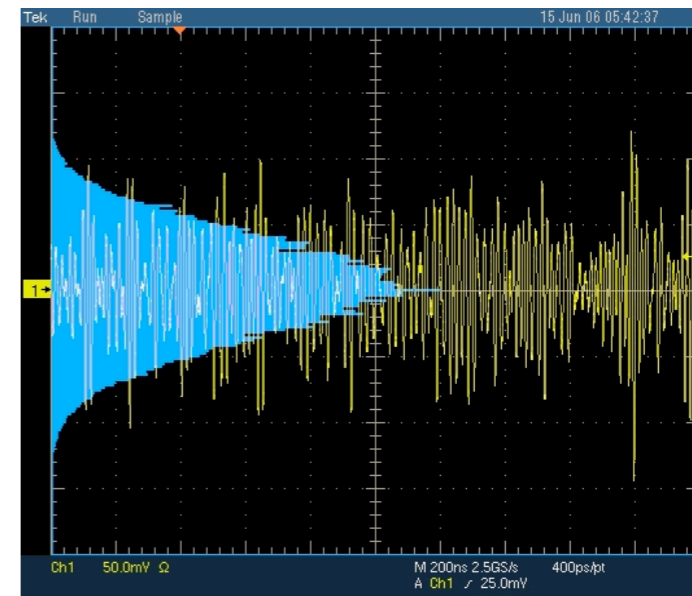
Gaussian distribution $p(n)$ of RF signal $n(t)$,
variance = noise power ($\sigma^2=N$)

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \exp\left(-\frac{n^2}{2N}\right)$$

Envelope demodulation →

Rayleigh distribution $p(r)$ of envelope signal $r(t) = |n(t)|$

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{N} \exp\left(-\frac{r^2}{2N}\right) & r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases}$$



La détection des transitoires EM dans le domaine GHz

- **Astronomie γ TeV...=>... Pulsars ?**

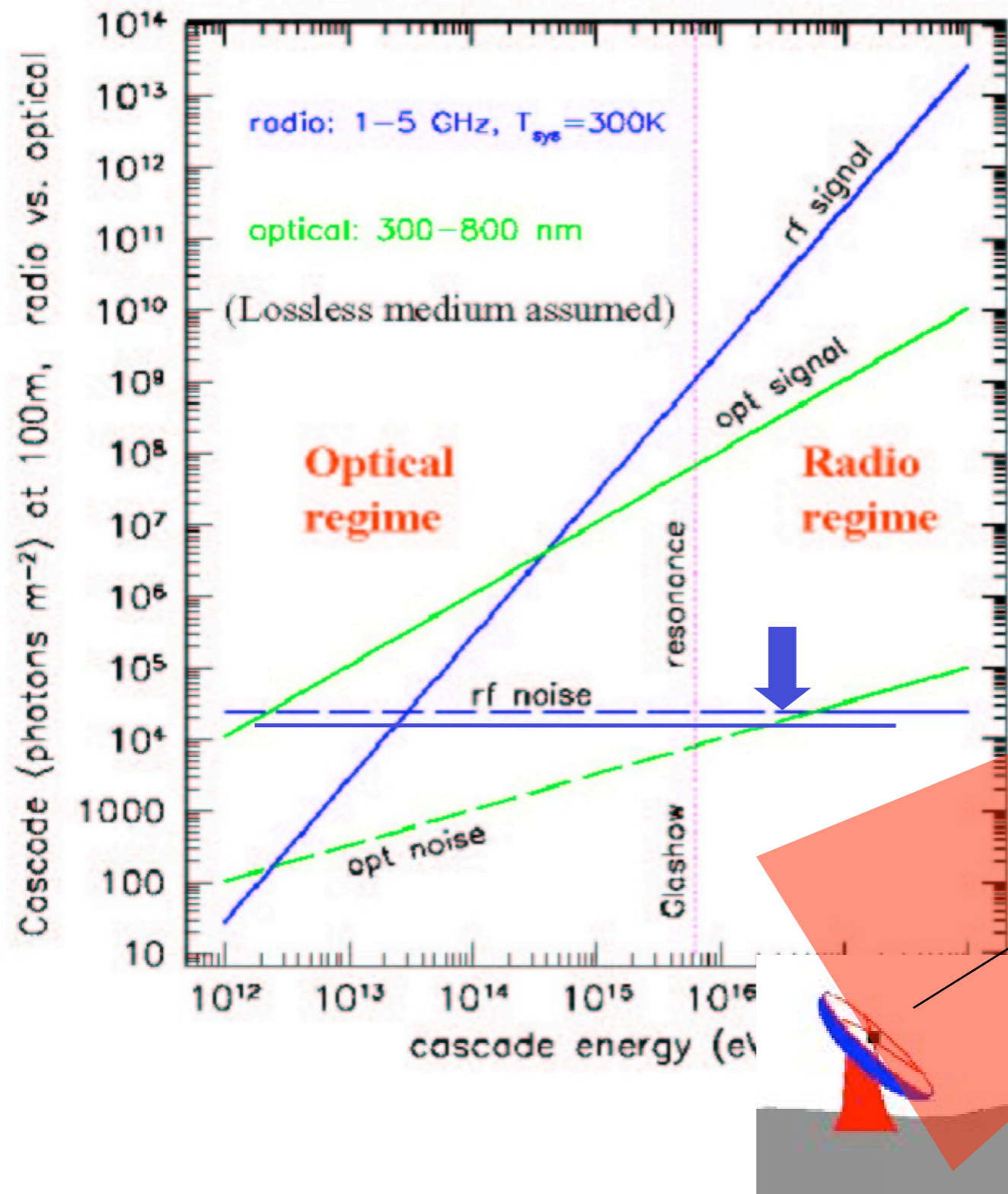


**ILLUSTRATION avec la détection des pulsars
@ RT de Nancy**

- **Détection d'une onde EM (plane)**
- **Signal faible: $\ll \mu\text{V/m}$**
- **Durée grande: ms. (+ dispersion temps-fréquence mais structures ns aussi!)**
- **Récurrence temporelle**
- **Pointage vers une source**



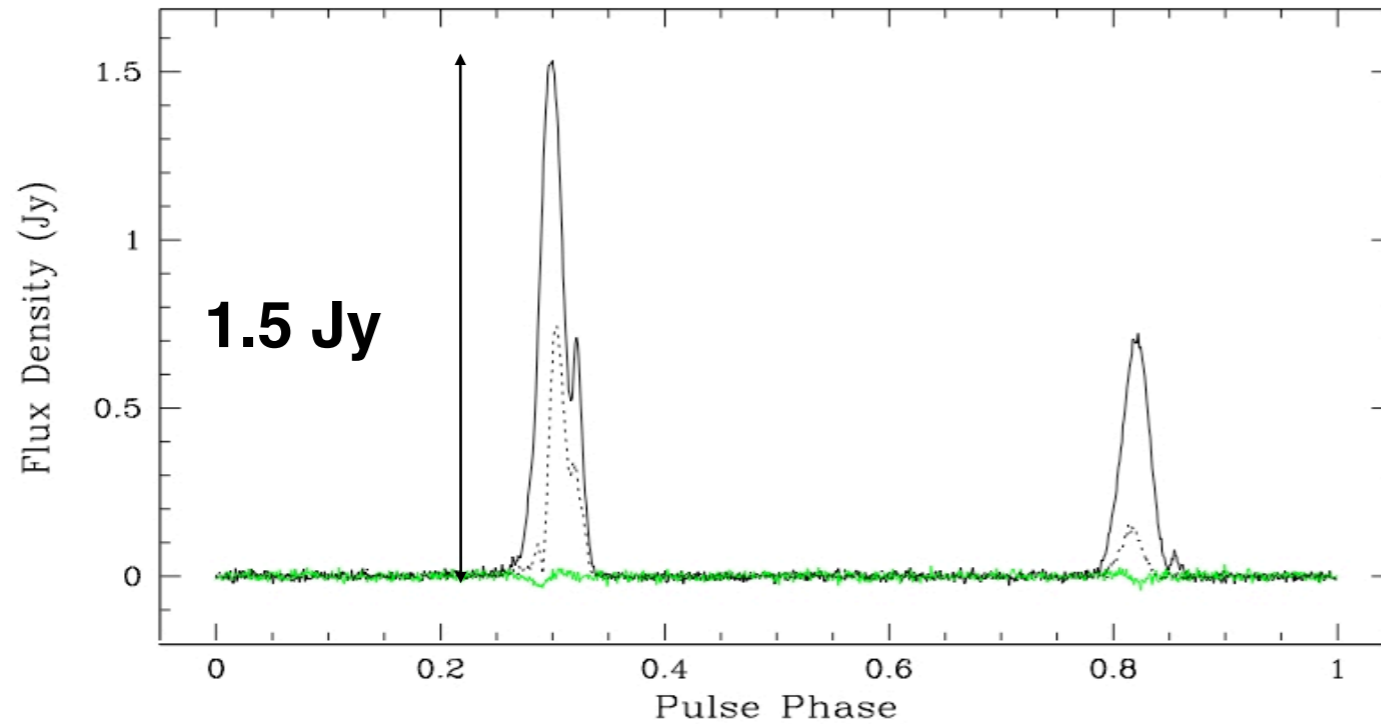
Radio-astronomie de haute énergie: Radio-Détection à la HESS vers 10^{12} eV ?



Télescope pointé (\sim mn d'arc @ RT de Nançay)
 Détection du transitoire \rightarrow radio
 Trigger et Analyse en forme d'onde \sim méthode CODALEMA

Fréquence \sim 1 GHz
 Fond = 3 K°
 $\Rightarrow T_{sys} \sim 20$ K°

Détection de structures nanoseconde dans les impulsions géantes des pulsars (Crabe, PSR1937...)



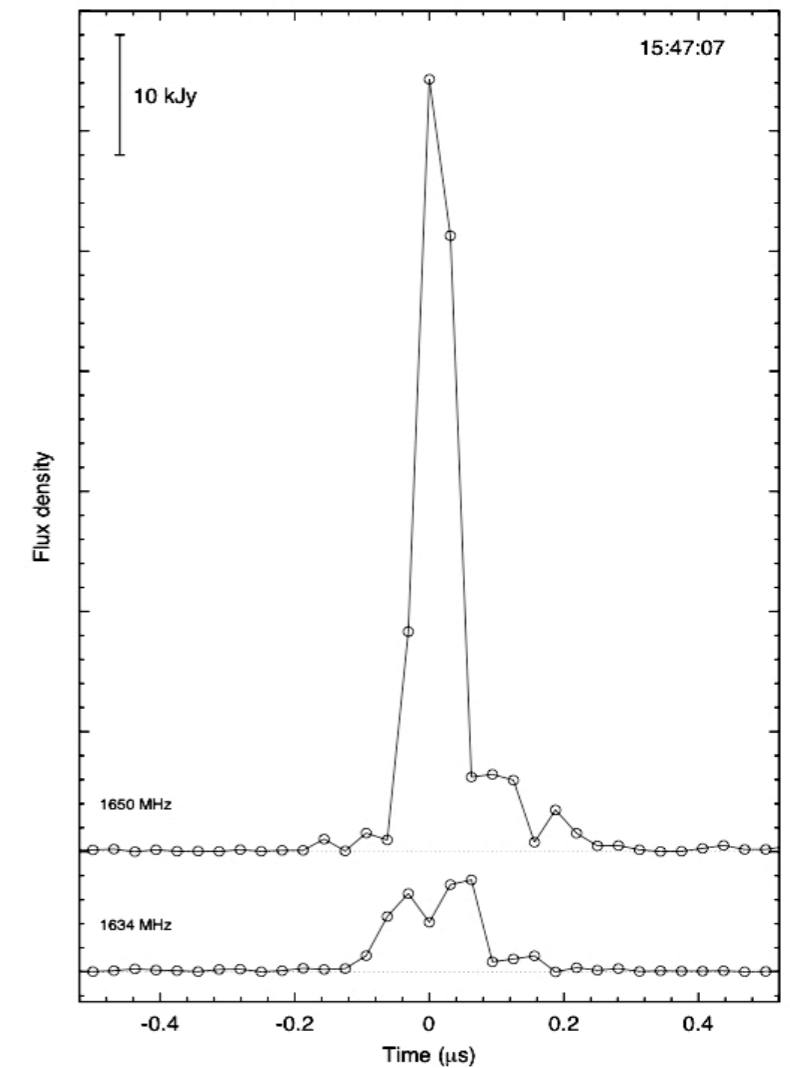
PSR 1937 - Pulse normal...

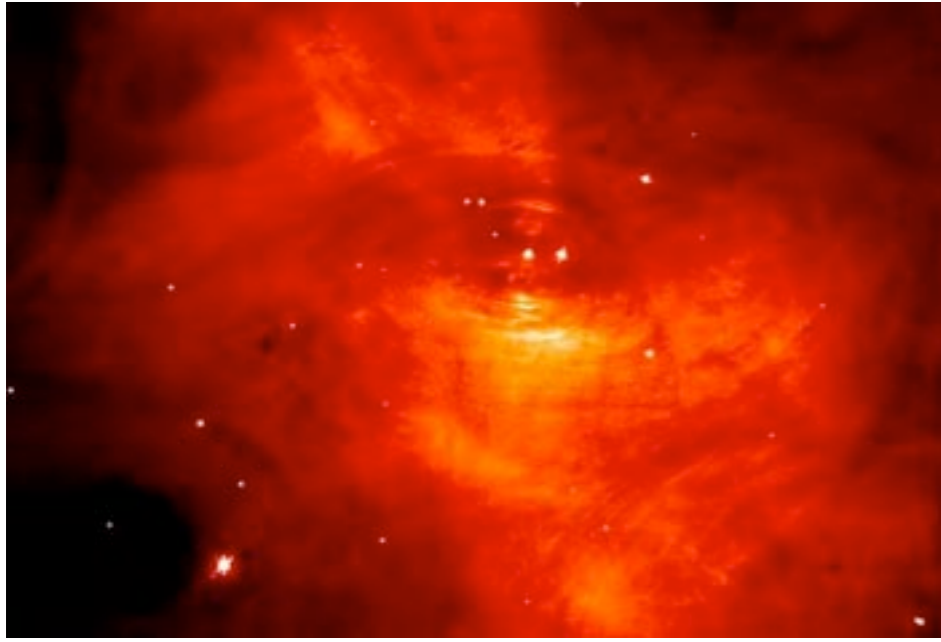
(Soglasnov et al., ApJ 2005)

75 kJy !

... Giant pulse

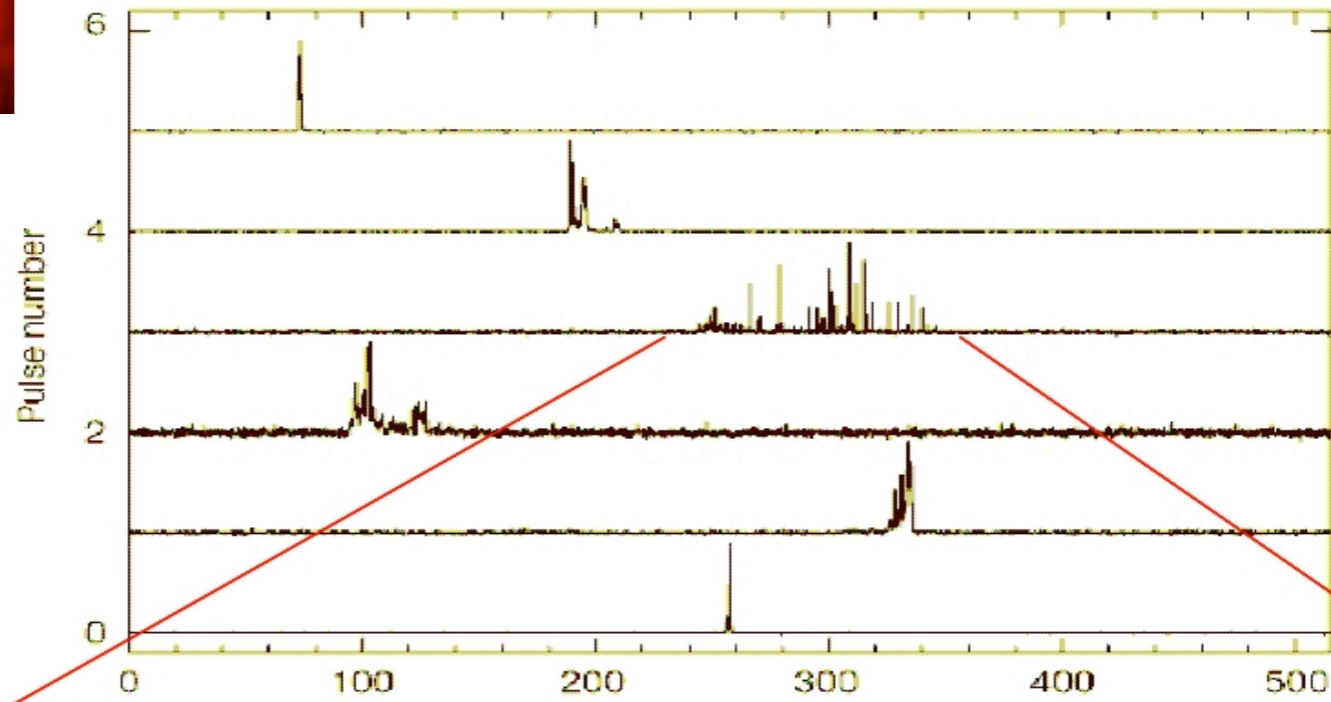
Résolution 31.25 ns



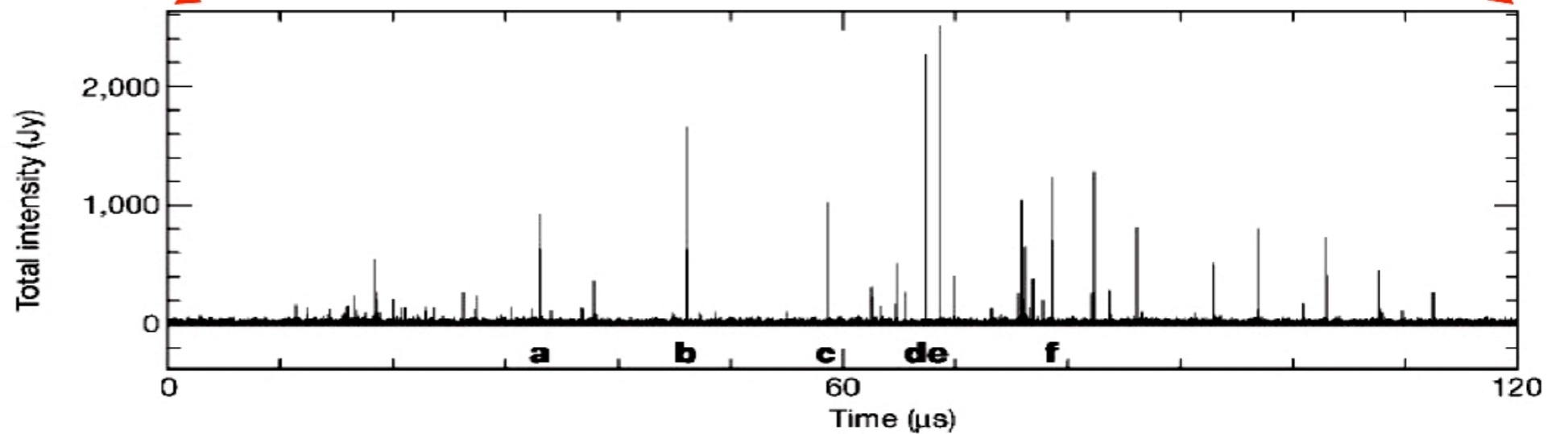


**La nébuleuse et le pulsar
du Crabe**

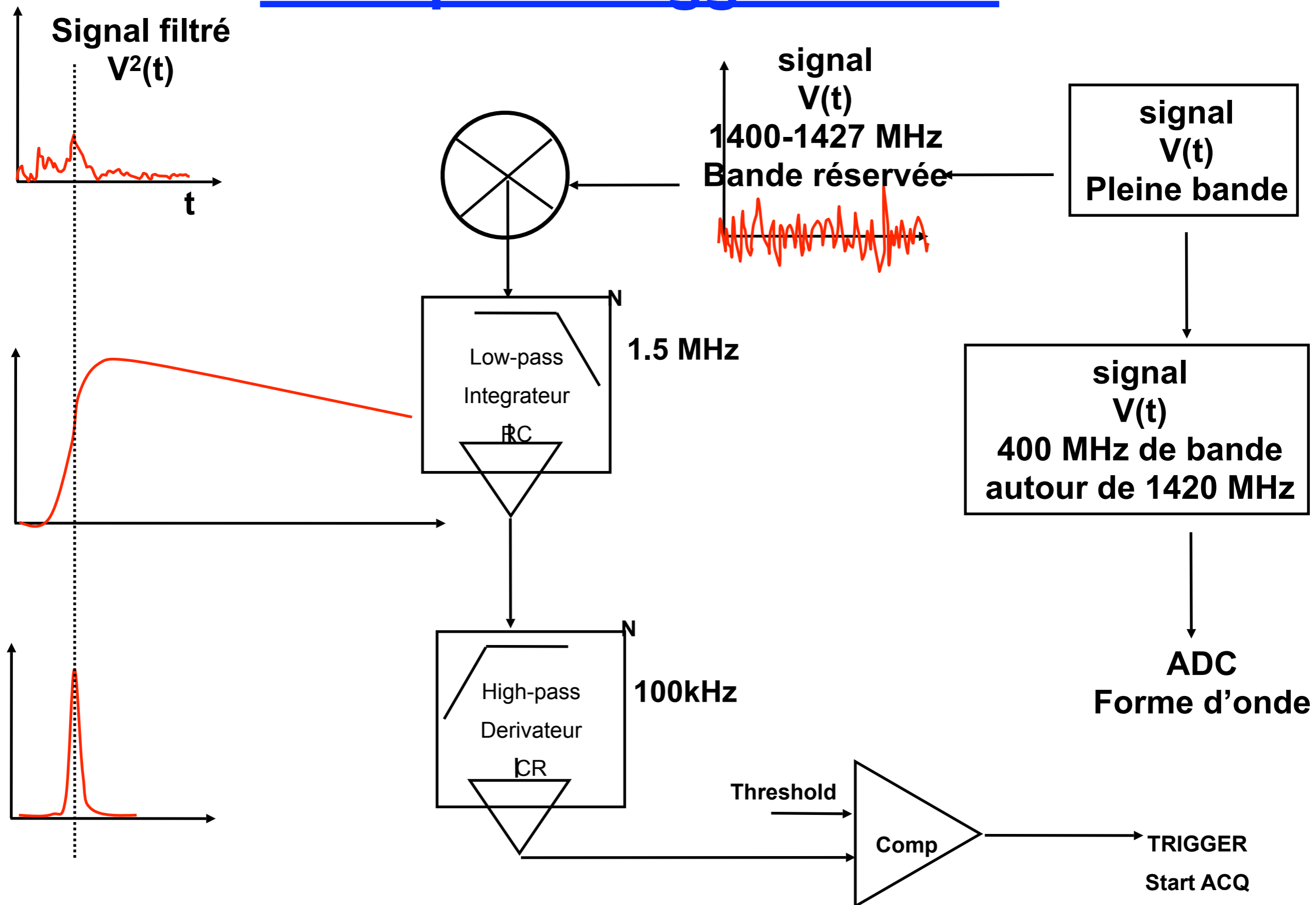
**Nanosecond radio bursts in Crab pulsar
Hankins et al., Nature 422, 2003**



Résolution 2 ns

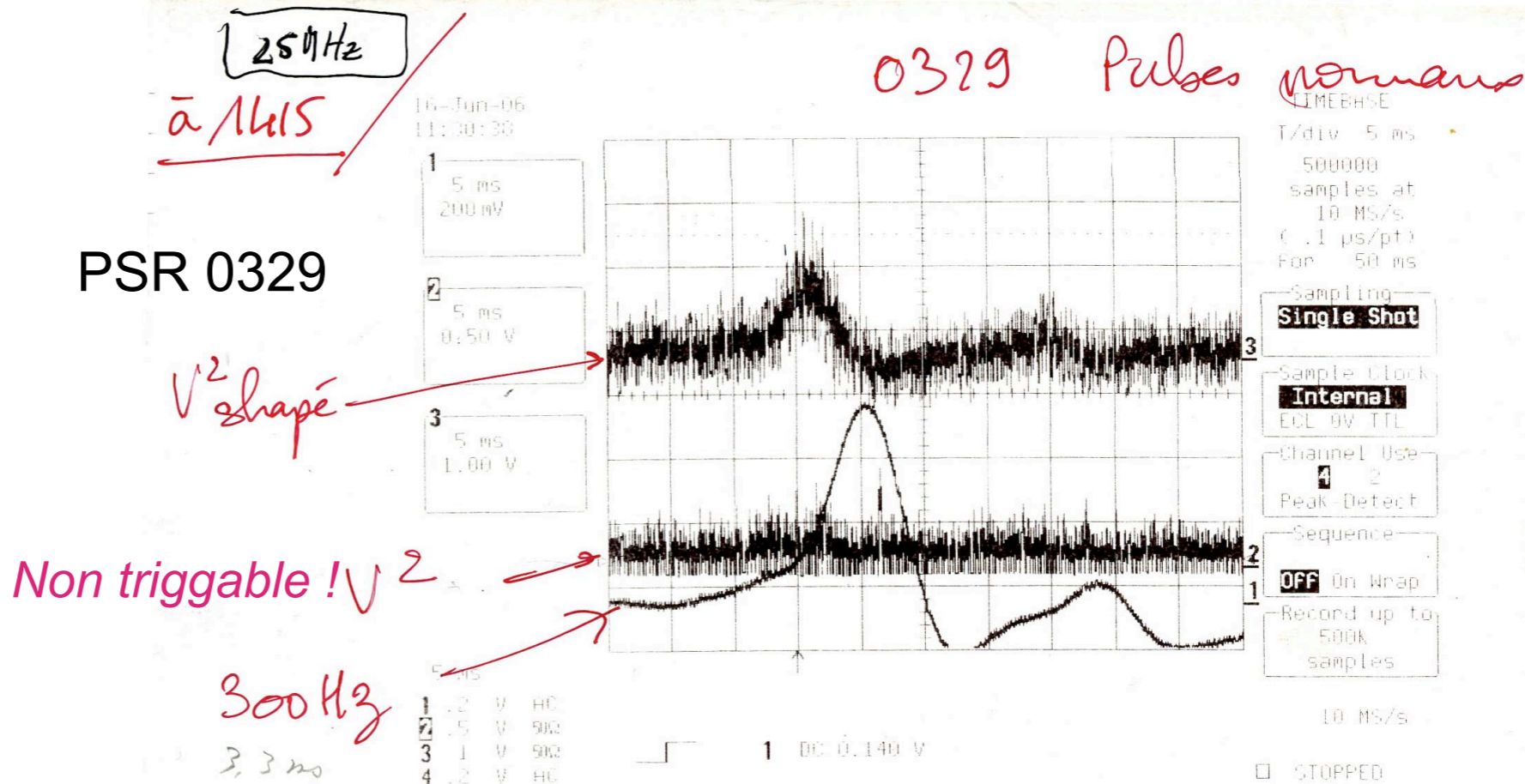


Principe du trigger Pulsar

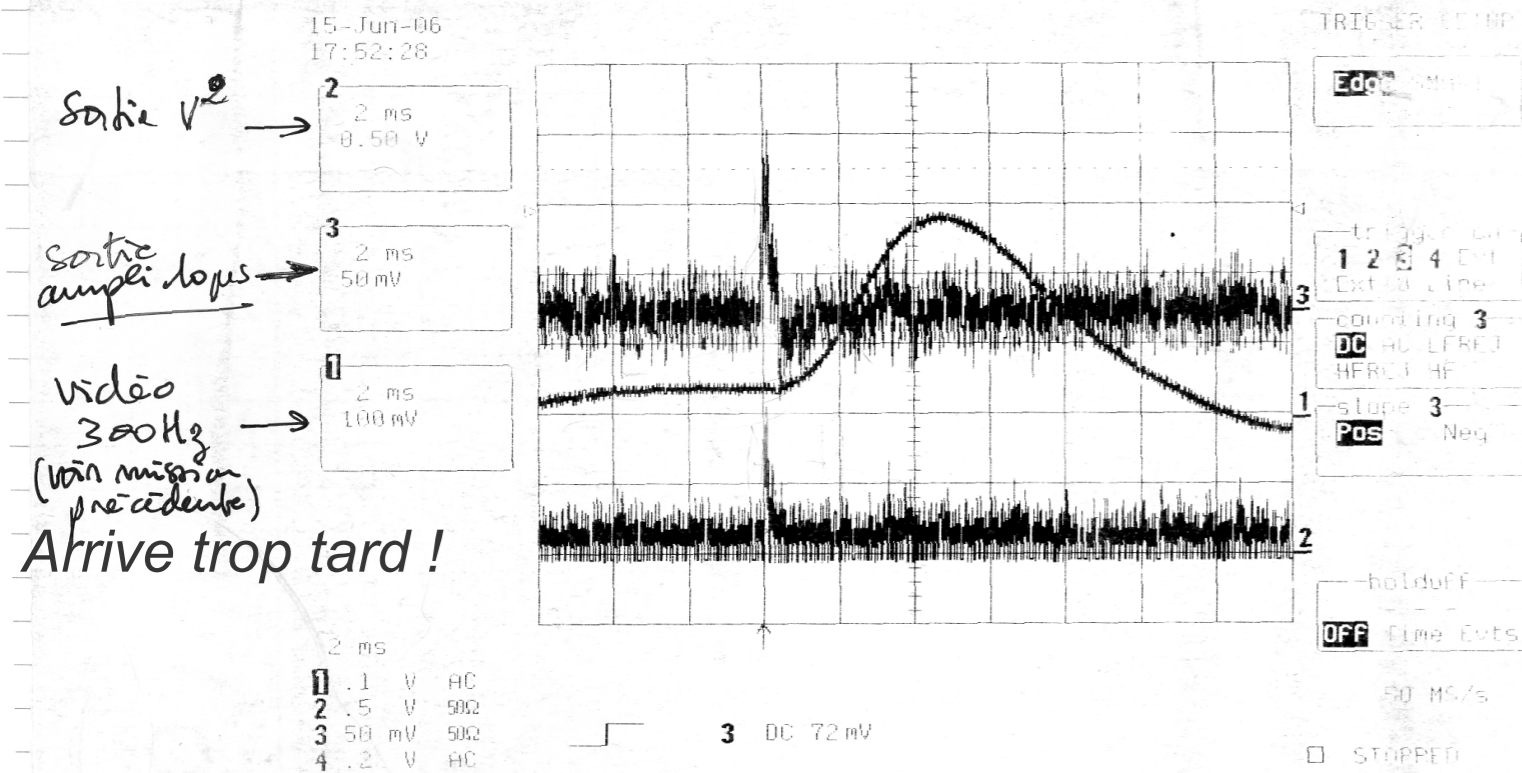


EXEMPLE de TRIGGER PULSARS

PSR 0329



PSR 0950

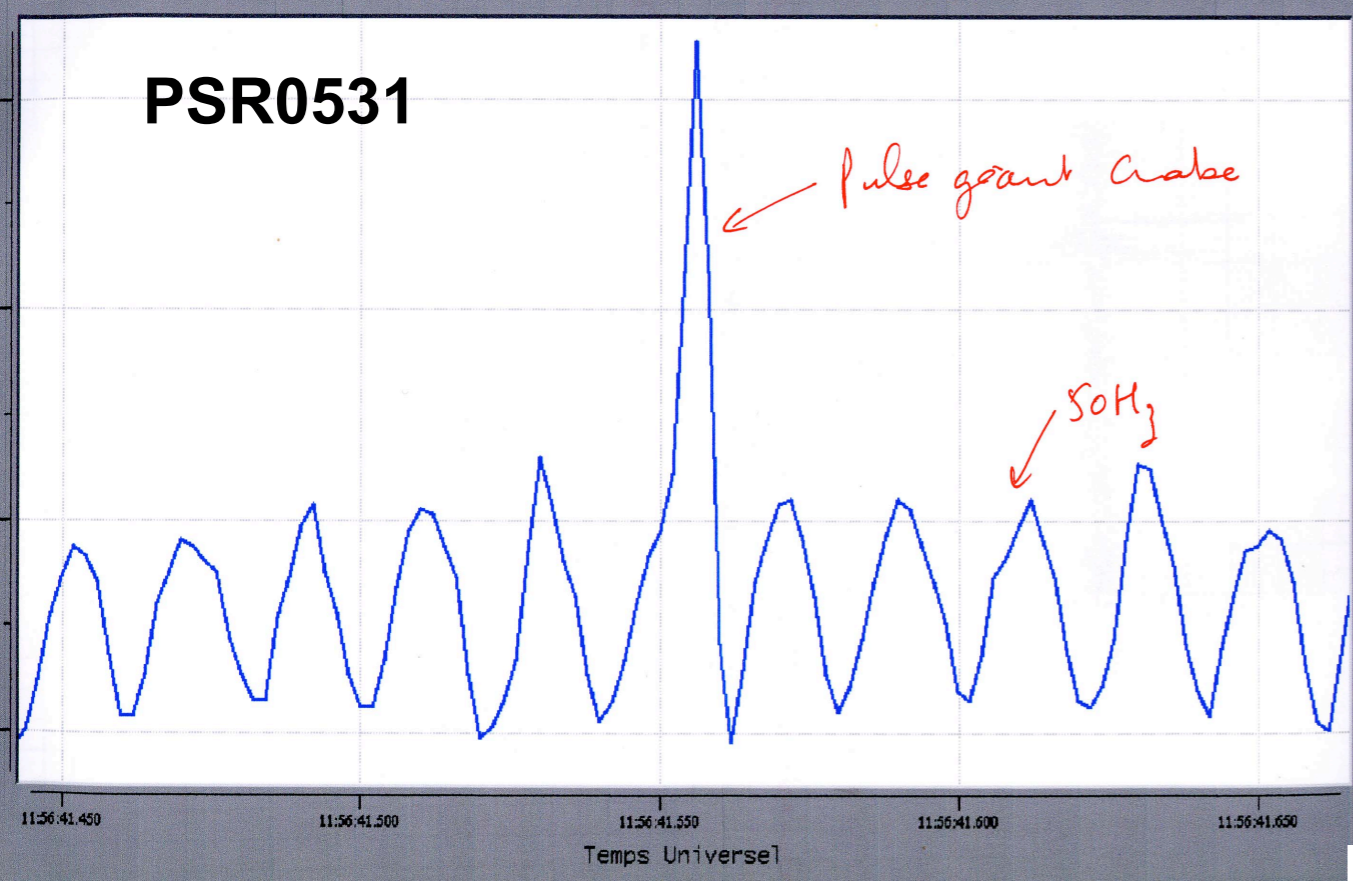


Efficacité de trigger peut encore être optimisée ?

Bonne réponse vis à vis:

- Bruit nébuleuse
- Amplitude
- DM
- Période
- ...

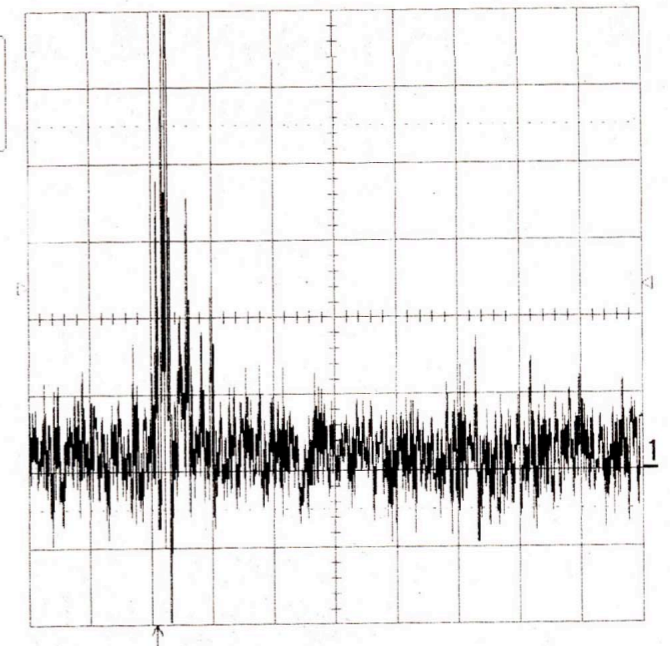
PSR0531



1415 MHz
5m
50MHz

16-Jun-06
12:56:44

1 ms
0.50 V



Pulse géant - Crabe

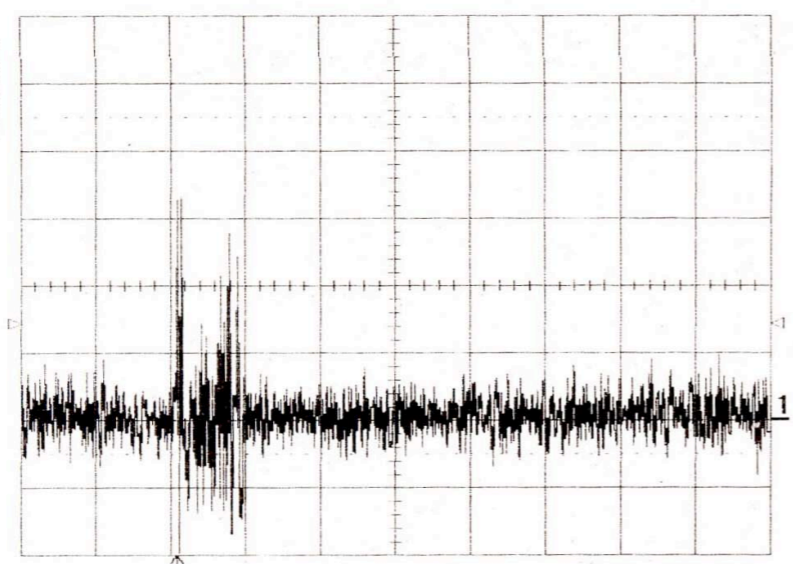
1 ms
0.5 V 500
2 1 V 500

50 MS/s

1415
50MHz

16-Jun-06
13:03:40

1 ms
0.50 V



Crabe géant

1 ms
1 .5 V 500
2 1 V 500
3 .5 V 500
4 .2 V HC

1 DC 0.71 V

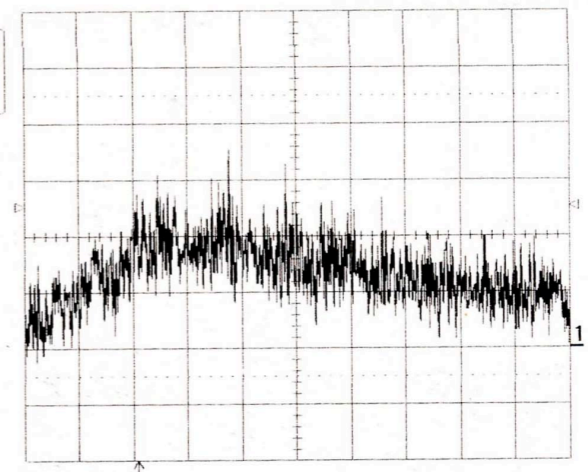
50 1

STOPPE

idem
freq.

16-Jun-06
12:58:59

1 ms
0.50 V



Pulse normal Crabe?

1 ms
1 .5 V 500
2 1 V 500
3 .5 V 500
4 .2 V HC

1 DC 1.26 V

50 MS/s

STOPPE

Autres Thématiques physiques...

En Physique de l'atmosphère

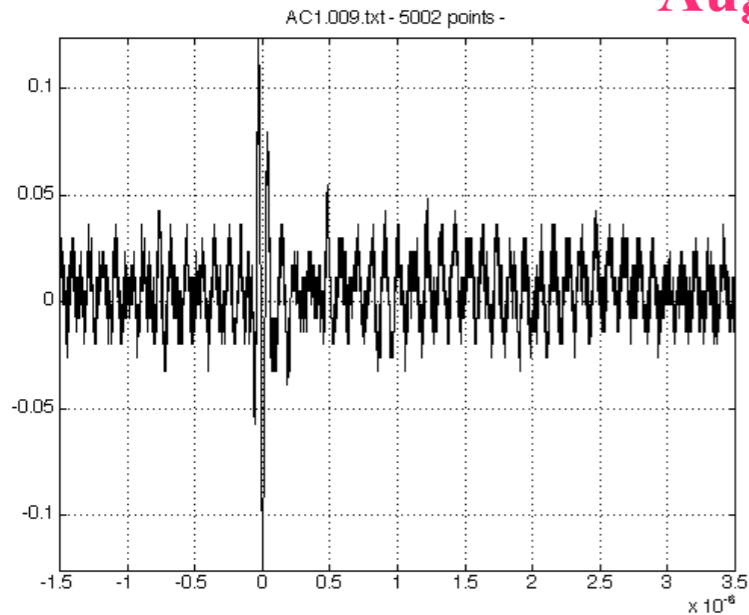
- Orage, Elfe, Sprite, Blue jet, X ray flash,...

En Détection des signaux anthropiques

- Telecom large bande, Guerre électronique, tracking de cible (avion, sat.)

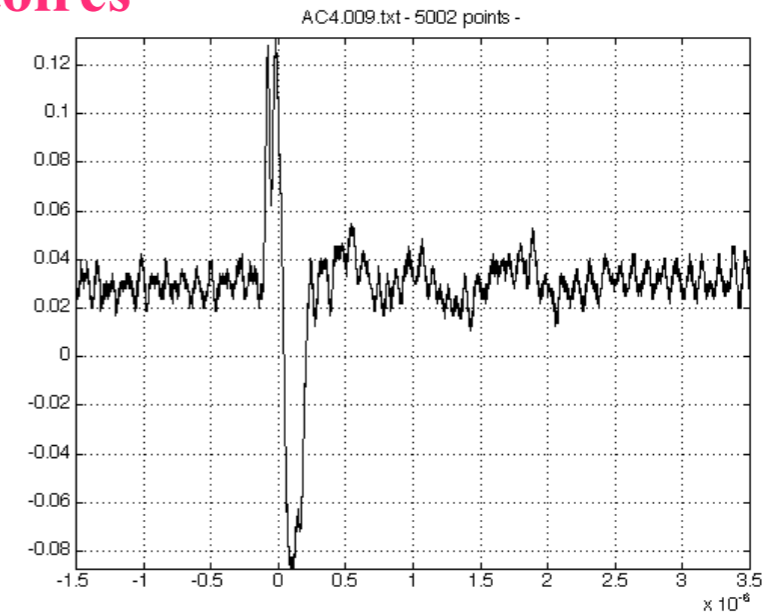
Autre physique: Physique de l'Atmosphère: Événements en conditions orageuses

Augmentation du flux de transitoires

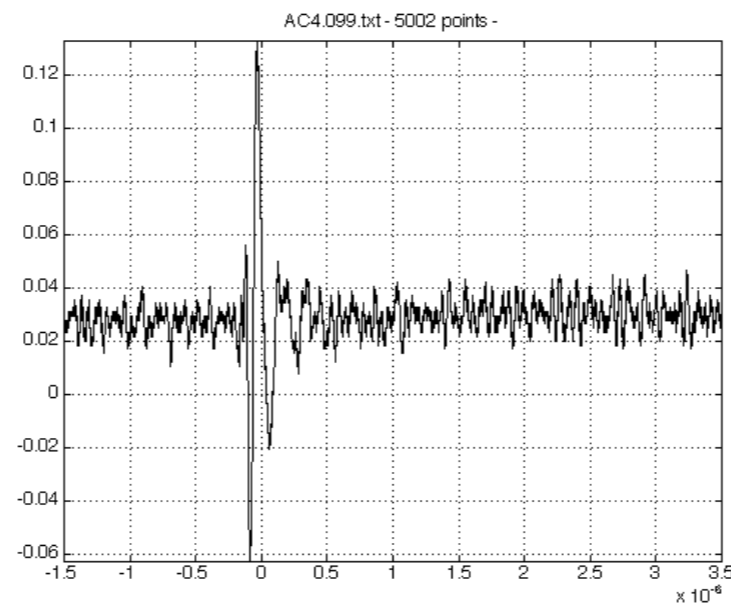


Trigger: Dipôle court
(filtrage 10-100MHz)

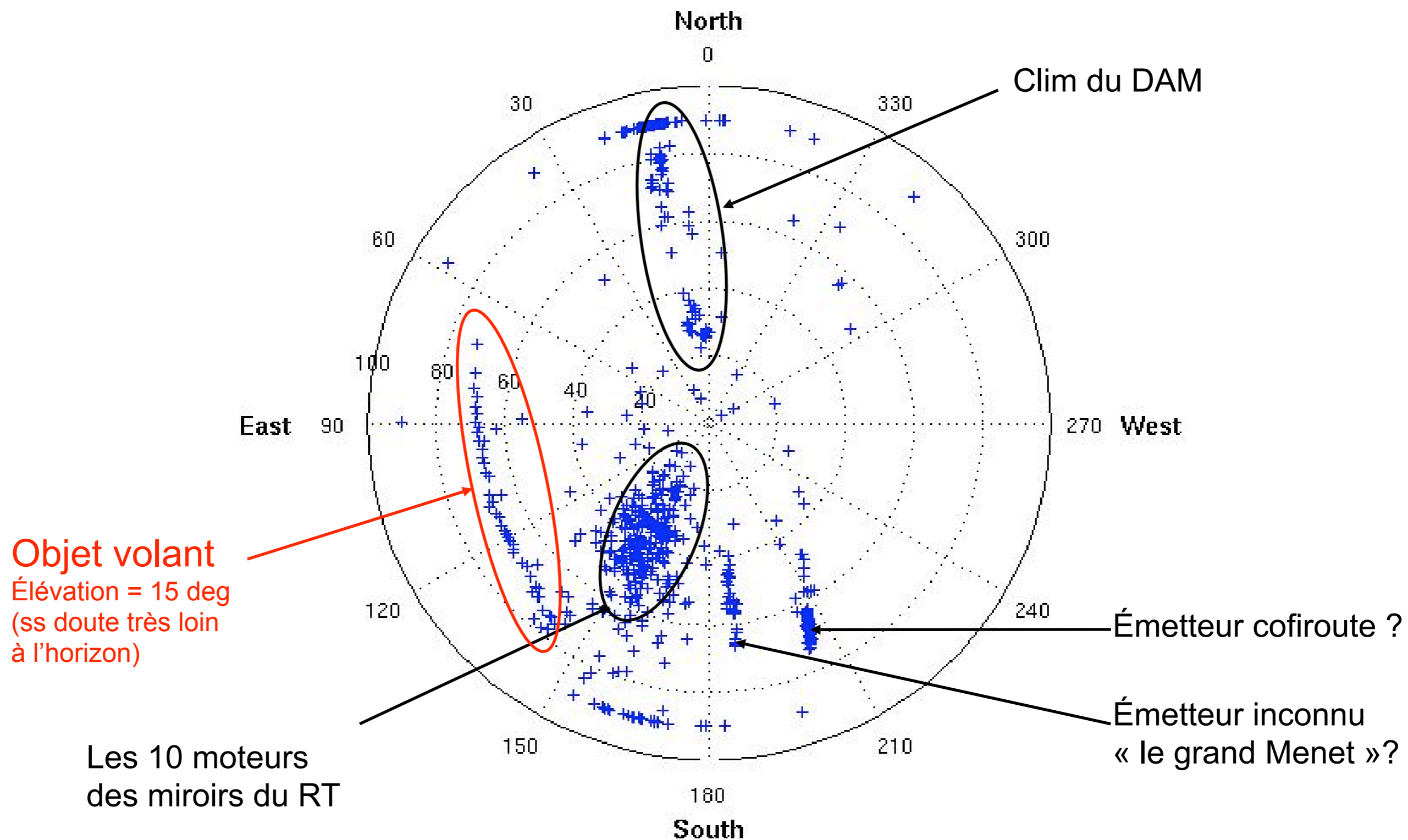
Ant. Log-Périodique
1-100MHz



Evts. de polarité inversée



Exemple de détection (nuit du 13 juillet 2005)



ZOOM en temps/azimut

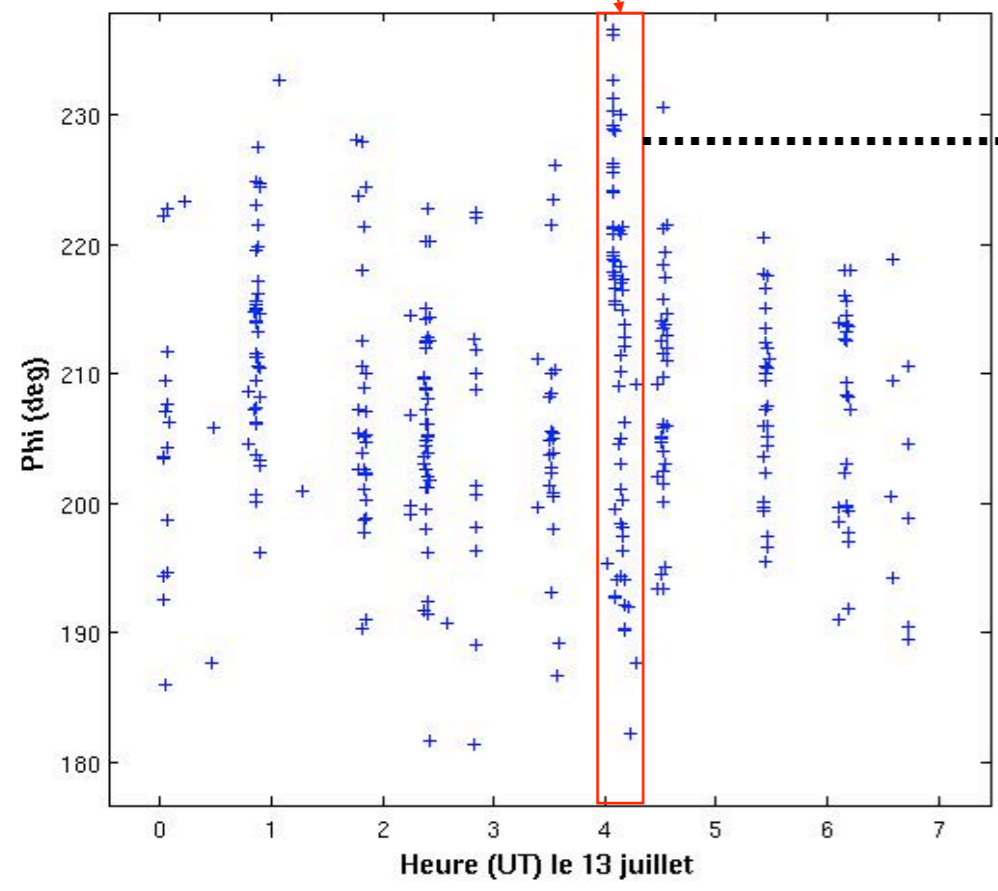
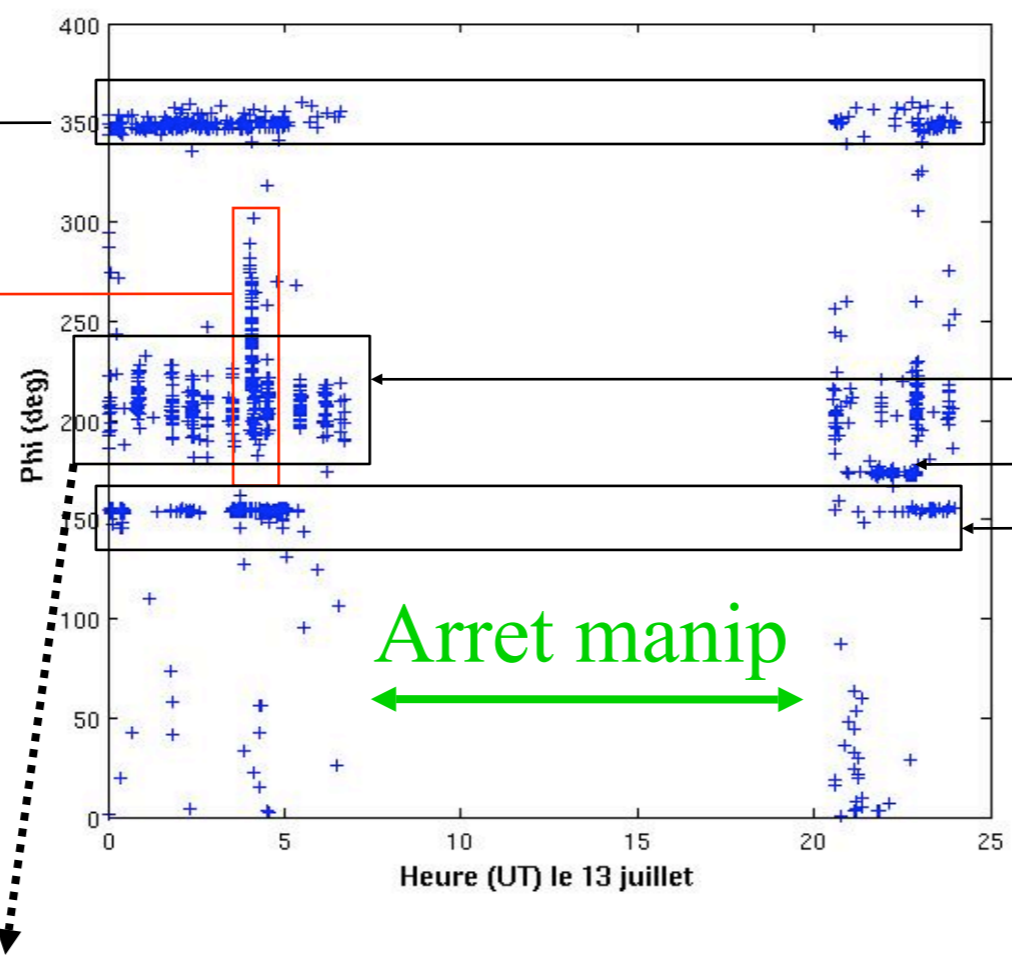
Clim DAM ←

Objet volant ←

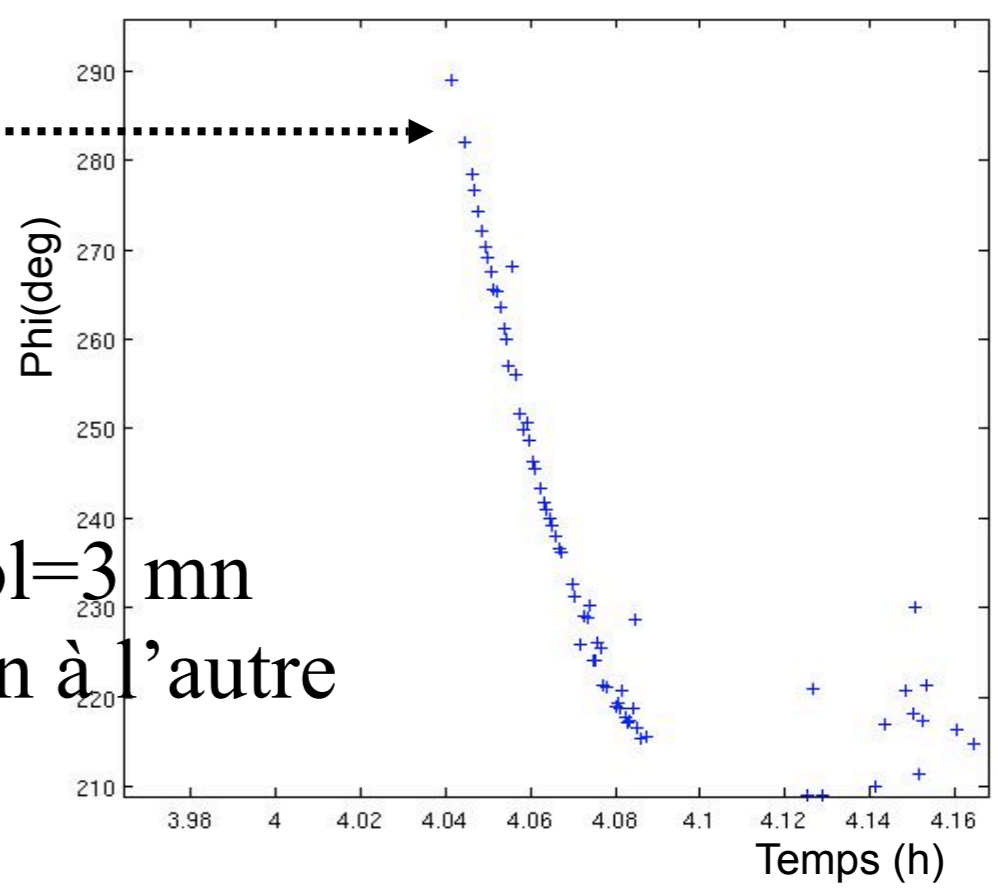
Pointage des miroirs du RT

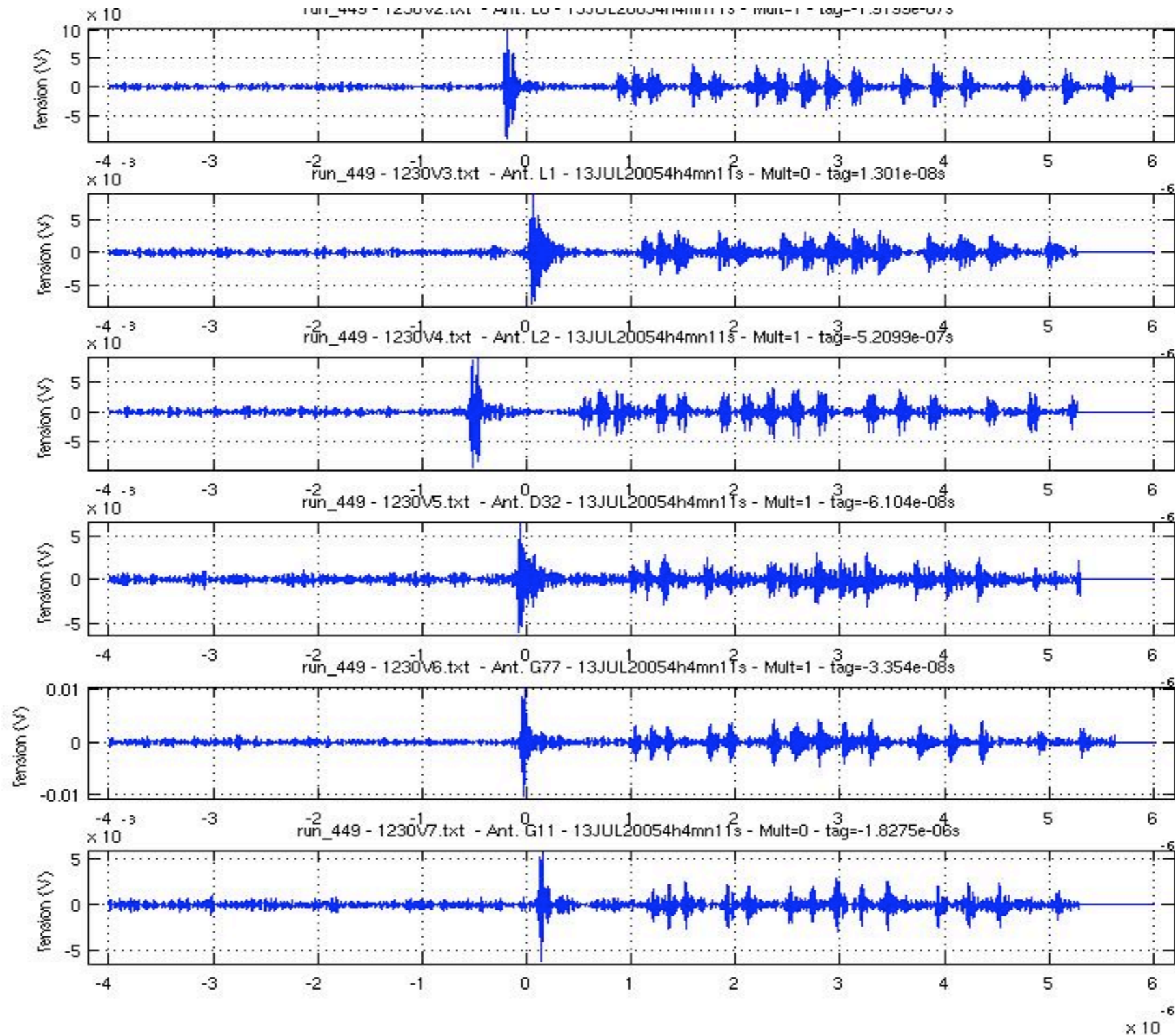
Grand Menet ?
Cofiroute ?

Arret manip



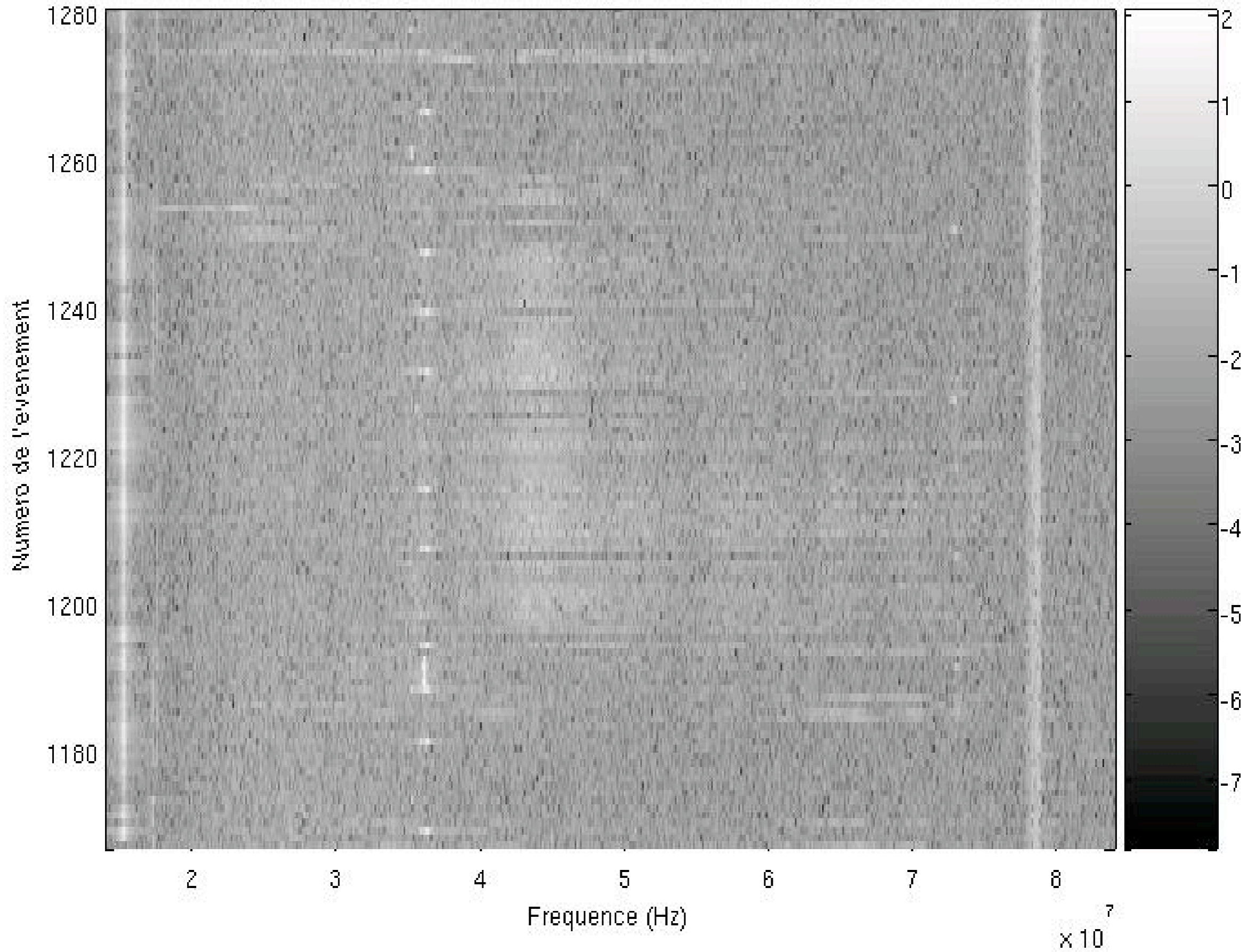
Trajectoire:
temps de vol=3 mn
d'un horizon à l'autre





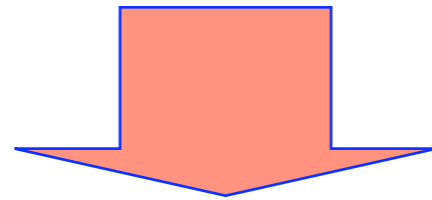
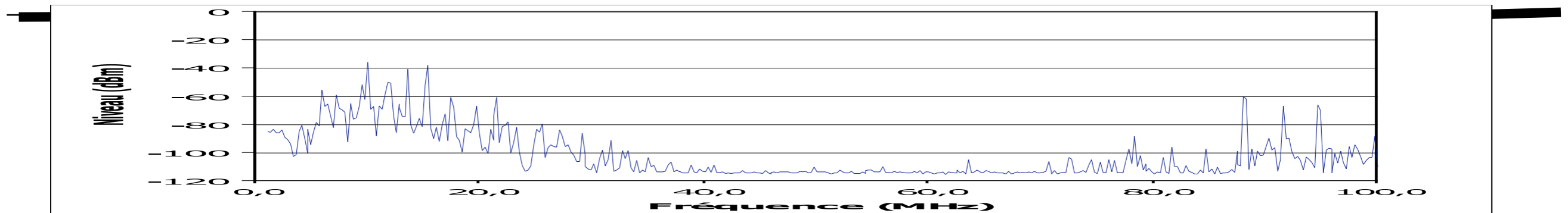
Exemple de la structure temporelle du train d'impulsions dans la bande 33-65 MHz
(ca change à chaque evt detecté)

Voie 3

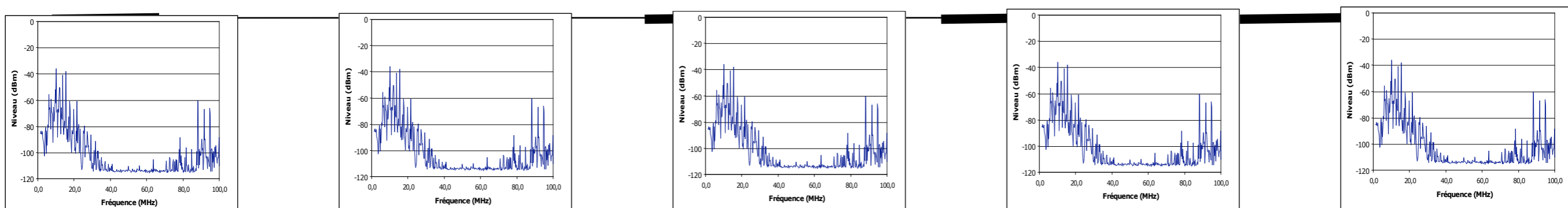


Quelle technique d'analyse des formes d'ondes?

Voir longtemps mais rarement & Analyser **successivement toutes les fréquences** par balayage (1 ms/500 ms , Δf petit) ?



Voir brièvement mais souvent & Analyser **simultanément toutes les fréquences** ($10\mu s/5$ ms , Δf grand) ?



Le temps de cohérence étant $\sim 100 \mu s$
 \Rightarrow s'affranchir de la turbulence atmosphérique

Quelle technique d'analyse des formes d'ondes?

1. **Faire une pose pendant une durée finie sur une région restreinte du ciel et grand S/B instantané**

=> Antennes à faible FOV (lobe étroit) ou Réseau phasé d'antennes



2. **Faire une pose pendant une durée très grande sur 2π str du ciel et faible S/B apparent**

=> Réseau d'antennes à très large FOV et enregistrer les formes d'onde

=> Post-phaser numériquement vers une région de ciel ce que l'on veut analyser

