

# 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**

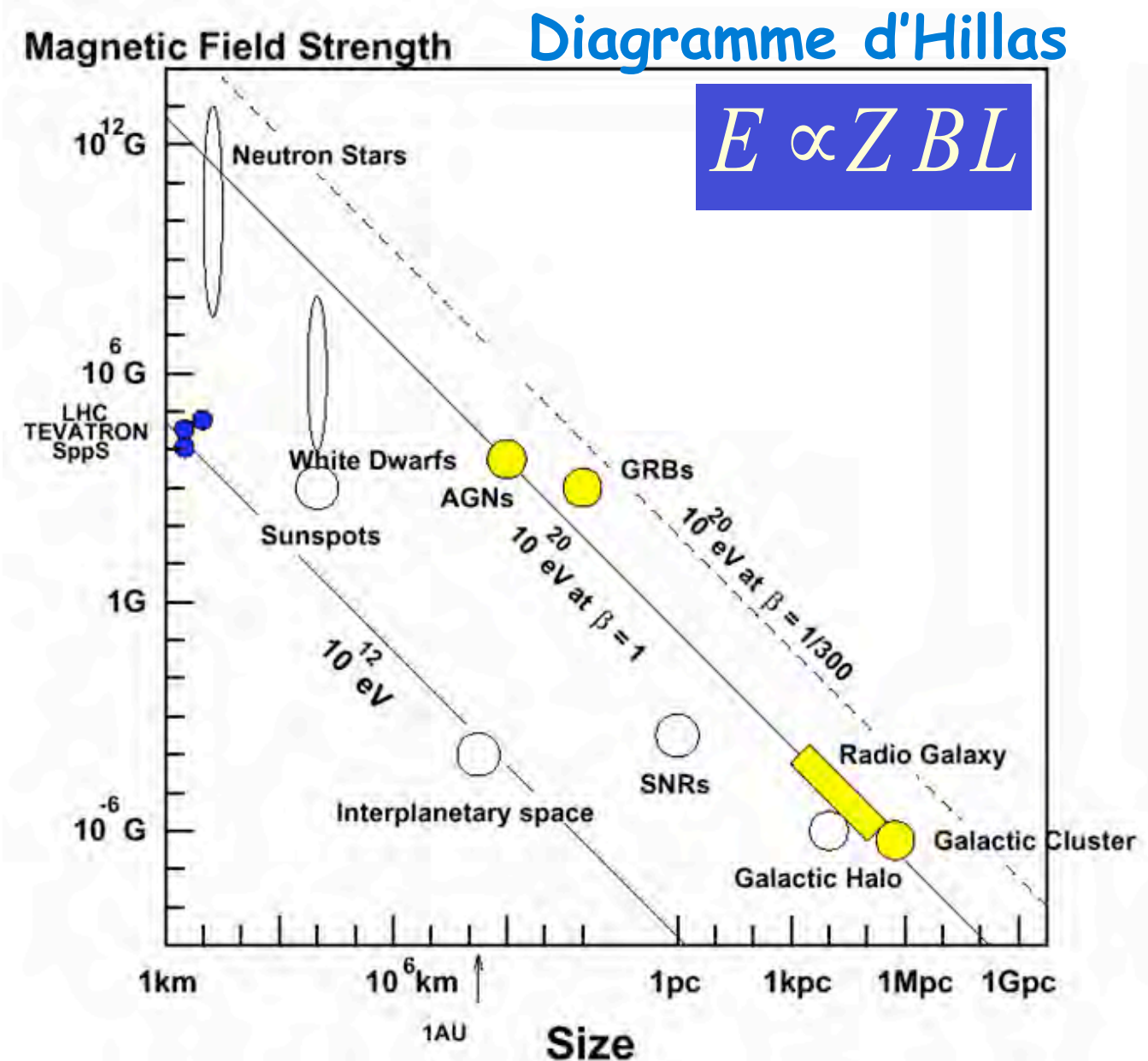
- CODALEMA (1<sup>re</sup> génération)
- LPDA (2<sup>me</sup> génération)
- Pulsars



# Thématiques physiques 1/3

## En Astroparticules

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



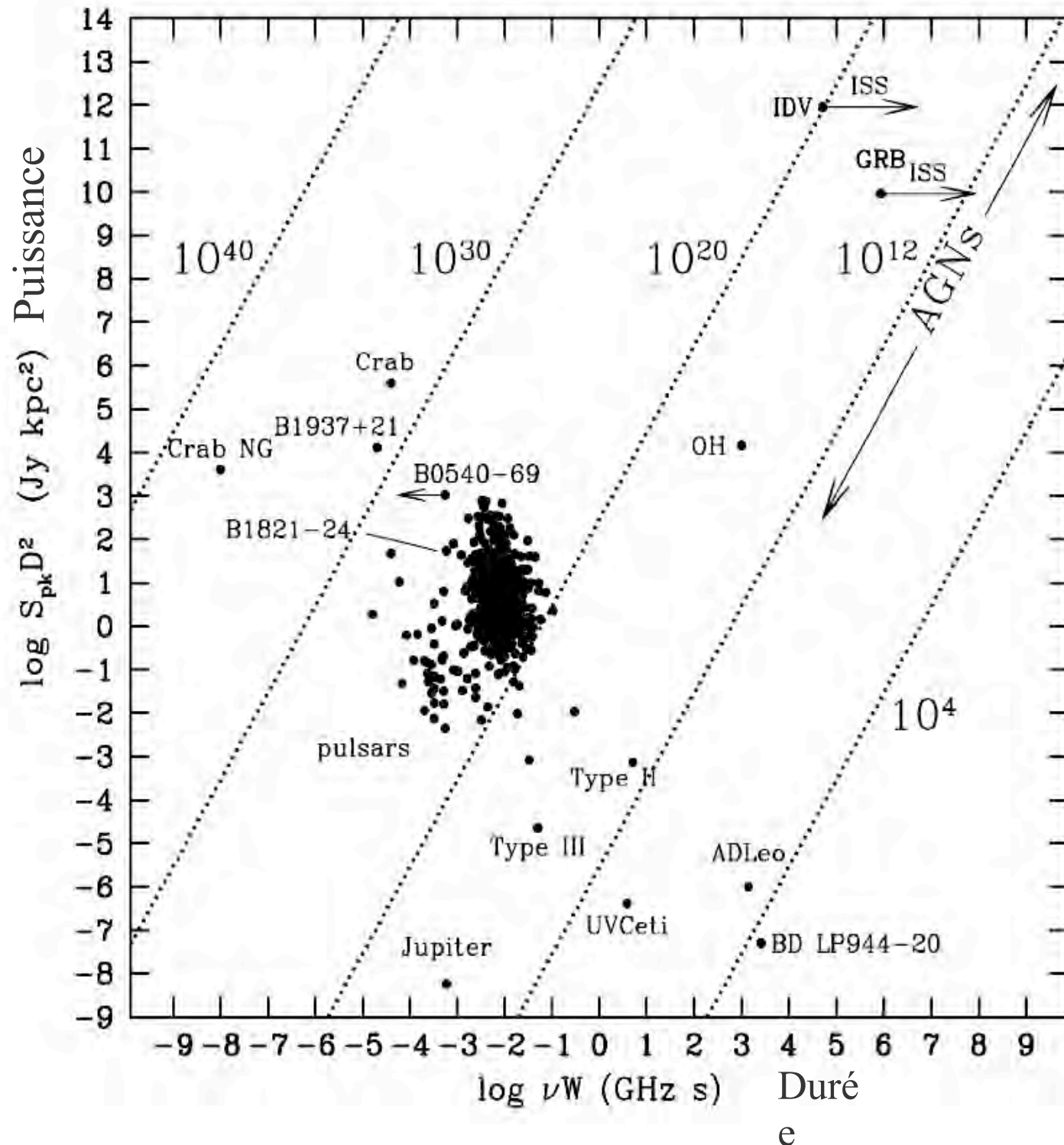
Origine & nature des Cosmiques  
distribution isotrope? sources ?)

# Thématiques physiques 2/3

## En radio-Astronomie

- Emissions impulsionnelles**
  - soleil, Jupiter (MHz)?
  - Pulsar giant pulse (GHz)?
  - $\gamma$  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**

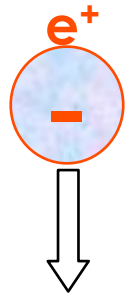
**(Pour les gerbes la détection des particules est indirecte)**

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

# Le champ électrique des gerbes

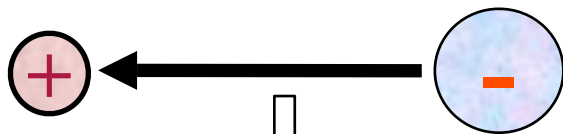
Identifiés en 1970

- Excès de charge  $\sim 10\% e^- /$

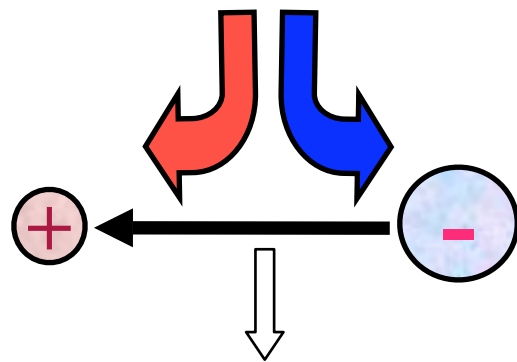


- Effet géomagnétique  $F=qV \times B$

→ moment dipolaire



→ Courant transverse d'alimentation du dipôle



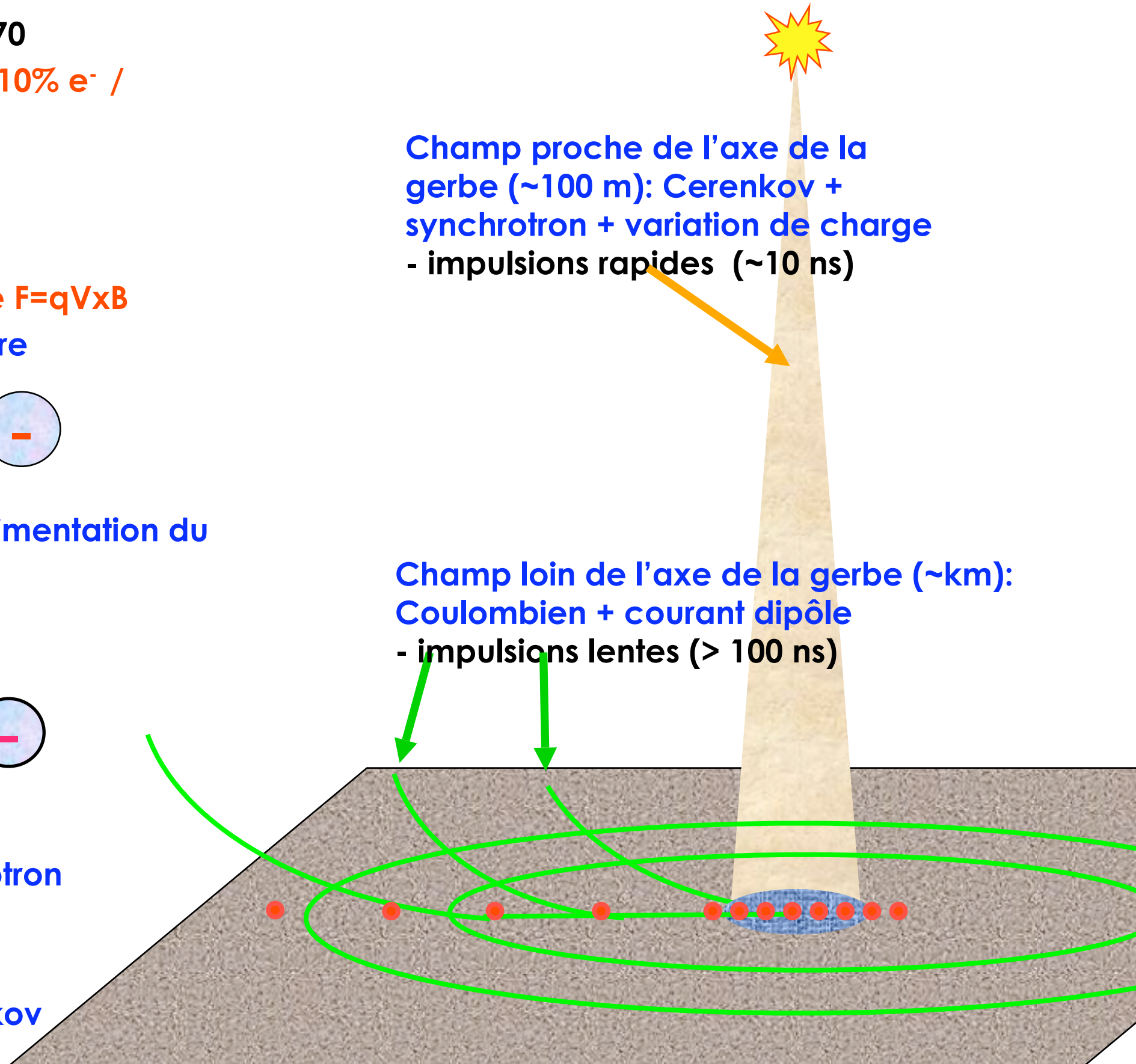
→ Emission Synchrotron

- $v_e > c$

→ Emission Cerenkov

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

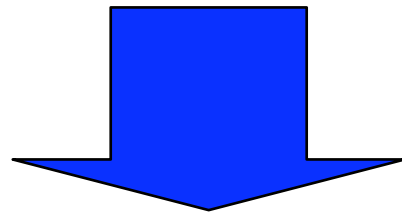
Champ loin de l'axe de la gerbe ( $\sim$ km): Coulombien + courant dipôle  
- impulsions lentes ( $> 100$  ns)



# La démarche expérimentale

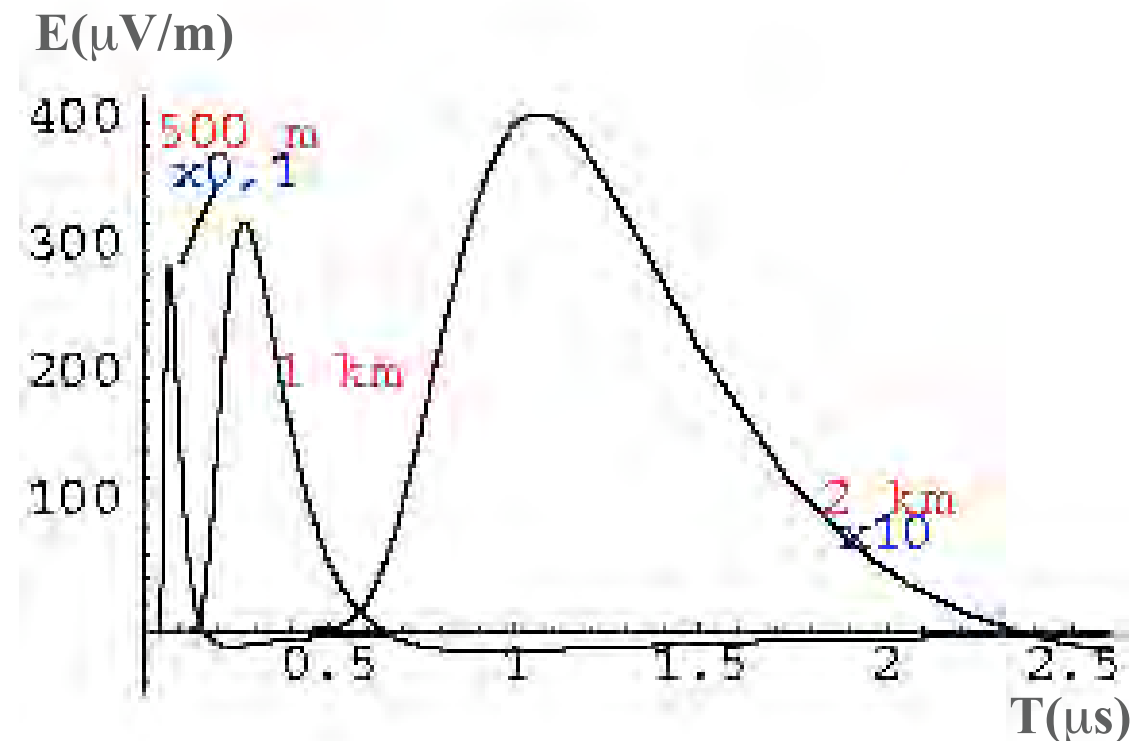
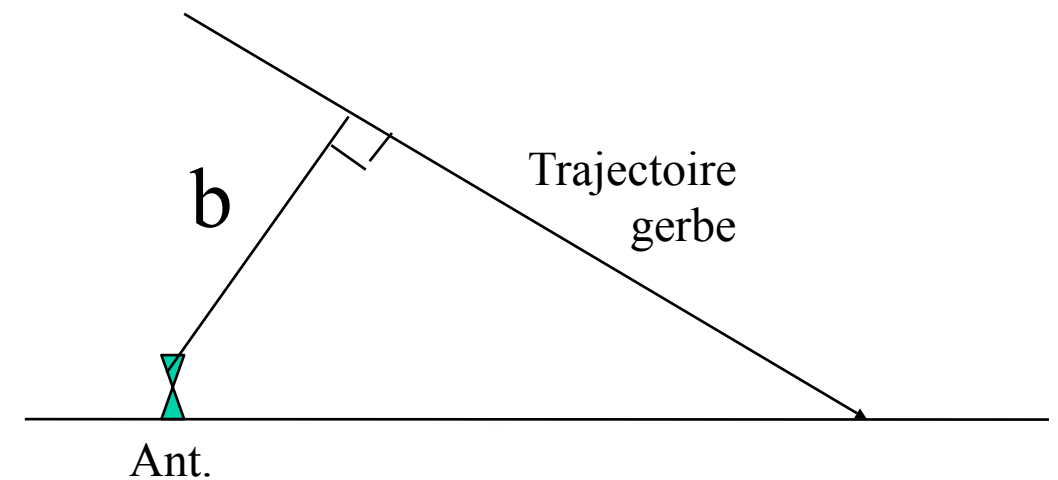
## • Simulation théorique: Informations contenues dans la forme du signal

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



## • Mesures expérimentales:

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

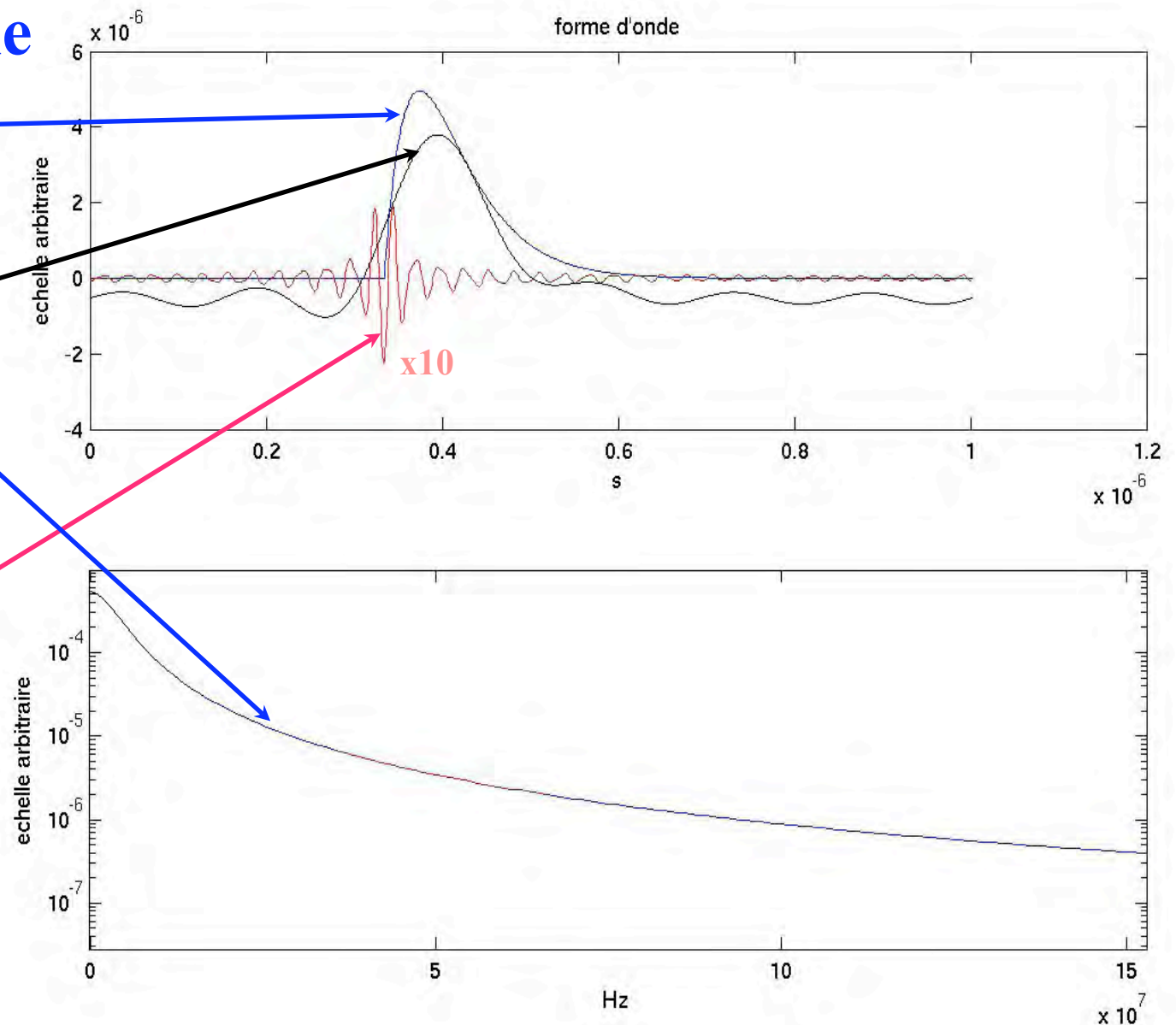
- Forme du transitoire
  - beaucoup de puissance

**=> 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...**

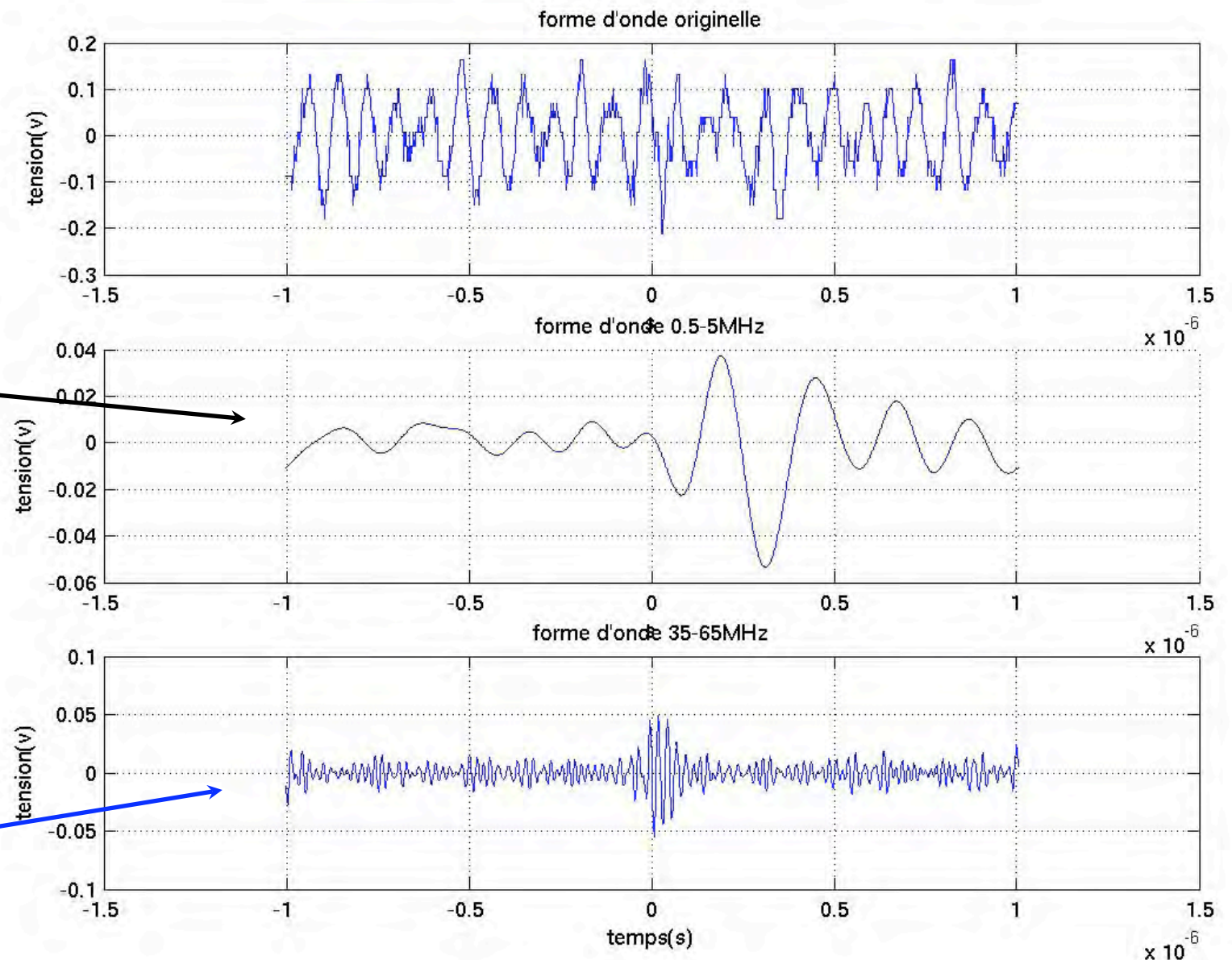
# Signature du transitoire par l'analyse multi-bande

Filtrage "rectangulaire"  
numérique



• Bande 0.5-5MHz

• Bande 35-65MHz  
(trigger)

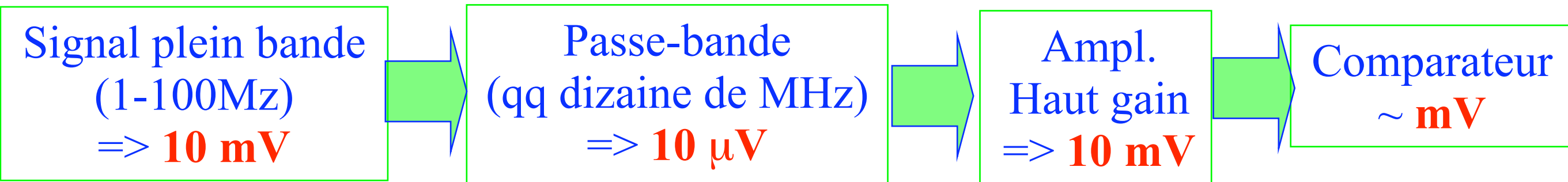


Antenne DAM



# 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

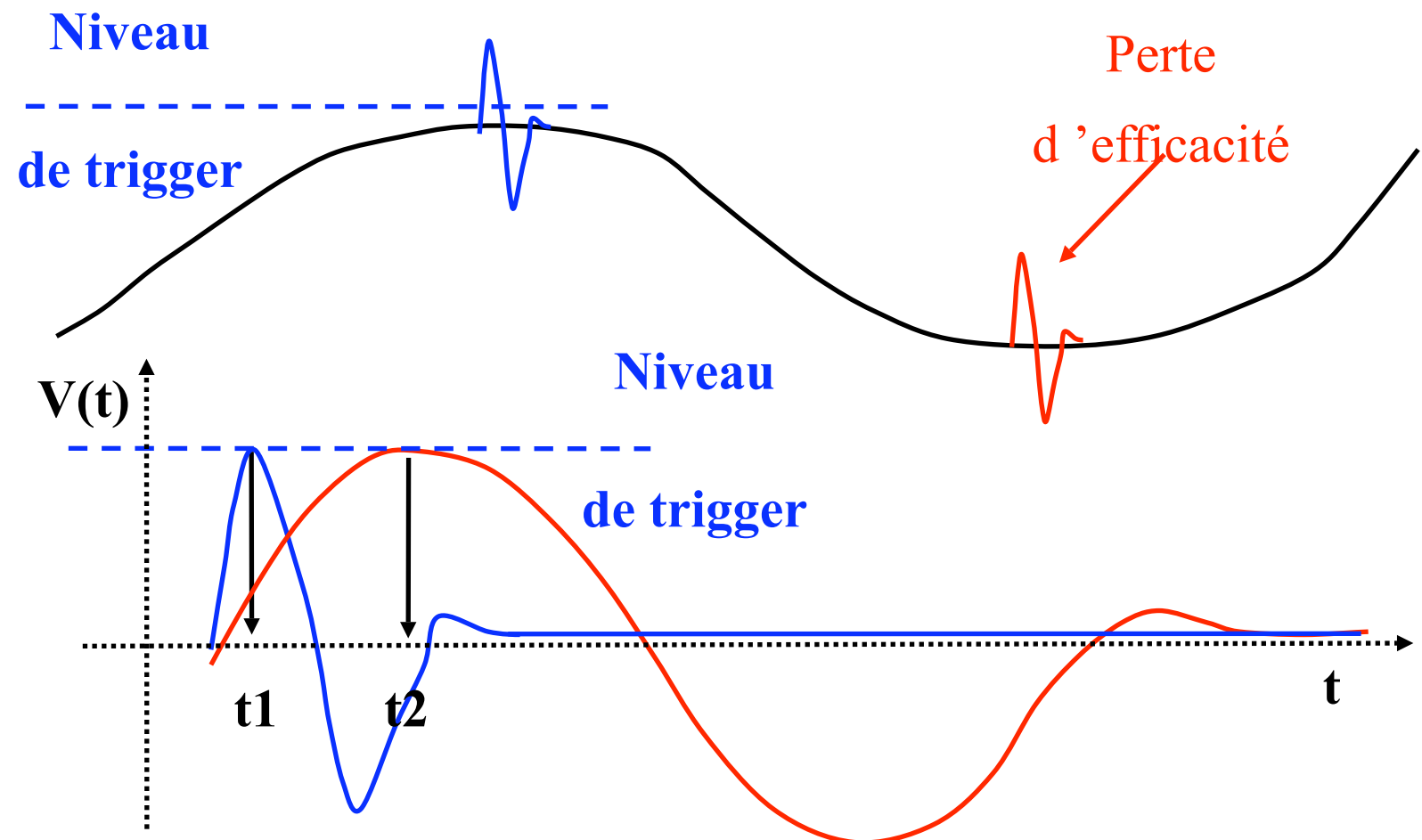


## Difficultés

- 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



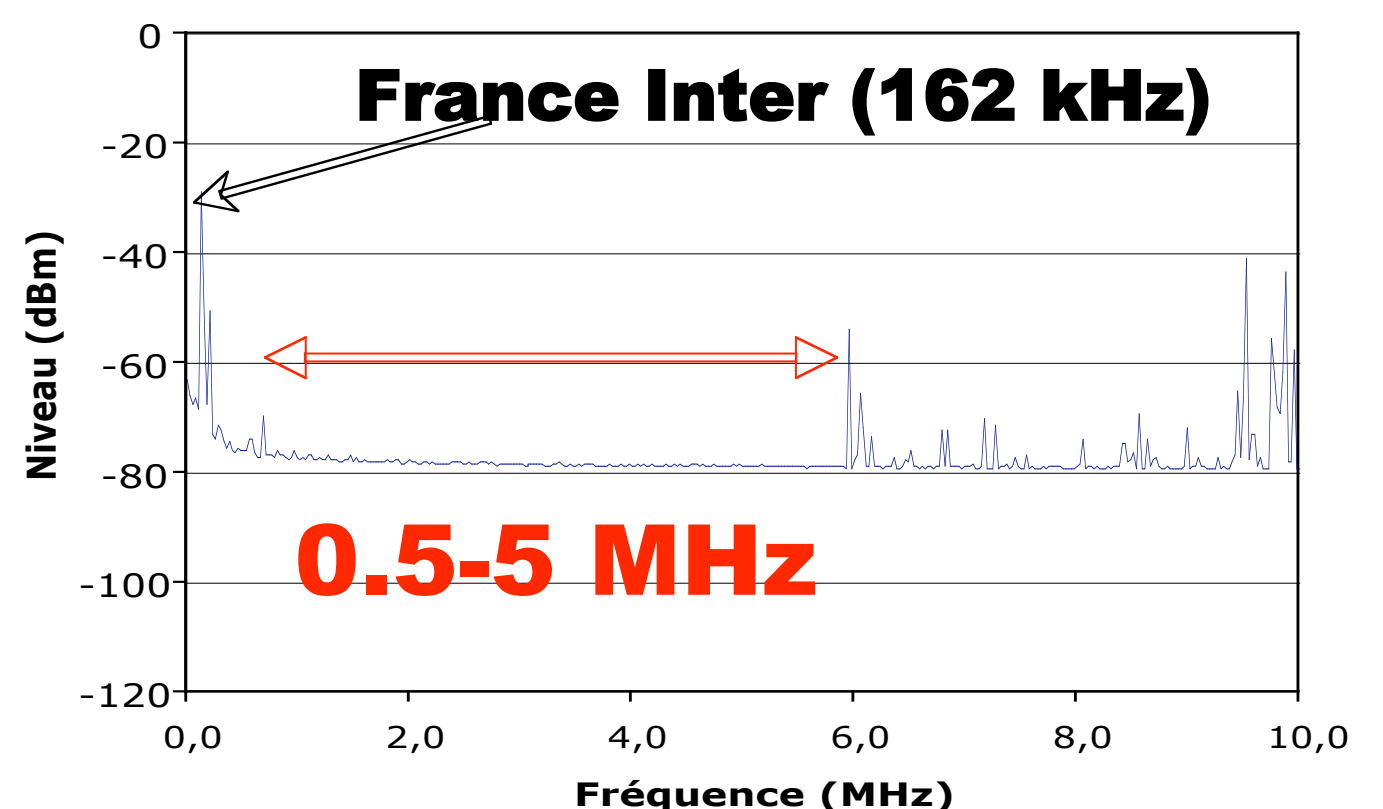
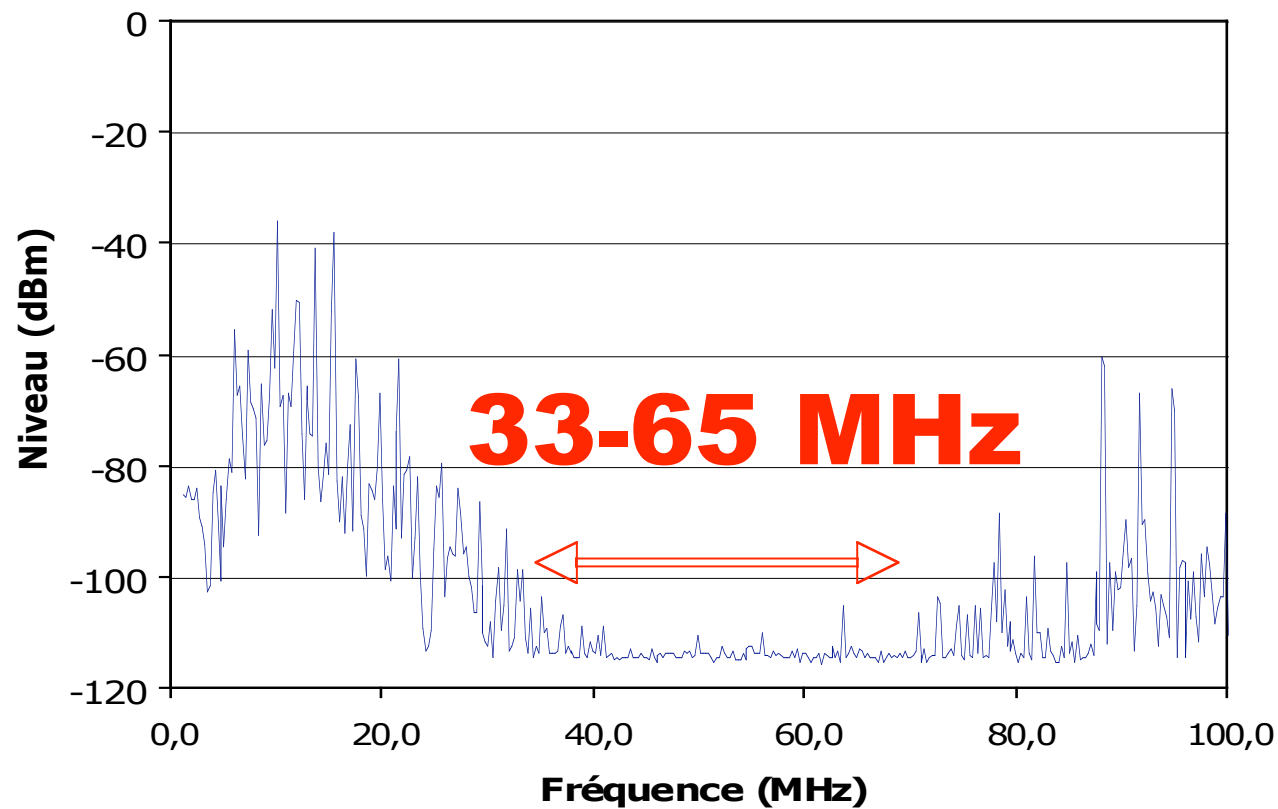
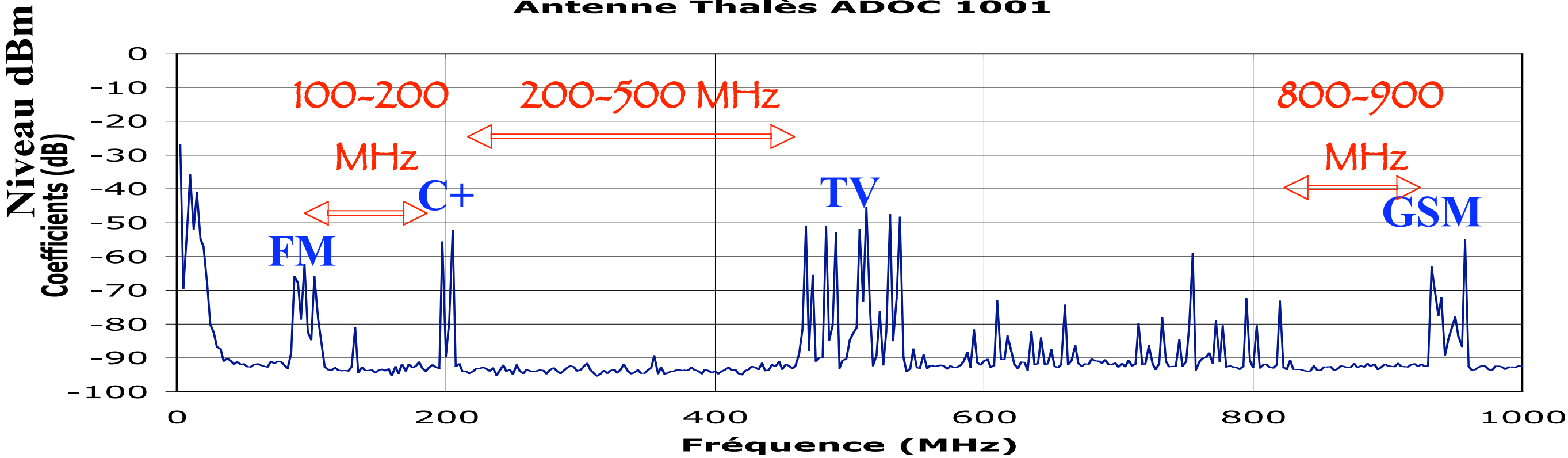
**BUT: Étiqueter un transitoire avec un Trigger minimal (min-biais trigger)**

- **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**

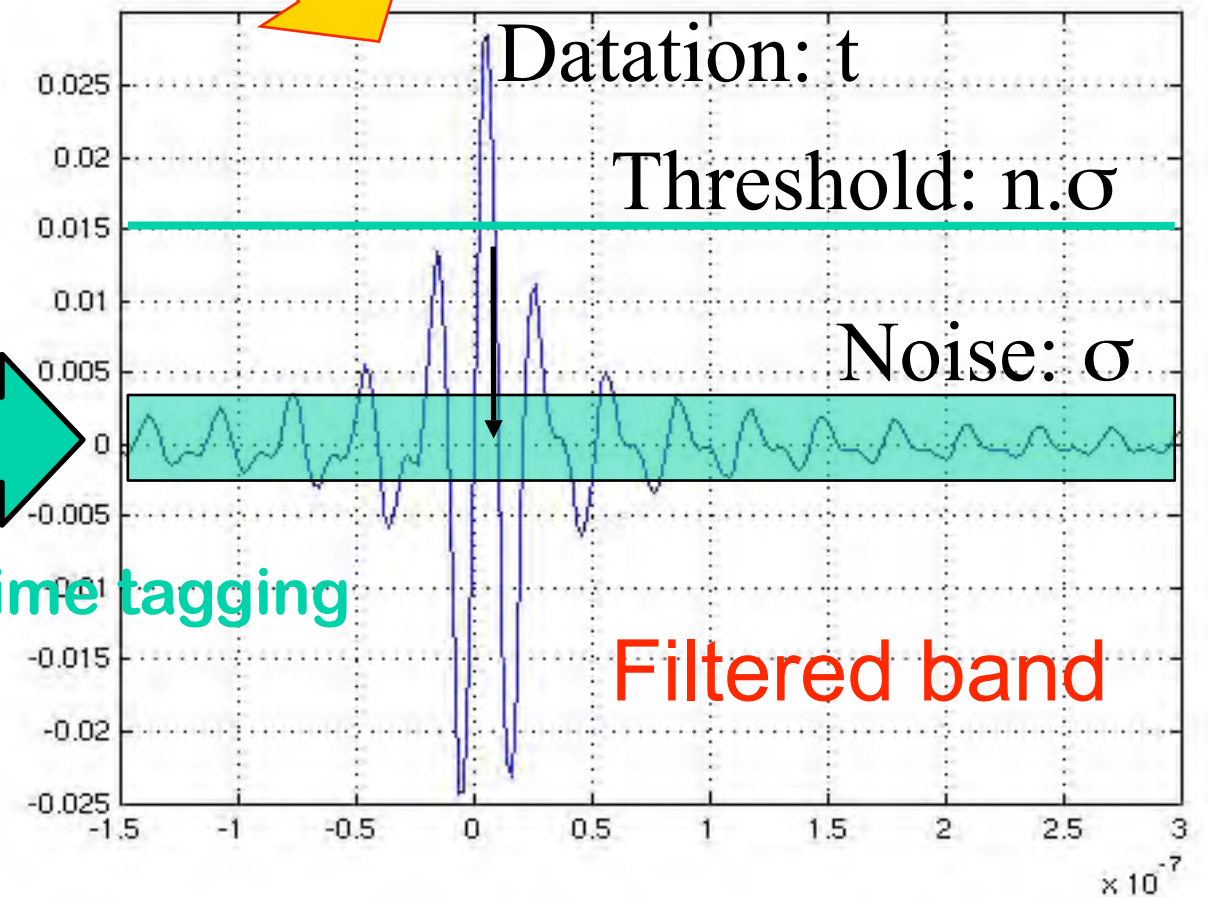
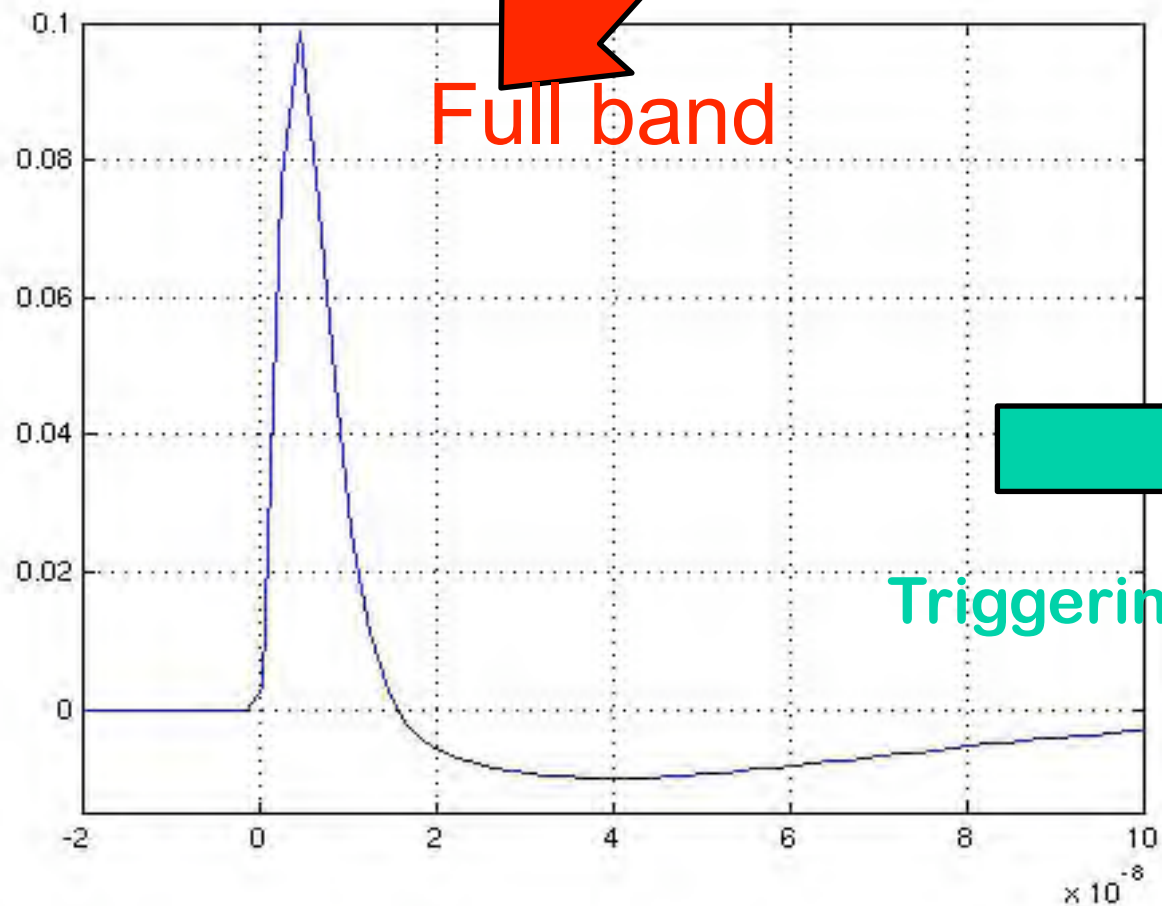
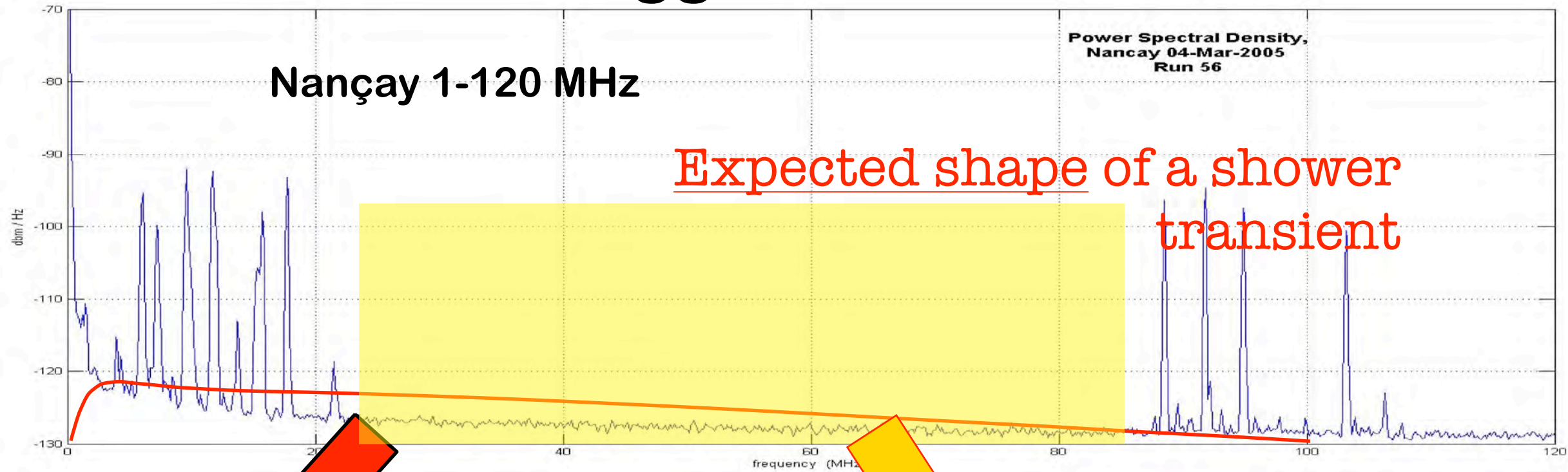


# Zones utilisables de trigger @ nançay

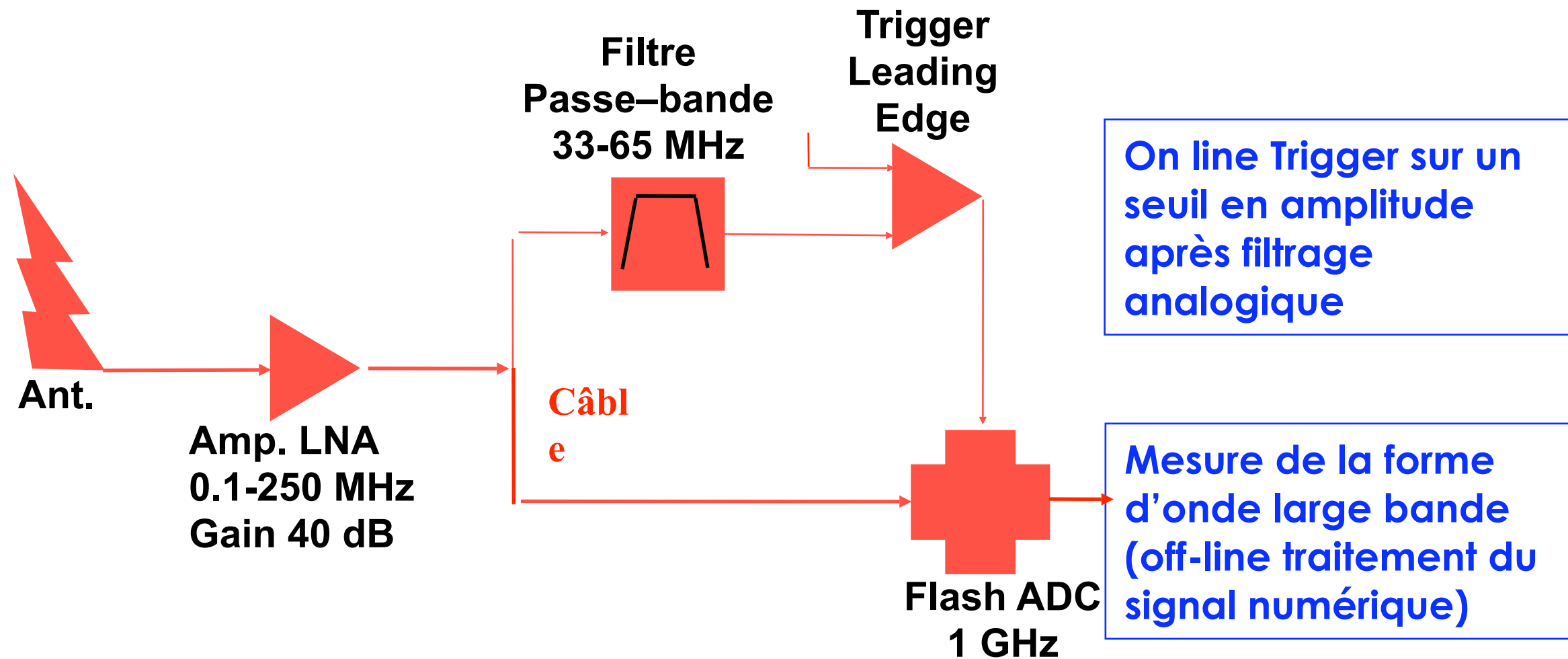
**Spectre fond radio à Nançay • 1 kHz - 1 GHz**  
**Antenne Thalès ADOC 1001**



# Le On-line trigger CODALEMA



# Schéma du Trigger CODALEMA @ Nançay

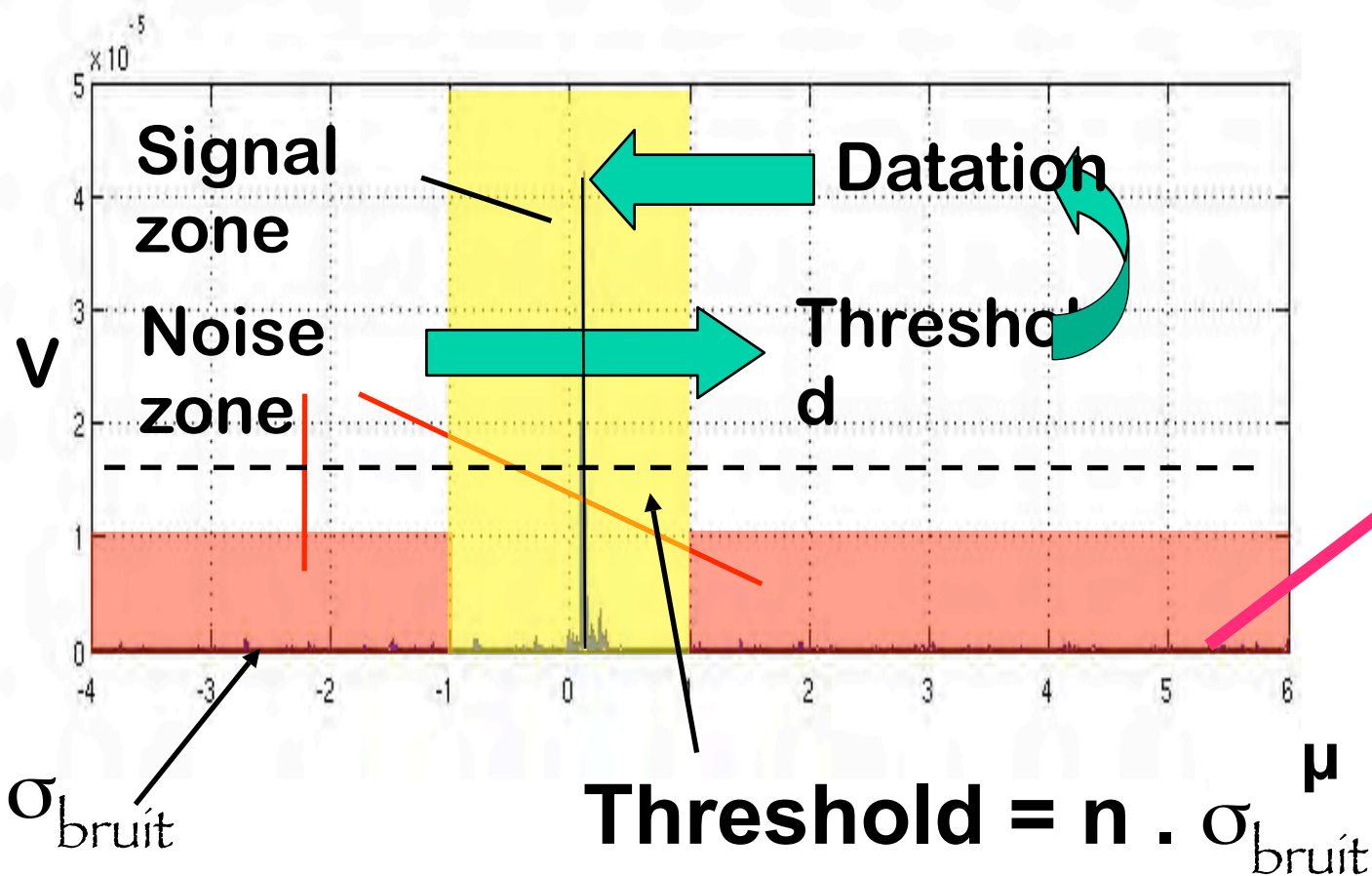
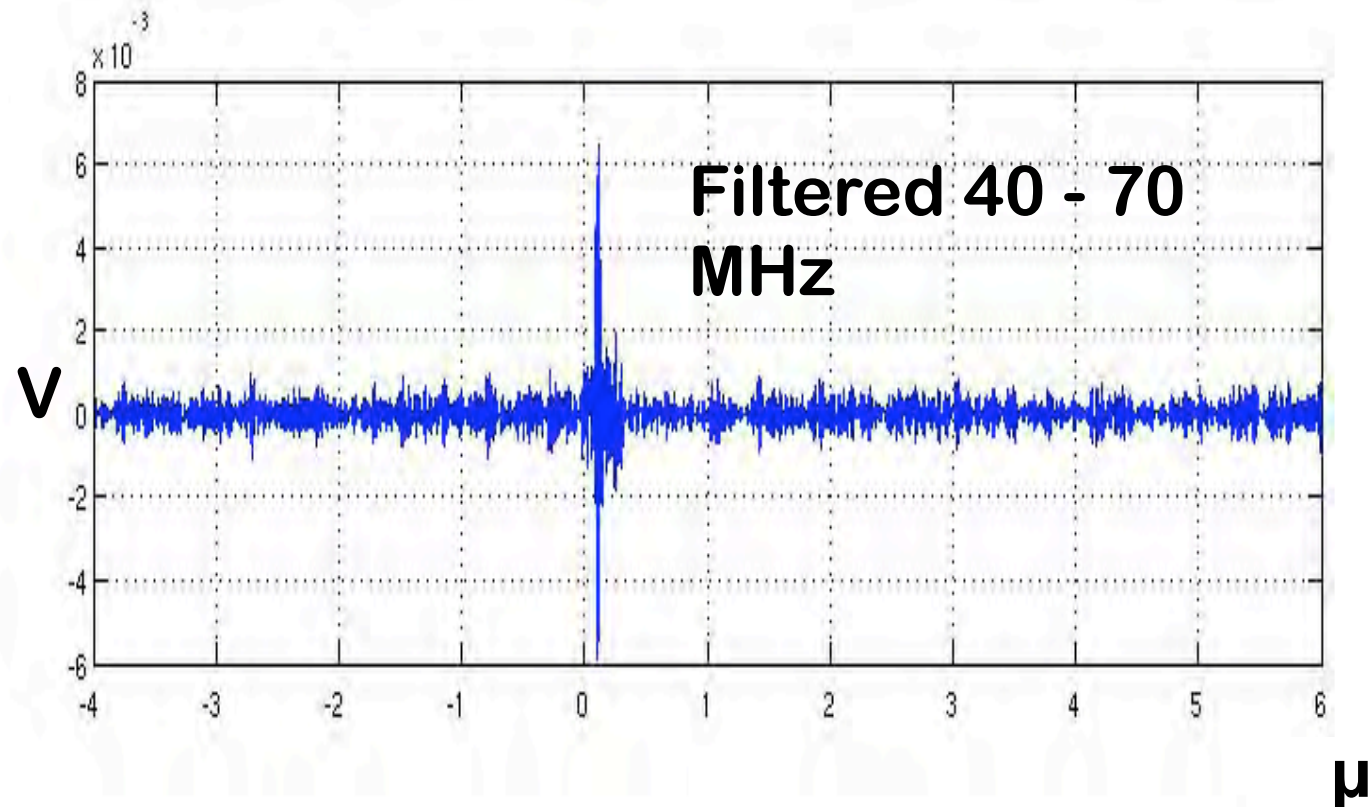


**Stratégie en 2 étapes:**

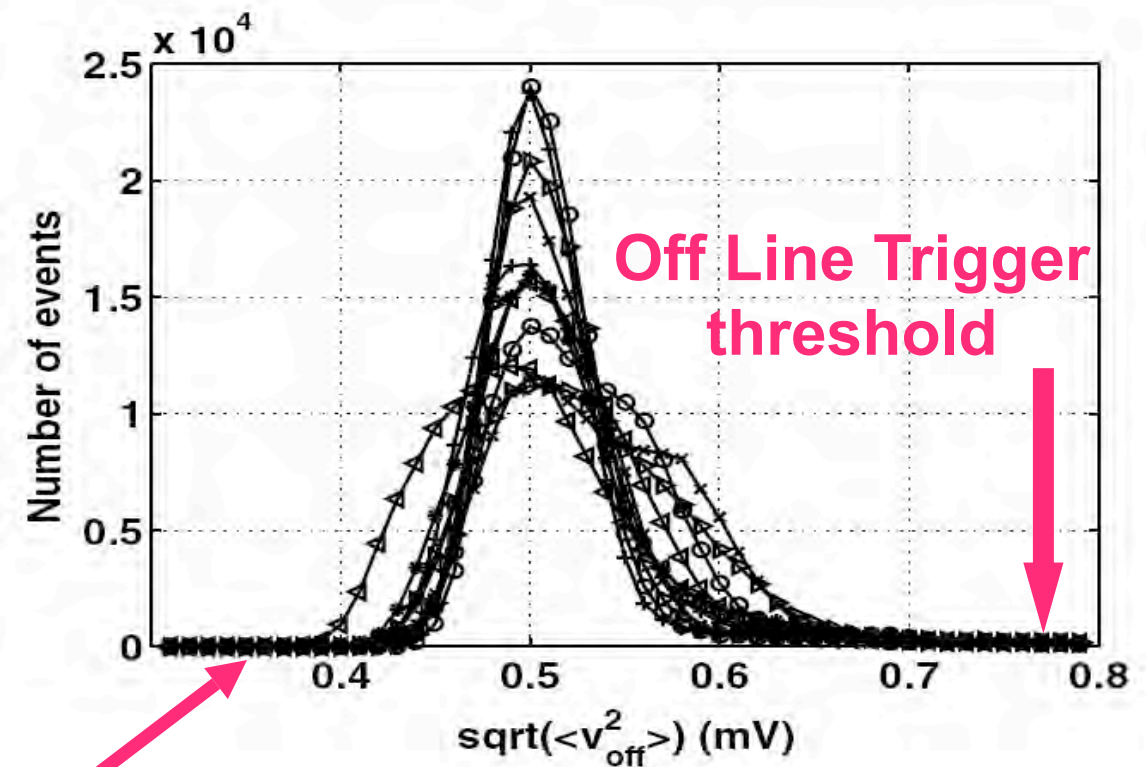
**=>Taux de trigger On-line >> Taux de vrais transitoires...  
qui sont identifiés off-line par analyse de la forme d'onde et par  
Un critère de sélection en utilisant le nombre d'antennes touchées**



# The Off-line Transient detection (and datation)

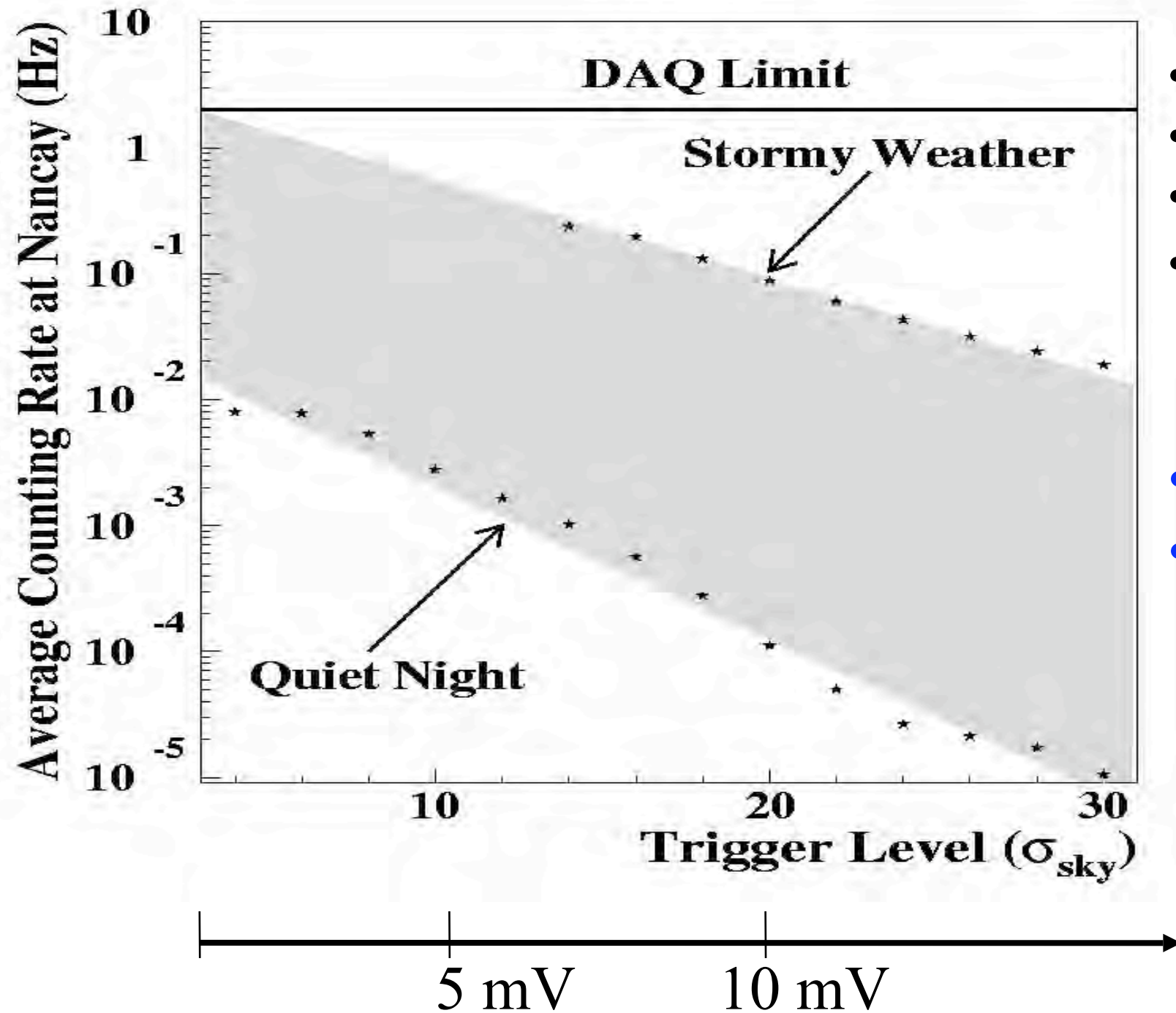


Distributions of the ground floor signal in the 40-70 MHz band after cross calibration of the antennas gains



# Trigger rate in 33-65 band with 1 antenna

Knowledge of the transient radio background



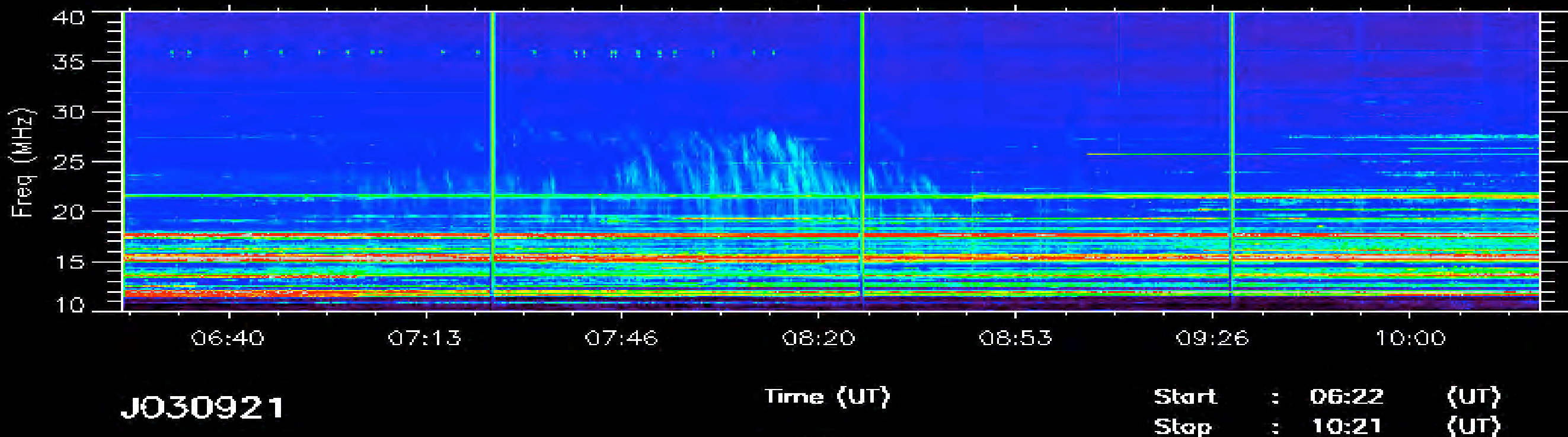
- Atmospheric conditions
- Day-Night modulations
- Human activities
- Solar activities

- Low rate  $< 1$  Hz
- 100 % duty cycle

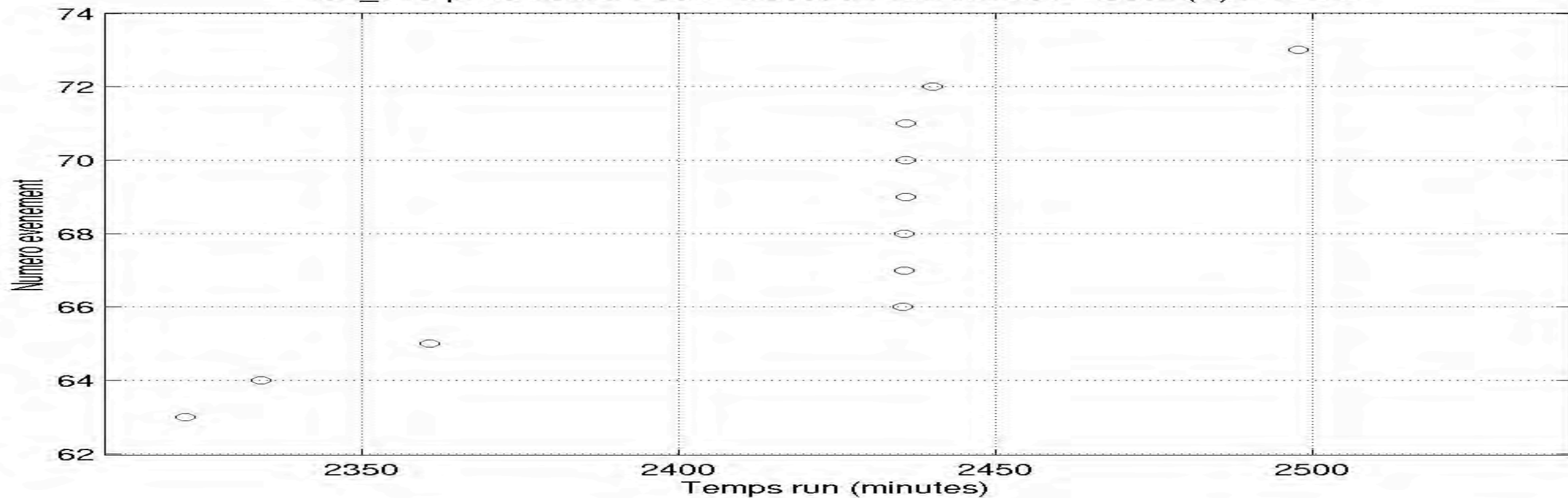
Trigger with antenna  
is possible  
in stand alone mode

# Corrélations CODALEMA-DAM: evt. impulsif de Jupiter

RIP ?

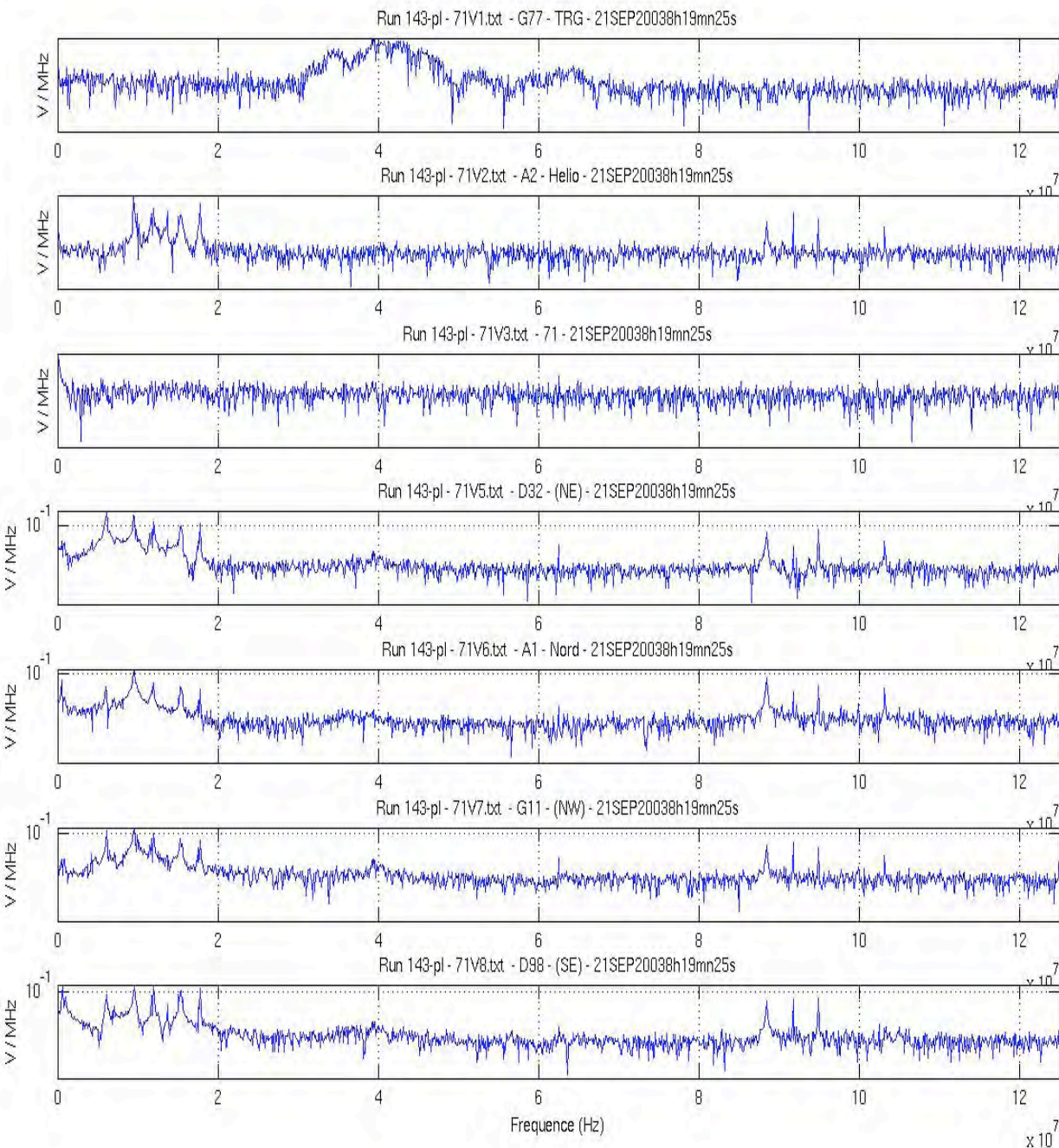


run\_143-pl du 19SEP2003 - Debut a : 15h43m38s - Seuil (V) : -10E-3

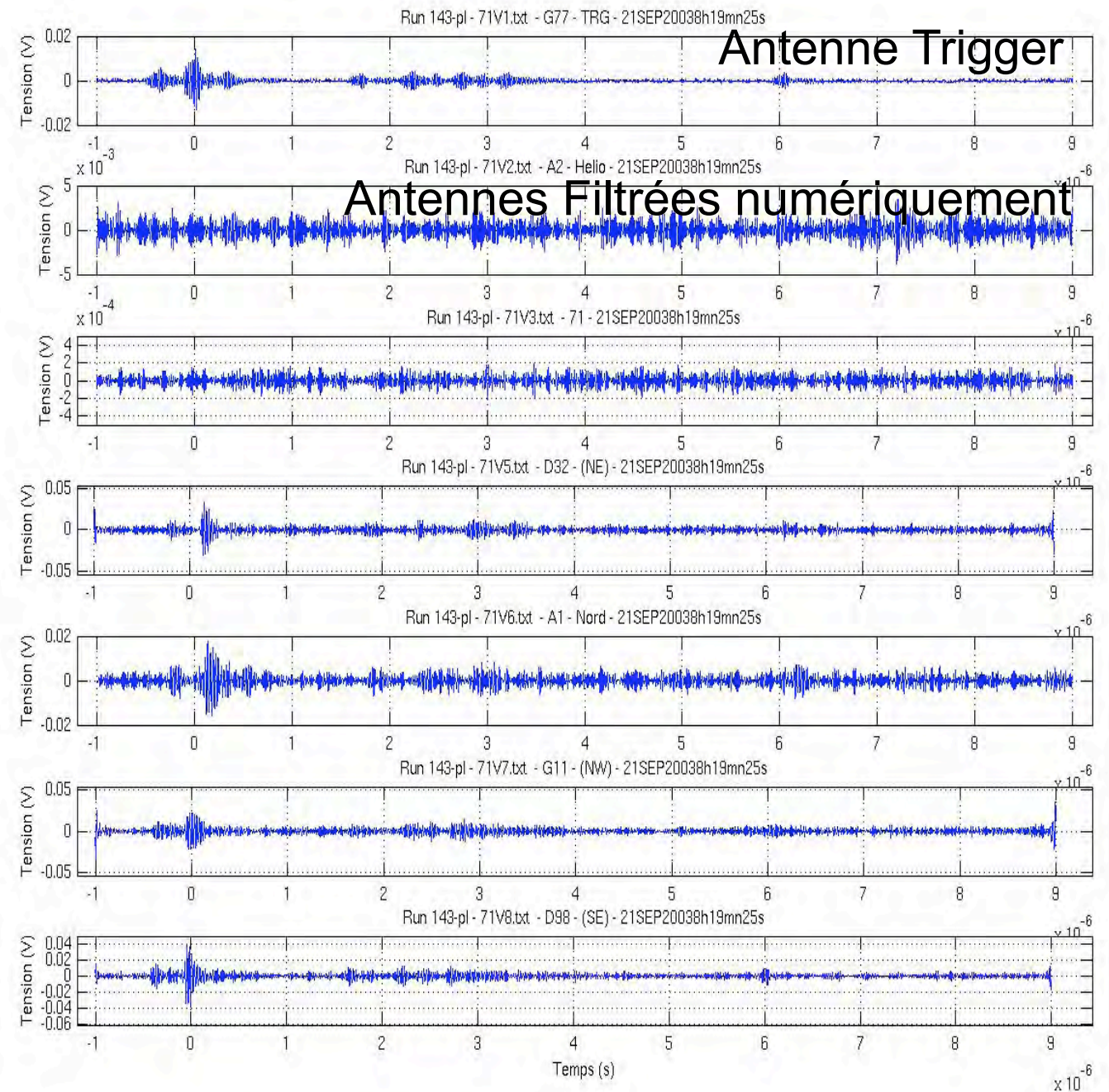




# Candidat d'évènement Jupiter impulsional?



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:

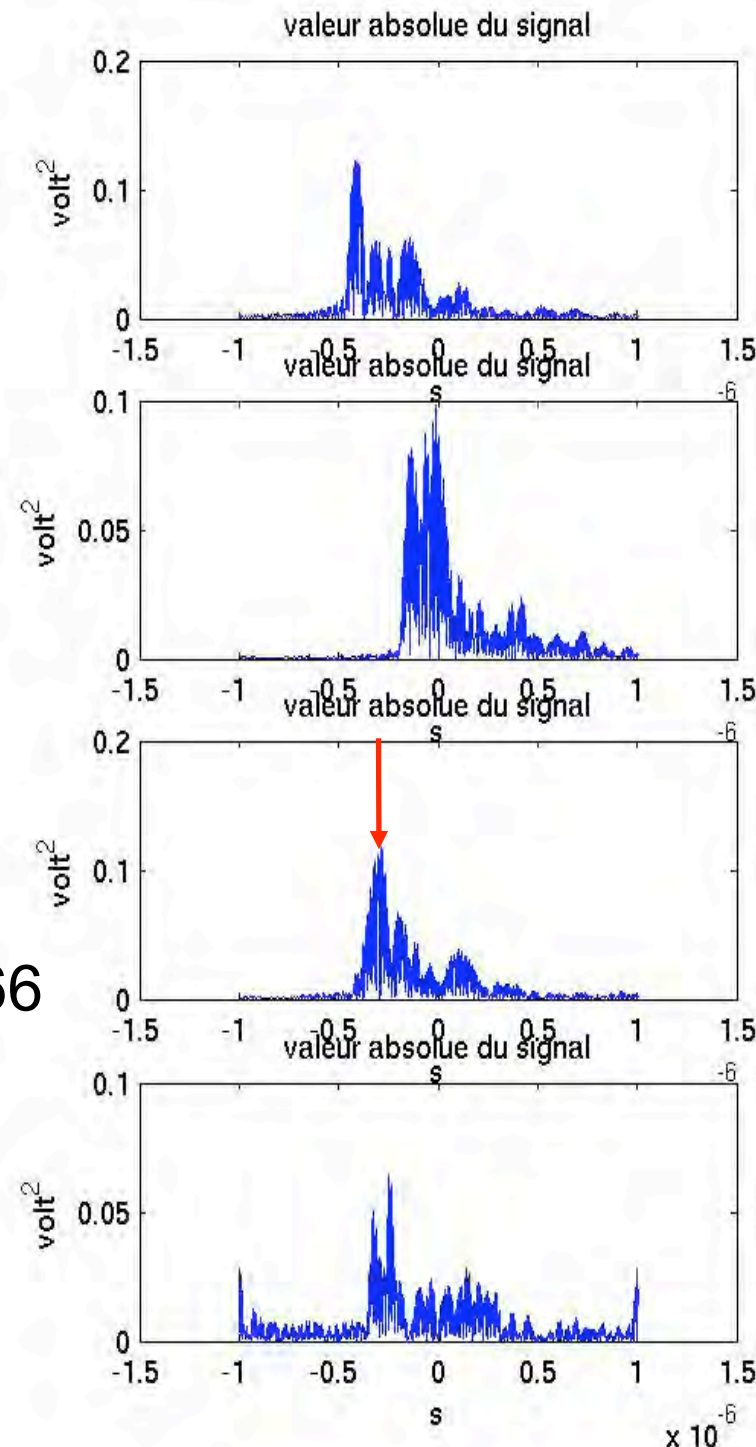
- Intrinsically: 500 Ms/s  $\Rightarrow \Delta t \sim 2\text{ns}$

**But**

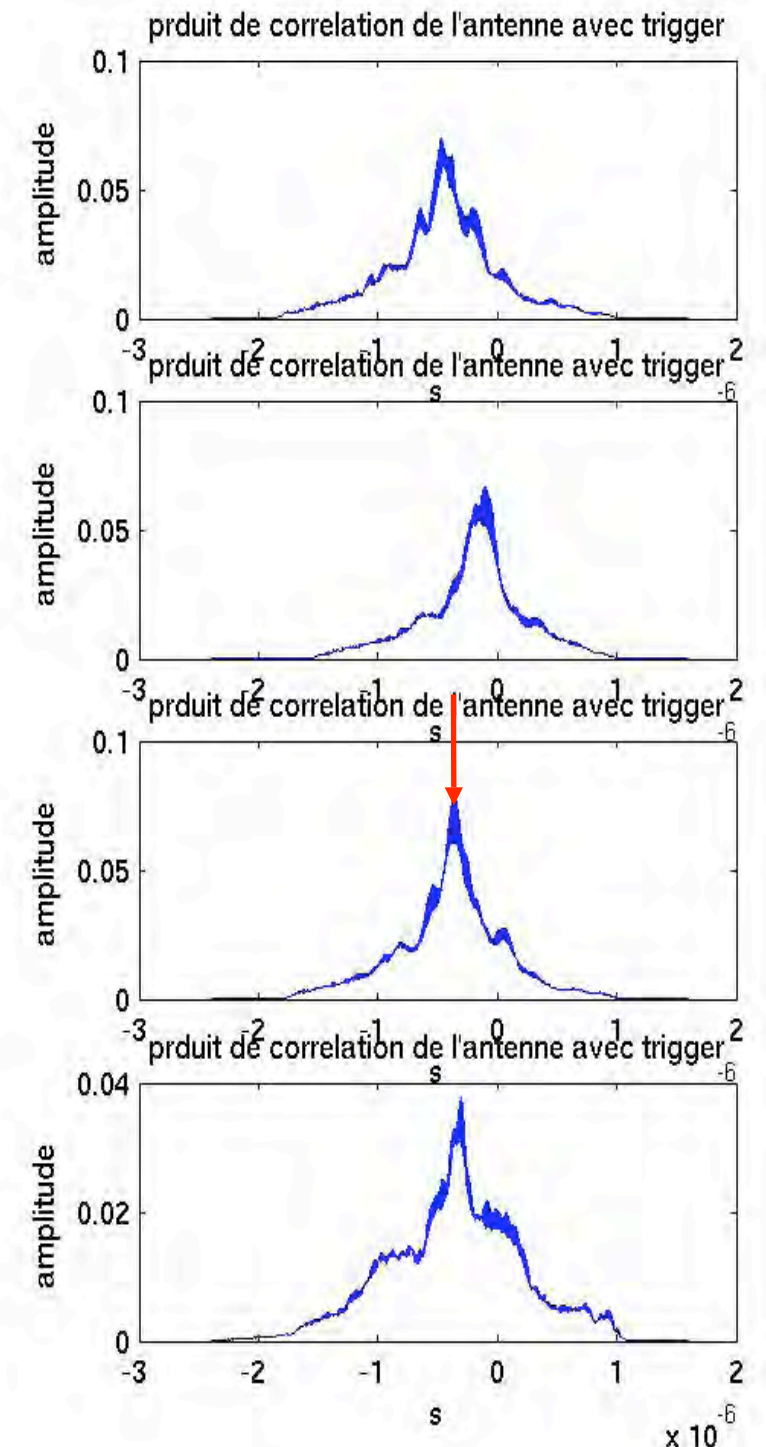
- Filter low cut-off: 33 MHz  $\Rightarrow V^2(t) \sim 66$  MHz

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

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



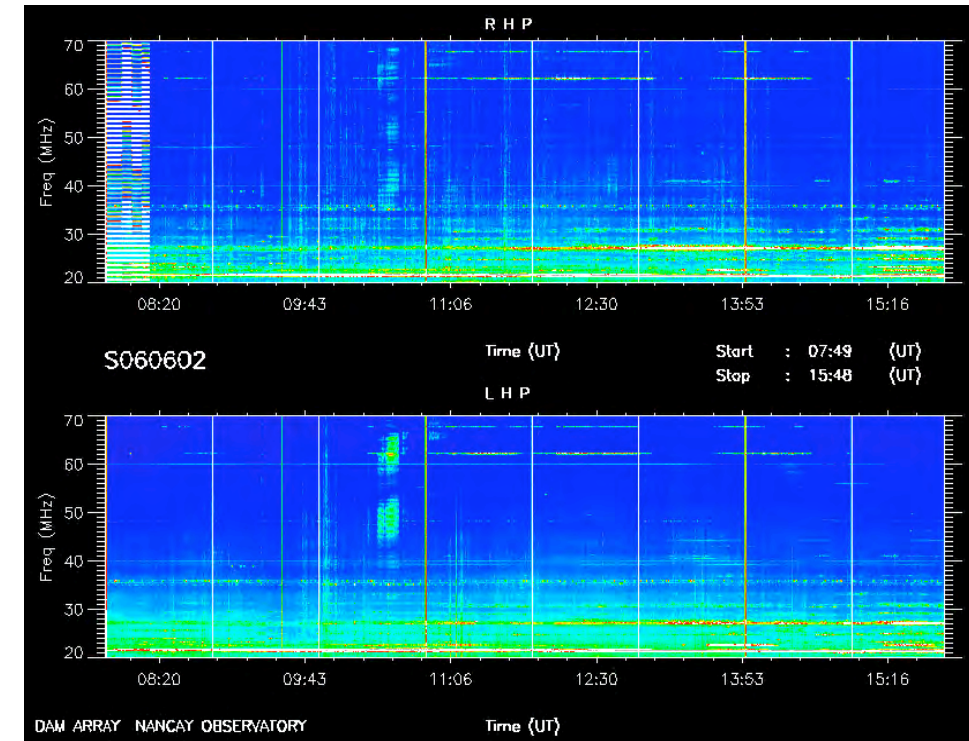
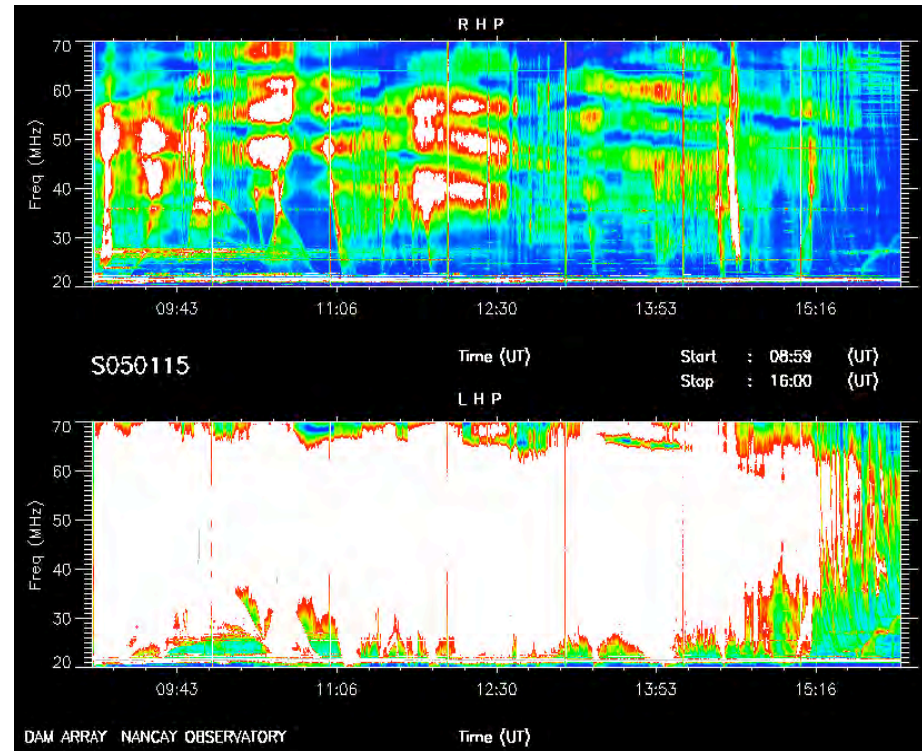
Antenna-Antenna  
correlation function



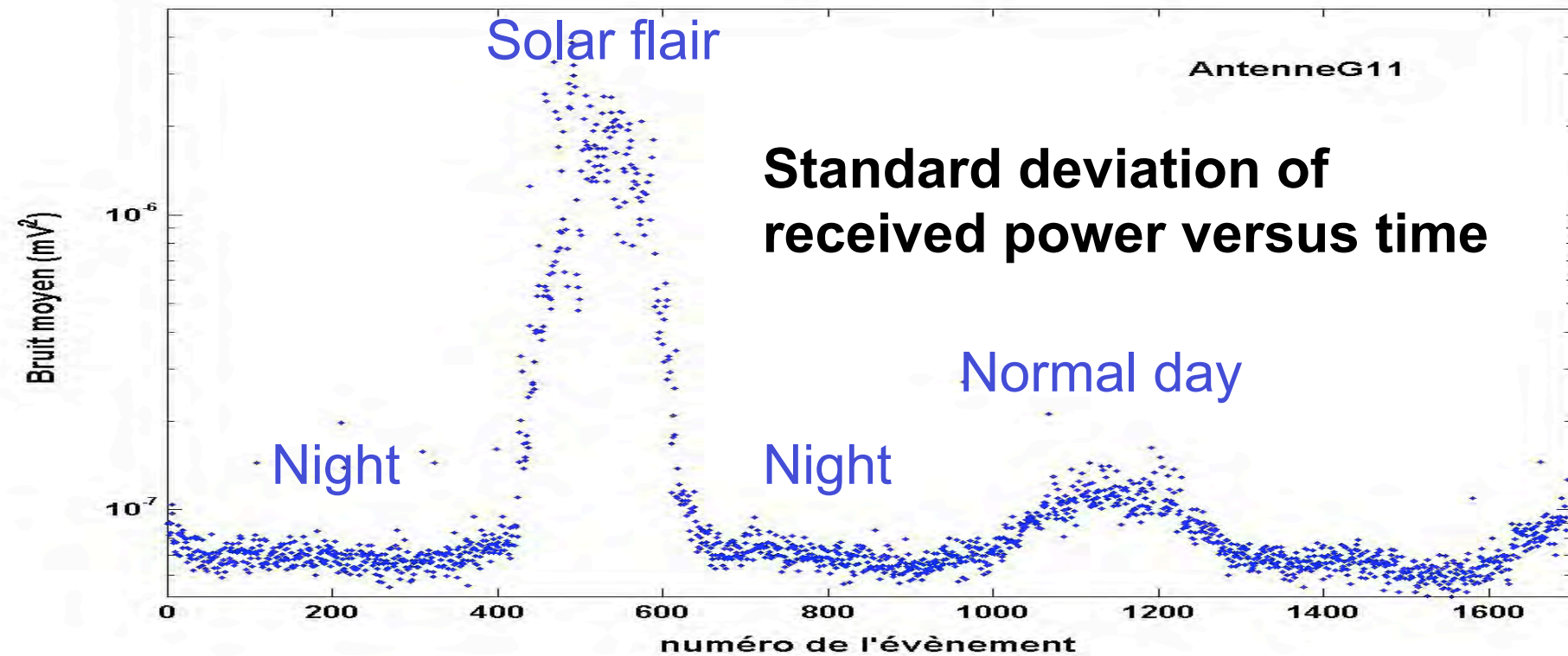
# Triangulation performances (1)

(using Solar bursts)

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



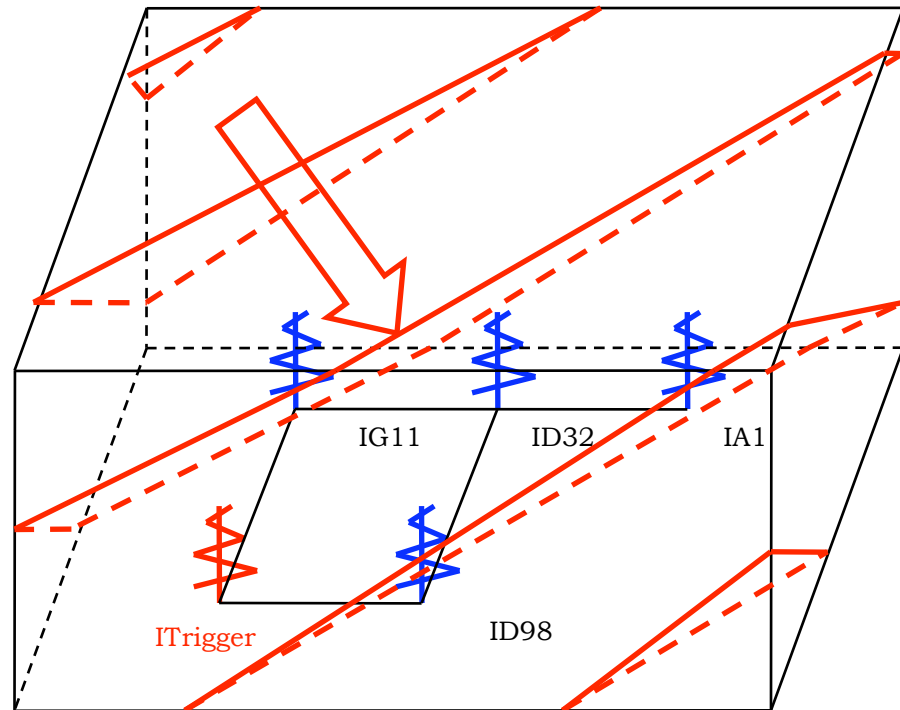
solar flare in active region  
AR10720 on 2005 Jan. 15





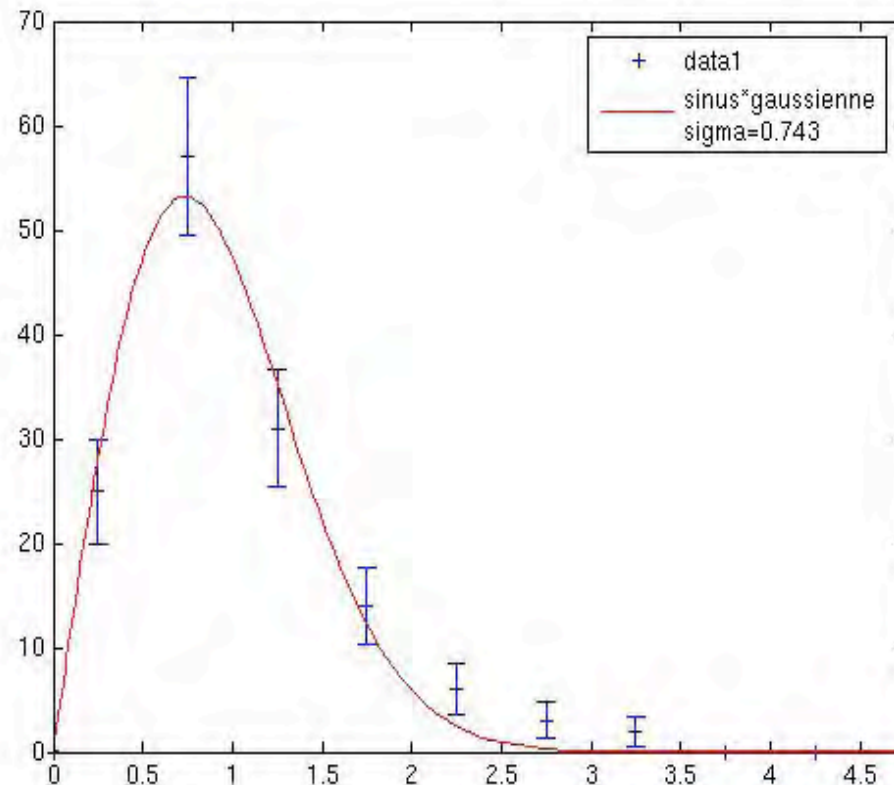
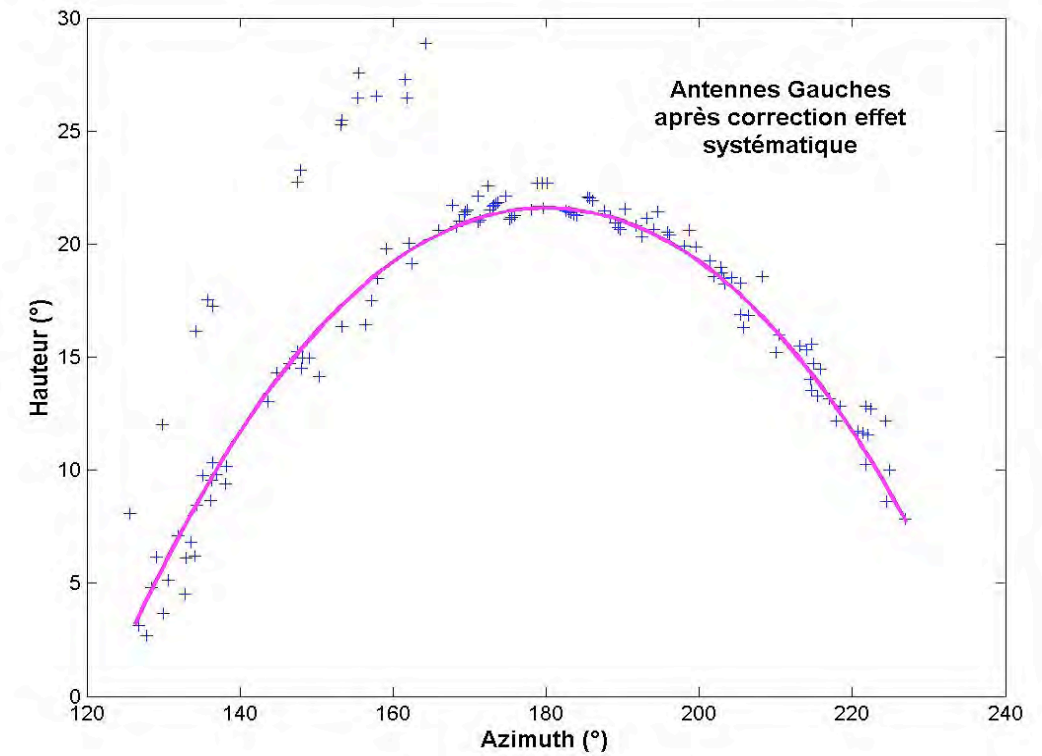
# Triangulation performances (2)

(using Solar bursts)



**Principle of the triangulation**

**Reconstructed directions versus sun ephemerids**

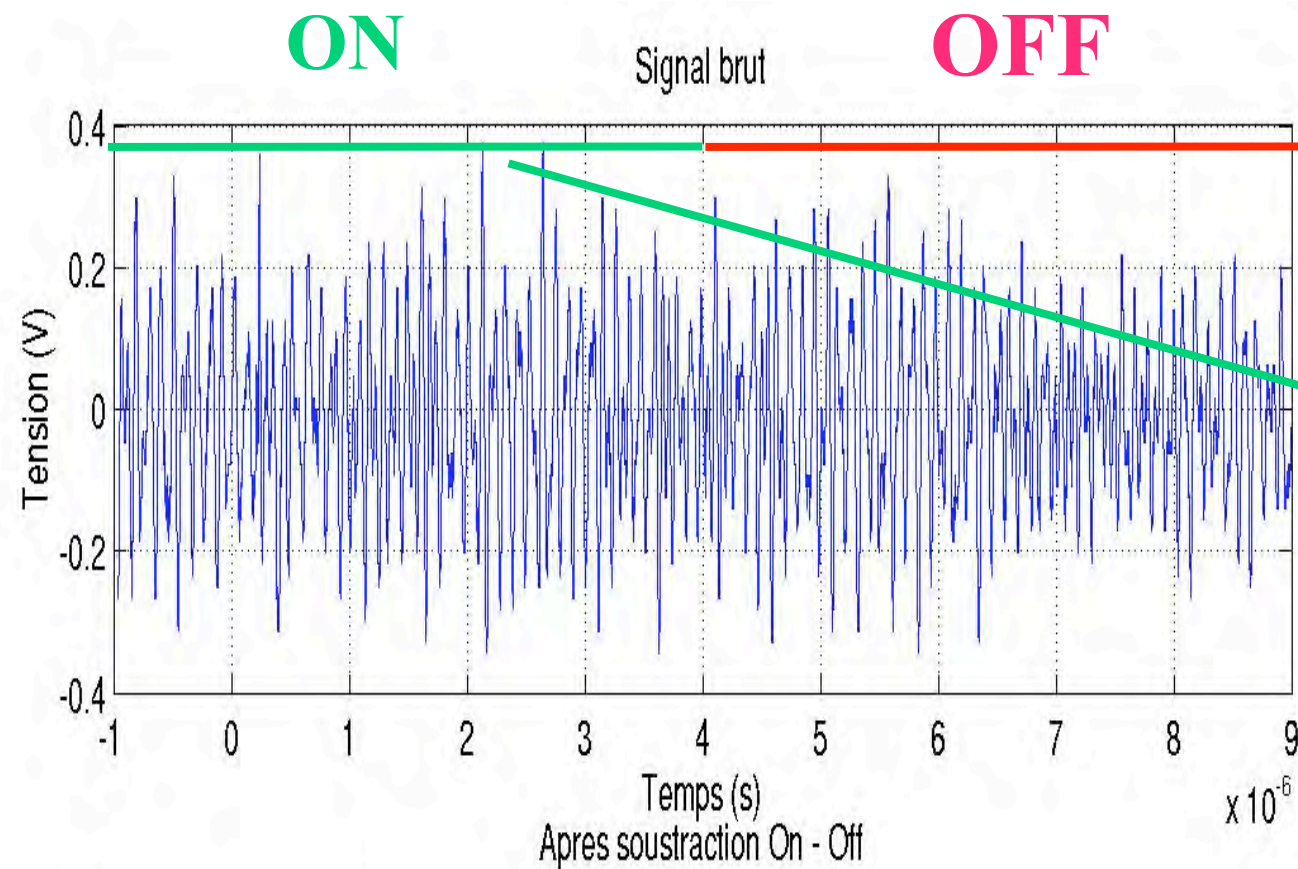


**Distribution of the Residues**

**Direction accuracy**

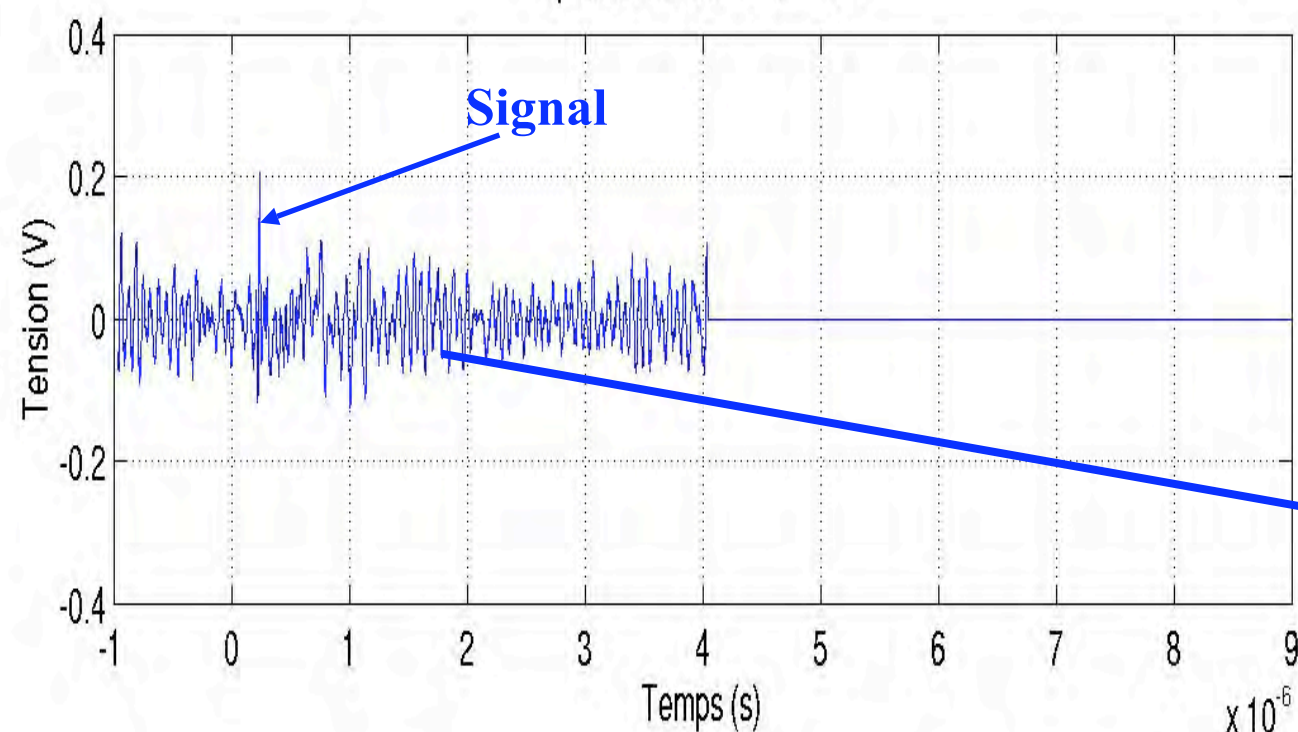
$$\sigma = 0.74^\circ$$

# 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  $j\Phi_{on}(f)$



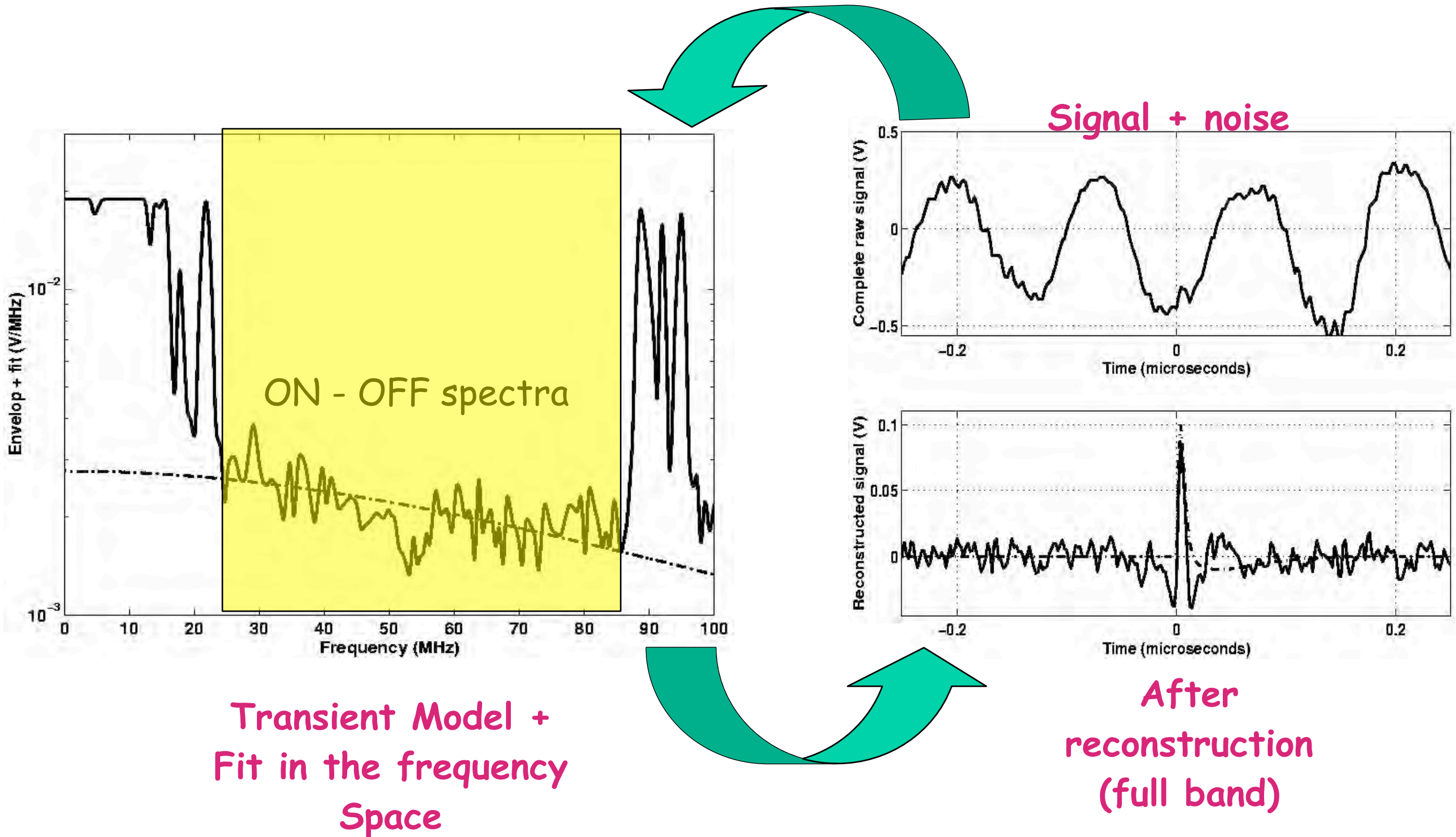
## Hypothèse:

- 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

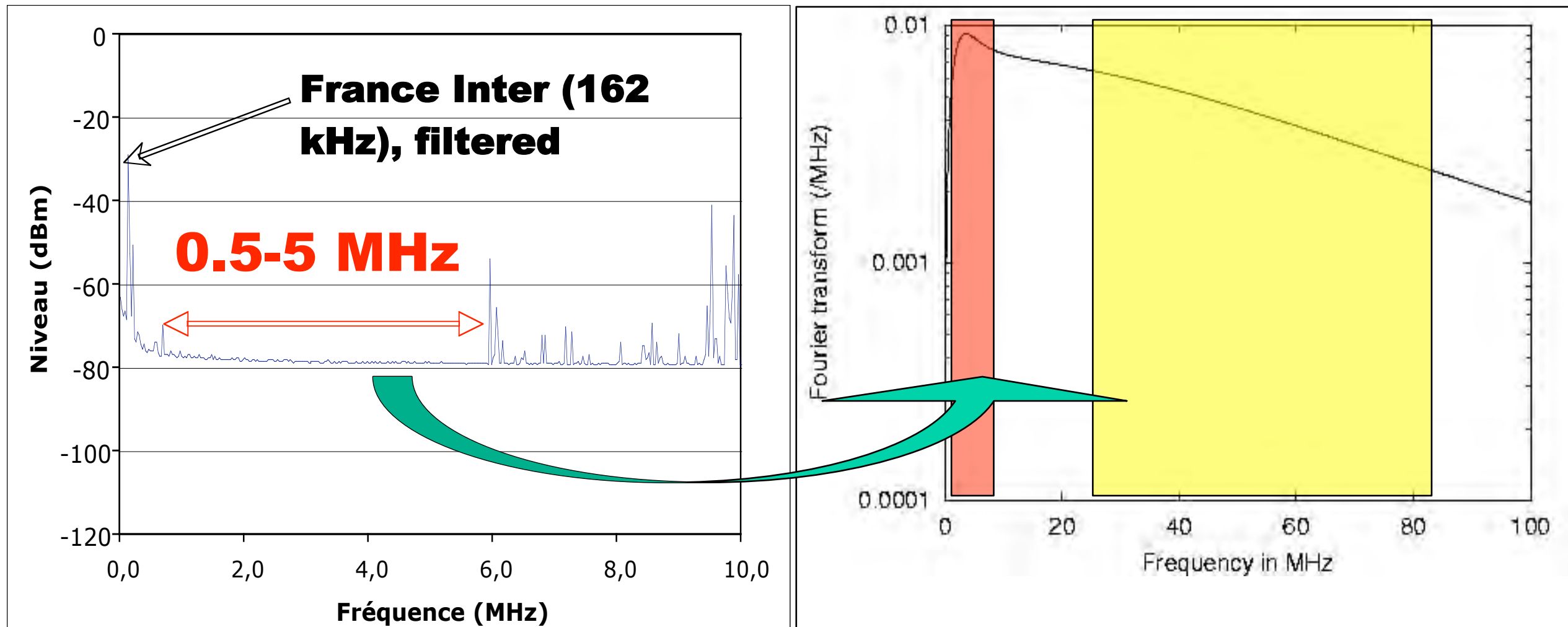
via un filtrage FFT + un modèle de transitoire





# 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)



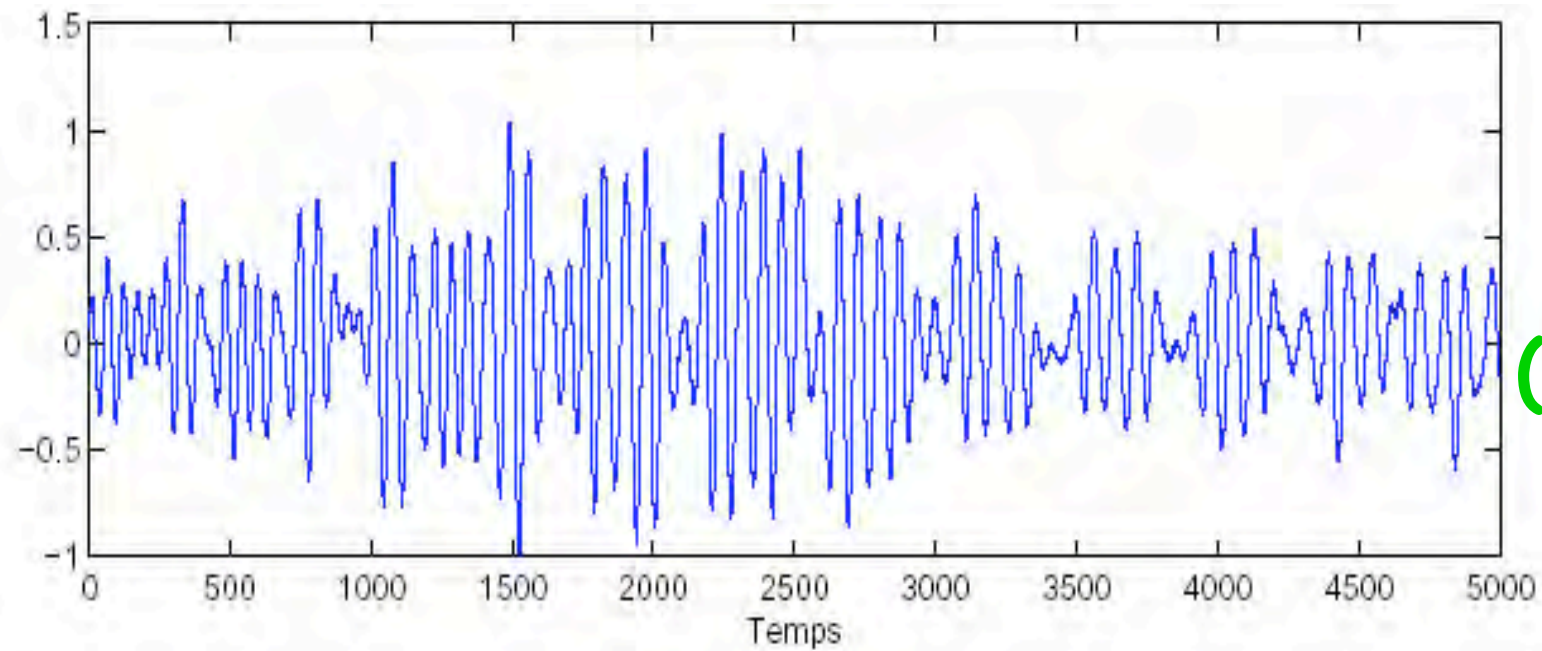
Mais la contribution basse fréquence n'est pas systématiquement accessible (alternance jour/nuit)

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

via un filtre LPC

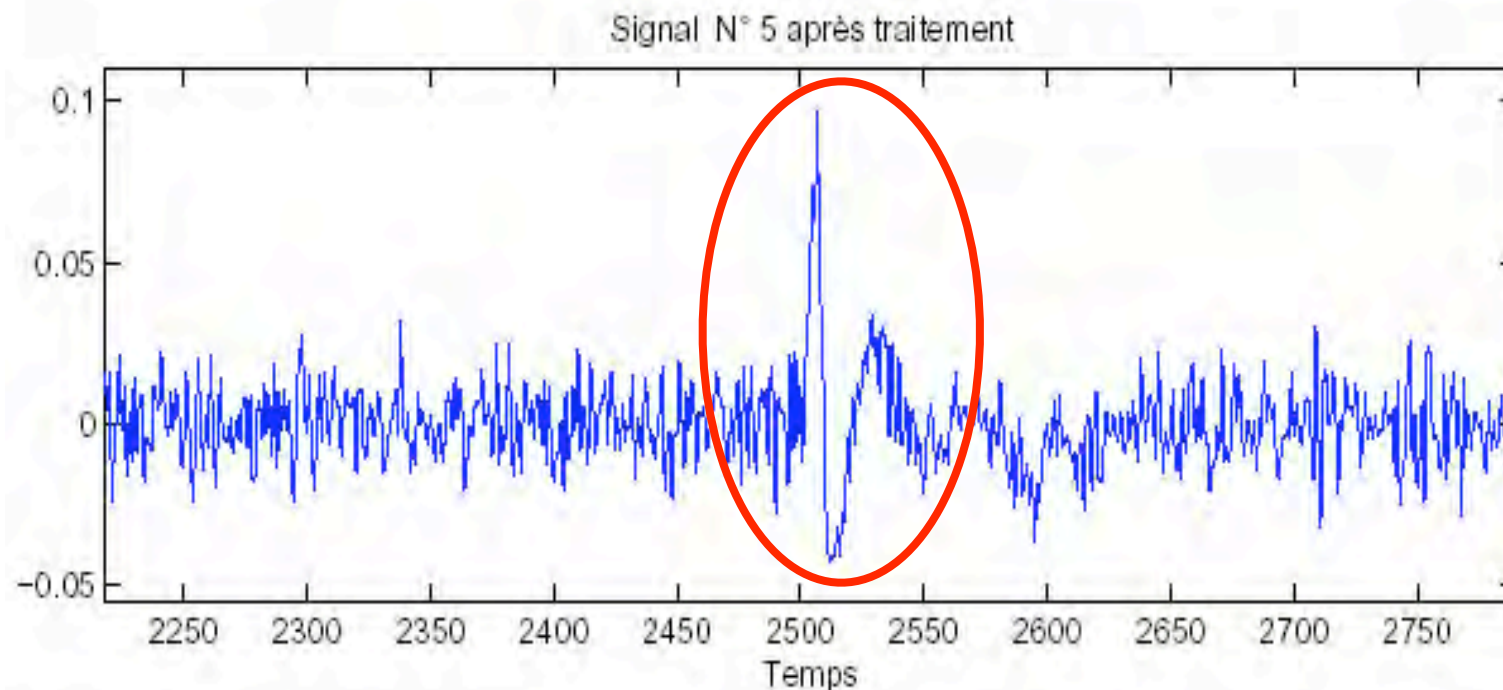
Adaptative optimal filtering + wavelet analysis

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



Signal  
(noise+ pulse)

=>Time  
resolution: ~ns  
adding Wavelet  
Analysis



Remaining  
signal

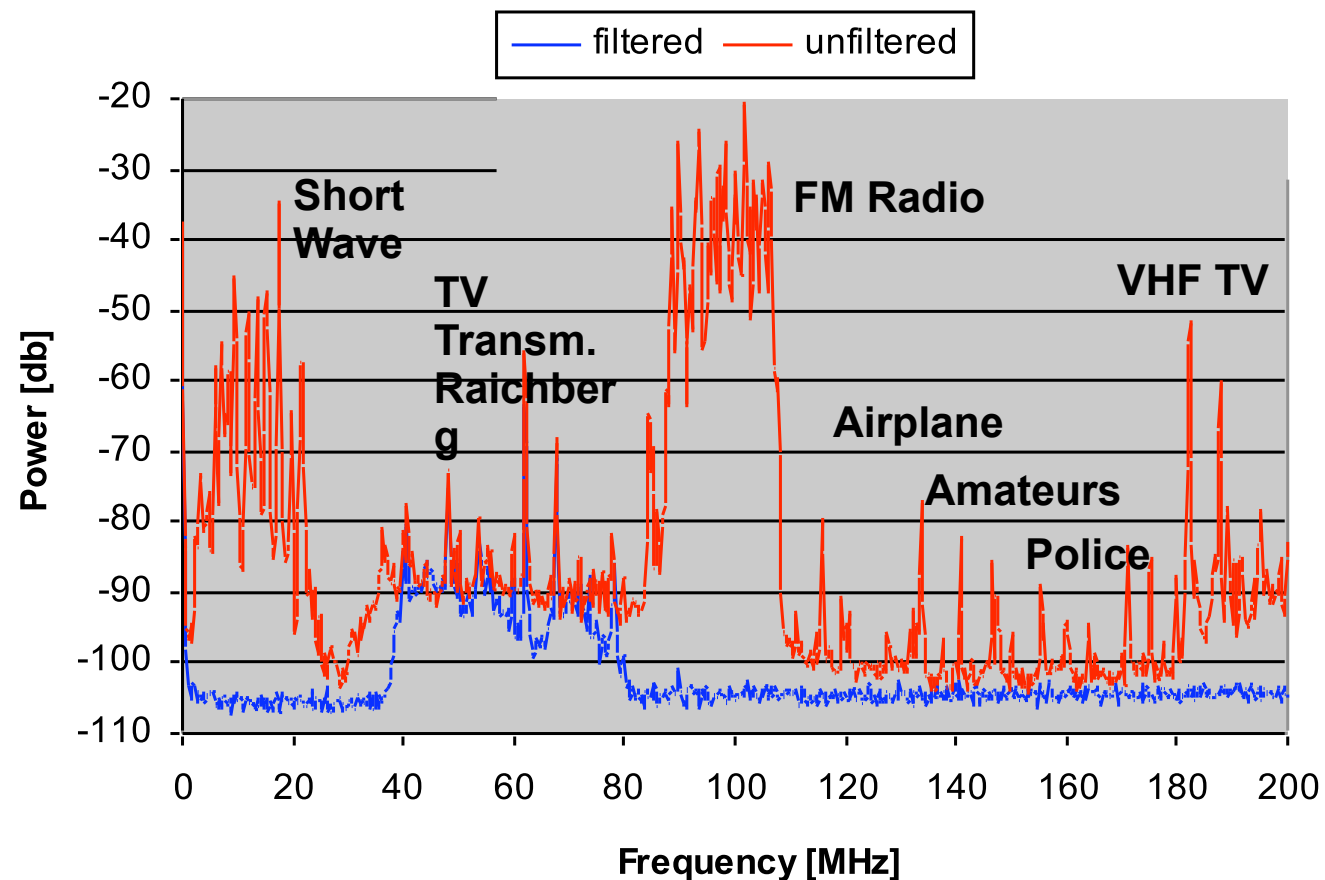


# Self-Triggered Receiver Concept of LOPES<sup>STAR</sup>

H. Gemmeke & O. Kroemer

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

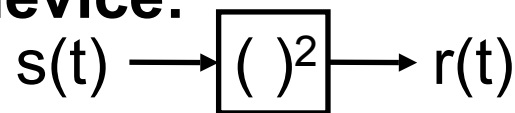
Interference rejection by filtering





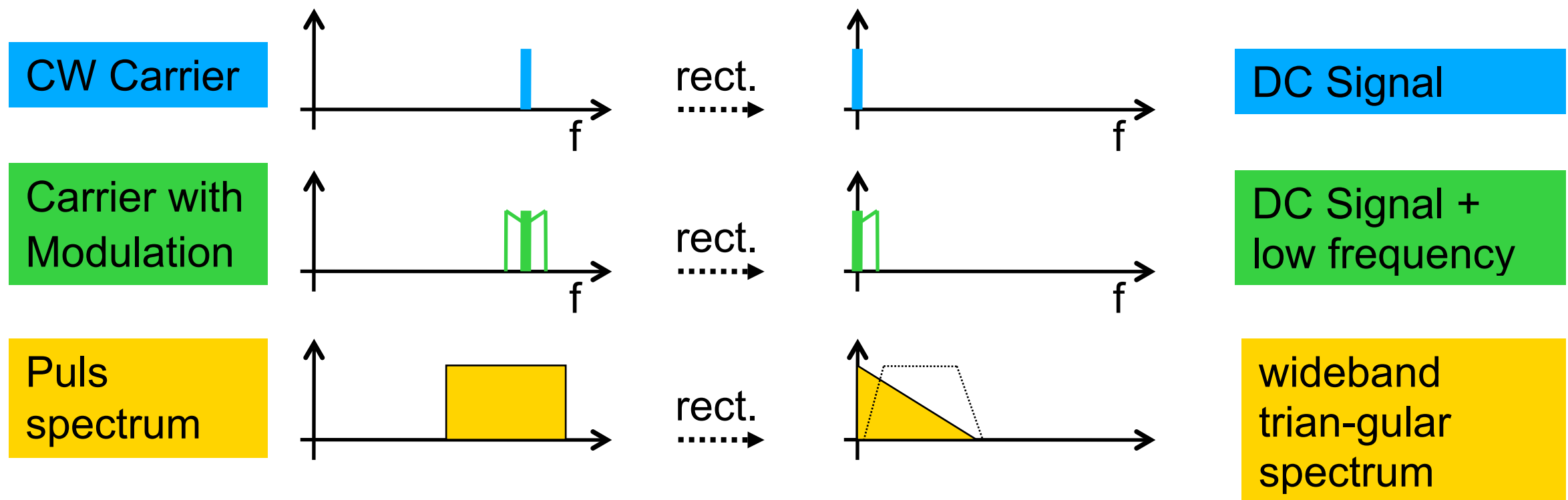
# Why driving the trigger with rectified RF ?

The rectifier is a squaring device:



Multiplikation (time domain)  $\rightarrow$  Convolution (frequency domain)

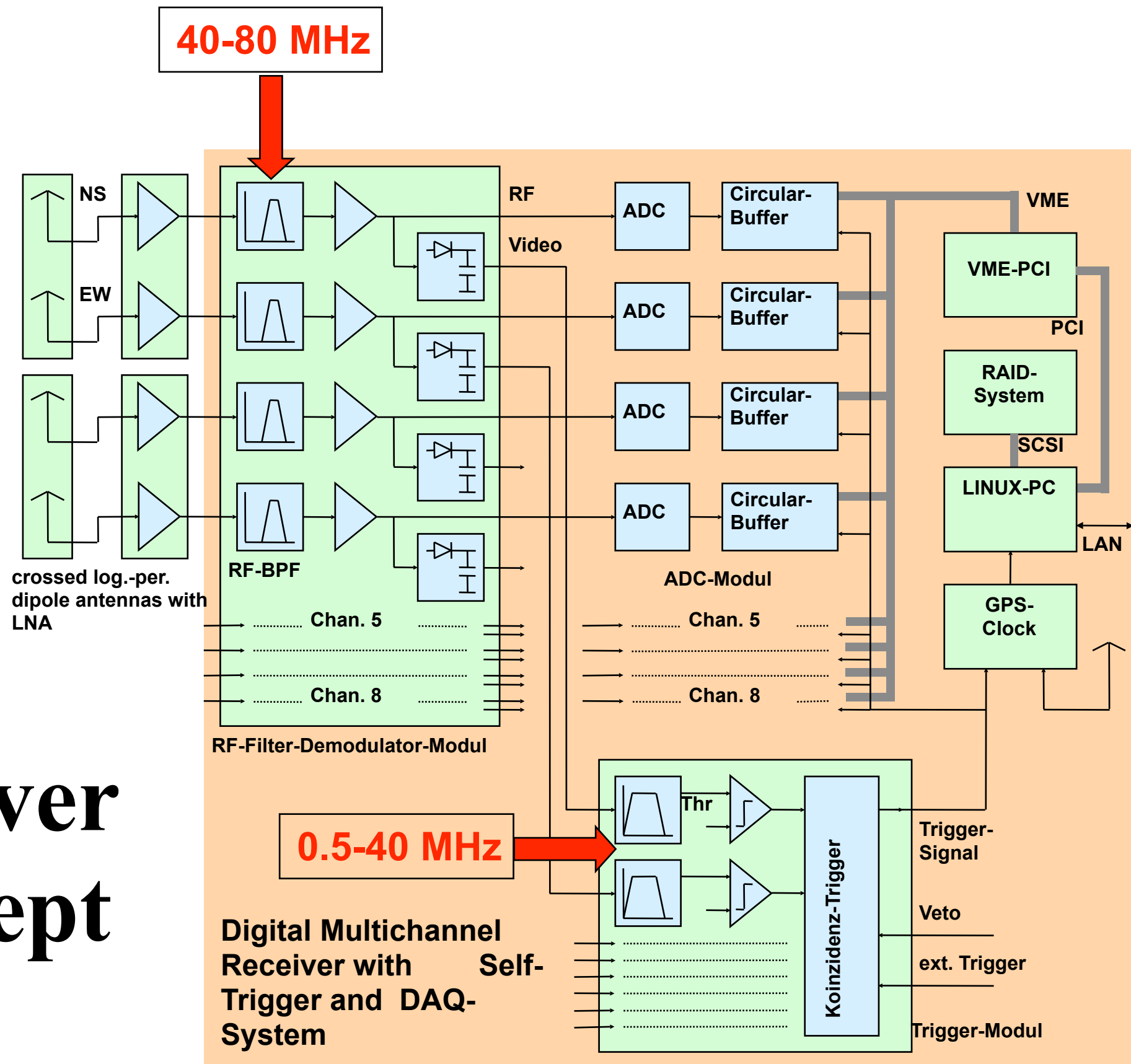
$$r(t) = s(t) \times s(t) \text{ ® } R(j\omega) = S(j\omega) * S(j\omega)$$



At Rectifier output:  
filtering

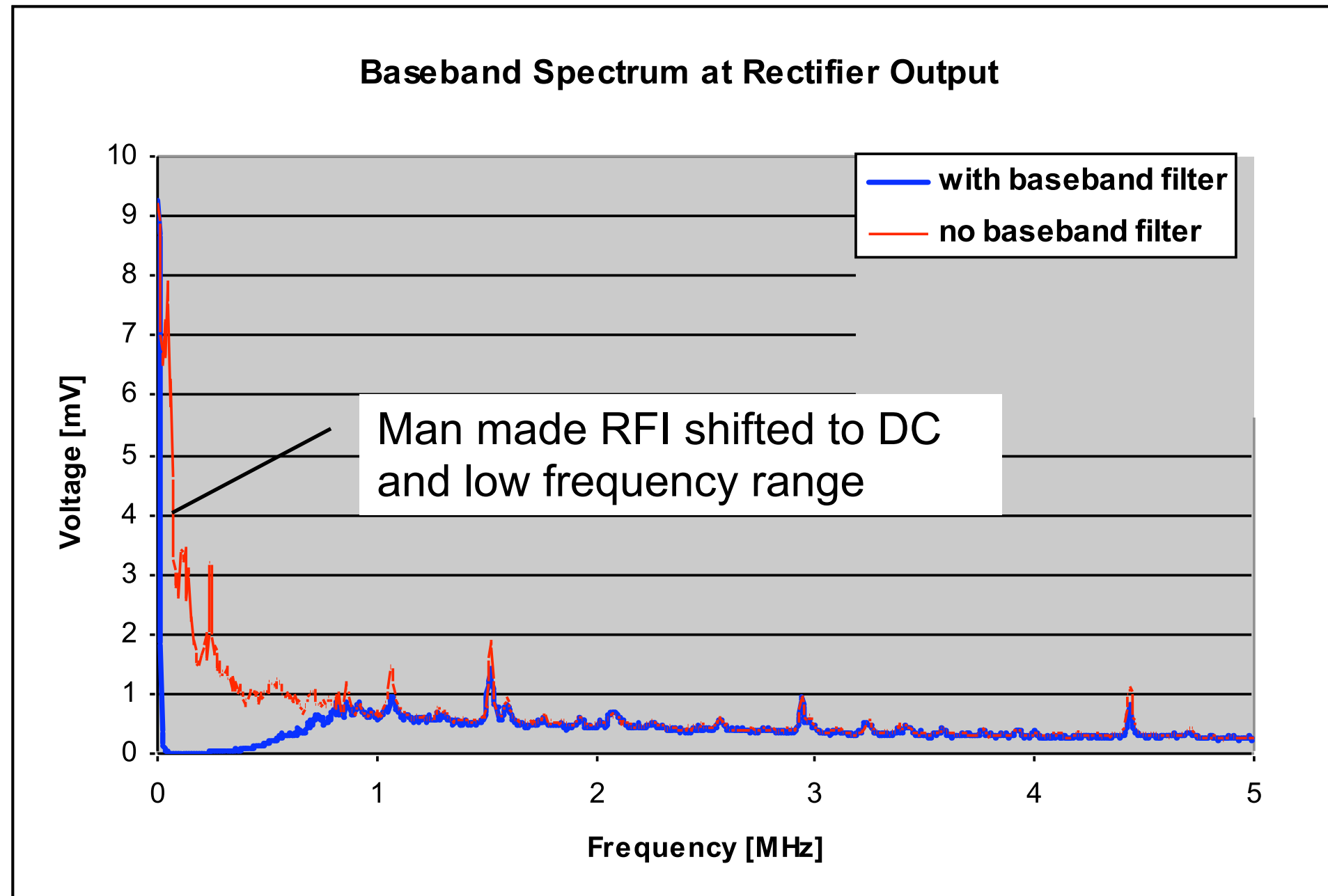
Man made RFI are DC or low frequency and may be seperated from puls spectrum by baseband

# Receiver Concept

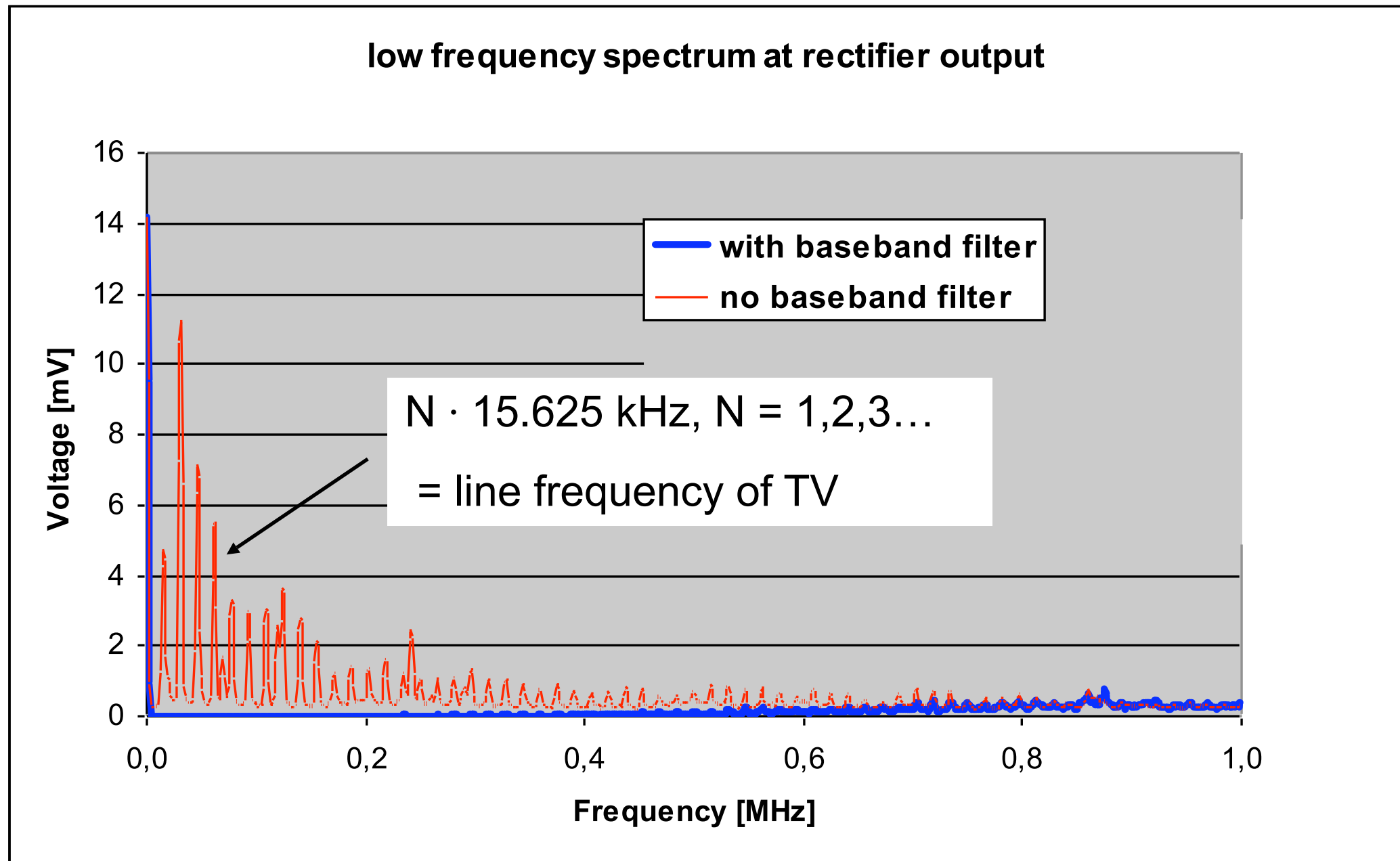




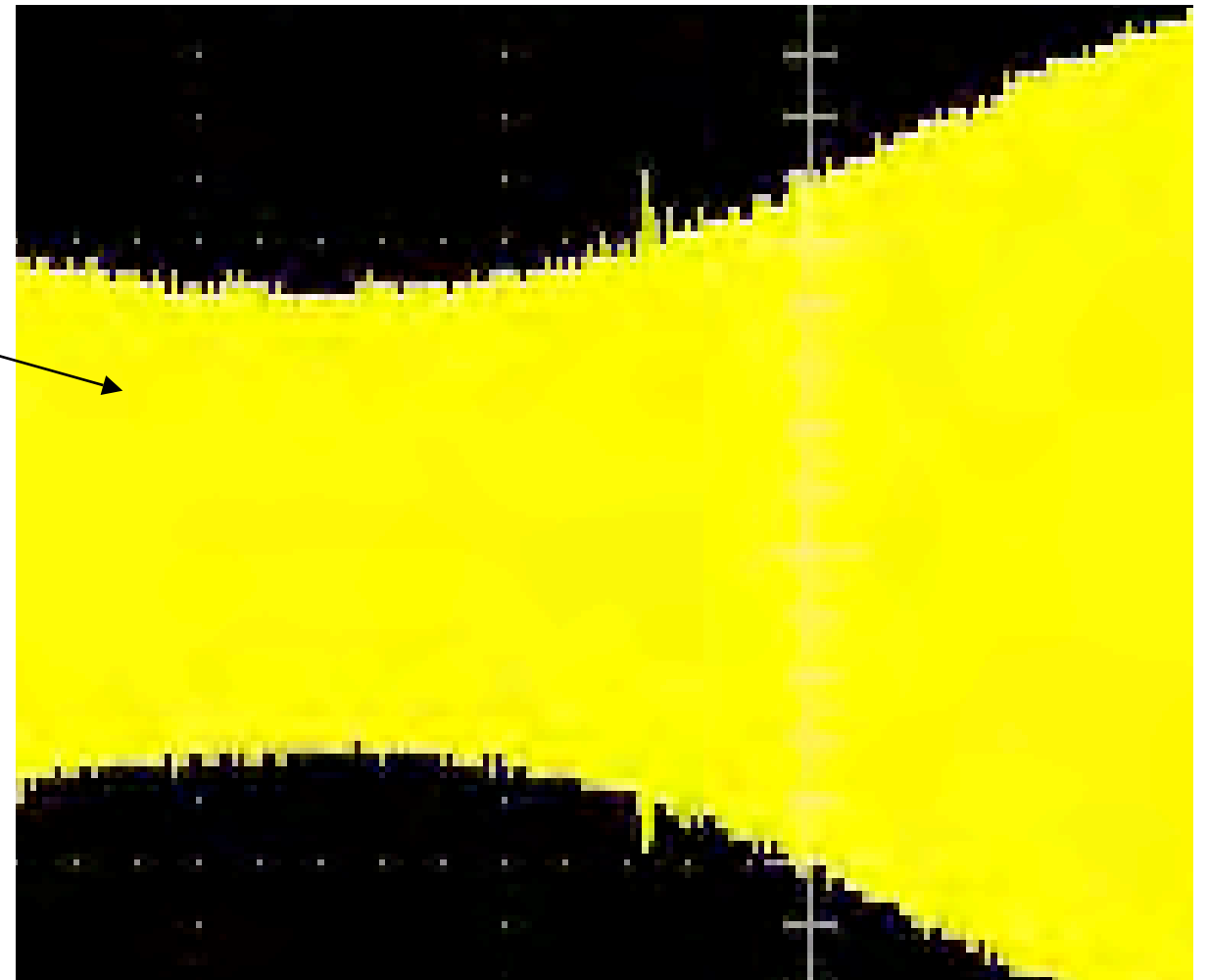
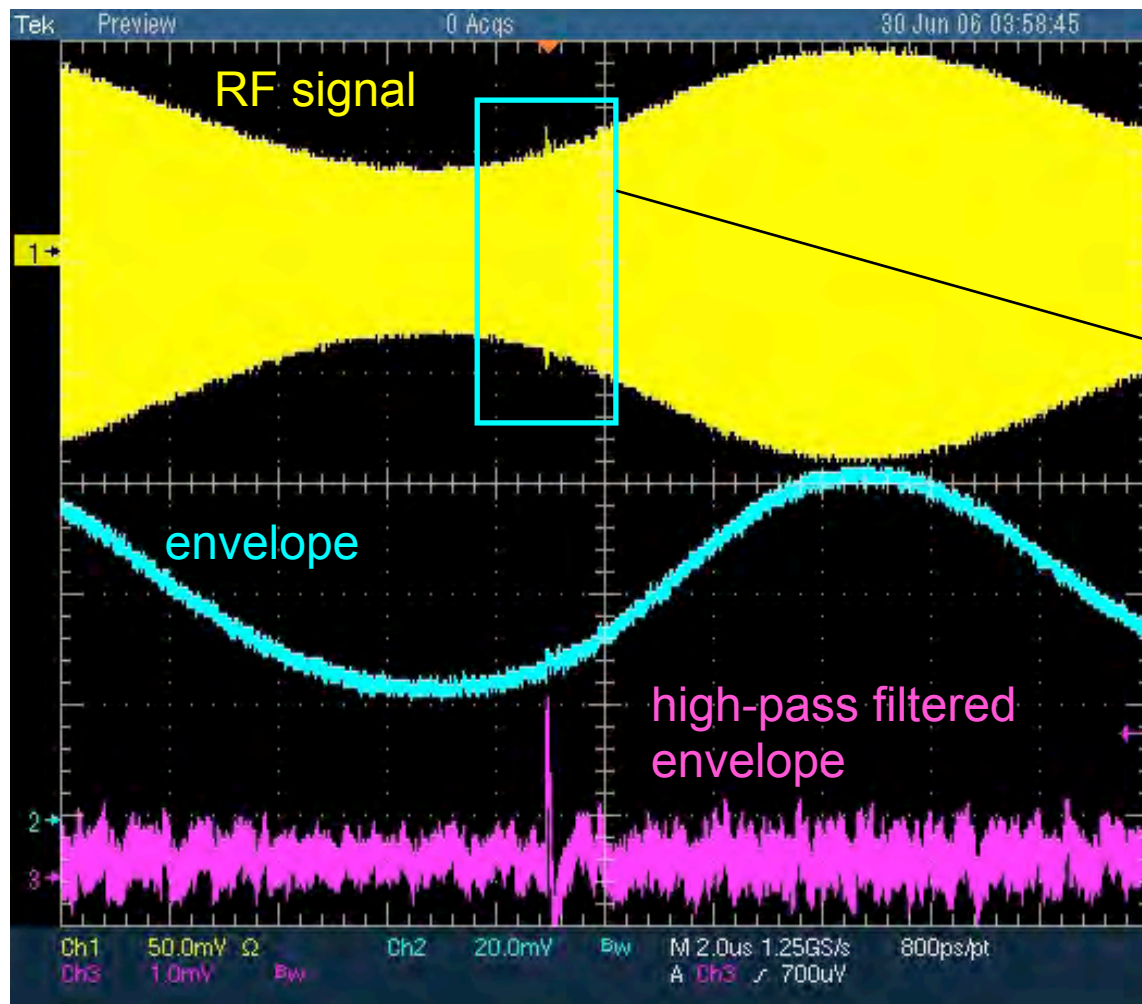
# Baseband spectrum at rectifier output



# Baseband spectrum at rectifier output

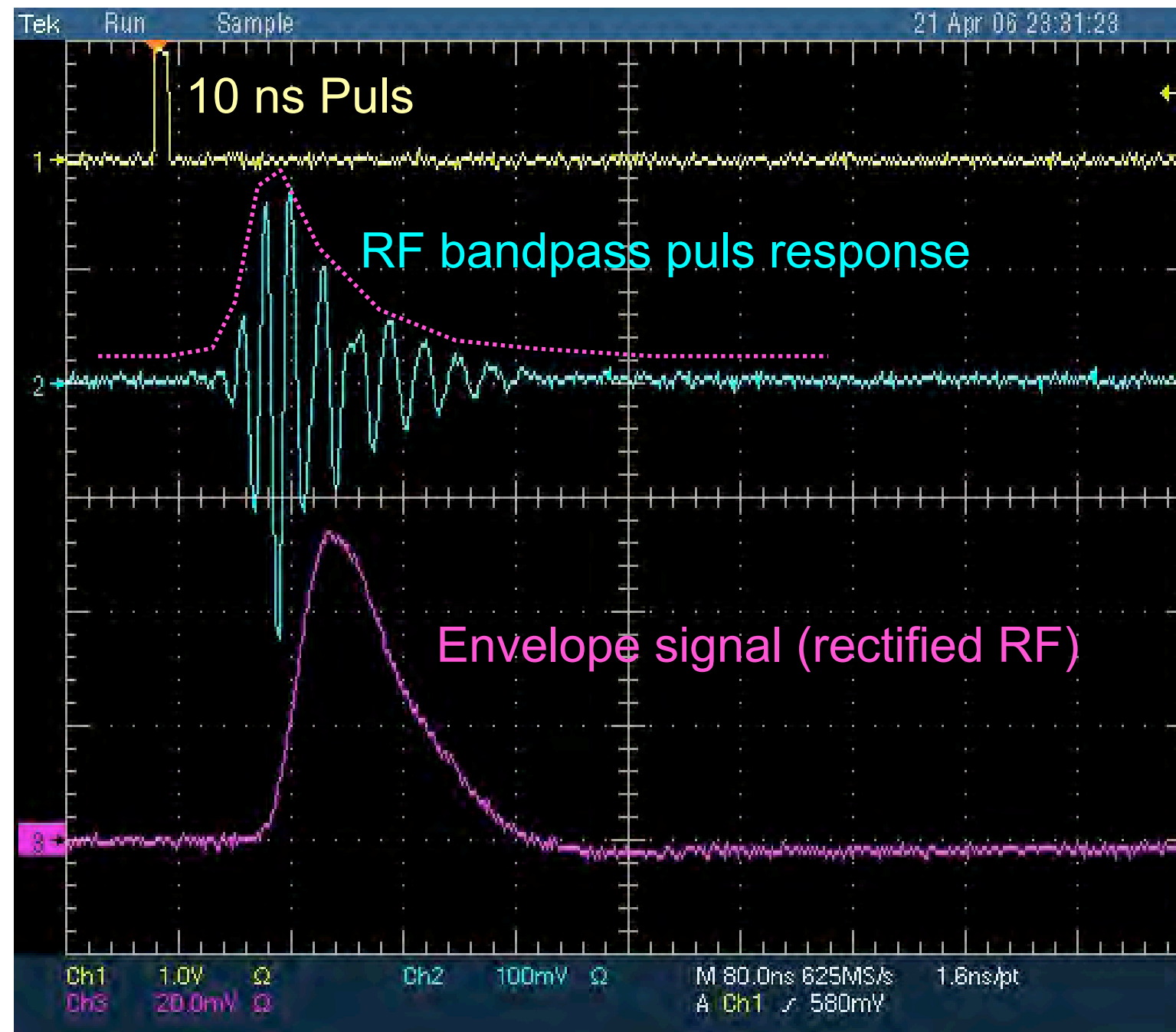


# Example of narrow band RFI rejection



50%-AM-modulated carrier with pulse

# Driving the trigger with envelope signals (rectified RF)





# Limits of self trigger

Noise distributions ?

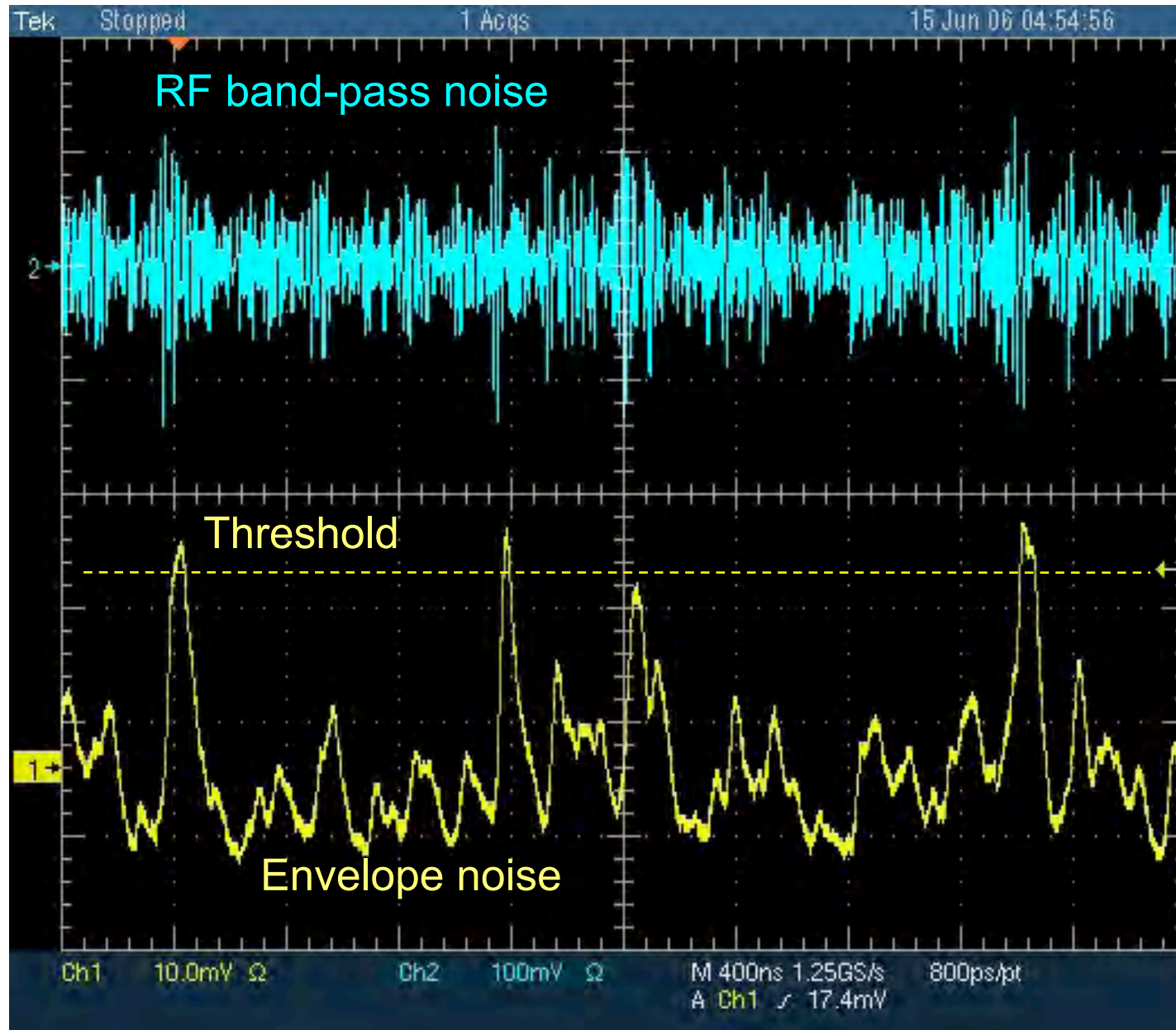
Probability that the envelope noise  
overtops the threshold ?

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)

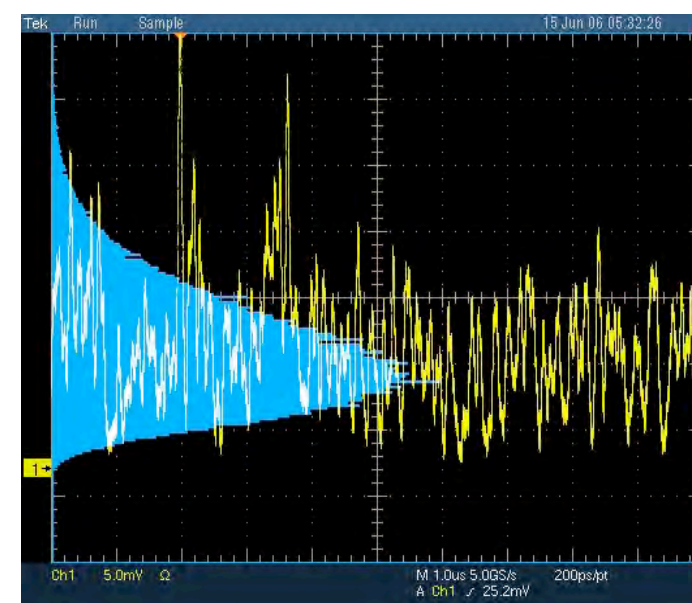
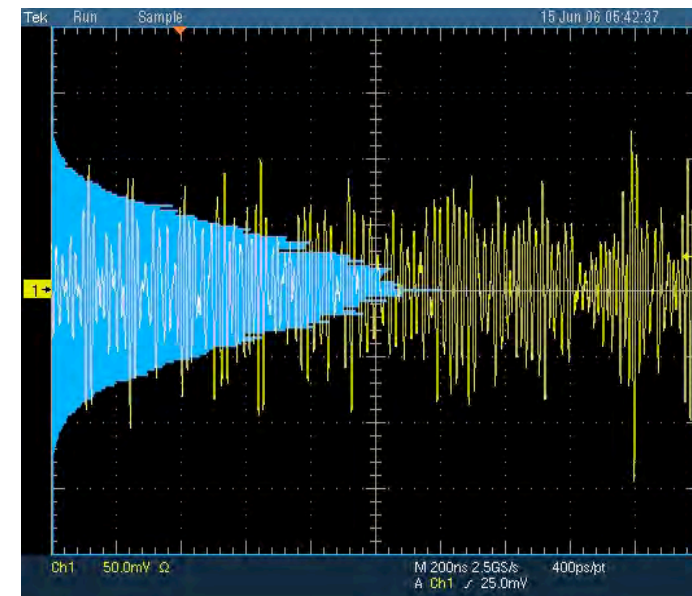
Gaussian distribution  $p(n)$  of RF signal  $n(t)$ ,  
variance = noise power ( $\sigma^2=N$ )

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

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  $\gamma$  TeV...=>... Pulsars ?**



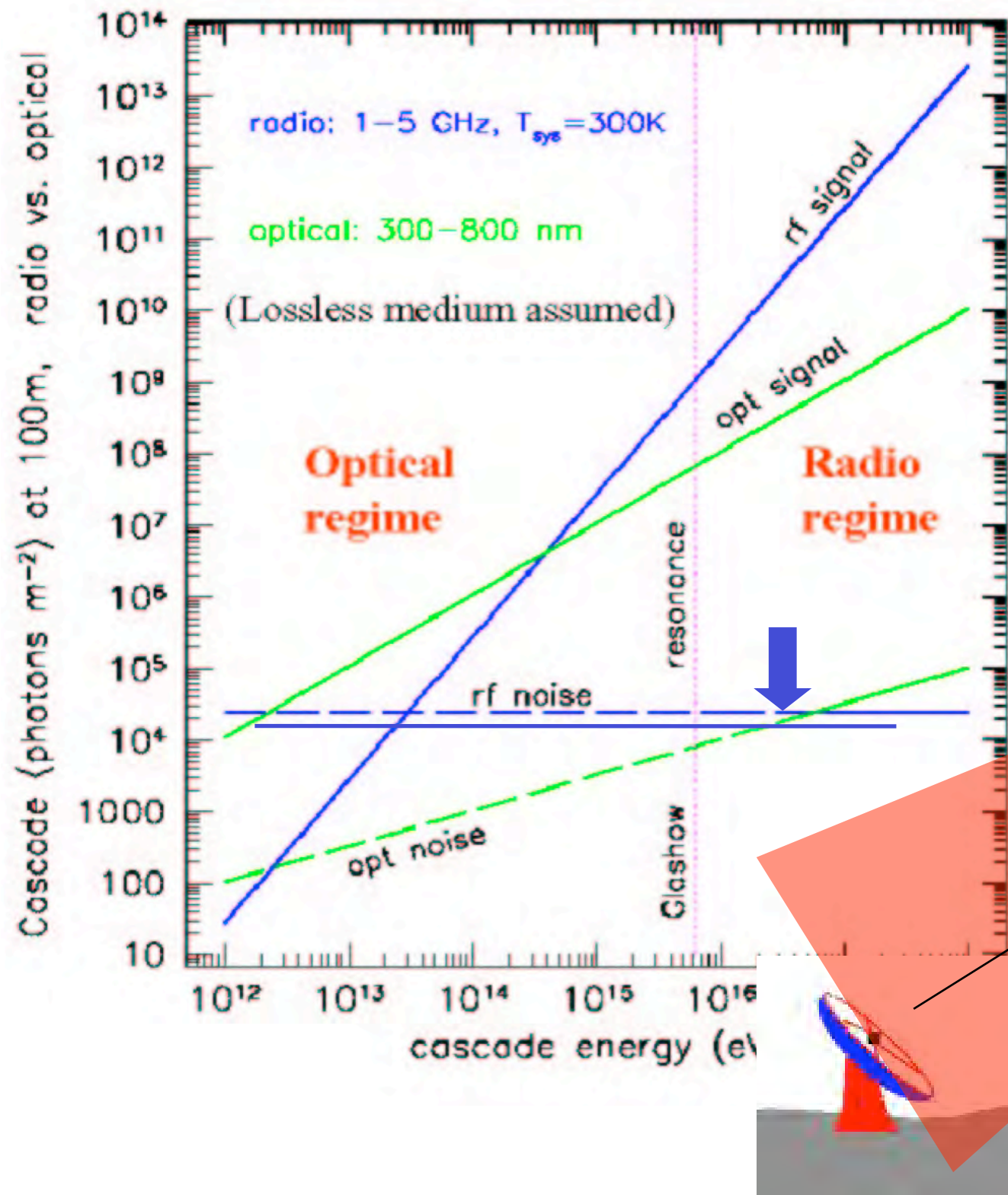
**ILLUSTRATION avec la détection des pulsars  
@ RT de Nancy**

- **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 ?

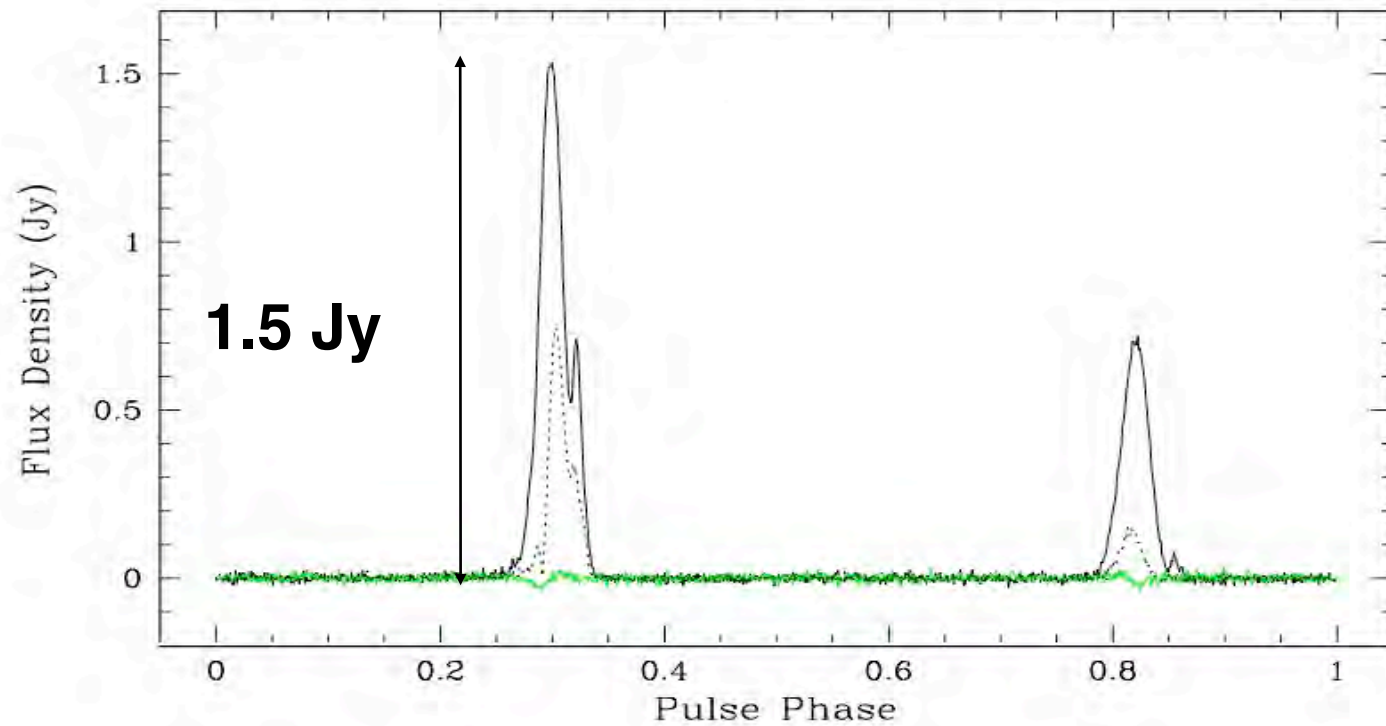


Télescope pointé ( $\sim$ mn d'arc @ RT de Nançay)  
 Détection du transitoire  $\rightarrow$  radio  
 Trigger et Analyse en forme d'onde  $\sim$  méthode CODALEMA

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...)



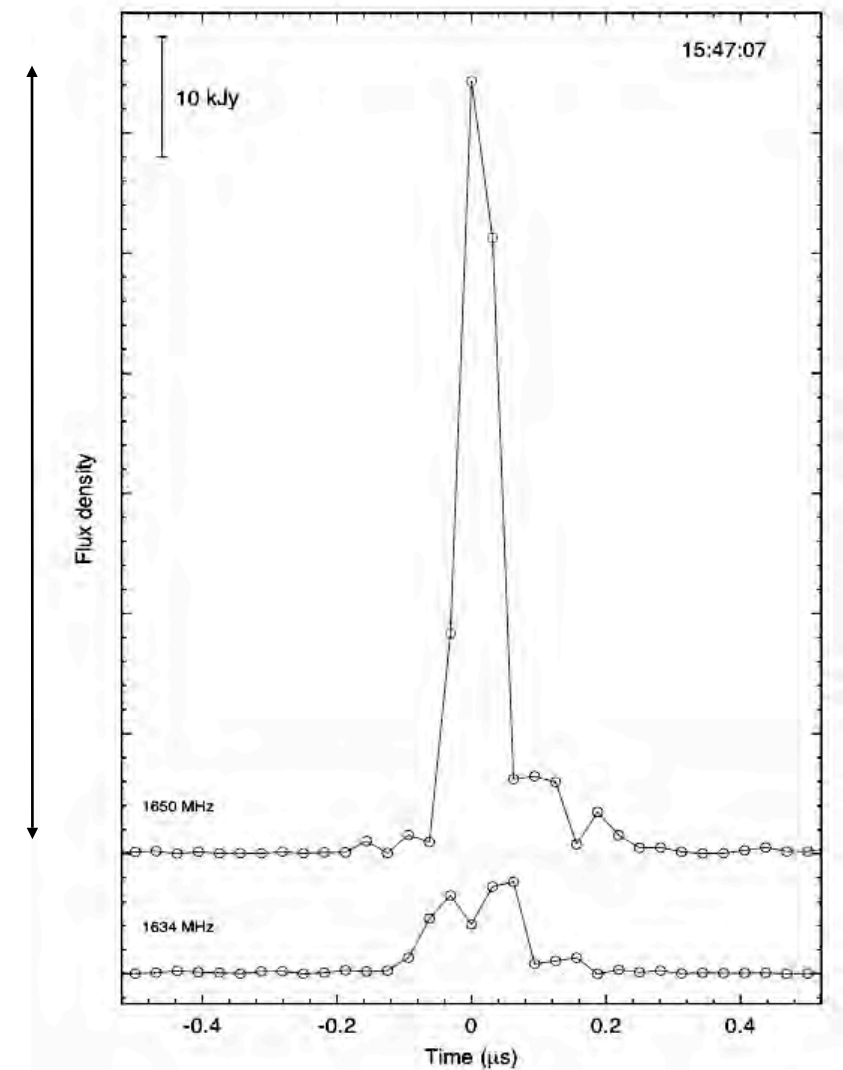
PSR 1937 - Pulse normal...

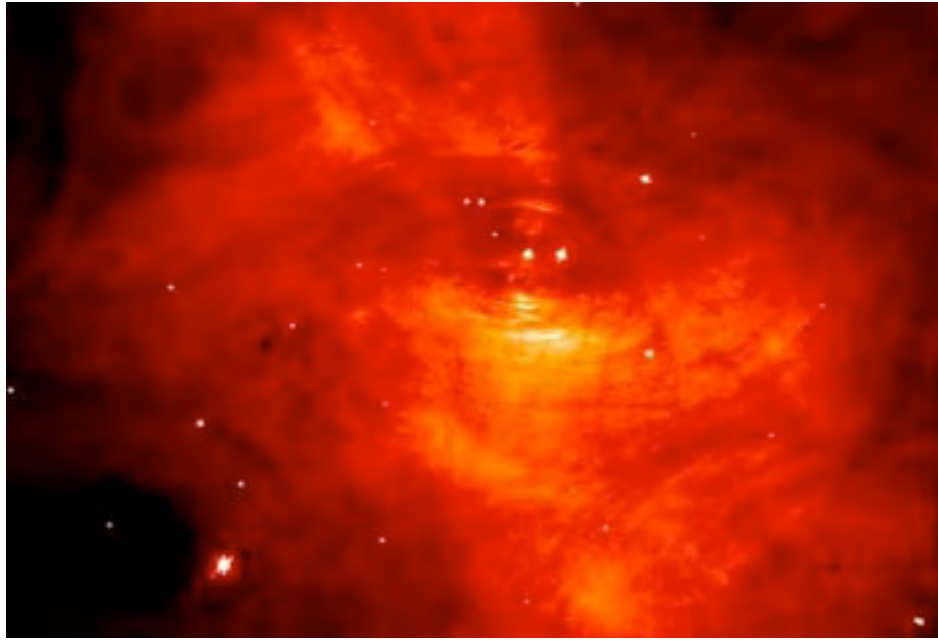
(Soglasnov et al., ApJ 2005)

75 kJy !

... Giant pulse

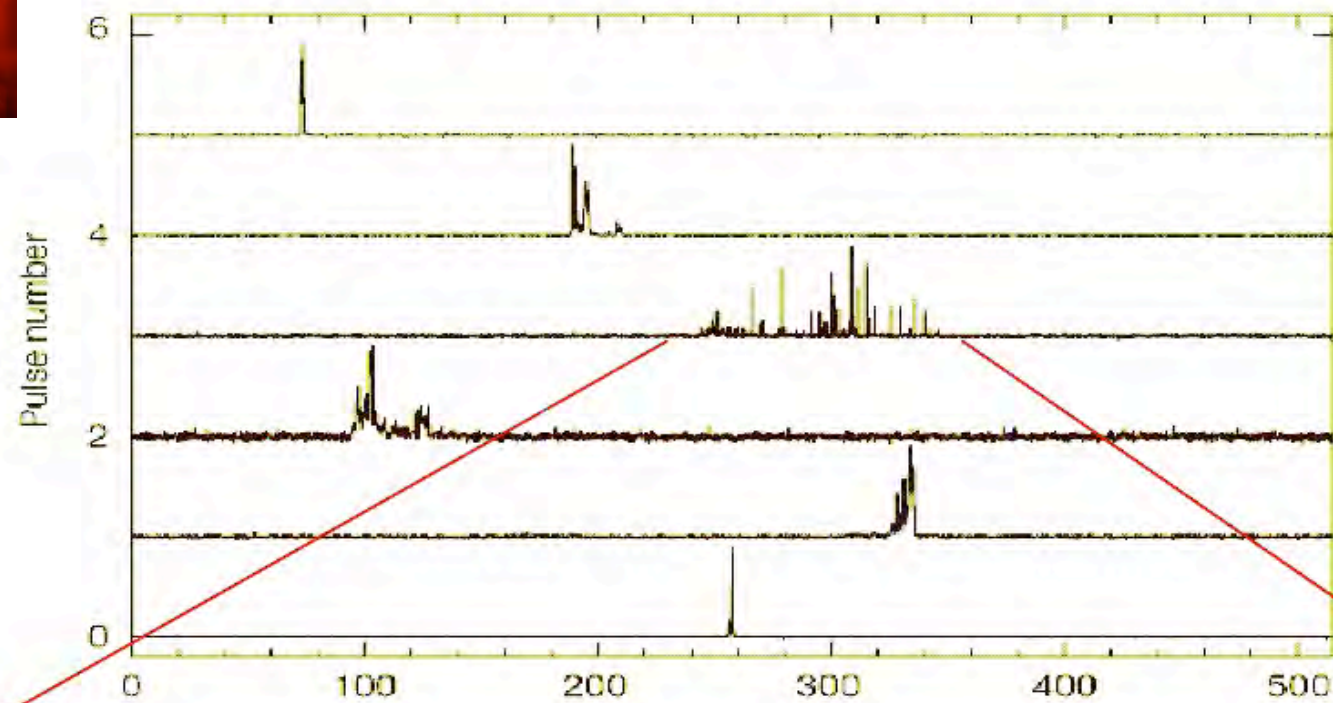
Résolution 31.25 ns



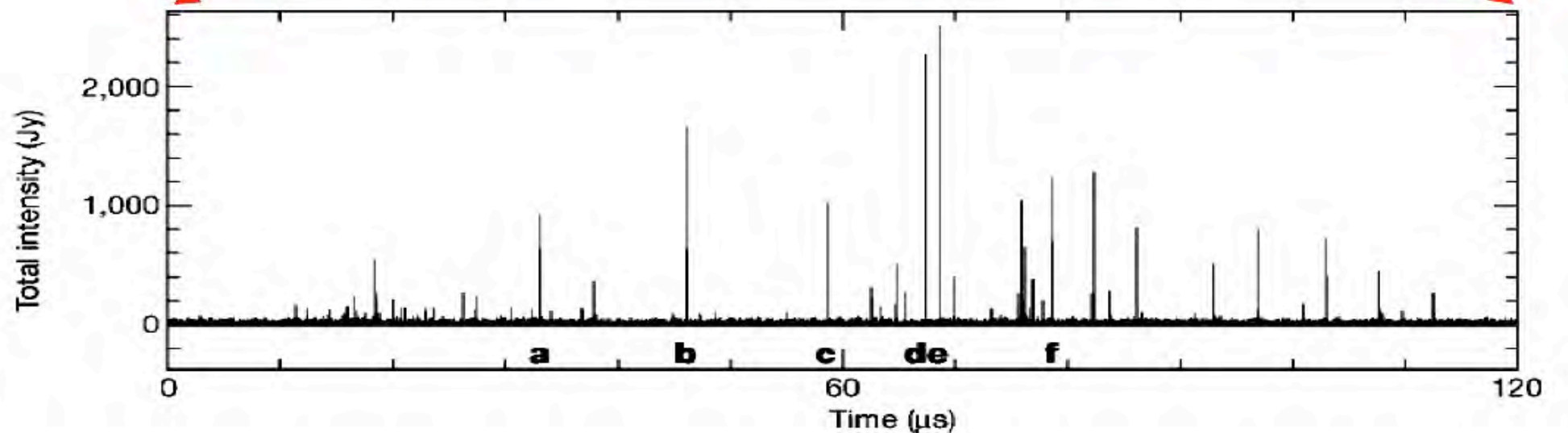


**La nébuleuse et le pulsar  
du Crabe**

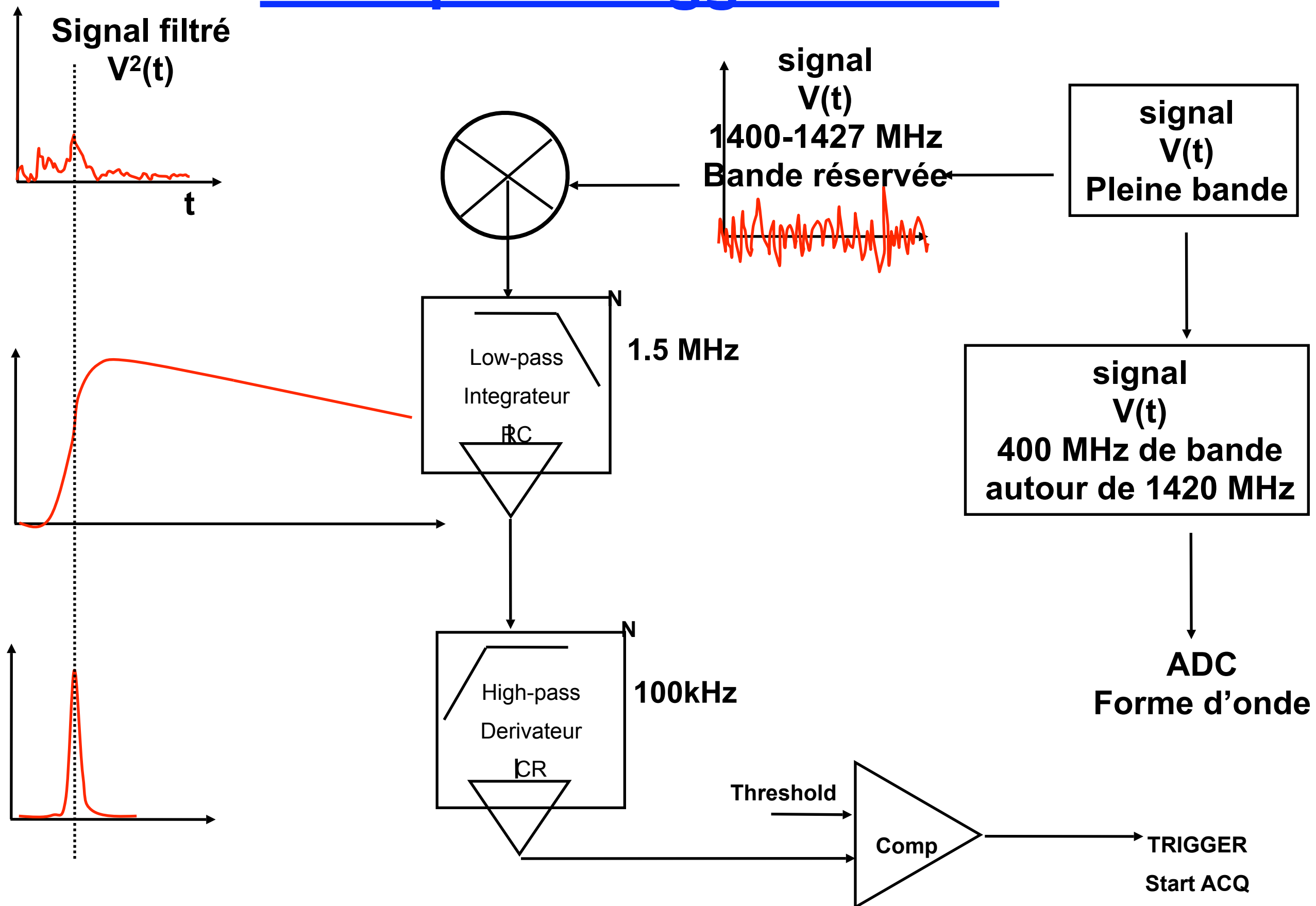
**Nanosecond radio bursts in Crab pulsar  
Hankins et al., Nature 422, 2003**



**Résolution 2 ns**



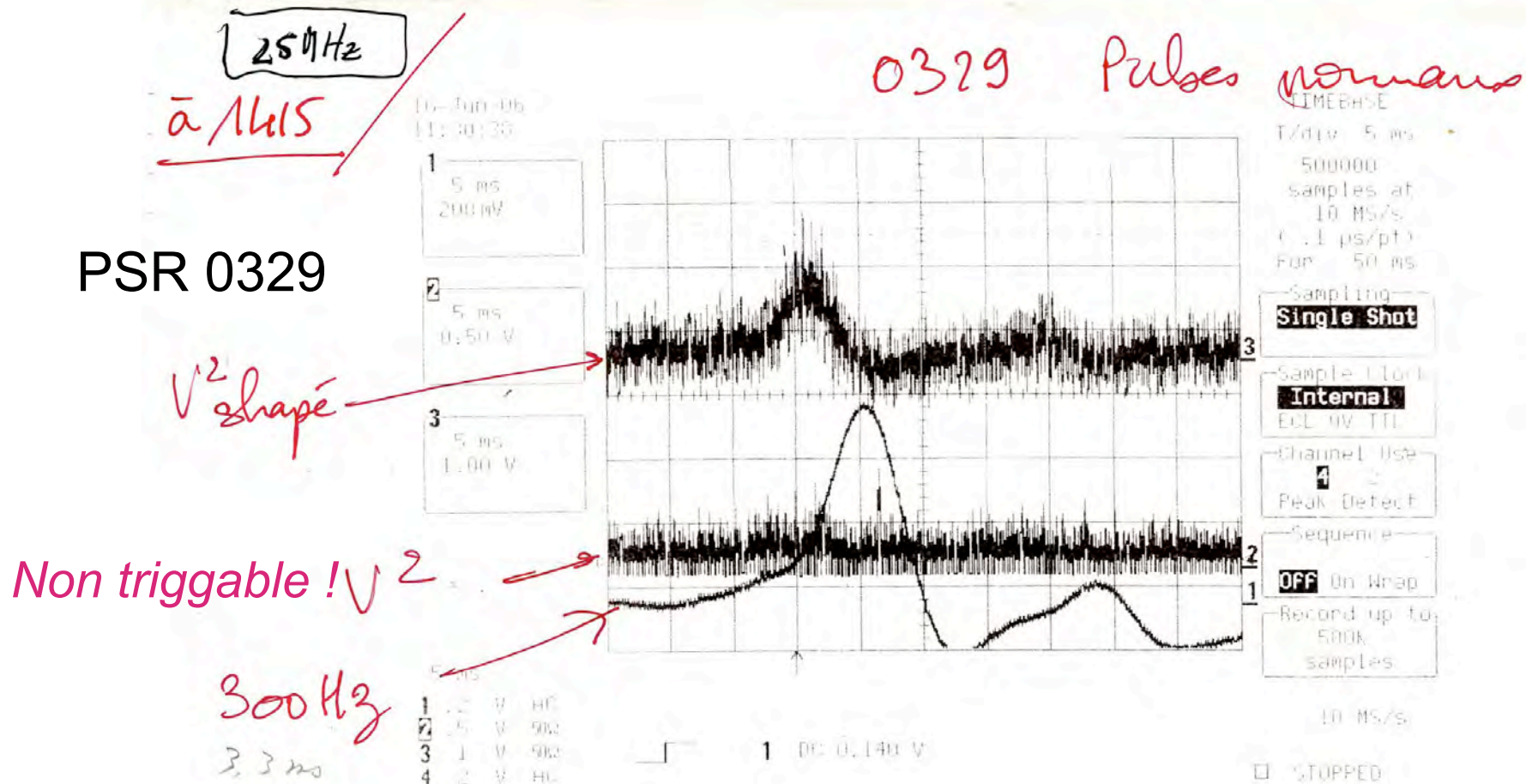
# Principe du trigger Pulsar



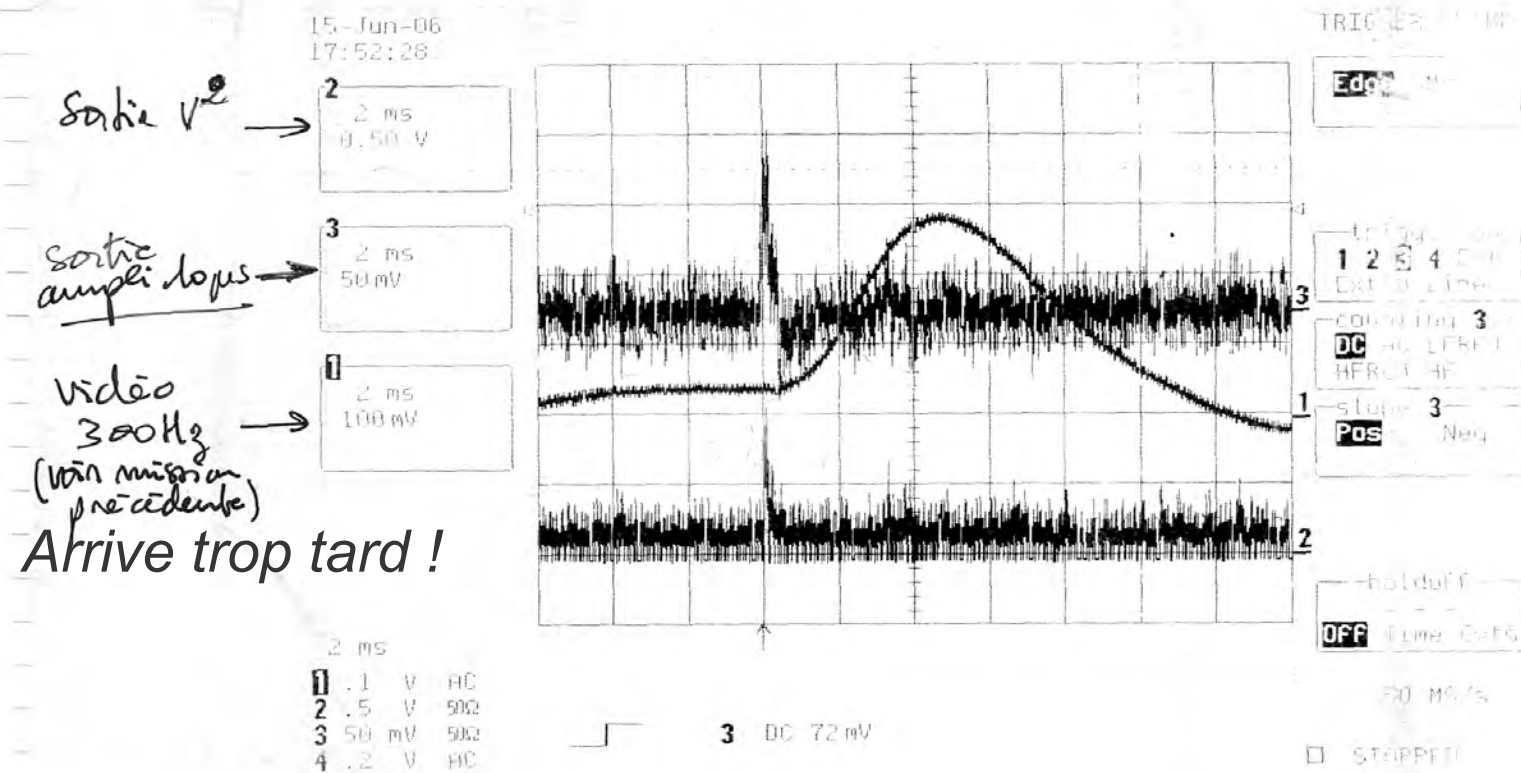


# EXEMPLE de TRIGGER PULSARS

PSR 0329



PSR 0950

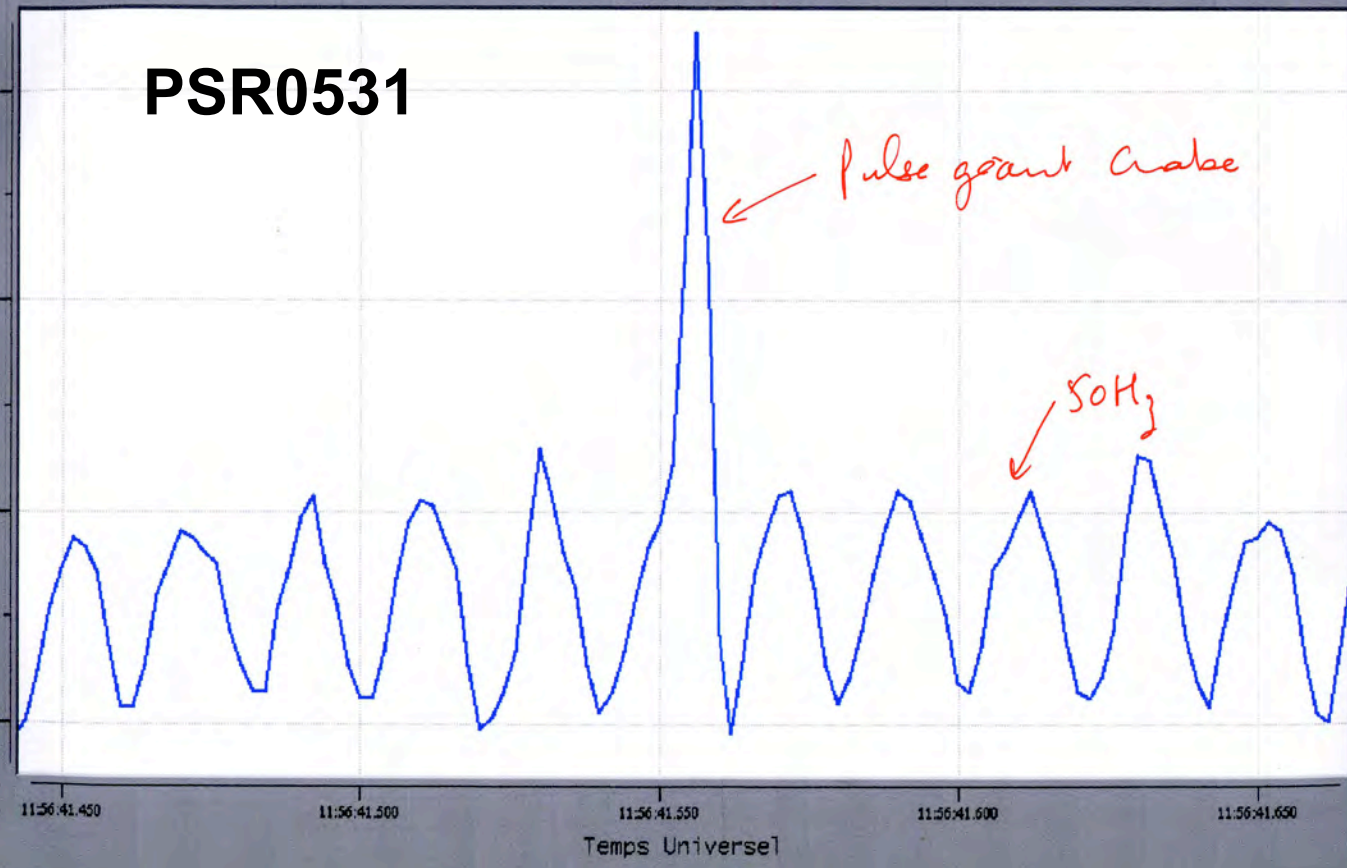


Efficacité de trigger peut encore être optimisée ?

Bonne réponse vis à vis:

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

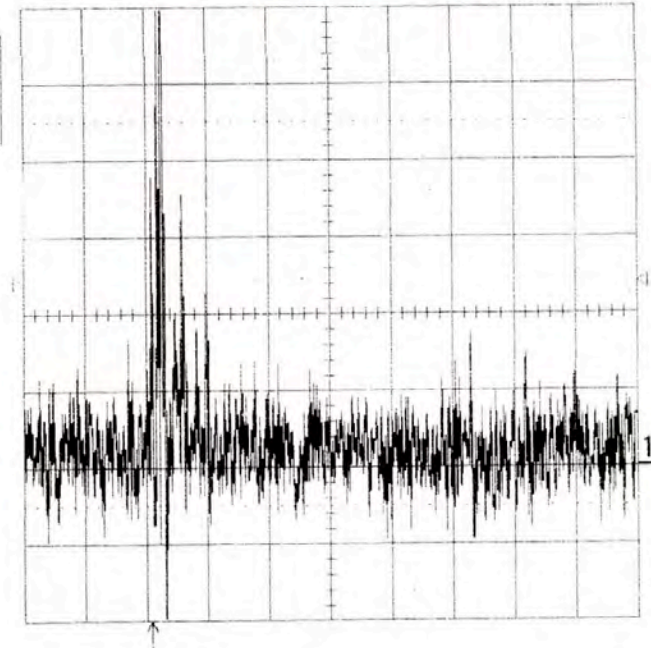
PSR0531



1415 MHz  
5m  
50MHz

16-Jun-06  
12:56:44

1 1 ns  
0.5 V 500



1 1 ns  
0.5 V 500  
2 1 V 500

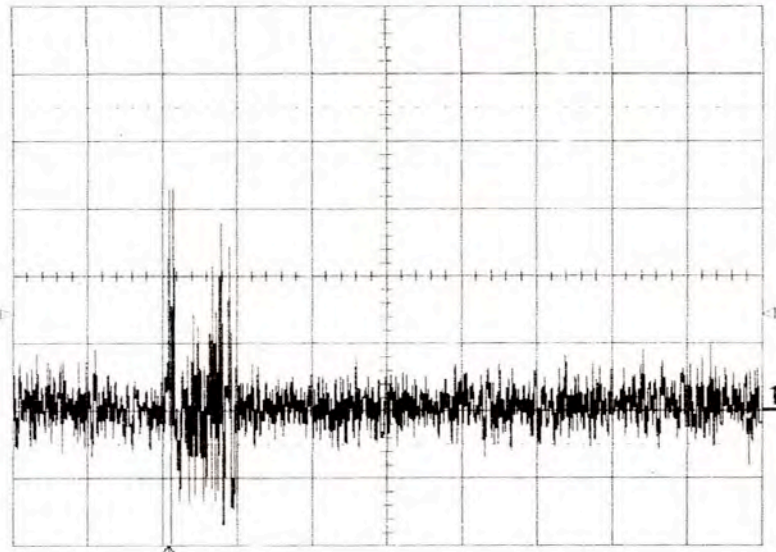
50 MS/s

Pulse géant - Crabe

1415  
50MHz

16-Jun-06  
13:03:40

1 1 ns  
0.50 V



1 1 ns  
0.5 V 500  
2 1 V 500  
3 0.5 V 500  
4 0.2 V HC

1 DC 0.71 V

50 1

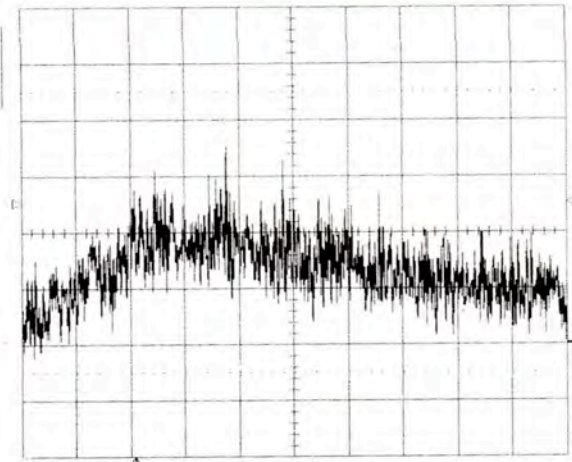
STOPPED

Crabe géant

idem  
freq.

16-Jun-06  
12:58:59

1 1 ns  
0.50 V



1 1 ns  
0.5 V 500  
2 1 V 500  
3 0.5 V 500  
4 0.2 V HC

1 DC 1.26 V

50 MS/s

STOPPED

Pulse normal Crabe?



# Autres Thématiques physiques...

## En Physique de l'atmosphère

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

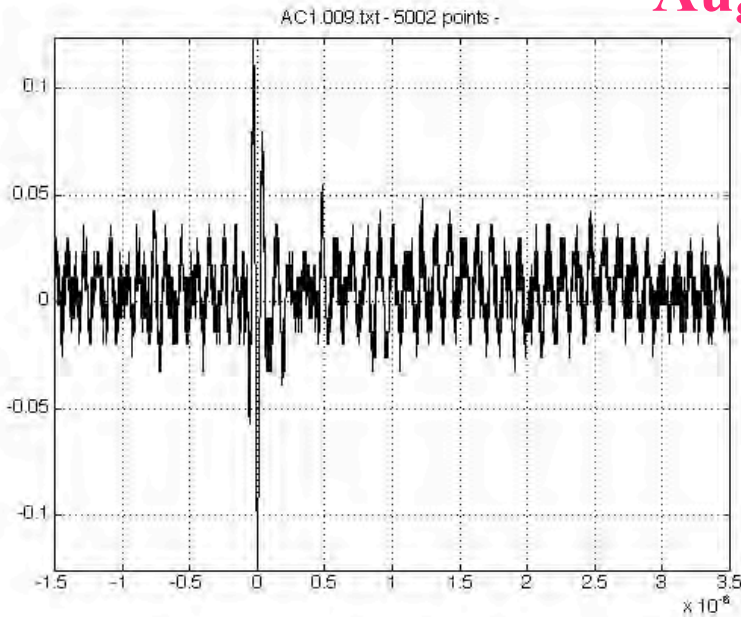
## En Détection des signaux anthropiques

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



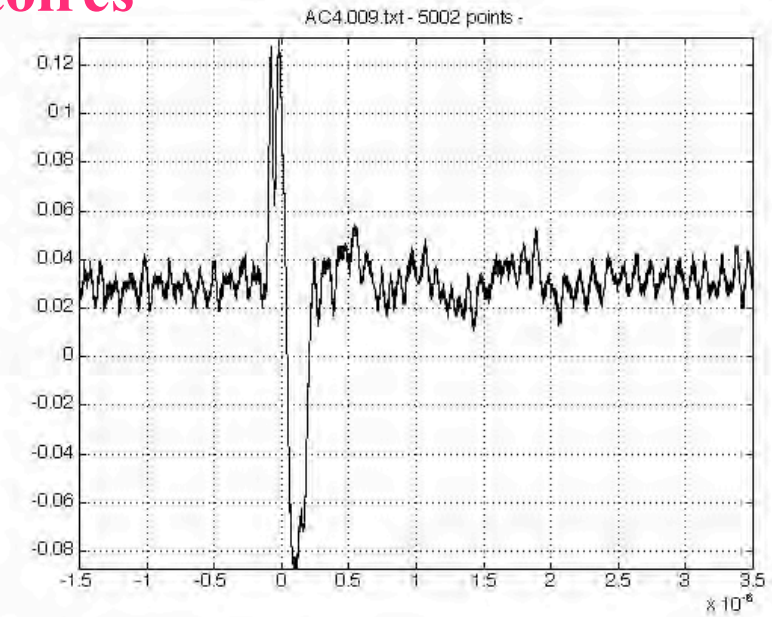
# Autre physique: Physique de l'Atmosphère: Événements en conditions orageuses

## Augmentation du flux de transitoires

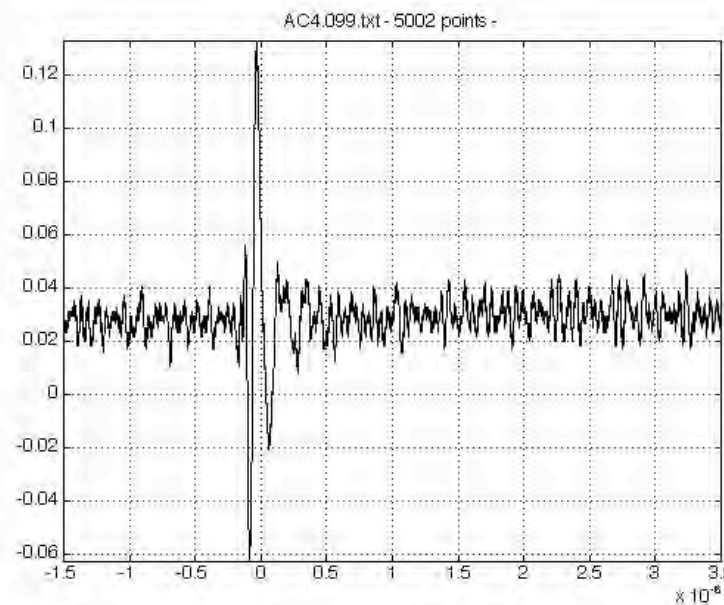


Trigger: Dipôle court  
(filtrage 10-100MHz)

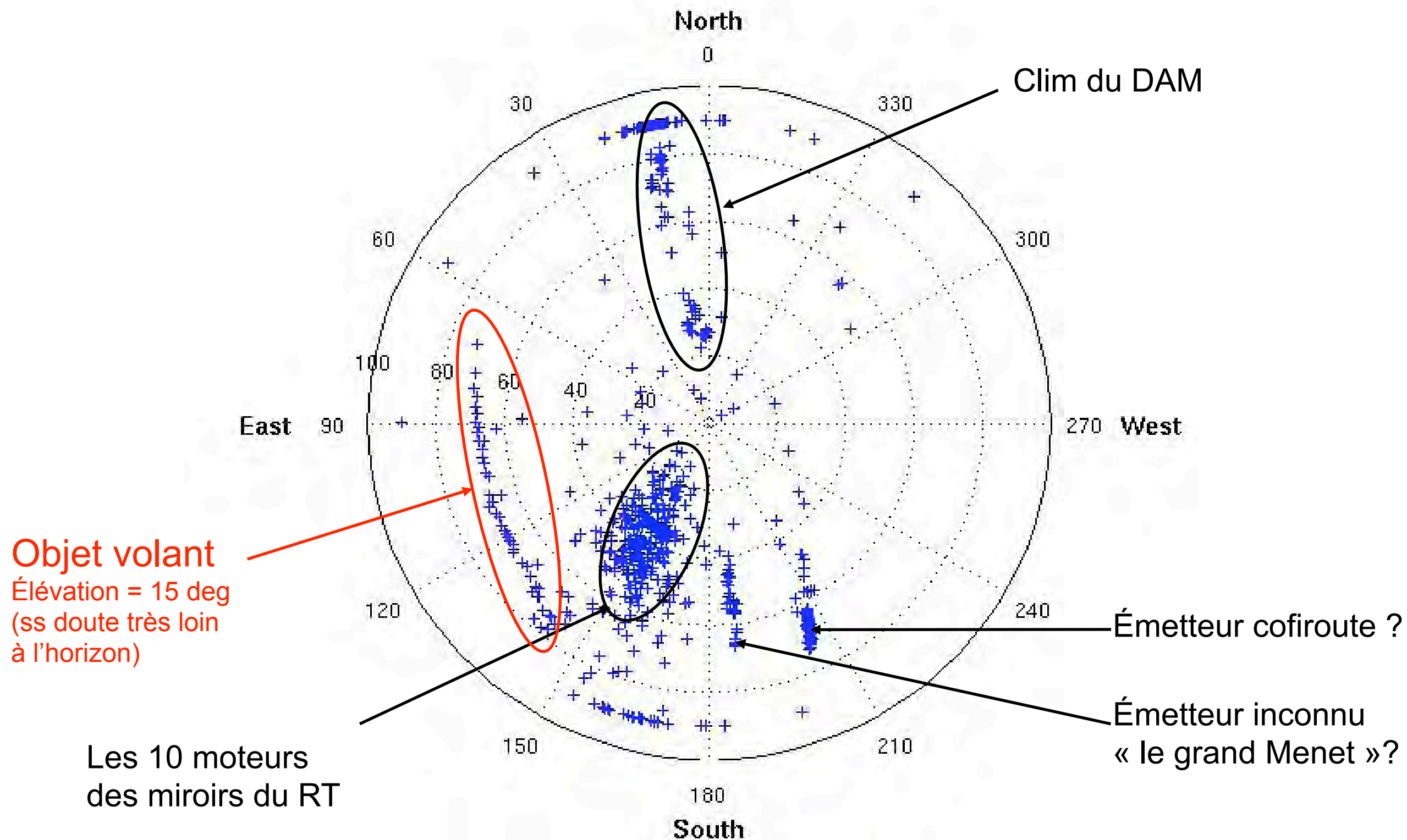
Ant. Log-Périodique  
1-100MHz



## Evts. de polarité inversée

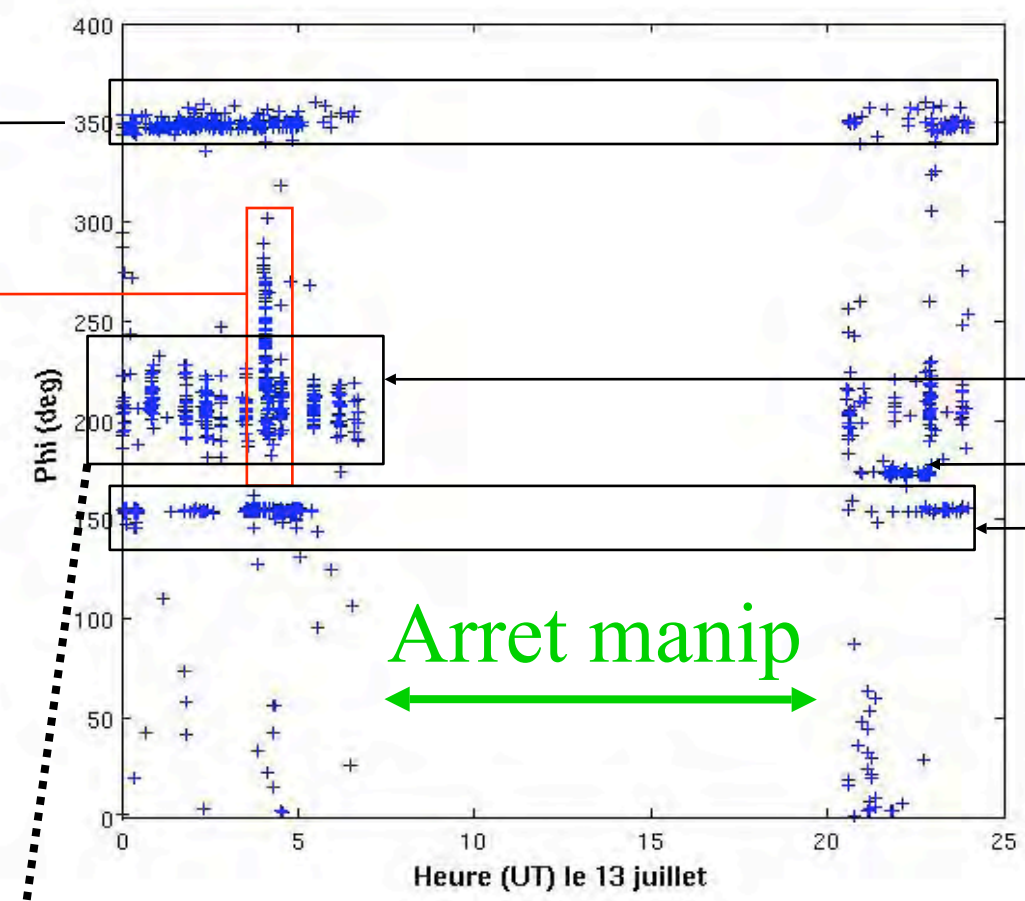


# Exemple de détection (nuit du 13 juillet 2005)

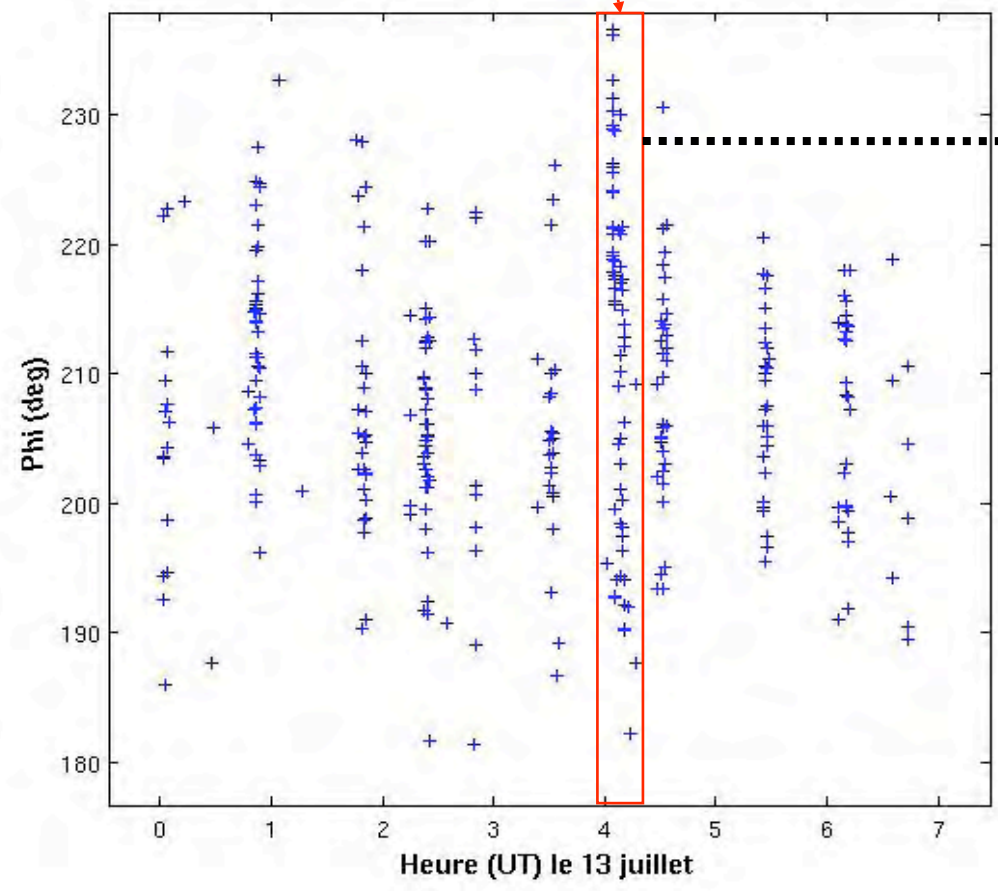


# ZOOM en temps/azimut

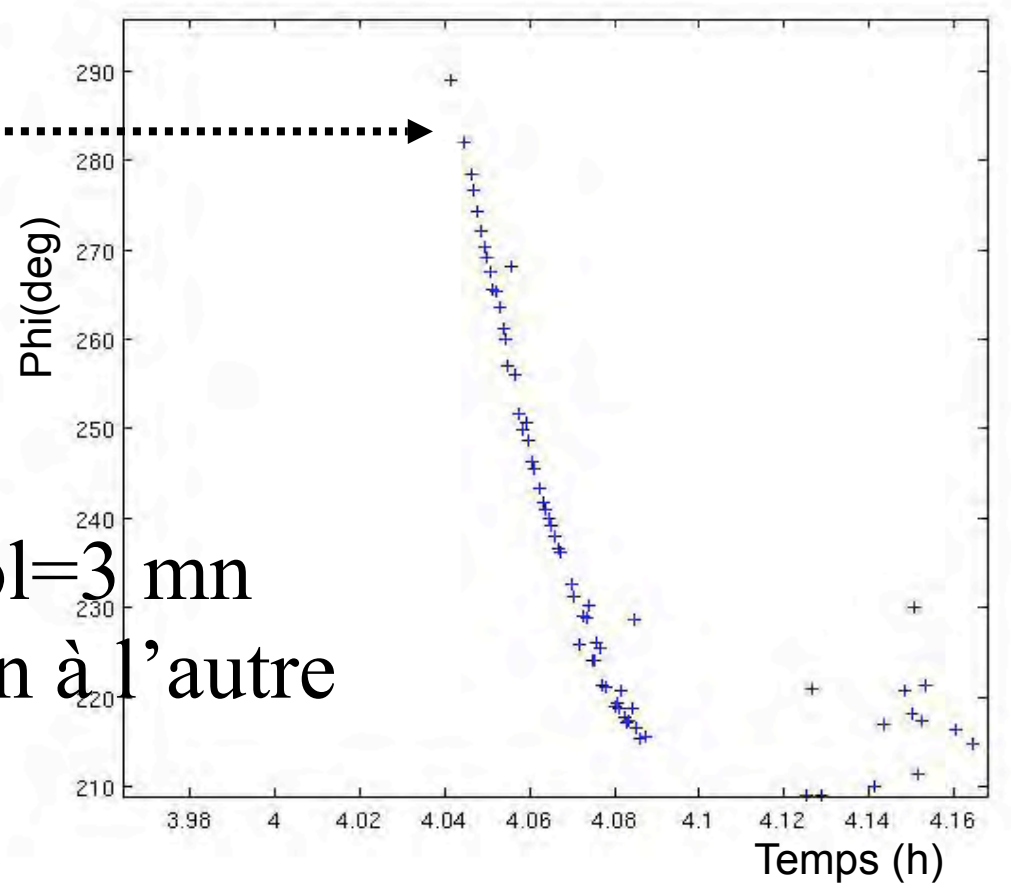
Clim DAM ←  
Objet volant ←



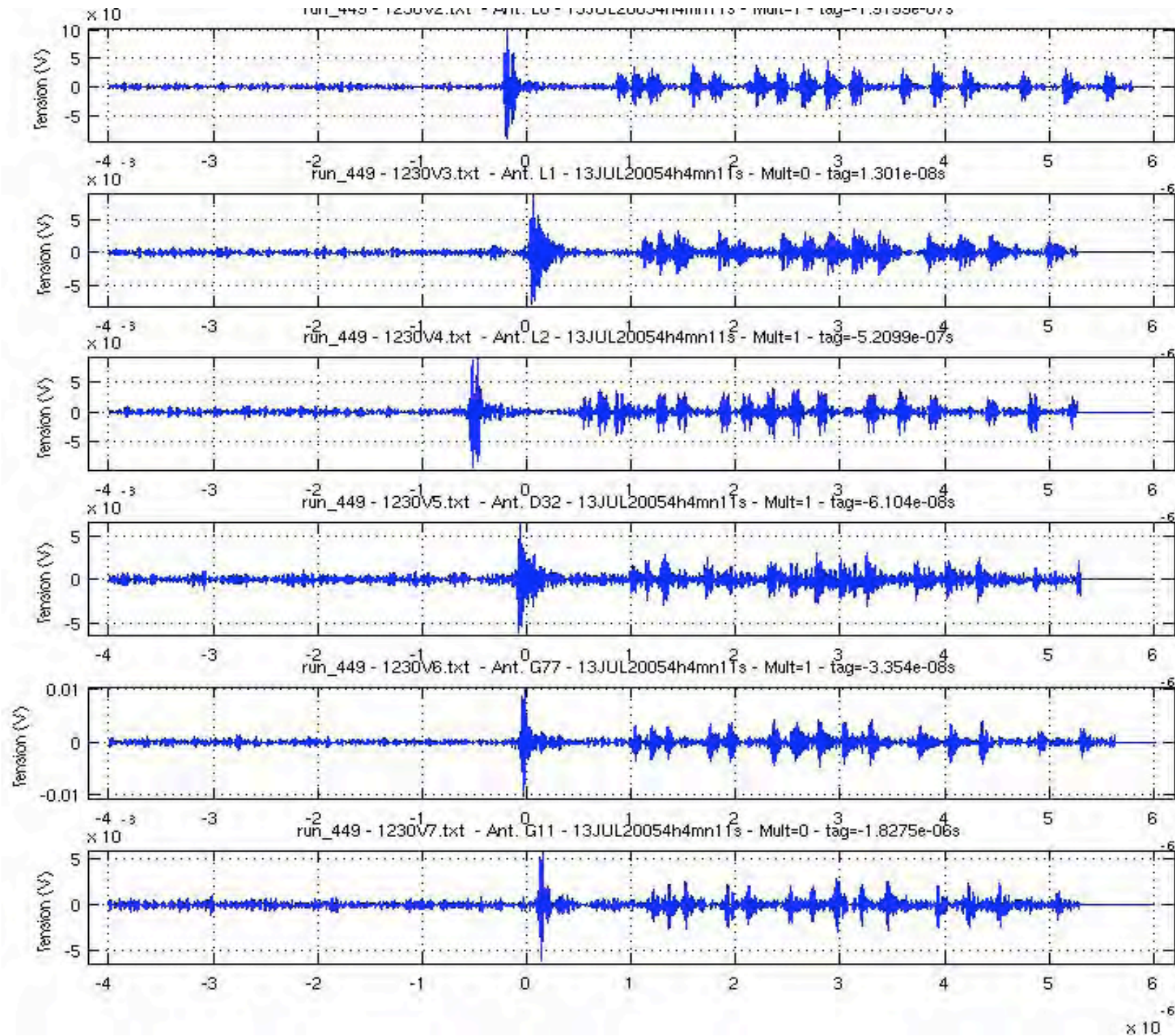
Pointage des miroirs du RT  
Grand Menet ?  
Cofiroute ?



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

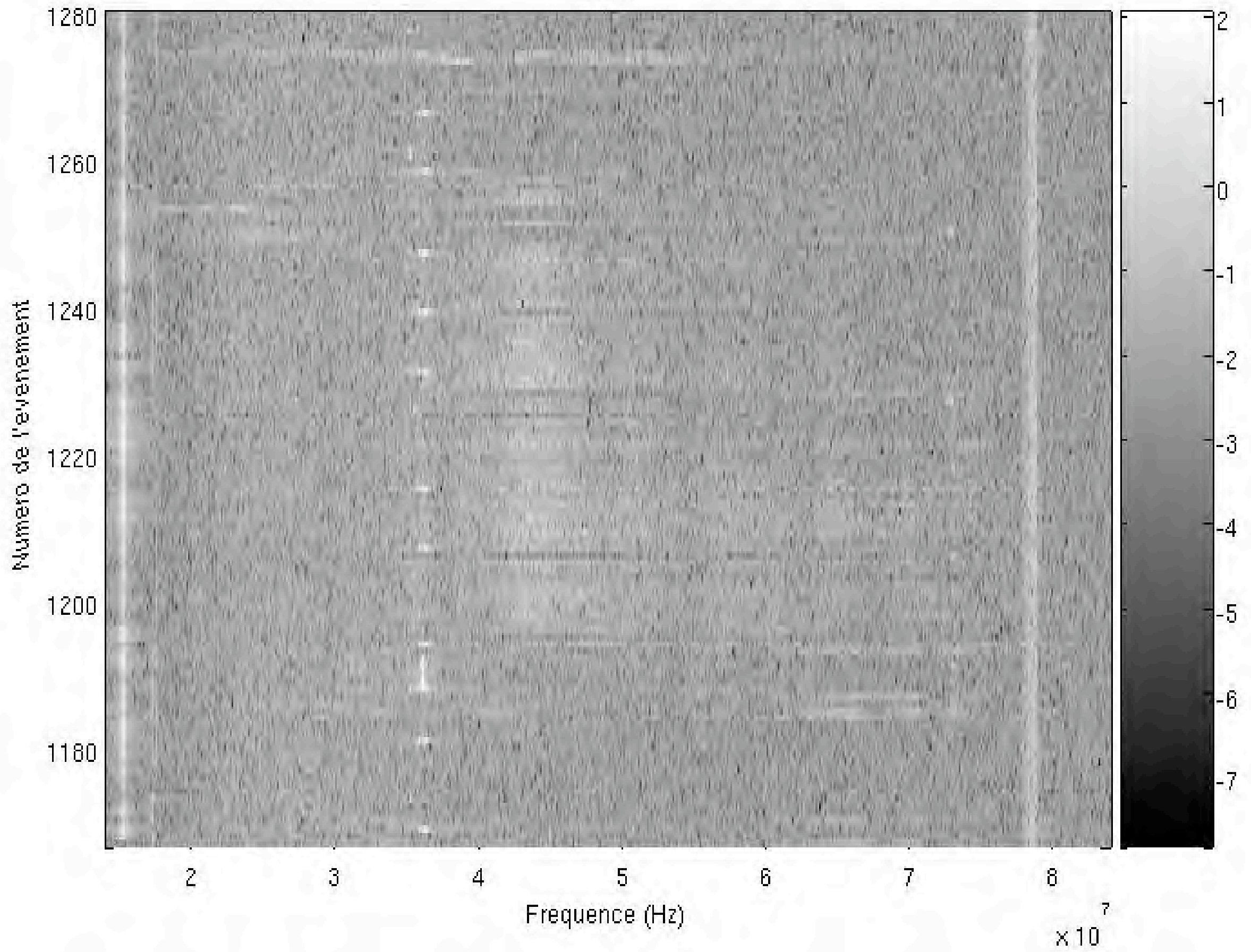






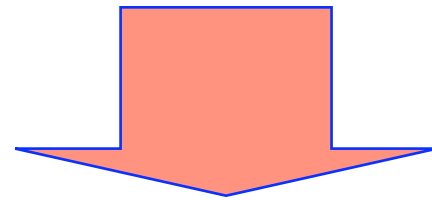
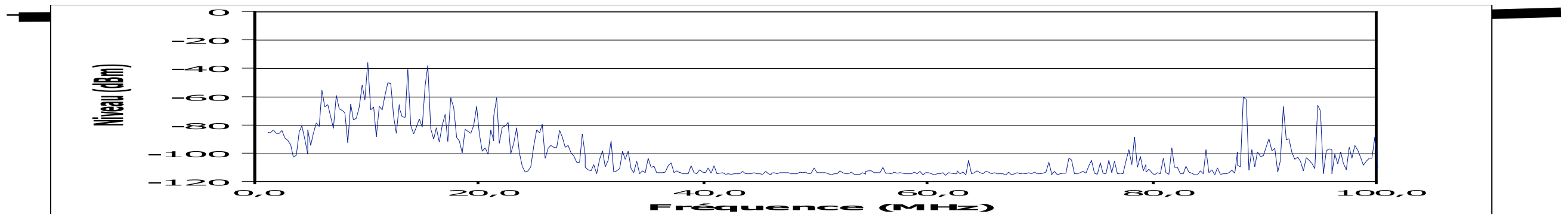
Exemple de la structure temporelle du train d'impulsions dans la bande 33-65 MHz  
(ca change à chaque evt detecté)

Voie 3

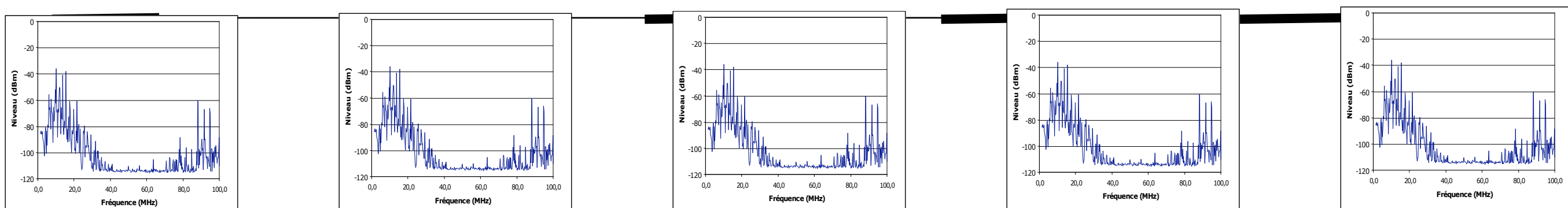


# Quelle technique d'analyse des formes d'ondes?

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



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



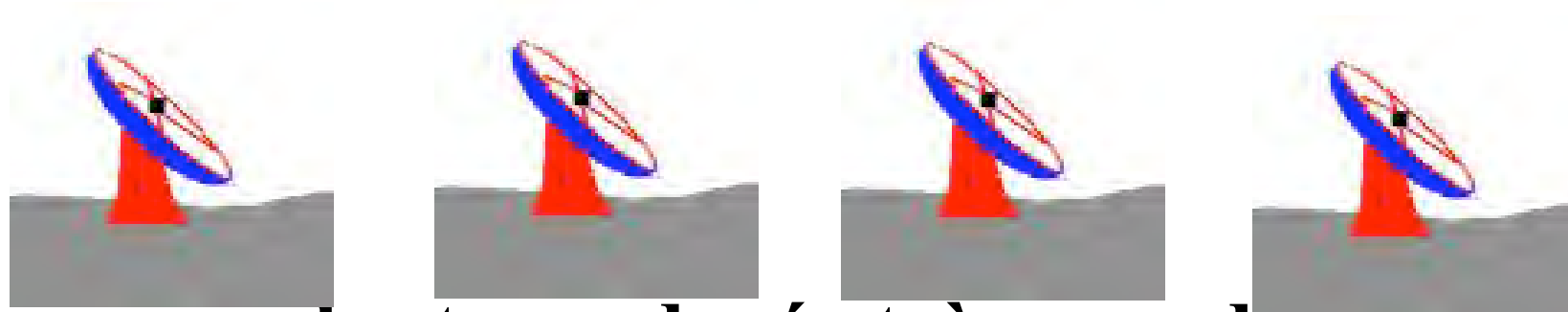
Le temps de cohérence étant  $\sim 100\ \mu s$   
 $\Rightarrow$  s'affranchir de la turbulence atmosphérique



# 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  $2\pi$  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**

