



Détections radar – principes et techniques

exemple d'application à la détection et au pistage de météores

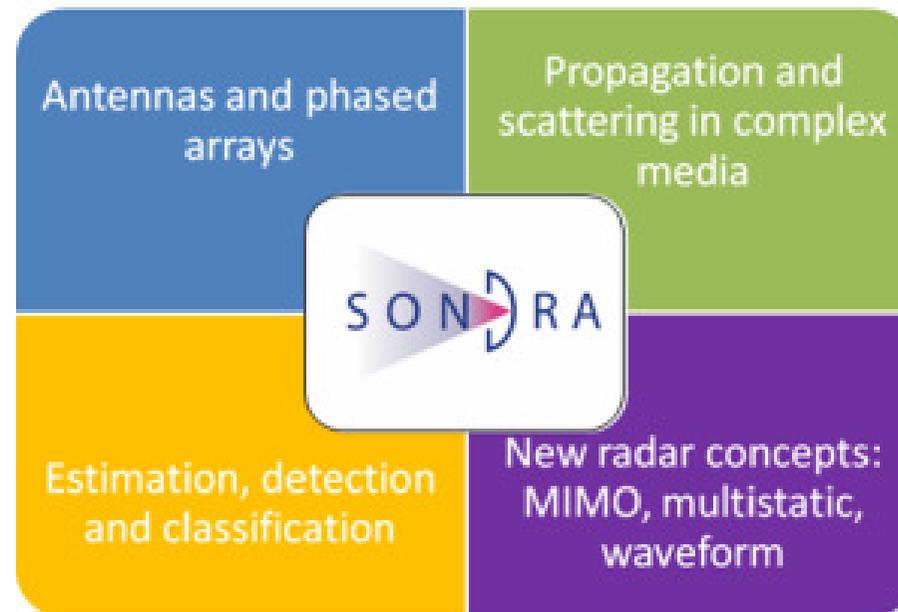
Sylvain AZARIAN
sylvain.azarian@onera.fr

Contexte

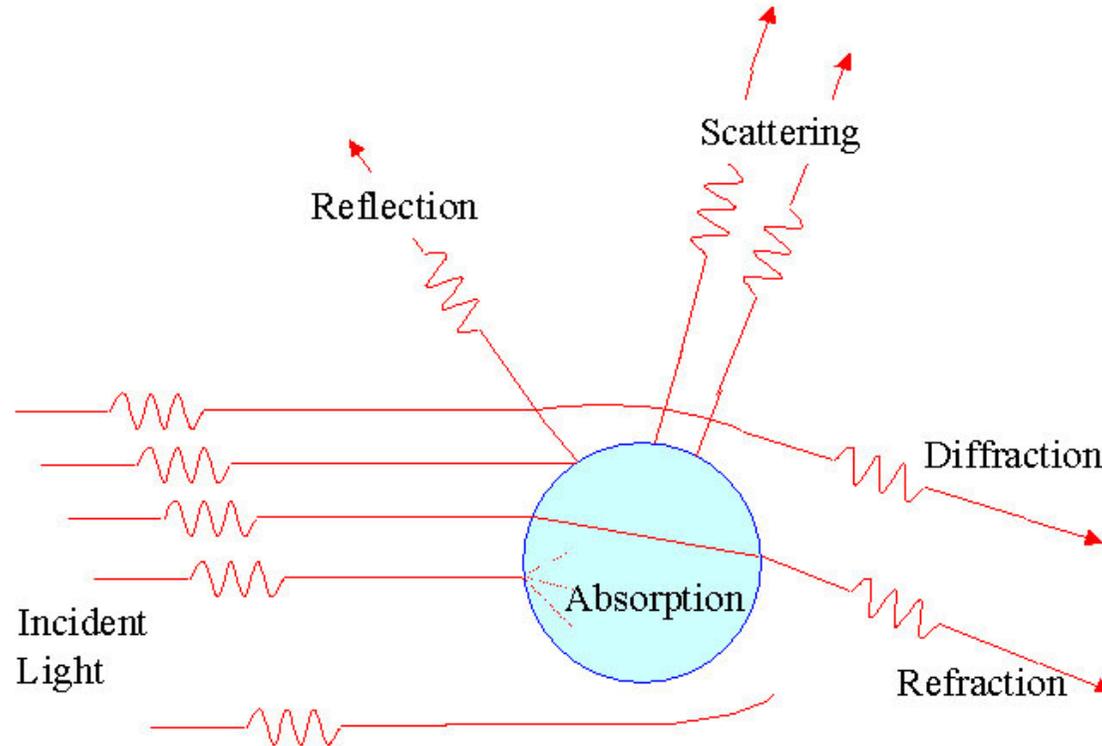


RETRAM : Projet amateur permettant de collecter des données à destination de la communauté scientifique (www.retram.org).

Sondra : laboratoire commun Supélec/Onera/Singapour (DSO, NUS) de recherche en électromagnétisme et radar (www.sondra-labs.com). Laboratoire installé à Supélec, plateau de Saclay.



Quelques mots de phénoménologie



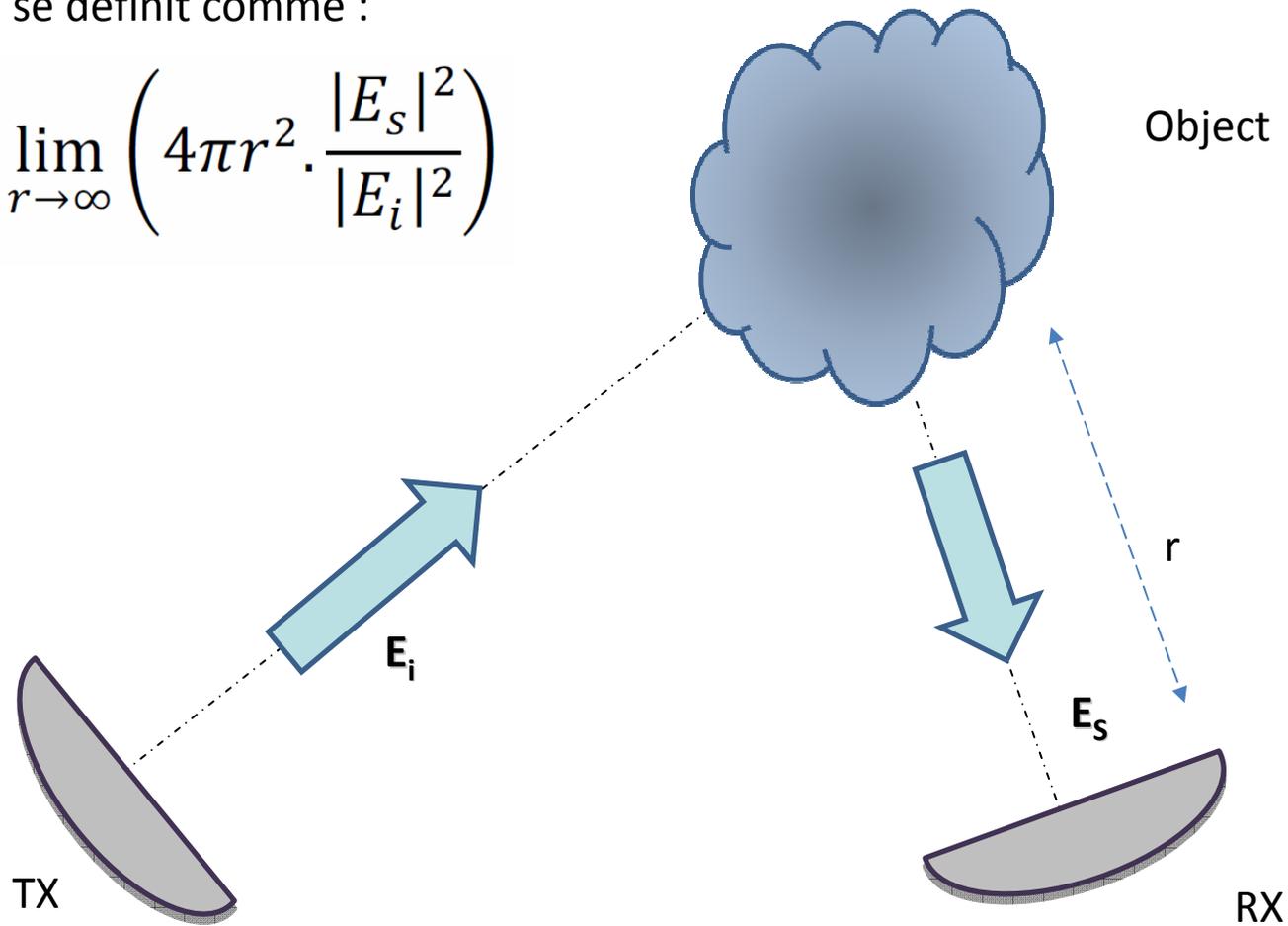
- Intensités et direction des signaux réfléchis, diffus ou diffractés dépendent du matériau



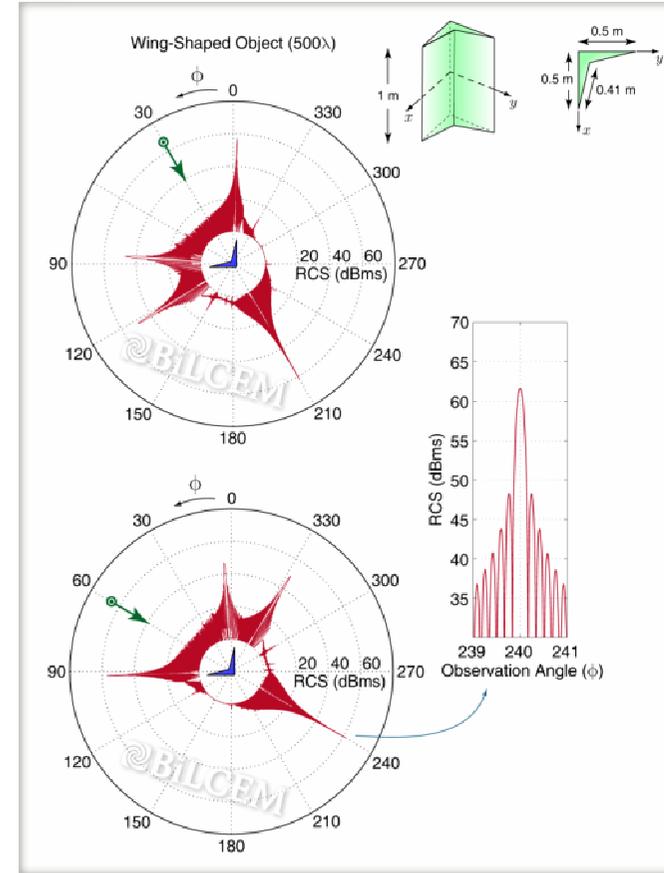
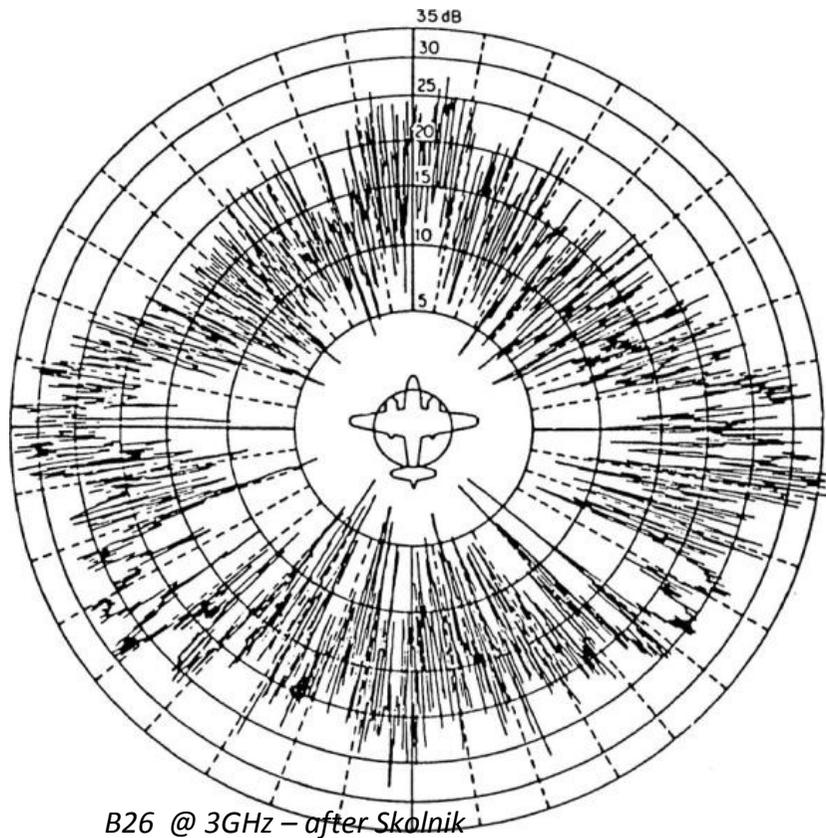
Simplification : Vu du « radariste » - La SER

La SER se définit comme :

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(4\pi r^2 \cdot \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right)$$



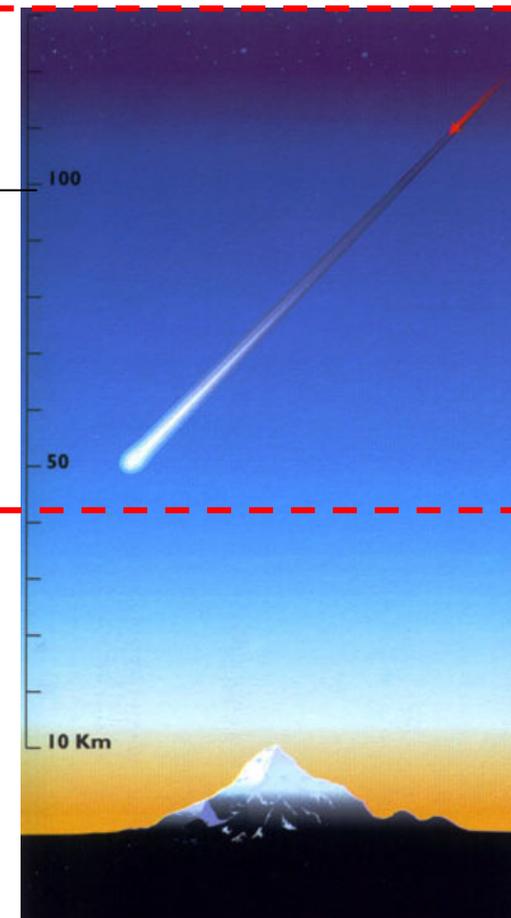
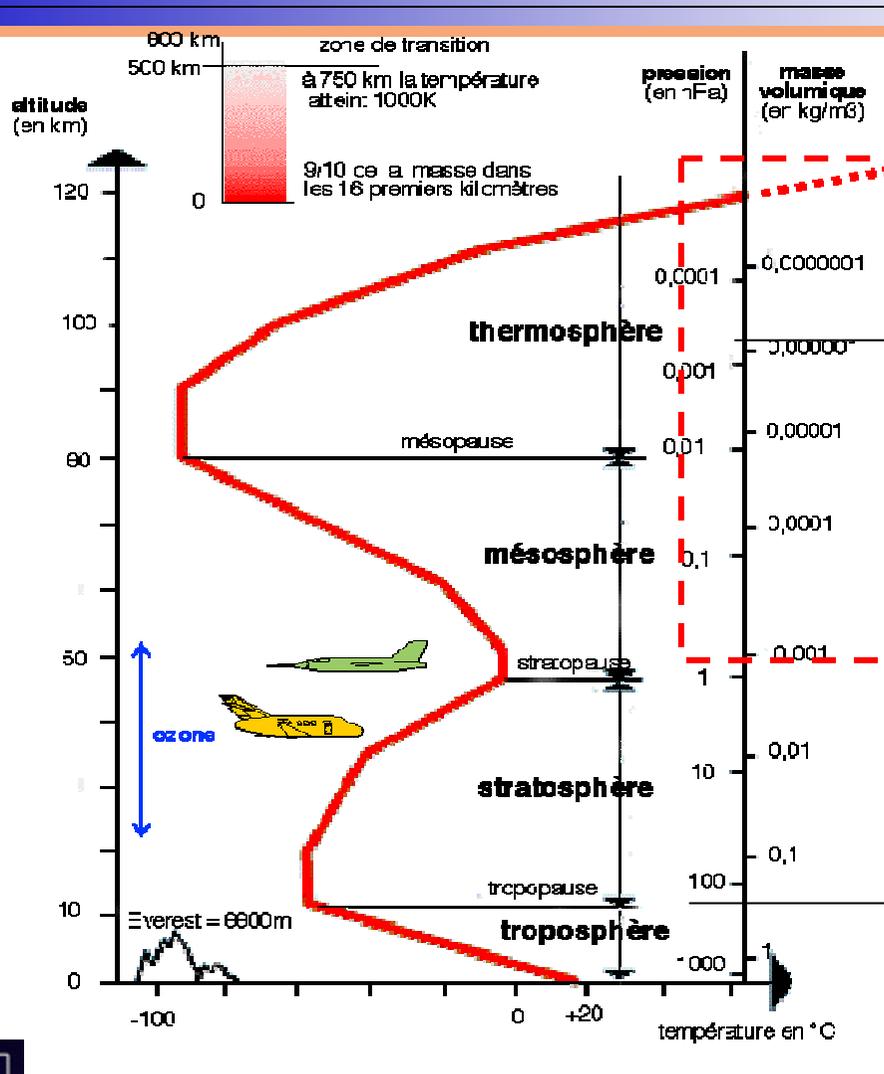
La SER d'objets réels



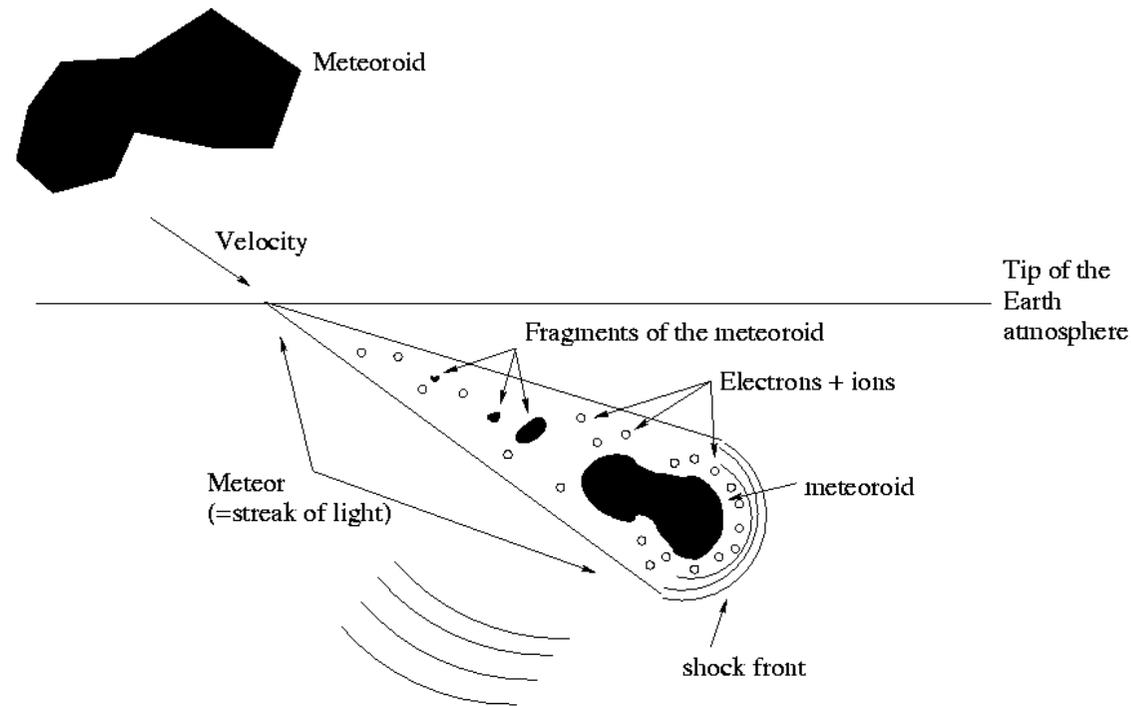
Propriétés exploitées pour de la reconnaissance de « cibles »
(ATR : Automatic Target Recognition)



Ce que l'on cherche à détecter et identifier



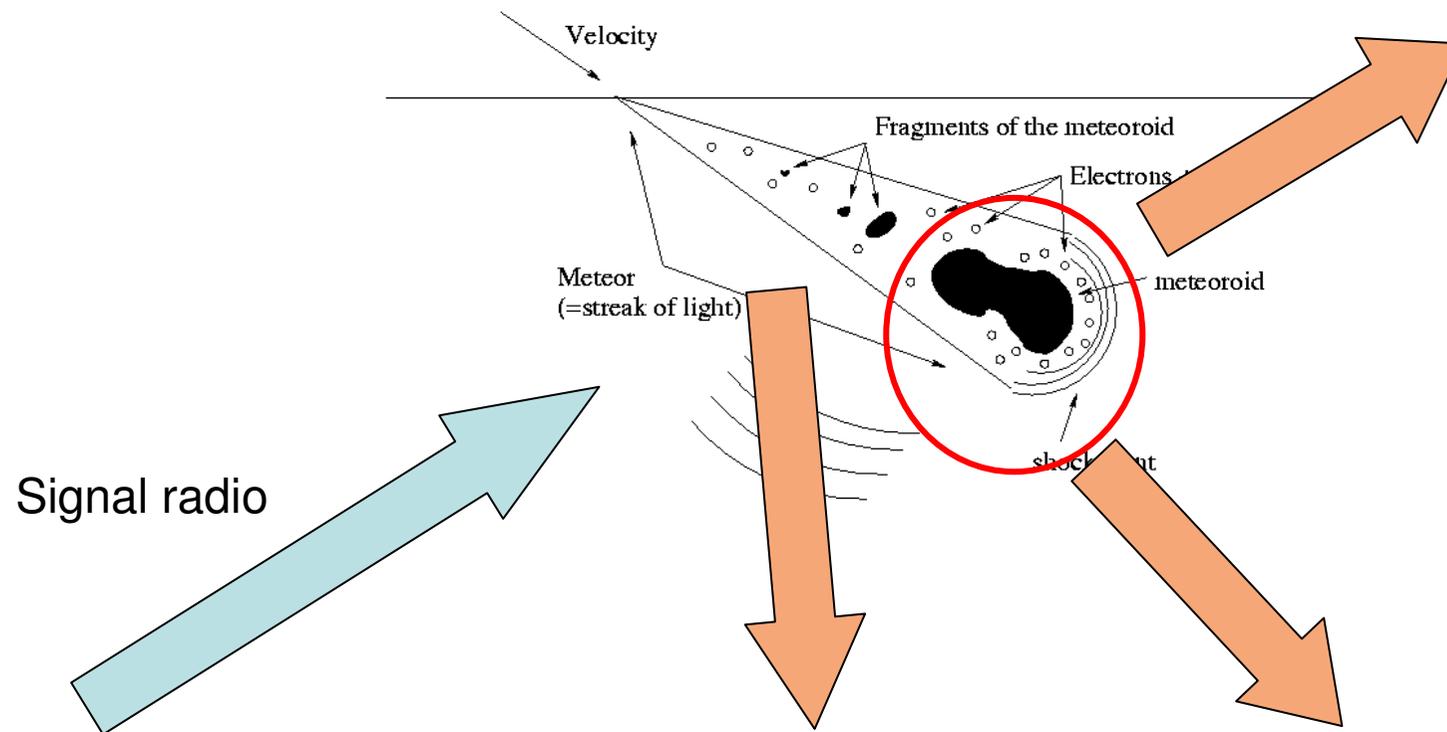
Conséquences de l'entrée d'un météore dans l'atmosphère



- Création d'un « plasma » autour et derrière le météore



Conséquence de l'entrée d'un météore dans l'atmosphère





Exemples de mesures réalisées avec un radar actif : données ALTAIR

ARPA Long-Range Tracking and Instrumentation Radar



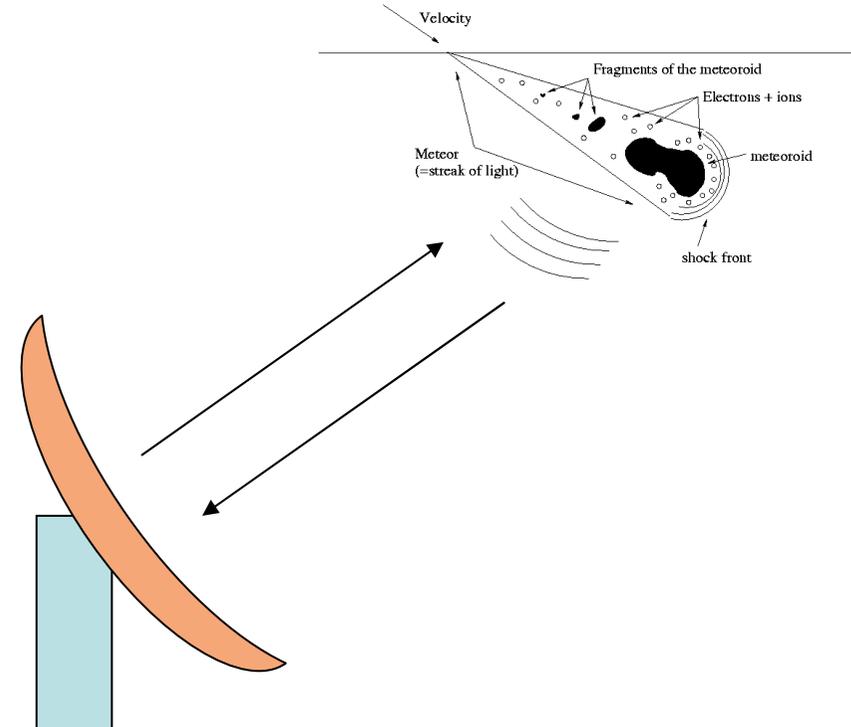
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 107, NO. 0, 10.1029/2002JA009253, 2002

Scattering characteristics of high-resolution meteor head echoes detected at multiple frequencies

ALTAIR : contexte de l'expérience

Table 1. Summary of Radar Characteristics for ALTAIR (VHF/UHF) and TRADEX (L-/S-band)

	VHF	UHF	L-band	S-band
Antenna diameter	46 m	46 m	26 m	26 m
Frequency	160 MHz	422 MHz	1320 MHz	2950 MHz
Beam width	2.8°	1.1°	0.6°	0.3°
Peak Power	6.0 MW	6.4 MW	2.0 MW	2.0 MW
Range Resolution	30 m	7 m	15 m	15 m
Sensitivity	-55 dBsm	-75 dBsm	-47 dBsm	-43 dBsm
Bandwidth	3 MHz	18 MHz	20 MHz	17.6 MHz
PRF	333	333 Hz	2000 Hz	2000 Hz
Pulsewidth	40 us	150 us	50 us	9 us



- Le radar émet des impulsions courtes et analyse les signaux reçus
- L'antenne est pointée vers le radiant de l'essaim étudié



Principaux enseignements de cette expérience

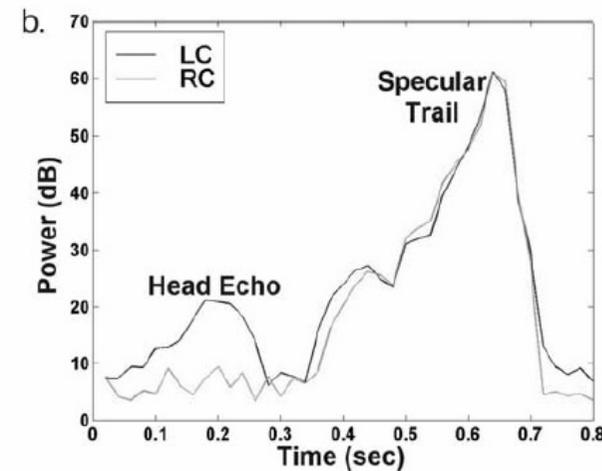
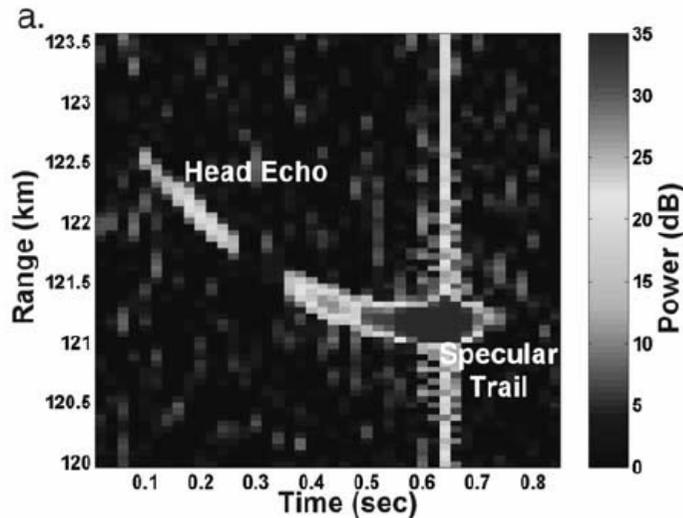


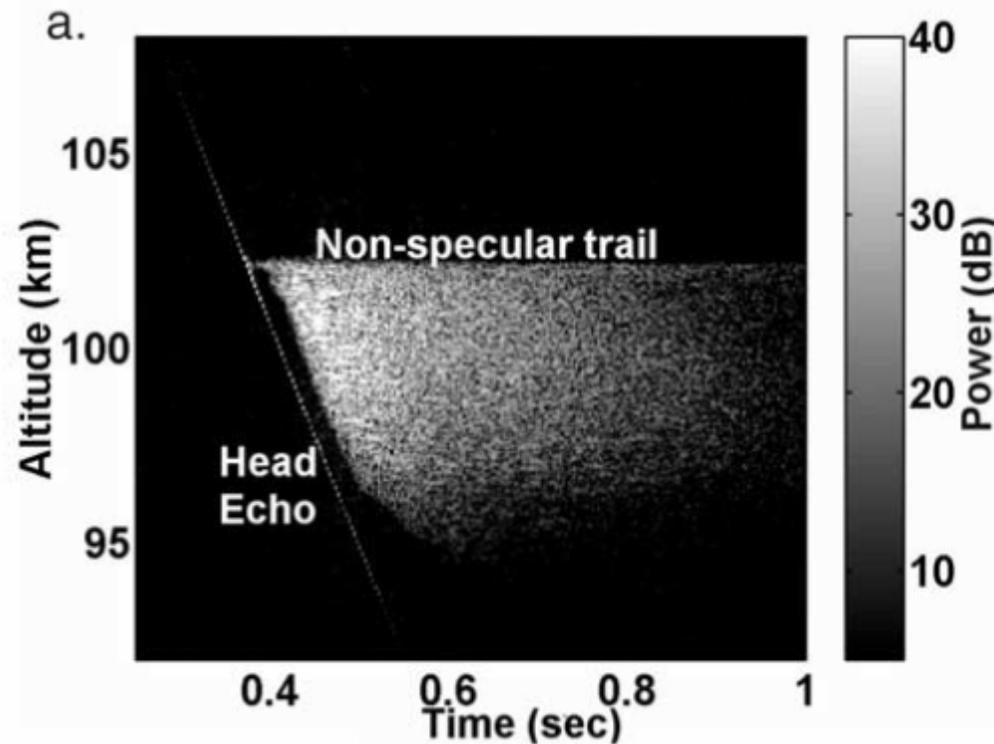
Figure 1. (a) Range-time-intensity image from 12 August 1998, showing head echo and specular trail pair at 160 MHz and (b) corresponding maximum LC and RC signal for both head echo and trail as a function of time.

On distingue nettement deux « cibles » :

1. Le « head echo » : météore et plasma proche
2. La traînée



Principaux enseignements de cette expérience



- La traînée suit le météore et s'étale sur plusieurs kilomètres



Pour « radio détecter » un météore, il faut :

1. Eclairer le ciel...
2. Avoir une puissance **importante**
3. **Emettre en permanence** (ou avoir de la chance)
4. Emettre dans des gammes de fréquences permettant de voir quelque chose (SER)





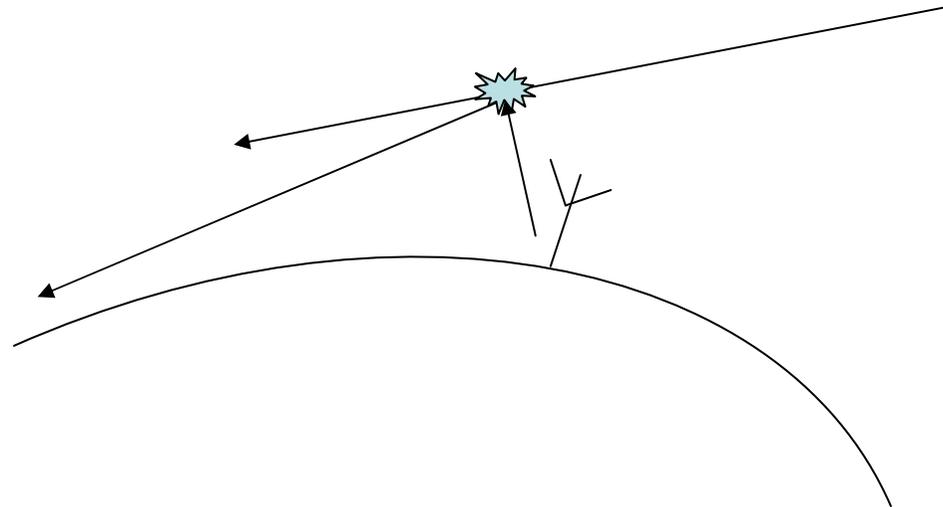
Le radar passif

Radar passif : « *a class of radar systems that detect and track objects by processing reflections from non-cooperative sources of illumination in the environment, such as commercial broadcast and communications signals* »

Wikipedia

Les principales sources radio utilisées par les scientifiques

- Le radar GRAVES – Transmission en VHF
- Le réseau BRAMS (Observatoire Royal de Belgique)



Characteristics of the beacon

Frequency	49.970 MHz
Power	150 W
Polarization	RHCP
Waveform	cw



Avantages :

- Pas d'émission donc pas d'autorisation à demander,
- Techniquement simple à mettre en œuvre,
- Discret.

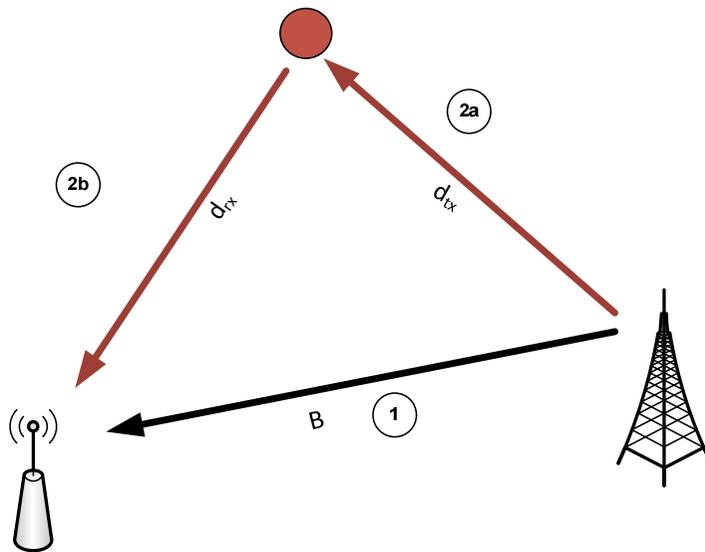
Inconvénients :

- Il faut éclairer le ciel,
- Il faut de la puissance,
- Le signal doit avoir de la diversité temporelle
- Le traitement peut devenir complexe

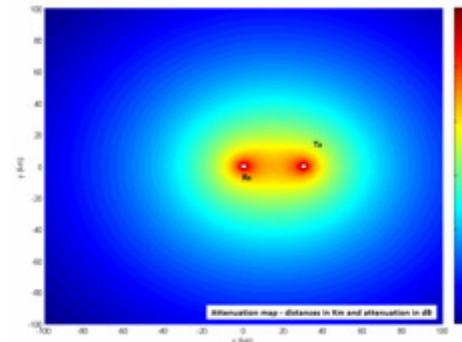


Détection passive – l'équation radar bistatique

- Energie diffusée par “la cible” qui atteint le récepteur



$$P_r = \frac{P_t \cdot \lambda \cdot g_t \cdot g_r \cdot \sigma \cdot f}{(4\pi)^3 (d_{tx} \cdot d_{rx})^2}$$



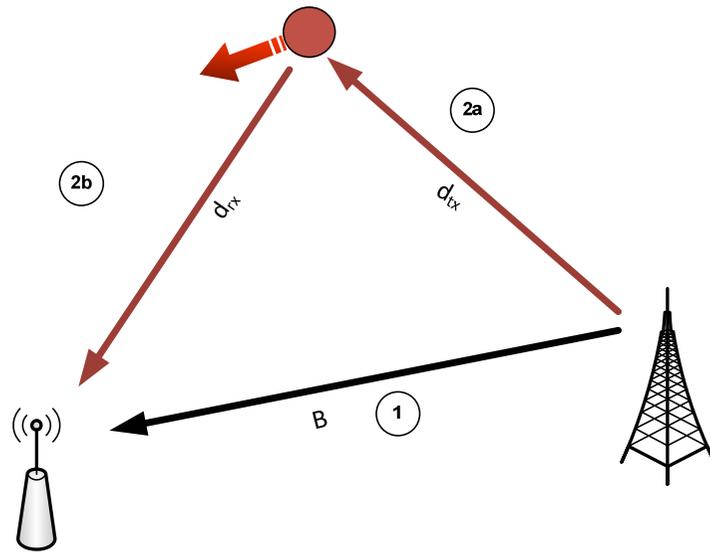
Avec :

- P_t puissance à l'émetteur,
- g_t et g_r gain des antennes d'émission et de réception
- La surface équivalente radar σ
- d_{tx} distance “cible” - émetteur,
- d_{rx} distance “cible” - récepteur.

Dépend de l'objet et de la fréquence



Doppler bistatique



On suppose une forme simple de signal transmis :

$$s(t) = A(t).e^{j\omega(t).t+\Theta(t)}$$

Le signal réfléchi par un objet en mouvement voit sa fréquence modifiée (effet Doppler) :

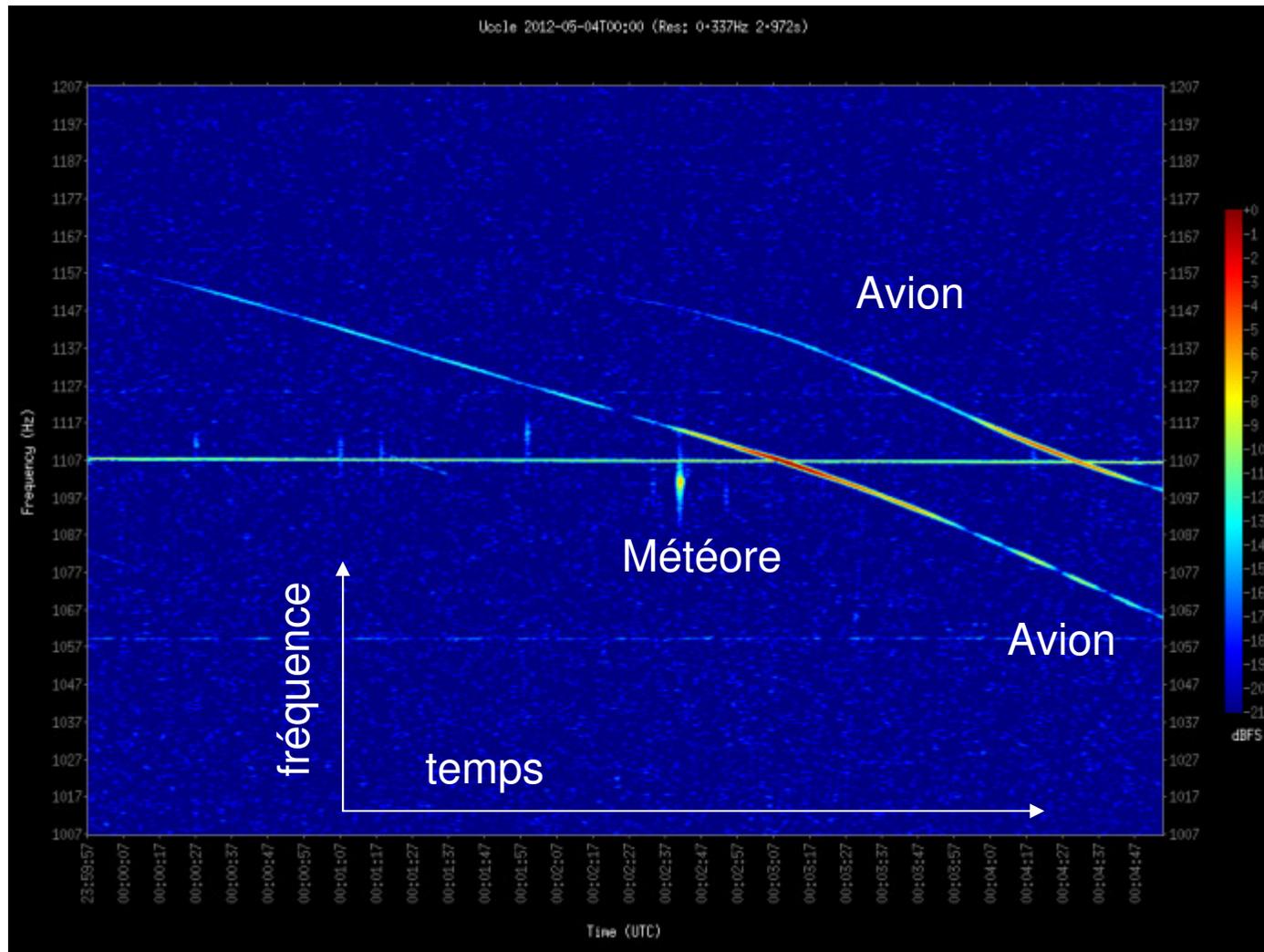
$$s(t) = A(t).e^{j\omega(t).t+\Theta(t)} . e^{j2\pi D_{opp}(t).t}$$

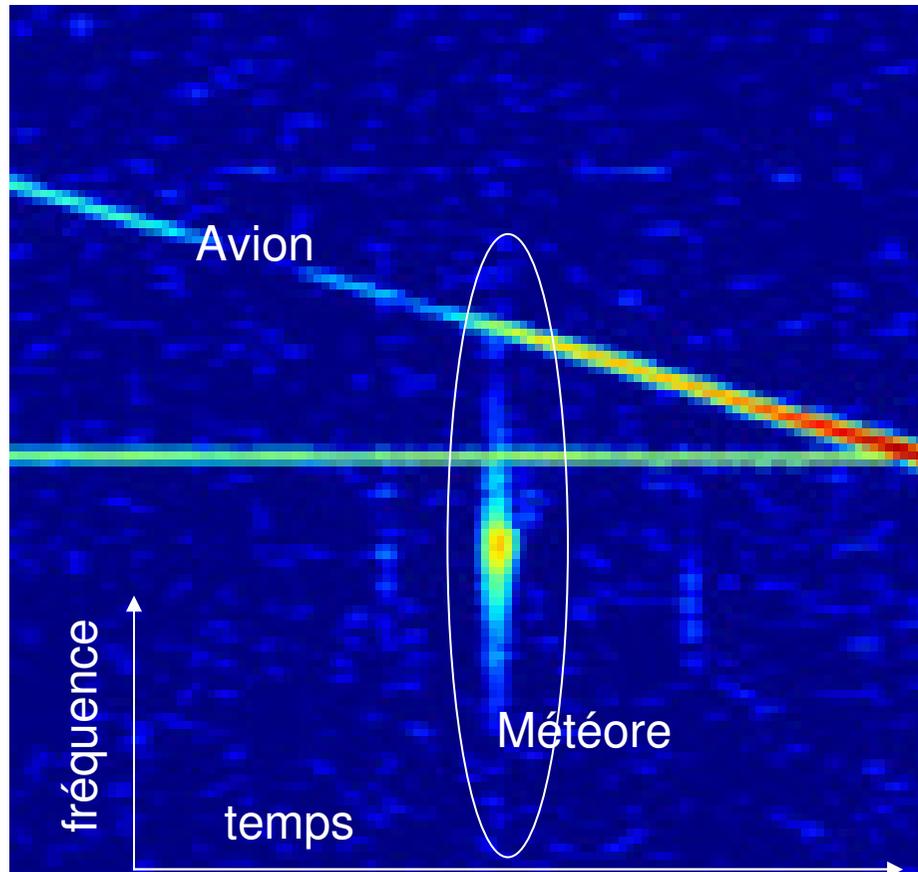
$$D_{opp}(t) = \frac{-1}{\lambda} \left[\frac{\partial d_{rx}}{\partial t} + \frac{\partial d_{tx}}{\partial t} \right]$$



Exemple sur BRAMS

Balise →





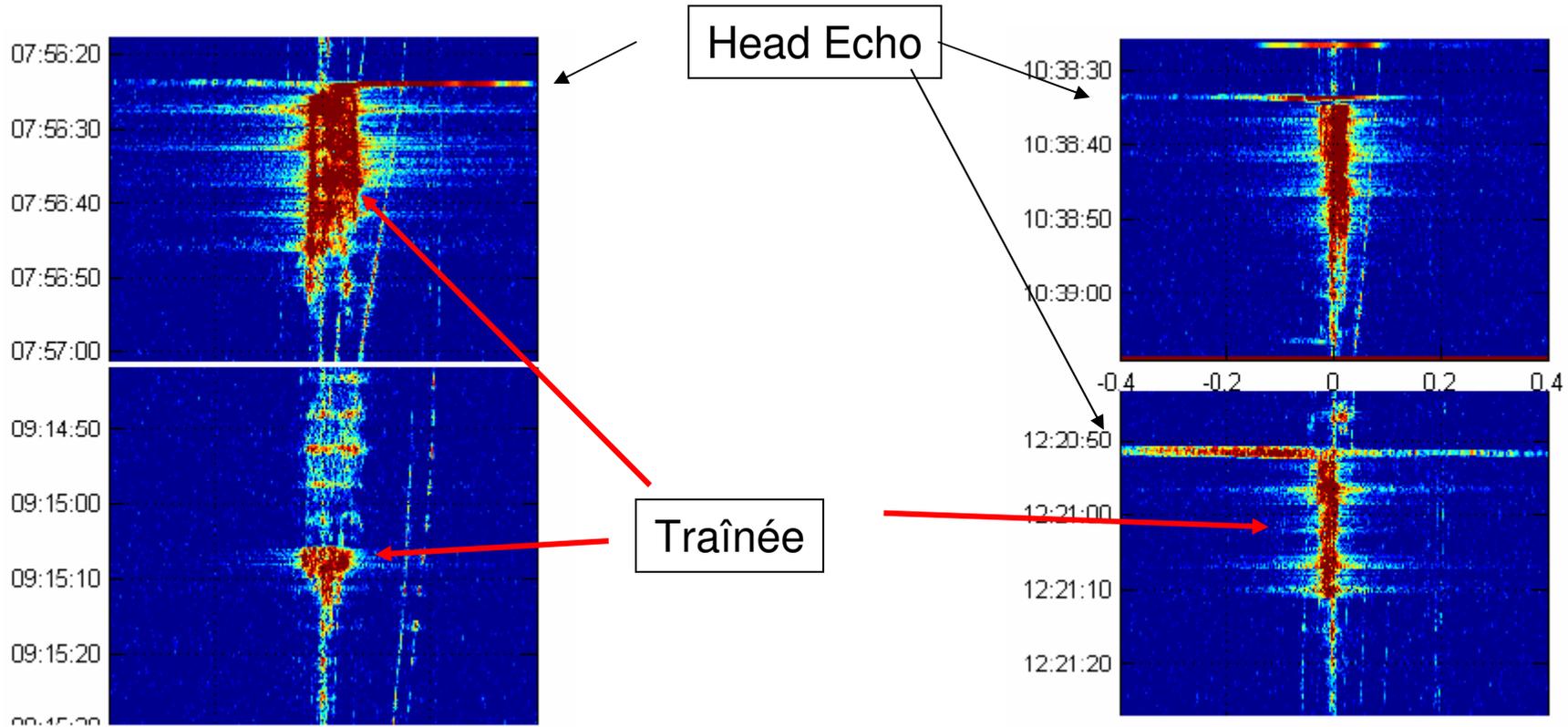
$$D_{opp}(t) = \frac{-1}{\lambda} \left[\frac{\partial d_{rx}}{\partial t} + \frac{\partial d_{tx}}{\partial t} \right]$$

Quelle valeur du Doppler(t) prendre ?

Trop rapide, fort étalement – Pas de traînée visible



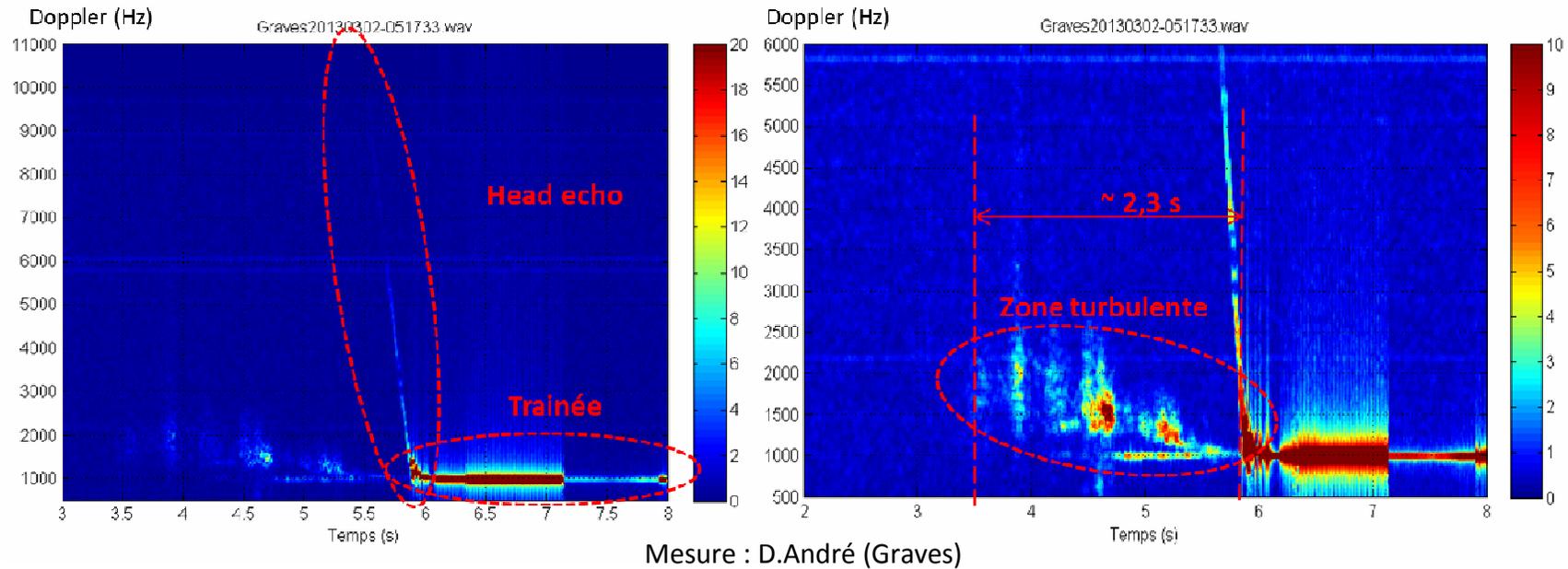
Autre exemple – GRAVES



On observe que la traînée à un Doppler quasi nul...



Quand on a de la chance...



Exemple de données mesurées via GRAVES



La mesure correspond à la dérivée de la distance bistatique

$$D_{opp}(t) = \frac{-1}{\lambda} \left[\frac{\partial d_{rx}}{\partial t} + \frac{\partial d_{tx}}{\partial t} \right]$$

1. Il faut plusieurs mesures bistatiques (plusieurs couples émetteur / récepteur)
2. Il faut mesurer des $Dopp(t) > 0$... (donc avoir un *head echo*)
3. Résoudre un système d'équations (*Doppler-only target localization*) à dérivées partielles

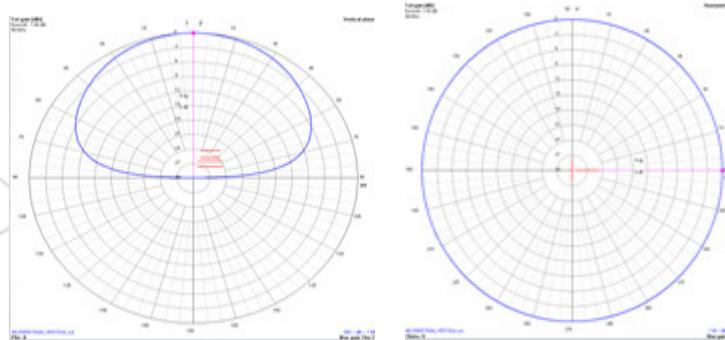
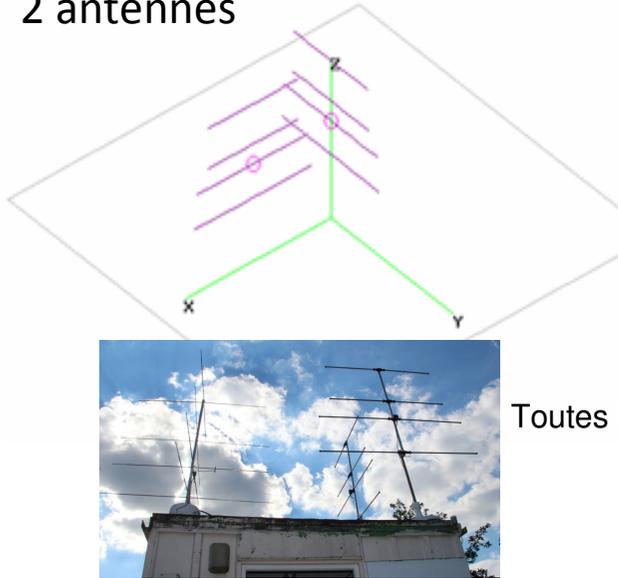
La solution la plus simple : recevoir simultanément plusieurs « canaux » correspondant à des émetteurs différents



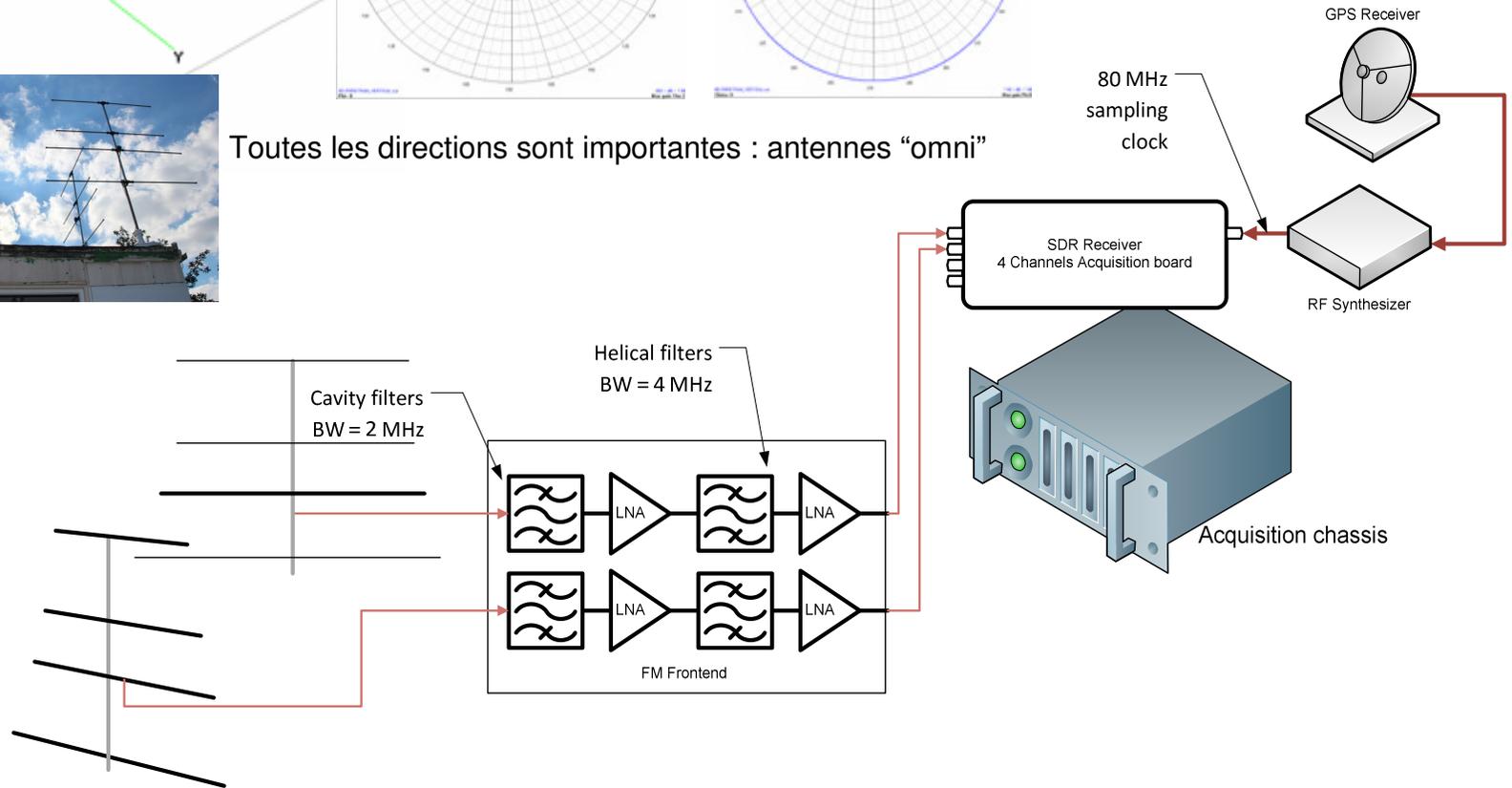
RETRAM – La station de reception



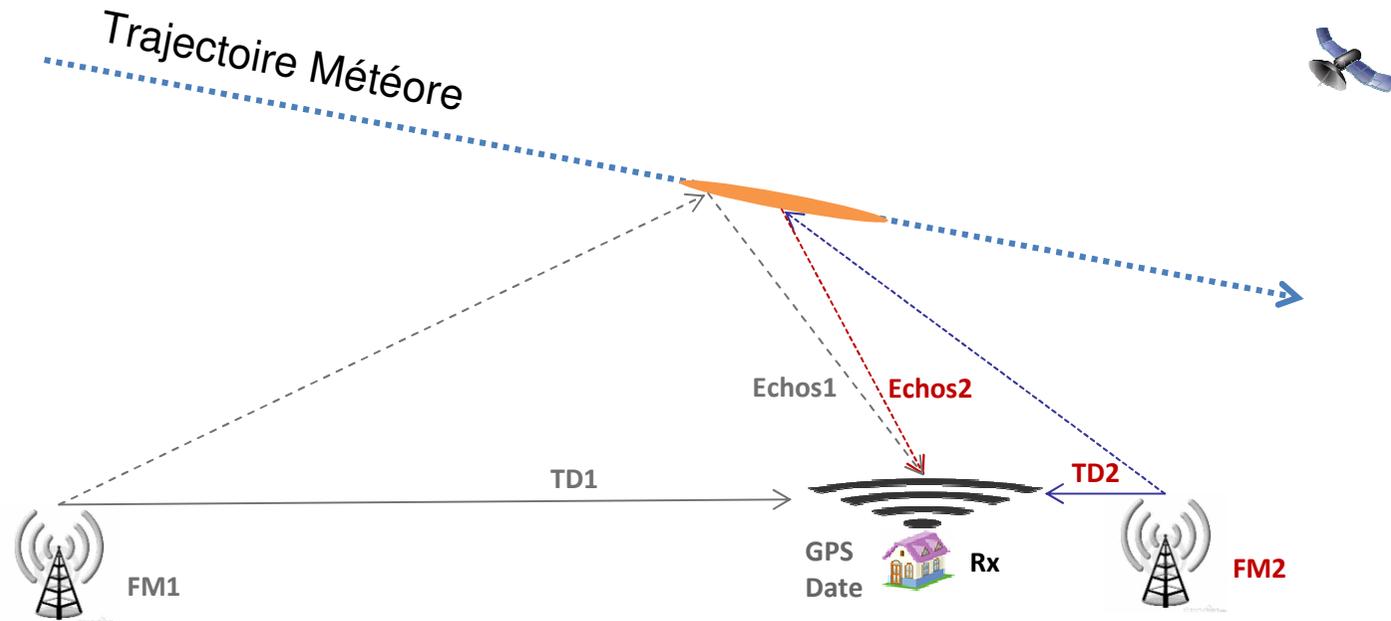
2 antennes



Toutes les directions sont importantes : antennes "omni"



Utiliser les stations de radio FM

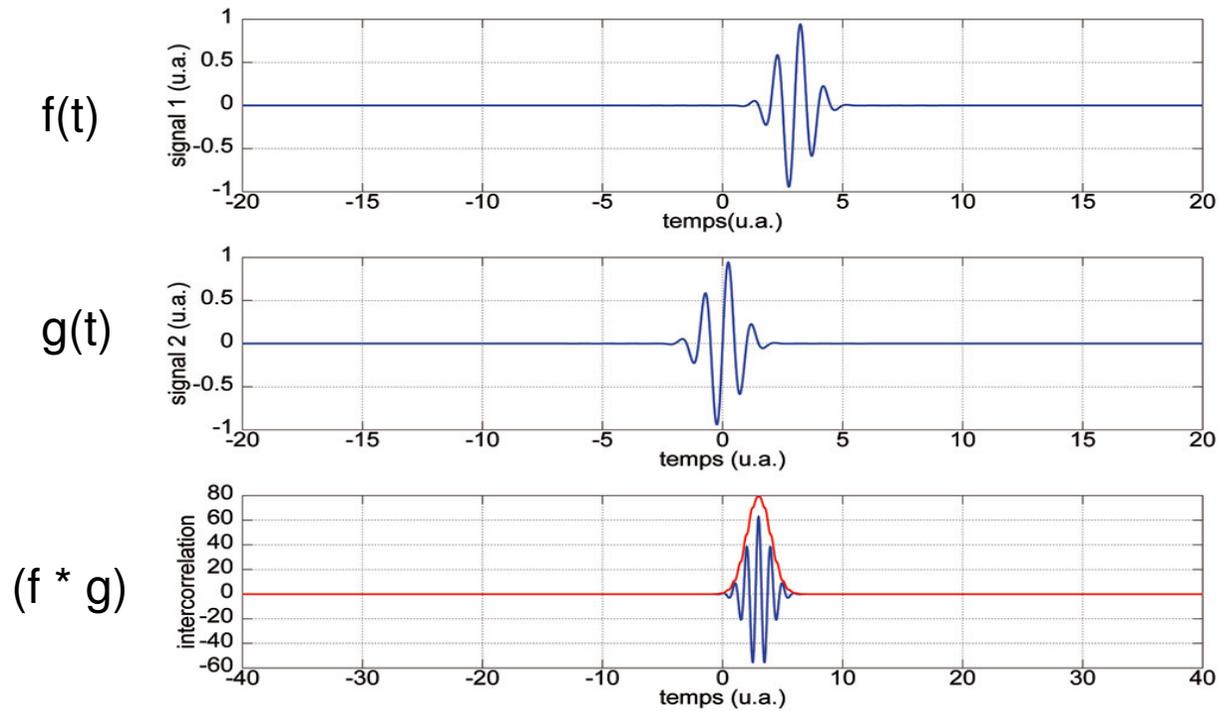


Le signal transmis varie au cours du temps, on exploite cette diversité temporelle pour dater les échos



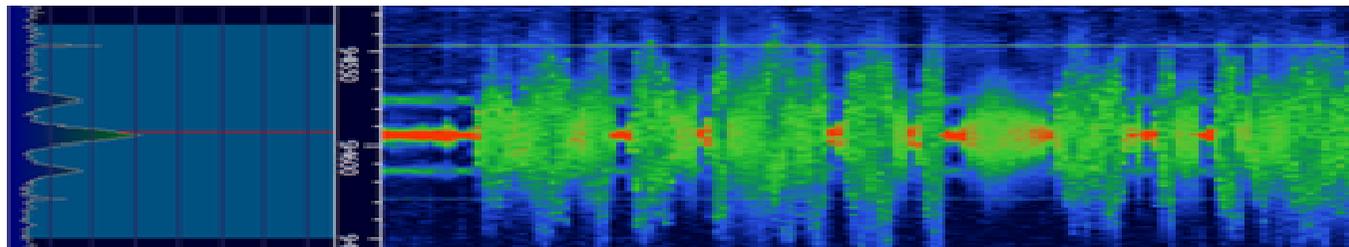
Les propriétés d'auto et inter corrélation

$$(f \star g)(\tau) \stackrel{\text{def}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t) g(t + \tau) dt,$$



Les propriétés du signal FM

Exemple : Signal France-Info sur 105.5 MHz



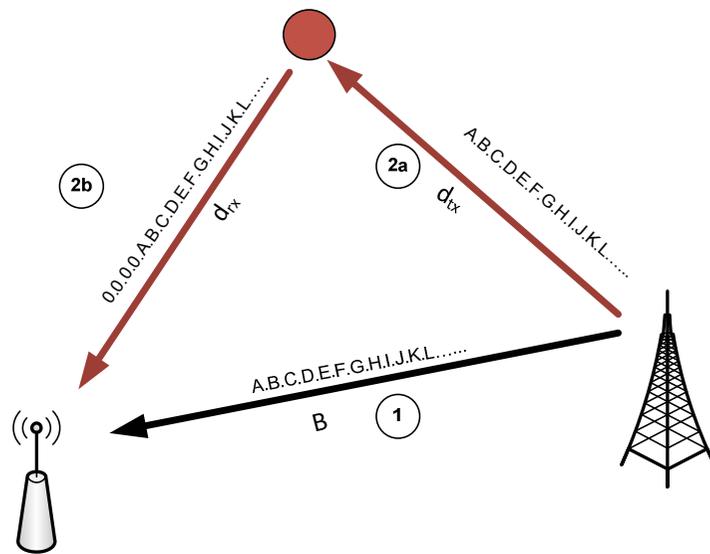
Signaux FM

- Bande utile de l'ordre de 100 KHz dans le meilleur des cas (résolution en distance au mieux 3Km),
- **Très dépendant du programme (musique, talk etc.)**
- Puissance émise importante (>10 kW)
- Attention : émission destinée à être reçue au SOL !



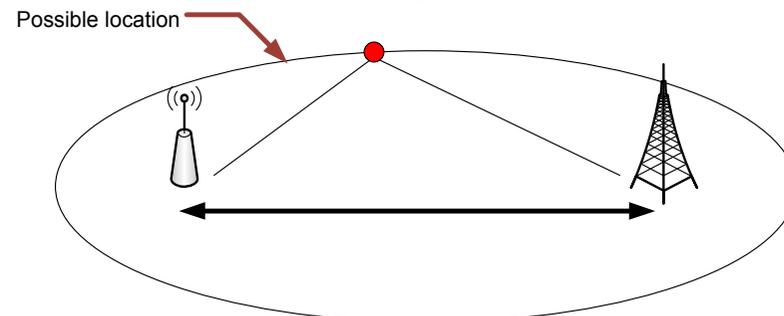
Temps de propagation

- Le signal qui transite de l'émetteur à la cible puis de la cible au récepteur est retardé



$$rx(t) = tx(t - \tau) = tx\left(t - \frac{d_{tx} + d_{rx}}{C}\right)$$

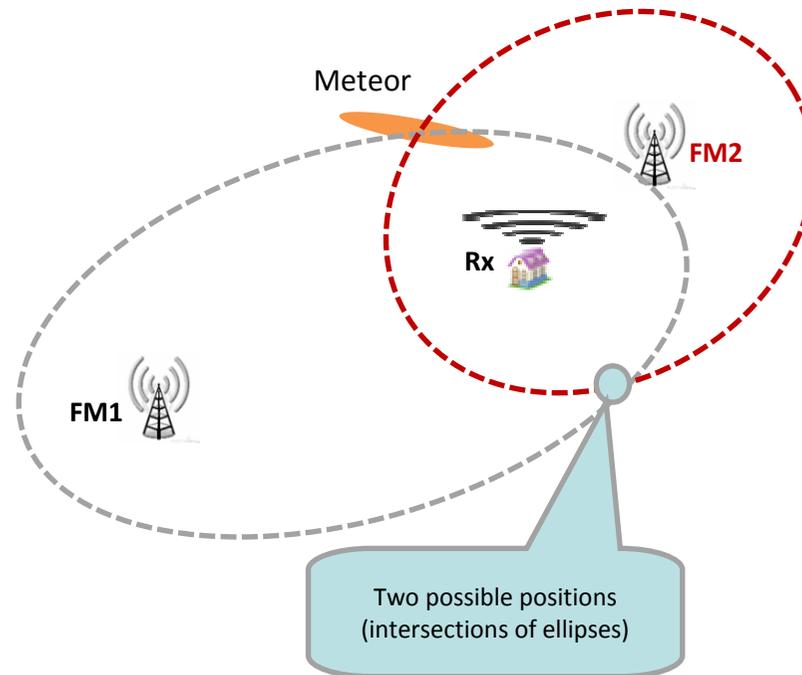
Le récepteur reçoit le signal retardé + le signal direct.
Le calcul du délai permet d'estimer l'ellipse des positions possibles



$$\tau = \frac{d_{tx} + d_{rx}}{C} = const$$



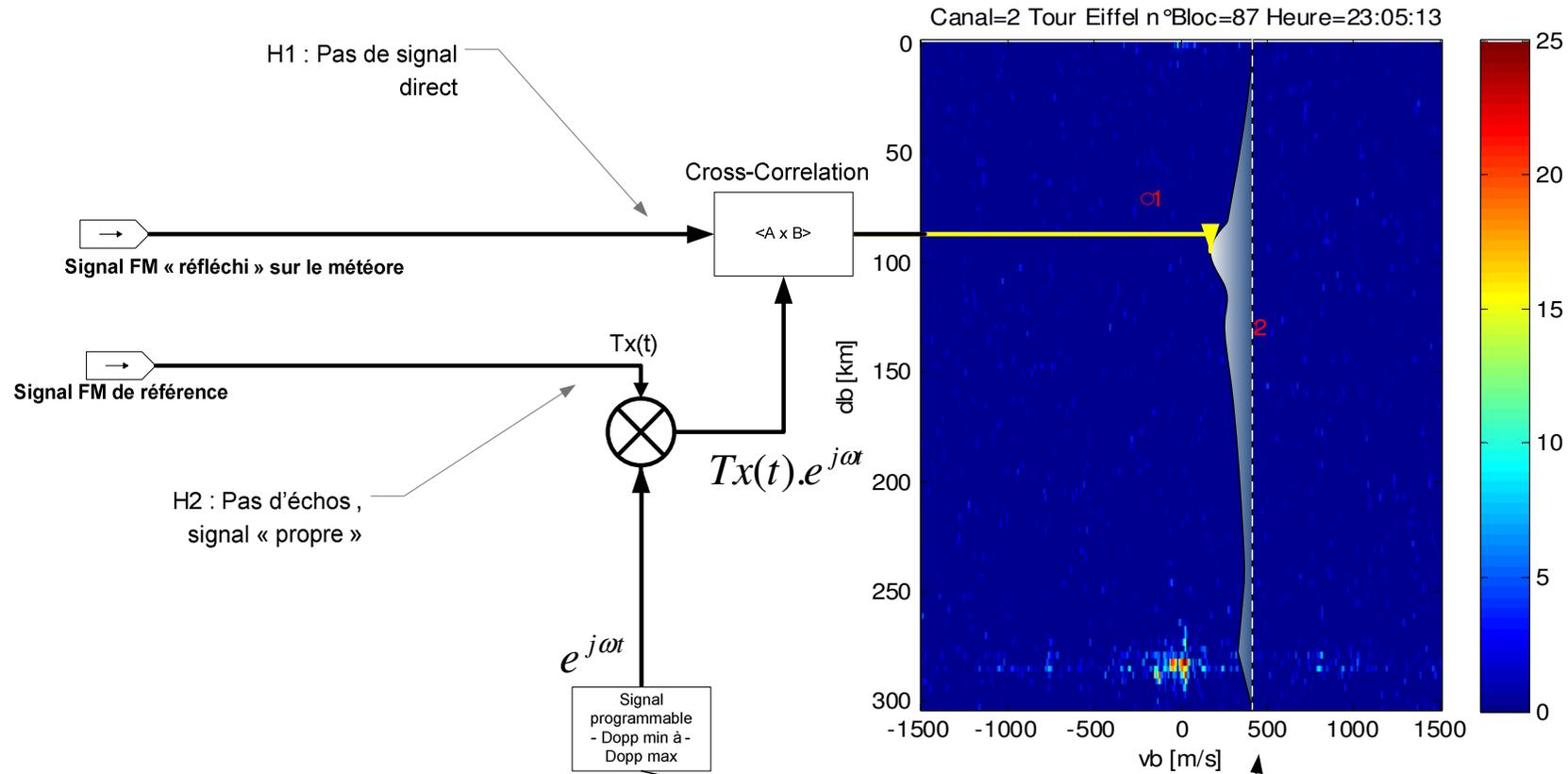
Retrouver la position



A partir de plusieurs retards, on peut estimer la position de l'objet (attention à l'ambigüité)



Traitement : Première approche « naïve »

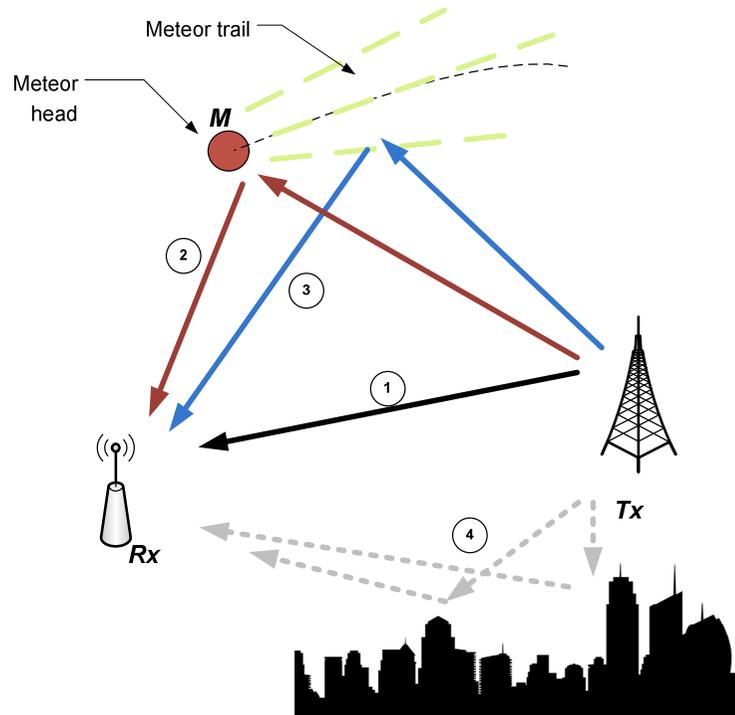


Traitement par blocs :



1. Numériser « n » échantillons voie « référence » et voie « mesure »
2. Appliquer un calcul de cross-corrélation entre la voie mesure et la voie référence

Signaux collectés par le récepteur



Approche naïve par ce que...

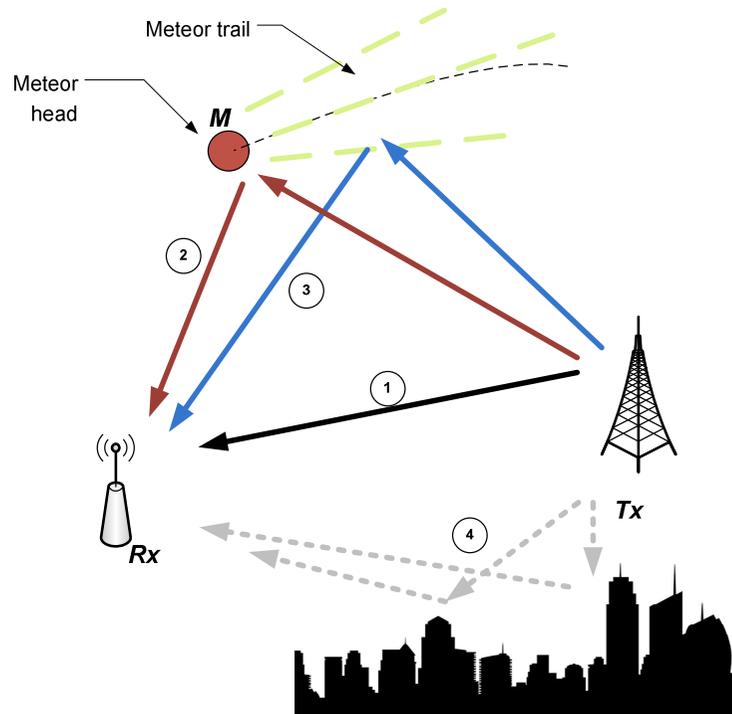
Bilan des signaux reçus :

- (1) Signal direct issu de l'émetteur
- (2) Signal réfléchi par le météore
- (3) Signal diffusé par la traînée ionisée
- (4) Signal réfléchi par l'environnement
- (5) Bruit ambiant

$$rx(t) = \underbrace{k.tx(t - \tau_1)}_{(1)} + \underbrace{\sum_n \alpha_n.tx(t - \tau_n).e^{jD_{opp}t}}_{(2+3)} + \underbrace{\sum_m \beta_m.tx(t - \tau_m)}_{(4)} + \underbrace{\eta}_{(5)}$$



Limites de l'approche naïve



Puissance relative des signaux

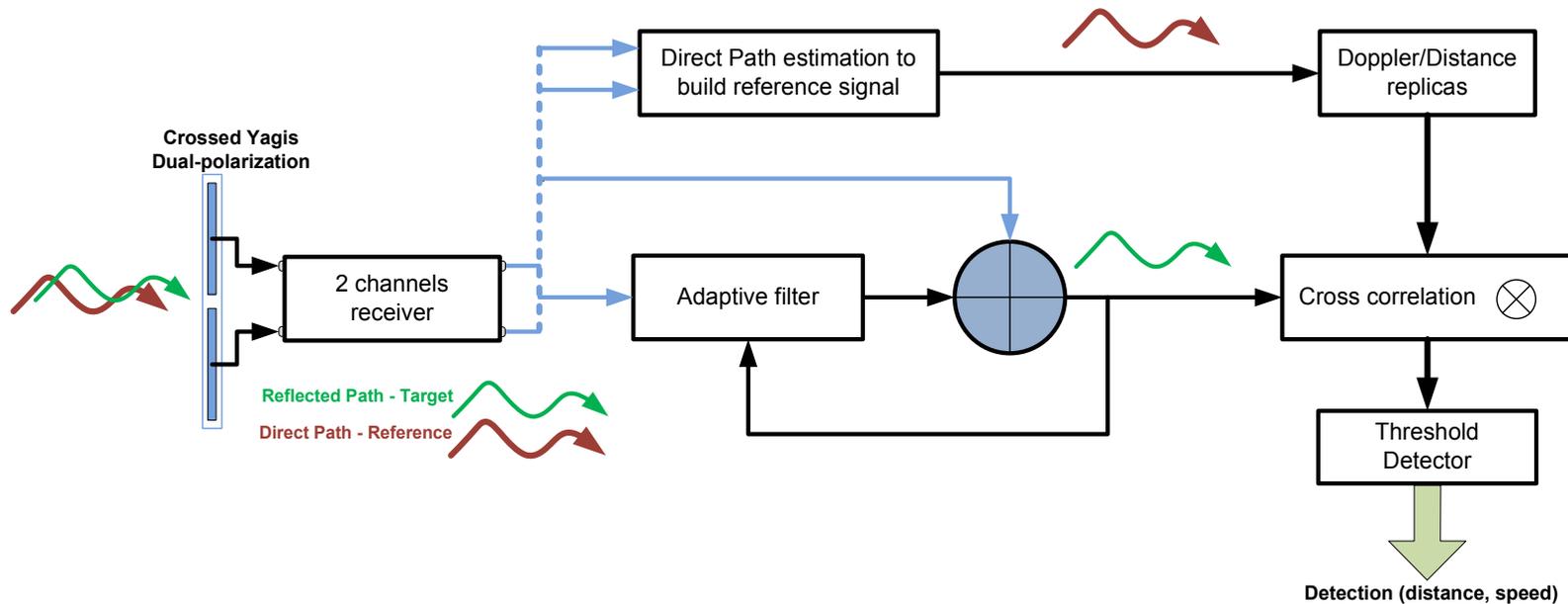
- (1) Signal direct issu de l'émetteur
- (2) Signal réfléchi par l'environnement
- (3) Bruit ambiant
- (4) Signal diffusé par la traînée ionisée
- (5) Signal réfléchi par le météore

Les signaux qui nous intéressent sont 20 à 30 dB plus faibles que (1+4)

L'approche naïve ne donne aucun résultat exploitable...



Solution : filtrage adaptatif



$$rx(t) = k.tx(t - \tau_1) + \sum_n \alpha_n . tx(t - \tau_n) . e^{jD_{opp}t} + \sum_m \beta_n . tx(t - \tau_m) + \eta$$

Objectif du filtrage adaptatif : atténuer les signaux indésirables

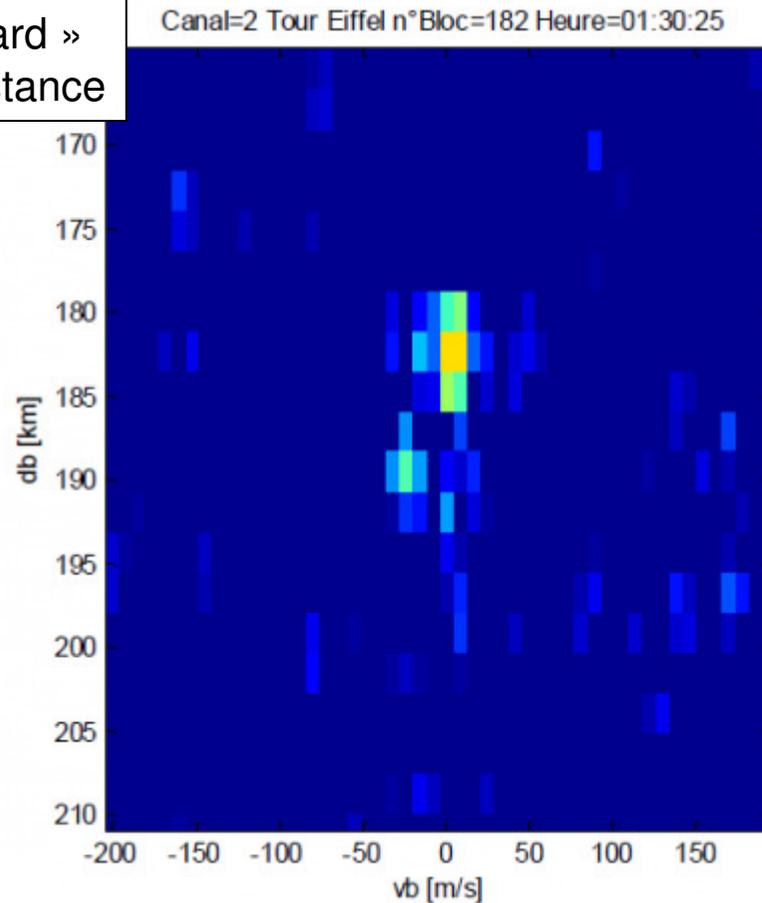
Différents algorithmes existent, les versions « simples » (utilisées par RETRAM) permettent d'obtenir une réjection suffisante



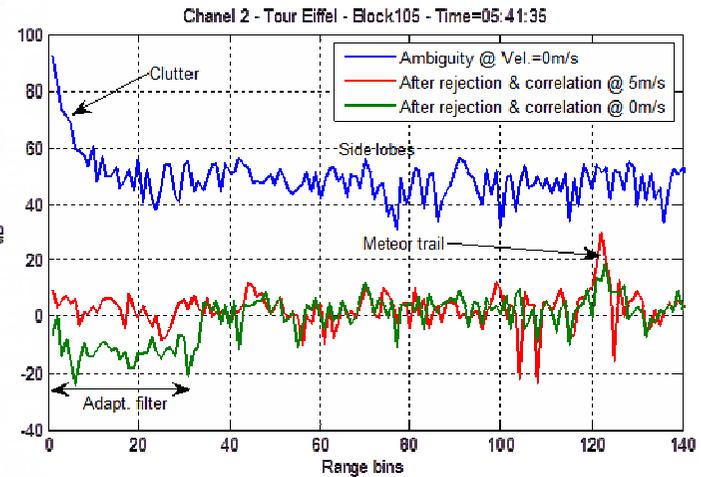
Exemple de sortie : « carte Range Doppler »



Axe « retard »
C'est la distance



Couleur
proportionnelle à la
SER de l'objet

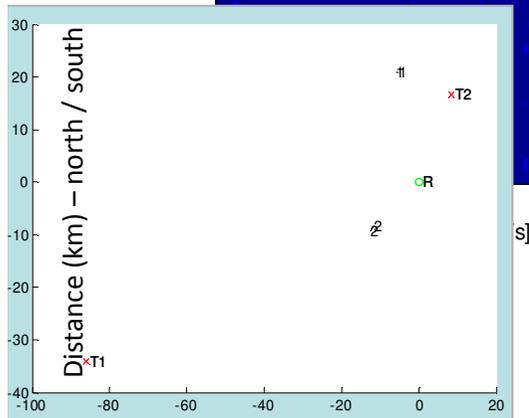
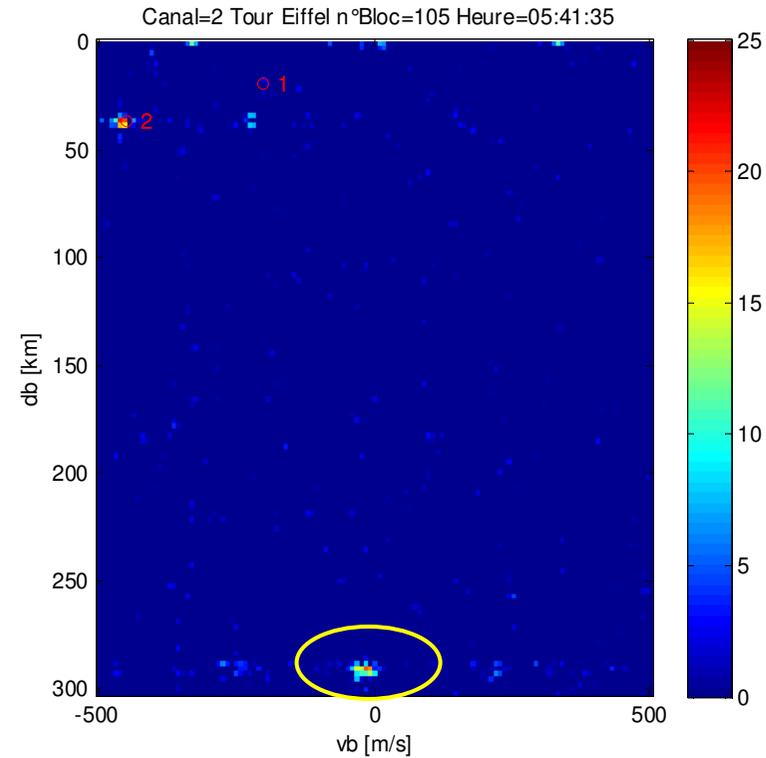
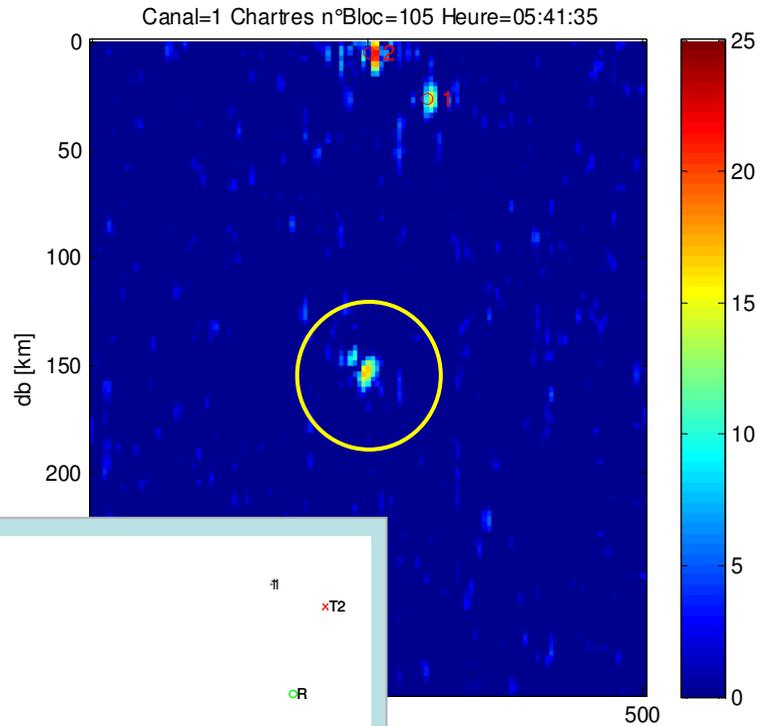


Performances réjection

Axe « vitesse »



Perséïdes 2013



Système configuré pour fonctionner avec :

- Premier émetteur : Chartres (T1)
- Second émetteur : Tour Eiffel (T2)
- Récepteur à Orsay

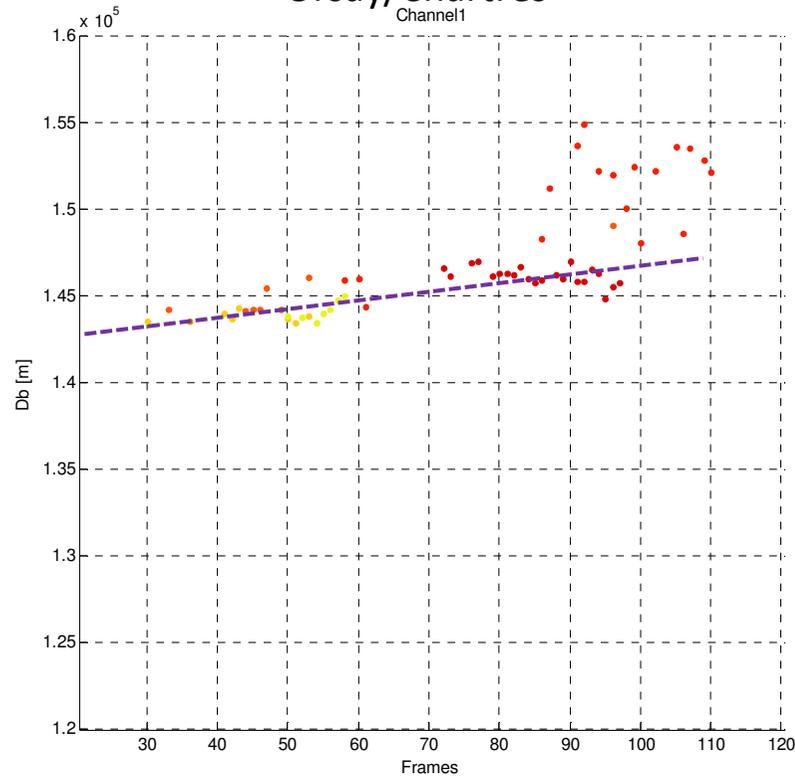


Distance (km) - east / west

Tracking – Perseïdes 2013

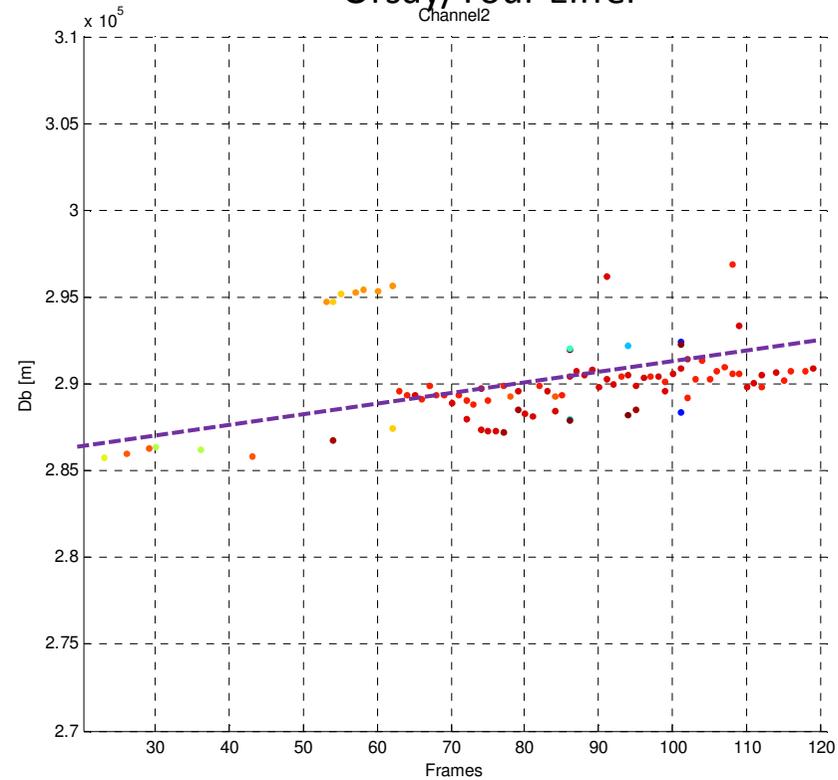


Distance bistatique sur base Orsay/Chartres



Time : 1 frame = 0,33s

Distance bistatique sur base Orsay/Tour Eiffel



Time : 1 frame = 0,33s

Evolution de la distance bistatique sur un météore
Perséïdes 2013 (12/08/2013 3h41 UTC)



Merci de votre attention !



- Questions ?
- www.retram.org

