

Trajectoires de météores en radio



23/01/2016

- ❑ Cette présentation a pour but de détailler l'observation en radio d'un météore (météoroïde traversant notre atmosphère)
- ❑ Le texte fait référence à des notes citées et listées en dernière page. Les démonstrations et explications de ces notes ne sont pas reprises (se reporter aux notes). Seuls les résultats ou figures sont utilisés.
- ❑ Les analyses sont conduites sur la base d'un signal relevé lors des Perséides 2015. Ce type de signal est assez commun et couramment observé.
- ❑ L'observation est décomposée en 4 phases successives. D'autres phases pourraient suivre comme pénétration à basse altitude (troposphère) mais aucun enregistrement de ce type n'a encore été effectué à RETRAM.
- ❑ Des informations complémentaires et synthèses sont présentées par la suite :
 - ❑ Trainées, Plasma, SER, Echos RADAR, Cinématique, Simulation, Impacts...
- ❑ Conclusions - Impact des résultats - Suite.
- ❑ Cet extrait de la présentation de l'AMS* fixe les définitions de =>

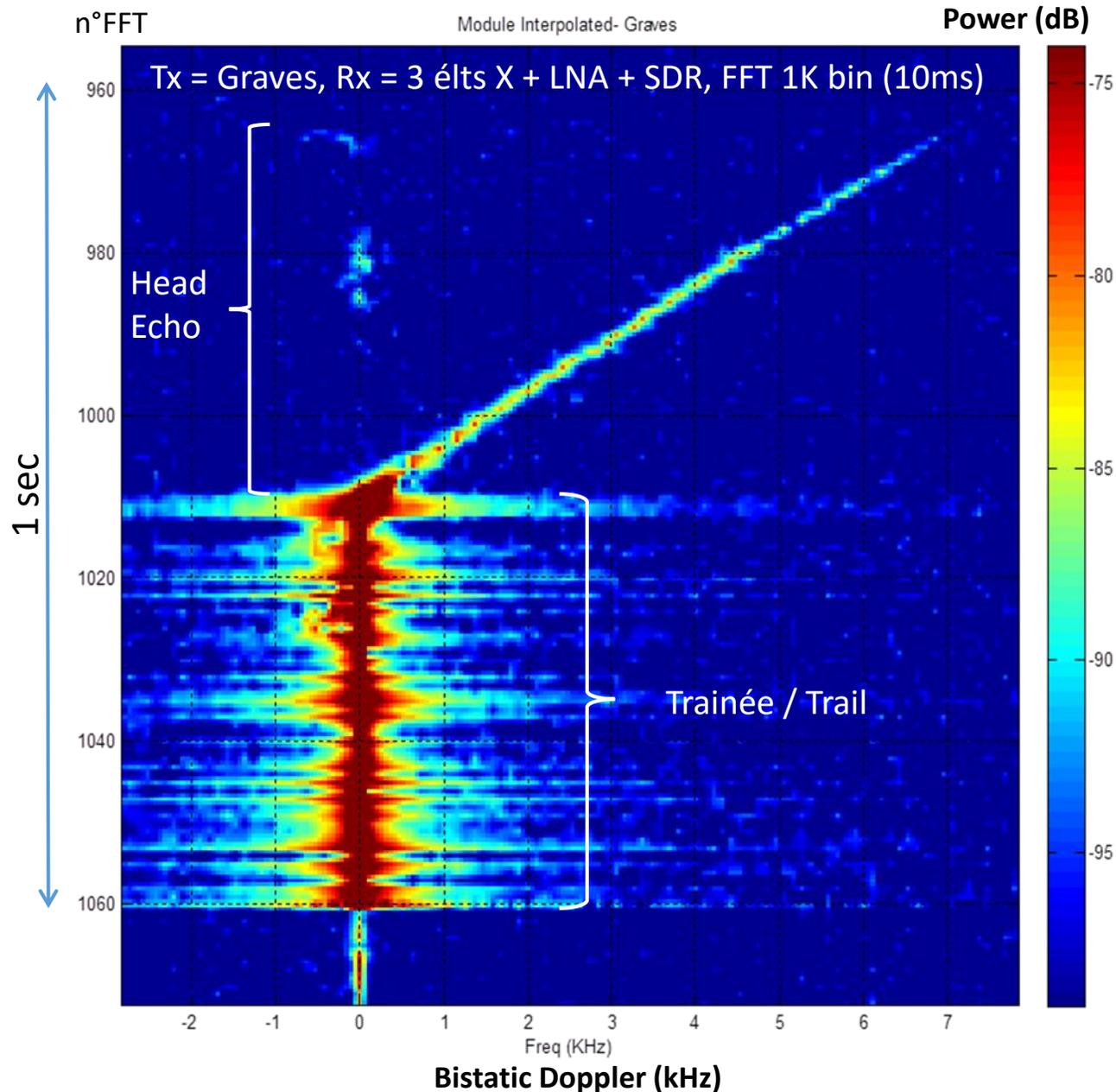
* AMS = American Meteor Society <http://www.amsmeteors.org/fireballs/faqf/>

Document sous licence CC BY-SA



contact@retram.org





Introduction

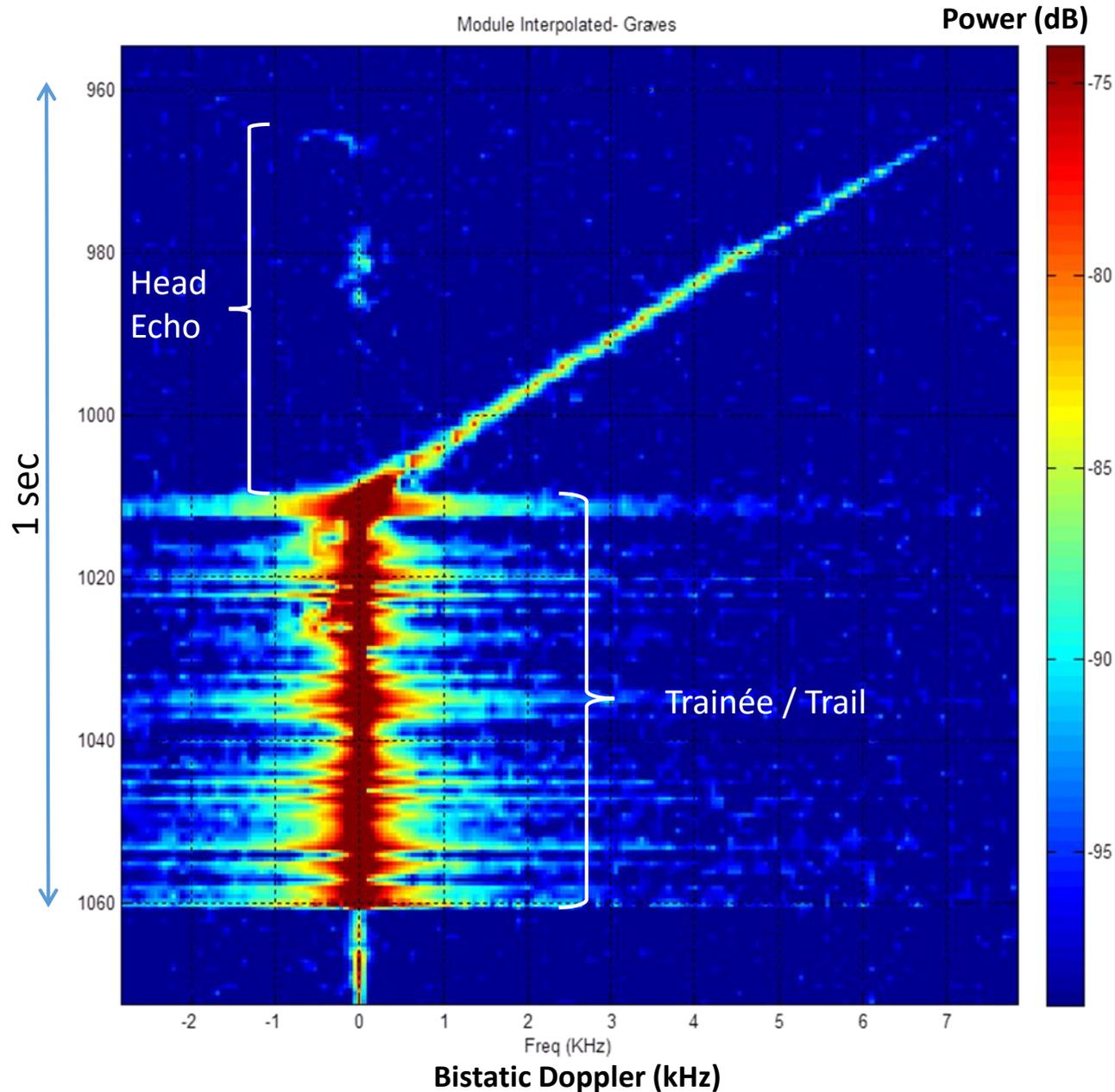
- ❑ Cette présentation a pour but de détailler l'observation en radio d'un météore (météoroïde traversant notre atmosphère). Devant les questions soulevées, l'analyse est détaillée dans les pages suivantes pour aboutir à un début de présentation.
- ❑ Les analyses sont conduites sur la base du signal ci-contre relevé lors des Perséides 2015. Ce type de signal est assez commun et couramment observé. La durée de cette détection est de 1s.

Constat

- *Les stations amateurs, utilisant des antennes peu directives (gain faible), peuvent observer, sans difficulté, la trainée (trail) d'un météore. En utilisant un émetteur radar puissant comme Graves, son rapport signal/bruit peut être élevé.*
- *Le « Head echo » observé ci-contre est d'un tel niveau, que l'on peut s'interroger si ces signaux fréquemment observés par les amateurs sont bien liés à la réflexion sur la tête (head) du météore (météoroïde entouré de plasma).*

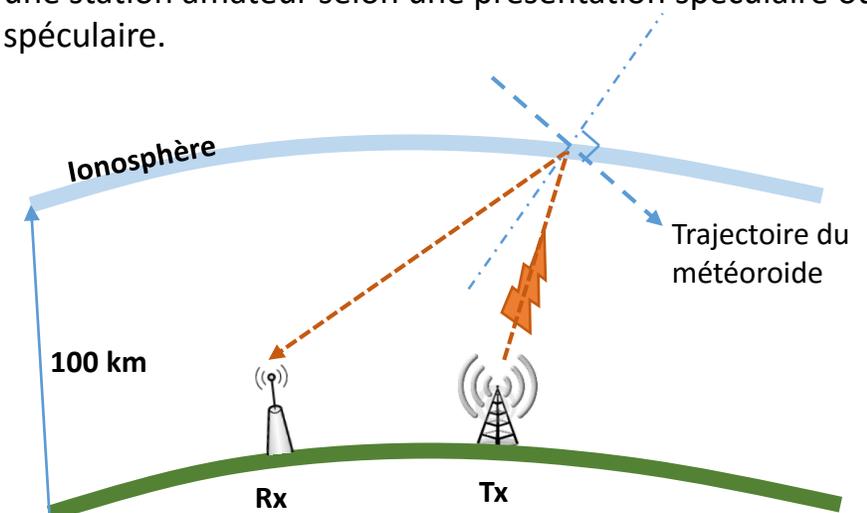
Commentaires

- Le Head-echo (selon l'observation ci-contre) est cohérent en temps avec l'observation de la trainée lumineuse observé en optique (référence 5).
- Partant de la représentation schématisée éditée par Cyprien (référence 6), l'objectif de cette présentation est de décrire un signal radio réfléchi correspondant à ce phénomène.
- Cette description est présentée en page 14 suite aux différentes hypothèses émises ci-après. Hypothèses à confirmer...



Hypothèses

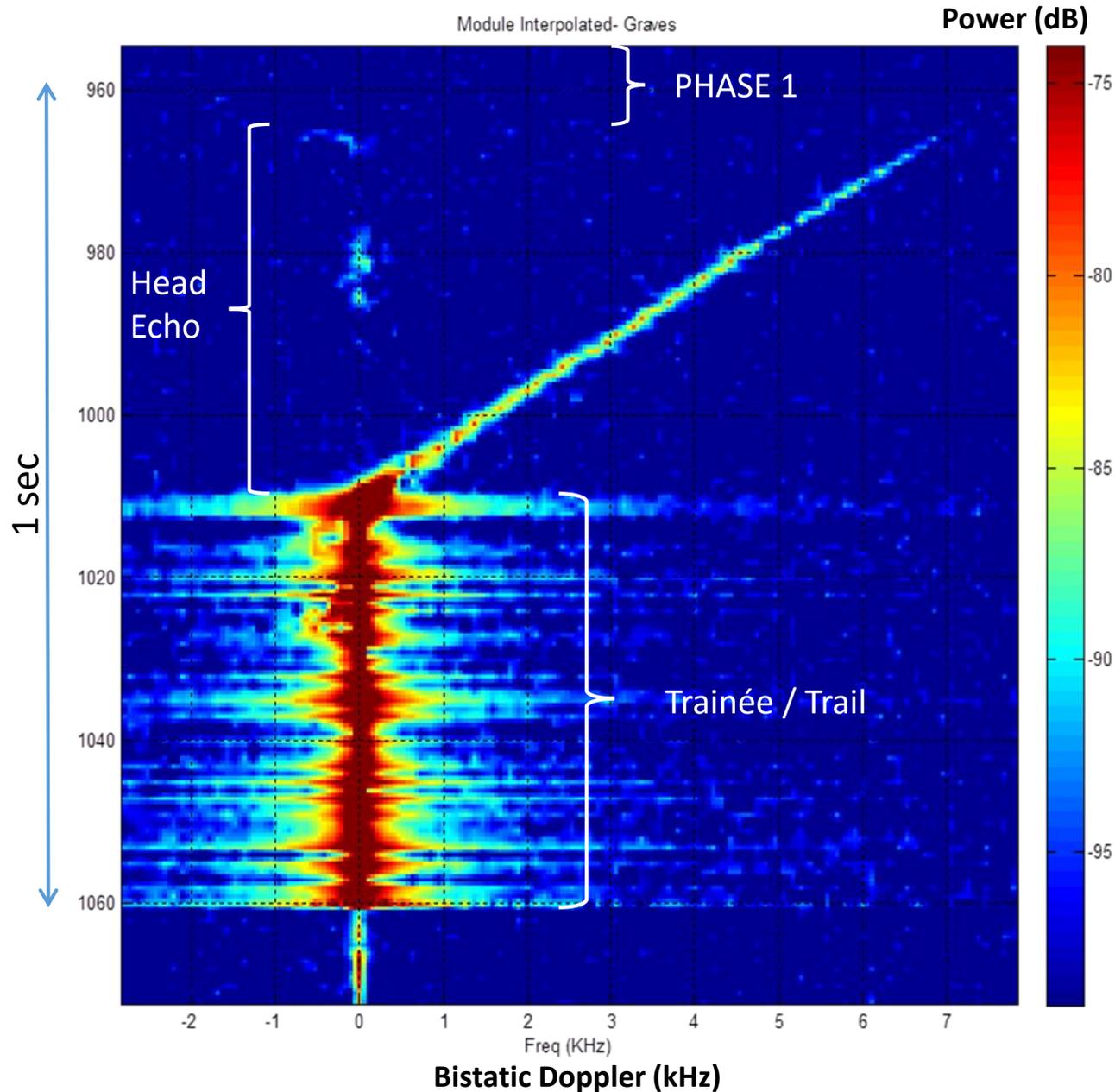
- Comme pour la trainée, le signal « head echo » est observé par une station amateur selon une présentation spéculaire ou quasi-spéculaire.



Exemple de configuration géographique conduisant à la réflexion spéculaire. Pour un radar monostatique, l'axe de la réflexion spéculaire est confondue avec la normale à la trajectoire, ce qui n'est pas le cas pour un radar bistatique.

Commentaires

- L'observation radio est détaillée dans les pages suivantes et des informations complémentaires sont données en synthèse et conclusion.



Hypothèses

1. PHASE 1

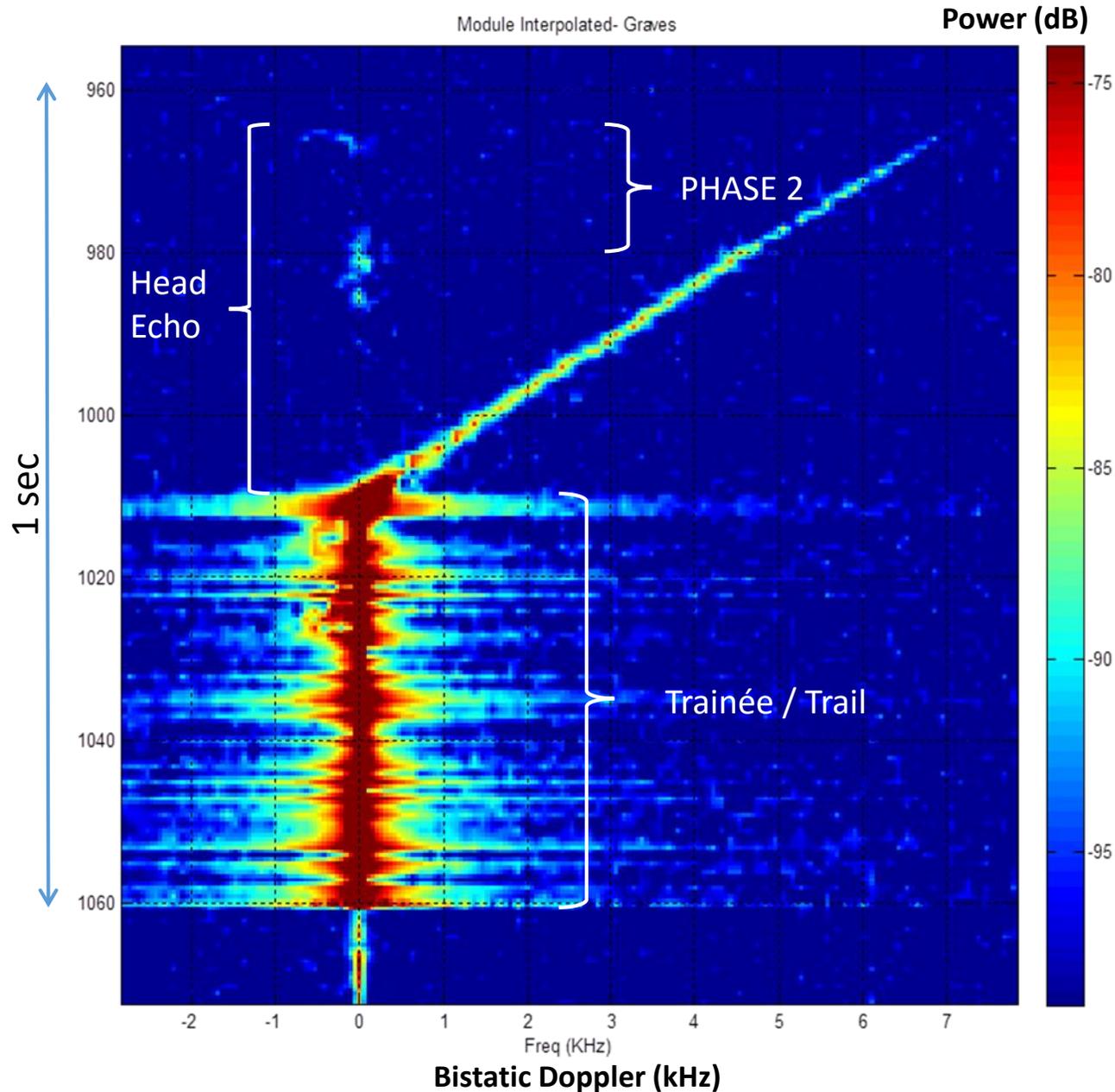
A haute altitude, à partir de 120 km, le météoroïde pénètre les couches peu denses de la ionosphère à très haute vitesse (plusieurs dizaines de km/s). Sa composition (différents matériaux) et le frottement contre les molécules d'air vont provoquer un échauffement et la vaporisation/ablation du météoroïde. Une production de plasma (ionisation) débute. Ce phénomène est peu lumineux.

A ce stade, le météore est observable en optique et en radio par des moyens professionnels tels les radars HPLA (High Power & Large Aperture). L'observation du « head echo » dont la SER est très faible (voir page 13) nécessite des puissances d'émission très élevées et de forts gains d'antenne.

Cette phase 1 précède la détection ci-contre.

Commentaires

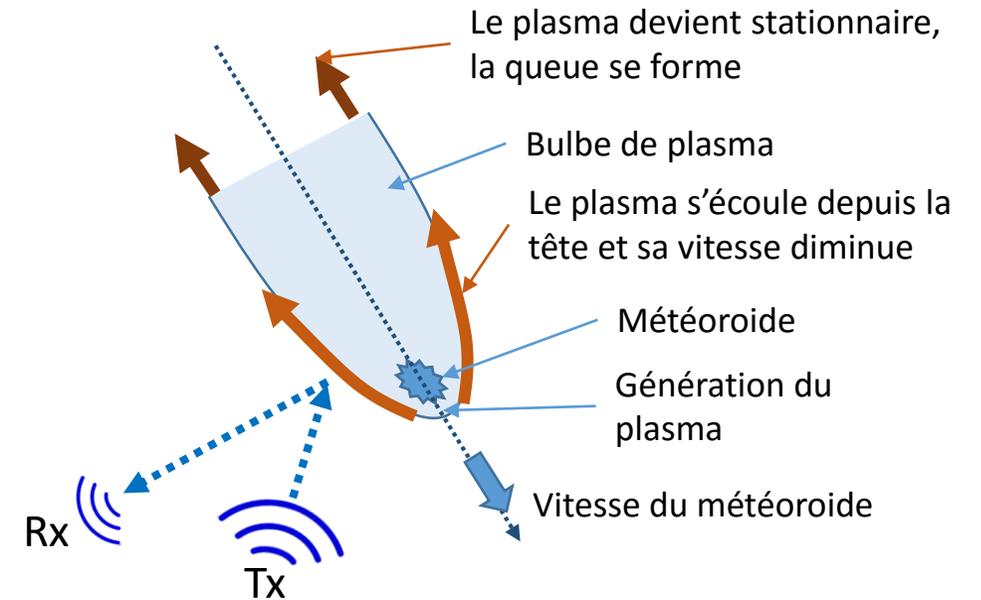
- L'observation radio de cette phase n'est pas possible par une station amateur (bilan radar trop faible suite à une surface équivalente radar trop petite)



Hypothèses

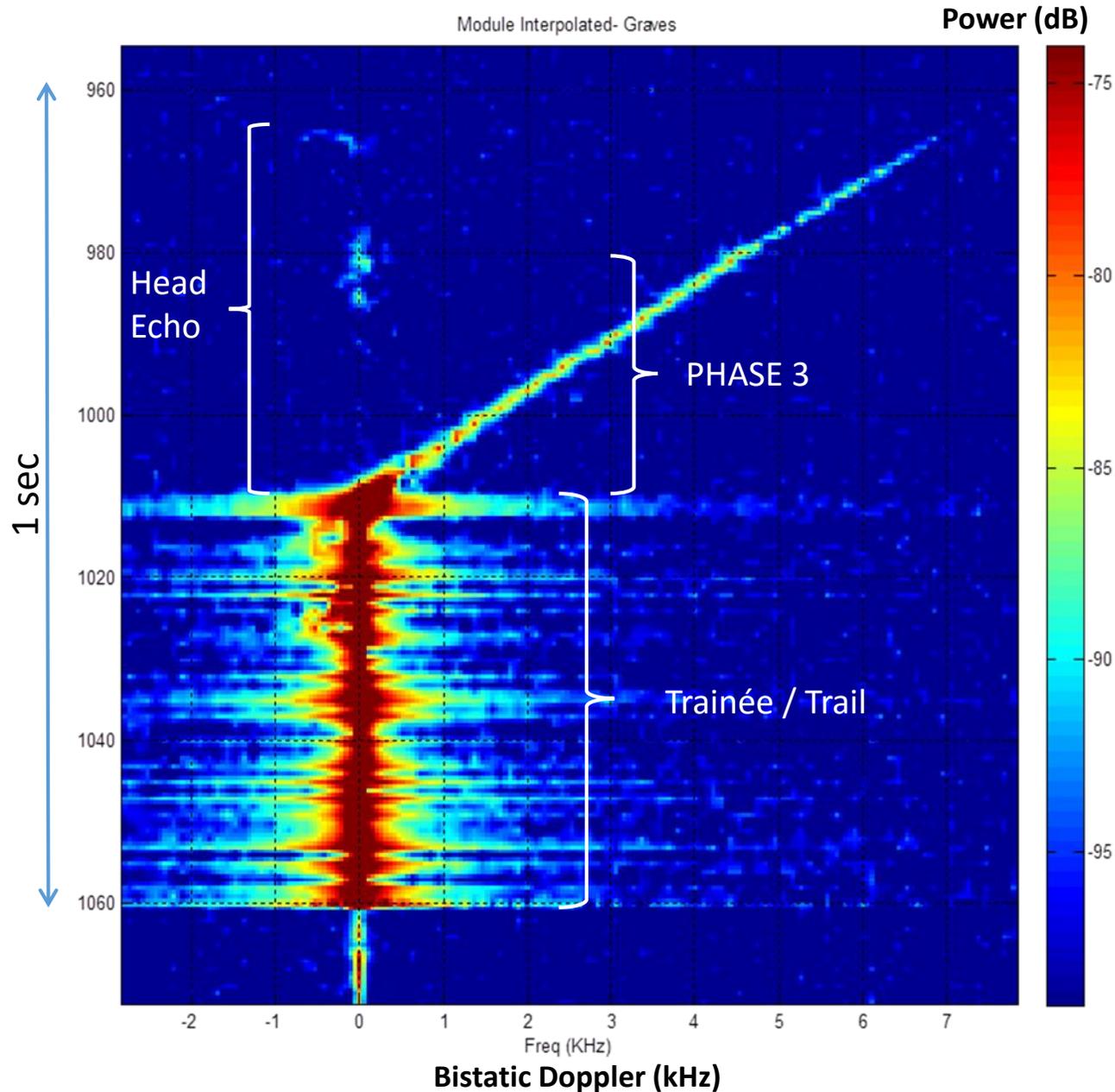
2. Phase 2 – Proposition d'explication à confirmer / compléter

Lors de sa descente et traversée de la ionosphère à très haute vitesse, la formation de plasma autour de la tête va continuer et se propager le long et derrière le météoroïde (début de formation de la queue ou plume).



Commentaires

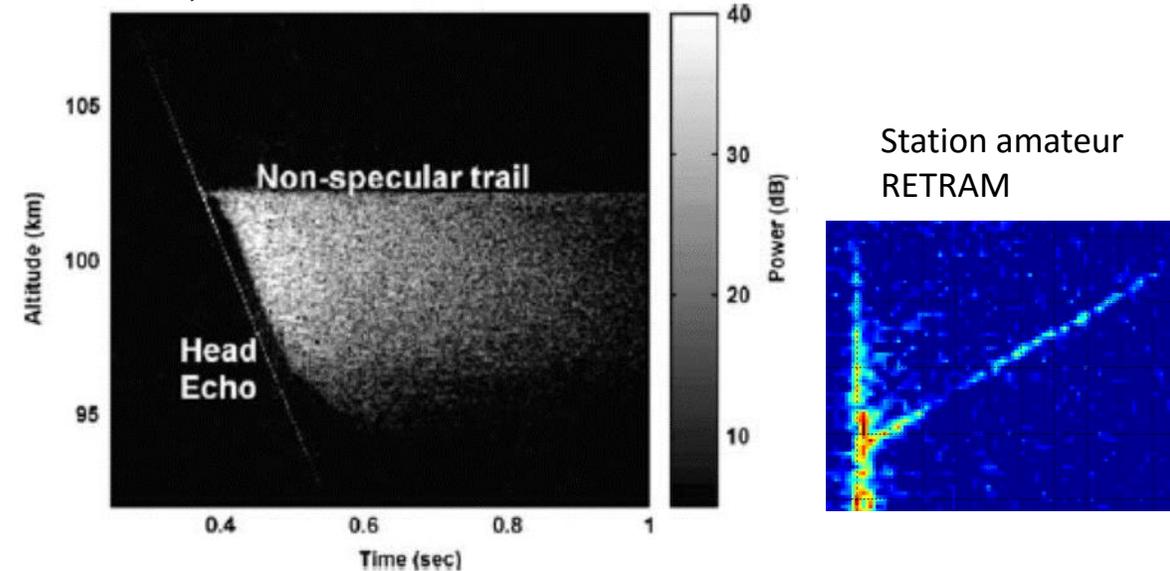
- Le météoroïde entouré de son bulbe de plasma devient observable en radio par une station amateur, Le doppler décroît rapidement du fait de la présentation spéculaire et de la vitesse du plasma qui diminue. Ce n'est pas lié à une décélération.
- La formation de la queue ou plume quand le plasma devient stationnaire débute (à Doppler nul) => Zone turbulente.
- La vitesse du météoroïde a peu évoluée (liée à sa taille et sa composition).



Hypothèses

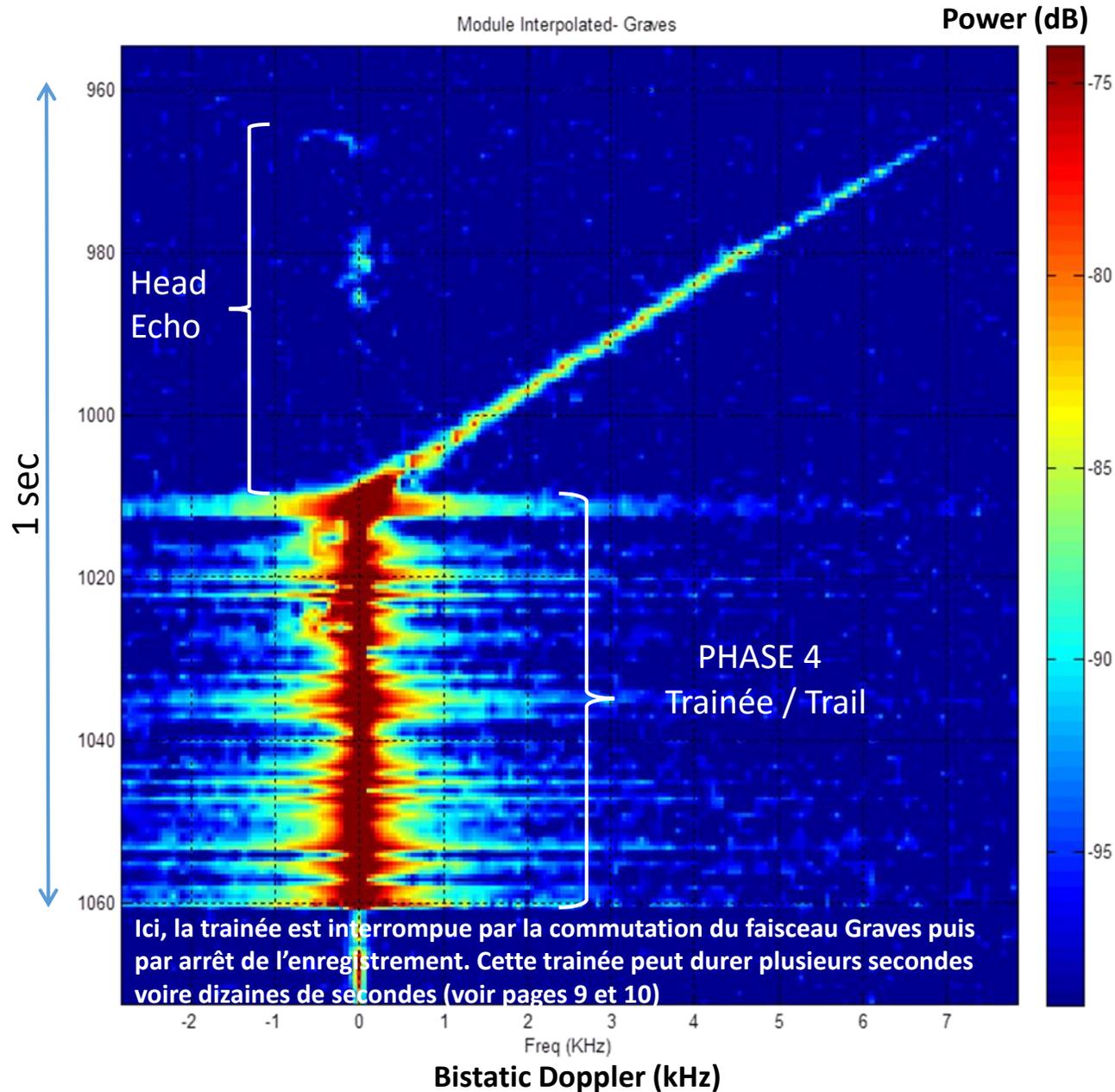
3. Phase 3

Le météoroïde poursuit sa descente. Le plasma s'étend, se refroidit, sa vitesse diminue et forme la trainée. La SER augmente et le signal devient puissant. La production de plasma finit par cesser et la trainée devient totalement stationnaire (Doppler nul).



Commentaires

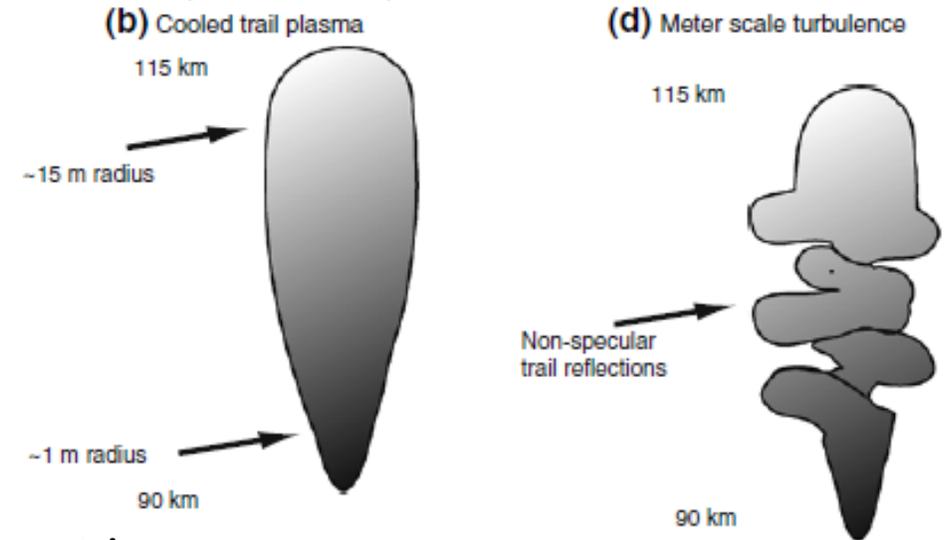
- La figure de gauche ci-dessus (référence 1 et 3 – Close 2002) montre cette phase vue par le radar VHF Altair selon une présentation non-spéculaire (non visible par une station amateur).
- A droite, la trainée à Doppler nul peut débuter plus tôt suivant la dimension et la présentation de la plume du météore.
- La vitesse du météoroïde a peu évolué (liée à sa taille et sa composition). Le météoroïde peut également se vaporiser / désintégrer totalement lors de cette phase.



Hypothèses

4. Phase 4

Seule la trainée stationnaire reste visible par des moyens amateurs. Son Doppler est nul ou très faible en fonction des vents présents en altitude et de la configuration bistatique Tx / Trainée / Rx. Le météoroïde se désintègre dans la plupart des cas lors de sa descente final ou finira au sol (météorite). Ces dernières phases n'ont pas été observées par RETRAM.



Commentaires

- Figures ci-dessus issue de référence 3.
- Cette trainée fait plusieurs mètres de diamètre et s'étend sur plusieurs kilomètres ce qui crée une SER importante et des signaux très puissants. La stationnarité, sans perte liée à la migration vitesse / Doppler, augmente encore le niveau de signal après FFT.
- Les déformations de la trainée (figure de droite) permettent des observations non-spéculaires aux tracés Doppler très variés... (reference 4). Voir observations planche suivante...

Météore



Images
Fabrice Noël
AAV

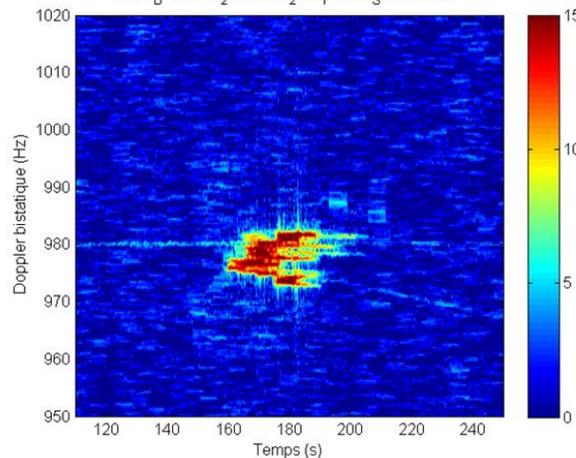
Rémanent



'RAD_B-RA-VVS_20130812_235_f1EHX_S_YS002.wav'

Bistatic Doppler (Brams)

Détection
B.Kiefer
F1EHX



Hypothèses

5. Phase 4 bis

Suivant la nature du météoroïde et de son environnement, la phase 4, décrite précédemment, peut se prolonger sous une autre apparence. Les particules vaporisées et l'échauffement excessif peut se propager et ainsi former et entretenir une trainée plus ou moins déformée et persistante également appelée « rémanent ».

Ce phénomène est observable en radio et en optique et peut durer de plusieurs dizaines de secondes jusqu'à plusieurs dizaines de minutes.

Son Doppler reste très faible mais la trace peut être complexe (comme montrée ci-contre) et évoluer en fonction des vents présents en altitude et de la configuration bistatique « Tx / Trainée / Rx ».

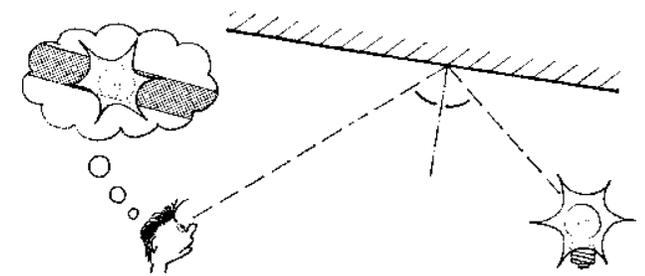
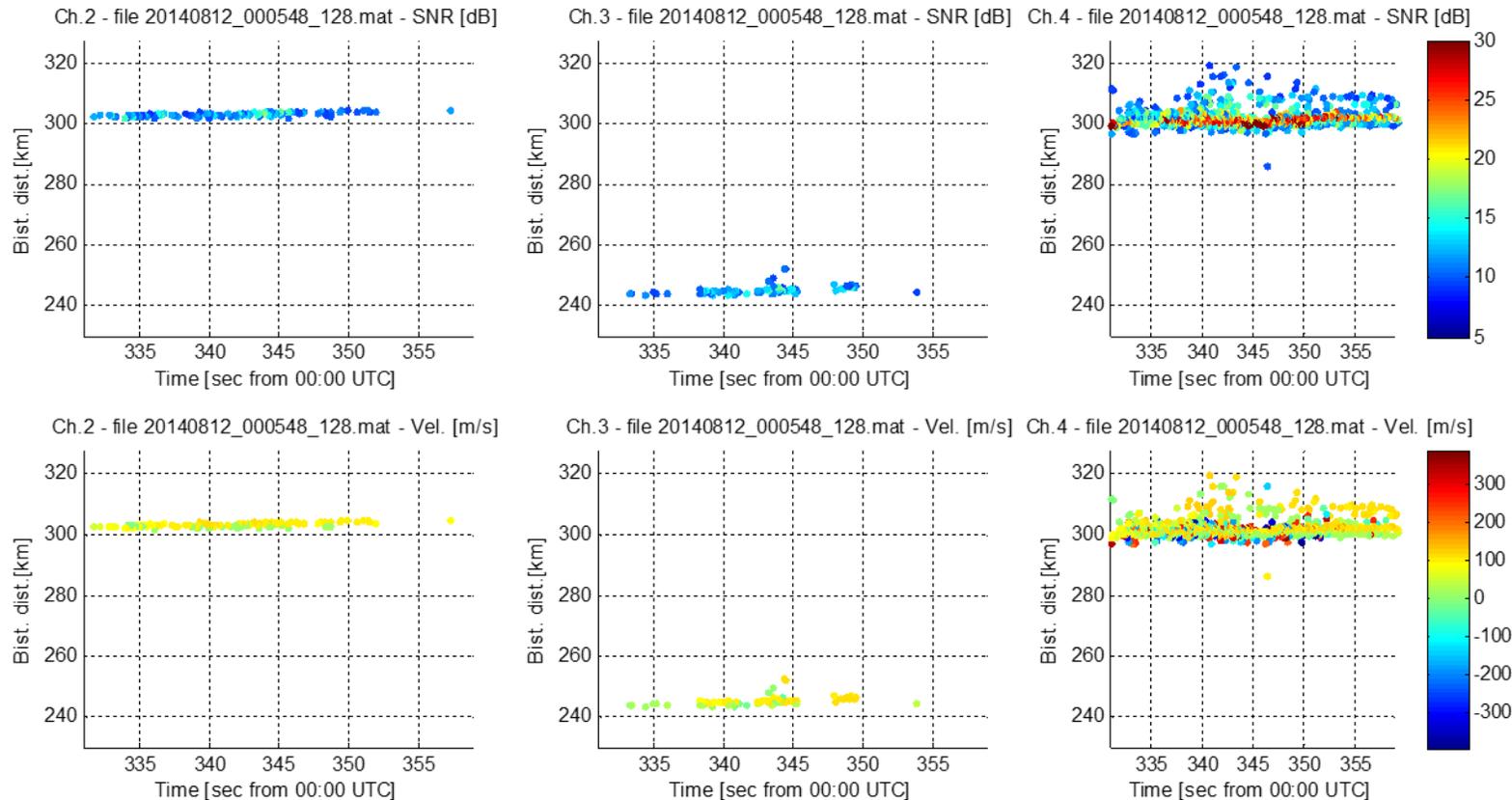
Commentaires

- Figures ci-contre issues de référence 5.
- Cette trainée s'étend sur plusieurs kilomètres ce qui crée une SER importante et des signaux puissants.
- Les déformations de cette trainée permettent des observations aux tracés Doppler parfois très variés... (voir également page 10).

Informations complémentaires

☐ Observations de la trainée – Phase 4 (RETRAM)

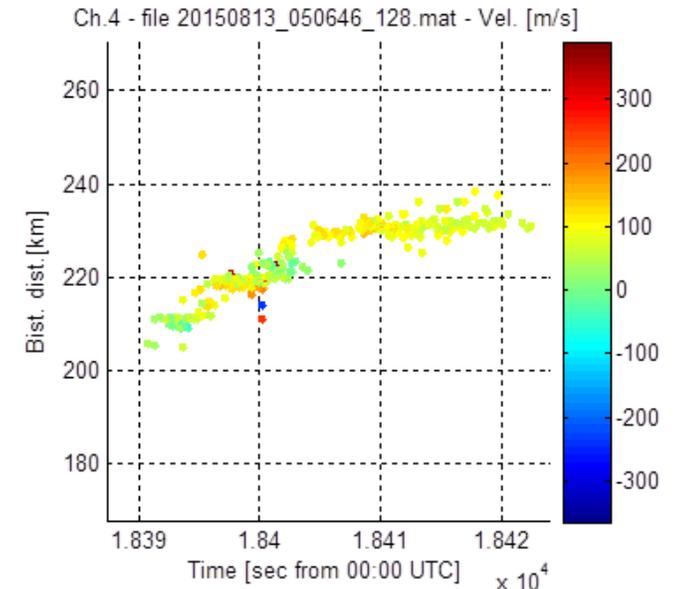
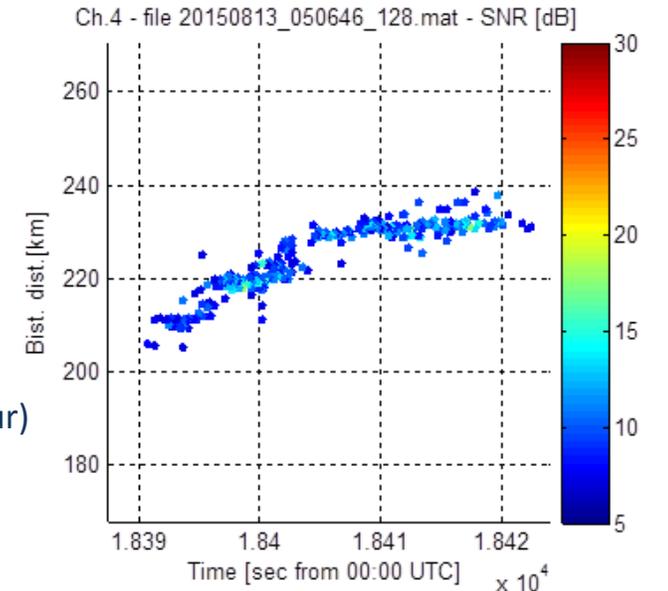
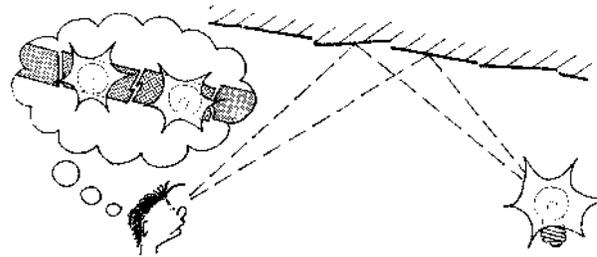
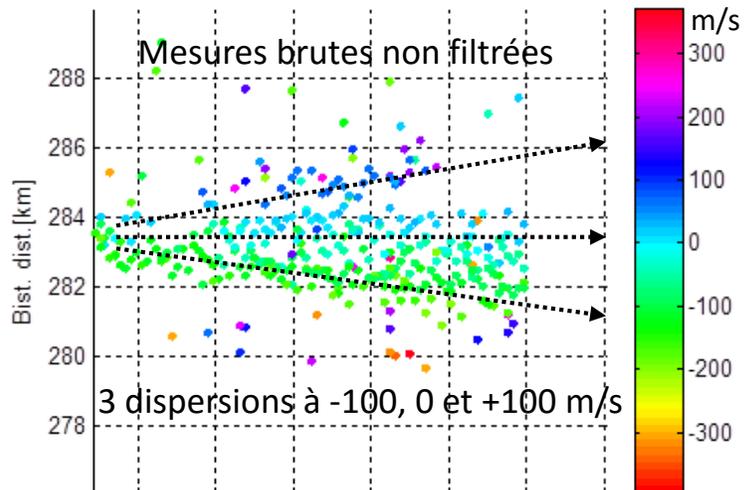
- ☐ Dans la majorité des cas, la trainée est stationnaire et sa distance évolue peu sur la durée de l'observation (graphe ci-dessous). Le constat est identique pour les 3 bases Tx-Rx. La faible évolution provient des déplacements liés aux vents en altitude (ici 95 km). Le déplacement est cohérent de la vitesse mesurée (50 à 100 m/s). Le principe de mesure est présenté en référence 7.
- ☐ On peut constater sur la courbe de droite (3^{ème} base) que le niveau de signal est beaucoup plus fort que sur les 2 autres ce qui est probablement dû à la présentation spéculaire pour cette base.
- ☐ Le point de réflexion n'évolue pas (dessin à droite issu du site de l'IMO - <http://www.imo.net/radio/reflection>)



Informations complémentaires

Observations de la trainée – Phase 4 bis (RETRAM - suite)

- ❑ Dans d'autres cas, on constate (voir) que la distance « bistatique » augmente très rapidement avec le temps alors que l'information doppler « bistatique » donne une vitesse « bistatique » entre 0 et 100 m/s. Sur le graphe ci-contre, on peut noter une distance qui varie de 20 km sur une durée d'environ 20 s soit en moyenne 1km/s de variation. Il n'y a pas cohérence entre la vitesse mesurée (graphe du bas) et la variation de distance de la trainée. Le graphe 1 donne le SNR ici peu élevé.
- ❑ Bien sûr, étant dans un domaine bi-statique (Emetteur, Trainée, Récepteur distant de l'émetteur) la variation mesurée dépend de la géométrie liée à la position de ces 3 points (référence 7).
- ❑ L'hypothèse est que ce n'est pas un déplacement de la trainée qui est mesuré mais une évolution de la trainée (son point de réflexion – point brillant) avec le temps tout au long de la trajectoire du météoroïde (bien sûr il y a une dispersion liée à la vitesse locale (vent) qui est révélée par la mesure Doppler en fonction de la dispersion des « particules » laissées par le météore
- ❑ D'autres observations comme ci-dessous révèlent une dispersion. Là aussi plusieurs points brillants sont observés mais simultanément. (dessin <http://www.imo.net/radio/reflection>)



Informations complémentaires

☐ Plasma – définition Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Physique_des_plasmas

☐ Ces changements d'état sont très complexes mais ils sont à la source de ces observations. Voici un extrait de la définition Wikipédia

La transformation d'un gaz en plasma (gaz ionisé) ne s'effectue pas à température constante pour une pression donnée, avec une chaleur latente de changement d'état, comme pour les autres états ; mais il s'agit d'une transformation progressive.

Lorsqu'un gaz est suffisamment chauffé, les électrons des couches extérieures peuvent être arrachés lors des collisions entre particules, ce qui forme le plasma. Globalement neutre, la présence de particules chargées donne naissance à des comportements inexistant dans les fluides, en présence d'un champ électromagnétique par exemple.

Un plasma peut également se former à basse température si la source d'ionisation lui est extérieure. C'est le cas de l'ionosphère, cette couche élevée de l'atmosphère terrestre qui, bien que froide, subit en permanence un intense bombardement ionisant de particules venant du soleil. Les aurores polaires sont l'une des manifestations de ce plasma.

Cet état est le plus commun dans l'univers, car il se retrouve dans les étoiles, le milieu interstellaire et aussi l'ionosphère terrestre. À une autre échelle, on trouve également des plasmas dans les tubes fluorescents, les propulseurs spatiaux. Ils sont couramment utilisés dans l'industrie notamment en micro-électronique.

Le plasma, tout comme le solide, le liquide, ou le gaz, est un état de la matière. Il n'est visible sur Terre qu'à très haute température, quand l'énergie est telle qu'elle réussit à arracher des électrons aux atomes. On observe alors ce qu'il est convenu d'appeler une sorte de « soupe » d'électrons extrêmement actifs dans laquelle « baignent » des noyaux d'atomes.

Lorsque l'ionisation est assez importante pour que le nombre d'électrons par unité de volume soit comparable à celui des molécules neutres, le gaz devient alors un fluide très conducteur qu'on appelle plasma.

Aujourd'hui, on parle de plasma lorsque la matière que l'on observe contient un grand nombre de particules de natures différentes qui peuvent interagir entre elles et avec l'environnement

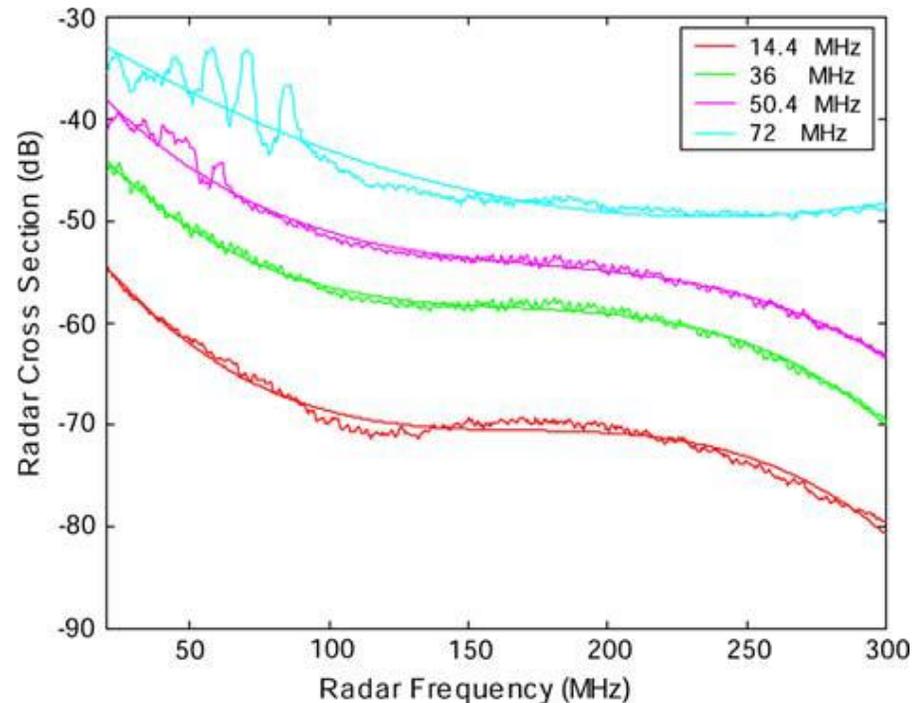
En physique, la fréquence plasma, ou fréquence de Langmuir, ou encore pulsation plasma, est la fréquence caractéristique des ondes de plasma, c'est-à-dire des oscillations des charges électriques présentes dans les milieux conducteurs, comme le métal ou les plasmas. À l'image de l'onde électromagnétique qui, quantifiée, est décrite par des photons, cette onde de plasma est quantifiée en plasmons.

Pour qu'une onde électromagnétique puisse pénétrer un milieu, sa pulsation doit être supérieure à la pulsation plasma du milieu en question et donc ce dernier se comporte comme un filtre passe haut. Par exemple la haute atmosphère, qui se comporte comme un plasma, laisse passer les signaux des satellites considérés comme des signaux à haute fréquence mais réfléchit les ondes radios qui ont des fréquences inférieures à la fréquence plasma de ce milieu.

Informations complémentaires

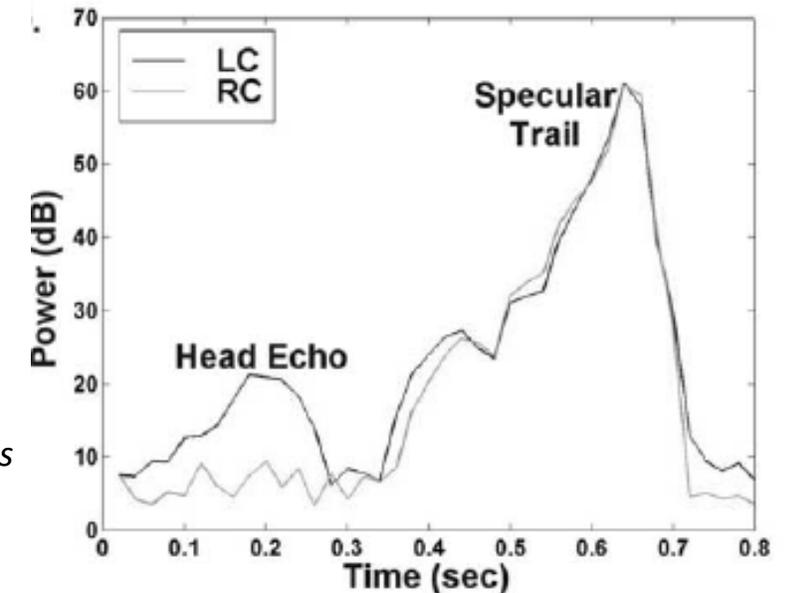
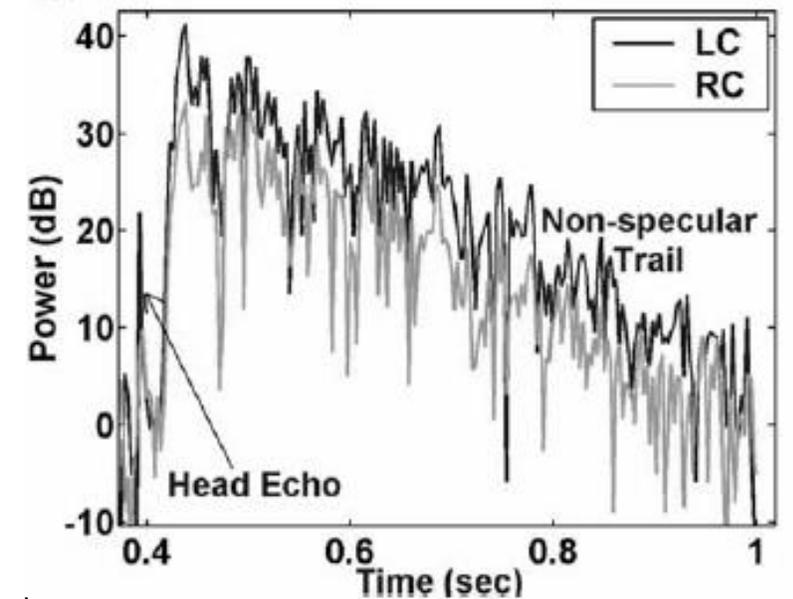
☐ Surface Equivalente Radar (SER ou RCS, Radar Cross Section en Anglais)

- ☐ Ces figures sont extraites des références 1 et 3.
- ☐ Elles montrent l'écart de SER entre head echo et trainée non spéculaire (haut) et head et trainée spéculaire (bas) à droite. LC et RC correspond aux 2 polarisations circulaires observées en VHF sur le radar Altair.
- ☐ Ci-dessous, la figure issue de simulations (référence 3) montre l'impact de la fréquence de plasma (courbes de différentes couleurs) sur la SER résultante en fonction de la fréquence. Elle confirme / justifie l'utilisation de fréquence VHF (30 / 150 MHz) pour l'observation des trainées météoritiques.



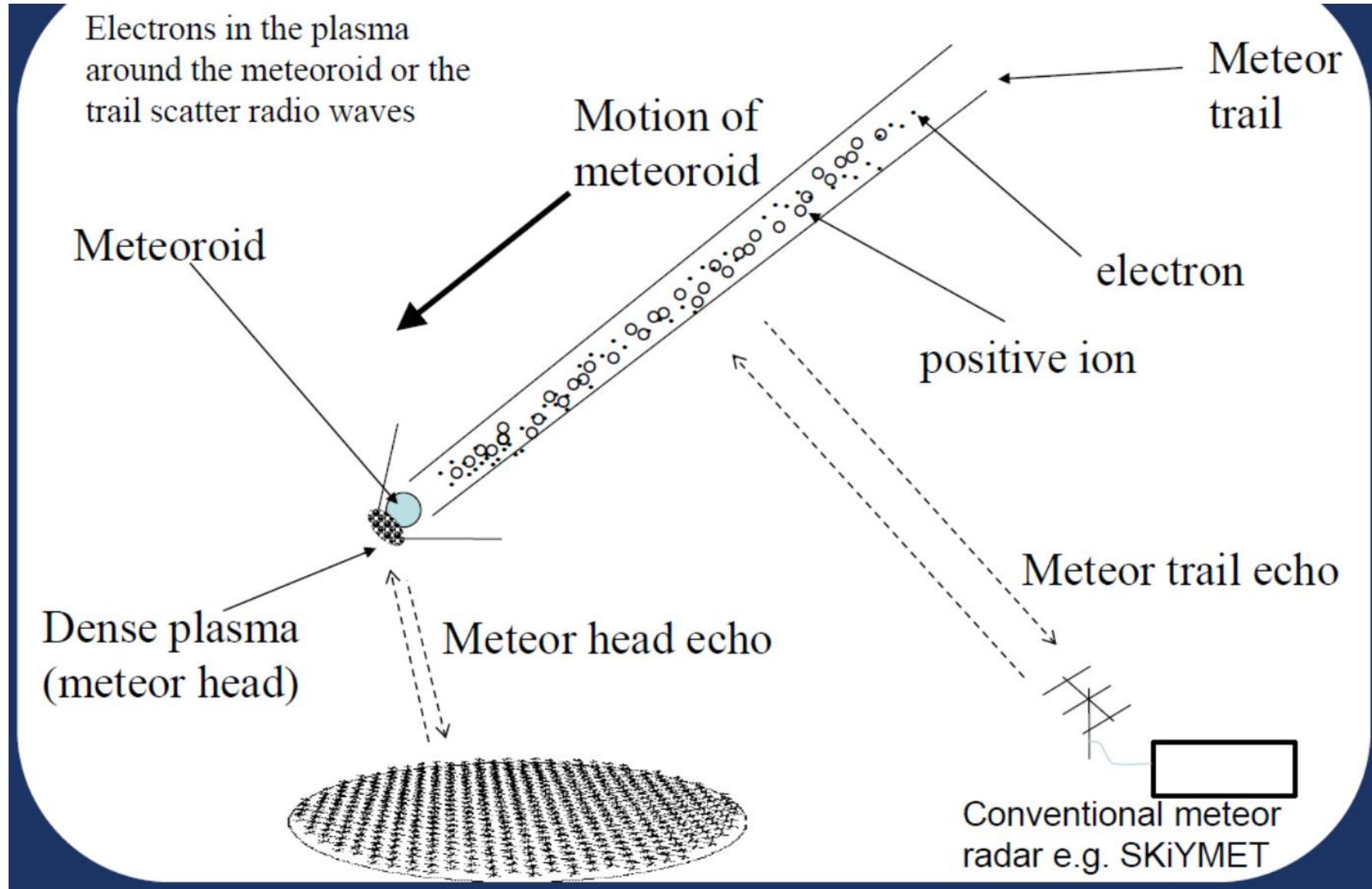
La SER (ou RCS – Surface équivalente radar) d'un météore (météoroïde + plasma) est extrêmement faible et non observable par une station amateur. En effet le « head echo » qui est de l'ordre de 20 dB (100 fois) plus faible que la réflexion non spéculaire d'une trainée qui elle-même est également 20 dB plus faible que lors de sa présentation spéculaire...

Les radars HPLA permettent ces observations appelées « head echo » .. Voir page suivante.



Informations complémentaires

☐ Meteor Head and Trail Echoes) : MU Radar (référence 4)

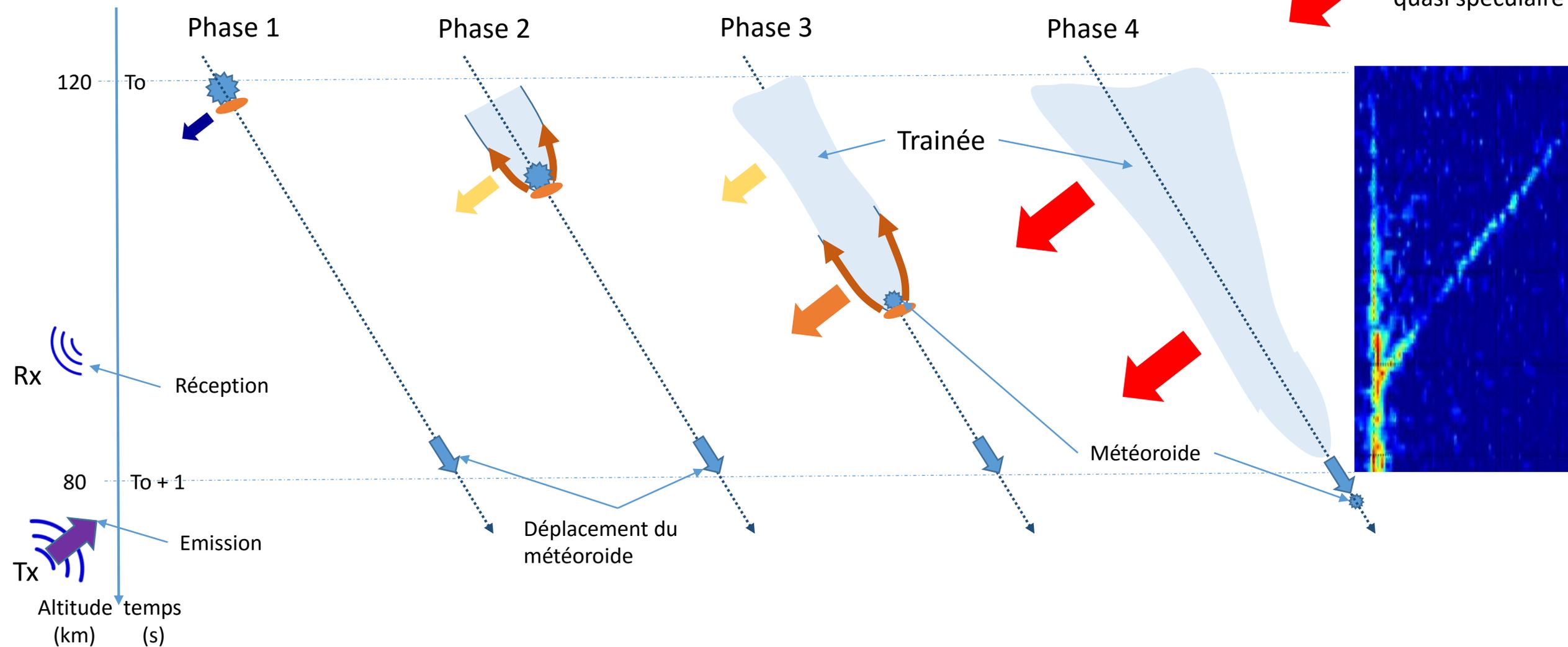


Informations complémentaires

□ Cinématique / Décomposition de la pénétration atmosphérique

□ Exemple pour une vitesse verticale à env 40 km/s

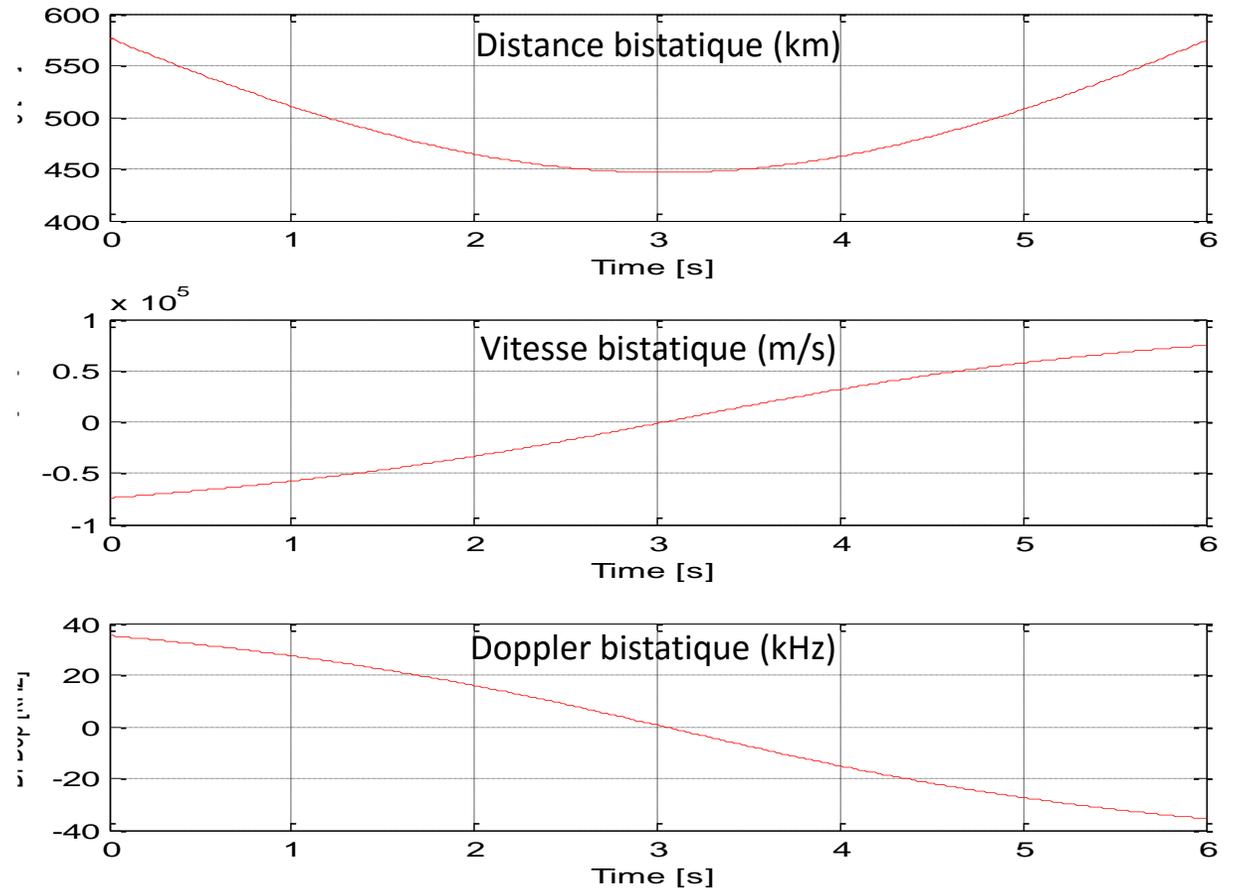
Non détectable
Niveaux reçus par réflexion spéculaire ou quasi spéculaire



Informations complémentaires

□ Doppler shift - Simulation d'un « head-echo » en VHF

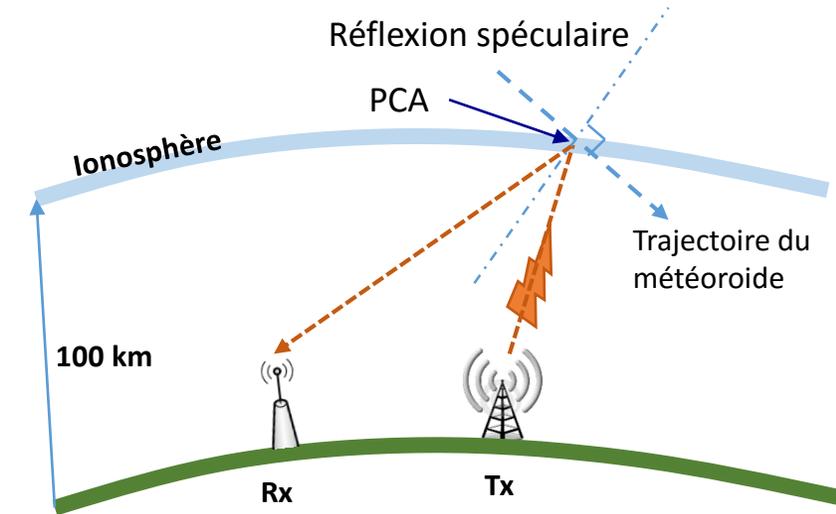
- La trajectoire 3D ci-dessous pénétrant la ionosphère entre Graves (point vert) et le Rx (point rouge) est simulée.



Informations complémentaires

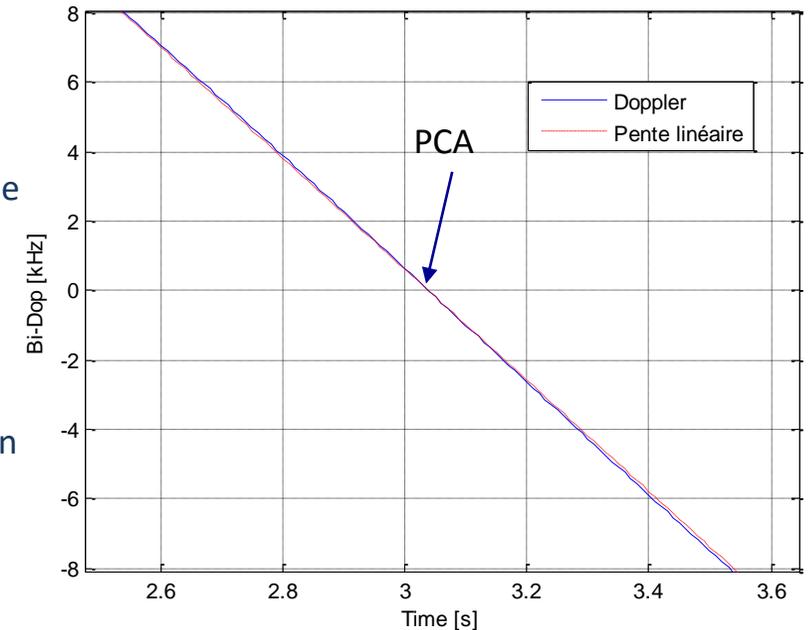
□ Doppler shift - Simulation d'un « head-echo » en VHF (suite)

- Le Doppler s'annule au moment de la réflexion spéculaire (voir ci-contre), ce point correspond à la distance (ici bistatique) la plus proche et est parfois appelé PCA (Point of the Closest Approach). A ce point les composantes Doppler appliquées aux ondes émises et réfléchies sont de signes opposés et s'annulent.
- Un zoom autour de l'axe Doppler révèle une pente quasi-linéaire autour de 0 (figure du bas). La valeur de la pente est fortement dépendante de la direction de la trajectoire par rapport à la base bistatique Tx-Rx.



□ Impacts sur les mesures

- Les forts décalages Doppler négatifs sont plus rarement observés par les stations amateurs. Ce Doppler négatif correspond à une augmentation de la distance bistatique et donc à une diminution du bilan « radio/radar » nuisant ainsi aux possibilités de détection (diminution du signal reçu et fin de la présentation spéculaire).
- Pour remonter à la vitesse du météoroïde, il faut relever sa trajectoire avec une très grande précision car une grande partie de la mesure est effectuée à une distance proche du PCA ce qui impose une datation très précise et également des temps de mesure très brefs ce qui est à l'opposé des méthodes « amateur » (temps d'intégration long)
- De plus, est-ce que la vitesse d'expansion et la direction d'expansion de la trainée est identique à la vitesse et à la trajectoire du météoroïde ?



Conclusions

❑ Bilan de ces analyses – Mesures effectuées par une station amateur

- ✓ La forte pente Doppler appelée « head echo » par les stations « amateur » ne correspond pas au signal « head echo » défini dans les différentes notes comme étant l'écho radar sur le météoroïde entouré d'un plasma dense. La SER d'un tel objet est telle qu'elle n'est pas détectable par de petites stations.
- ✓ Pour la détecter, il est nécessaire d'avoir des antennes bien plus importantes. Cela permet des temps d'observations courts compatible de la migration de l'objet observé.
- ✓ Les temps d'intégration / d'observation très longs utilisés par les amateurs vont à l'encontre d'une mesure précise de la vitesse de l'objet à un instant précis. De plus, dans le cas d'une analyse Doppler, les pertes de migration sont alors élevées du fait de la pente Doppler observé.
- ✓ La pente observée n'est pas liée à une décélération mais provient de la présentation quasi-spéculaire du météoroïde entouré et suivi d'un flux de plasma réfléchif (début de formation de la trainée ou queue du météore).
- ✓ La vitesse observée est donc fortement dépendante de la présentation géométrique (réflexion spéculaire) et de la vitesse réelle de l'expansion de ce plasma ou trainée (plus faible que celle du météoroïde, celle que l'on souhaite mesurer)
- ✓ La condition nécessaire d'une présentation spéculaire implique que le même phénomène (pente Doppler) n'est observable par plusieurs stations distantes (réparties) que pour certaines conditions géométriques.
- ✓ Pour la trainée, elle peut être observée depuis plusieurs points du fait de sa grande SER et de certaines irrégularités autorisant des détections non-spéculaires. Cela a été montré par RETRAM qui utilise différents émetteurs pour localiser la position de la trainée en 3D. Bien sûr, cette localisation a des limites et ne fonctionnent pas pour toutes les trainées. Déjà observé également.
- ✓ Ce constat, s'il se vérifie, a un impact important sur les systèmes souhaitant utiliser l'information vitesse du « head echo ».
- ✓ Pour les stations amateur, il faudrait définir une autre appellation pour l'observation appelée « head echo », pourquoi pas « front echo » ? A suivre

REFERENCES

1. S. Close, M. Oppenheim, S. Hunt, and L. Dyrud - 2002
Scattering characteristics of high-resolution meteor head echoes detected at multiple frequencies
2. David Morgan <http://www.dmradas.co.uk>
Working Note on the Origin of Radar Doppler Shifts (Speculations on meteor echoes 2012)
3. Lars Dyrud, Derek Wilson, Steiner Boerve, Jan Trulsen, Hans Pecseli, Sigrid Close, Chen Chen, Yoonjae Lee
Plasma and Electromagnetic Simulations of Meteor Head Echo Radar Reflections
4. Johan Kero - Swedish Institute of Space Physics (IRF)
Meteor head echo observations with the MU Radar
5. RETRAM - Maintoux JJ, Azarian S, Maintoux J, Rible F
Meteor Recognition & Trajectory - Approach and Principle
http://www.retram.org/wp-content/uploads/2014/04/meteor_trajectory_V5.pdf
6. Cyprien Pouzenc - <http://www.cypouz.com/>
Représentation schématique d'une étoile filante
7. RETRAM - Maintoux JJ, Azarian S, Maintoux J, Rible F
Proceedings of the IMC, Giron, 2014
Recognition and trajectories of meteors
<http://www.retram.org/public/2014-15-maintoux-final.pdf>
8. S Abe – 2009
Meteoroids and Meteors – Observations and Connection to Parent Bodies

Document
sous licence
CC BY-SA



contact@retram.org