



Cédric Willemin

Détection de Météores et d'Aéronefs

L'utilisation des ondes électromagnétiques pour l'observation spatiale

Détection de Météores et d'Aéronefs

L'utilisation des ondes électromagnétiques pour l'observation spatiale

Résumé du travail :

Le radar militaire français GRAVES émet en permanence sur la fréquence de 143.05MHz. Les ondes électromagnétiques se propagent dans les airs et sont réfléchies par tout objet conducteur électriquement. Si l'objet qui reflète l'onde est en mouvement, alors il modifiera celle-ci par effet Doppler. Ce phénomène est comparable à la hauteur du son émis par la sirène d'une voiture de police qui, quand elle se rapproche de l'observateur, devient plus aiguë.

L'onde réfléctie est réceptionnée par une antenne située sur la toiture du gymnase de la rue des Alpes à Bienne. Comme le récepteur n'est pas situé à proximité de l'émetteur, on parle de configuration de radar bistatique. Le signal est transmis à un ordinateur qui enregistre le décalage Doppler sous forme graphique.

Les avions, les stations spatiales et les météores peuvent facilement être différenciés car la vitesse d'un météore et par conséquent le décalage en fréquence engendré par ce dernier est bien plus important que le décalage engendré par un avion. Dans le cadre de ce travail, divers objets ont été clairement identifiés, en passant de l'essaim météoritique des Perséides à la station spatiale internationale (ISS).

Cédric Willemin

Table des matières

1	Introduction	1
1	Bases de l'expérience	1
2	Le radar GRAVES	1
3	Méthodologie	2
4	Source de l'idée et motivations	3
2	Théorie	4
1	Le radar bistatique	4
2	Antennes et propagation des ondes	5
2.1	L'antenne	5
2.2	Fonctionnement de l'antenne à l'émission	6
2.3	Fonctionnement de l'antenne à la réception	7
3	L'effet Doppler et calculs	8
3.1	La ligne de transmission	10
4	Objets spatiaux potentiellement détectables	12
5	Dénomination d'objets susceptibles d'entrer dans l'atmosphère	13
5.1	Exemple de l'astéroïde géocroiseur	13
5.2	Objets chutant dans l'atmosphère	13
6	Météorites : objets retrouvés sur une planète	15
7	Réflexion de l'onde	15
8	Cinématique entre orbite terrestre et trajectoire d'objets extraterrestres . .	16
9	Atterrissage	18
3	Détection	20
1	Situation	20
2	Equipements	22
2.1	Représentations	22
2.2	Construction de l'antenne	22
2.3	Mise en place de l'antenne	23
2.4	Lignes de transmission	24
2.5	Les filtres	25
2.6	Préamplificateur	26
2.7	Récepteur	27
2.8	Logiciel	27
2.9	Interprétation des résultats	28

4	Phase de test	29
1	Introduction	29
2	Sensibilité du système, perturbations et bruit de l'ensemble	29
3	Conclusion	30
5	Observations	31
1	Signature des avions	31
2	Détection de satellites	32
3	Météores	33
4	Signaux mystérieux	35
5	Perturbations et bruit	35
5.1	Le Soleil, bruit de fond	35
5.2	Les radios	36
5.3	Les lampes, contacts électriques	36
5.4	Les moteurs à allumage électronique	36
5.5	Les moteurs électriques	36
5.6	Les téléphones portables	37
5.7	Autres signaux	37
6	Prolongement	39
7	Conclusion	40
8	Remerciements	41
9	Bibliographie	42
10	Tables des illustrations	46
11	Annexes	49
1	Diagramme de rayonnement et caractéristiques	49
2	Mesures en chambre anéchoïque	50
3	Equation	52
4	SDR	54
5	Météores	54

Avril 2020

Chapitre 1

Introduction

1 Bases de l'expérience

Source : [1]

Dans le cadre de ce travail, un radar bistatique a été mis en place. Il opère grâce à deux antennes positionnées à des endroits différents, une d'émission et l'autre de réception. L'antenne d'émission émet une onde à une certaine fréquence de manière relativement isotrope dans le ciel. Dans notre cas, le radar (GRAVES) est celui de l'armée française. L'onde émise par ce radar est réfléchiée par tout objet plus ou moins conducteur électriquement croisant cette dernière. Si l'objet est en mouvement, l'onde réfléchiée verra sa fréquence augmenter ou diminuer en fonction de sa vitesse radiale par rapport au radar, mais aussi par rapport au mouvement de l'observateur. Les objets qui réfléchissent l'onde se déplacent à une vitesse relativement élevée pour un météore et une vitesse bien plus faible pour un avion. Ce phénomène de décalage de fréquence est connu sous la dénomination d'effet Doppler. L'onde captée par l'antenne de réception sera décalée en fréquence, positivement ou négativement par rapport à l'onde émise, suivant le mouvement relatif de l'objet par rapport aux deux antennes. Le système est conçu avec une bande de réception centrée sur la fréquence nominale d'émission qui permet de mesurer la vitesse relative de l'objet par rapport à la source et à l'observateur grâce au décalage de fréquence Doppler. L'antenne est munie d'un amplificateur et d'un filtre (optionnel) et le tout est connecté à un récepteur opérant la conversion digitale. Ce dernier est relié, via USB, à un ordinateur qui affiche et enregistre les données, sous forme d'image ou de fichier son.

Dans les années 1940, une expérience similaire avait déjà été réalisée. Par contre, la technologie de l'époque ne permettait pas d'atteindre les résultats actuels. Le but était d'écouter l'écho des météores sous forme sonore. Les fichiers audio étaient enregistrés sur des bandes magnétiques, technologie totalement obsolète.

2 Le radar GRAVES

Sources : [2] [3]

Le radar GRAVES ou **G**rand **R**éseau **A**dapté à la **V**eille **S**patiale est un réseau composé en deux parties : Les antennes émettrices, situées en Bourgogne entre Dijon et Vesoul dans le département de la Haute-Saône (cf. Fig. 1.1). Le récepteur, quant à lui, est situé sur le

plateau d’Albion. Le radar a été inauguré vers fin 2005 (cf. Fig. 1.2). Ce radar, à vocation militaire, détecte les satellites survolant le territoire national Français. L’émission se fait en continu sur la fréquence de 143.05 MHz.



Fig. 1.1 – Emetteurs du radar GRAVES, situé entre Dijon et Vesoul. [B]

Le récepteur du système GRAVES opère pratiquement comme le détecteur réalisé dans le cadre de ce travail de recherche. Cependant, il est utilisé uniquement pour les aéronefs et non pas pour les météores ou autres objets volants, comme prévu dans ce travail.

L’émission se fait sur un angle de 180° en direction plein Sud. Le radar est composé de quatre panneaux qui balayent le ciel.

La réception s’opère grâce à un grand réseau d’antennes (cf. Fig. 1.2). Chaque antenne est reliée à un récepteur. Puis, en analysant les différents signaux obtenus, la trajectoire de l’objet peut être définie.¹



Fig. 1.2 – Récepteurs du radar GRAVES, composé d’un grand réseau d’antennes. [B]

3 Méthodologie

En premier lieu, il était nécessaire de se procurer les différents éléments de base pour détecter l’onde réfléchiée par les météores et autres objets. Comme indiqué, la fréquence de cette onde est centrée sur la fréquence de base de l’émetteur GRAVES, soit 143.05 MHz. Les décalages en fréquence restent relativement faibles, en raison des vitesses considérées bien inférieures à celle de la lumière. Pour réaliser ce dispositif de détection, une antenne efficace était nécessaire, ainsi qu’un préamplificateur et des filtres (optionnels), un récepteur USB et un ordinateur. L’antenne a finalement été construite sur mesure, plutôt que de porter le choix sur une antenne commerciale nécessitant des adaptations. Dans la phase de mise au point, s’assurer que le système livre des résultats plausibles était une priorité. Une fois que le matériel était mis en place, les logiciels devaient être paramétrés, puis en faisant des essais, la meilleure configuration possible devait être sélectionnée. Et

¹. Lorsque le radar est en révision aucun résultat n’est obtenu.

finalement, une fois que tout était opérationnel, il convenait d'effectuer plusieurs expériences, comme des détections durant la pluie d'étoiles filantes des Perséides, la détection de satellites et d'autres applications.

4 Source de l'idée et motivations

Mon intérêt pour l'astrophysique remonte à mon plus jeune âge. Mais, c'est en feuilletant la brochure « Les Cahiers Clairaut », numéro 163, édition automne 2018, que l'idée m'est venue. Un article sur le programme FRIPON (**F**ireball **R**ecovery and **I**nter**P**lanetary **O**bservation **N**etwork) et Vigie-Ciel, programme qui vise à tapisser l'Europe de détecteur de météores radio et optique, paraissait dans la revue. L'idée de réaliser un travail en radioastronomie, domaine extrêmement spécifique, m'intéressait particulièrement. De plus, ce travail me permettait de m'aventurer dans un domaine de la physique, et en particulier de l'électronique et de la radiofréquence, qui ne m'était pas très connu.

Chapitre 2

Théorie

1 Le radar bistatique

Sources : [4] [5] [6] [7]

Contrairement au radar monostatique qui a un émetteur et un récepteur au même endroit, le radar bistatique a un émetteur éloigné géographiquement du récepteur comme illustré (cf. Fig. 2.1). C'est précisément le cas pour ce travail, car l'émetteur est localisé en Bourgogne et le récepteur est construit sur le toit du gymnase des Alpes à Bienne. Les radars bistatiques ont commencé d'être utilisés avant la Seconde Guerre mondiale pour détecter les bombardiers et autres aéronefs.

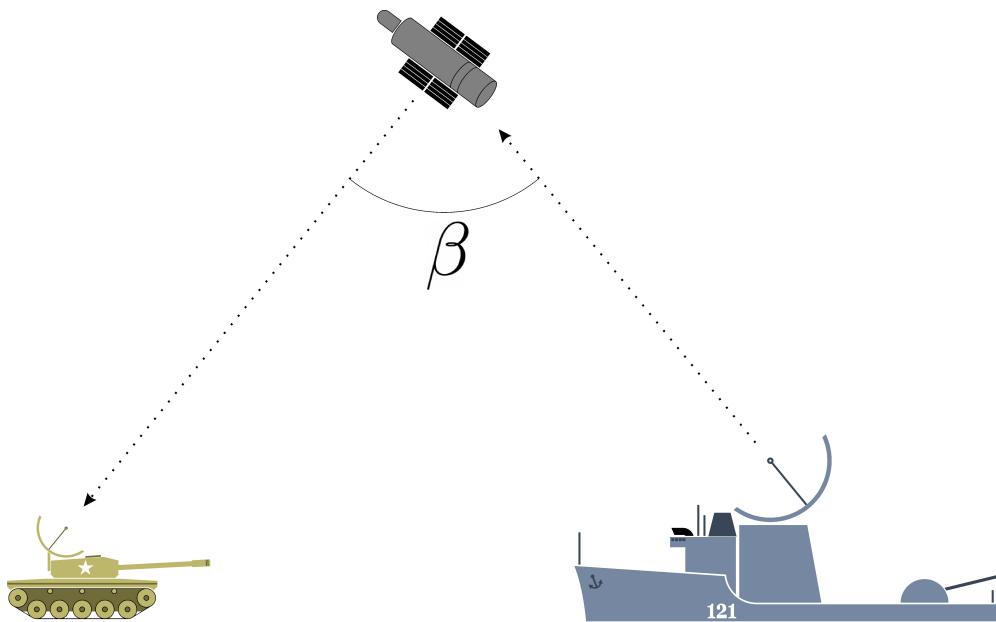


Fig. 2.1 – Fonctionnement général du radar bistatique où β représente l'angle bistatique. [A]

L'angle β est appelé angle bistatique. Lorsque l'émetteur et le récepteur sont relativement proches l'un de l'autre, par rapport à la distance à l'objet, alors l'angle bistatique est très aigu [6]. On parle alors de radar pseudo-monostatique.

Les avantages d'un radar bistatique sont :

- Ne nécessite aucune autorisation

- Mise en place relativement bon marché
- Possibilité d'améliorer l'antenne de réception
- Mise en place secrète

L'inconvénient :

- Aucun contrôle du radar émetteur (vulnérabilité)

2 Antennes et propagation des ondes

Les ondes électromagnétiques représentent les bases de l'expérience. Elles sont interceptées par l'antenne, puis sont transmises à un récepteur, par exemple un ordinateur, par la ligne de transmission. Il est impératif d'avoir une antenne et une ligne adaptée à la détection de météores. Mais le schéma de montage reste néanmoins le même dans tous les cas de figure (cf. Fig. 2.2, 3.11, 3.16).



Fig. 2.2 – Schéma de montage où RX représente le récepteur. [A]

2.1 L'antenne

Sources : [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17]

Une antenne est un composant qui convertit des ondes électromagnétiques en courant électrique haute fréquence ou vice-versa. Son fonctionnement est réversible, suivant si elle opère en réception ou en émission.

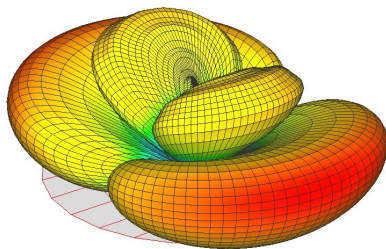


Fig. 2.3 – Exemple de diagramme de rayonnement tridimensionnel. [C]

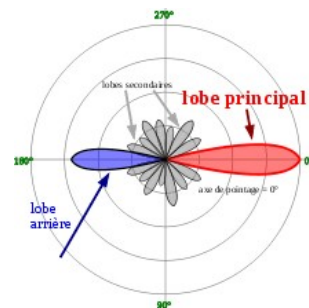


Fig. 2.4 – Coupe horizontale d'un diagramme de rayonnement. [C]

Chaque antenne possède une zone dans laquelle elle peut émettre ou recevoir un signal. Le diagramme permet de visualiser les lobes de l'antenne i.e. les zones de réceptions et

d'émissions d'une antenne. En d'autres termes, il s'agit du « profil du flux électromagnétique en champ lointain autour de l'antenne ». Le diagramme est tridimensionnel comme illustré (cf. Fig. 2.3), mais il peut être présenté sous la forme d'une coupe, dans le plan vertical ou horizontal (cf. Fig. 2.4). Le diagramme de rayonnement peut être calculé théoriquement ou mesuré en chambre anéchoïque.

Chaque antenne a un diagramme de rayonnement unique. Le choix de l'antenne se fait en règle générale en fonction de celui-ci ; on s'arrange pour que le lobe principal de l'antenne soit orienté dans la direction souhaitée. En effet, il est plus judicieux de choisir une antenne adaptée à son utilisation [13] [14] [15].¹

Lorsqu'une antenne est modélisée, elle est comparée à une antenne isotrope. Cette dernière est théoriquement idéale car elle présente un diagramme de rayonnement uniforme dans toutes les directions. Son diagramme est comparable à une sphère parfaite. Le gain G d'une antenne est sa capacité à diriger le rayonnement dans une direction. Il peut se donner en dB. Celui de l'antenne isotrope, exprimé en dBi, est nul. Une antenne isotrope parfaite, bien que souhaitable pour détecter uniformément dans le ciel, n'est pas réalisable [13] [16] [17].

Pour un travail de ce type il convient d'utiliser une antenne possédant un grand lobe comme par exemple une antenne de type Yagi. Pour ce travail de recherche, le choix s'est finalement porté sur une antenne $3/4 - \lambda$ faite sur mesure. L'antenne à également été testée en chambre anéchoïque, dans le laboratoire de CEM de METAS.^{2 3}

2.2 Fonctionnement de l'antenne à l'émission

Sources : [8] [18] [19] [20] [21]

Comme indiqué, une antenne peut aussi bien être utilisée à l'émission qu'à la réception. L'antenne utilisée dans ce travail peut servir d'antenne de transmission, par exemple pour la communication entre radioamateurs. Dans le cadre ce travail, l'antenne utilisée fonctionnera uniquement en réception.

La **P**uissance **A**pparente **R**ayonnée **P**AR (**E**ffective **R**adiated **P**ower ERP en anglais) est une mesure théorique de la puissance émise par une antenne. C'est la puissance en Watts qui devrait être appliquée à une antenne dipôle⁴, pour obtenir la même intensité de rayonnement $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$ dans la direction du faisceau le plus puissant de l'antenne, qui est mesurée.

La **P**uissance **I**sotrope **R**ayonnée **E**quivalente **P**IRE (**E**ffective **I**sotropic **R**adiated **P**ower EIRP en anglais) est la même mesure appliquée à une antenne isotrope hypothétique. Le gain G_{TX} est une fonction des angles θ et ϕ respectivement en élévation et en gisement.

1. Voir annexe 1 et 2

2. <https://www.metas.ch/metas/fr/home.html>

3. Voir annexe 2

4. Etant donné que l'antenne isotrope est irréalisable, les mesures sont réalisées avec une antenne dipôle de référence. Le gain est cette fois exprimé en dBd.

La PIRE se calcule comme :

$$\text{PIRE} = P_{HF_TX} \cdot \eta_{TX} \cdot G_{TX}(\theta, \phi) \quad (2.1)$$

où P_{HF_TX} est la puissance HF de l'antenne à l'émission et η_{TX} le rendement de l'antenne.

Le gain d'une antenne dipôle s'élève à 2,15dBi par rapport à une antenne isotrope. Par conséquent :

$$\text{PIRE (dBm)} = \text{PAR (dBm)} + 2,15\text{dBi} \quad (2.2)$$

L'intensité de rayonnement est un flux en watt par mètre carré $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right]$. Il se calcule à partir de la PIRE et diminue avec le carré de la distance :⁵

$$\Phi = \frac{\text{PIRE}}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

2.3 Fonctionnement de l'antenne à la réception

Source : [8] [22]

En réception, une antenne se comporte comme une surface captant un flux de rayonnement (cf. Fig. 2.5). Cette surface $[\text{m}^2]$ se nomme section efficace S et se calcule selon la formule suivante :

$$S = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_{RX} \quad (2.4)$$

où λ est la longueur de l'onde.

Consécutivement, la puissance haute fréquence reçue P_{HF_RX} par l'antenne se calcule :

$$P_{HF_RX} = \Phi \cdot S \cdot \eta_{RX} \quad (2.5)$$

La puissance haute fréquence est injectée dans la ligne de transmission vers le récepteur.

Il est aussi possible de calculer la tension efficace U_{HF_RX} à l'entrée du récepteur après avoir appliqué les corrections dues aux pertes.

$$U_{HF_RX} = \sqrt{P_{HF_RX} \cdot Z} \quad (2.6)$$

Cette tension est usuellement donnée en microvolt $[\mu\text{V}]$ et le niveau de réception (S-mètre) est normalement calibré.

Il est important de tenir compte de nombreux paramètres pour avoir une antenne adaptée à son utilisation. Le point 2.2 du chapitre 3 aborde le choix de l'antenne choisie et en annexe se trouve le diagramme de rayonnement de l'antenne ainsi que la simulation en chambre anéchoïque.

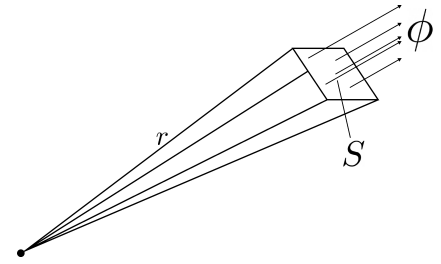


Fig. 2.5 – Représentation schématisque de la section efficace. [A]

5. Voir annexe 1

3 L'effet Doppler et calculs

Sources : [8] [29] [30] [34] [35]

Si une source sonore se déplace vers un observateur, la hauteur du son devient plus élevée que lorsque la source est immobile. Et quand elle s'éloigne de l'observateur le son devient plus grave comme illustré ci-contre (cf. Fig. 2.6). Ce phénomène est connu sous effet Doppler.

Dans le cas présent, il s'agit d'un effet Doppler électromagnétique ou optique. La formule suivante permet de calculer le décalage de fréquence Doppler Δf .

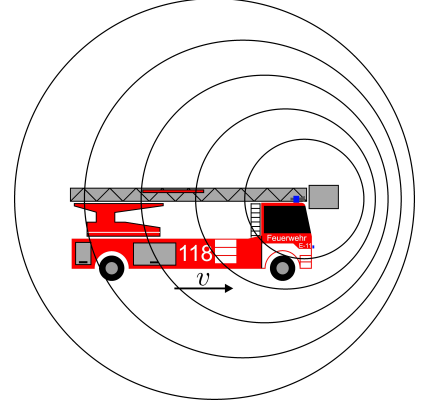


Fig. 2.6 – Représentation de l'effet Doppler sonore. [A]

$$\Delta f = f_{RX} - f_{TX} \quad (2.7)$$

$$\Delta f = \frac{2f_{TX} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \cdot \|\vec{v}\| \cos \delta \quad (2.8)$$

Où f_{RX} est la fréquence de réception (Receiver), f_{TX} est la fréquence d'émission (Transmitter), l'angle bistatique β , la vitesse de la lumière c , la vitesse de l'objet $\vec{v}$ et l'angle entre la bisectrice de l'angle bistatique et le vecteur vitesse de l'objet δ (cf. Fig. 2.7)⁶.

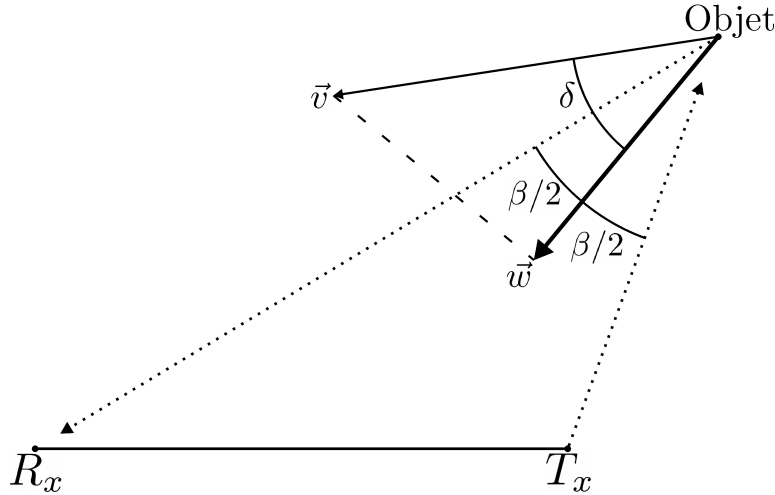


Fig. 2.7 – Représentation géométrique du radar bistatique. [A] Où T_X représente l'émetteur et R_X le récepteur.

$$\|\vec{w}\| = \|\vec{v}\| \cdot \cos \delta \Leftrightarrow \Delta f = \frac{2f_{TX} \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{c} \cdot \|\vec{w}\| \quad (2.9)$$

Malheureusement, le système mis en place ne livre pas tous les facteurs de l'équation 2.8. L'angle bistatique, la vitesse réelle de l'objet, et l'angle δ sont inconnus. Mais il est

6. Voir annexe 3

néanmoins possible de tracer un abaque qui nous servira de référence pour définir la projection de la vitesse $\vec{w}$ ⁷ (cf. Fig. 2.7) en fonction du décalage de fréquence Doppler pour chaque valeur de l'angle bistatique (cf. Fig. 2.8).

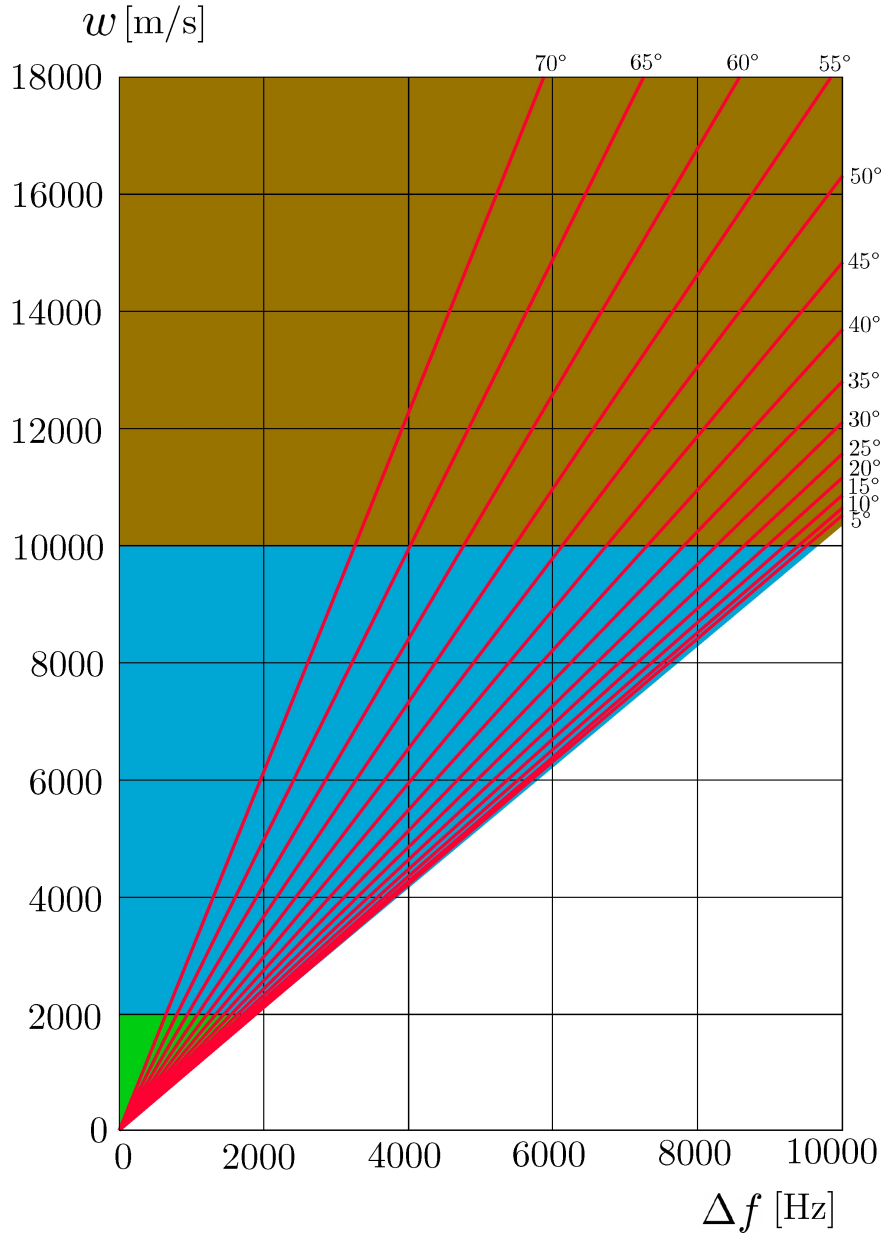


Fig. 2.8 – Abaque représentant la projection de la vitesse en fonction du delta des fréquences et de l'angle bistatique. [A]

Zones	Type de signature
■	Avions
■	Satellites
■	Météores

7. Si la vitesse est orthogonal par rapport à la bisectrice de l'angle β , la valeur de $\vec{w}$ sera nul.

3.1 La ligne de transmission

Sources : [8] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33]

Le rôle d'une ligne de transmission est de relier des composants haute fréquence (HF) entre eux, comme par exemple entre l'antenne et le récepteur. La ligne de transmission idéale doit véhiculer le signal haute fréquence avec les caractéristiques suivantes :

- Minimum de pertes et éviter les réflexions
- Supporter la puissance haute fréquence véhiculée
- Insensible à l'environnement

Les lignes de transmission les plus courantes sont :

- Le câble coaxial
- La ligne bifilaire
- Le guide d'onde

L'impédance est une caractéristique des composants haute fréquence et notamment des lignes de transmission. Par la loi d'Ohm, elle est le quotient de la tension U sur le courant I .

$$U = ZI \Leftrightarrow Z = \frac{U}{I} \quad (2.10)$$

Dans un cas avec du courant alternatif sinusoïdal, les capacités et les inductivités présentent un comportement réactif désigné sous le nom de réactance X . La réactance est exprimée sous la forme d'une composante imaginaire j . La partie purement résistive R est exprimée sous la forme d'une composante réelle. Les composantes réactives et résistives forment donc un nombre complexe.

$$Z = R + Xj$$

L'impédance correspond au module du nombre complexe et la phase correspond à l'argument.

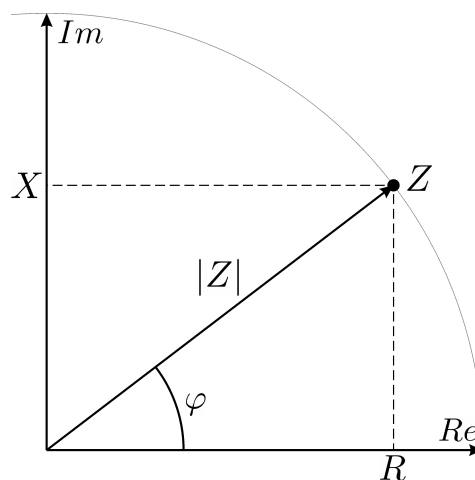


Fig. 2.9 – Représentation graphique de la composante réelle et imaginaire.
[A]

L'impédance d'entrée ainsi que de sortie d'un composant haute fréquence et de la ligne de transmission qui les relie doivent être identiques et au besoin adaptées [25] [27] [28] [29].

Les impédances des câbles coaxiaux courants sont de 50Ω pour les stations radioamateurs et les émetteurs en général. Les impédances de 75Ω sont rencontrées dans les récepteurs de radios et de télévisions. L'impédance d'un câble coaxial se calcule avec la formule :

$$Z = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \log\left(\frac{D}{d}\right) \quad (2.11)$$

Où D est le diamètre du diélectrique, d le diamètre de l'âme et ϵ_r la permittivité relative du diélectrique.

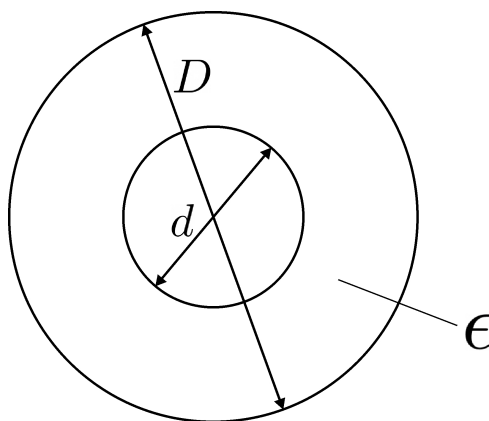


Fig. 2.10 – Coupe verticale d'une ligne coaxiale. [A]

Les pertes ou les gains dans un composant haute fréquence se calculent en décibels dB (qui signifie un dixième de Bel, nommé en l'honneur d'Alexander Graham Bell, inventeur du téléphone) [31] [32].

Un nombre de dB positif correspond à un gain, par exemple pour un amplificateur et un nombre négatif à une perte. Les dB de composants montés en série s'ajoutent. Plus une ligne de transmission est longue plus elle présente de pertes. Les dB correspondent au rapport entre la puissance à la sortie et à l'entrée du composant qui sert de référence. Il s'agit d'une échelle logarithmique, sans unité.⁸

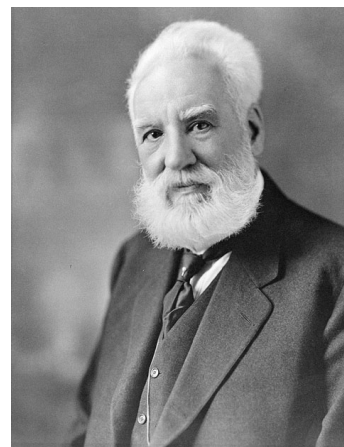


Fig. 2.11 – Alexander Graham Bell [C]

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = 10 \cdot \log(G) \quad (2.12)$$

Le coefficient de vélocité est le rapport entre la vitesse de propagation d'un signal haute fréquence dans un certain diélectrique (matière qui est peu ou pas isolante électrique) par rapport à la vitesse dans le vide qui est la vitesse de la lumière soit environ $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Il est toujours inférieur à 1.

8. Le Bel étant une unité relativement petite, on utilise des décibels qui signifie dix Bels. C'est pour cette raison que la formule ci-dessus possède un facteur 10 [26].

Le coefficient de vélocité peut être exprimé de la façon suivante [33] :

$$Vf = \frac{l}{l_0} = \frac{v}{c} \quad (2.13)$$

Une ligne de transmission qui a comme diélectrique le vide, qui a comme permittivité absolue $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$, la vitesse du courant alternatif qui passe dans celui-ci est environ égal à la vitesse de la lumière c .

Le coefficient de vélocité peut se calculer à partir de la permittivité relative du diélectrique :

$$Vf = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \Leftrightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot c = Vf \cdot c \quad (2.14)$$

Les valeurs des diélectriques usuelles sont :

Diélectrique	ϵ_r	Vf
Vide	1	1
Air	$\simeq 1$	$\simeq 1$
Polyéthylène	2.3	0.66
PTFE	1.9	0.72

Dans le cas présent, le choix s'est porté sur un câble coaxial utilisé couramment chez les radioamateurs. Malheureusement, la longueur de la ligne est élevée (environ 30 mètres), ce qui occasionne de nombreuses perturbations et de pertes. L'impédance est de 50Ω , le diamètre du diélectrique en polyéthylène s'élève à 7mm et le diamètre de l'âme à 2mm. Un préamplificateur a été inséré entre l'antenne et la ligne de transmission, afin rendre le signal transmis moins sensible aux perturbations.

4 Objets spatiaux potentiellement détectables

Source : [36]

La détection d'un objet n'est possible que si ce dernier change les caractéristiques de l'onde par exemple en la réfléchissant partiellement. Si l'objet est en bois, en plastique ou en un autre matériau isolant, le radar ne le détectera pas, par manque de conductivité électrique.

Les corps qui entrent dans l'atmosphère sont soit des météoroïdes ou soit dans de très rares cas des astéroïdes. En chutant dans la mésosphère (partie de l'atmosphère se situant à une altitude d'environ 100km) (cf. Fig. 2.13), il laisse une traînée lumineuse derrière lui et prend la dénomination de météore si le corps était un météoroïde. Seule une petite partie de ces objets sont constitués de métaux et sont donc conducteurs. La traînée occasionnée, réfléchit l'onde dans tous les cas, comme détaillé ultérieurement. Tous les météores ne conduisent pas à un impact avec le sol. Certains se consomment totalement lors de la rentrée dans l'atmosphère. De plus, pour ceux qui atteignent le sol, tous ne laissent pas forcément d'empreinte impressionnante illustrant l'impact avec le sol. Le météore devient météorite si ce dernier atteint la surface sans se consumer entièrement lors de sa chute (ablation).

Il faut préciser qu'une grande partie de la planète bleue est constituée d'eau, soit environ 71%. La grande majorité des objets qui atteignent la Terre atterrissent dans les eaux. La majorité des météorites a été retrouvée dans les déserts ou sur les glaces, car ces dernières sont bien moins camouflées dans un environnement hostile tel que sur la banquise.



Fig. 2.12 – The Meteor Crater, impact de météorite situé en Arizona. [D]

5 Dénomination d'objets susceptibles d'entrer dans l'atmosphère

Sources : [1] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [57]

5.1 Exemple de l'astéroïde géocroiseur

Un astéroïde est un objet constitué principalement de roche, de glace et de métaux. Leur taille peut atteindre plusieurs kilomètres de diamètre. L'astéroïde géocroiseur qui, comme son nom l'indique, possède une orbite qui croise celle de la Terre. Un tel objet, s'il est de taille respectable, est considéré comme « dangereux » [39].

Un astéroïde peut se désintégrer, se transformer en météoroïde ou atterrir sur Terre. C'est notamment un astéroïde géocroiseur qui a provoqué la disparition des dinosaures il y a 66 millions d'années. L'astéroïde s'est écrasé dans la péninsule du Yucatán, au Mexique [37].

5.2 Objets chutant dans l'atmosphère

L'Union astronomique internationale (UAI) précise qu'un météoroïde est «un objet solide se déplaçant dans l'espace interplanétaire, d'une taille plus petite qu'un astéroïde et considérablement plus grande que l'atome ». Ses dimensions sont comprises entre 100 μm et 10m de diamètre. De plus, il est invisible depuis la Terre.

Un météoroïde provient d'un astéroïde qui c'est partiellement ou complètement désintégré [40]. Il peut également provenir d'une comète.

Une fois entré dans la mésosphère [43], le météoroïde se vaporise et laisse derrière lui un sillage de gaz très chaud nommé plasma [36]. Sa vitesse atteint un ordre de quelques dizaines de kilomètres par seconde [42]. Ce dernier prend le nom de météore. Ce terme désigne un objet extraterrestre chutant dans l'atmosphère terrestre et qui provoque un phénomène lumineux. Le météore laisse derrière lui une traînée lumineuse. Cette traînée est due à la vaporisation du météore et de l'ionisation de l'air sur sa trajectoire. Si le météore est de grande taille, il s'agit d'un bolide et s'il est de petite taille il s'agit d'une étoile filante [49].

A plusieurs moments de l'année, l'orbite de la Terre croise la trajectoire d'une ancienne comète ayant laissé des débris sur son passage. Ces nuages de poussières et de débris provoquent des pluies d'étoiles filantes observables annuellement. Ces événements périodiques portent le nom de la constellation qui semble être la source des étoiles filantes. Le point d'où elles semblent venir s'appelle le radian [57]. En août, la trajectoire terrestre croise celle de la comète Swift-Tuttle et génère ce qu'on appelle les Perséides, étoiles filantes semblant provenir de la constellation de Persée. Il y en a d'autres à d'autres moments de l'année, comme les Orionides (Orion), Léonides (Lion), les Taurides (Taureau) ou encore les Géminides (Gémeaux).

Le terme bolide est utilisé si le météore est de taille relativement grande. Sa magnitude apparente est au minimum de -4 s'il est observé à une distance entre 120 et 70 km [45] [49].⁹ Le bolide peut être observé de jour dans quelques rares cas. Il arrive que le bolide éclate en fragments de météorites. Un exemple est celui du superbolide de Tcheliabinsk, en Russie observé le matin du 15 février 2013 à environ 9 h 20 heure locale. Le superbolide s'est fragmenté dans l'atmosphère ; à une altitude de 20 à 40 km. L'énergie libérée est estimée à environ 35 bombes nucléaires larguées sur Hiroshima. Le souffle de l'explosion a arraché des toitures et a fait exploser des fenêtres [47].

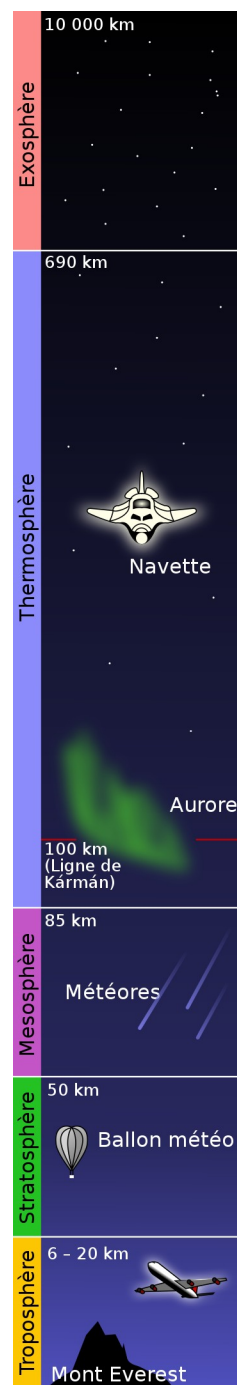


Fig. 2.13 – Représentation des différentes couches de l'atmosphère [C]

9. On parle de superbolide (UIA) lorsque la magnitude est inférieure à environ -17 [46]. Un superbolide est si lumineux qu'il peut être observé de jour.



Fig. 2.14 – Météore observé depuis Prêles lors d'un maximum des Perséides. L'observateur attentif remarquera la présence de la Voie Lactée et aussi celle de la galaxie d'Andromède. [A]

6 Météorites : objets retrouvés sur une planète

Sources : [36] [38] [41] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56]

Une météorite est un objet extraterrestre solide qui n'a pas perdu toute sa masse durant sa chute [49]. Sa surface est carbonisée. Les météorites se regroupent en trois groupes principaux : les météorites métalliques, rocheuses et celles dites « mixtes » c'est-à-dire composée de roche et de minerai [36].

7 Réflexion de l'onde

Sources : [1] [49] [57]

Un météoroïde entre dans l'atmosphère à une vitesse hypersonique (environ 5 fois la vitesse du son, mais très inférieure à celle de la lumière). Lorsque le projectile rencontre les molécules d'air de l'atmosphère, la décélération est si grande que les molécules du rocher extraterrestre sont arrachées et laissées derrière lui, le long de sa trajectoire. A ce moment précis, le météoroïde prend le nom de météore, il devient également visible via sa traînée lumineuse pour les observateurs terrestres. Cela, naturellement, à condition qu'il fasse nuit. Dans de rares cas, comme expliqué précédemment, le phénomène peut s'observer de jour dans le cas de gigantesques bolides [49]. Comme vu précédemment, lorsque toutes les molécules sont arrachées du rocher, le météore devient une étoile filante. L'énergie est telle que les atomes se détachent des molécules. Puis, les électrons sont arrachés des atomes. Des turbulences se forment dans cette région. Le principe est exactement le

même lorsqu'il s'agit d'un astéroïde.

Les atomes sont chargés positivement, ils sont dit « ionisés ». Les atomes, bien qu'ils soient chargés, ont peu d'influence sur les ondes électromagnétiques. Par contre les électrons libres, sont bien plus légers. Ils sont plus influencés par les ondes radio. L'onde est réfléchiée dans toutes les directions [1].

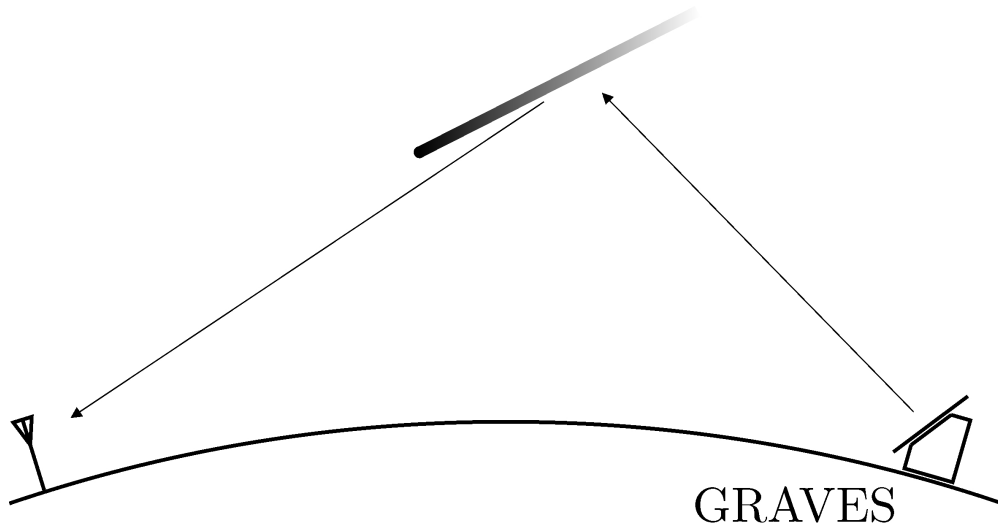


Fig. 2.15 – Fonctionnement général de l'expérience. L'onde est réfléchiée par la traînée occasionnée durant l'ablation. [A]

8 Cinématique entre orbite terrestre et trajectoire d'objets extraterrestres

Sources : [8] [58] [59] [60] [61] [62]

La Terre et toutes les autres planètes du système solaire tournent autour du Soleil sous forme de trajectoire elliptique (1^{re} loi de Kepler). Le Soleil occupe le foyer (2^e loi de Kepler). Il arrive qu'un astéroïde dit géocroiseur croise l'orbite terrestre. Lorsque les deux objets se trouvent à proximité, la Terre attire l'astéroïde. On passe alors d'une représentation héliocentrique à une représentation géocentrique (car l'influence du soleil sur la trajectoire de l'objet est négligeable). La Terre et l'objet s'attirent mutuellement, mais le plus petit corps est néanmoins plus influencé. De nombreux facteurs influencent alors la trajectoire de l'astéroïde ou du météoroïde les principaux sont : La vitesse de l'astéroïde ; l'énergie cinétique et la distance séparant l'astéroïde de la Terre (Sphère d'influence) (cf. Fig. 2.17).

Si l'objet possède une énergie cinétique suffisamment élevée, ce dernier ne sera pas ou que peu influencé. Au contraire, si son énergie cinétique est plus faible, sa trajectoire est fortement déviée et peut dans quelques cas s'écraser sur le corps en question. En astrodynamique, la sphère d'influence est la zone où la trajectoire d'un objet est influencée par un autre corps dans l'espace. Cette dernière est obtenue par la formule ci-dessous :

$$R_{SOI} = D \left(\frac{m}{M} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.15)$$

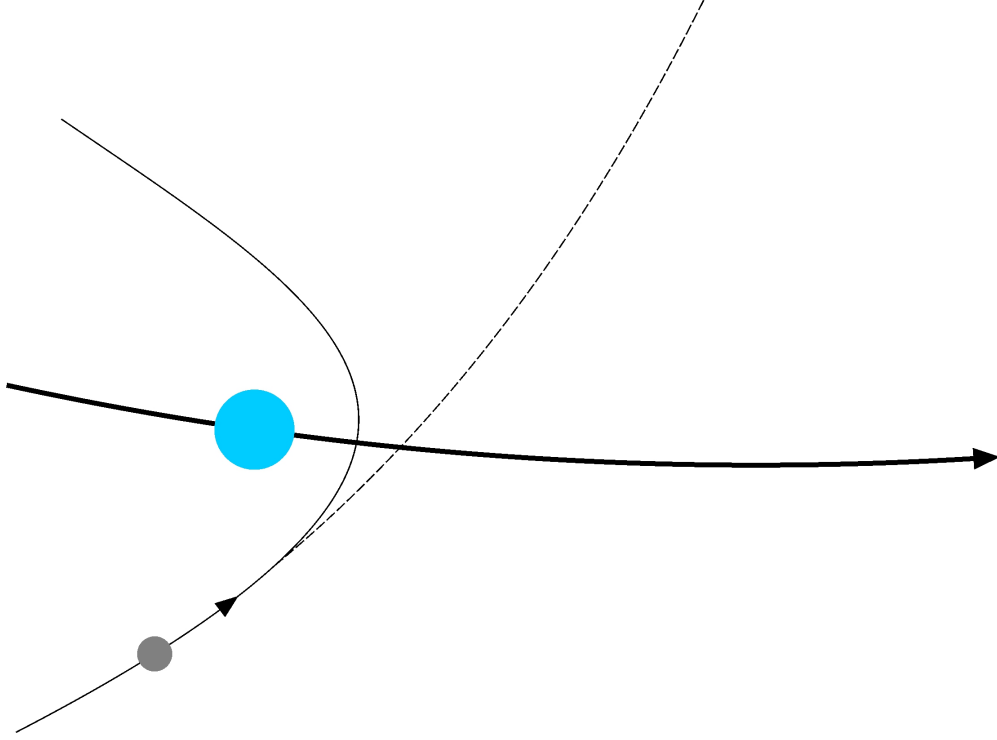


Fig. 2.16 – La terre (disque bleu) dévie l'astéroïde (gris), car ce dernier est entré dans la sphère d'influence de la terre. [A]

Où M et m sont respectivement les masses du grand et du petit corps. D est la longueur du demi-grand axe du petit objet (en général planète, Soleil).

Les R_{SOI} suivant sont obtenu (modèle héliocentrique) [61] :

Planète	R_{SOI} (10^6 km)	R_{SOI} /rayon du corps
Mercure	0.112	45
Terre	0.925	145

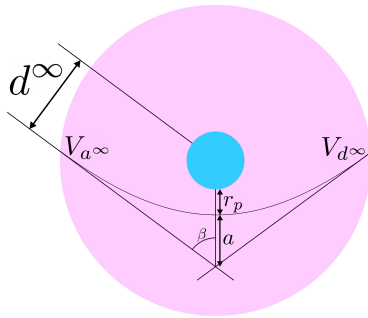


Fig. 2.17 – Représentation de la sphère d'influence d'un corps (par exemple la terre). [A]

$$\cos \beta = \frac{a}{a + r_p} \quad (2.16)$$

$$v_a^2 = v_d^2 + v_{erd}^2 \quad (2.17)$$

La vitesse de libération v_{erd} est la vitesse nécessaire pour se libérer de l'attraction d'un corps. Elle est caractérisée par les formules suivantes [62] :

$$v_{erd} = \sqrt{\frac{2\mu}{r_p}} \quad (2.18)$$

$$\mu = GM \quad (2.19)$$

Où M est la masse de l'astre et r_p est le rayon au péri-gée.

Dans le cas suivant, le rayon au péri-gée est inférieur au rayon de l'atmosphère. L'astéroïde est attiré par l'astre ; plus le corps émet de lumière, plus il est freiné.

9 Atterrissage

Source : [8] [43]

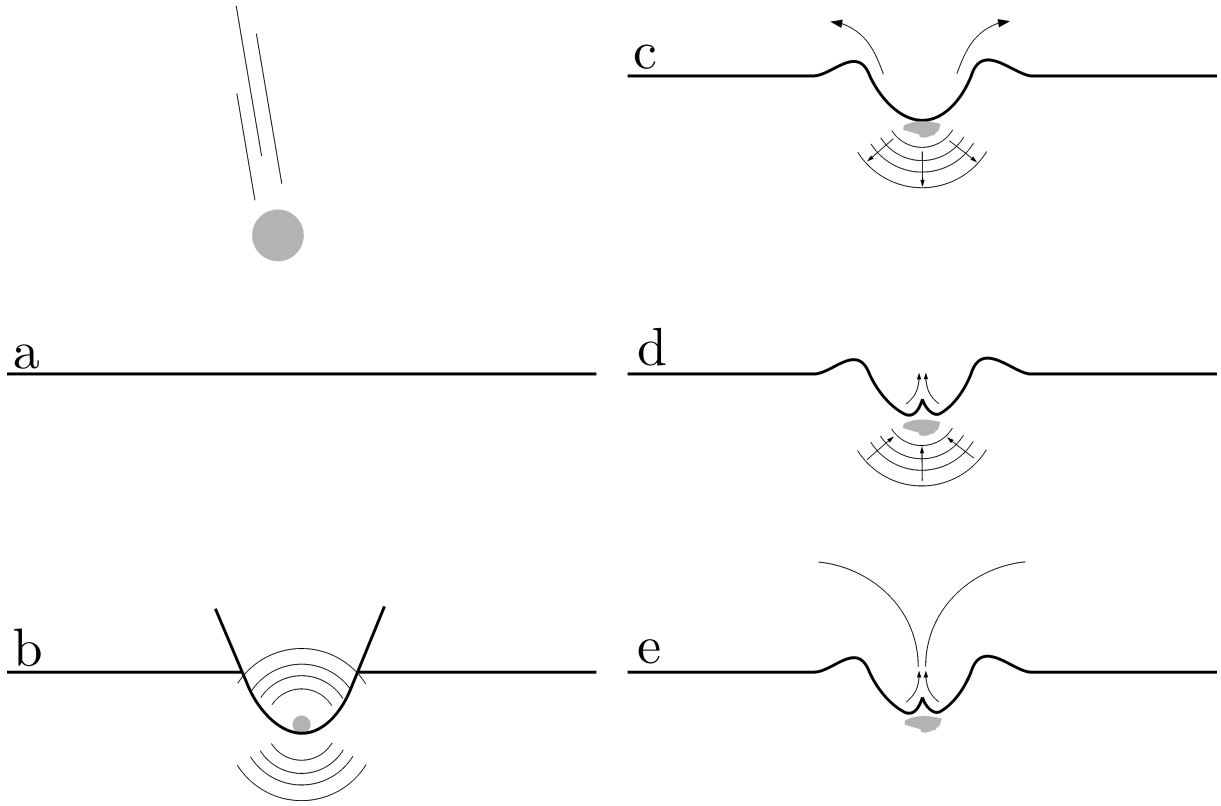


Fig. 2.18 – Différentes phases d'atterrissage d'une météorite. [A]

Dans les cas où l'objet parvient à atteindre le sol, ce dernier s'écrase et peut créer un cratère (cf. Fig. 2.18 b). Tout dépend de la masse et de la vitesse de l'objet par rapport au sol. La surface de la météorite est très chaude. L'onde de choc libérée se dissipe dans le sol (cf. Fig. 2.18 c) puis revient contre la météorite (cf. Fig. 2.18 d) (dans certains cas de la formation d'un cratère). Des roches sont alors projetées dans les airs et sur les bords du cratère (cf. Fig. 2.18 e). Le diamètre du cratère obtenu est d'environ 50 fois le diamètre de la météorite.

L'énergie libérée par le météore lors de sa chute est caractérisé par les formules suivantes :

Le total des énergies E_m est égal à la somme des énergies potentielle et cinétique.

$$E_m = E_{pot} + E_{cin} \quad (2.20)$$

L'énergie cinétique $E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2$ et l'énergie potentielle $\Delta E_{pot}(P) = \int_P^0 \vec{F} \cdot d\vec{r}$ [43]

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \rightarrow E_{pot} = -\frac{GMm}{r} \quad (2.21)$$

Avec $E_{pot=0}$ à ∞

Situation 1, loin de la Terre :

$$E_{pot} = 0 \wedge E_{cin} \geq 0 \rightarrow E_m \geq 0 \quad (2.22)$$

Situation 2, proche de la Terre :

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow -\frac{GM}{r} + \frac{1}{2}v^2 \quad (2.23)$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (2.24)$$

Cette dernière formule permet de calculer la vitesse de l'objet.

La vitesse de l'objet ne dépend pas de sa masse, mais seulement de la masse du grand corps. Plus le corps a une masse importante, plus il influencera le météore. Une grande partie de ces corps attirés ne sont pas visibles depuis la terre, en raison, de leurs désintégrations, de la lumière du jour ou des conditions météorologiques. L'énergie libérée durant l'ablation est inimaginable.

Chapitre 3

Détection

1 Situation

Pour le calibrage du dispositif expérimental, il est impératif de connaître la distance séparant l'émetteur TX et le récepteur RX. Leurs coordonnées géographiques doivent être parfaitement connues. L'angle du radar bistatique est défini par ces coordonnées. Dans cas échéant, l'émetteur GRAVES (Grand Réseau Adapté à la VEille Spatiale) se situe en France près de Dijon, dans la commune de Montseugny (département de la Haute-Saône). L'antenne de réception se situe à Bienne en Suisse (Canton de Berne), sur la toiture de la Halle de gymnastique du Gymnase de la rue de Alpes (Rue des Alpes 50, 2502 Bienne), parcelle 3260 du cadastre de Bienne.¹

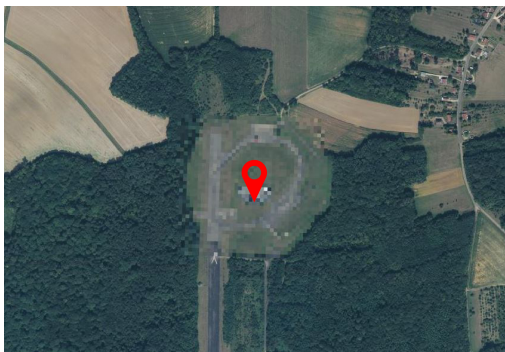


Fig. 3.1 – Vue satellite de l'emplacement de l'émetteur GRAVES (ce dernier est flouté). [A]

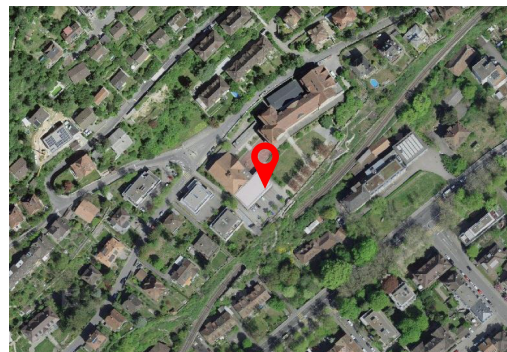


Fig. 3.2 – Vue satellite de l'emplacement du récepteur. [A]

Le radar émetteur militaire GRAVES se situe aux coordonnées suivantes :²

- Latitude : 47.34782°
- Longitudes : 5.514983°
- Altitude : 205.6 mètres

L'antenne de réception se situe aux coordonnées suivantes :³

-
1. Source : <http://sig.biel-bienne.ch/>
 2. Source : <https://www.geoportail.gouv.fr/>
 3. Source : <https://map.geo.admin.ch/>

- Latitude : 47.13863°
- Longitudes : 7.23852°
- Altitude : 480.0 mètres

« La ligne de base est calculée à l'aide de l'ellipsoïde de référence selon WGS84 via la conversion en coordonnées cartésiennes géocentriques puis calcul de la ligne de base par le théorème de Pythagore ». ⁴

- Demi grand axe de l'ellipsoïde $a=6378.14\text{km}$ (distance entre le centre de la Terre et l'équateur)
- Demi petit axe de l'ellipsoïde $b=6356.75\text{km}$ (distance entre le centre de la Terre et l'un des pôles)

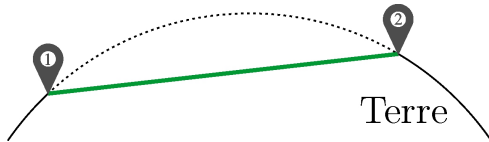


Fig. 3.3 – La ligne de base en vert entre le point 1 et le point 2. [A]

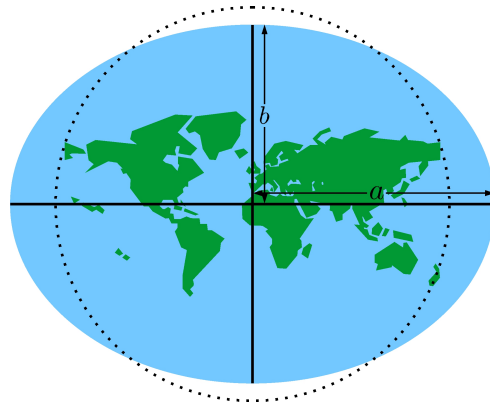


Fig. 3.4 – Représentation schématique de la terre où a est le demi grand axe et b le demi petit axe. [A]

La première excentricité numérique (de l'ellipsoïde) $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$

Les coordonnées cartésiennes de l'émetteur et du récepteur se calculent selon les formules suivantes :

$$X = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \quad (3.1)$$

$$Y = (N + h) \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda \quad (3.2)$$

$$Z = (N \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin \varphi \quad (3.3)$$

Où le rayon de courbure normal $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$, φ est la latitude en radian et λ est la longitude en radians.

La valeur de la ligne de base s'élève à $L = 132.55 \text{ km}$. ⁵

4. Source : Office fédéral de topographie Swisstopo

5. Note : Une sphère pourrait fonctionner en première approximation. Mais en utilisant un ellipsoïde, la valeur de la ligne de base est plus précise. De plus, cette valeur est très proche de la distance à vol d'oiseau, car la distance les séparant est très petite par rapport à la longueur du rayon de la terre environ égal à 6371 km.

2 Equipements

- D'une antenne accordée
- D'une ligne de transmission
- D'un récepteur
- D'un ordinateur

2.1 Représentations

Il est possible d'ajouter un filtre à cavité, pour réduire les bruits parasites non souhaités. Il est aussi possible d'ajouter un préamplificateur, qui amplifiera le signal réceptionné par l'antenne.

Ce matériel n'est pas indispensable, mais peut grandement améliorer la qualité des résultats obtenus.

2.2 Construction de l'antenne

L'antenne doit être accordée sur la fréquence de 143.05MHz ; fréquence émise par l'émetteur militaire de l'armée française GRAVES. Initialement, il était prévu d'installer une antenne de type Yagi calibrée à 144MHz (antenne polyvalente et relativement bon marché). Mais il est plus intéressant, pour une expérience de ce type, de choisir une antenne qui a la possibilité de réceptionner dans toutes les directions, par exemple une antenne $3/4 - \lambda$. Une antenne de type Yagi, n'a la possibilité de réceptionner que dans une seule direction, soit environ $\simeq 46^\circ$ (cf. Fig. 3.5).⁶

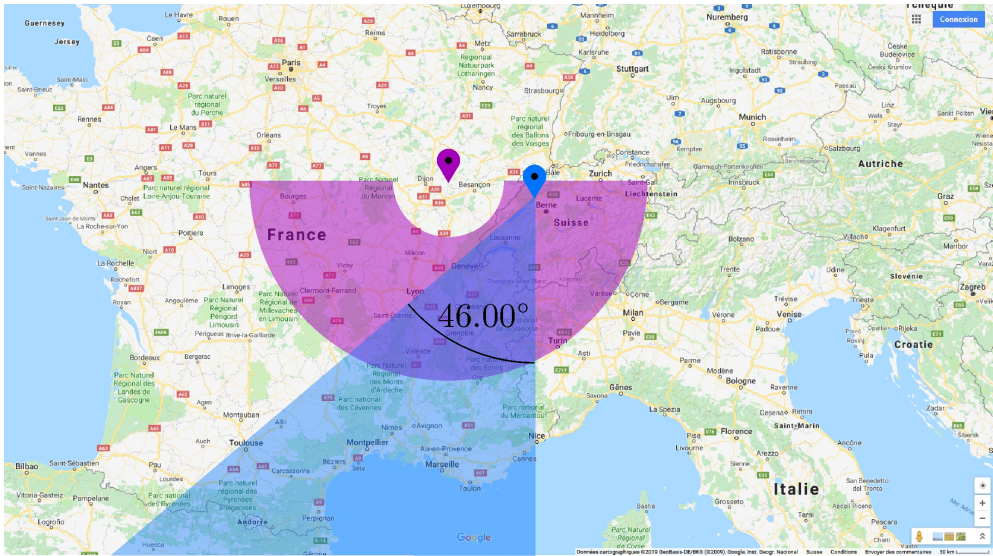


Fig. 3.5 – L'ouverture d'une antenne de type Yagi en bleu, zone d'émission de l'émetteur de radar GRAVES en violet. La zone commune est très réduite. [A]

Une antenne $3/4 - \lambda$ accordée sur la fréquence souhaitée n'existe pas sur le marché. Elle doit être réalisée sur mesure. Dans le cas présent, une antenne $3/4 - \lambda$, plus performante

6. Voir annexe 1 et 2

a été choisie car la réception est focalisée contre le haut ; contrairement à une antenne $\frac{3}{4} - \lambda$, qui réceptionne les ondes de façon identique en dessus qu'en dessous de l'antenne. L'antenne choisie présente l'inconvénient d'être plus difficile à construire.

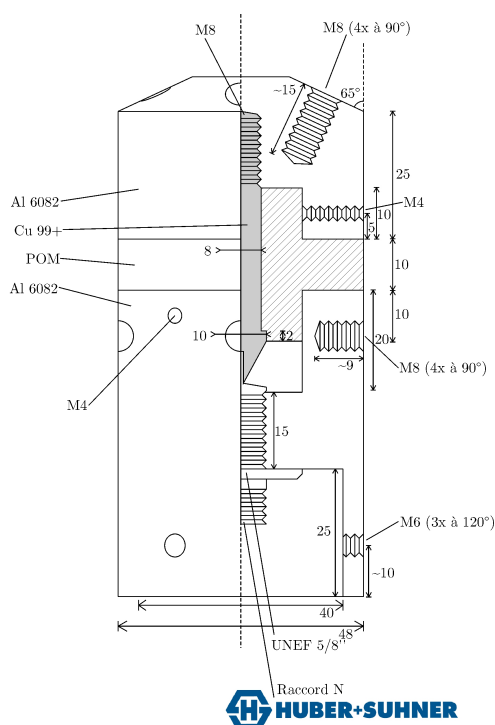


Fig. 3.6 – Schéma de l'antenne mise en place pour effectuer les observations. [A]

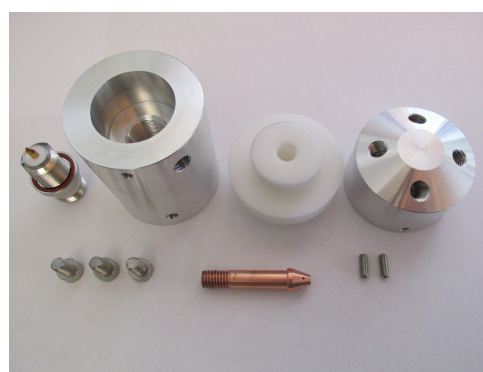


Fig. 3.7 – Antenne démontée. Des tiges en aluminium viennent se glisser dans les filetages présents. [A]

2.3 Mise en place de l'antenne

L'antenne a été solidement maintenue au sol grâce à un support de parasol.



Fig. 3.8 – Antenne montée sur le toit de la halle de gymnastique. [A]



Fig. 3.9 – Antenne solidement maintenue au sol grâce au support de parasol. [A]

De plus, le support de l'antenne et le blindage de la ligne ont été mis à la terre pour éviter les accidents dans le cas où la foudre venait à la frapper.



Fig. 3.10 – L'antenne est mise à la terre par raccord au paratonnerre du bâtiment pour éviter tout accident. [A]

2.4 Lignes de transmission

Dans le cas présent, la ligne de transmission se divise en deux parties : la partie principale et la partie secondaire. Une troisième partie est utilisée lorsqu'un préamplificateur est mis en place. Des tests avec et sans préamplificateur ont été menés à bien.

La partie principale relie l'antenne (ou le préamplificateur) et le filtre à cavité. Il présente les caractéristiques suivantes :

Type de ligne	Câble coaxial
Impédance	50Ω
Longueur	30 mètres
Entrée	N mâle
Sortie	N femelle
Modèle	DATWYLER Altdorf RG-213/U

Le câble secondaire est un câble d'adaptation. Il présente les caractéristiques suivantes :

Type de ligne	Câble coaxial
Impédance	50Ω
Longueur	1 mètre
Entrée	N mâle
Sortie	SMA femelle
Modèle	Inconnu

La partie tertiaire a pour rôle de relier l'antenne et le préamplificateur.

Type de ligne	Câble coaxial
Impédance	50Ω
Longueur	0.01 mètre
Entrée	N mâle
Sortie	N femelle

2.5 Les filtres

Un filtre à cavité ou filtre passe-bande peut être mis en place pour limiter les bruits de fond et perturbation sur la ligne de transmission. Le filtre résonne sur une fréquence, qui peut être réglée et doit être choisie pour correspondre à la fréquence nominale du radar, soit 143.05 MHz.

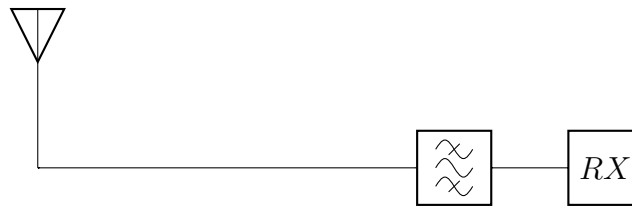


Fig. 3.11 – Schéma de montage comprenant le filtre. [A]

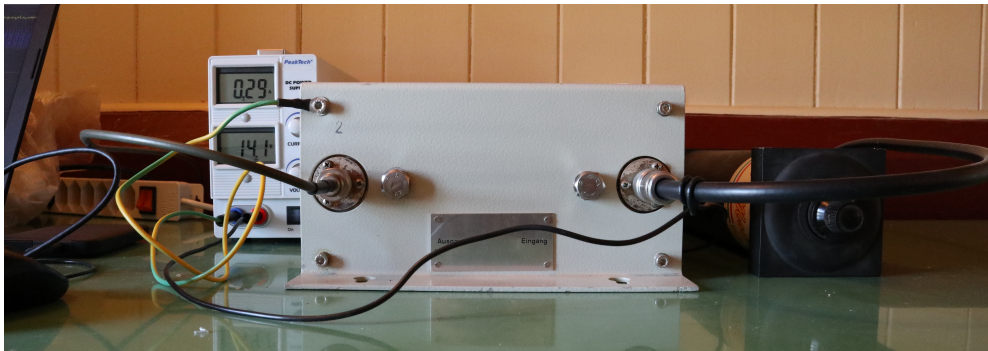


Fig. 3.12 – Au centre, le second filtre à cavité, à droite le premier filtre et à gauche l'alimentation. [A]

En premier lieu, une analyse spectrale a dû être effectuée à l'aide d'un analyseur de spectre⁷ pour régler les filtres sur la fréquence escomptée, c'est-à-dire 143.05MHz. Les filtres ont comme utilité de réduire le bruit de fond sur une bande de fréquence.

Un filtre passe-bande est obtenu par exemple via un circuit RLC (composé d'une self-inductance L , d'un condensateur C , et d'une résistance R). Le condensateur est variable et la résistance est celle du circuit. Pour que le circuit remplisse ses fonctions il est nécessaire de faire entrer le circuit RLC en résonance sur la fréquence $f_0=143.05$ MHz. En d'autres termes, il faut que l'impédance de la self-inductance X_L soit égale à l'impédance du condensateur X_C . Etant donné que le condensateur est variable, le filtre peut être mis en résonance. Il filtre alors toutes les fréquences hormis la fréquence souhaitée.⁸

7. Analyseur de spectre Hewlett Packard 8594E

8. Un filtre qui présente les mêmes caractéristiques n'est pas monté de la façon suivante dans tous les cas de figure.

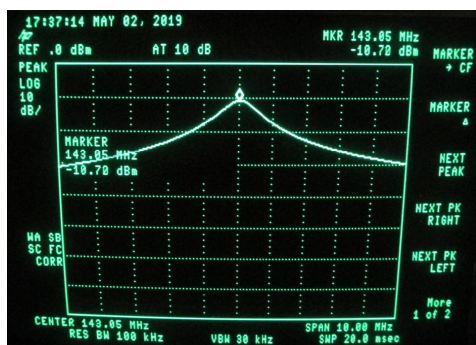


Fig. 3.13 – Analyse spectrale de la première cavité (filtre noir sur la Fig. 3.12). [A]

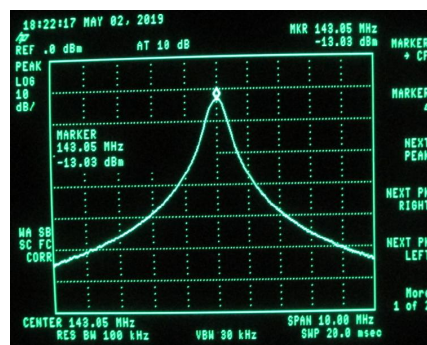


Fig. 3.14 – Analyse spectrale de la seconde cavité (filtre gris sur la Fig. 3.12). [A]

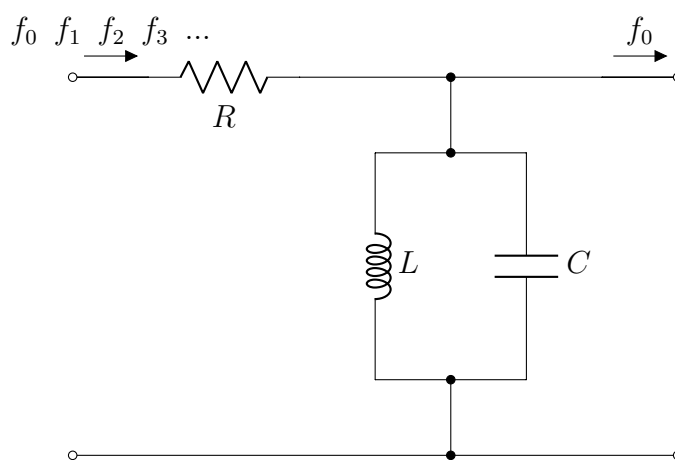


Fig. 3.15 – Exemple de schéma de montage de filtre. Toutes les fréquences sont court-circuitées sauf la fréquence de résonance. [A]

Comportements asymptotiques : A très basse fréquence, la self opère pratiquement comme court-circuit et le signal sera fortement atténué. De façon similaire, à très hautes fréquences, le condensateur aura une impédance très basse et atténuera le signal. A la fréquence f_0 , le circuit LC aura une impédance infinie, conduisant à pratiquement aucune atténuation.

2.6 Préamplificateur

Un préamplificateur a comme intérêt d'amplifier le signal obtenu. Celui-ci doit être placé juste après l'antenne car on ne veut pas amplifier les parasites engendrés par le câble. En particulier dans notre cas où, la ligne de transmission mesure plus de 30 mètres.

Fabricant	SSB-Electronic, D-59557 Lippstadt
Modèle	SP-2
Gain approximatif à 143 MHz	18dB
facteur de bruit	1dB

Le préamplificateur doit être alimenté par une tension de 13,8 Volts nécessaire au bon fonctionnement de ce dernier. Cette tension est fournie par une alimentation stabilisée de laboratoire.

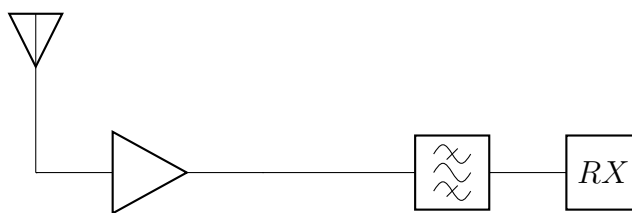


Fig. 3.16 – Schéma de montage comprenant le préamplificateur. [A]



Fig. 3.17 – Préamplificateur utilisé dans le cadre de ce travail. [A]

2.7 Récepteur

Le récepteur (SDR signifiant **S**oftware **D**efined **R**adio ou Radio Logicielle) type Dongle Funcube Pro+ à un connecteur coaxial SMA (**S**ub**M**iniature version **A**) mâle et se connecte directement sur l'un des ports USB de la machine. Le modèle utilisé fonctionne grâce à la carte son de l'ordinateur⁹.



Fig. 3.18 – Récepteur Dongle Funcube Pro+

Il est nécessaire de le calibrer sur la fréquence voulue avant la phase de détection. Le logiciel utilisé pour fixer la fréquence est FUNCUBE Dongle Pro+ Control V2 (cf. Fig. 3.18).

2.8 Logiciel

Le logiciel Spectrum Lab V2 a été utilisé pour ce travail. Il effectue une transformée de Fourier. Le logiciel permet de visualiser les résultats selon une représentation de type

9. Voir annexe 4

chute d'eau (Waterfall). C'est-à-dire : le défilement du temps en ordonnée et le décalage Doppler en abscisse (cf. Fig. 3.19). Un axe d'abscisse positif correspond à un décalage en fréquence supérieur à la fréquence nominale et un axe d'abscisse négatif correspond à un décalage inférieur. Il présente de nombreux paramètres, comme par exemple la sensibilité de la réception.

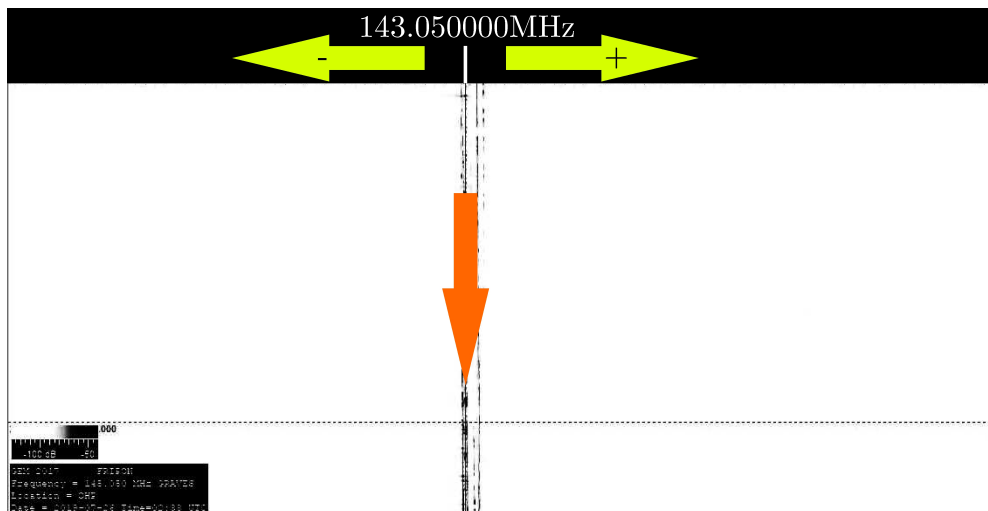


Fig. 3.19 – Les flèches jaunes représentent le décalage Doppler, et la flèche orange le défilement du temps. [A]

Il est possible de paramétrer le logiciel pour qu'il prenne des captures d'écran à intervalles réguliers et qu'il les stocke en mémoire (HDD, SSD ou autres supports). Il est nécessaire préciser son emplacement.¹⁰

Les images sont enregistrées en format JPG. Le son est également enregistré (format WAV). Très vite après la mise en place, les premiers résultats affluent.

2.9 Interprétation des résultats

Deux paramètres influencent indirectement les résultats : le décalage Doppler et la durée du décalage.^{11 12}

- Si le décalage en fréquence est grand et sa durée faible, alors il s'agit d'un objet ayant une vitesse très élevée, comme par exemple un météore¹³.
- Si le décalage est grand et sa durée longue, l'objet se déplace à une vitesse relativement importante. Il s'agira vraisemblablement d'un satellite.
- Si le décalage est faible et la durée longue, alors l'objet se déplace à une basse vitesse comme par exemple celle d'un avion.

10. Les images et les fichiers audio sont classés par date et par heures.

11. Les résultats sont « traitillés » car, comme expliqué précédemment, le radar balaye le ciel et ne bombarde pas l'objet avec des ondes électromagnétiques en continu.

12. Si d'autres signaux sont détectés alors il s'agira probablement de parasites. En particulier si ceux-ci sont présent sur les harmoniques.

13. La pente de la signature sera faible mais jamais parfaitement horizontale

Chapitre 4

Phase de test

1 Introduction

Des essais ont été nécessaires pour la mise au point dans une phase préliminaire. Dans ce chapitre, de nombreuses observations ont été effectuées. La phase de test a permis de définir quels équipements et quels réglages seraient retenus pour réaliser les observations de météorites durant la pluie d'étoiles filantes des Perséides d'août 2019. De plus, elle a permis d'acquérir le matériel afin de mener les expériences. D'habitude, on observe moins d'un météore par heure, alors que lorsque la Terre traverse l'essaim des Perséides, ce taux peut s'accroître à quelques dizaines. Pour la date du 11 août 2019, la prédiction faisait état de l'ordre de 20 météores par heure. Cette phase préliminaire a permis d'appréhender le matériel pour avoir des résultats optimaux. Finalement elle a pour d'atteindre les limites de l'équipement à disposition. Les fichiers audio ne seront pas traités dans ce travail, car n'ajoutant que très peu de valeur par rapport aux graphiques visuels. Le shift Doppler est quantifiable aisément sur un graphique, alors qu'acoustiquement cela demande plus d'infrastructure pour atteindre le même résultat.

2 Sensibilité du système, perturbations et bruit de l'ensemble

On constate de nombreuses perturbations lorsqu'on n'utilise aucun filtre. De plus le signal est relativement faible.

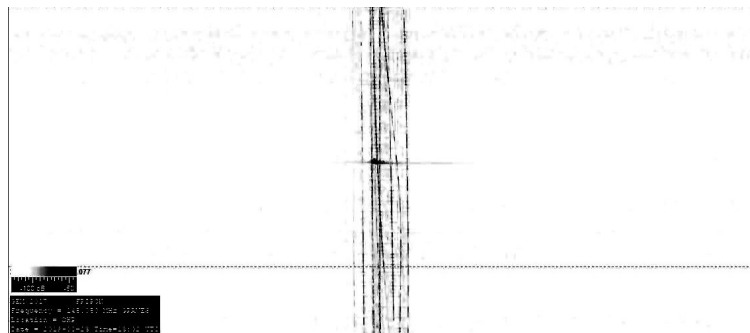


Fig. 4.1 – Signaux sans filtre et sans préamplificateur. [A]

Lorsque le préamplificateur est enclenché, le signal obtenu est plus puissant. De plus, les

données peuvent potentiellement être améliorés avec une cavité (filtre).

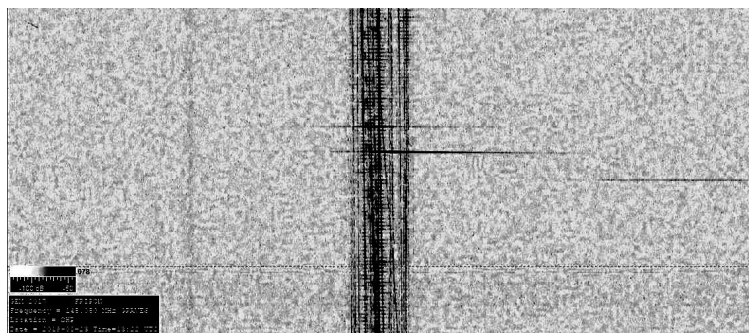


Fig. 4.2 – Signaux obtenus avec la seconde cavité et le préamplificateur enclenché. [A]

La première cavité n'a pas été utilisée pour la prise de mesure car elle offre pas une bonne sélectivité.

3 Conclusion

Les fichiers enregistrés avec la seconde cavité et le préamplificateur sont de très bonne qualité par rapport aux fichiers enregistrés avec les autres configurations. C'est pourquoi la suite des observations se fera uniquement avec cette configuration.

Grâce à cette configuration, le nombre de météores enregistré durant la pluie d'étoiles filantes devrait être bien plus élevé, en raison de la sensibilité accrue du système.

Chapitre 5

Observations

Très vite, après la mise en place de l'installation, de nombreux signaux apparaissent.

Il convient de noter que la vitesse donnée par l'effet Doppler n'est pas la vitesse réelle de l'objet. Il faut voir la vitesse du point de vue de l'antenne. Cela n'a pas forcément grande importance pour la suite, mais néanmoins utile de le préciser. Cependant, les signatures de météores, d'avions ou encore de satellites (e.g. station ISS) seront très facilement différenciables.

1 Signature des avions

Les premiers signaux observés sont ceux reflétés par les avions. Il est facile de les reconnaître car leur vitesse de croisière et donc l'effet Doppler engendré par celle-ci est relativement faible. Dans le diagramme (cf. Fig. 5.1), les variations Doppler (changement de fréquence en fonction du temps) seront faibles.

Les avions peuvent légèrement changer de vitesse ou de direction lorsqu'il s'agit d'avions cargo ou d'avions de ligne.

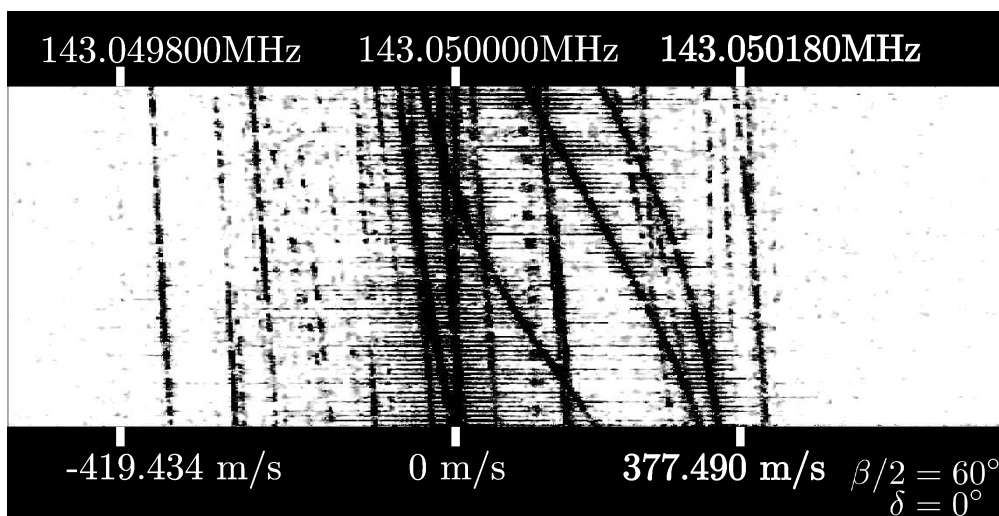


Fig. 5.1 – Signaux obtenu par réflexion contre des avions. [A]

Le lecteur attentif remarquera que la nuit le trafic aérien est bien moins important comme nous le montre les images ci-dessous prises respectivement à 23h30 et à 12h00. Les avions bruyants ne peuvent décoller après une certaine heure.



Fig. 5.2 – Illustration prise à 23h30. [A]



Fig. 5.3 – Illustration prise à 12h00, le nombre d'avions détectés est plus élevé. [A]

2 Détection de satellites

Les satellites artificiels, comme la Station Spatiale International (ISS) peuvent être détectés. En effet, la position et le moment de passage de l'ISS sont révélés au public (cf. Fig. 5.4 et 5.5). Il est possible d'affirmer avec certitude qu'il s'agit de satellite car leur vitesse, environ 24'000 km/h, est plus élevée que des avions et plus faible que des météores.

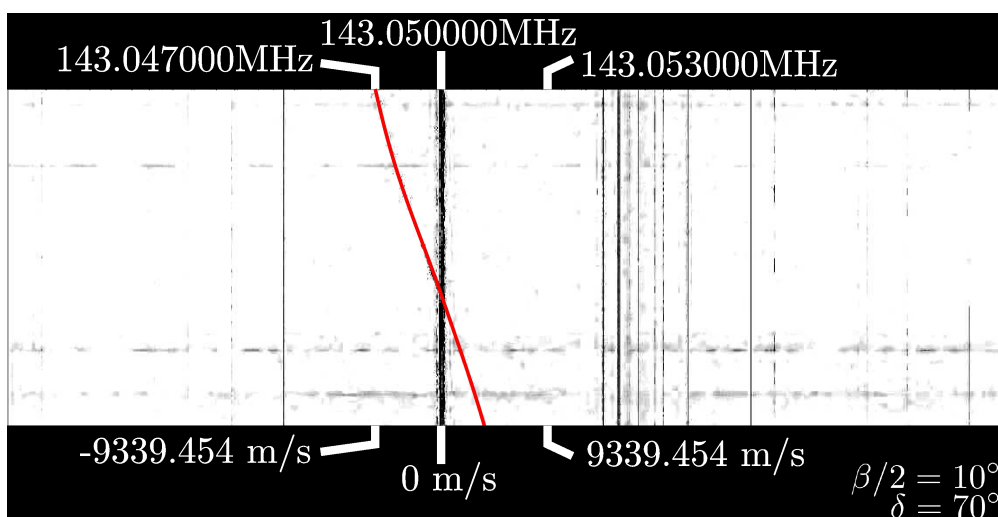


Fig. 5.4 – Détection de l'ISS le 1 juin 2019 à 22h34 [A]

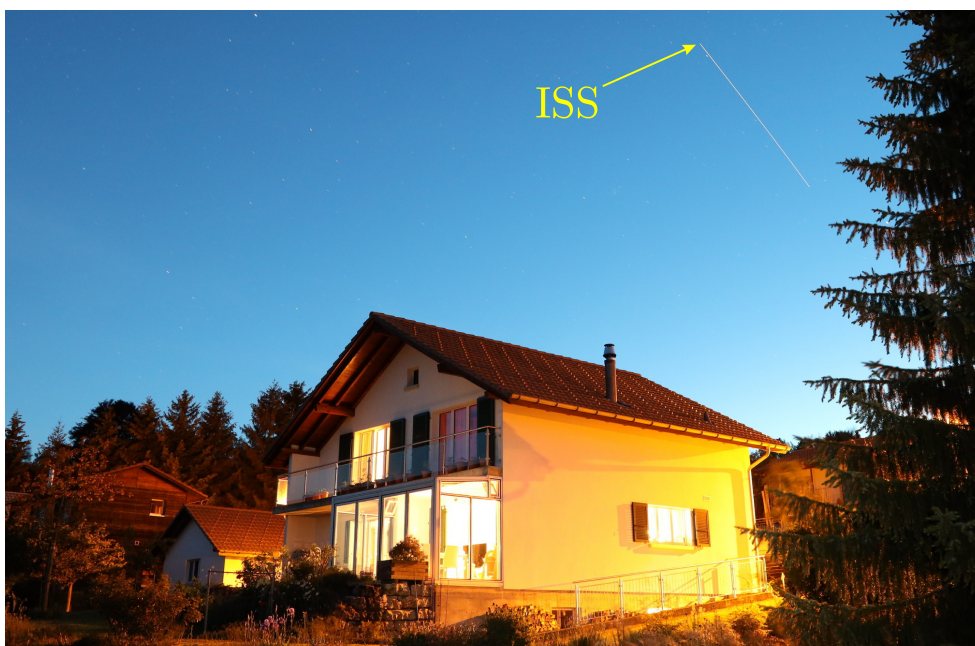


Fig. 5.5 – Image de ISS prise le 1 juin 2019 à 22h34. [A]

Il est impossible de détecter un signal reflété sur notre satellite naturel avec le matériel à disposition. Il y a certes une réflexion, mais l'antenne ne peut pas réceptionner ce signal, car trop faible. Il est intéressant de noter que certains centres de recherches (La National Aeronautics and Space Administration ou NASA par exemple) utilisent cette méthode pour définir précisément la distance séparant la Terre et la Lune. A noter que cette distance s'accroît au fil du temps.

3 Météores

Beaucoup de météores arrivent dans la mésosphère et une grande partie d'entre eux se consomment intégralement quasiment instantanément. En réalisant ce détecteur, il est possible de voir bien plus d'objets qu'à l'œil nu. Contrairement aux aéronefs, les météores présentent de très fortes variations Doppler (cf. Fig. 5.6 et annexe 5).

Lorsque la Terre croise la trajectoire de la comète Swift-Tuttle une fois par an, les débris de cette dernière entrent dans l'atmosphère terrestre et s'embrasent. Le nombre de météores augmente lors de cette période. Cette augmentation est visible au radar. On passe d'une fréquence d'environ dix météores par heure à plus de trente lors des Perséides (cf. Fig. 5.7). De plus le lecteur remarquera que les météores détectés traversent souvent la fréquence nominale ce qui signifie que le météore s'approche puis s'éloigne. L'hypothèse est que la sensibilité est accrue pour les météores passant près du R_X , ce qui sous entend qu'il passe au dessus de l'antenne et croise la fréquence du radar. Un écho très court va avoir une fréquence « plate », cette fréquence est coupée par le filtre et un trait horizontal de longueur finie et symétrique par rapport à la fréquence du filtre est perçu.

Plus de 10500 météores ont été détectés durant l'intervalle du 22 juillet au 20 août 2019 (cf. Fig. 5.7). Des résultats similaires ont pu être observés lors des Aquarides. Lorsque la Terre est passée dans la trajectoire de la comète de Halley.¹

1. Le 26 juillet, le 27 juillet et le 20 août, les mesures n'ont pas été effectuées en raison d'un problème technique à l'équipement.

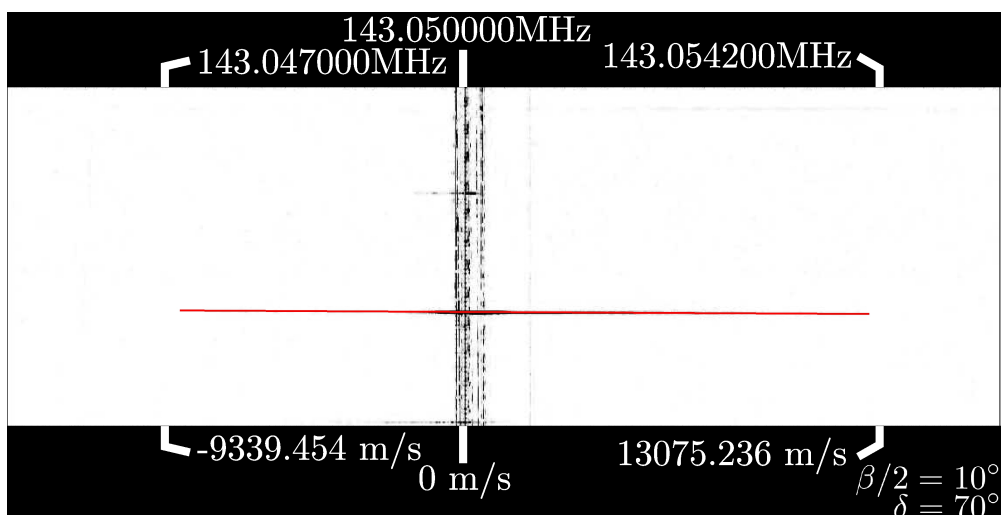


Fig. 5.6 – Détection de météore [A]

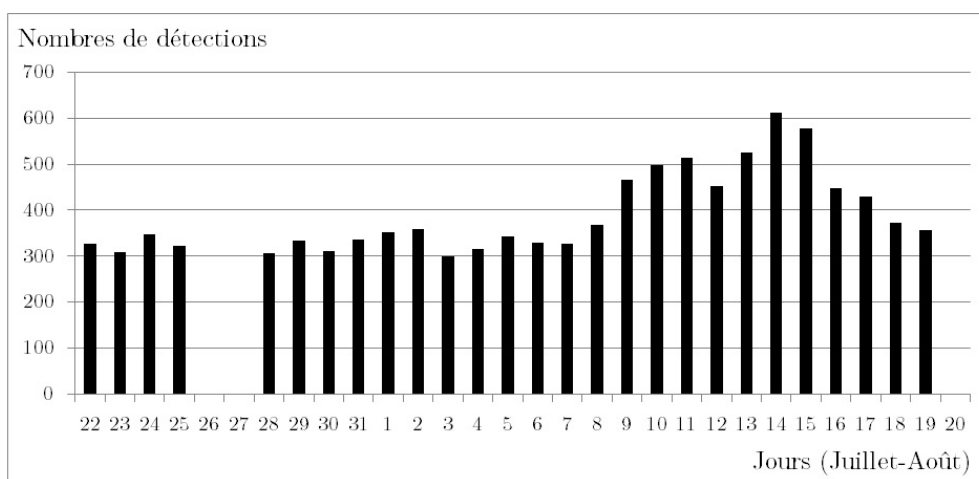


Fig. 5.7 – Nombre de météores détecté durant les Perséides avec cette instrumentation. Le nombre de météores augmente lors du pic d'activité (11-15 août). [A]

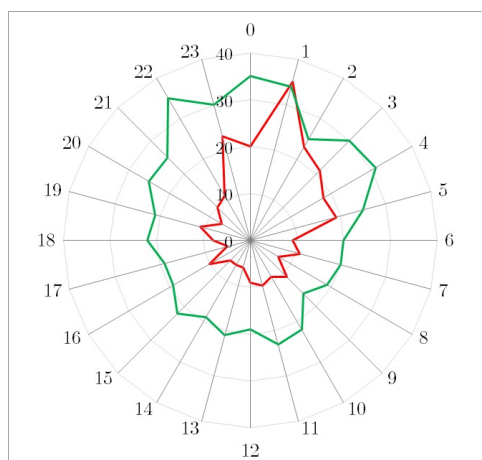


Fig. 5.8 – Répartition des détections de météores sur 24 heures (en rouge le 22 juillet et en vert le 14 août). [A]

4 Signaux mystérieux

Source : [63]

Des signaux inconnus ont été observés. Le premier signal provenait d'un objet se déplaçant à une vitesse pouvant atteindre 350 km/h, comme par exemple un ballon-sonde utilisé dans le domaine de la météorologie. En effet, il aurait pu être déplacé par un courant-jet allant de 200 à 400 km/h [63].

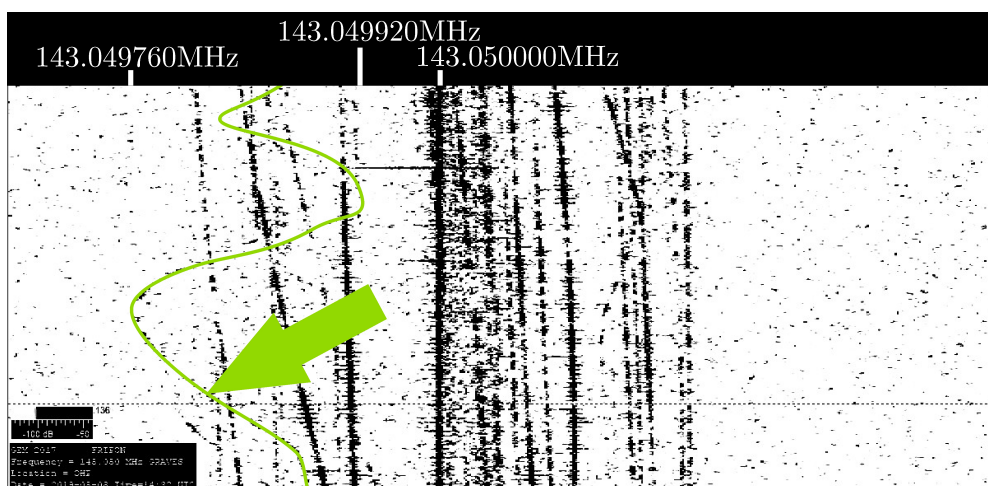


Fig. 5.9 – Signal mystérieux qui semble provenir d'un ballon sonde, déplacé par un courant-jet. [A]

Le signal peut également provenir d'un avion militaire se déplaçant à Mach 0.8 par exemple.

5 Perturbations et bruit

Source : [64]

5.1 Le Soleil, bruit de fond

Il est connu que le Soleil émet du bruit. La différence est notable lorsque l'on compare une image prise lorsque le Soleil culmine (12h00) et lorsqu'il est couché (1h36).

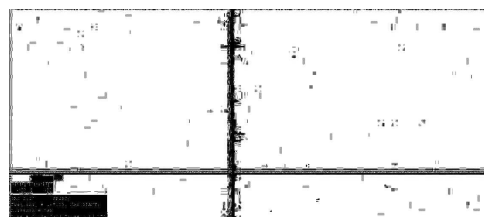
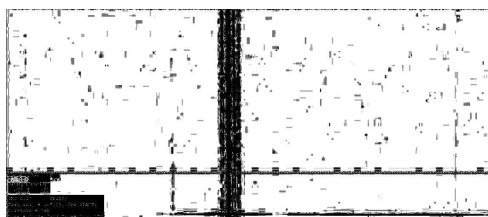


Fig. 5.10 – Mesure prise à 12h00, le bruit de fond est plus important à cause du soleil. [A]

5.2 Les radios

Les radios utilisées dans le domaine civil tout comme les radios professionnelles émettent aussi des interférences. Aucune observation n'a pu être effectuée à ce sujet. La radio doit être placée à proximité de l'antenne de réception pour pouvoir visualiser ces perturbations.

5.3 Les lampes, contacts électriques

Le simple fait d'allumer et d'éteindre la lumière peut engendrer de petites perturbations dues au courant qui passe dans la lampe par le culot.

Les tubes à néon et les lampes fluorescentes produisent quant à elles un petit grésillement lorsqu'elles sont enclenchées.

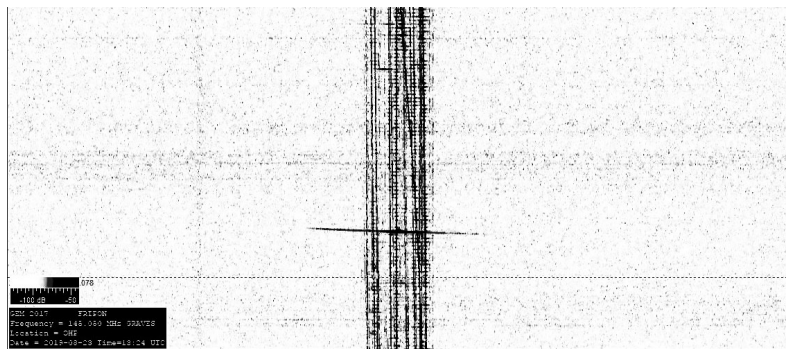


Fig. 5.12 – Parasites de fond engendré par les contacts électriques de la lampe du laboratoire. La lampe a successivement été allumée puis éteinte à la manière d'un stroboscope. [A]

5.4 Les moteurs à allumage électronique

Les moteurs à allumage électronique sont connus pour émettre des parasites. Il arrive que les moteurs à explosion fonctionnant par allumage commandé soient interdits sur les lieux lors de l'utilisation d'un radiotélescope. Les véhicules utilisent comme combustible le diesel par exemple ; en effet, lorsque ce dernier est injecté dans le moteur, il s'auto-enflamme instantanément. Comme précédemment, ces perturbations n'ont lieu que lorsque les moteurs équipés de bougies sont proche du récepteur.

Il arrive que l'électrode centrale de la bougie soit suivie d'une résistance ayant pour but de filtrer les ondes électromagnétiques.

Ces perturbations n'ont pas pu être identifiées.

5.5 Les moteurs électriques

Les moteurs électriques utilisés dans les rasoirs, aspirateurs, sèche-cheveux, machines à coudre, etc. interfèrent les signaux. Mais il est possible d'ajouter un filtre sur l'appareil en question pour limiter ses émissions de signaux.

Toutefois, comme les appareils ne fonctionnent que pendant une durée de temps limitée, ils ne perturbent pas le déroulement des observations. De plus, ces appareils électriques ne peuvent jouer le rôle de perturbateurs que lorsqu'ils sont proches du dispositif de réception.

5.6 Les téléphones portables

Des signaux similaires sont obtenus lorsqu'un téléphone portable est placé à côté de l'antenne de réception.

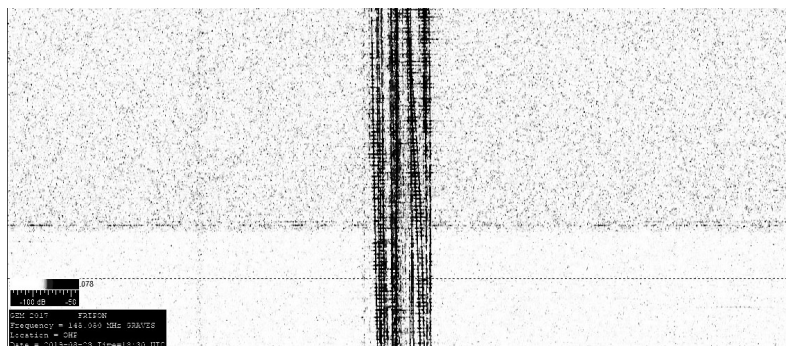


Fig. 5.13 – Parasites obtenus lorsqu'un téléphone portable est placé à côté de l'antenne. [A]

5.7 Autres signaux

Certains appareils utilisés dans l'industrie peuvent provoquer des perturbations. Ces perturbations se traduisent par un ronflement continu.

Il y a notamment un signal, qui engendrait des parasites, qui revenait quotidiennement et qui débutait à 5h47 et qui s'atténuait le long de la journée. La source de ces perturbations n'a pas pu être définie clairement. Il s'agit probablement d'un appareil électrique automatique. Une seconde supposition serait la ligne de chemin de fer, cette dernière passe non loin du Gymnase de la rue des Alpes. Le train en direction de Sonceboz-Sombeval emprunte cette ligne et part à 5h47 de la gare de Bienne.

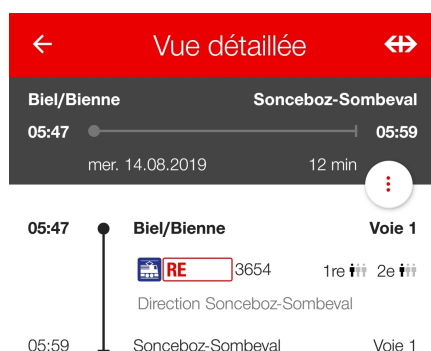


Fig. 5.14 – Horaire du train passant à quelques mètres de l'antenne, causant hypothétiquement des parasites. [E]

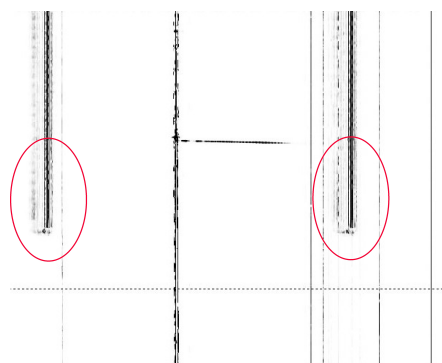


Fig. 5.15 – Parasites détectés à 5h47 potentiellement engendrés par le train reliant Bienne et Sonceboz-Sombeval. [A]

Il faut préciser qu'il s'agit peut-être d'une coïncidence.

D'autres exemples de parasites :

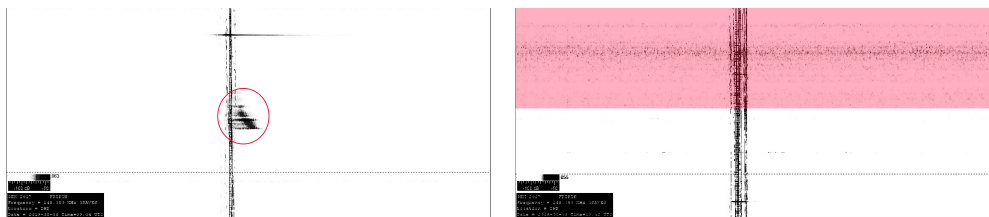


Fig. 5.16 – Autres parasites dont la source n'a pas pus être identifié. [A]

Chapitre 6

Prolongement

Sources : [65] [66]

Les résultats obtenus durant l'expérience pourraient être envoyés à FRIPON (**F**ireball **R**ecovery and **I**nter**P**lanetary **O**bservation **N**etwork), l'organisateur du programme, qui a comme but de tapisser l'Europe de détecteurs de ce type. Le projet FRIPON est soutenu par l'observatoire de Paris, l'Université Paris sud, l'Université Aix Marseille, le CNRS et le CNES [65]. En effet, il pourrait être intéressant d'agrandir leur réseau à l'est du radar GRAVES.

Les essais pourraient tout à fait être prolongés avec une antenne Yagi si l'on cherche à suivre des satellites ou des objets ayant une trajectoire connue au préalable. De plus, le signal obtenu à l'aide d'une antenne Yagi est théoriquement de meilleure qualité. C'est-à-dire remplacer l'antenne actuelle, puis faire des essais sans cavité puis avec la première et pour finir avec la seconde. Il serait intéressant de voir si l'on observerait plus de météores et si le signal serait de qualité supérieure.

Une alternative au programme Spectrum Lab V2, serait de traiter le signal au moyen d'un programme (Python, C++, etc.). Il devrait effectuer un échantillonnage au-delà de la fréquence de Nyquist puis une transformée de Fourier et aligner un peigne de Dirac. Les données ne seraient plus enregistrées au format JPG mais sous forme numérique. L'avantage est considérable, car le signal serait traité numériquement et par conséquent tous les signaux parasites pourraient être supprimés informatiquement.

En plaçant une seconde antenne à une certaine distance, il serait possible de trianguler la position de satellites, d'avions ou de météorites. Il est alors plus simple de définir la réelle vitesse de l'objet et sa trajectoire (et non sa vitesse radiale). Dans le cas d'une météorite, des fragments de météorites pourrait alors être localisés.

Malheureusement, le temps des observations étant limité, les expériences complémentaires n'ont pas pu être réalisées.



Chapitre 7

Conclusion

L'expérience a été très concluante, les fichiers obtenus sont d'une très bonne qualité par rapport aux résultats imaginés. Elle est due à l'antenne et aux composants optionnels ajoutés. L'expérience a permis de démontrer que la détection spatiale à l'aide d'ondes électromagnétiques est possible pour n'importe qui et à moindre coût. La configuration a été optimisée pour obtenir de meilleurs résultats. De plus, il n'est pas nécessaire posséder une licence de radioamateur ni d'autorisation pour mener à bien une telle expérience. Mais, il est vivement conseillé de se renseigner sur le sujet auprès d'un spécialiste, avant de débiter l'expérience. Très vite, après la mise en place de l'antenne, les premiers résultats affluent.

Les résultats peuvent être consultés ultérieurement car la prise de mesure se fait automatiquement. De plus, la détection se fait par tous les temps de jour et de nuit. La plausibilité des résultats a été vérifiée de différentes façons, comme la détection du passage de la Station Spatiale International (ISS) ou les pluies d'étoiles filantes des Perséides et des Aquarides. La fréquence de détection de météores s'élève à trente par heure en période de pluies contre dix par heure en période normale.

Les objectifs fixés au préalable ont largement été dépassés. Bien que la façon dont ils ont été accomplis n'était pas prévue initialement, notamment en ce qui concerne le choix de l'antenne.

Finalement, je suis très satisfait du travail effectué. Cette recherche m'a permis de travailler en autonomie et d'approfondir deux sujets qui me fascinent depuis toujours : l'astronomie et la technique radiofréquence. Dans le cadre de mon travail, j'ai eu l'occasion de rencontrer des passionnés qui m'ont appris de nombreuses choses. Ce travail m'a également donné envie d'approfondir certains domaines.

Chapitre 8

Remerciements

- Monsieur Dr. Nicolas Produit, expert de la Fondation Science et jeunesse.
- Monsieur Dr Patrick Eggli, sans qui je n'aurais pas pu faire d'antenne de réception, je n'aurais pas eu les informations nécessaires au bon fonctionnement du système mis en place. Ses conseils avisés en radiofréquence et en électrotechnique m'ont été très précieux.
- Monsieur Emrah Tas du Laboratoire de compatibilité électromagnétique (CEM) de METAS, qui a mesuré le diagramme de rayonnement ainsi que le gain de l'antenne.
- Monsieur Philippe Drompt pour son soutien pour mon travail, son implication pour trouver un local où je puisse mener mes expériences à bien et également pour avoir organisé l'ordinateur et le récepteur Dongle.
- L'institution du gymnase de Bienne pour m'avoir mis le local à disposition et en particulier à Monsieur Kummer, concierge des lieux.
- Monsieur Richert, contacté grâce à Monsieur Dr Tim Riesen (UNI Bern), qui m'a prodigué de bons conseils pour optimiser le système mis en place et analyser les résultats.
- Monsieur Michaël Monnier pour la réalisation du graphisme de la page de couverture.
- Le club de radioamateurs HB9XC section Pierre-Pertuis (USKA).
- Ma famille pour leur soutien.



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES



SCHWEIZER JUGEND FORSCHT
SCIENCE ET JEUNESSE
SCIENZA E GIOVENTÙ



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

u^b

b
**UNIVERSITÄT
BERN**



Chapitre 9

Bibliographie

Sources :

- [1] En ligne, Available : <http://articles.adsabs.harvard.edu//full/1948LAstr..62..121L/0000137.000.html> [Accès : août 2019]
- [2] En ligne, Available : <https://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/graves.htm> [Accès : juillet 2019]
- [3] En ligne, Available : <https://www.usinenouvelle.com/article/le-radar-de-surveillance-spatial-graves-va-etre-renove.N476039> [Accès : juillet 2019]
- [4] En ligne, Available : <http://www.radartutorial.eu/05.bistatic/bs04.fr.html> [Accès : juillet 2019]
- [5] J. Willis, Nicholas, 2005. Bistatic Radar. [U.S.A.] : Scitech Publishing, INC. ISBN 1-891121-45-6
- [6] En ligne, Available : <https://www.universalis.fr/dictionnaire/bistatique/>
- [7] En ligne, Available : <https://www.electronicshobby.com/2017/05/difference-between-monostatic-radar.html> [Accès : juillet 2019]
- [8] Cours Dr. P. Egli (HB9OMZ)
- [9] Brault, Raymond, 1987. Les Antennes. [Paris] : Editions Techniques et Scientifiques Françaises, ISBN 2-85535-149-9
- [10] D. Bensoussan, 1980. Les Antennes. [Paris] : Dunod, ISBN 2-04-012084-X
- [11] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08a/RM08a01.html> [Accès : juillet 2019]
- [12] En ligne, Available : <https://rogerbeep.fr/antennes-1-4-1-2-5-8-3-4-7-8/> [Accès : août 2019]
- [13] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM08/RM08a/RM08a07.html> [Accès : juillet 2019]
- [14] En ligne, Available : http://jmfriedt.free.fr/diagramme_antenne.pdf [Accès : août 2019]
- [15] En ligne, Available : http://bts.uba.be/articles_pour_site_web/le_diagramme_de_rayonnement_des_antennes..pdf [Accès : août 2019]
- [16] En ligne, Available : https://shopdelta.eu/dbi-gain-dantenne-isotrope_14_aid836.html [Accès : août 2019]

- [17] En ligne, Available : <https://www.everythingrf.com/community/what-is-an-isotropic-antenna> [Accès : août 2019]
- [18] En ligne, Available : <https://arml.r-e-f.org/pdf/par.pdf>
- [19] En ligne, Available : <https://hamsci.com/sites/default/files/resources/erp.pdf> [Accès : septembre 2019]
- [20] En ligne, Available : <https://www.everythingrf.com/community/what-is-the-difference-between-eirp-and-erp> [Accès : juin 2019]
- [21] En ligne, Available : https://www.memoireonline.com/04/15/9099/m_Influence-de-la-PIRE-sur-la-transmission-par-satellite-geostationnaire6.html [Accès : juin 2019]
- [22] En ligne, Available : <http://www.formules-physique.com/categorie/607>
- [23] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM07/RM07d/RM07d08.htm> [Accès : juillet 2019]
- [24] En ligne, Available : http://www.pilloud.net/op_web/les_lignes_op.pdf [Accès : septembre 2019]
- [25] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23I/RM23i07.html> [Accès : juillet 2019]
- [26] Pilloud, Olivier (HB9CEM), 2018. Le Radioamateur, préparation à l'examen technique, manuel de référence. [Paris] : Editions TECHNIP, ISBN 978-2-7108-1184-8
- [27] En ligne, Available : <https://reverb.com/fr/news/le-guide-technique-limpedance-quest-ce-que-cest-au-fait> [Accès : juillet 2019]
- [28] En ligne, Available : <http://www.epsic.ch/Branches/electrotechnique/theorie/rlcserie/270.html> [Accès : septembre 2019]
- [29] En ligne, Available : <http://www.zpag.net/Electroniques/Impedance.htm> [Accès : juillet 2019]
- [30] A. Tipler, Paul, 1991. Physik. [U.S.A.] : Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin • Oxford, ISBN 3-86025-122-8
- [31] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23m/RM23m02.html> [Accès : juillet 2019]
- [32] En ligne, Available : <http://villemin.gerard.free.fr/aScience/Physique/Decibel.htm> [Accès : septembre 2019]
- [33] En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM07/RM07d/RM07d07.htm> [Accès : juillet 2019]
- [34] En ligne, Available : <https://www.techno-science.net/definition/11651.html>
- [35] C. Giancoli, Douglas, 2011. Physik [Deutschland] : Pearson, ISBN 978-3-86326-954-8
- [36] En ligne, Available : https://astronomia.fr/2eme_partie/petitsCorps/meteorites.php [Accès : septembre 2019]
- [37] En ligne, Available : <https://www.nationalgeographic.fr/sciences/lasteroide-qui-cause-lextinction-des-dinosaures-sest-ecrase-au-pire-endroit-possible> [Accès : octobre 2019]
- [38] En ligne, Available : <http://tobeornotplanet.e-monsite.com/pages/notre-planete-1/cometes-asteroides-et-meteorites.html> [Accès : septembre 2019]

- [39] En ligne, Available : https://www.notre-planete.info/terre/fin_du_monde/risque-collision-asteroide-Terre.php [Accès : octobre 2019]
- [40] En ligne, Available : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/astronomie-meteoroide-11355/> [Accès : septembre 2019]
- [41] En ligne, Available : <https://www.astronomes.com/le-systeme-solaire-interne/les-meteoroides> [Accès : septembre 2019]
- [42] En ligne, Available : <http://www.etoile-des-enfants.ch/article1181.html> [Accès : octobre 2019]
- [43] Commission Romande de Mathématiques, 2015. Formulaires et tables : G d'Encre, ISBN 978-940501-41-0
- [44] En ligne, Available : <http://toilesetetoiles.canalblog.com/archives/2017/03/26/35097669.html>
- [45] En ligne, Available : <http://www.reforme-meteor.net/page-bolide/> [Accès : septembre 2019]
- [46] En ligne, Available : <http://adsabs.harvard.edu/full/1999md98.conf...37C> [Accès : août 2019]
- [47] En ligne, Available : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/meteorite-Tcheliabinsk.xml> [Accès : août 2019]
- [48] En ligne, Available : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/m%C3%A9t%C3%A9ore/50932> [Accès : août 2019]
- [49] En ligne, Available : <http://www.astrosurf.com/luxorion/impact-meteoroide1.htm> [Accès : août 2019]
- [50] En ligne, Available : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/meteorites/> [Accès : août 2019]
- [51] En ligne, Available : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-meteorite-872/> [Accès : septembre 2019]
- [52] En ligne, Available : https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_planetologie-petitscorps/meteorites-definition.html [Accès : septembre 2019]
- [53] En ligne, Available : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/choindre/15632> [Accès : septembre 2019]
- [54] En ligne, Available : http://ipag.obs.ujf-grenoble.fr/~beckp/Research/Teaching_files/Mineralogie_Chondrites.pdf [Accès : septembre 2019]
- [55] En ligne, Available : http://www.carionmineraux.com/meteorite_achondrite.htm [Accès : septembre 2019]
- [56] En ligne, Available : http://www.astrosurf.com/astrojanus/Meteorites/%20presentation_achondrites%20primitives.htm [Accès : septembre 2019]
- [57] En ligne, Available : https://www.astro-rennes.com/initiation/essaims_meteorites.php [Accès : août 2019]
- [58] En ligne, Available : <http://www.cosmovisions.com/pointvernal.htm> [Accès : août 2019]
- [59] En ligne, Available : <https://www.le-systeme-solaire.net/aide-perihelie.html> [Accès : août 2019]

- [60] En ligne, Available : https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_eclipses-lune/stlp-mvmt-moyen-ligne-noeuds.html [Accès : août 2019]
- [61] En ligne, Available : http://mecaspa.cannes-aero-patrimoine.net/COURS_SA/MOUV_KEP/MOUV_KEP.HTM [Accès : août 2019]
- [62] En ligne, Available : <http://villemin.gerard.free.fr/Astronom/ViteEvas.htm> [Accès : août 2019]
- [63] En ligne, Available : <http://la.climatologie.free.fr/troposphere/jet-stream.htm> [Accès : octobre 2019]
- [64] En ligne, Available : <https://www.ic.gc.ca/eic/site/smt-gst.nsf/fra/sf01379.html> [Accès : septembre 2019]
- [65] En ligne, Available : <https://www.fripon.org/> [Accès : octobre 2019]
- [66] En ligne, Available : <https://www.obspm.fr/> [Accès : octobre 2019]

Egalement consulté :

- En ligne, Available : <https://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM04/RM04c03.html> [Accès : juillet 2019]
- En ligne, Available : https://www.britastro.org/radio/projects/Detection_of_meteors_by_RADAR.pdf
- Programme de Patrouille Suisse
- F. Panter, Philip, 1965. Modulation, Noise and Spectral Analysis [U.S.A] : McGRAW-HILL Book Company, ISBN 07-048446-5
- Fontolliet, Pierre-Gérard, 1994. Traité d'Electricité, Systèmes de telecommunications [Lausanne] : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, ISBN 2-88074-269-2
- Reithofer, Sepp/Josef (DL6MH), 1987. Praxis der Mikrowellen-Antennen, 1-75GHz [Western Germany] : UKW berichte, ISBN 3-9801 367-0-1
- F. Combes, Paul, 1982. Ondes métriques et centimétriques : Dunod Université, ISBN 2-04-015798-0
- Van Valkenburgh, Nooger & Neville, Inc, 1966 Radars, Principe et fonctionnement [Belgique] : Editions Gamma, D-1966-0195-7
- Conseils et informations de Monsieur Jochen Richert

Photographies :

- [A] Cédric Willemin
- [B] En ligne, Available : <https://f6crp.pagesperso-orange.fr/ba/graves.htm>
- [C] En ligne, Available : <https://www.wikipedia.org/>
- [D] En ligne, Available : <https://www.popularmechanics.com/science/g26028358/places-where-meteors-hit-united-states/>
- [E] Application mobile SBB

Chapitre 10

Tables des illustrations

1.1	Emetteurs du radar GRAVES, situé entre Dijon et Vesoul. [B]	2
1.2	Récepteurs du radar GRAVES, composé d'un grand réseau d'antennes. [B]	2
2.1	Fonctionnement général du radar bistatique où β représente l'angle bistatique. [A]	4
2.2	Schéma de montage où RX représente le récepteur. [A]	5
2.3	Exemple de diagramme de rayonnement tridimensionnel. [C]	5
2.4	Coupe horizontale d'un diagramme de rayonnement. [C]	5
2.5	Représentation schématique de la section efficace. [A]	7
2.6	Représentation de l'effet Doppler sonore. [A]	8
2.7	Représentation géométrique du radar bistatique. [A] Où T_X représente l'émetteur et R_X le récepteur	8
2.8	Abaque représentant la projection de la vitesse en fonction du delta des fréquences et de l'angle bistatique. [A]	9
2.9	Représentation graphique de la composante réelle et imaginaire. [A]	10
2.10	Coupe verticale d'une ligne coaxiale. [A]	11
2.11	Alexander Graham Bell [C]	11
2.12	The Meteor Crater, impact de météorite situé en Arizona. [D]	13
2.13	Représentation des différentes couches de l'atmosphère [C]	14
2.14	Météore observé depuis Prêles lors d'un maximum des Perséides. L'observateur attentif remarquera la présence de la Voie Lactée et aussi celle de la galaxie d'Andromède. [A]	15
2.15	Fonctionnement général de l'expérience. L'onde est réfléchiée par la traînée occasionnée durant l'ablation. [A]	16
2.16	La terre (disque bleu) dévie l'astéroïde (gris), car ce dernier est entré dans la sphère d'influence de la terre. [A]	17
2.17	Représentation de la sphère d'influence d'un corps (par exemple la terre). [A]	17
2.18	Différentes phases d'atterrissage d'une météorite. [A]	18
3.1	Vue satellite de l'emplacement de l'émetteur GRAVES (ce dernier est flouté). [A]	20
3.2	Vue satellite de l'emplacement du récepteur. [A]	20
3.3	La ligne de base en vert entre le point 1 et le point 2. [A]	21

3.4	Représentation schématique de la terre où a est le demi grand axe et b le demi petit axe. [A]	21
3.5	L'ouverture d'une antenne de type Yagi en bleu, zone d'émission de l'émetteur de radar GRAVES en violet. La zone commune est très réduite. [A]	22
3.6	Schéma de l'antenne mise en place pour effectuer les observations. [A]	23
3.7	Antenne démontée. Des tiges en aluminium viennent se glisser dans les filetages présents. [A]	23
3.8	Antenne montée sur le toit de la halle de gymnastique. [A]	23
3.9	Antenne solidement maintenue au sol grâce au support de parasol. [A]	23
3.10	L'antenne est mise à la terre par raccord au paratonnerre du bâtiment pour éviter tout accident. [A]	24
3.11	Schéma de montage comprenant le filtre. [A]	25
3.12	Au centre, le second filtre à cavité, à droite le premier filtre et à gauche l'alimentation. [A]	25
3.13	Analyse spectrale de la première cavité (filtre noir sur la Fig. 3.12). [A]	26
3.14	Analyse spectrale de la seconde cavité (filtre gris sur la Fig. 3.12). [A]	26
3.15	Exemple de schéma de montage de filtre. Toutes les fréquences sont court-circuitées sauf la fréquence de résonnance. [A]	26
3.16	Schéma de montage comprenant le préamplificateur. [A]	27
3.17	Préamplificateur utilisé dans le cadre de ce travail. [A]	27
3.18	Récepteur Dongle Funcube Pro+	27
3.19	Les flèches jaunes représentent le décalage Doppler, et la flèche orange le défilement du temps. [A]	28
4.1	Signaux sans filtre et sans préamplificateur. [A]	29
4.2	Signaux obtenus avec la seconde cavité et le préamplificateur enclenché. [A]	30
5.1	Signaux obtenu par réflexion contre des avions. [A]	31
5.2	Illustration prise à 23h30. [A]	32
5.3	Illustration prise à 12h00, le nombre d'avions détectés est plus élevé. [A]	32
5.4	Détection de l'ISS le 1 juin 2019 à 22h34 [A]	32
5.5	Image de ISS prise le 1 juin 2019 à 22h34. [A]	33
5.6	Détection de météore [A]	34
5.7	Nombre de météores détecté durant les Perséides avec cette instrumentation. Le nombre de météores augmente lors du pic d'activité (11-15 août). [A]	34
5.8	Répartition des détections de météores sur 24 heures (en rouge le 22 juillet et en vert le 14 août). [A]	34
5.9	Signal mystérieux qui semble provenir d'un ballon sonde, déplacé par un courant-jet. [A]	35
5.10	Mesure prise à 12h00, le bruit de fond est plus important à cause du soleil. [A]	35
5.11	Mesure prise à 1h36, il n'y a pas ou très peu de bruit. [A]	35
5.12	Parasites de fond engendré par les contacts électriques de la lampe du laboratoire. La lampe a successivement été allumée puis éteinte à la manière d'un stroboscope. [A]	36
5.13	Parasites obtenus lorsqu'un téléphone portable est placé à côté de l'antenne. [A]	37

5.14	Horaire du train passant à quelques mètres de l'antenne, causant hypothé- tiquement des parasites. [E]	37
5.15	Parasites détecté à 5h47 potentiellement engendré par le train reliant Bienne et Sonceboz-Sombeval. [A]	37
5.16	Autres parasites dont la source n'a pas pus être identifié. [A]	38

Chapitre 11

Annexes

1 Diagramme de rayonnement et caractéristiques

Cette antenne $3/4 - \lambda$ présente l'avantage d'avoir une réception qui se fait dans toutes les directions sauf à la verticale. De plus, le diagramme est plus « concentré » contre le haut.

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	6.0	-1
2	0.0	0.0	0.0	0.46	0.0	0.0	4.0	-1
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.46	0.0	4.0	-1
4	0.0	0.0	0.0	-0.46	0.0	0.0	4.0	-1
5	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.46	0.0	4.0	-1
6	0.0	0.0	0.05	0.6	0.0	1.46	4.0	-1
7	0.0	0.0	0.05	0.0	0.6	1.46	4.0	-1
8	0.0	0.0	0.05	-0.6	0.0	1.46	4.0	-1
9	0.0	0.0	0.05	0.0	-0.6	1.46	4.0	-1

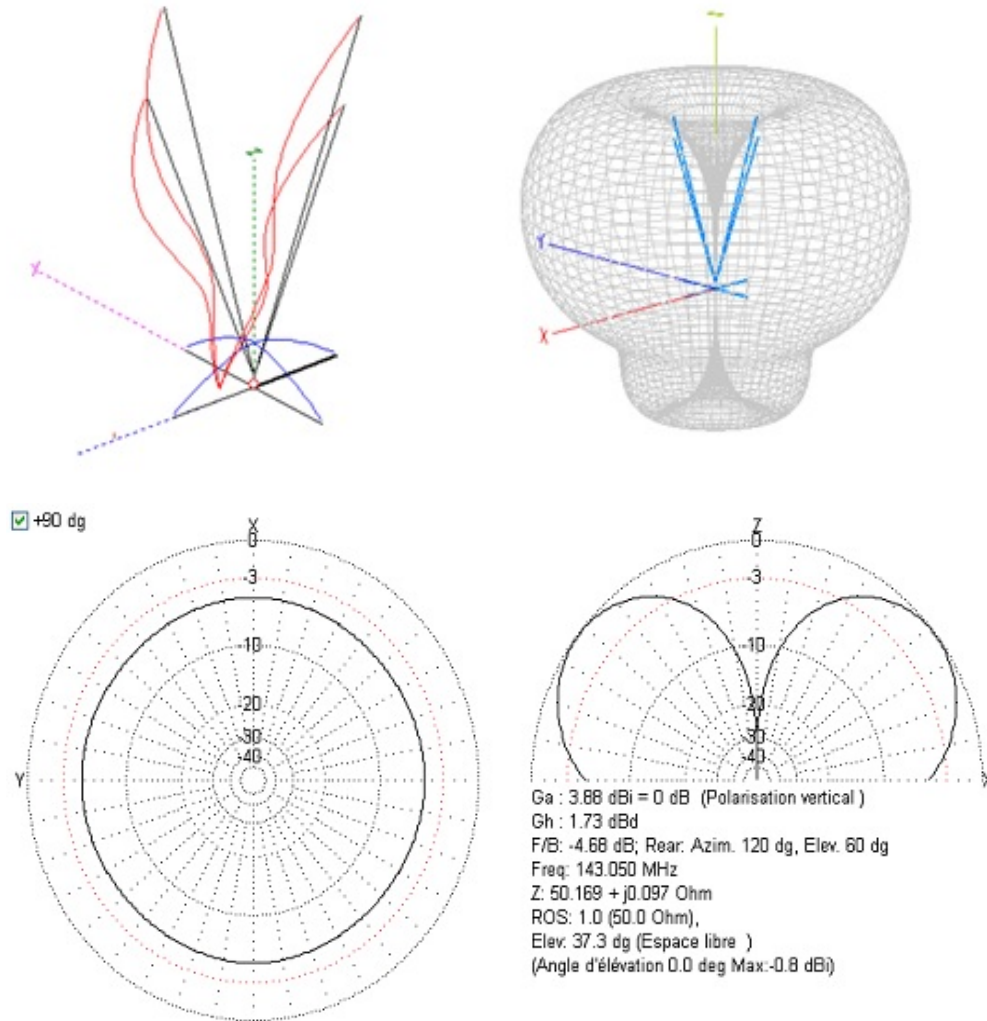
Fréq MHz

Terre
☒ Espace libre
☐ Parfait
☐ Réel

Elargir (haut) m
Matériel

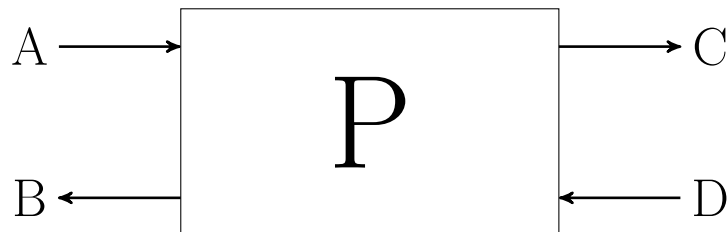
LONGUEUR D'ONDE = 2.096 (m)
TOTAL (POULS) = 331
REEMPLIR MATRICE
MATRICE DEFACTEURS
POULS U (V) I (mA) Z (Ohm) ROS
w1b 1.00+j0.00 19.93-j0.04 50.17+j0.10 1.00
DONNEES ACTUELLES...
CHAMP LOINTAIN
PAS D'ERREURS BLOQUANTS
0.69 sec

No.	F (MHz)	R (Ohm)	jX (Ohm)	ROS 50	Gh dBd	Ga dBi	F/B dB	Elev.	Masse	Add H.	Polar.
10	143.05	50.17	0.0972	1.0	1.73	3.88	-4.68	37.3	Libre	---	vert.



2 Mesures en chambre anéchoïque

Principe de mesure



Pour mesurer le diagramme de rayonnement ainsi que le gain d'une antenne, il faut se rendre dans une chambre anéchoïque électromagnétique; exempte de toutes ondes parasites venant de l'extérieur. L'antenne $\frac{3}{4} - \lambda$ est placée dans la chambre du laboratoire de CEM de METAS. Des ondes sont transmises à l'antenne que l'on mesure à l'aide d'une antenne biconique¹. Les deux antennes sont comparable à une boîte P dans laquelle un signal entre puis ressort. Le signal entrant (A-B) est comparé avec le signal sortant (C-D) au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel². La mesure est refaite sur tous les côtés de

1. Biconical antenna schwarzbeck BBA 9106

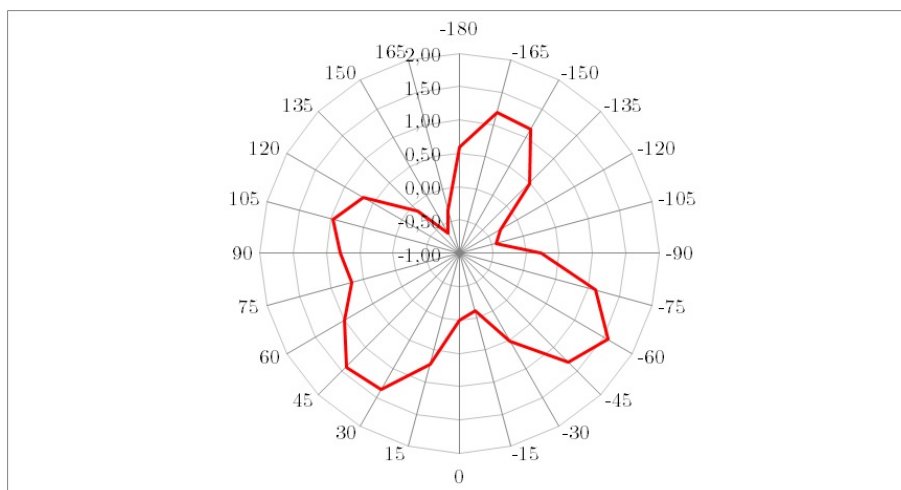
2. Rohde & Schwarz Vector Network Analyzer · 10MHz...20MHz · ZVM

l'antenne $\frac{3}{4} - \lambda$.

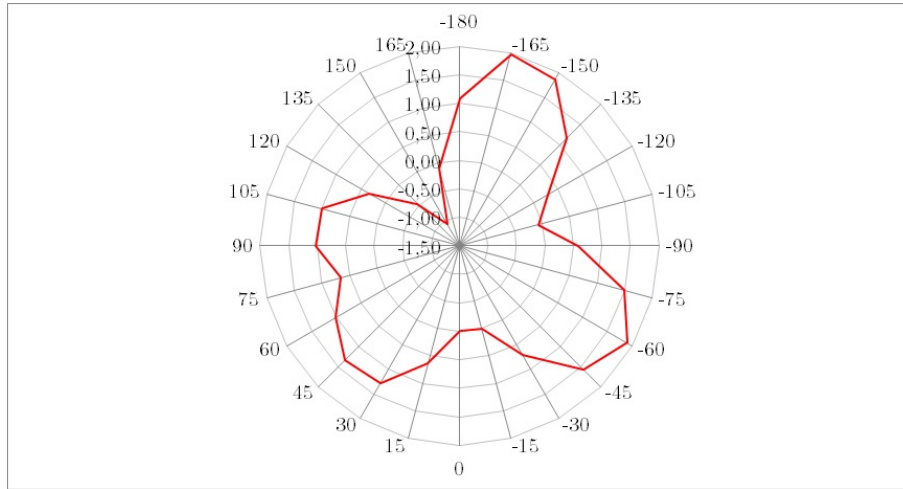


Diagramme de rayonnement

Sans préamplificateur :



Avec préamplificateur :



Gain G

Fréquence [Hz]	Gain sans PA [dBi]	Gain avec PA [dBi]
1,00E+08	-1,07	-40,16
1,05E+08	-1,21	-39,22
1,10E+08	-0,94	-39,88
1,15E+08	-0,84	-39,21
1,20E+08	-1,07	-36,84
1,25E+08	-1,75	-32,27
1,30E+08	-2,45	-24,71
1,35E+08	-3,01	-12,28
1,40E+08	-3,44	9,08
1,43E+08	-4,10	16,77
1,45E+08	-4,14	14,16
1,50E+08	-5,10	0,54
1,55E+08	-7,33	-10,19
1,60E+08	-10,54	-18,16
1,65E+08	-9,56	-27,28
1,70E+08	-7,06	-31,50
1,75E+08	-5,71	-33,91
1,80E+08	-4,60	-35,12
1,85E+08	-3,39	-35,51
1,90E+08	-2,79	-35,41
1,95E+08	-2,38	-34,76
2,00E+08	-2,14	-33,71

3 Equation

L'effet Doppler électromagnétique se caractérise par la formule suivante :

$$f_{rec} = \frac{c - v_{rec}}{c - v_{em}} \cdot f_{em}$$

Dans le cas d'un récepteur en mouvement et d'un émetteur fixe :

$$f_{rec} = \frac{c - v_{rec}}{c} \cdot f_{em} \Leftrightarrow f_{rec} = \left(1 - \frac{v_{rec}}{c}\right) f_{em}$$

Dans le cas d'un émetteur en mouvement et d'un récepteur fixe :

$$f_{rec} = \frac{c}{c - v_{em}} \cdot f_{em} \Leftrightarrow f_{rec} = \frac{1}{1 - v_{em}/c} f_{em}$$

Pour simplifier l'expression $\frac{v}{c} = \kappa$.

La fréquence reçue par l'objet est :

$$f_{Meteore} = (1 - \kappa \cos(\theta_{EM})) f_{TX}$$

La fréquence reçue par le récepteur est :

$$f_{RX} = \frac{1 - \kappa \cos(\theta_{EM})}{1 - \kappa \cos(\theta_{MR})} \cdot f_{TX}$$

$$\theta_{MR} = \delta - \beta/2$$

$$\theta_{EM} = \pi - \delta - \beta/2$$

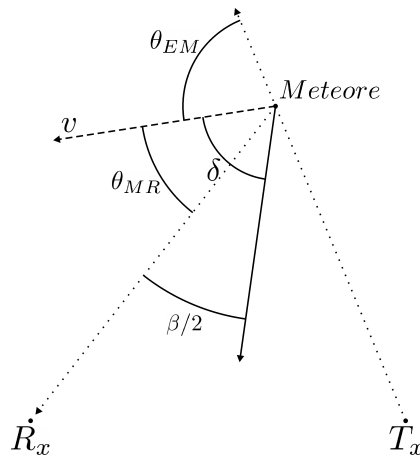
$$f_{RX} = f_{TX} \frac{1 + \kappa \cos(\delta + \beta/2)}{1 - \kappa \cos(\delta - \beta/2)}$$

Le numérateur et le dénominateur sont multipliés par $1 + \kappa \cos(\delta - \beta/2)$, les termes en κ^2 sont négligés :

$$f_{RX} = f_{TX} (1 + \kappa \cos(\delta + \beta/2) + \kappa \cos(\delta - \beta/2))$$

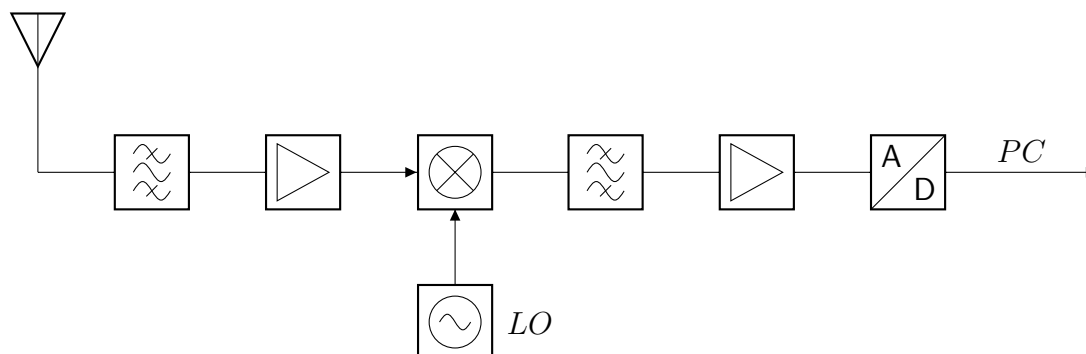
$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) \mp \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$f_{RX} - f_{TX} = 2 \cdot f_{TX} \cdot \kappa \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\beta/2) = \frac{2f_{TX}}{c} \cdot \cos(\beta/2) \cdot \cos(\delta) \cdot v$$

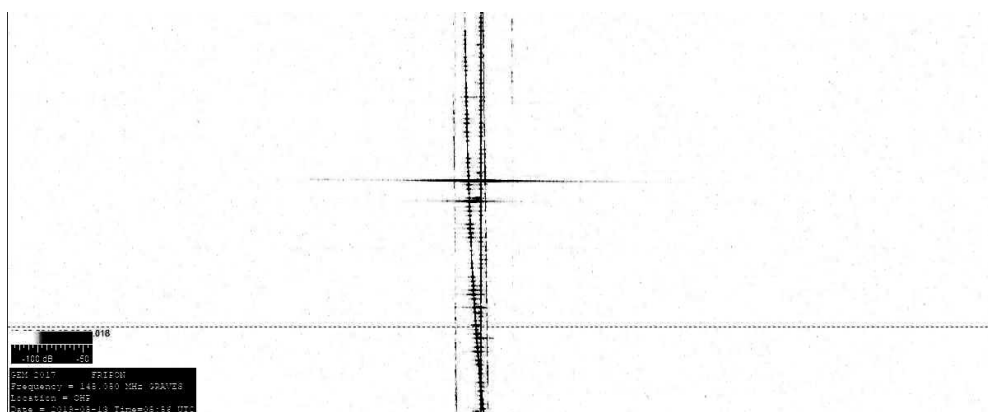
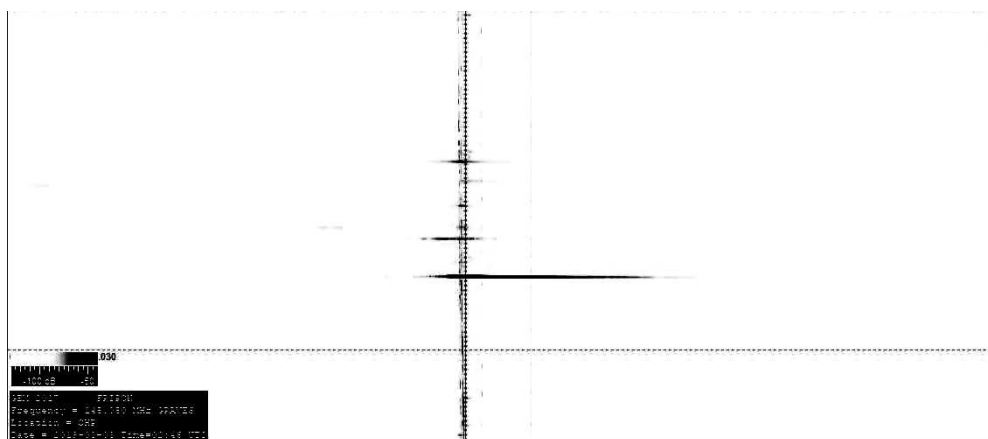


4 SDR

Fonctionnement du récepteur USB, en faisant varier la fréquence de l'oscillateur local (*LO*) au moyen d'un fichier fourni avec le Dongle, la fréquence de réception change.



5 Météores



Cédric Willemin
Chemin des Alouettes 6
CH-2515 Prêles

`cedric@willemin.li`
`www.willemin.li/cedric`