

Mémoire

Auteur : Gerlache, Arthur

Promoteur(s) : 5554; Jehin, Emmanuel

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences spatiales, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23873>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences
Département d'astrophysique, géophysique et océanographie

**Étude des échos de tête associés aux bolides au moyen des observations FRIPON et
BRAMS**

Thèse de Master

Sous la direction de :

<i>Promoteur :</i> Dr. Hervé LAMY	<i>Co-Promoteur :</i> Dr. Emmanuel JEHIN
--------------------------------------	---

Évalué par :

Hervé Lamy, Jehin Emmanuel, Benoît Hubert, François Colas (IMCCE, Visio), Federico Bariselli (VKI)

Mémoire présenté par Arthur Gerlache
En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences Spatiales à finalité approfondie

Soumission et défense lors de l'année académique 2024 - 2025

En collaboration avec l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique



Faculté des Sciences
Département d'astrophysique, géophysique et océanographie

**Étude des échos de tête associés aux bolides au moyen des observations FRIPON et
BRAMS**

Thèse de Master

Sous la direction de :

<i>Promoteur :</i> Dr. Hervé LAMY	<i>Co-Promoteur :</i> Dr. Emmanuel JEHIN
--------------------------------------	---

Évalué par :

Hervé Lamy, Jehin Emmanuel, Benoît Hubert, François Colas (IMCCE, Visio), Federico Bariselli (VKI)

Mémoire présenté par Arthur Gerlache
En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences Spatiales à finalité approfondie

Soumission et défense lors de l'année académique 2024 - 2025

En collaboration avec l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique

Remerciements :

Je remercie le docteur Marc Van Droogenbroeck pour m'avoir donné accès aux documents de son cours sur la conception et l'analyse de systèmes de communications pour étudier en détail les signaux modulés en quadrature de phase.

Je remercie également le docteur François Colas, le chercheur principal responsable du projet FRIPON pour m'avoir donné accès à la base de données du réseau de détecteur.

J'ai également une attention particulière pour le personnel de l'IASB et plus précisément l'équipe en charge du développement de la librairie PyBRAMS (Joachim Balis et Antoine Calegaro) pour m'avoir assisté pour comprendre le fonctionnement de celle-ci.

Sans oublier mes deux promoteurs sans lesquels cette thèse n'aurait pas été possible.

Enfin, je souhaite remercier Alain Lardinois pour avoir relu plusieurs fois ce document pour réaliser les corrections orthographiques nécessaires.

Table des matières

1	Introduction	7
2	Description et fonctionnement des réseaux utilisés	11
2.1	Réseau BRAMS	11
2.1.1	Principe de fonctionnement	11
2.1.2	Émetteur	12
2.1.3	Stations de réception	13
2.1.4	Données BRAMS	14
2.1.5	PyBRAMS	17
2.2	FRIPOON	19
3	Données	21
3.1	Évènement du 28 novembre 2024 16 : 30UTC	22
3.2	Évènement du 2 septembre 2024 01 : 01UTC	23
3.3	Évènement du 27 août 2019 02 : 53UTC	24
4	Méthode	27
4.1	Détermination de la vitesse à partir de la pente des head echos.	27
4.2	Explication de la présence de head echos dans les données BRAMS par la géométrie.	44
5	Résultats	47
5.1	Détermination de la vitesse à partir de la pente des head echos.	47
5.1.1	Évènement du 28 novembre 2024 16 :30UTC	47
5.1.2	Évènement du 2 septembre 2024 01 :01UTC	52
5.1.3	Évènement du 27 août 2019 02 :53UTC	57
5.2	Note concernant les erreurs sur les résultats de vitesse	61
5.3	Etude de l'effet de géométrie	62
6	Conclusion	69
7	Perspectives	71

Table des figures

1.1	Illustration des phénomènes de trail et head echo	9
2.1	Logo du réseau BRAMS[1]	11
2.2	Antenne d'émission de Dourbes	12
2.3	Exemple de station de réception	13
2.4	Graphique de fonctionnement des stations de réceptions	14
2.5	Carte des stations BRAMS existantes	15
2.6	Déférence entre un fichier brut et un spectrogramme.	16
2.7	Exemple de spectrogramme BRAMS	17
2.8	Logo du réseau FRIPON	19
2.9	Répartition des stations FRIPON	19
2.10	Exemple d'observation avec une caméra FRIPON	20
2.11	Exemple de trajectoire de fireball donné par FRIPON	20
3.1	Exemple de spectrogrammes pour le premier évènement	22
3.2	Premier évènement observé par une caméra FRIPON	22
3.3	Trajectoire et profil d'altitude du premier évènement	23
3.4	Exemple de spectrogrammes pour le deuxième évènement	23
3.5	Deuxième évènement observé par une caméra FRIPON	24
3.6	Trajectoire et profil d'altitude du deuxième évènement	24
3.7	Exemple de spectrogrammes pour le troisième évènement	25
3.8	Troisième évènement observé par une caméra FRIPON	25
3.9	Trajectoire et profil d'altitude du troisième évènement	26
4.1	Identification du début du signal associé à l'évènement météoritique	27
4.2	Exemple de Doppler shift affecté par le signal de calibration	28
4.3	Spectrogramme zoomé de la station de Manhay pour le premier évènement.	28
4.4	Test de <code>compute_doppler_shift</code> avec un signal monochromatique	29
4.5	Test de <code>compute_doppler_shift</code> avec un balayage de fréquence et présence d'un signal monochromatique	29
4.6	Comparaison de signaux avec et sans nettoyages d'avions	31
4.7	Comparaison des méthodes de nettoyage pour le calibrateur	32
4.8	Résultats de <code>compute_doppler_shift</code> après nettoyage	33
4.9	Illustration de la correction entre faible amplitude de signal et points outliers.	34
4.10	Illustration du filtrage des outliers	34
4.11	Illustration de l'action du filtre passe-bande Blackman sur le cas de Manhay.	35
4.12	Illustration des artefacts causant des erreurs avec la première méthode	35
4.13	Histogramme de la distribution du nombre de points de données Doppler de chaque station pour l'évènement du 2 septembre 2024.	36
4.14	Histogramme de l'intensité des pixels dans le spectrogramme de l'évènement du 28 novembre 2024 avec la station de Manhay.	37
4.15	Isolation du trail echo en temps et fréquence	37
4.16	Isolation du head echo sans nettoyage de bruit	38
4.17	Intervalles et points du head echo après nettoyage par érosion.	39
4.18	Superposition du spectrogramme, du bon intervalle et des résultats de <code>compute_doppler_shift</code>	39
4.19	Comparaison des méthodes sur un cas avec effet Doppler négatif.	40
4.20	Données altitude-vitesse disponibles sur https://fireball.fripo.org/	40
4.21	Graphiques montrant les effets Doppler attendus en fonction de la vitesse du météore.	41

4.22 Visualisation de la fonction de détermination de vitesse.	42
4.23 Résultat de l'estimation de vitesse sur le cas de la station de Manhay	43
4.24 Illustration de la propriété géométrique d'un point de réflexion spéculaire	45
4.25 Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire après conversion de coordonnées par pymap3d	46
5.1 Résultat vitesse du météore pour la station BEMANH - évènement 1	47
5.2 Résultat vitesse du météore pour la station BEOVER - évènement 1	49
5.3 Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Genk pour le premier évènement.	50
5.4 Résultat vitesse du météore pour la station BEFRAM - évènement 2	52
5.5 Résultat vitesse du météore pour la station BEHUMA - évènement 2	53
5.6 Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Humain n°2 pour le deuxième évènement.	54
5.7 Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Gavere pour le deuxième évènement.	55
5.8 Résultat vitesse du météore pour la station BEMONS - évènement 3	57
5.9 Résultat vitesse du météore pour la station BEHUMA - évènement 2	58
5.10 Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Grimbergen pour le troisième évènement.	59
5.11 Simulation d'erreurs sur la pente et répercussions sur la détermination de vitesse	61
5.12 Graphique en projection polaire de l'évènement 1	62
5.13 Graphique en projection polaire de l'évènement 2	63
5.14 Graphique en projection polaire de l'évènement 2 en utilisant la nouvelle méthode	64
5.15 Graphique en projection polaire de l'évènement 3	65
5.16 Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire après conversion de coordonnées par pymap3d	66
5.17 Altitude des points de réflexion spéculaire pour l'évènement 2	66
5.18 Altitude des points de réflexion spéculaire pour l'évènement 3	67

Liste des tableaux

2.1	Fréquence d'échantillonnage des deux types de stations.	14
2.2	Définitions des résolutions d'un spectrogramme.	16
3.1	Résumé des informations sur les évènements étudiés.	21
5.1	Table des résultats pour le premier évènement	51
5.2	Table des résultats pour le deuxième évènement	56
5.3	Table des résultats pour le troisième évènement	60

Chapitre 1

Introduction

Les étoiles filantes sont des phénomènes lumineux nécessitant de la patience et de la chance afin d'être observés. Ces dernières ont été historiquement considérées comme des phénomènes atmosphériques jusqu'au 19^{ème} siècle. Ce n'est que par après que ces phénomènes furent reliés aux météorites et comètes puis considérés comme des phénomènes astronomiques aussi connus sous le nom de météores.

Dans un premier temps, établissons certaines bases :

- Selon la définition de l'IAU [6], un *météoroïde* est un objet solide d'une taille entre 30µm et 1m se déplaçant en orbite autour du soleil.
- Un *météore* est le phénomène lumineux résultant de l'entrée d'un météoroïde dans l'atmosphère. Il s'agit du phénomène plus couramment connu comme "étoile filante".
- Une *météorite* est un objet d'origine extraterrestre ayant survécu à l'entrée dans l'atmosphère.
- Un *fireball* est un météore possédant une magnitude élevée (magnitude visuelle inférieure à -4). Ceux-ci sont en général associés à des objets plus gros. La traduction française fréquemment utilisée est *bolide*.

Malgré le fait que les météores tombent en permanence sur Terre (ce que l'on appelle la composante sporadique), il est connu que les météores sont plus fréquents à certaines périodes de l'année. Ceci peut s'expliquer grâce aux comètes. Ces objets astrophysiques possèdent une queue provoquée par la sublimation de la glace présente dans ces objets sous l'action des rayons du soleil. Dès lors, des débris de cette sublimation s'accumulent dans l'orbite de ces comètes. Si la Terre passe à proximité de ces orbites de comètes, les débris contenus dans celles-ci peuvent rentrer dans l'atmosphère. Ceci est à l'origine des pluies de météores.

Typiquement, les météores possèdent une altitude comprise entre 85 et 110km. Cependant, certains fireballs peuvent descendre encore plus dans l'atmosphère.

L'une des propriétés des météores qui nous intéressera le plus dans ce travail est que les météores entrent dans l'atmosphère à des vitesses de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde. Cette vitesse est telle qu'un phénomène d'ionisation a lieu autour du météore à cause de la friction aérodynamique. Le plasma résultant de cette ionisation possède la capacité de réfléchir les ondes radio. Cette propriété a déjà été utilisée, entre autres, à des fins de télécommunication.

Afin d'observer ces météores, il existe plusieurs réseaux de détection utilisant des principes différents.

La méthode la plus évidente pour observer météores et fireballs est d'utiliser des caméras capables de repérer ces objets lumineux. C'est le cas de nombreux réseaux comme FRIPON, CAMS et GMN.

Le cas de FRIPON nous intéressera grandement dans ce travail. En effet, ce réseau (spécialement conçu pour la détection de fireballs) donne des informations précises sur la trajectoire, la vitesse et les

orbites des fireballs détectés de manière automatisée.

Pour être plus précis, nous utiliserons les données du réseau FRIPON comme référence. En effet, nous utiliserons les données de trajectoires et nous comparerons nos résultats avec les informations de vitesse données par ce réseau.

Cependant, l'inconvénient principal de ce réseau est qu'il ne peut fonctionner que la nuit et en l'absence de nuages.

Une alternative sont les réseaux utilisant la détection radio. Le principe général est d'émettre une onde radio vers le ciel pour couvrir une superficie d'atmosphère la plus large possible. Quand un météoroïde / fireball pénètre dans l'atmosphère, il crée de l'ionisation. Une trainée de plasma résulte de cette dernière, les ondes émises vont être réfléchies par ce plasma. Ensuite, une ou plusieurs antennes de réception vont recevoir le signal réfléchi vers le sol appelé écho de météore.

Il existe différentes méthodes d'implémentation de ce principe. Nous pouvons citer les réseaux BRAMS et CMOR (*Canadian Meteor Orbit Radar*) comme exemples. Le premier émet une onde continue (cw) tandis que l'autre émet des pulses. Le premier est un système de diffusion vers l'avant (forward scatter) avec de nombreuses stations de réception non-colocalisées avec l'émetteur, tandis que le deuxième est un système de rétro-diffusion (back scatter) avec quelques stations de réception à proximité de l'émetteur.

Cette méthode bénéficie d'un avantage considérable : les observations peuvent avoir lieu quelle que soit la couverture nuageuse et à tout moment de la journée.

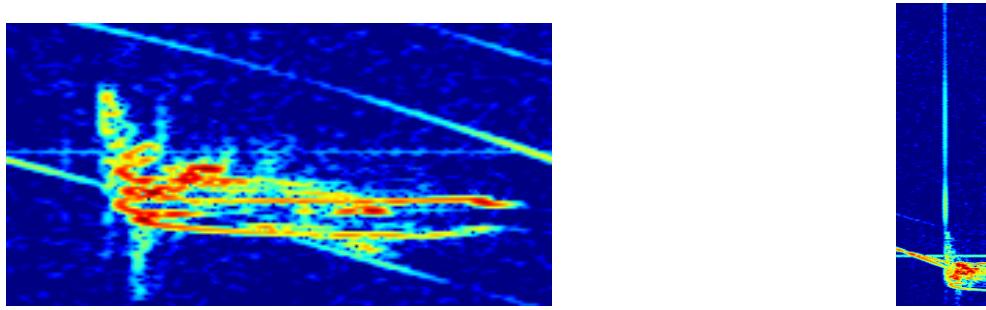
L'un des objectifs de ces systèmes de détection est d'établir la trajectoire de ces fireballs et potentiellement les relier à un corps parent. Sans oublier la possibilité de récupération de météorites, qui sont des objets riches en informations et dont l'étude est profitable pour de nombreuses disciplines comme l'astrochimie, l'astrobiologie et l'étude de la formation du système solaire.

Comme expliqué précédemment pour les détections par ondes radio, le bolide génère du plasma lors de son entrée. Nous pouvons discriminer les échos générés en deux cas :

- Il existe une trainée de plasma subsistant un certain temps après le passage du météoroïde. Celle-ci se dilue ensuite dans l'atmosphère. C'est ce que l'on appelle le *trail echo*.
- Dans certains cas, il peut exister du plasma créé à l'avant du météoroïde. Ce dernier est déplacé avec l'objet durant son entrée. Ainsi, l'écho de l'onde radio sur ce plasma est affecté d'un effet Doppler important (dû à la composante radiale de la vitesse du météoroïde). C'est ce que l'on appelle un *écho de tête* (*head echo*).

BRAMS détecte et étudie majoritairement les trail echos liés à des petites poussières qui donnent des trainées suivant strictement la loi de réflexion spéculaire (Balis et al., 2025). Ces derniers possèdent une durée de vie courte (une fraction de seconde). Par contre, dans le cas des bolides, l'ionisation est plus importante, ce qui provoque une durée de vie plus longue (jusqu'à plusieurs dizaines de secondes). C'est également dans le cas des bolides que le phénomène de head echo est plus fréquent, à cause de cette ionisation et de la surface de zone ionisée à l'avant qui sont toutes les deux plus élevée.

Voici une illustration de ces deux phénomènes (figure 1.1) :



(a) Trace correspondant à un trail echo.

(b) Trace correspondant à un head echo.

FIGURE 1.1 – Illustration des phénomènes de trail et head echo

Dans ce travail, nous nous intéresserons à ce dernier cas.

Une analyse plus poussée de ces head echo pourrait permettre de caractériser le vecteur vitesse du bolide au moment de la réflexion radio causant le head echo.

Dans ce travail, nous étudierons trois événements détectés simultanément par FRIPON et BRAMS et tenterons de déduire la vitesse des bolides à l'aide des données BRAMS.

Ainsi, les deux questions auxquelles nous tenterons de répondre sont les suivantes :

- Est-il possible de mesurer la vitesse d'un bolide à partir d'un head echo observé par BRAMS ?
- Peut-on expliquer par la géométrie du problème que certaines stations BRAMS sont capables d'observer un head echo tandis que d'autres ne le peuvent pas ?

Ce document sera structuré de la manière suivante :

Le chapitre 2 donnera un descriptif des deux réseaux utilisés dans ce travail. Ensuite, le chapitre 3 présentera les données utilisées. Dans le chapitre 4, la méthodologie développée sera discutée en détails et les résultats associés seront présentés dans le chapitre 5. Enfin, les chapitres 6 et 7 conclueront ce travail et donneront des perspectives pour la suite.

Chapitre 2

Description et fonctionnement des réseaux utilisés

Plusieurs réseaux m'ont été mis à disposition dans ce travail. Notamment les données des différentes stations BRAMS, les algorithmes python liés à ce système ainsi que les données du réseau FRIPON. Une description de ces systèmes va être réalisée dans cette section.

2.1 Réseau BRAMS



FIGURE 2.1 – Logo du réseau BRAMS[1]

BRAMS (Belgian RAdio Meteor Stations, 2.1) est un réseau développé par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (IASB) depuis 2010. Ce réseau est multistatique, ce qui veut dire que les antennes d'émission et de réception ne sont pas colocalisées. Ce réseau possède 51 stations de réception en Belgique, France, Luxembourg et aux Pays-Bas (voir carte dans la figure 2.5). Les objectifs principaux de ce réseau sont de surveiller l'activité liée aux météores, reconstruire leurs trajectoires et déterminer les paramètres physiques des météoroïdes associés.

2.1.1 Principe de fonctionnement

Lors de l'entrée dans l'atmosphère des météores, la friction vaporise la surface du météore. Les collisions entre atomes génèrent de l'ionisation se manifestant sous la forme d'une trainée de plasma. Suivant la densité d'électrons générée dans le plasma, deux cas de figure sont possibles :

- Si la densité d'électrons est inférieure à $\sim 2.4 \cdot 10^{14}/m$ (nombre d'électrons générés par mètre parcouru par le météore), le météore est dit "*underdense*". C'est-à-dire que les ondes radio ne sont réfléchies que pour un très court instant et de manière moindre que dans le cas précédent. Ce court écho (de quelques dixièmes de secondes) a lieu au moment où la réflexion est spéculaire.
- Une densité supérieure à $\sim 2.4 \cdot 10^{14}/m$ correspondra à un météore "*overdense*", le plasma est alors imperméable aux ondes radio dans la bande VHF (de 30 à 300MHz). Par conséquent, l'entièreté de la trainée réfléchira les ondes incidentes. Ainsi, le signal reçu durera plusieurs secondes durant la rentrée dans l'atmosphère du météore.

Ainsi, si nous disposons d'une source d'ondes radio assez puissantes dont la fréquence se situe dans la gamme VHF, ces ondes seront réfléchies par ces trainées. Dans un deuxième temps, si nous disposons d'antennes de réception, nous pouvons alors tenter de détecter ces réflexions radio. Tel est le principe des systèmes de détection étudiés ici.

2.1.2 Émetteur

L'émetteur du réseau BRAMS est une antenne dipolaire munie d'un réflecteur situé au site du Centre Géophysique du globe dans la commune de Dourbes. Cet émetteur génère une onde monochromatique à amplitude constante (signal d'onde continue "cw") avec une fréquence de 49.9705MHz (fréquence allouée) et une puissance de 120W (340 maintenant).



(a) Zoom sur le doublet de dipôles.

FIGURE 2.2 – Antenne d'émission située à Dourbes[1]

L'onde émise possède une polarisation circulaire droite (RHCP) générée par un doublet de dipôles croisés et l'antenne est conçue pour avoir une directivité verticale grâce au plan réflecteur situé sous les dipôles (voir figure 2.2). Le déphasage de ces derniers, nécessaire pour générer la polarisation, est réalisé par un système de câbles de longueurs ajustées pour obtenir l'effet désiré (avec une différence de longueur de l'ordre de $\lambda/4$).

Le design de l'émetteur et le choix de l'onde générée impliquent plusieurs facteurs sur le fonctionnement du réseau :

- L'isotropie de l'onde générée implique une irradiation de tous les météores passant dans le secteur, peu importe leur orientation par rapport à l'antenne.
- Le fait que l'onde soit continue empêche d'utiliser les méthodes de localisation à la base des systèmes radar (par ondes pulsées). Cependant, un système basé sur des ondes pulsées aurait l'inconvénient de ne pas détecter les événements ayant lieu durant les intervalles sans émission au vu de la courte durée de ceux-ci. L'aspect multistatique du système remédie à ce manque d'information positionnelle.

2.1.3 Stations de réception

Le design des stations de réception a évolué dans le temps. Cependant, le fonctionnement général est resté le même. Tout d'abord, l'élément principal de chaque station est une antenne Yagi (voir figure 2.3). Celle-ci est reliée au récepteur proprement dit.

Le but des récepteurs est de rabaisser la fréquence reçue dans le spectre audio (vers 1kHz).

Il est nécessaire de rabaisser le contenu fréquentiel des signaux radio dans la gamme audible afin d'être conforme au théorème de Shanon-Nyquist. Ce dernier implique que le seul moyen d'échantillonner un signal correctement est d'avoir une fréquence d'échantillonnage au minimum supérieure à deux fois la fréquence maximum du signal.

Les anciens récepteurs sont de type analogique (ICOM-R75). Leur sortie est envoyée dans un convertisseur analogique-digital. Celui-ci est une carte son d'ordinateur qui permet l'échantillonnage et l'enregistrement en fichiers .wav (voir figure 2.4a) Un exemple de données .wav est donné à la figure 2.6a.

Cependant, la première version de ce système ne permettait pas de recevoir de référence externe de fréquences. Par conséquent il est possible d'avoir des variations du contenu fréquentiel de l'ordre de 0.6% à cause de l'aspect analogique du récepteur (sensible aux changements de température).

Cet ancien système est en train d'être remplacé par un récepteur totalement numérique (RSP2) accompagné d'un ordinateur à carte unique (Raspberry Pi ou similaire). Ces stations 2.0 sont capables de recevoir une référence fréquentielle externe à partir d'un signal GPS (GPS disciplined oscillator). Ceci permet d'avoir une précision de l'ordre de 0.001Hz 2.4b.



FIGURE 2.3 – Exemple de Station de réception [1]

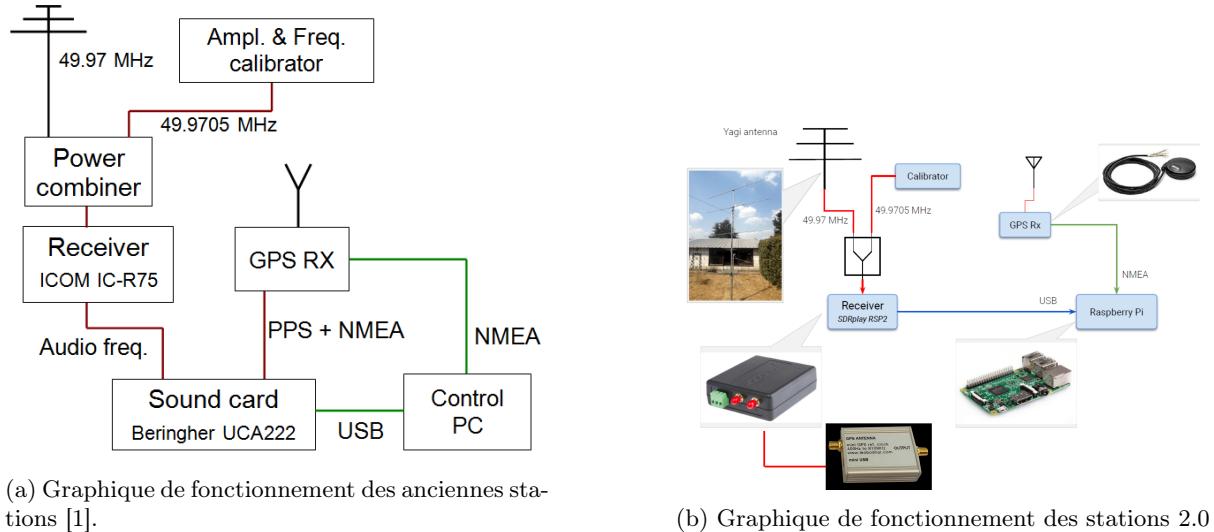


FIGURE 2.4 – Graphique de fonctionnement des stations de réceptions (Balis, 2025)

L'ensemble des récepteurs est synchronisé temporellement via un récepteur GPS donnant le temps universel et une référence de fréquence.

Il existe également une station de réception de type interférométrique.

2.1.4 Données BRAMS

Les signaux reçus par les stations de réception sont enregistrés en format .wav par intervalles de 5 minutes.

Ces fichiers sont stockés sur les serveurs de l'IASB. Il existe actuellement plus de 10 années de données disponibles.

En plus des enregistrements de signaux reçus, il existe des "métadonnées" accompagnant ces enregistrements tels que la fréquence d'échantillonnage, les coordonnées géographiques de la station de réception, le code d'identification de celle-ci.

Par ailleurs, voici les fréquences d'échantillonnage pour les deux types de stations évoquées précédemment :

Type de station	Fréquence d'échantillonnage
Ancienne	5512 éch/S
2.0	6048 éch/s

TABLE 2.1 – Fréquence d'échantillonnage des deux types de stations.

Il s'avère judicieux d'introduire ici la différence entre les fichiers bruts (.wav) et leurs spectrogrammes (dont il sera question durant la majeure partie de ce travail) :

Les fichiers bruts stockent le signal en temps qu'oscillation (soit l'évolution de l'amplitude en fonction du temps).

Cependant, il existe une transformation mathématique capable de représenter le même signal en termes de présence de fréquences au cours du temps. Il s'agit de la transformée de Fourier et des spectrogrammes.

Une transformée de Fourier est une opération capable de décomposer un signal depuis son espace direct (dans notre cas, le domaine temporel) dans une représentation en termes de domaine fréquentiel.

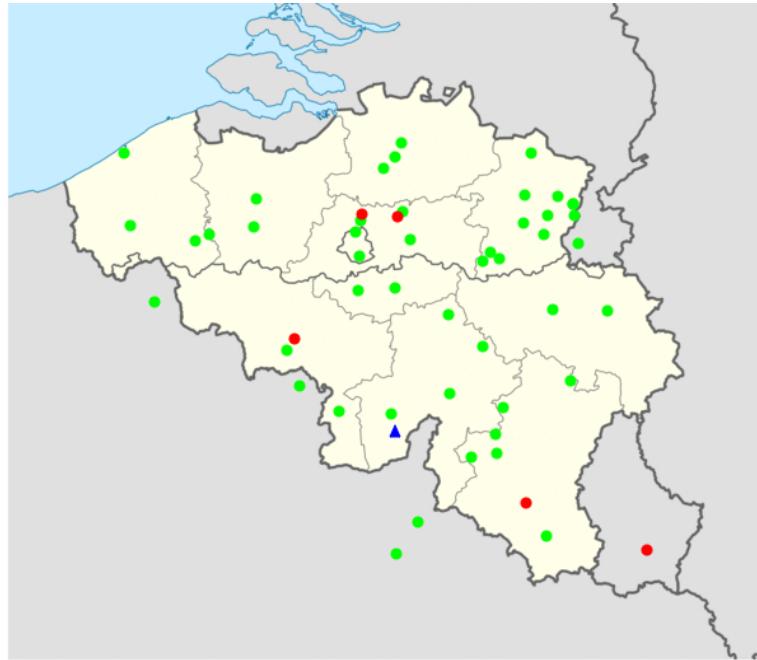


FIGURE 2.5 – Carte des stations BRAMS existantes, le triangle bleu représente l'émetteur de Dourbes, les points verts et rouges montrent les stations de réception disponibles et indisponibles respectivement pour la date du 1^{er} juillet 2025.[1]

Ceci est possible par une intégration du produit du signal par une exponentielle complexe :

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.1)$$

avec :

- t , la variable temps.
- ω la fréquence angulaire.
- $F(\omega)$ le spectre de fréquence en valeur complexe.

Attention : cette définition peut être trouvée avec de légères différences dans d'autres ouvrages de référence.

Comme énoncé précédemment, un spectrogramme est un graphique montrant la présence de fréquence d'un signal en fonction du temps.

Son axe vertical représente la fréquence tandis que l'axe horizontal représente le temps.

Afin de créer ce graphique, une série de transformées de Fourier à court terme (STFT) sont effectuées avec des segments temporels successifs du signal original.

La magnitude pour chaque segment de temps t et chaque fréquence ω est enfin calculée et représentée dans le graphique selon un code couleur. En d'autres termes, un spectrogramme peut être considéré comme un pré-traitement du signal.

Deux paramètres clés sont nécessaires pour l'élaboration d'un spectrogramme : `nperseg` et `noverlap` :

- `nperseg` correspond au nombre de points par segment utilisé pour réaliser la STFT du signal. Ce nombre permet de contrôler la résolution temporelle et fréquentielle du spectrogramme. Plus ce nombre est élevé, plus le segment de la STFT contient de points, par conséquent, plus la résolution fréquentielle augmente aux dépens de la résolution temporelle.

- `noverlap` est un nombre strictement inférieur à `nperseg` ou nul. Celui-ci permet de contrôler le recouvrement entre chaque segment. Ce paramètre permet d'améliorer la continuité temporelle du spectrogramme et de capter des objets transitoires de courte durée.

Le choix de ces paramètres va aussi déterminer la performance du calcul du spectrogramme. En effet, un `nperseg` plus grand implique moins de segments à calculer et donc une exécution du code plus rapide avec moins de mémoire vive nécessaire dans un ordinateur.

Voici, ci-dessous, la relation formelle entre ces paramètres et les deux résolutions du spectrogramme. Notez que la fréquence d'échantillonnage du signal `fs` fait partie de l'équation :

$$\Delta_{t_{ech}} = \frac{nperseg - nooverlap}{fs} \quad (2.2)$$

$$\Delta_t = \frac{nperseg}{fs} \quad (2.3)$$

$$\Delta_f = \frac{fs}{nperseg} \quad (2.4)$$

(2.5)

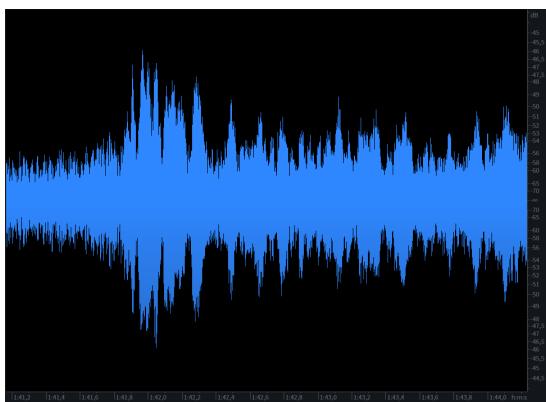
Avec :

$\Delta_{t_{ech}}$	Intervalle de temps entre chaque colonne de pixels du spectrogramme.
Δ_t	La résolution temporelle (la durée de chaque segment).
Δ_f	La résolution fréquentielle, soit l'espacement fréquentiel entre chaque ligne de pixels du spectrogramme.

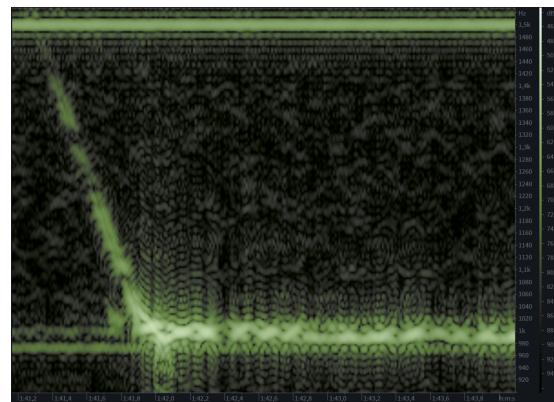
TABLE 2.2 – Définitions des résolutions d'un spectrogramme.

Prenons un exemple avec une fréquence d'échantillonnage de 6048échantillons/*s*, un `nperseg` de 512 points et un paramètre `noverlap` choisi comme 75% de `nperseg` (soit 384 points). Dès lors, les résolutions obtenues sont :

$\Delta_{t_{ech}}$	0.021s
Δ_t	0.084s
Δ_f	11.812Hz



(a) Exemple de waveform provenant d'un fichier .wav utilisé dans ce travail.



(b) Équivalent de la figure précédente une fois transformée en spectrogramme.

FIGURE 2.6 – Différence entre un fichier brut et un spectrogramme

Voici un exemple de spectrogramme utilisé dans ce travail (figure 2.7) :

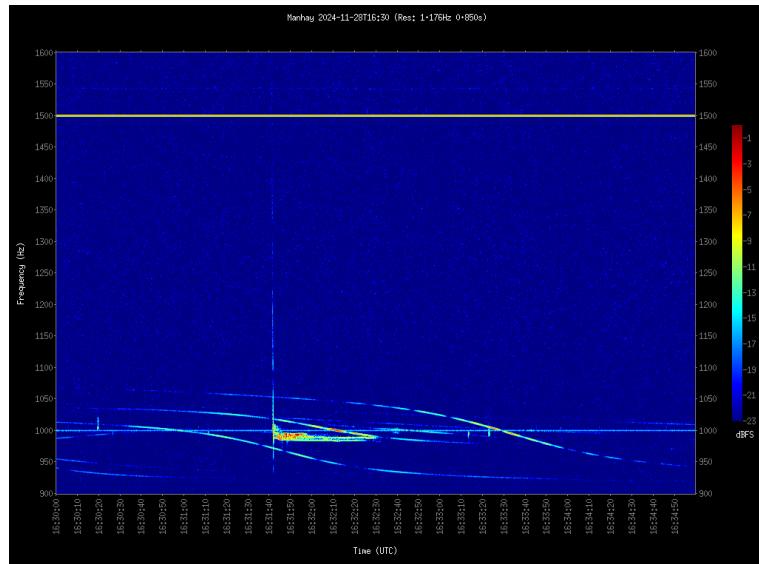


FIGURE 2.7 – Spectrogramme BRAMS de la station de Manhay.

Nous pouvons observer la présence d'avions (générant des formes en "S"), le signal du calibrateur (ligne horizontale à 1500Hz) ainsi qu'un head echo.

Cependant, celui-ci semble quasi-vertical dans cette représentation. La résolution temporelle de ce dernier est de 3 secondes. Ce qui veut dire que tout le phénomène s'est déroulé dans cette seule tranche de temps représentée.

Si nous augmentons la résolution temporelle, nous pouvons observer ce qui est exposé à la figure 2.6b. Cependant, il est clair que le seul moyen d'obtenir une précision maximale est d'utiliser le fichier brut.

2.1.5 PyBRAMS

PyBRAMS est la librairie python développée à l'IASB pour, entre autres, accéder aux enregistrements radio de BRAMS, les nettoyer du signal direct (celui émis de Dourbes et reçu par les stations sans réflexion par le plasma), et réaliser divers traitements sur ceux-ci (certains en dehors du contexte de ce travail, comme la détermination des trajectoires des météores).

Cette librairie nécessite l'installation de plusieurs dépendances, de préférence dans un environnement dédié.

Cette librairie se présente sous la forme d'un code source contenant des fichiers .py réalisant toutes les fonctions décrites.

Comme il sera écrit dans ce travail, cette librairie est toujours en cours de développement. Certaines des fonctions déjà présentes devront être modifiées et d'autres entièrement créées afin de réaliser cette étude.

Entre autre, PyBRAMS possède nativement les fonctionnalités suivantes (seules celles qui nous intéressent seront listées ci-dessous) :

- Télécharger un enregistrement radio contenant un intervalle de temps et un ensemble de stations spécifiées.

- Lister l'ensemble des stations de réception et donner les informations relatives à celles-ci.
- Identifier la présence d'un météore sur base de l'évolution de l'amplitude du signal en fonction du temps.
- Nettoyer les traces provenant d'échos d'avions.
- Nettoyer le signal direct de la balise de Dourbes.
- Calculer l'évolution de la fréquence principale du signal en fonction du temps par comptage du nombre de passages de la forme d'onde par zéro.
- Extraire les composantes i et q d'un enregistrement radio par une transformée de Hilbert.
- Réaliser un filtrage passe-bande avec une fenêtre de type Blackman.
- Réaliser des spectrogrammes de séries entières (durée 5 minutes) ou d'échantillons de signaux.
- Convertir des coordonnées géodétiques en dourbocentriques (plus d'informations seront données plus tard sur ce point).
- Calculer les points de réflexion spéculaire théoriques à partir d'une trajectoire de météore rectiligne et des coordonnées d'un émetteur et récepteur.

Le fonctionnement de ces codes est assuré par un ensemble de classes d'objets propre au code source.

2.2 FRIPON



FIGURE 2.8 – Logo du réseau FRIPON (fireball.fripon.org)

Le réseau FRIPON (*Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network*, figure 2.8) est un réseau d'observation de fireballs avec des caméras optiques. Ce réseau est capable de déterminer la trajectoire, la vitesse et l'orbite de ces fireballs ainsi que d'autres informations sur base des courbes de lumière observées.

Ce réseau est constitué principalement de caméras "all-sky" situées sur le territoire français et à l'étranger (voir figure 2.9) couplé à un système de détection automatique. L'un des buts de ce réseau est de pouvoir organiser des recherches sur le terrain dans les 24 heures qui suivent la chute d'un météore pour une possible récupération de météorite.



FIGURE 2.9 – Carte des stations optiques et radio FRIPON en France et Belgique[3]

Les résultats principaux de la détection sont exposés sur le site <https://fireball.fripon.org/>. Un compte sur le site est nécessaire pour obtenir la partie des informations non-publique (coordonnées exactes de la trajectoire du météore et autre).

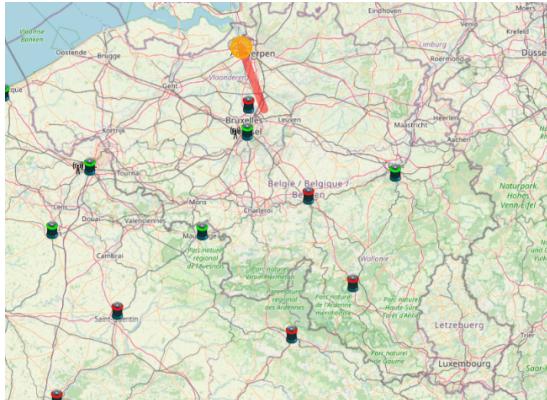
La détermination de la trajectoire du météore est possible par l'observation de celui-ci via plusieurs caméras situées à des emplacements différents.

Voici un exemple d'observation à partir d'une caméra FRIPON (figure 2.10) :

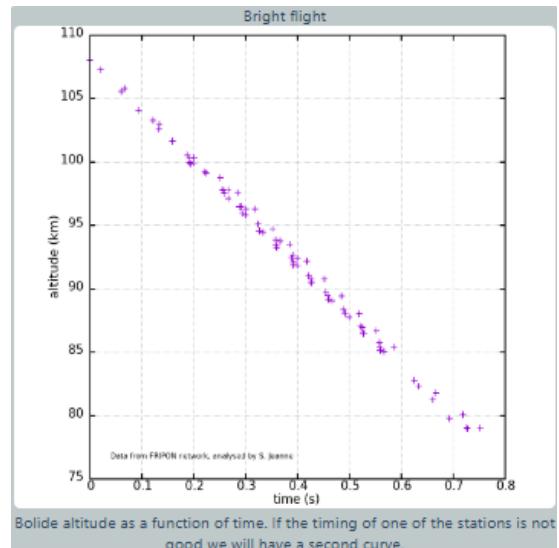


FIGURE 2.10 – Exemple d'observation avec la caméra FRIPON de Liège de l'évènement du 27 août 2019. Le fireball est visible dans le coin inférieur gauche de l'image. La caméra est centrée sur le zénith.

Après traitement, voici des illustrations de la trajectoire du fireball fournies par FRIPON (figure 2.11) :



(a) Carte avec une représentation de la trajectoire du fireball. Les caméras ayant observé l'évènement sont en vert.



(b) Graphique de l'évolution de l'altitude en fonction du temps.

FIGURE 2.11 – Exemple de trajectoire de fireball donné par FRIPON

Le système FRIPON est également capable de déterminer une relation altitude-vitesse assez précise grâce à un résultat du modèle d'ablation de Maria Gritsevich [4]. Le graphique de cette relation pour chaque évènement enregistré est disponible sur la page associée. Un compte sur la base de données permet d'obtenir les points vitesse-altitude mais pas la relation issue de ces points.

Chapitre 3

Données

La sélection des évènements étudiés dans ce travail a été déterminée par une condition indispensable :

Ces derniers doivent avoir été observés simultanément avec le réseau FRIPON et le réseau BRAMS. Également, il faut qu'il y ait des head echos présents dans certains enregistrements.

Ainsi, trois évènements ont été sélectionnés :

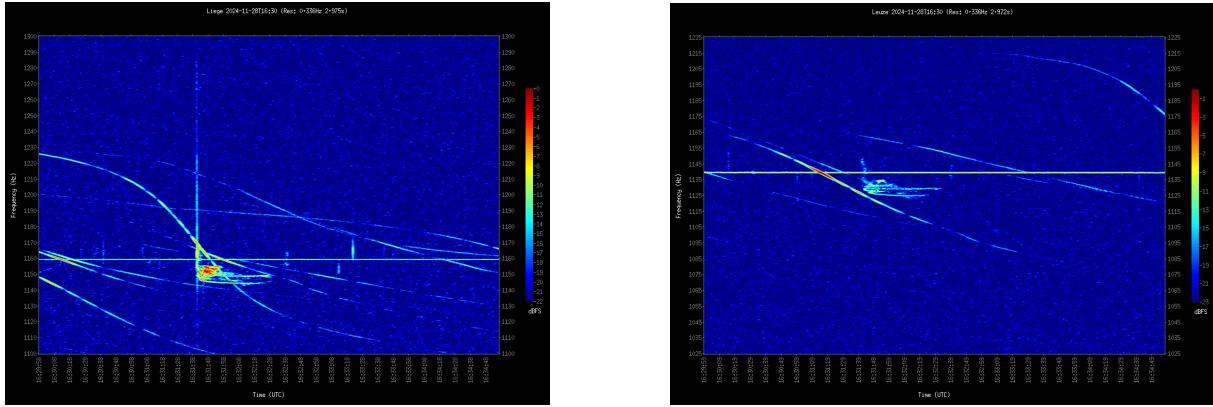
- Le 28 novembre 2024 à 16 : 31 : 41UTC (ID FRIPON 23956)
- Le 2 septembre 2024 à 01 : 01 : 37UTC (ID FRIPON 23538)
- Le 27 août 2019 à 02 : 53 : 49UTC (ID FRIPON 11537)

Regroupons toutes les informations sur ces évènements ici :

Date	28-11-2024	02-09-2024	27-08-2019
Temps (UTC)	16 : 30 : 41	01 : 01 : 37	02 : 53 : 49
Durée (s)	1.202	2.2378	0.752
ID FRIPON	23956	23538	11537
Latitude (départ/arrivée)	50.6329/50.5814	50.9831/51.4171	50.9338/51.2523
Longitude (départ/arrivée)	3.37163/3.18978	2.8784/3.05292	4.49325/4.3087
Altitude (départ/arrivée) (m)	96770/77597.7	92851.5/50306.5	106401/80001.6
Vitesse initiale (km/s)	20.221	29.573	68.397
Nombre de stations avec head echo/total	13/50	27/52	16/29

TABLE 3.1 – Résumé des informations sur les évènements étudiés.

3.1 Évènement du 28 novembre 2024 16 : 30UTC



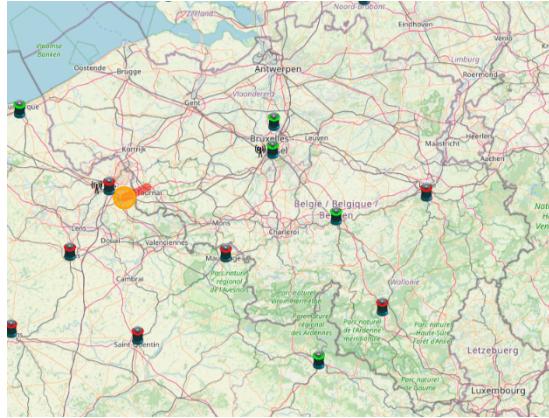
(a) Spectrogramme de la station de Liège où un head echo est visible

(b) Spectrogramme de la station de Leuze où le head echo n'est pas visible.

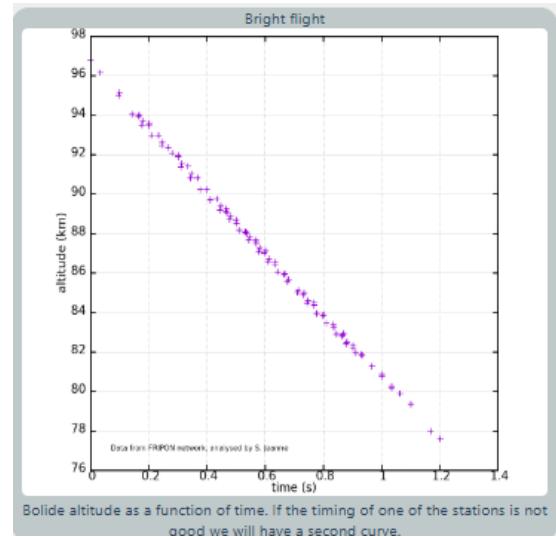
FIGURE 3.1 – Exemple de spectrogrammes pour le premier évènement



FIGURE 3.2 – Premier évènement observé avec la caméra FRIPOON de Namur. Le fireball est entouré en rouge.



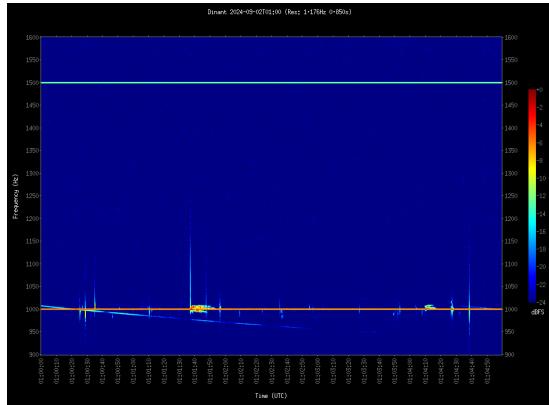
(a) Trajectoire du fireball du premier évènement



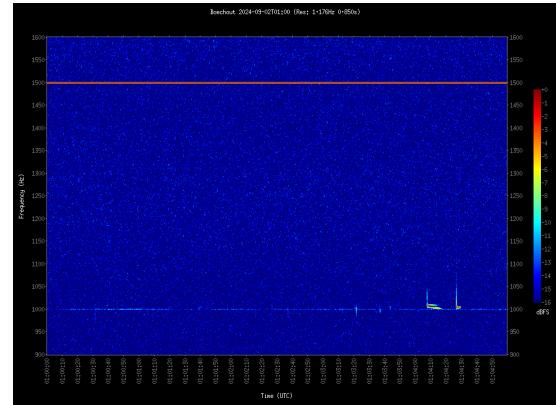
(b) Profil d'altitude du premier évènement

FIGURE 3.3 – Trajectoire et profil d'altitude du premier évènement

3.2 Évènement du 2 septembre 2024 01 : 01UTC



(a) Spectrogramme de la station de Dinant où un head echo est visible

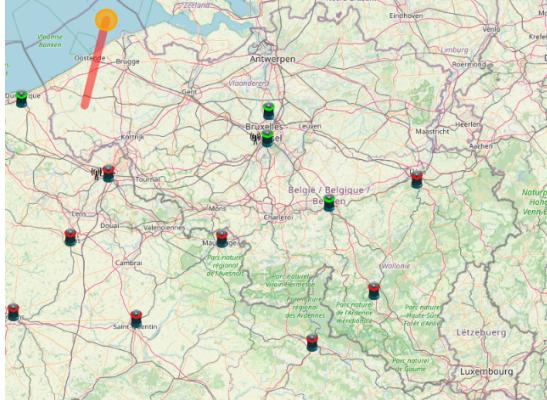


(b) Spectrogramme de la station de Boechout où le head echo n'est pas visible.

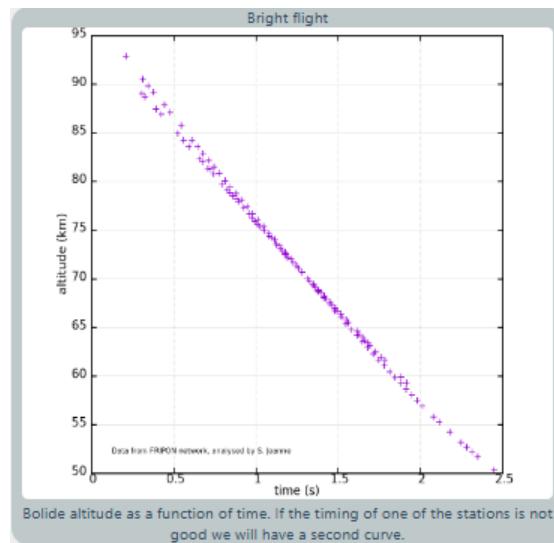
FIGURE 3.4 – Exemple de spectrogrammes pour le deuxième évènement



FIGURE 3.5 – Deuxième évènement observé avec la caméra FRIPON de Bruxelles.



(a) Trajectoire du fireball du deuxième évènement



(b) Profil d'altitude du deuxième évènement

FIGURE 3.6 – Trajectoire et profil d'altitude du deuxième évènement

3.3 Évènement du 27 août 2019 02 : 53UTC

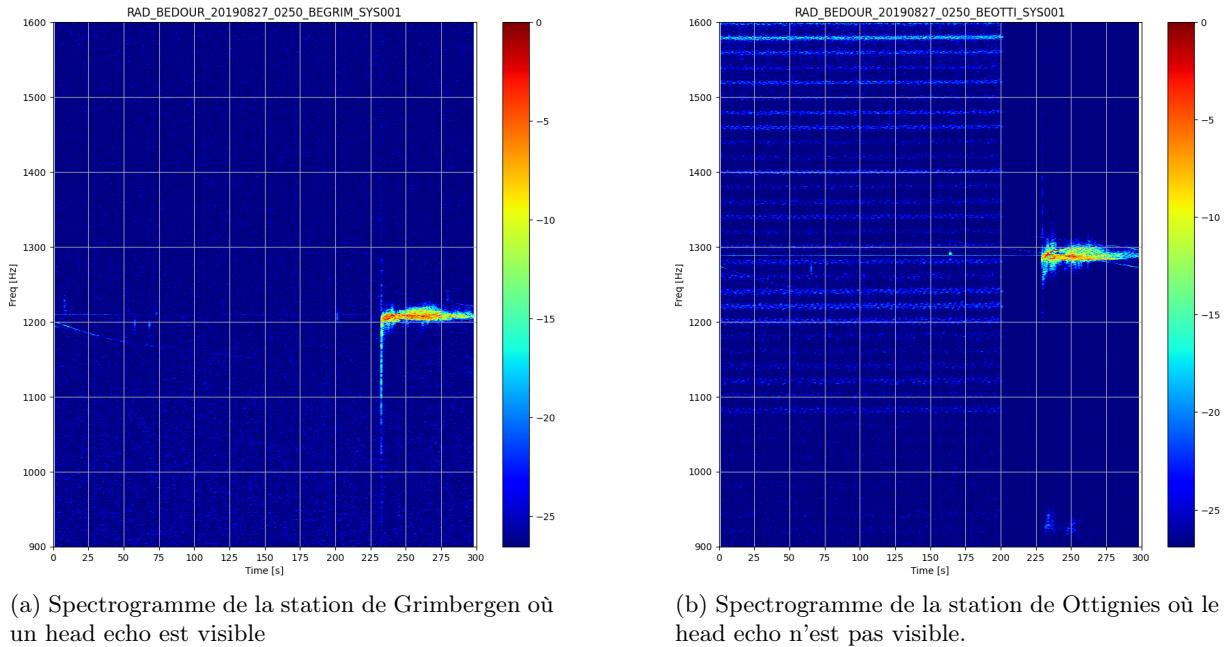


FIGURE 3.7 – Exemple de spectrogrammes pour le troisième évènement



FIGURE 3.8 – Troisième évènement observé avec la caméra FRIPOON de Liège.

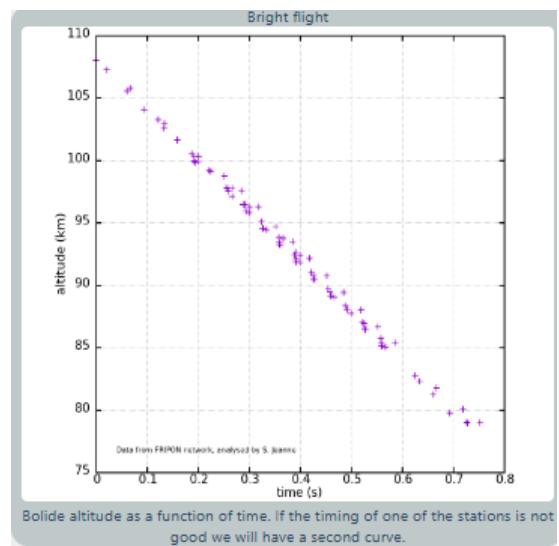
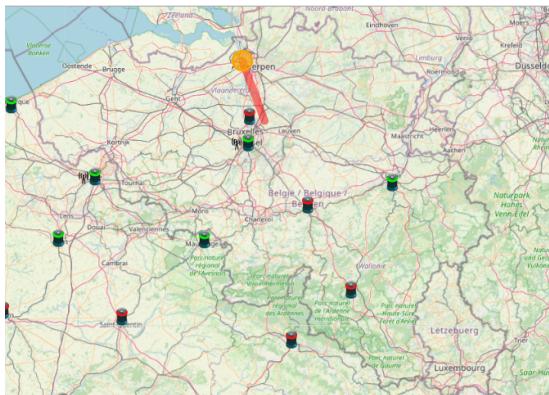


FIGURE 3.9 – Trajectoire et profil d'altitude du troisième évènement

Chapitre 4

Méthode

4.1 Détermination de la vitesse à partir de la pente des head echos.

Pour répondre à notre première question, nous allons devoir faire appel à des méthodes visant à quantifier l'extension du head echo en fréquence (due à l'effet Doppler).

Dans un premier temps, nous allons utiliser une fonction de PyBRAMS déjà existante. Celle-ci est appelée "compute_doppler_shift". Celle-ci utilise le fichier brut (et permet par conséquent de travailler avec la résolution temporelle maximale disponible, soit la fréquence d'échantillonnage de 5512 ou 6048Hz).

Cette fonction détermine une fréquence instantanée du signal sur base de comptage de passage par zéro des données des fichiers .wav.

Par défaut, cette fonction sélectionne un échantillon de 0.2s et détermine l'évolution de la fréquence principale de celui-ci.

Pour chaque événement, les enregistrements de chaque station sont téléchargés via PyBRAMS et stockés localement. L'intervalle durant lequel le fireball est observé par FRIPON est utilisé pour localiser la position temporelle de l'évènement dans les enregistrements de 5 minutes. Cette localisation de l'évènement est réalisée par une fonction utilisant l'amplitude du signal. La sortie de cette dernière est une information appelée "rise" et équivaut à l'intervalle de temps où une croissance de l'amplitude est détectée (présumée due au météore). Ceci est exposé dans la figure 4.1

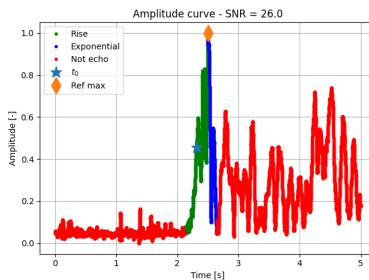


FIGURE 4.1 – Graphique d'amplitude du signal du 28 novembre capté par la station de Jalthay. Ce graphique est généré par la fonction `pybrams.event.meteor.compute_t0_and_SNR` mentionnée précédemment. Le début du signal météoritique est identifié par l'étoile bleue.

Il faut rappeler que PyBRAMS est conçu, de base, pour l'analyse de météores underdense. Par conséquent, la fonction `pybrams.event.meteor.compute_t0_and_SNR`, donnant accès au `rise` a dû être modifiée pour prendre en compte diverses erreurs de fonctionnement possibles.

Ces intervalles de temps mentionnés plus haut doivent être ajustés manuellement afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles (un mauvais intervalle peut causer une sélection automatique d'un artéfact autre que le signal du météore).

Après avoir utilisé le segment `rise` du signal enregistré dans la fonction `compute_doppler_shift`, nous obtenons un résultat comme dans la figure 4.2

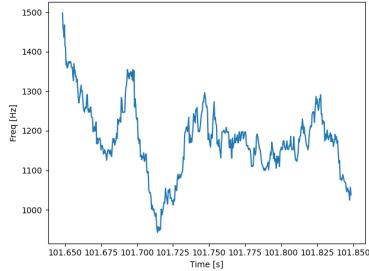


FIGURE 4.2 – Exemple de données retournées par `compute_doppler_shift` pour la station de Manhay.

Or, si nous comparons avec le spectrogramme du signal de la même station, nous pouvons voir que celui-ci contient des points à 1500Hz. Ce qui ne devrait pas être possible si l'on compare avec la trace du head echo dans le spectrogramme associé (figure 4.3).

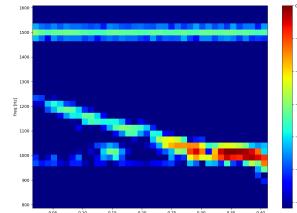


FIGURE 4.3 – Spectrogramme zoomé de la station de Manhay pour le premier évènement. Nous observons que l'extension maximale du head echo se situe entre 1200 et 1300Hz. Le signal du calibrateur est visible à 1500Hz

Il devient évident qu'un signal supplémentaire à celui du head echo existe et cause une contamination se manifestant dans les résultats de `compute_doppler_shift`.

Ces signaux parasites peuvent avoir plusieurs origines :

- Le signal direct provenant de la balise de Dourbes (normalement situé à 1000Hz)
- Le signal du calibrateur (directement injecté dans le récepteur comme calibration de fréquence et intensité) situé 500Hz au-dessus de celui de la balise.
- Des signaux causés par des avions.
- D'autres types d'interférences radio.

La superposition de ces signaux modifie clairement le nombres de passages par zéro. Ce qui altère les résultats avec une importance dépendant de l'amplitude de ces derniers.

Nous pouvons également constater qu'il existe des intervalles de temps dans les résultats (figure 4.2) où de fortes variations existent. Notre hypothèse est que ceux-ci sont causés par des interruptions du signal du head echo. Dès lors, le signal d'amplitude dominante durant ces interruptions provoque les résultats observés.

Des tests intensifs avec la fonction `compute_doppler_shift` et des signaux synthétiques ont été effectués afin de mieux comprendre son comportement dans plusieurs circonstances semblables auxquelles nous avons été confronté :

Tout d'abord, nous avons vérifié le bon fonctionnement de celle-ci avec un signal monochromatique de 1000Hz. Comme mentionné au début de cette section, la fonction donne par défaut des résultats sur un intervalle de 0.2s sélectionné dans un intervalle de temps donné en paramètre de celle-ci. La figure 4.4 illustre cette subtilité.

Le graphique en haut à gauche montre l'amplitude du signal. La partie colorée en rouge est celle donnée comme paramètre à `compute_doppler_shift`. La partie en vert est celle réellement étudiée et dont les résultats sont disponibles dans le graphique inférieur gauche. Les deux graphiques restants montrent le spectrogramme du signal synthétique.

Nous pouvons observer que le résultat est une fréquence constante comme attendu.

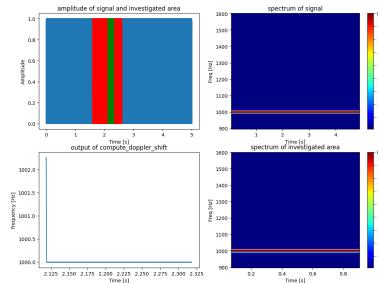


FIGURE 4.4 – Test de `compute_doppler_shift` avec un signal monochromatique à 1000Hz

Les deux prochains exemples de tests (figure 4.5) montrent l'effet d'une superposition d'un signal monochromatique de 1000Hz (pour reproduire l'effet du signal direct de la balise) et d'un glissement de fréquence pour reproduire le head echo. L'un des deux cas possède des interruptions volontaires du glissement pour observer l'effet de ceux-ci (figure 4.5b) :

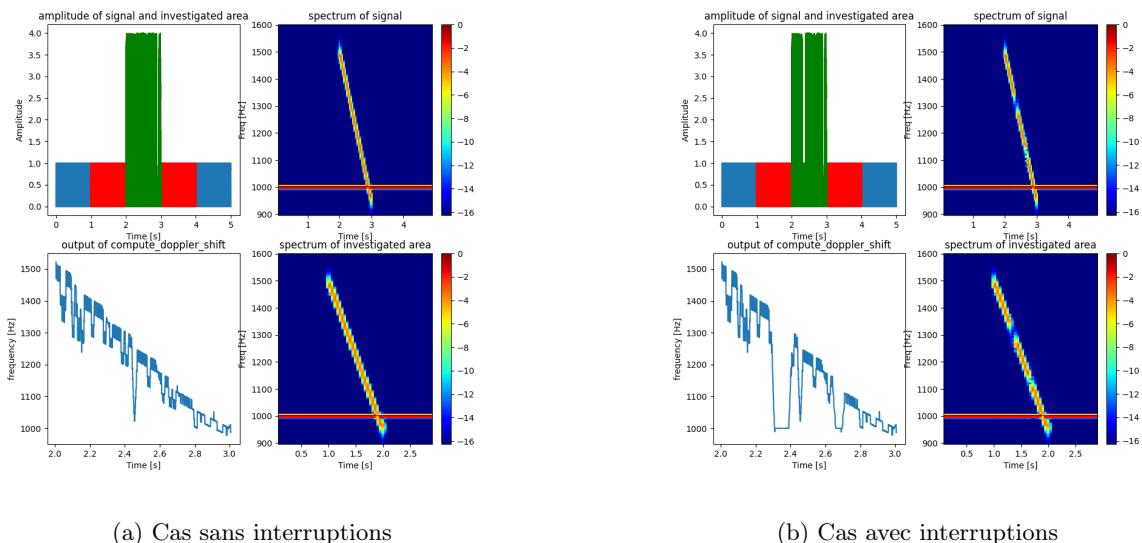


FIGURE 4.5 – Test de `compute_doppler_shift` avec un balayage de fréquence et présence d'un signal monochromatique. Deux cas (avec et sans interruptions) sont exposés ici.

Comme nous le pensions, les interruptions de signal tendent à ramener les résultats de la fonction vers le signal dont l'amplitude devient dominante (ici le signal monochromatique à 1000Hz).

Durant ces tests, nous avons mis en évidence plusieurs observations :

- La présence simultanée de signaux de différentes fréquences provoque des oscillations des résultats

entre ces dernières.

- La sélection automatique de l'intervalle de temps réellement traité par la fonction est défaillante en cas de signal d'amplitude constante ou de présence de bruit, peu importent les caractéristiques de celui-ci.
- Les interruptions de signaux étudiés peuvent provoquer divers effets allant d'une chute des résultats vers une valeur constante à la création d'intervalles de fortes variations dues à la présence de bruit.
- Le bruit blanc, peu importent ses caractéristiques d'amplitude, provoque de graves dysfonctionnements de la fonction se manifestant systématiquement par des hautes fréquences dépassant plusieurs kilohertz.

Au vu de ces conclusions, plusieurs modifications et recommandations doivent être prises en compte afin d'obtenir des résultats les plus fidèles possibles par rapport au signal observé :

- Tout d'abord, la fonction `compute_doppler_shift` a été modifiée de manière à court-circuiter la sélection automatique d'intervalles de fonctionnement de sorte que l'utilisateur décide du point de départ de cette dernière ainsi que de la durée de fonctionnement de la fonction. Ainsi, il est désormais possible de demander que celle-ci prenne strictement en compte l'entièreté de l'intervalle `rise` associé au head echo. Ceci permet d'obtenir des résultats sur l'ensemble du signal associé à celui-ci.
- Il est important de réduire le bruit de haute fréquence dans les cas étudiés. Fort heureusement, les signaux enregistrés sont filtrés dès l'étape d'enregistrement grâce à un passe-bande large avec une limite supérieure de 2500Hz.
- Il apparait maintenant vital que toute contamination du signal du head echo par des avions, le calibrateur, la balise de Dourbes et toute autre interférence doivent être nettoyées le plus fortement possible, sous peine de provoquer au minimum des variations des résultats avec des tendances vers les hautes fréquences.
- L'intervalle de temps `rise` doit être déduit de manière telle toute contamination par le trail echo doit être évitée sous peine de provoquer les mêmes perturbations que mentionnées plus haut (quelques tests ont été effectués pour observer les modifications de cet intervalle de temps sur les résultats. Il semble que le processus de sélection de cet intervalle soit assez fiable).

Dans le but de supprimer les signaux parasites, plusieurs procédures de nettoyage ont été implémentées :

Pour commencer, le nettoyage du signal direct est déjà implémenté dans PyBRAMS (voir figure 4.6). Cette méthode de nettoyage consiste à reconstruire ce signal direct depuis l'enregistrement puis de le soustraire, ce qui est relativement sans danger puisque ce signal direct est monochromatique par construction. Ce nettoyage est inclus automatiquement dans la phase de téléchargement des enregistrements.

Concernant les avions il existe également une méthode de nettoyage basée sur l'érosion, désormais activée automatiquement.

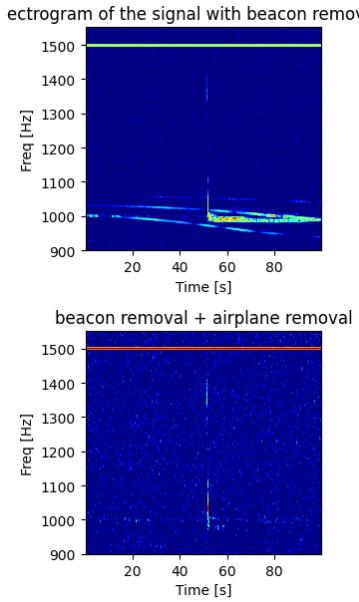


FIGURE 4.6 – Comparaison de signaux avec (en bas) et sans (en haut) nettoyages d'avions pour le cas de Manhay.

Par contre jusque maintenant, il n'existe pas de méthode de nettoyage pour le signal du calibrateur.

Un premier essai avec un filtre coupe-bande étroit a été réalisé avec un certain succès. Cependant, il s'est avéré qu'il était possible de réutiliser la même méthode que pour le nettoyage du signal direct (exemples sur la figure 4.7). Une mise à jour du code a ajouté cette fonctionnalité.

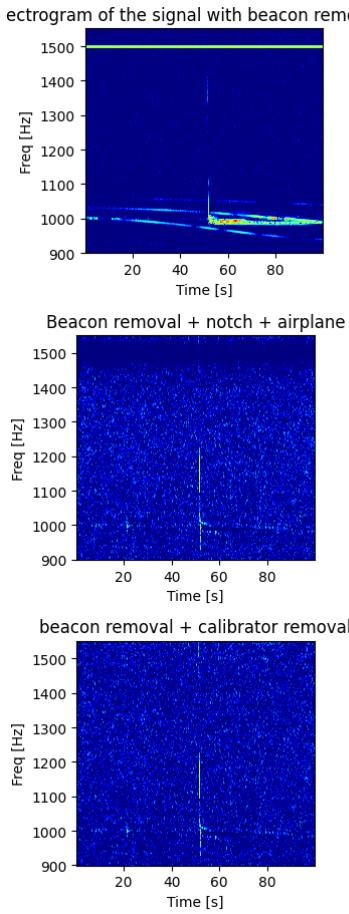


FIGURE 4.7 – Comparaison des méthodes de nettoyage pour le calibrateur pour le cas de Manhay. Le graphique en haut représente le spectrogramme de base. Le graphique au centre montre le nettoyage du calibrateur sur base d'un filtre coupe-bande étroit. Le graphique en bas montre l'effet de la méthode de nettoyage par reconstruction et soustraction de signal. Le nettoyage des avions était activé dans les deux derniers cas.

Par la même occasion, il est désormais possible d'utiliser cette procédure manuellement après avoir localisé une interférence monochromatique pour tenter de la nettoyer.

Maintenant, les résultats de `compute_doppler_shift` ne sont plus affectés par ces signaux et sont visuellement plus fidèles à la réalité (voir figure 4.8).

Discutons maintenant des interruptions de signal.

Afin de prouver formellement que ces interruptions sont la cause des fortes variations dans les résultats, nous allons tout d'abord les isoler.

Ceci fait partie d'une procédure de raffinement des données implémentée dans ce travail. En effet, pour rappel, notre but est de déterminer la vitesse à partir de la pente. Or nous avons besoin de déterminer cette dernière à partir des résultats à notre disposition.

Par conséquent, nous avons implémenté une méthode capable de nettoyer les points dus aux fortes variations (que nous appellerons outliers). Or cela nous permet également d'isoler ces outliers. Dès lors, si nous isolons les périodes d'interruption du signal, nous serons capable de trouver une corrélation si elle existe.

Cependant, nous devons choisir un critère pour définir ces zones d'interruption de signal.

Un paramètre idéal pour cette tâche aurait été le rapport signal sur bruit au cours de l'enregistrement. Cependant ne disposant pas d'un tel paramètre, nous nous sommes contenté de l'amplitude.

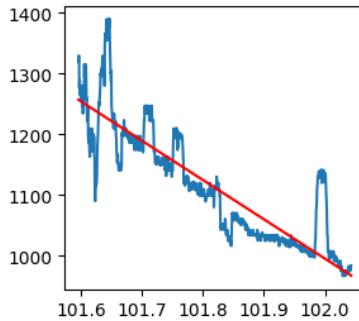


FIGURE 4.8 – Résultats de `compute_doppler_shift` après application des nettoyages d'avion, balise et calibrateur.

En effet, si nous supposons que le bruit de fond de l'enregistrement possède une amplitude constante, nous pouvons conclure qu'une diminution de l'amplitude (si l'enregistrement a bien été nettoyé de tout les autres signaux différents du head echo) signifie une interruption du head echo.

Le critère de décision si un intervalle de temps est de faible amplitude a été choisi par rapport à une approximation polynomiale de l'évolution de l'amplitude.

Tout d'abord, l'amplitude au cours du temps du signal est déjà connue. Nous approximons la forme générale de l'évolution de l'amplitude à l'aide d'un polynôme. Ensuite, nous cherchons les intervalles de temps où la vraie amplitude devient inférieure à l'approximation. Ces intervalles sont courts vu que leur diminutions associées sont négligeables par rapport à la forme générale obtenue via le polynôme.

Ainsi nous obtenons les intervalles d'interruption de signal.

Dans un second temps, nous cherchons à isoler les outliers. Cette opération est complémentaire à leur nettoyage.

Voici la description du code permettant ceci :

- Une première régression linéaire est réalisée avec l'ensemble des points disponibles.
- Les résidus des points sont calculés par rapport à la fonction linéaire résultant de la régression.
- Dans une boucle d'ordre N :
 - Les points dont les résidus ont une dispersion supérieure à 1σ sont sélectionnés.
 - Ces derniers sont supprimés de l'ensemble des points résultats.
 - Une nouvelle régression linéaire avec les points restants est réalisée.
 - Les nouveaux résidus sont calculés.
 - La boucle recommence.
- Enfin, nous obtenons un ensemble de points dépourvus d'outliers et d'une fonction linéaire ajustée sur ceux-ci.
- De manière complémentaire, nous pouvons désormais identifier les points manquants par rapport au set initial comme les outliers.

Enfin, nous pouvons superposer les outliers avec les intervalles de faible amplitude comme ci-dessous (figure 4.9) :

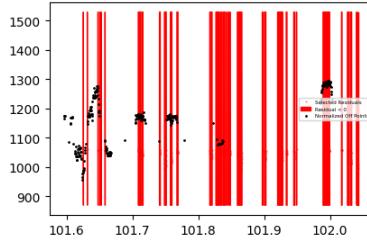


FIGURE 4.9 – Superposition des intervalles de temps avec une diminution d'amplitude par rapport à une approximation polynomiale de celle-ci (zones rouges) et des points de `compute_doppler_shift` identifiés comme outliers par la méthode mentionnée ci-dessus. Les valeurs de l'axe vertical n'ont pas de signification par rapport aux données affichées.

Nous pouvons observer que plusieurs de ces outliers sont superposés sur ces intervalles rouges. Ce qui tend à confirmer nos soupçons.

Maintenant, nous sommes capable de raffiner les points de `compute_doppler_shift` de manière à éliminer les outliers dans le but d'améliorer les régressions qui nous permettront d'obtenir la pente des head echos.

Une illustration de cette amélioration est visible dans la figure suivante (figure 4.10) :

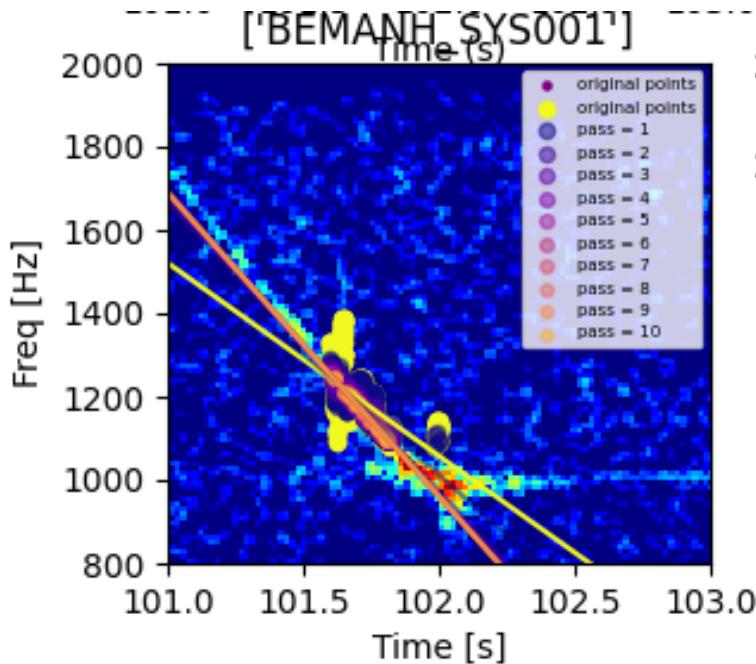


FIGURE 4.10 – Superposition du spectrogramme de Manhay avec les résultats de `compute_doppler_shift` (en jaune) les résultats de l'algorithme de nettoyage des outliers sont visible avec le code couleur mentionné dans la légende. Des droites sont également tracées pour montrer les résultats des régressions linéaires sur chacun des ensembles de points

Dans le but d'améliorer encore plus l'approximation du head echo par une fonction linéaire, les enregistrements sont filtrés avec un filtre passe-bande de type Blackman entre 800Hz et 1700Hz (la fonction permettant de réaliser cette opération existe déjà dans la librairie PyBRAMS). Ce traitement permet d'augmenter le rapport signal sur bruit du head echo.

Également, un filtrage manuel des points de `compute_doppler_shift` est effectué pour éliminer une partie des outliers ou les points contaminés par le trail echo. Ce filtrage consiste à définir des bornes

supérieures et inférieures de fréquence et éliminer les points se trouvant en dehors de celles-ci. Cette opération doit être effectuée manuellement pour chaque enregistrement pour obtenir des résultats optimaux. Les effets de ce filtre Blackman et sélection de points résultats sont visibles dans la figure 4.11

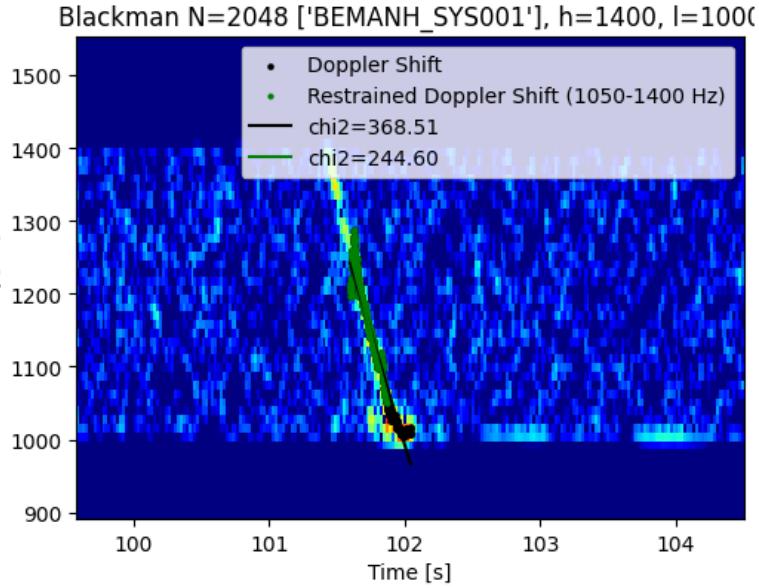
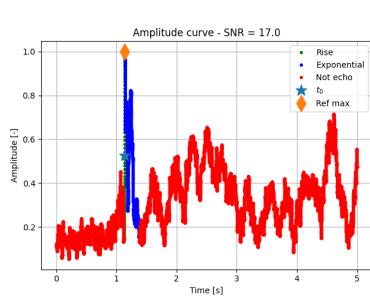
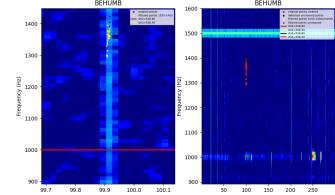


FIGURE 4.11 – Illustration de l'action du filtre passe-bande Blackman sur le cas de Manhay. Nous pouvons observer que les nouveaux points trouvés par `compute_doppler_shift` ont tendance à avoir moins de variations et être moins présents au niveau du trail echo par rapport aux points originaux dans la figure 4.10

Lors de notre travail sur les événements 2 et 3, nous nous sommes aperçus de problèmes critiques avec notre méthode actuelle. Plus précisément, avec la sélection de l'intervalle de temps `rise` sur base de l'amplitude. Dans ces événements, nous avons observé la présence d'artéfacts de forte amplitude (figure 4.12a) et de courte durée dans les spectrogrammes des enregistrements (exemple dans la figure 4.12b)



(a) Graphique d'amplitude en fonction du temps pour un cas de l'événement du 2 septembre 2024. L'intervalle de temps détecté comme étant le météore se trouve en réalité avant le vrai météore entre la seconde 2 et 3.



(b) Spectrogramme de la station de Humbeek pour l'événement du 2 septembre 2024. L'artefact identifié comme étant le météore est visible dans le spectrogramme agrandi dans le graphique à gauche. Nous pouvons également voir les points de données Doppler dans cet intervalle de temps. Le spectrogramme à droite montre l'ensemble de l'enregistrement. Il est possible de voir que ce type d'artefact est présent en plusieurs endroits.

FIGURE 4.12 – Illustration des artéfacts causant des erreurs avec la première méthode

Nous ne connaissons toujours pas l'origine de ces phénomènes. Nous avons écarté la possibilité d'un phénomène météorologique ou ayant trait à de la météo spatiale en consultant des archives.

Reste le fait que ceux-ci nous empêchent d'obtenir les points du head echo comme réalisé précédemment.

Nous pouvons noter que ceci est loin d'être un cas rare. Dans le but d'estimer le nombre d'enregistrements affectés par cette erreur, nous avons réalisé un histogramme du nombre de points contenus dans l'intervalle `rise` de chaque station. Etant donné que le symptôme commun aux événements affectés à cette erreur est un intervalle `rise` très court (contenant au maximum quelques centaines de points), un histogramme du nombre de points pour chaque station nous montrera le nombre de stations affectées par le problème.

C'est ainsi que nous avons observé que le problème était répandu dans les enregistrements (voir figure 4.13)

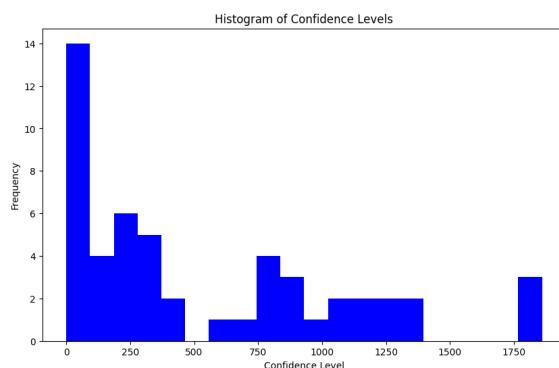


FIGURE 4.13 – Histogramme de la distribution du nombre de points de données Doppler de chaque station pour l'événement du 2 septembre 2024.

Nous avons tout de même obtenu un nombre réduit d'enregistrements où la première méthode décrite fonctionne sans problèmes.

Par la même occasion, nous avons compris la raison pour laquelle les effets Doppler négatifs n'ont presque jamais été repérés : ceux-ci se situent dans l'intervalle de temps après le début du trail echo. Or, celui-ci n'est pas pris en compte dans l'étude car il contamine fortement les données Doppler à cause de son intensité.

C'est pourquoi nous avons décidé de créer une nouvelle méthode d'extraction de points :

Cette dernière, n'utilisant pas l'amplitude mais plutôt le spectrogramme lui-même, permettrait d'identifier le trail echo grâce à son intensité dominante, et le head echo dont l'intensité est moindre. Ainsi, un intervalle de temps contenant le head echo sans contamination par le trail pourrait être identifié. De plus, cette méthode permettrait d'éviter d'analyser des intervalles de temps où le signal du météore serait interrompu. Et par conséquent d'éliminer les intervalles de variation intense provoqués par ces interruptions. Également, une estimation grossière de la pente du head echo serait possible après l'avoir isolé. Enfin, après avoir isolé le trail il pourrait être possible de le filtrer d'une certaine manière afin de pouvoir utiliser la trace d'un head echo négatif situé sous ce dernier dans les spectrogrammes.

En bref, une telle méthode innovatrice ouvrirait la porte à de nombreuses possibilités.

Le prélude de cette méthode a été l'étude de la distribution en intensité des pixels du spectrogramme. Pour commencer, il faut noter que ces derniers sont sensés refléter la magnitude du spectre en décibels. Alors, une conversion en quantités positives par un opérateur de valeur absolue a été implémentée.

Ensuite, un histogramme des valeurs a été réalisé (voir figure 4.14).

Notre hypothèse de travail est que le trail semble être systématiquement la partie la plus intense du signal. Dès lors, nous sélectionnons les pixels dont l'intensité se trouve au-dessus d'un certain percentile pour trouver ce dernier. De manière empirique, ce dernier est de 99.5%.

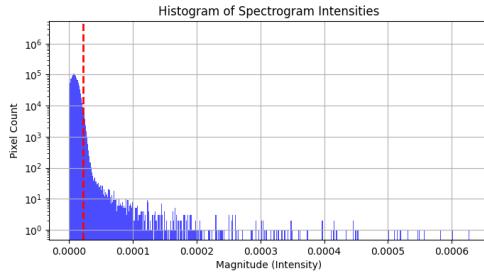


FIGURE 4.14 – Histogramme de l'intensité des pixels dans le spectrogramme de l'évènement du 28 novembre 2024 avec la station de Manhay. L'axe vertical est affiché de manière logarithmique. La ligne verticale rouge montre la position du percentile de 99.5%

Dans notre cas, avec une fréquence d'échantillonnage de 6048 échantillons/s, un `nperseg` de 512 points a été choisi afin d'obtenir la résolution temporelle la plus haute possible dans les spectrogrammes avec une résolution fréquentielle acceptable. Le paramètre `noverlap` est choisi comme 75% de `nperseg` (soit 384 points).

Afin d'isoler le trail, non seulement un niveau minimum d'intensité nécessaire a servi à créer le masque mais également des conditions sur l'intensité et la gamme de fréquence ont été ajoutées afin de ne pas inclure d'autres éléments de l'enregistrement radio. Ainsi, seuls les pixels situés 50Hz (la valeur peut être adaptée au cas par cas) autour de la fréquence de la balise sont potentiellement considérés comme le trail. Enfin, seuls les pixels se trouvant dans l'intervalle de temps de l'entrée du météore sont considérés (cet intervalle de temps est large de plusieurs secondes). La première condition supplémentaire permet de ne pas inclure des interférences dans l'identification du trail (par exemple, si le calibrateur n'était pas nettoyé, il deviendrait dominant dans certains cas en termes d'intensité). La condition temporelle permet de sélectionner le météore étudié et non un autre événement se produisant dans les 5 minutes de l'enregistrement.

Ainsi, cela permet d'obtenir le résultat suivant (figure 4.15) :

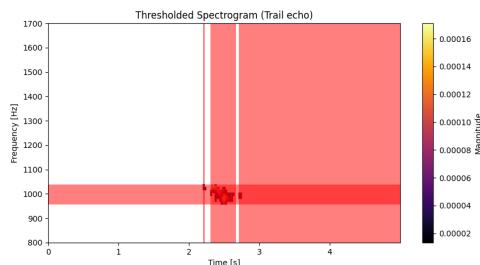


FIGURE 4.15 – Isolation du trail echo avec des conditions de temps, fréquence et intensité pour le cas du premier événement à Manhay.

Une fois le trail isolé, les intervalles de temps et fréquence où celui-ci est présent sont enregistrés.

L'étape suivante est d'augmenter la sensibilité du filtre d'intensité et de répéter l'opération sans le filtre de fréquence (vu que le head echo peut avoir lieu a priori sur n'importe quelle fréquence). La condition temporelle est maintenue. Dans ce cas-ci, la nouvelle limite inférieure d'intensité est un percentile de 99%.

Cependant, un effet secondaire de cette augmentation de la sensibilité est la détection de bruit. En effet, les pixels isolés et indépendants du head echo commencent à apparaître (voir figure 4.16)

Afin de contrer cet effet, un processus de nettoyage a été implémenté. Ce processus est basé sur la même logique que celle pour le nettoyage des avions, c'est-à-dire le principe de dilatation, érosion, ouverture et fermeture.

En termes de morphologie dans un cas binaire (ici une grille de pixels avec soit une valeur soit un

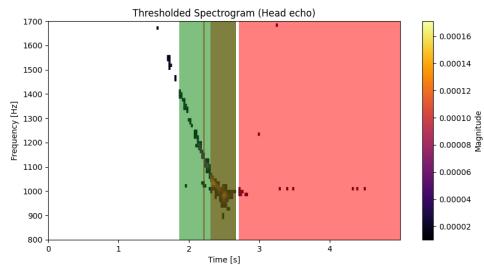


FIGURE 4.16 – Isolation du head echo pour le cas du premier évènement à Manhay. Des pixels de bruits apparaissent du fait de la sensibilité accrue en intensité.

état nan (not a number) pour ceux ne satisfaisant pas les conditions), ces quatre opérations permettent de mettre en évidence ou faire disparaître des détails en dessous d'une taille définie par une structure appelée "kernel". Ce kernel est appliqué point par point sur l'ensemble de l'image.

- **Érosion** : Application d'un kernel tel que le résultat de l'opération est 1 si et seulement si tous les pixels situés dans la zone du kernel centré sur le point d'application possèdent une valeur. Ceci permet de faire disparaître des objets petits comme du bruit. Cependant, les interruptions dans des structures peuvent devenir plus grandes également.
- **Dilatation** : Procédé complémentaire à l'érosion capable de faire disparaître des trous dans des images binaires.
- **Ouverture** : Opération combinant une érosion suivie d'une dilatation. Ceci permet de lisser les structures et d'éliminer le bruit.
- **Fermeture** : Complémentaire de l'ouverture : dilatation suivie d'une érosion. Permet le lissage des structures, remplissage des trous dans celles-ci et connecte des structures adjacentes.

Ainsi, une opération d'érosion avec un kernel (de 1 ligne * 2 colonnes par défaut) a été appliquée. Ceci a permis d'isoler les intervalles de temps où head echo et trail sont présents. Il ne reste désormais qu'à isoler les intervalles de temps où le head echo est présent et le trail absent (figure 4.17).

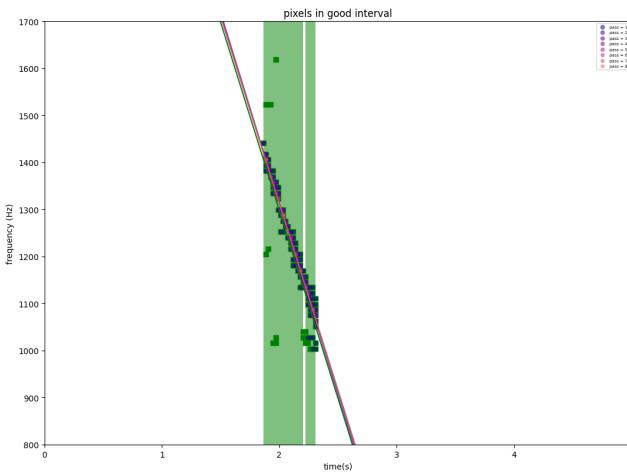


FIGURE 4.17 – Intervalles et points du head echo après nettoyage par érosion. L'élimination des outliers est implémentée sur les points restants.

Une fois cette partie terminée, nous pouvons utiliser la fonction `compute_doppler_shift` pour calculer l'évolution de la fréquence en fonction du temps sur les intervalles de temps récupérés ainsi qu'appliquer le reste de traitement sur les résultats (figure 4.18).

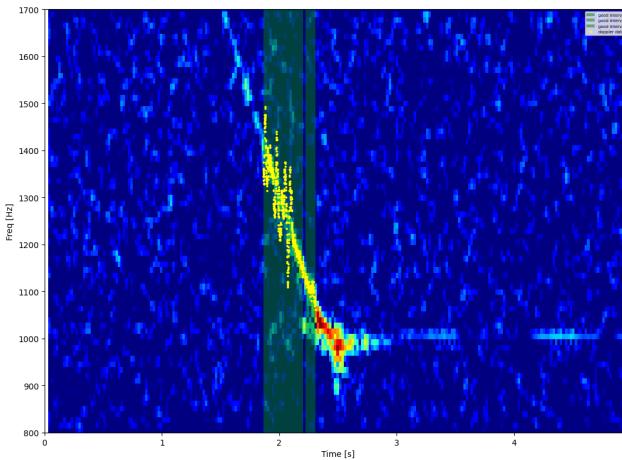


FIGURE 4.18 – Superposition du spectrogramme, du bon intervalle (en vert) et des résultats de `compute_doppler_shift`

Nou avons désormais un moyen d'étudier la pente de ces cas critiques via une déduction des intervalles de head echo en utilisant soit `compute_doppler_shift` soit les points du spectrogramme d'intensité sélectionnée.

En plus, nous avons pu confirmer que cette sélection de pixels du spectrogramme permet d'obtenir les informations des head echos avec un effet Doppler négatif. Pour cette tâche, une opération intermédiaire est nécessaire. Vu que nous avons obtenu l'intervalle de fréquence du trail, nous pouvons l'effacer avec un filtre coupe-bande étroit de type Notch. Ensuite, nous pouvons trouver le contenu en dessous de ce trail comme exposé dans la figure 4.19 :

Maintenant que nous possédons une approximation de l'effet Doppler suffisamment proche de la réa-

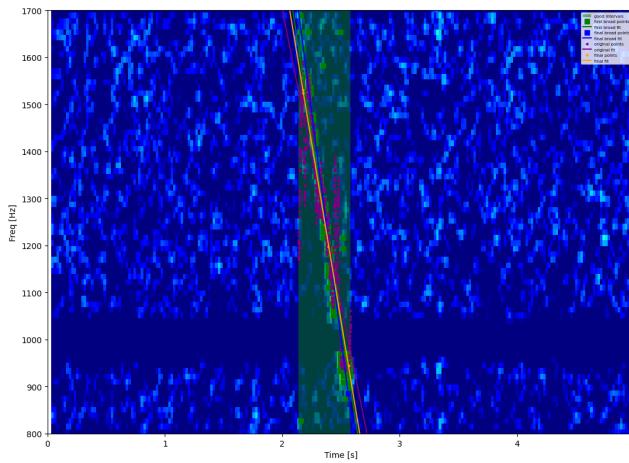


FIGURE 4.19 – Comparaison des méthodes sur le cas de Gavere pour le second évènement. Ce dernier possède la particularité d'avoir un effet Doppler très prononcé jusqu'à 900Hz. Les carrés verts sont les points correspondant aux pixels du spectrogramme sélectionnés.

lité, nous pouvons nous concentrer sur la dernière partie de la chaîne de processus à effectuer, c'est-à-dire établir le lien entre les observations radio BRAMS et les résultats connus de FRIPON optique.

Tout d'abord, notre première idée pour rejoindre ces deux types d'observation a été de recréer l'effet Doppler théoriquement observé par la station en tenant compte de sa position, de celle de l'émetteur, de la trajectoire du météore et de sa vitesse. Une description détaillée de cette méthode permettant également de retrouver la vitesse du météore est détaillée dans l'article de Steyaert [8].

Cependant, nous nous sommes retrouvés confrontés à un problème de taille : nous avons besoin de la vitesse du météore au cours du temps. Cette information est affichée sur le site <https://fireball.fripo.org/> sous la forme d'un graphique altitude-vitesse (voir figure 4.20). Or, les données de cette relation ne sont pas disponibles directement. Il aurait été relativement compliqué de retrouver l'implémentation rigoureuse du modèle de Maria [4] utilisé pour retrouver cette relation à partir des données brutes disponibles.

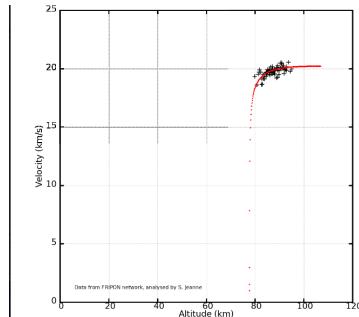


FIGURE 4.20 – Seules informations sur la vitesse du météore disponibles sur la page de l'évènement de <https://fireball.fripo.org/> [2]

Dès lors, il aurait été tentant de réaliser l'approximation que la vitesse du météore est constante et égale à celle du plateau visible dans le graphique ci-dessus. Cependant, l'altitude des points de réflexion spéculaire associée aux événements et pour les stations concernées se trouve dans la partie croissante du graphique. Ainsi, une telle approximation se révèle fausse et dangereuse.

C'est pour cette raison qu'une autre approche a été trouvée afin de relier les deux observations. Plutôt que de traiter la vitesse comme paramètre du problème, nous allons la traiter comme une inconnue.

Avec toutes les informations à notre disposition, nous pouvons générer les effets Doppler théoriques de l'évènement en fonction de la vitesse.

Nous allons commencer par dessiner ces effets Doppler théoriques avec plusieurs vitesses afin d'observer le comportement de ceux-ci sur la figure 4.21

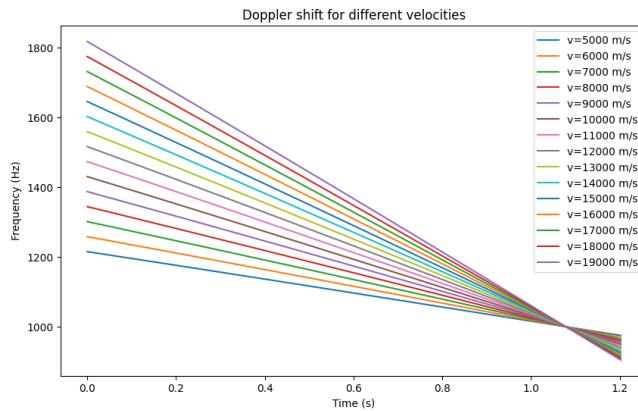


FIGURE 4.21 – Graphiques montrant les effets Doppler attendus en fonction de la vitesse du météore. Le cas particulier de la station de Manhay est utilisé avec la trajectoire du météore du 28 novembre 2024 (les informations géométriques du système sont nécessaires pour produire ces graphiques). Le domaine temporel de la fonction est adapté à la durée de rentrée dans l'atmosphère mentionnée sur la page FRIPON de l'évènement (soit 1.2s)

Comme il est visible dans cette figure, la forme de la relation fréquence-temps semble similaire à celle d'une fonction linéaire. Dès lors, il paraît aisément d'implémenter une fonction capable de retrouver la vitesse de sorte que la relation résultante soit la plus fidèle possible à l'approximation de l'effet Doppler observé.

Une manière simple de procéder est de comparer les pentes de la relation synthétique et celle de l'approximation. Il ne reste plus qu'à réaliser une réduction par moindres-carrés pour retrouver le bon paramètre vitesse.

Cette dernière étape peut être implémentée grâce à la fonction `scipy.optimize.minimize` et avec une fonction-objectif proprement écrite.

Désormais, nous sommes capable de déduire une vitesse depuis l'approximation linéaire des données Doppler et des informations géométriques du système émetteur-récepteur-trajectoire. Un inconvénient de cette méthode est que celle-ci n'est applicable que sur des météores dont la trajectoire est connue.

Cependant, nous pouvons désormais comparer les observations des deux systèmes :

Voici une visualisation de l'estimation de la vitesse comme décrite ici (voir figure 4.22)

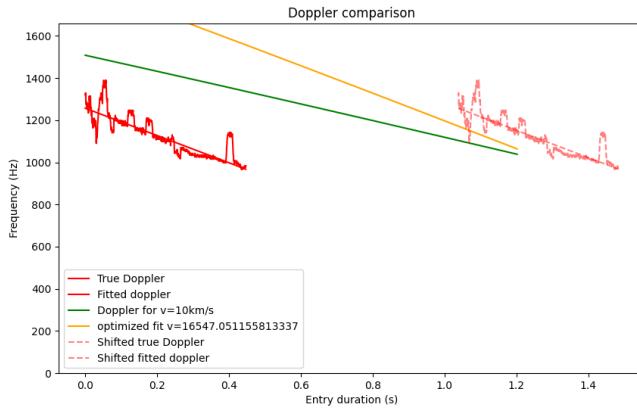


FIGURE 4.22 – Visualisation du résultat de la fonction de détermination de vitesse dans le cas de la station de Manhay pour l'évènement du 28 novembre 2024. La courbe en rouge montre les points Doppler observés ainsi que la régression linéaire de ces points. La ligne jaune montre la relation fréquence-temps ajustée en vitesse pour avoir la même pente. Les points Doppler observés sont déplacés à proximité et affichés en tirets pour observer la similitude. Une relation fréquence-temps paramétrée avec une vitesse de 10km/s est affichée à fins de comparaison.

Pour ceci, nous allons formater les résultats de la manière suivante (figure 4.23) :

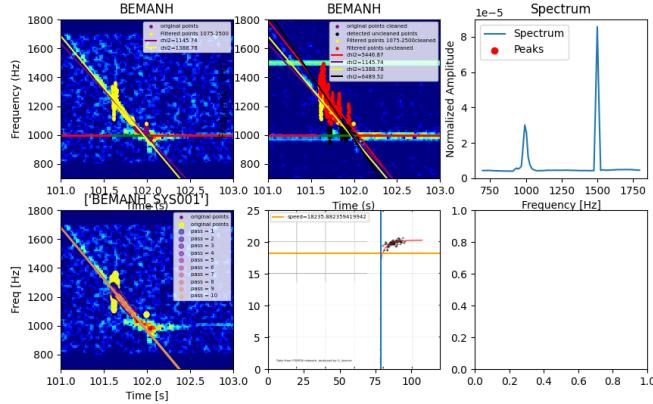


FIGURE 4.23 – Graphiques de résultats de vitesse pour la station de Manhay pour l'événement du 28 novembre 2024. Le graphique en haut au centre est le spectrogramme initial non nettoyé. Les points rouges et noirs sont les points Doppler produits sans nettoyage de l'enregistrement. Les lignes rouges et noires sont les approximations linéaires liées à ces points. Le graphique en haut à gauche est le spectrogramme nettoyé de la balise, du calibrateur, des avions et passé à travers un filtre passe-bande Blackman (entre 800 et 1700Hz) pour diminuer le bruit. Les points mauves sont les données Doppler de ce signal nettoyé et filtré. Ceux en jaune sont identiques mais restreints à un intervalle de fréquence mentionné dans la légende. Cette restriction est manuelle et permet de garder des intervalles de points moins affectés par des variations importantes. Le graphique en haut à droite est le spectre intégré du signal non nettoyé. Celui-ci permet de détecter la présence d'interférences approximativement monochromatiques et d'engager manuellement le nettoyage de celles-ci. Le graphique en bas à gauche est le résultat de la routine de nettoyage des outliers mentionnée plus haut. La dernière courbe est celle utilisée par la fonction de détermination de vitesse. Enfin, le graphique en bas au centre est une superposition du graphique disponible sur le site FRIPON contenant la relation altitude-vitesse. Les axes du graphique sont ajustés pour correspondre à ceux de FRIPON. L'axe horizontal montre l'altitude en kilomètres tandis que l'axe vertical montre la vitesse en km/s. Une ligne horizontale bleue montre l'altitude du point de réflexion spéculaire associé à la station. La ligne horizontale montre la vitesse déduite par la fonction élaborée ici.

Dans le graphique FRIPON, les points noirs résultent d'un lissage par trois points. Donc, nous nous attendons à ce que les résultats soient proches de ce nuage de points et pas forcément exactement sur la courbe rouge issue du modèle de Maria.

Également, nous pouvons observer que l'approximation finale de la relation Doppler observée n'est pas exactement superposée sur la trace du spectrogramme. Nous pouvons même dire que la pente de celle-ci n'est pas assez importante. Or, comme nous avons pu l'observer dans le graphique 4.21, une pente négative plus importante est un signe d'une vitesse plus élevée. Nous pouvons dès lors nous attendre à ce que notre vitesse déduite soit sous-estimée dans des cas similaires à celui-ci.

4.2 Explication de la présence de head echos dans les données BRAMS par la géométrie.

Dans un premier temps, afin de tenter de comprendre cet effet de géométrie, nous nous sommes concentré sur la répartition des stations possédant un head echo.

Afin de réaliser cette étude, il est nécessaire de quantifier l'extension du head echo en fréquence (due à l'effet Doppler), ce qui a été réalisé dans le cadre de la première question. Une fois celle-ci obtenue, un graphique en projection polaire a été implémenté pour tenter de comprendre cet effet de géométrie. Ce graphique possède comme origine la station d'émission à Dourbes. Les stations BRAMS disponibles sont placées en fonction de leur position relative par rapport à Dourbes. L'effet Doppler pour chacune des stations est représenté par des lignes radiales partant des stations. Une ligne bleue vers l'intérieur du graphique correspond à un effet Doppler en fréquence supérieure à celle de la balise. Autrement, les lignes rouges vers l'extérieur du graphique correspondent à un effet Doppler avec une fréquence inférieure à celle de la balise.

Ce graphique a dû être amélioré par la suite en intégrant les effets de géométrie sphériques afin de corriger des erreurs de position constatées. Ceci a été possible par l'intervention de la formule de Haversine pour déduire la distance entre deux points de coordonnées connues sur une sphère :

$$d = 2 \cdot r \cdot \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1 \cdot \cos\phi_2 \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right) \quad (4.1)$$

Avec :

- d la distance entre les deux points sur un cercle les joignant sur la sphère.
- r le rayon de la sphère.
- ϕ les coordonnées de latitude des points.
- λ les coordonnées de longitude des points.
- Δ signifiant les différences de coordonnées.

Les extrema normalisés des courbes données par `compute_doppler_shift` nous ont servi pour définir les extensions des effets Doppler.

Il existe certaines stations où ces données sont manquantes. C'est le cas pour celles où aucun intervalle `rise` n'a été trouvé.

Nous avons pu observer un regroupement de stations dans le premier événement dont les effets Doppler sont plus prononcés. Les deux autres événements ont été plus difficiles à traiter pour des raisons exposées dans la section précédente.

Par la suite, nous avons tenté de comprendre quel facteur est responsable de la visibilité d'un head echo dans les stations BRAMS.

Pour cela, nous devons nous intéresser aux points de réflexion spéculaire.

Ceux-ci correspondent aux points de la trajectoire des météores où l'onde incidente est réfléchie de manière spéculaire. C'est-à-dire que l'angle émetteur-météore est équivalent à l'angle météore-récepteur dans le plan qui unit ces trois points (voir figure 4.24).

Il est utile de rappeler que les phénomènes que nous décrivons ici impliquent non pas un seul, mais deux effets Doppler simultanément.

4.2. EXPLICATION DE LA PRÉSENCE DE HEAD ECHOS DANS LES DONNÉES BRAMS PAR LA GÉOMÉTRIE

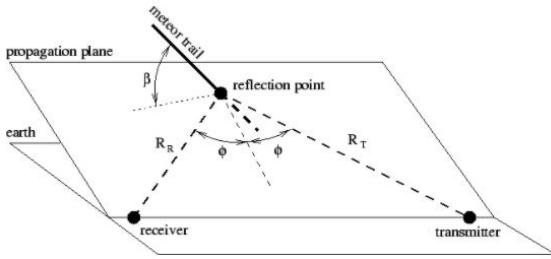


FIGURE 4.24 – Illustration de la position du point de réflexion spéculaire par rapport au météore, au récepteur et à l'émetteur. [9]

L'onde émise par la balise de Dourbes entre en contact avec le météore en mouvement. En plus, le plasma en mouvement avec le météore produit la réflexion affectée d'un nouvel effet Doppler comme expliqué dans l'article de Steyaert [8].

Afin de déduire leurs positions, il est nécessaire de connaître les coordonnées géographiques de la station d'émission de Dourbes, les positions de chaque station ainsi que la trajectoire du météore. L'ensemble de ces positions doit être réexprimé en coordonnées "dourbocentriques". C'est-à-dire en coordonnées cartésiennes dans un repère centré sur la station de Dourbes.

Pour ceci, il existe déjà une fonction dans PyBRAMS pour réaliser cette conversion géodélique en dourbocentrique. Celle-ci est basée sur un double produit matriciel de la différence de coordonnées géodéliques de Dourbes et d'un triplet de coordonnées de l'objet étudié. Au final, les coordonnées de ce dernier sont réexprimées dans l'espace tangent à la position de l'émetteur de Dourbes.

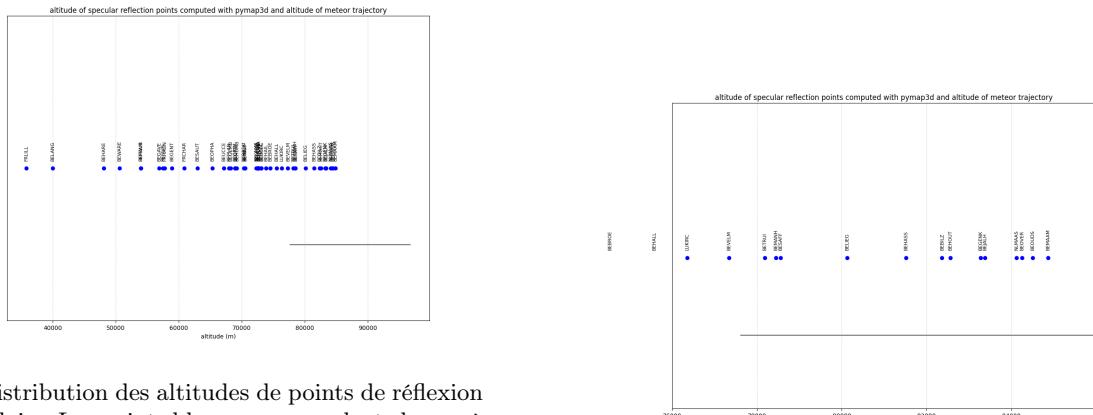
Cependant, nous pouvons noter que la conversion inverse est beaucoup plus difficile à réaliser. En effet, comme expliqué dans l'article de Ligas [7], cette conversion inverse nécessite des méthodes numériques basées sur des itérations. Cette dernière méthode n'a jusqu'à présent pas été implémentée dans le code source de PyBRAMS. Une tentative d'utiliser la méthode décrite dans l'article mentionné a été réalisée. Cependant, ses résultats étaient visiblement erronés.

Dans cette partie du travail, ce qui nous intéressera sera exclusivement l'altitude de ces points de réflexion spéculaire. Il existe déjà une fonction de PyBRAMS capable de calculer la position de ces points en coordonnées cartésiennes dourbocentriques `compute_specular_points`. La sortie de cette fonction est la position du point de réflexion spéculaire en coordonnées cartésiennes dourbocentriques. Nous pouvons alors utiliser l'approximation que l'altitude géocentrique du point est équivalente à la somme de celle de Dourbes et celle du point de réflexion spéculaire. Cette approximation devient de plus en plus mauvaise lorsque l'on s'éloigne de Dourbes (à cause de la sphéricité de la Terre). Cependant, pour les distances étudiées (à l'intérieur du royaume de Belgique), cette approximation est suffisante.

Après plus de recherches, il s'est avéré qu'il existe une librairie contenant une fonction implémentant cette conversion inverse (`pymap3d` [5]).

A partir de maintenant, cette fonction sera systématiquement utilisée pour réaliser cette conversion.

Également, la précision de celle-ci est telle qu'elle a permis de découvrir une nouvelle station dont le point de réflexion spéculaire se trouve dans l'intervalle d'altitude d'intérêt : BETRUI, soit la station de Saint-Trond dans le premier événement (voir figure 4.25).



(a) Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire. Les points bleus correspondent chacun à une station. Le nom de celle-ci est écrit au dessus. La barre grise indique l'intervalle d'altitude où le météore a parcouru sa trajectoire selon FRIPON.

(b) Zoom sur les points contenus dans l'intervalle d'altitude.

FIGURE 4.25 – Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire après conversion de coordonnées par pymap3d

Après avoir listé les stations dont les points de réflexion sont dans l'intervalle d'altitude, nous avons visuellement comparé ces stations aux autres et découvert que celles dont un head echo est visible sont exactement celles dans cette liste. Les autres ne contenant pas d'effet Doppler visible.

Par contre, le deuxième évènement ne suit pas la même logique. La majorité des stations possèdent des points dans l'intervalle d'altitude associé. Cependant, plusieurs d'entre-elles ne possèdent pas de head echo.

Nous suspectons que le météore associé soit du type underdense et ne provoque pas de réflexion spéculaire pour expliquer nos observations.

Chapitre 5

Résultats

5.1 Détermination de la vitesse à partir de la pente des head echos.

Nous montrerons dans cette section des exemples typiques et/ou cas particuliers de graphiques de résultats pour chaque évènement pour les deux méthodes utilisées.

Les tout premiers graphiques de résultats seront accompagnés d'une description du format dans lequel ces résultats sont illustrés.

Une table de résultats commentés sera donnée à la fin de chaque section dédiée aux évènements.

5.1.1 Évènement du 28 novembre 2024 16 :30UTC

Méthode `compute_doppler_shift`

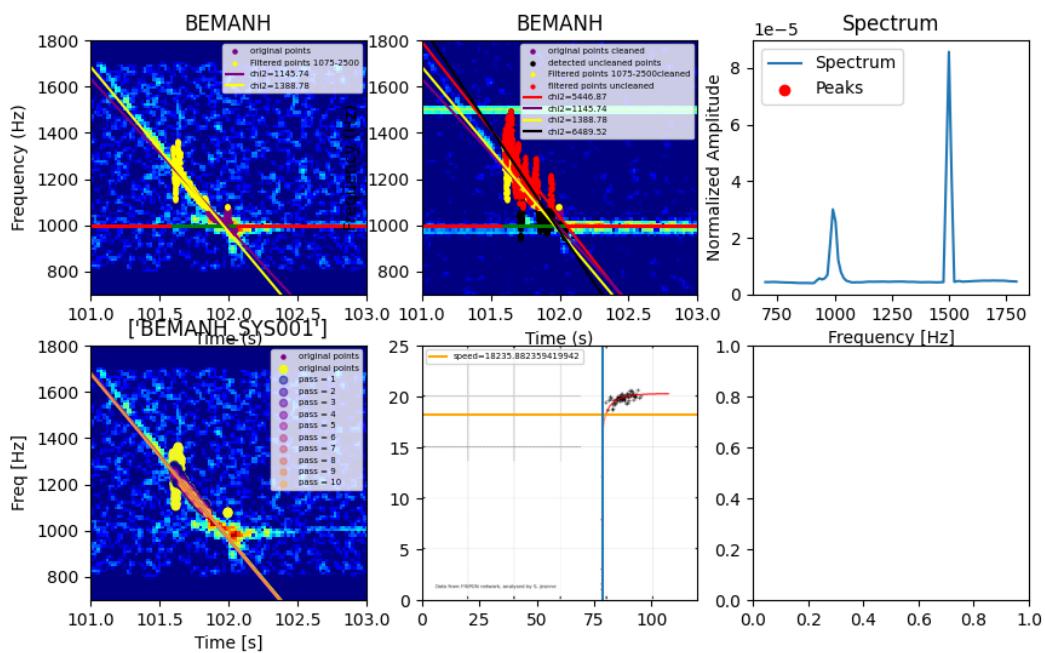


FIGURE 5.1 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station de Manhay.

Dans ce type de figure, nous montrons les divers processus de raffinement de données et nettoyages mentionnés ainsi que le résultat de l'estimation de vitesse

Voici une description des graphiques présents dans la figure :

- Le graphique en haut à gauche montre le spectrogramme avec les processus de nettoyage appliqués (balise, avions et calibrateur), ainsi que l'entièreté points de `compute_doppler_shift` en mauve. Les points en jaune sont ceux sélectionnés manuellement avec des limites de fréquence. Les lignes mauves et jaunes montrent le résultat d'une régression linéaire en utilisant chacun de ces ensembles de points.
- Le graphique en haut au centre montre le spectrogramme original (sans nettoyage) avec les points issus de `compute_doppler_shift` mentionnés précédemment ainsi que ceux obtenus si aucun nettoyage n'avait été effectué (en rouge et noir).
- Le graphique en haut à droite montre le spectre intégré de l'enregistrement original. Celui-ci permet de mettre en évidence les fréquences de signaux parasites (balise, calibrateur et autre).
- Le graphique en bas à gauche montre une superposition du spectrogramme, des points sélectionnés dans le premier graphique en jaune et ceux issus du processus d'élimination des outliers par récurrence. Les lignes montrent les régressions linéaires associées à chaque ensemble de points.
- Enfin, le graphique en bas au centre montre le résultat de l'estimation de vitesse (la valeur numérique se trouve dans la légende en m/s). Le graphique en arrière-plan est celui issu de FRIPON avec la courbe du modèle de Maria. L'axe horizontal représente l'altitude en km. L'axe vertical représente la vitesse en km/s. Une ligne bleue montre l'altitude du point de réflexion spéculaire associé à la station pour l'événement étudié. La ligne orange montre la vitesse déduite par notre algorithme.

Dans la figure montrée ici (5.1), les résultats de la station de Manhay sont illustrés. Nous pouvons observer l'amélioration de l'estimation de la pente de l'effet Doppler au cours des nettoyages et raffinement des données. Le résultat de vitesse est proche du nuage de points dans le graphique FRIPON. Cependant, nous pouvons également observer une sous-estimation de la pente dans le dernier spectrogramme. Dès lors, nous nous attendons à ce que le résultat de vitesse soit également légèrement sous-estimé.

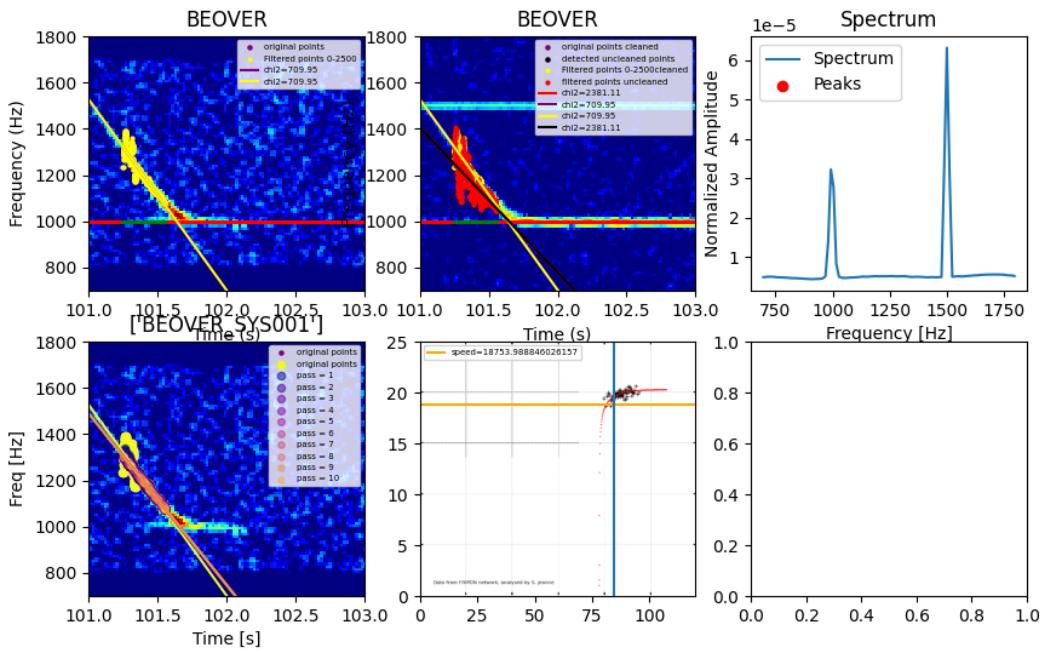


FIGURE 5.2 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station d'Overpelt.

Dans ce deuxième cas (figure 5.2), nous pouvons observer que l'élimination des outliers est particulièrement efficace pour réaliser des corrections fines et donner une approximation du head echo plus fidèle.

Méthode par spectrogramme

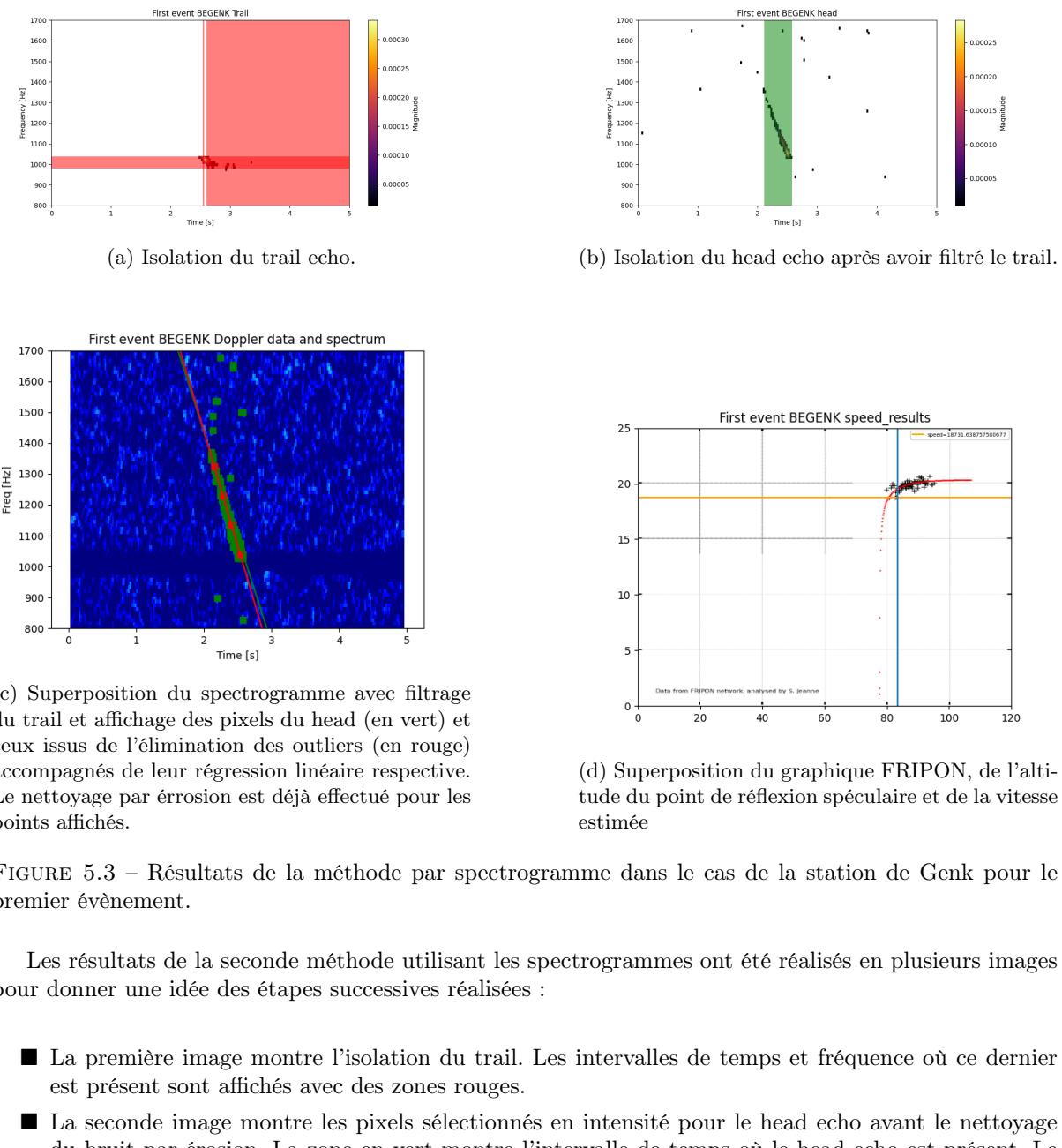


FIGURE 5.3 – Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Genk pour le premier évènement.

Les résultats de la seconde méthode utilisant les spectrogrammes ont été réalisés en plusieurs images pour donner une idée des étapes successives réalisées :

- La première image montre l'isolation du trail. Les intervalles de temps et fréquence où ce dernier est présent sont affichés avec des zones rouges.
- La seconde image montre les pixels sélectionnés en intensité pour le head echo avant le nettoyage du bruit par érosion. La zone en vert montre l'intervalle de temps où le head echo est présent. Le nettoyage du trail par un filtre coupe-bande est effectué.
- La troisième image montre le spectrogramme du signal filtré avec les points du head echo sélectionnés après érosion. Seuls les points contenus dans l'intervalle vert de la figure précédente sont maintenus pour les étapes suivantes.
- Enfin, la dernière image montre une superposition du graphique FRIPON et des lignes montrant l'altitude du point de réflexion spéculaire associé à la station et à l'évènement ainsi que la vitesse du bolide estimée.

Nous pouvons observer dans le groupe de figure 5.3 que le cas de Genk a été particulièrement facile à traiter avec cette méthode. Le résultat de l'estimation de vitesse se trouve à l'intérieur du nuage de points affiché sur le graphique FRIPON.

Résumé des résultats

Station	V. par méthode c.d.s.*	V. par méthode du s.**	commentaires
BEBILZ	16.25km/s	N/A	En dessous des points FRIPON, contaminé par le trail.
BEGENK	18.21km/s	18.73km/s	La pente obtenue par c.d.s. est sous-estimée.
BEHASS	18.91km/s	N/A	Légère sous-estimation de la pente
BEMANH	18.23jm/s	N/A	À l'extrémité du nuage de points FRIPON, sous-estimé.
BEOUDS	18.91km/s	19.02km/s	Dans le nuage de points.
BEOVER	18.75km/s	N/A	Dans le nuage de points.
BESAFF	18.26km/s	N/A	Sous-estimé.
BETRUI	14.73km/s	20.78km/s	Surestimé par la méthode du s., sur la courbe rouge dans c.d.s.
NLMAAS	18.14km/s	N/A	A l'extrémité inférieure du nuage de points.
BELIEG	N/A	17.36km/s	Légèrement sous-estimé.

TABLE 5.1 – Table des résultats pour le premier évènement

* : compute_doppler_shift
** : spectrogramme

5.1.2 Évènement du 2 septembre 2024 01 :01UTC

Cet évènement présente la particularité de posséder plusieurs cas comprenant des effets Doppler négatifs, ainsi que des artefacts causant un dysfonctionnement de la détection automatique du météore par amplitude de la méthode c.d.s.

Méthode compute_doppler_shift

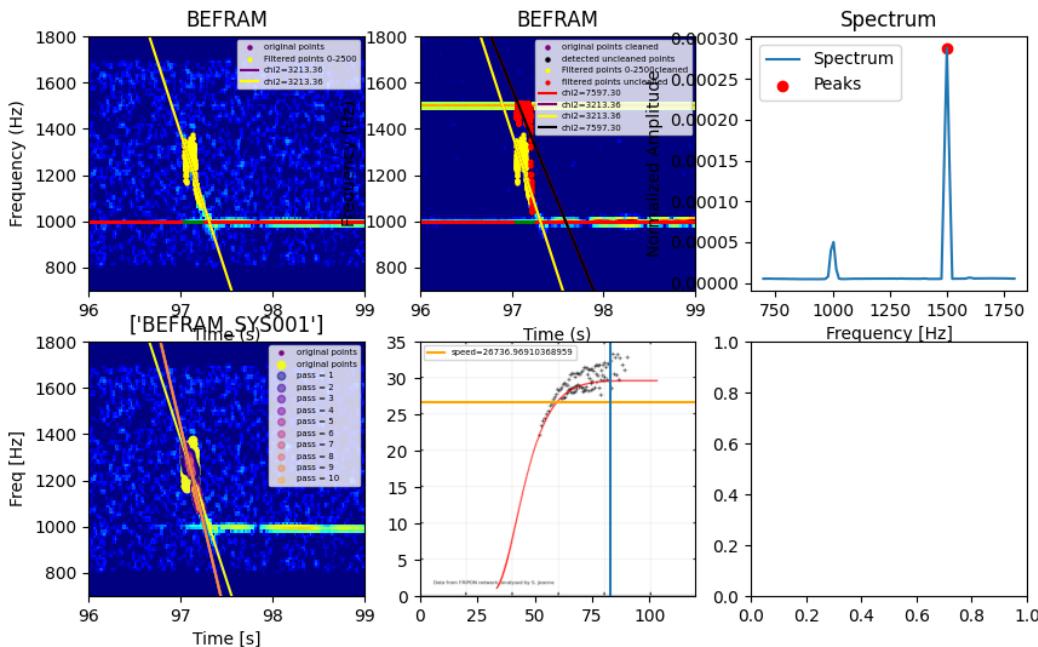


FIGURE 5.4 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station de Frameries.

Dans la figure (5.4), nous observons l'un des rares cas ayant fonctionné avec la première méthode. L'une des caractéristiques des évènements étudiés avec la première méthode pour le deuxième évènement est une sous-estimation systématique de la pente (et par conséquent, de la vitesse).

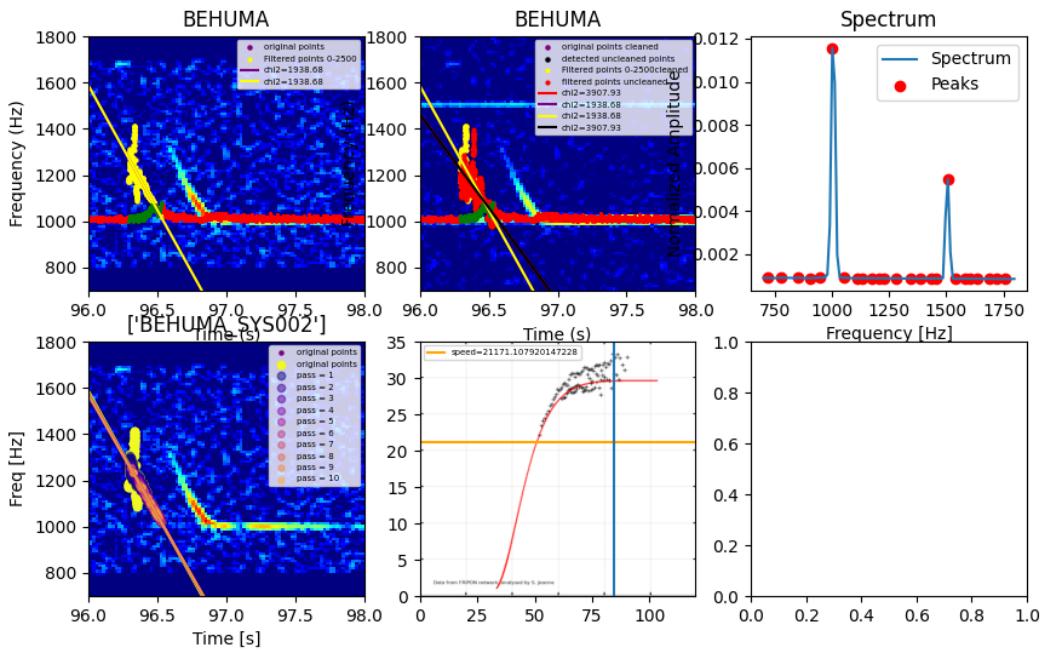
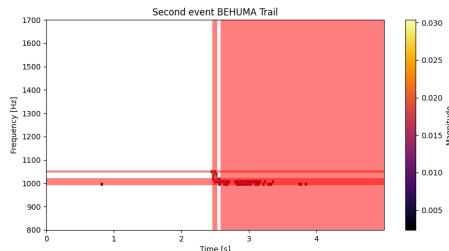


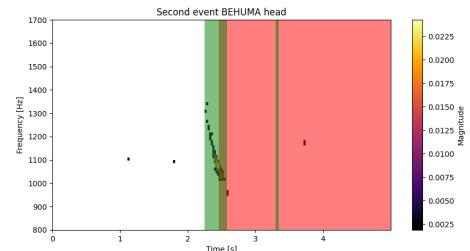
FIGURE 5.5 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station de Humain n°2.

Le cas de la station de Humain n°2 (5.5 BEHUMA est la station interférométrique contenant 6 récepteurs) est particulier dans le sens que l'intervalle **rise** ne coïncide pas avec l'évènement météoritique. Cependant, les points Doppler sont étrangement alignés avec la trace du spectrogramme. Il est clair que cet évènement n'est pas utilisable. Cependant, il illustre le type d'erreur récurrente pour cet évènement avec la première méthode.

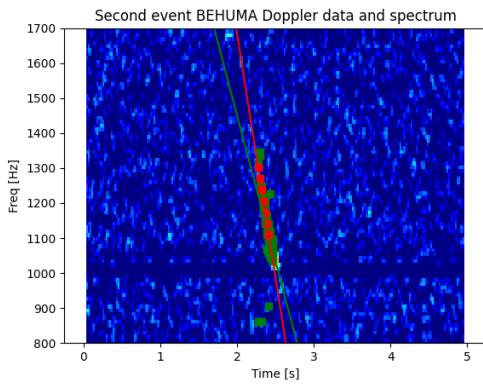
Méthode par spectrogramme



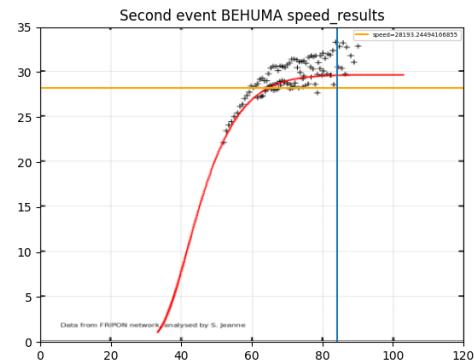
(a) Isolation du trail echo.



(b) Isolation du head echo après avoir filtré le trail.



(c) Superposition du spectrogramme avec filtrage du trail et affichage des pixels du head (en vert) et ceux issus de l'élimination des outliers (en rouge) accompagnés de leur régression linéaire respective. Le nettoyage par érosion est déjà effectué pour les points affichés.



(d) Superposition du graphique FRIPON, de l'altitude du point de réflexion spéculaire et de la vitesse estimée

FIGURE 5.6 – Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Humain n°2 pour le deuxième évènement.

Contrairement à la première méthode, BEHUMA_SYS002 (figure 5.6) a été traité sans problèmes par la nouvelle méthode utilisant le spectrogramme et a permis d'obtenir une vitesse cohérente avec les points de données de FRIPON.

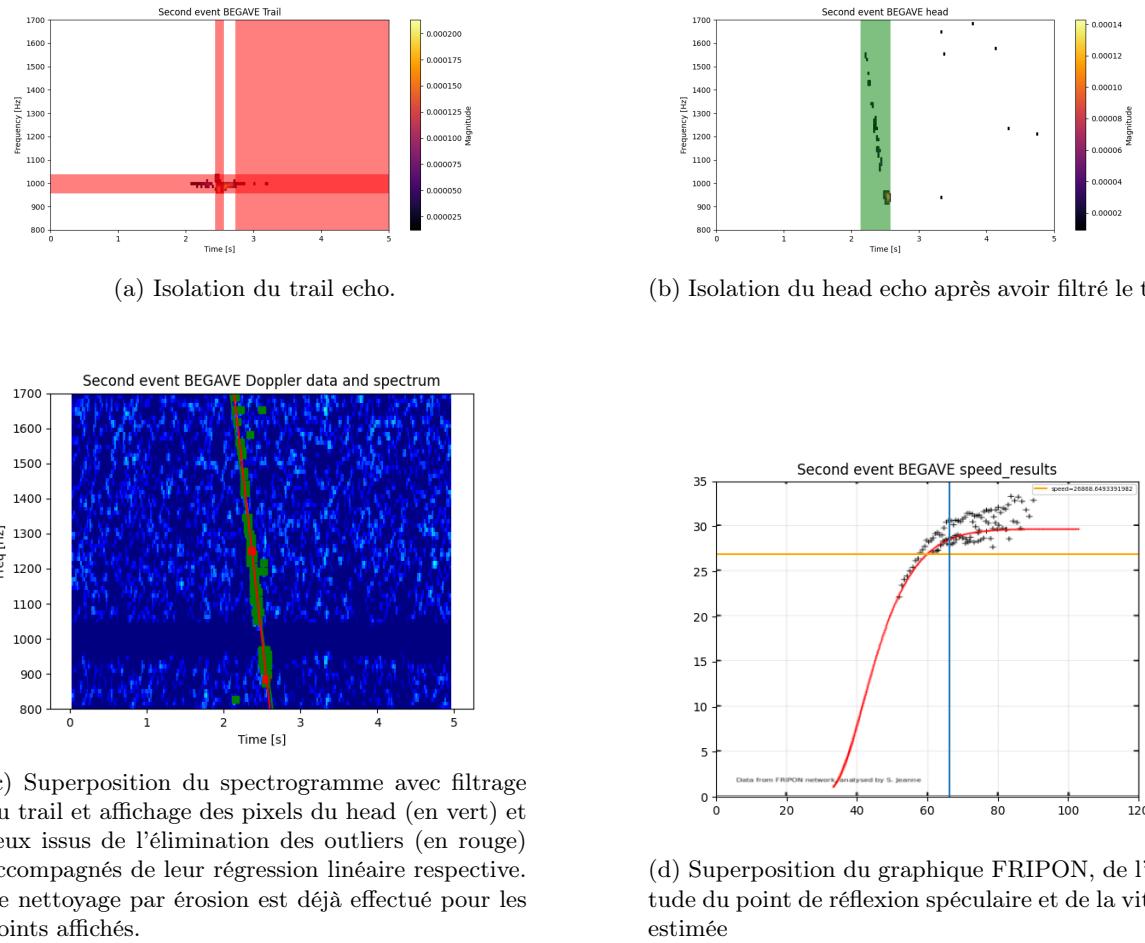


FIGURE 5.7 – Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Gavere pour le deuxième évènement.

Gavere (figure 5.7) a été notre motivation à expérimenter avec la deuxième méthode afin d'obtenir les points issus d'un effet Doppler négatif. Nous pouvons observer que cela est possible contrairement à la première méthode.

Résumé des résultats

Station	V. par méthode c.d.s.	V. par méthode du s.	commentaires
BEDINA	19.55km/s	25.10	Sous-estimée par les deux méthodes.
BEFRAM	26.732km/s	N/A	A l'extrémité inférieure du nuage de points.
BEGEMB	27.63km/s	24.77km/s	Sous-estimé par la méthode du s.
BEHUMA_SYS002	21.17km/s (faux)	28.19km/s	Bons résultats avec méthode du s.
BETELL	23.02km/s	N/A	Sous-estimé.
FRLILL	20km/s	22.31km/s	Mauvaise pente pour c.d.s. et sous-estimé par méthode du s.
BEGAVE	N/A	26.8km/s	Extrémité inférieure du nuage de points.

TABLE 5.2 – Table des résultats pour le deuxième évènement

5.1.3 Évènement du 27 août 2019 02 :53UTC

De tout les évènements considérés dans ce travail, celui-ci a été le plus difficile à traiter. Les deux seuls cas fonctionnant avec la première méthode sont faux par la même cause qui a empêché le traitement de Humain n°2 dans l'évènement précédent.

Cet évènement possède également plusieurs cas contenant un effet Doppler négatif

Méthode compute_doppler_shift

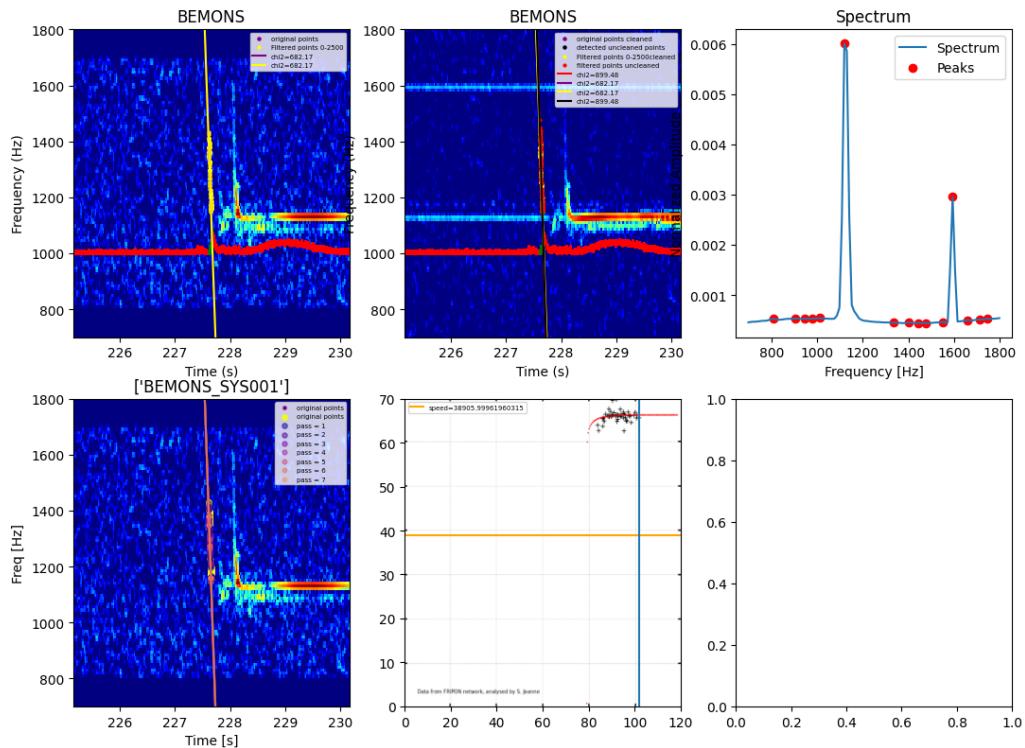


FIGURE 5.8 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station de Mons.

Les deux cas présentés ici (figures 5.8 et 5.9) sont les deux seuls ayant été capables d'être traités avec la première méthode. Nous pouvons constater que les résultats sont totalement faux à cause d'une erreur similaire à celle constatée dans la figure 5.5.

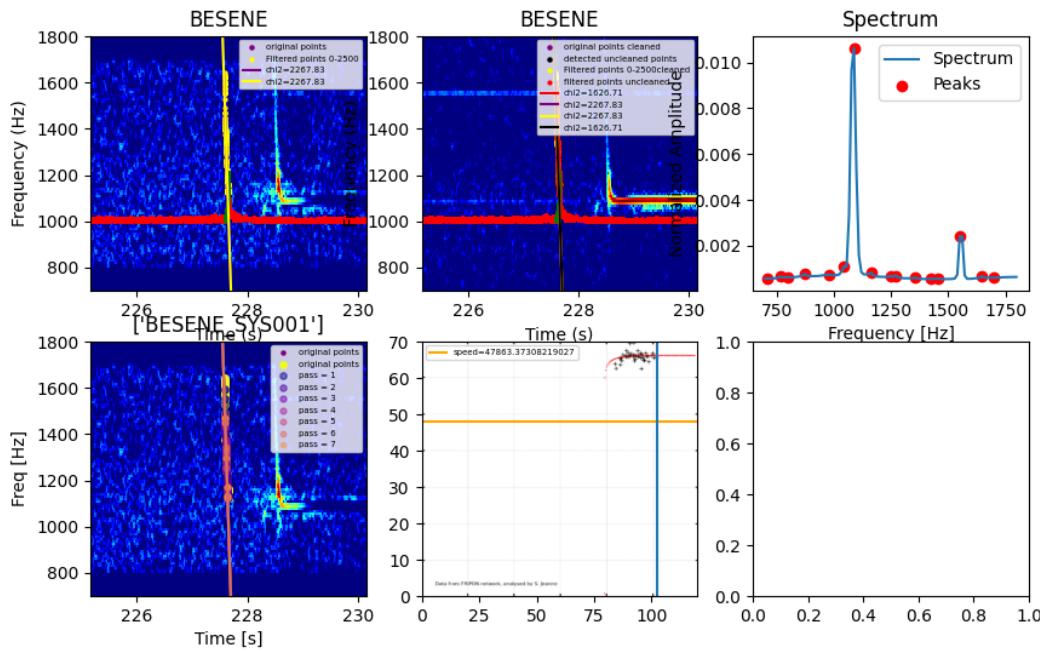


FIGURE 5.9 – Résultat de l'estimation de vitesse du météore pour la station de Seneffe.

Méthode par spectrogramme

bien que le cas de la station de Grimbergen (figure 5.10) puisse être traité par la méthode par spectrogramme, la contamination du trail echo subsistante a rendu difficile le traitement du head écho négatif au vu de sa taille réduite.

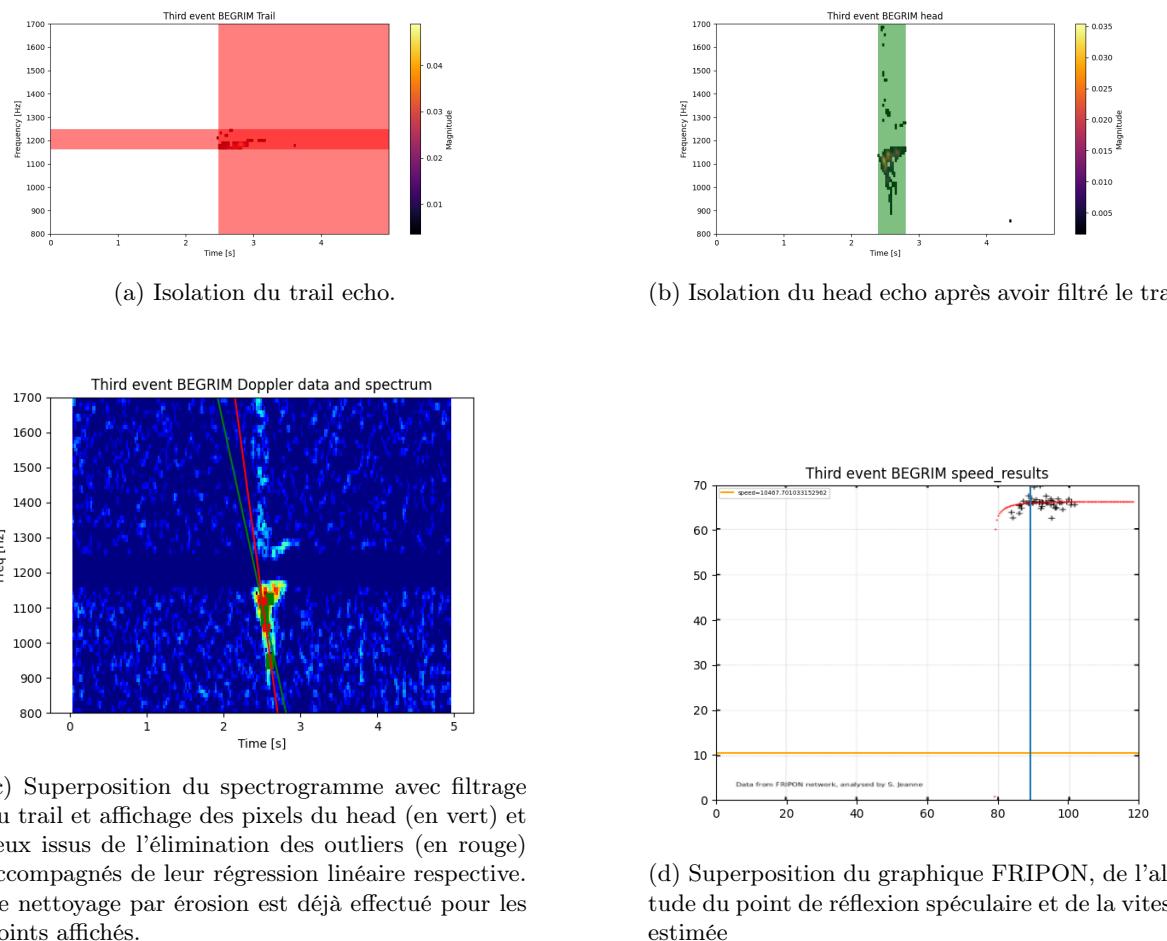


FIGURE 5.10 – Résultats de la méthode par spectrogramme dans le cas de la station de Grimbergen pour le troisième évènement.

Résumé des résultats

Station	V. par méthode c.d.s.	V. par méthode du s.	commentaires
BEMONS	38.9km/s (faux)	3.8km/s (faux)	Mauvais rise et pas assez de points pour la méthode du s.
BESENE	47.86km/s (faux)	16.44km/s	Mauvais rise et forte sous-estimation dans la méthode du s.
BEGENK	N/A	20.6km/s	Forte sous-estimation.
BEGRIM	N/A	10.46km/s	Contamination par le trail echo, forte sous-estimation.
BEOVER	N/A	24.1km/s	Données trop bruitées, forte sous-estimation.

TABLE 5.3 – Table des résultats pour le troisième évènement

5.2 Note concernant les erreurs sur les résultats de vitesse

Nous sommes conscient que nous ne pouvons pas donner de barres d'erreur sur les résultats de vitesse obtenus.

A vrai dire, nous ne sommes pas capable avec notre méthode d'estimation de vitesse (peu importe si les points Doppler ont été acquis avec un spectrogramme ou `compute_doppler_shift`) de donner une quelconque incertitude sur les résultats.

Cependant, nous avons tenté de montrer l'effet d'une erreur sur la pente des effets Doppler sur la vitesse déduite.

Bien entendu, des erreurs sur la vitesse peuvent être produites par d'autres causes, comme les positions géographiques de tous les éléments impliqués, par exemple. Cependant, nous sommes confiant quant à la précision de ces derniers.

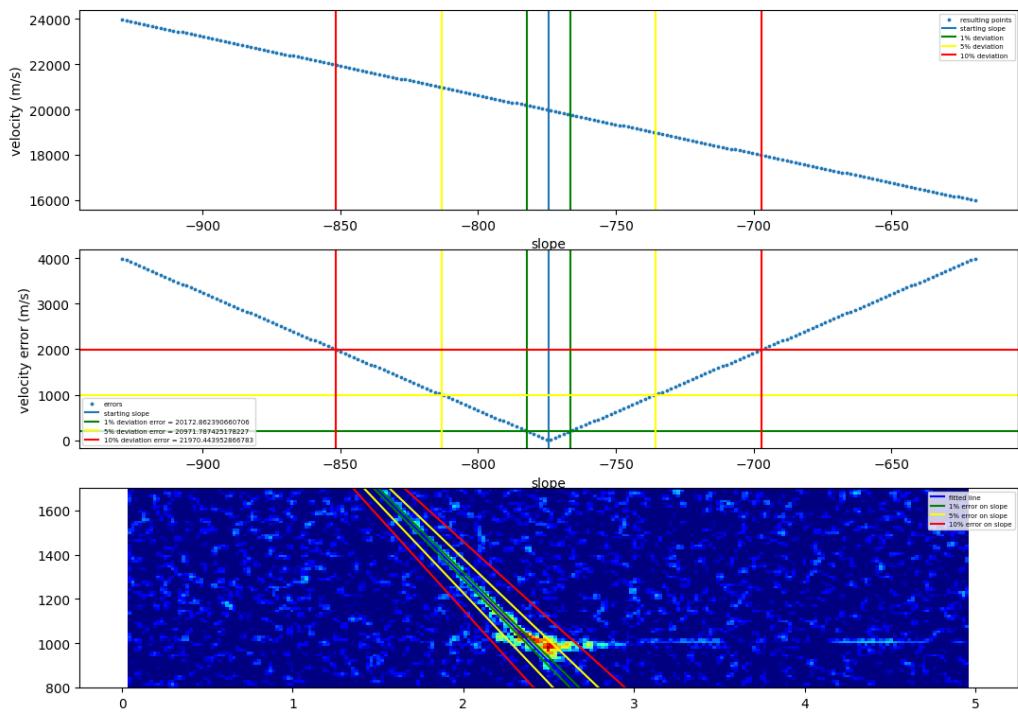


FIGURE 5.11 – Simulation d'erreurs sur la pente et répercussions sur la détermination de vitesse dans le cas de Manhay pour l'évènement 1.

Dans la figure 5.11 les effets d'erreurs sur la pente d'une hauteur de 5%, 10% et 20% sont mis en évidence sur le cas de Manhay pour le premier événement. Une visualisation de ces erreurs de pentes est affichée dans le troisième graphique sur le spectrogramme.

Donc, une erreur de 20% sur la pente provoque jusqu'à 2km/s d'erreur sur la vitesse dans ce cas-ci. La relation liant l'erreur à pente sur l'erreur de vitesse semble linéaire.

Cependant, les erreurs de vitesses obtenues dans le troisième événement semblent indiquer que la sensibilité de la relation pente-erreur de vitesse est liée à la vitesse du bolide.

5.3 Etude de l'effet de géométrie

Pour commencer, affichons les graphiques en projection polaire pour les trois évènements.

Dans un premier temps, voici le graphique associé à l'évènement 1 :

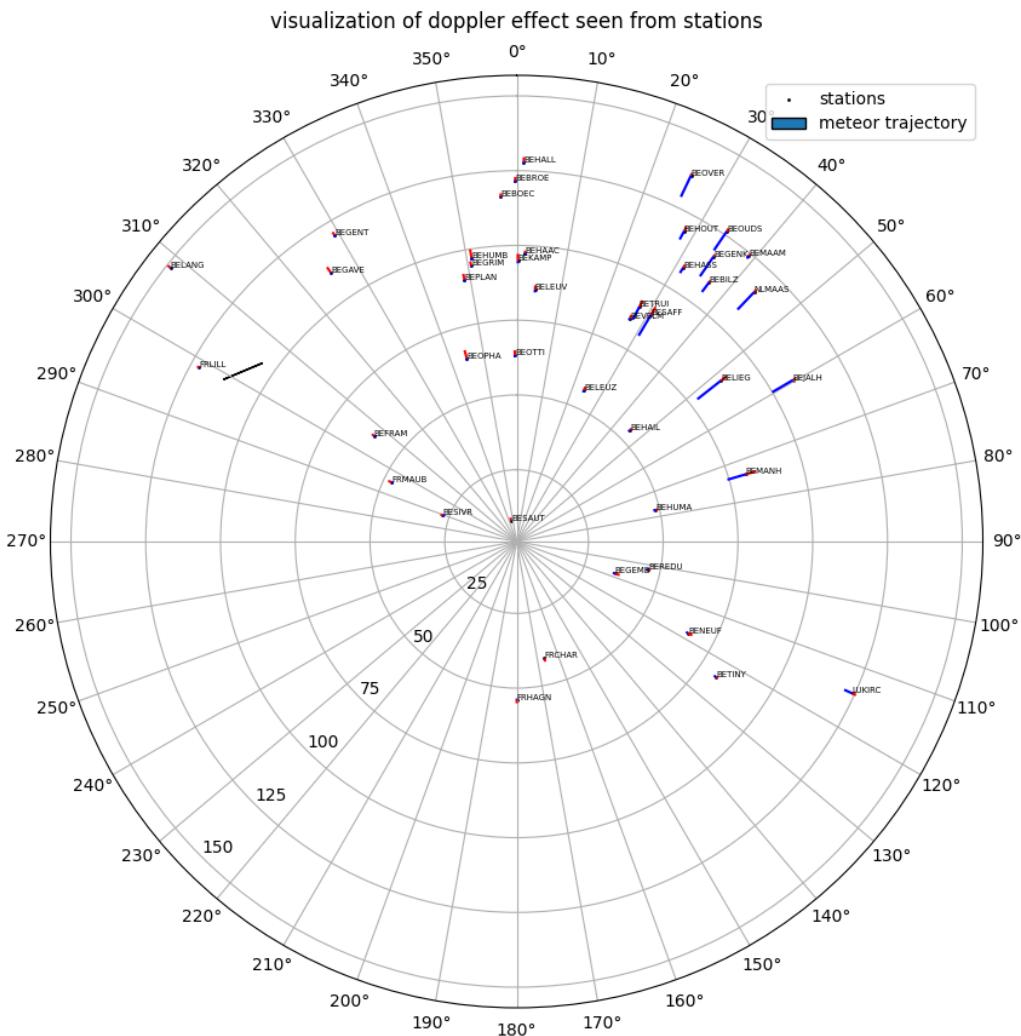


FIGURE 5.12 – Graphique en projection polaire de l'évènement 1

Nous pouvons observer dans la figure 5.12 qu'il existe un regroupement de stations au nord-est où les effets Doppler sont plus marqués. La trajectoire du météore est indiquée par la ligne noire.

Le graphique de l'évènement 2 est le suivant (figure 5.13) :

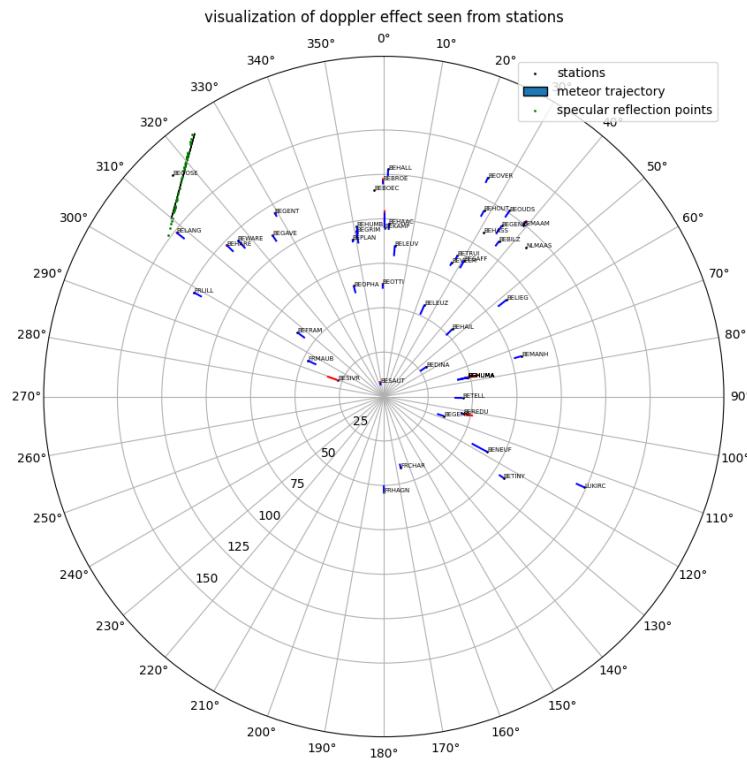


FIGURE 5.13 – Graphique en projection polaire de l'évènement 2, la position des points de réflexion spéculaire est affichée avec des points verts.

Contrairement au cas précédent, aucune tendance n'est visible. Ceci est certainement dû au mauvais traitement par la première méthode, lorsque nous avons découvert que plusieurs stations n'obtenaient pas le bon intervalle de temps où le météore existait.

Après avoir mis au point la nouvelle méthode nous avons tenté de réaliser à nouveau ce graphique avec celle-ci. Voici le résultat que nous avons obtenu (figure 5.14) :

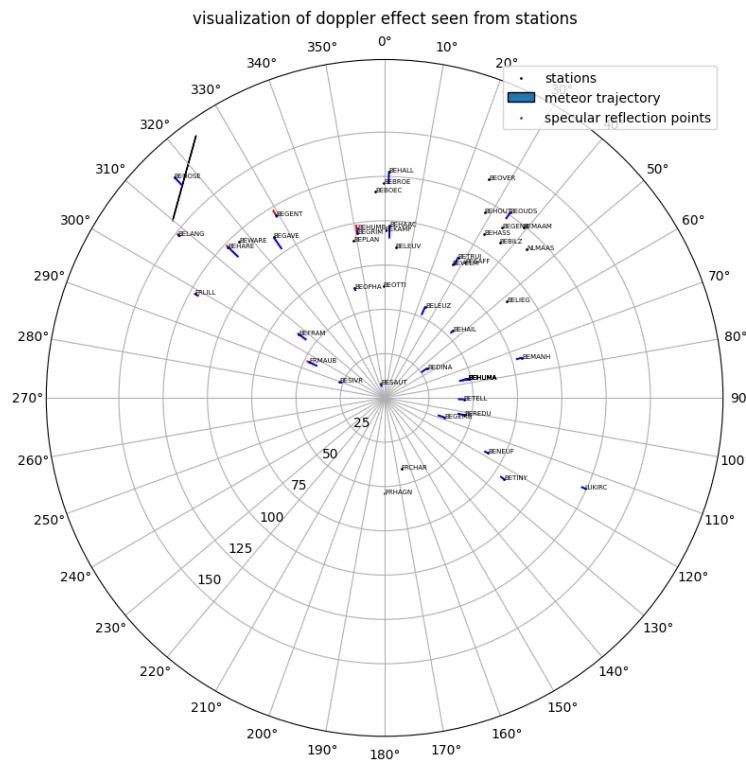


FIGURE 5.14 – Graphique en projection polaire de l'évènement 2 en utilisant la nouvelle méthode basée sur les spectrogrammes.

Nous pouvons observer que les stations avec des effets Doppler négatifs sont regroupées au nord-est.

Enfin, voici le graphique en projection polaire pour le dernier évènement (figure 5.15) :

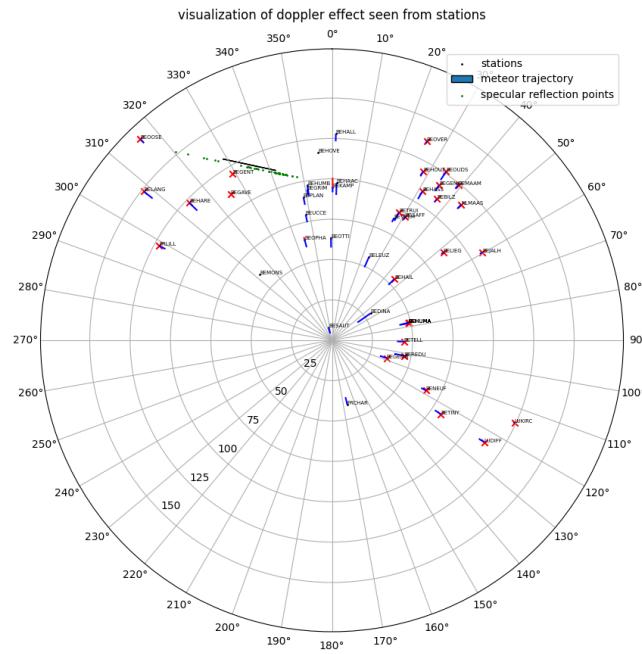


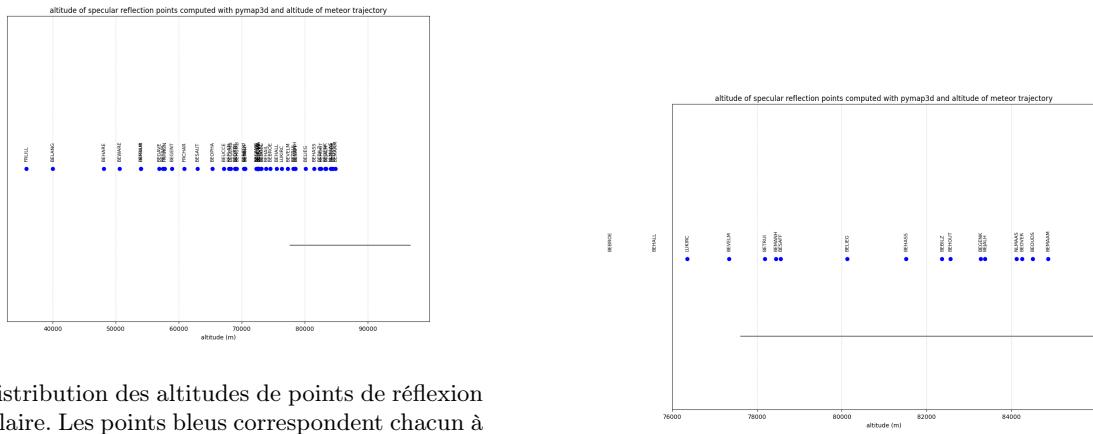
FIGURE 5.15 – Graphique en projection polaire de l'évènement 3. Les stations dont le point de réflexion spéculaire ne sont pas dans le bon intervalle d'altitude sont mentionnées avec une croix rouge.

Une fois de plus, aucune tendance n'est visible pour les mêmes raisons que précédemment.

Maintenant, intéressons-nous à l'étude de l'altitude des points de réflexion spéculaire.

Dans les figures suivantes les points de réflexion spéculaire seront représentés en bleu avec le nom de leur station noté au-dessus de chacun.

Une barre grise indiquera l'intervalle d'altitude du fireball observé par FRIPON



(a) Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire. Les points bleus correspondent chacun à une station. Le nom de celle-ci est écrit au-dessus. La barre grise indique l'intervalle d'altitude où le météore a parcouru sa trajectoire selon FRIPON.

(b) Zoom sur les points contenus dans l'intervalle d'altitude.

FIGURE 5.16 – Distribution des altitudes de points de réflexion spéculaire pour le premier évènement

Nous pouvons observer pour le premier évènement (fig 5.16) que seule une partie des points se trouve dans le bon intervalle. Il a été confirmé que seuls ces derniers possédaient un head echo dans leurs spectrogrammes.

Maintenant, pour le deuxième évènement (figure 5.17), un autre comportement est visible :

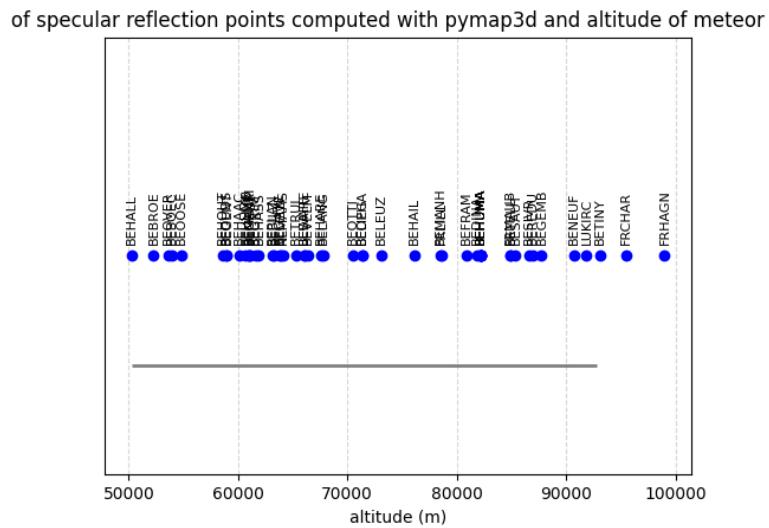


FIGURE 5.17 – Altitude des points de réflexion spéculaire pour l'évènement 2.

Nous pouvons voir que presque la totalité des points se trouvent dans l'intervalle malgré qu'il en existe certains dont aucun head echo n'est visible.

Enfin, voici la figure associée au dernier évènement (figure 5.18) :

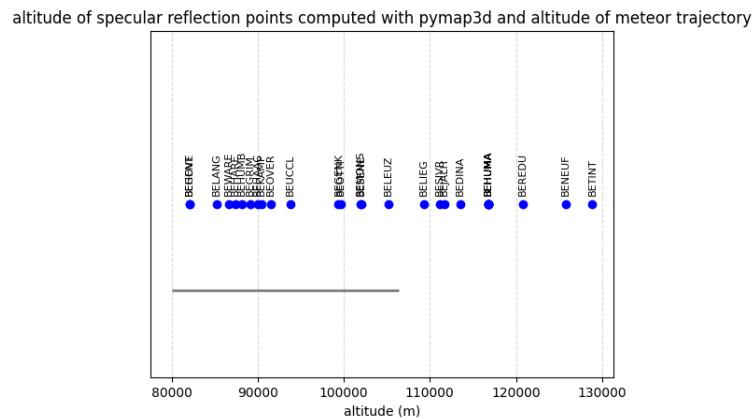


FIGURE 5.18 – Altitude des points de réflexion spéculaire pour l'évènement 3.

Cette fois, nous sommes confronté à un cas similaire à l'évènement 1.

Chapitre 6

Conclusion

Ainsi, nous allons répondre aux deux questions de ce travail :

- **Est-il possible de mesurer la vitesse d'un bolide à partir d'un head echo observé par BRAMS ?** : Oui, nous avons réussi cette estimation de vitesse sur base d'un algorithme tenant compte de la géométrie du problème pour chaque station et nécessitant la trajectoire du fireball observé par FRIPON. Les résultats de ces vitesses ont été comparés à ceux disponibles avec les informations de FRIPON et en tenant compte de l'altitude du point de réflexion spéculaire associé à chaque observation. Cette estimation de vitesse a été rendue possible par la déduction de l'effet Doppler en fonction du temps, soit par une mesure basée sur le signal brut en utilisant une méthode de comptage de passage par zéro, soit avec une méthode inédite basée sur l'analyse du spectrogramme associé à l'observation. Les résultats de ces estimations de vitesse sont mitigés, avec soit des valeurs cohérentes avec les mesures effectuées par FRIPON, soit des sous-estimations potentiellement explicable par de mauvais ajustements de la trace du head echo.
- **Peut-on expliquer par la géométrie du problème que certaines stations BRAMS sont capables d'observer un head echo tandis que d'autres ne le peuvent pas ?** : Les premier et dernier événement semblent montrer qu'une réflexion spéculaire de head echo n'est observable par des stations de réception que si l'altitude des points de réflexion spéculaire théoriques est comprise dans l'intervalle d'altitude de la trajectoire du fireball. Le deuxième événement étudié, quant à lui, ne semble pas en accord avec cette observation étant donné que des stations avec des points de réflexion situés dans cet intervalle ne possèdent pas de head echo visible (eg. BEFRAM).

Afin de répondre à ces questions, des méthodes d'analyse et de représentation de données inédites ont été implémentées.

De plus, des tests ont permis de mettre en évidence l'impact néfaste significatif de toute interférence dans les signaux enregistrés.

Ceci nous a motivé à implémenter de nouveaux codes capables d'effectuer les nettoyages de signaux et raffinement de données afin de parvenir à des résultats les plus fidèles possibles aux head echos rencontrés.

Une nouvelle méthode d'analyse de signal basé sur des spectrogrammes a été implémentée dans le but de contourner la problématique de localisation erronée du météore.

Cette dernière s'est montrée efficace dans l'analyse de head echo dont l'effet Doppler est négatif (ce qui était théoriquement impossible à réaliser avec les outils actuels à cause d'une superposition temporelle entre la partie négative du head echo et le trail echo).

Enfin, une méthode de détermination de la vitesse du fireball a été développée avec comme hypothèse une vitesse constante sur une trajectoire connue, cette méthode utilisant la pente de l'effet Doppler du head echo comme moyen d'estimation par ajustement par moindres-carrés.

L'ensemble de ces méthodes implémentées ont malgré tout montré des signes de faiblesse sur les événements 2 et 3. Le point commun à ces deux derniers est que la vitesse du bolide impliqué est supérieure à celle du premier événement.

Ceci est particulièrement vrai pour le dernier qui a provoqué systématiquement de fortes sous-estimations de la vitesse malgré des estimations d'effets Doppler visuellement proches de la réalité des

spectrogrammes.

Chapitre 7

Perspectives

Ce travail a mis en évidence de nombreuses perspectives, parmi celles-ci, des améliorations de ce qui a été implémenté, des études et questions auxquelles répondre.

Tout d'abord, le fait d'avoir été capable de déterminer des vitesses correctes dans certains cas (à travers l'étude de la pente de l'effet Doppler) permettrait d'ajouter des contraintes sur une méthode de détermination de trajectoire à partir des observations radio.

Dans un cas plus général, ceci prouve que les observations radio de fireballs peuvent mener à des résultats similaires aux mêmes observations réalisées avec des réseaux optiques. Nous rappelons que cet exploit est possible peu importe la couverture nuageuse et l'heure d'observation.

Bien sûr, nous ne pouvons pas négliger les cas où cette détermination de vitesse n'a pas été satisfaisante pour des cas évidents de sous-estimation de pentes d'effets Doppler. Dès lors, il nous paraît possible de pouvoir améliorer ces nouvelles techniques dans le but de ne pas générer ces sous-estimations.

Également, la contrainte actuelle la plus importante de la détermination de vitesse est qu'une trajectoire est nécessaire. Nous pouvons envisager la possibilité qu'une telle trajectoire ne soit pas indispensable et développer une méthode de détermination de vitesse indépendamment de cette information.

Il paraît également possible de pouvoir implémenter ces méthodes de manière automatisée dans un futur non lointain.

Nous avons également réfléchi sur la possibilité d'utiliser la partie radio du réseau FRIPON (basée sur le même principe que BRAMS, le forward-scattering). L'émetteur utilisé est le radar militaire GRAVES (*Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale*) doté d'une puissance de plusieurs mégawatts. Cette puissance rend possible l'observation de head echos sur une plage de fréquence de plusieurs kilohertz.

Les récepteurs de ce réseau possèdent une fréquence d'échantillonnage de 192kHz.

Cette fréquence d'échantillonnage plus élevée permet d'obtenir une résolution temporelle plus élevée que ce qui est actuellement possible avec BRAMS.

Bibliographie

- [1] Belgian Institute for Space Aeronomy. BRAMS : Belgian RAdio Meteor Stations, 2025. Accessed : 2025-04-12.
- [2] FRIPON Fireball Network. Fireball event #23956, 2025. Accessed : 2025-01-27.
- [3] FRIPON Team. List of stations — fireball recovery and interplanetary observation network (fripoN). Online, July 2025. Accessed July 15, 2025.
- [4] Maria Gritsevich. Determination of parameters of meteor bodies based on flight observational data. *Advances in Space Research*, 44(3) :323–334, 2009.
- [5] Michael Hirsch. pymap3d : Pure python 3d coordinate conversions for geospace ecef enu n-vectors. <https://github.com/geospace-code/pymap3d>, 2019. Version 2.7.1 or later recommended.
- [6] International Astronomical Union. Meteors & meteorites : The iau definitions of meteor terms. https://iauarchive.eso.org/public/themes/meteors_and_meteorites/, n.d. Accessed 9 August 2025.
- [7] Marcin Ligas and Piotr Banasik. Conversion between cartesian and geodetic coordinates on a rotational ellipsoid by solving a system of nonlinear equations. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56(1) :194–209, 2012.
- [8] Chris Steyaert, Felix Verbelen, and VVS Observers. Meteor trajectory from multiple station head echo doppler observations. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 08 2010.
- [9] Jean-Marie Wislez. Forward scattering of radio waves off meteor trails. In *Proceedings of the International Meteor Conference, Brandenburg*, pages 99–117, 1995.

