

## Mémoire

**Auteur** : Van den Bossche, Mathias

**Promoteur(s)** : 5554; Jehin, Emmanuel

**Faculté** : Faculté des Sciences

**Diplôme** : Master en sciences spatiales, à finalité approfondie

**Année académique** : 2020-2021

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/12732>

---

### *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.*

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE ; DÉPARTEMENT  
D'ASTROPHYSIQUE, GÉOPHYSIQUE ET  
OCÉANOGRAPHIE

EN COLLABORATION AVEC L'INSTITUT ROYAL D'AÉRONOMIE SPATIALE  
DE BELGIQUE

THÈSE DE MASTER

---

Reconstruction de la trajectoire  
des météores en utilisant les  
observations du réseau BRAMS

---

*Auteur :*

Mathias VAN DEN

BOSSCHE, ir.

*Promoteur :*

Dr. Hervé LAMY, ir.

*Co-promoteur :*

Dr. Emmanuel JEHIN

*Membres du jury :*

Dr. Dominique SLUSE - Dr. Benoît HUBERT - Dr. Jan THOEMEL

15 août 2021

# Remerciements

La réalisation de cette thèse de Master n'aurait jamais été possible sans le support que j'ai reçu de plusieurs personnes à qui je voudrais exprimer mes remerciements.

Tout d'abord je tiens à exprimer ma gratitude à mon promoteur Dr. Hervé Lamy, ir. pour sa disponibilité, sa patience et son aide pour écrire cette thèse en français, mais surtout pour partager sa connaissance et passion pour les météores avec moi.

Je tiens aussi à remercier mon co-promoteur Dr. Emmanuel Jehin, qui m'a introduit le sujet lors de son cours *Small Bodies of the Solar System* et pour son soutien durant la réalisation de ma thèse de Master.

Je desire remercier Dr. Jan Thoemel, Dr. Dominique Sluse et Dr. Benoît Hubert pour faire partie du jury lors de la défense de ma thèse.

Je voudrais adresser ma reconnaissance à Mr. Carl Johannink pour avoir accepté de nous fournir les données CAMS, que nous avons utilisées lors de cette dissertation, mais aussi à Dr. Gunter Stober et à Mr. Michel Anciaux pour les discussions sur les méthodes mathématiques.

Un grand merci aussi à mon commandant d'escadron, Maj Avi Davy Van Rompaey, qui m'a permis de faire un Master à côté de mon travail.

Je voudrais remercier en particulier mon épouse, Dicle, pour le soutien moral et pour accepter d'avoir une vie familiale fort réduite pendant 2 années.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>11</b>
<b>2 Histoire et intérêt des météores</b>	<b>14</b>
2.1 Histoire . . . . .	15
2.2 L'intérêt des météores et des météorites . . . . .	17
<b>3 La détection des météores par ondes radio</b>	<b>19</b>
3.1 Météores "underdense" et "overdense" . . . . .	20
3.2 La réflexion spéculaire . . . . .	23
<b>4 Le réseau BRAMS</b>	<b>24</b>
4.1 L'émetteur de Dourbes . . . . .	25
4.2 Les stations de réception . . . . .	27
4.2.1 Les premières stations . . . . .	27
4.2.2 Les nouvelles stations . . . . .	28
4.2.3 L'interféromètre à Humain . . . . .	29
4.3 Les données BRAMS . . . . .	30
<b>5 Modèle mathématique</b>	<b>33</b>
5.1 Système référentiel . . . . .	33
5.1.1 Système de coordonnées Cartésiennes . . . . .	33

5.1.2	Le référentiel canonique d'un ellipsoïde . . . . .	35
5.1.3	La représentation de la trajectoire d'un météore . . . . .	35
5.2	La réflexion spéculaire . . . . .	37
5.2.1	Propriété 1 : La distance minimale . . . . .	37
5.2.2	Propriété 2 : L'ellipsoïde et son plan tangent . . . . .	38
5.3	Méthodes pour obtenir une solution pour la trajectoire . . . . .	40
5.3.1	Une méthode basée uniquement sur la mesure des délais temporels . . . . .	41
5.3.2	Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et les données de l'interféromètre à Humain . . . . .	41
5.3.3	Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et sur la connaissance de la distance parcourue par le signal . . . . .	43
5.3.4	Discussion des trois méthodes . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Validation des méthodes</b>	<b>48</b>
6.1	Le réseau CAMS . . . . .	48
6.2	Comparaison . . . . .	51
<b>7</b>	<b>La programmation</b>	<b>54</b>
7.1	Détermination des délais temporels . . . . .	54
7.2	Calcul de la trajectoire . . . . .	57
<b>8</b>	<b>Résultats</b>	<b>60</b>
8.1	La trajectoire 105 . . . . .	60
8.2	Reconstruction de la trajectoire 105 en utilisant la méthode 1	61
8.3	Reconstruction de la trajectoire 105 en utilisant la méthode 2	65
8.3.1	Influence de l'erreur sur l'azimuth et l'élévation . . . . .	68
8.3.2	Influence de l'erreur sur la mesure des délais temporels	70
8.4	Reconstruction de la trajectoire en utilisant la méthode 3 . . . . .	72
8.4.1	Influence de l'erreur sur le temps d'enregistrement . . . . .	73

8.4.2	La différence en vitesse entre CAMS et BRAMS pour la trajectoire 105 . . . . .	73
8.5	Résumé des 12 trajectoires CAMS reconstruites . . . . .	77
<b>9</b>	<b>Conclusions et Perspectives</b>	<b>80</b>

# Table des figures

2.1	Illustration de la variation diurne du nombre de météores. . .	15
2.2	Les Léonides en 1833 ( <i>Seventh Day Adventist</i> ) . . . . .	16
2.3	La communication par les réflexions spéculaires . . . . .	18
3.1	Le principe du radar monostatique et du radar bistatique. . .	20
3.2	Le profil de puissance pour un météore "overdense" enregistré par la station de Redu. . . . .	21
3.3	La géométrie de la réflexion d'une onde radio par une traînée de météore [1]. . . . .	22
3.4	Le profil de puissance pour un météore "underdense" enregistré par la station de Humain. . . . .	22
3.5	La réflexion spéculaire d'un météore "underdense". Pour le système Tx-Rx, il y a une réflexion spéculaire pour la trajec- toire $b$ , mais pas pour la trajectoire $a$ . . . . .	23
4.1	Les stations du réseau BRAMS avec l'émetteur à Dourbes (tri- angle bleu) et les stations de réception (points verts), situées en Belgique, au Luxembourg et aux Pays-Bas . . . . .	25
4.2	L'émetteur de Dourbes est composé d'une antenne dipolaire croisée et d'une grille réflectrice. . . . .	26
4.3	La grille réflectrice permet une amélioration du gain théorique dans la direction verticale (courbe continue) par rapport à un émetteur sans grille réflectrice (courbe pointillée). . . . .	26
4.4	Configuration typique d'une station de réception analogique BRAMS. . . . .	28
4.5	Configuration typique d'une station de réception digitale BRAMS. . .	29

4.6	L'interféromètre situé à Humain, composé de 5 antennes Yagi en configuration Jones . . . . .	30
4.7	Le signal reçu par la station BETRUI (30/07/2020 à 11H40) est très difficile à interpréter . . . . .	31
4.8	Spectrogramme pour la station BETRUI (30/10/2020 à 11H40)	32
5.1	Le système référentiel du réseau BRAMS . . . . .	34
5.2	Le référentiel canonique de l'ellipsoïde pour une station de réception $Rx_j$ . . . . .	36
5.3	La trajectoire du météore se trouve dans le plan tangent à l'ellipsoïde passant par le point $(X'_j, Y'_j, Z'_j)$ . . . . .	39
5.4	Reconstruction d'une trajectoire par le réseau BRAMS en incluant l'azimut et l'élévation obtenus par l'interféromètre à Humain. . . . .	42
5.5	Principe CMOR : Le site principal ("Main Site") contient l'émetteur et 1 récepteur, le site distant ("Remote Site") ne contient qu'un récepteur ([2]). . . . .	45
6.1	Projection des champs de vision des caméras du réseau CAMS-Benelux. Le ciel au-dessus du Benelux à 90 km d'altitude est complètement couvert par les champs de vision des différentes caméras. . . . .	49
6.2	Optimisation des directions de pointage pour maximiser le volume couvert par le réseau CAMS dans la région 80km-120km en altitude. . . . .	50
6.3	Les trajectoires CAMS projetées dans le plan horizontal. Les trajectoires en bleu sont toutes les trajectoires enregistrées par CAMS entre le 29 juillet 2020 et le 31 juillet 2020. Les trajectoires en rouge sont celles sélectionnées pour la validation des 3 méthodes développées dans le chapitre 5. . . . .	51
7.1	Gauche : Un spectrogramme pour la station de Humain (BE-HUMA 31/07/2020 à 23H40). Droite : Le même spectrogramme après soustraction du signal direct. L'écho étudié à la figure 7.2 apparaît à 23 :43 :56. . . . .	56

7.2	Exemple de la mesure du temps d'apparition d'un écho de météore pour BEHUMA : 30/07 à 23H4. En haut : le signal brut. En bas : le signal brut filtré avec le signal direct soustrait (gauche) avec un zoom (droite). . . . .	57
8.1	Les solutions pour la position du point de réflexion pour Humain et les composantes de la vitesse en utilisant la méthode 1, en fonction de 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par le réseau CAMS sont montrés comme comparaison. . . . .	62
8.2	Les solutions pour la position, les composantes du vecteur vitesse et la valeur absolue de la vitesse totale après un calcul avec la méthode 1 et en incluant l'équation du plan tangent, pour 100 vecteurs de départ. . . . .	63
8.3	La Trajectoire 105 reconstruite dans le plan horizontal XY et le plan vertical XZ en utilisant uniquement les délais temporels. Pour comparaison, la trajectoire CAMS est montrée aussi. . .	64
8.4	Les solutions pour la position du point de réflexion pour Humain et les composantes du vecteur vitesse en utilisant la méthode 2, en fonction de 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par le réseau CAMS sont montrées comme comparaison. . . . .	65
8.5	La vitesse totale pour la trajectoire 105, calculée pour 100 vecteurs de départ en utilisant la méthode 2. . . . .	66
8.6	La trajectoire 105 reconstruite dans le plan vertical XZ (haut) et dans le plan horizontal XY (bas). Les trajectoires CAMS sont montrées pour comparaison. Le point de réflexion spéculaire pour Humain calculé par la méthode 2 se trouve le long de la direction dans laquelle l'interféromètre a observé le météore.	67
8.7	<i>lsqnonlin</i> convergeant vers une fausse solution . . . . .	68
8.8	<i>lsqnonlin</i> convergeant vers une bonne solution . . . . .	68
8.9	Influence d'une erreur (jusqu'à 2°) sur l'azimuth et l'élévation de l'écho sur la détermination de la vitesse totale pour la trajectoire 105. . . . .	69
8.10	La région de temps dans laquelle se trouve le début de l'écho identifié par le programme, pour une erreur maximale de 5% de la moyenne des délais temporels utilisés pour la reconstruction de la trajectoire 105. . . . .	71

8.11	Influence d'une erreur de 5% sur les délais temporels sur la vitesse totale. La vitesse totale est calculée avec la méthode 2 pour 1000 combinaisons de délais temporels. . . . .	71
8.12	La solution pour le vecteur de la position du point de réflexion spéculaire pour Humain et le vecteur vitesse de la trajectoire 105, calculées par la méthode 3 pour 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par CAMS sont montrées comme comparaison. . . . .	74
8.13	La vitesse totale de la trajectoire 105 pour 100 vecteurs de départ, calculée par la méthode 3 . . . . .	74
8.14	La trajectoire 105 reconstruite dans le plan XZ (haut) et dans le plan XY (bas) avec la méthode 3. La trajectoire CAMS est montrée pour comparaison. . . . .	75
8.15	Influence d'une erreur de 5% sur les délais temporels sur la vitesse totale. La vitesse totale est calculée avec la méthode 3 pour 1000 combinaisons de délais temporels. . . . .	76
8.16	Les 12 trajectoires CAMS (en rouge) et les trajectoires reconstruites par la méthode 2 (en bleu). Les trajectoires sont projetées dans le plan horizontal. . . . .	77
8.17	Les 12 trajectoires CAMS (en rouge) et les trajectoires reconstruites par la méthode 3 (en bleu). Les trajectoires sont projetées dans le plan horizontal. . . . .	78

# Liste des tableaux

6.1	Paramètres des trajectoires utilisées pour la comparaison BRAMS-CAMS. Ces trajectoires enregistrées par le réseau CAMS sont également détectées par le réseau BRAMS . . . . .	53
7.1	Intervalle de temps caractéristique sur laquelle le météore est détecté par des stations BRAMS. De gauche à droite : La trajectoire, la vitesse totale du météore, l'altitude maximale correspondant à un écho détecté par une station BRAMS, l'altitude minimale correspondant à un écho détecté par une station BRAMS et le délai entre la détection correspondante à $Alt_{max}$ et $Alt_{min}$ . . . . .	54
8.1	Paramètres de la trajectoire CAMS 105. . . . .	61
8.2	Le point de réflexion spéculaire pour BEHUMA et les composantes du vecteur vitesse, calculés pour la trajectoire 105 du fichier Excel CAMS. . . . .	61
8.3	La position du point de réflexion spéculaire pour Humain et les composantes du vecteur vitesse, calculées pour la trajectoire 105 par les trois méthodes et comparées avec les résultats CAMS	72
8.4	Résumé des différences en coordonnées du point de réflexion spéculaire pour Humain et les différences en orientation ( $\Delta\alpha$ ) du vecteur vitesse dans le plan horizontal, pour la méthode 2 et 3 . . . . .	79

8.5 Résumé des vitesses totales pour toutes les trajectoires re-  
construites avec les méthodes 2 et 3. De gauche à droite : Le  
numéro de la trajectoire du fichier CAMS, la vitesse totale me-  
surée par CAMS, la vitesse totale calculée par la méthode 2,  
la différence relative entre la vitesse calculée avec la méthode  
2 et la vitesse mesurée par CAMS, la vitesse totale calculée  
par la méthode 3, la différence relative entre la vitesse calculée  
avec la méthode 3 et la vitesse mesurée par CAMS. . . . . 79

# Chapitre 1

## Introduction

L'espace autour de la Terre n'est pas complètement vide. Il y a de manière permanente des météoroïdes, des corps solides dont le diamètre varie entre quelques microns et un mètre. Quand ces météoroïdes sont assez grands et passent au travers de l'atmosphère terrestre, ils produisent un phénomène lumineux qui intrigue beaucoup le grand public : les météores. Les météores ont été étudiés de manière visuelle depuis plusieurs siècles. Beaucoup de progrès ont été faits depuis lors et actuellement, des réseaux de caméras optiques, comme le réseau CAMS (*Cameras for Allsky Meteor Surveillance*) observent des météores en de nombreux endroits du globe, dont le réseau CAMS-BeNeLux, qui couvre notamment le ciel au-dessus de la Belgique. La plupart des météoroïdes sont trop petits et ne produisent pas de phénomène lumineux, mais quand ils passent dans l'atmosphère, ils créent une traînée ionisée localement plus dense que l'ionosphère. Cette traînée a la propriété de pouvoir réfléchir les ondes radio. Cette réflexion sera dans la plupart des cas spéculaire, ce qui signifie que la réflexion se fait en un seul point le long de la trajectoire. La position de ce point, appelé le point de réflexion spéculaire, dépend de la trajectoire du météore d'une part et de la position de l'émetteur et du récepteur d'autre part.

Ce n'est que depuis 70 ans que la détection des météores par ondes radio a été développée. Cette méthode consiste à émettre une onde radio vers le ciel, qui peut être réfléchi par la traînée ionisée créée dans le sillage des météores et cette onde réfléchi peut être enregistrée par une station de réception. Ce signal est appelé l'écho du météore. Des "*meteor radars*" pour lesquels l'émetteur et le récepteur sont co-localisés, existent depuis longtemps. Ces systèmes émettent généralement un signal pulsé, ce qui permet d'obtenir des informations sur la distance parcourue par le signal (comme c'est le cas pour par exemple le CMOR - *Canadian Meteor Orbit Radar*). Il y a aussi des ra-

dars qui utilisent une configuration multistatique, pour lesquels l'émetteur et les récepteurs ne sont pas co-localisés. Cette configuration a comme avantage de couvrir une plus grande partie du ciel, mais il est beaucoup plus difficile d'y inclure les informations sur la distance parcourue.

Depuis 2010, le réseau BRAMS (*Belgian RADio Meteor Stations*), développé par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique (BIRA-IASB) utilise aussi la réflexion des ondes radio pour la détection des météores. C'est un des seuls réseaux au monde pour lequel l'émetteur et les stations de réception ne sont pas co-localisés. En termes de nombre de stations, c'est de loin le plus grand au monde.

Un réseau de caméras optiques (tel que CAMS [3]) permet déjà de reconstruire les trajectoires des météores, en utilisant des méthodes basées sur la triangulation et la synchronisation des données. Ces réseaux ne peuvent détecter que les météores les plus brillants, qui ne constituent qu'une petite partie des objets qui tombent en permanence dans l'atmosphère terrestre. Le réseau BRAMS de son côté, ne dispose que des temps d'apparition des échos des météores, parce que l'émetteur émet un signal continu non-modulé, ce qui ne permet pas (en ce moment) d'obtenir la distance parcourue par l'onde radio. De plus, les antennes utilisées en réception ne sont pas directives. Cela permet de maximiser le nombre total de détections, mais a comme conséquence que la direction d'arrivée du signal (et donc la direction du point de réflexion) n'est pas connue. Les temps d'apparition sont légèrement différents, à cause du fait que la position du point de réflexion spéculaire est légèrement différente pour chaque station. Ces données peuvent être complémentées par des données d'un interféromètre, situé à Humain. Cet interféromètre permet d'obtenir la direction d'arrivée du signal réfléchi, contrairement aux autres stations.

Dans cette dissertation, nous proposons 3 méthodes mathématiques pour reconstruire les trajectoires des météores en utilisant les données du réseau BRAMS. La première méthode utilise uniquement les délais temporels. Pour la deuxième méthode, nous utilisons en plus des délais temporels des informations sur l'angle d'arrivée du signal obtenues par l'interféromètre à Humain. La troisième méthode suppose une modification hypothétique du signal transmis par l'émetteur, qui permettrait d'obtenir la distance parcourue par les ondes radio. Nous verrons que cette modification rendrait le problème beaucoup plus simple, mais n'est pas applicable aux données obtenues jusqu'à présent avec le réseau BRAMS. Les 3 méthodes seront testées et leurs résultats seront comparés avec ceux provenant d'observations du réseau CAMS-BeNeLux qui fournit des mesures de trajectoires et de vitesse très précises. Nous évaluerons les résultats et discuterons de l'implémentation de ces méthodes.

La structure de cette dissertation est la suivante : une brève introduction sur les météores et l'observation radio des météores est donnée aux chapitres 2 et 3. Ensuite, dans la chapitre 4, les composantes du réseau BRAMS sont expliquées en détails. Le chapitre 5 se concentre sur le développement mathématique des trois méthodes pour la reconstruction des trajectoires. Puis, le chapitre 6 donne un aperçu au lecteur comment les méthodes sont comparées avec les données CAMS. Le chapitre 7 rentre en détail sur la programmation des méthodes en Matlab et dans le chapitre 8, nous présentons les résultats obtenus et nous en discutons. La dissertation se termine par les conclusions et les perspectives au chapitre 9.

## Chapitre 2

### Histoire et intérêt des météores

Tous les jours, une masse comprise entre 5 et 270 tonnes tombe dans l'atmosphère [4]. Ce sont les météoroïdes qui apportent cette masse. Ces météoroïdes ont des origines diverses : il y en a qui ont comme corps parent un astéroïde provenant de la ceinture principale, comme il y en a qui trouvent leur origine dans les comètes ou même hors de l'héliosphère (ces derniers sont très rares).

Avant tout, il est important de clarifier les différents termes utilisés dans ce domaine de l'astronomie. Voici quelques définitions [5] :

- Météoroïde : objet naturel solide d'une taille comprise entre 30 micromètres et 1 mètre environ, provenant de l'espace interplanétaire (ou dans de rares cas de l'espace interstellaire).
- Météore : lumière et phénomènes physiques associés (chaleur, choc, ionisation) résultant de l'entrée à grande vitesse d'un objet solide venant de l'espace dans une atmosphère gazeuse.
- Météorite : tout objet solide naturel qui a survécu à la phase de météore dans une atmosphère gazeuse sans être complètement vaporisé.

Des météores se produisent très fréquemment dans l'atmosphère, mais cette présence est variable et afin de pouvoir entrer dans l'atmosphère terrestre, les météoroïdes doivent se déplacer à une vitesse minimale par rapport à la Terre. En outre, comme la figure 2.1 le montre, la rotation de la Terre et sa direction de déplacement par rapport au soleil impliquent qu'au lever du soleil les météoroïdes ont une vitesse relative par rapport à la Terre beaucoup plus grande qu'au coucher du soleil. Cet effet diurne induit qu'il y a plus de météores le matin que le soir [6].

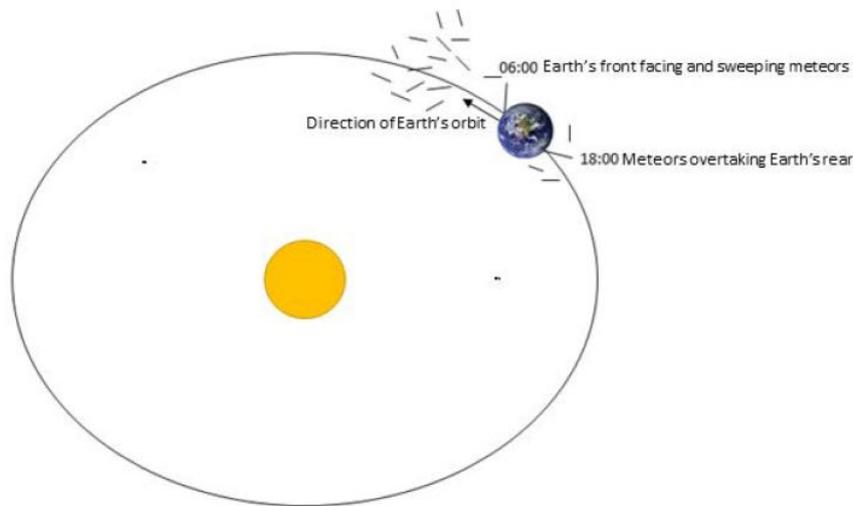


FIGURE 2.1: Illustration de la variation diurne du nombre de météores.

## 2.1 Histoire

Les premiers rapports d'observations d'un météore datent de bien avant notre ère. Il existe des témoignages issus d'Égypte antique et de Chine datant de 645 avant JC (documentés par Confucius) témoignant de ces phénomènes. Depuis lors, ce phénomène a été rapporté dans de nombreux travaux littéraires. Les météores étaient souvent expliqués par la religion : en Grèce par exemple, les météores étaient interprétés comme les âmes des morts qui montaient vers le ciel. Pour la première référence littéraire sur la chute d'une météorite en Europe, il a fallu attendre 1400. Cet événement ne correspond d'ailleurs pas au début de la recherche sur l'origine et la composition des météorites. Pour cela il faut attendre 1794 quand Chladni suggère dans "*Über den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen*" que les météorites sont d'origine extraterrestre et non pas des dépôts volcaniques, ce qui était souvent supposé à cette époque. C'est environ au même moment, aux États-Unis, que le professeur Silleman fait lui aussi des recherches sur la composition d'une météorite tombée au Connecticut. Il estimait alors également que les météorites étaient d'origine extra-atmosphérique. Les météores et les météorites ont commencé à intéresser les chercheurs quelques années plus tard, lors d'une tempête de météores de l'essai des Léonides [7].

A partir de là, les chercheurs ont commencé à suivre les phénomènes liés aux météorites. Ce suivi a permis de mettre en relation certains événements. C'est



FIGURE 2.2: Les Léonides en 1833 (*Seventh Day Adventist*)

finalement en 1861 que Kirkwood établit le lien entre les météores et les comètes : en comparant les dates des Léonides avec des calculs de trajectoire. Il découvre alors le corps parent des Léonides, la comète 55P/Tempel-Tuttle. En ce qui concerne l'enregistrement des météores, on observe une percée scientifique, conséquence du développement des caméras. En effet, une caméra disposant d'une pièce qui tourne devant la lentille, permet de visualiser la trajectoire d'un météore. C'est ainsi qu'à partir de 1881 des données relatives aux météores ont pu être collectionnées et étudiées par après [8]. Néanmoins, un problème important limitait fortement les observations : les nuits nuageuses ne permettaient pas l'observation et l'enregistrement des météores. C'est l'arrivée de la technique des radio météores qui a permis de résoudre ce problème. Cette technologie a été développée grâce au développement du radar par l'Angleterre lors de la Seconde Guerre mondiale pour faire face à l'aviation allemande. En effet, ces radars avaient un effet imprévu : le signal radar n'était pas réfléchi que par les missiles V1 et V2, mais aussi par les météores. En 1922, le scientifique Guglielmo Marconi avait déjà évoqué la possibilité qu'un signal radar peut être réfléchi dans un milieu ionisé. Cette théorie est basée sur le principe de Hertz qui stipule que les ondes électromagnétiques se réfléchissent sur un milieu conducteur. Sa théorie avait comme but principal la détection des bâtiments militaires, mais sans le savoir il a posé les bases de l'astronomie radio pour les météores.

## 2.2 L'intérêt des météores et des météorites

La question de l'intérêt de l'observation des météores se pose. La réponse se trouve dans trois domaines scientifiques différents :

- Le premier domaine se focalise sur la reconstruction de la trajectoire du météoroïde, l'identification du corps parent et sur le flux de météores. Comme déjà évoqué, la probabilité qu'un météoroïde atteigne l'atmosphère terrestre est beaucoup plus grande lors d'une pluie de météores. Il est par conséquent intéressant d'avoir un modèle qui prévoit ces essaims. Les essaims résultent généralement du passage de la Terre à travers l'orbite d'un petit corps du système solaire. La direction et la vitesse des météores peuvent alors être mesurées et associées au corps parent. La connaissance de la trajectoire des météoroïdes et leur corps parents est aussi importante pour la protection des satellites et l'ISS. En effet, comme ils ne sont pas protégés contre l'impact d'un météoroïde, une correction de trajectoire peut résoudre la situation, mais pour cela il faut savoir où et quand les essaims se présentent. Des mesures additionnelles peuvent être envisagées aussi : reporter une sortie dans l'espace ou reporter des expériences scientifiques.
- Le deuxième domaine est l'étude de la composition chimique des météorites. La composition chimique est en effet très utile pour découvrir l'origine de la météorite. Non seulement la découverte du corps parent d'une météorite nous donne la région probable de ce corps, mais la combinaison d'un grand nombre de météorites de différents corps parents nous permet de comprendre la formation du système solaire, sa composition initiale et son âge ! Il est clair qu'afin de pouvoir étudier les météorites, il est nécessaire de les trouver. Comme les météores ne se présentent qu'entre 80km et 120km d'altitude et les fireballs ne sont visibles que jusqu'à quelques dizaines de kilomètres d'altitude, une méthode de reconstruction de la trajectoire est nécessaire pour retracer l'origine des météorites récemment tombées sur terre.
- Mis à part ces deux domaines qui se concentrent sur les météores et météorites, il y a une troisième utilité qui était également, comme vu auparavant, à la base de la détection de météores par ondes radio. Les météores ont comme particularité que leur traînée ionisée reflète les signaux radio. Cela implique que la région d'altitude (80km - 120km) où les météores produisent cette ionisation, peut être utilisée dans le domaine de la propagation des ondes radios. Dans les années 50, après la formation de l'OTAN, la nécessité de pouvoir communiquer rapidement à travers de longues distances est apparue, la communication

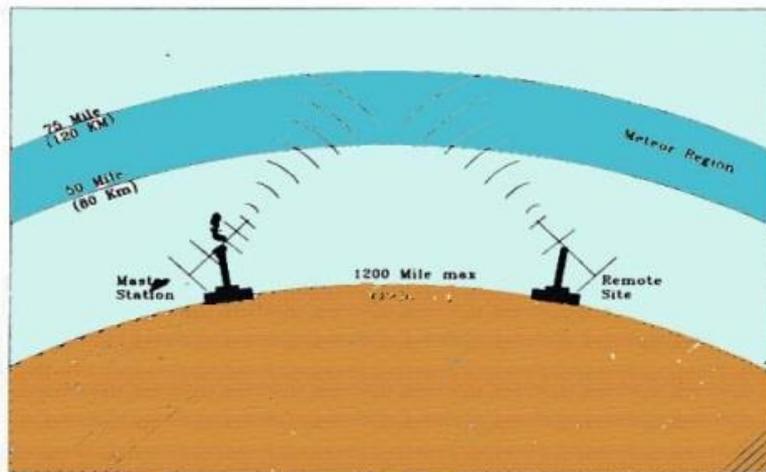


FIGURE 2.3: La communication par les réflexions spéculaires

par *Meteor Radio Burst* a vu le jour.

Le principe est assez simple : en supposant que dans l'hémisphère visible par l'antenne<sup>1</sup> il y ait des météores en permanence, il existe une possibilité de réflexion. Le système de communication envoie alors le même signal espacé de périodes très courtes dans toutes les directions. Grâce à la réflexion par les météores, certains de ces petits morceaux de signal subissent une réflexion spéculaire dont une petite partie arrivera à l'antenne de réception qui est en configuration bistatique avec l'antenne de transmission. Le récepteur collecte toutes les réflexions radio et reconstruit le message envoyé par l'émetteur. Ce principe est montré à la figure 2.3. Comme décrit par Irving et Silver [9], ce principe permettait des communications allant jusqu'à 2000 km, donnant une popularité énorme à cette méthode de communication. Lors de la mise en orbite des satellites de télécommunication, le Meteor Radio Burst a perdu beaucoup de sa popularité et a été remplacé presque entièrement par le SATCOM. Ce n'est que depuis quelques années que la communication par sursauts radio réfléchis par les météores est de nouveau considérée. La réutilisation de cette technologie est permise principalement par l'amélioration des antennes. Ce système est également beaucoup moins onéreux à mettre en oeuvre que les satellites de télécommunication.

1. L'obstruction de l'hémisphère est par exemple possible dans le cas où l'antenne se trouve dans une vallée

## Chapitre 3

# La détection des météores par ondes radio

L'enregistrement visuel des météores ne peut se faire que de nuit et avec un ciel dégagé. En outre, les météores visuels ne constituent qu'une toute petite partie des objets qui tombent dans l'atmosphère terrestre. Voilà pourquoi la détection par ondes radio est intéressante, ceci dans n'importe quelles conditions météorologiques. Le principe utilise la réflexion des ondes radio par le météore. Les ondes radio sont produites par un système radar. Il y a deux catégories de radars : les radars monostatiques et les radars multistatiques. Pour les radars monostatiques l'émetteur et le récepteur sont co-localisés et synchronisés. Ils permettent de mesurer le temps de parcours des pulses émis et déterminent la distance du point de réflexion. Le radar multistatique consiste en un émetteur et plusieurs antennes de réception (qui ne sont pas co-localisées avec l'émetteur). Un cas spécial de radars multistatiques est le radar bistatique pour lequel il y a une antenne de transmission et une antenne de réception comme présenté à la figure 3.1.

La bande de fréquences utilisée pour ce type de détections est la bande VHF (30 à 300 MHz), pour permettre la détection des météores de petite taille.

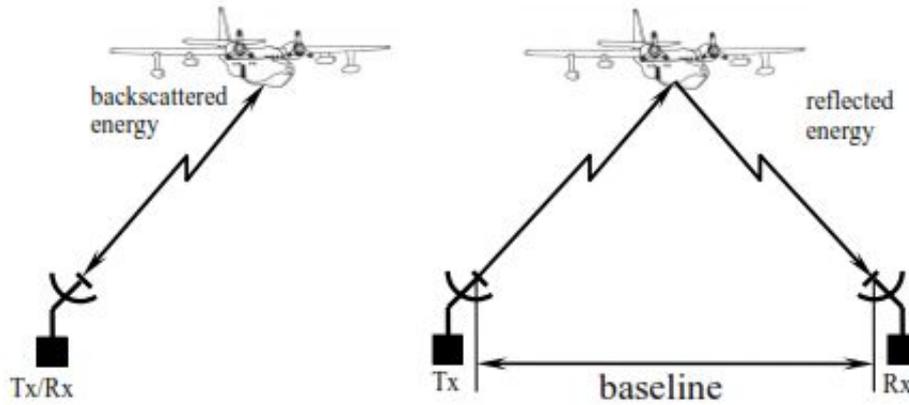


FIGURE 3.1: Le principe du radar monostatique et du radar bistatique.

### 3.1 Météores "underdense" et "overdense"

Lorsqu'un météoroïde entre dans l'atmosphère terrestre, il heurte les atomes et molécules de la haute atmosphère, s'échauffe par friction et commence à se vaporiser sous les contraintes thermiques. Les collisions entre ces atomes et molécules d'air produisent une traînée ionisée. Selon le degré d'ionisation de la traînée, on peut avoir deux catégories de météores : les météores "underdense" et les météores "overdense". Cette différence est liée au fait qu'un plasma est imperméable aux ondes radio à partir d'une densité électronique critique [1] donnée par la formule :

$$N_e = \frac{\pi}{\lambda^2 r_e} \quad (3.1)$$

Pour les ondes radio dans la bande VHF nous avons : lorsque la densité linéique électronique<sup>1</sup> est plus grande que  $\sim 2 \times 10^{14}/m$ , le plasma créé sera imperméable pour la radiation VHF provenant du radar, ce qui aura pour conséquence que le météore et toute la traînée réfléchira la radiation incidente. La conséquence de ceci est une réflexion durant plusieurs secondes avec une amplitude non-constante, comme présenté à la figure 3.2.

De l'autre côté, quand la densité est inférieure à  $\sim 2 \times 10^{14}/m$ , on parle d'un météore "underdense". Dans ce cas, la radiation est réfléchi par les électrons individuellement et la réflexion devient cohérente. La théorie de la détection

1. Comme la traînée d'un météore peut être approximée par un cylindre dont la dimension radiale est beaucoup plus grande que la dimension transversale (dizaines de km par rapport à quelques centimètres/mètres), on peut approximer la traînée par une ligne droite d'électrons.

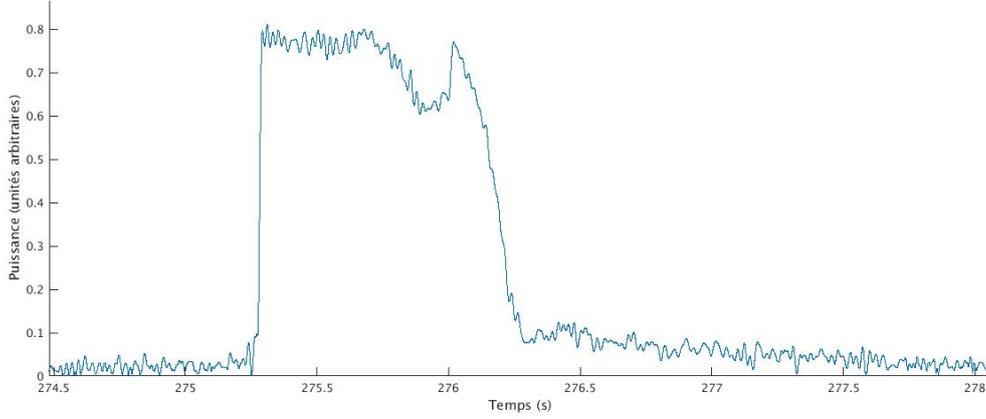


FIGURE 3.2: Le profil de puissance pour un météore "overdense" enregistré par la station de Redu.

des météores par ondes radio a été établie par McKinley dans les années cinquante et explique le profil de puissance d'un météore "underdense" [10]. Le signal enregistré (l'écho de météore) sera alors caractérisé par une montée très rapide de la puissance au moment de la création du point de réflexion spéculaire, suivi par une décroissance exponentielle liée à la diffusion ambipolaire des électrons dans l'atmosphère neutre ambiante. Mathématiquement, on a :

$$P(t = 0) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^3 r_e^2 q^2 \sin(\gamma)^2}{32\pi^2 R_T R_R (R_T + R_R) (1 - \sin(\phi)^2 \cos(\beta)^2)} \exp\left(-\frac{8\pi^2 r_0^2}{\lambda^2 \sec^2(\phi)}\right) \quad (3.2)$$

et la décroissance exponentielle au cours du temps :

$$P(t) = P(t = 0) \cdot \exp\left(-\frac{32\pi^2 D_a t}{\lambda^2 \sec^2(\phi)}\right) \quad (3.3)$$

Dans les équations 3.2 et 3.3, nous avons :

- $P_T$  : la puissance émise
- $G_T$  : le gain de l'émetteur
- $G_R$  : le gain du récepteur
- $R_T$  et  $R_R$  : les distances du point de réflexion vers l'émetteur et vers le récepteur
- $\phi$  : le demi-angle de diffusion
- $\beta$  l'angle entre la trajectoire du météore et le plan de propagation du signal
- $\gamma$  : l'angle entre le champ électrique incident et la direction vers le récepteur

- $q$  : la densité linéique
- $r_0$  : le rayon initial de la traînée
- $D_a$  : le coefficient de diffusion ambipolaire

La figure 3.3 présente la géométrie du problème et la figure 3.4, présente le profil de puissance d'un météore "underdense" enregistré par le réseau BRAMS.

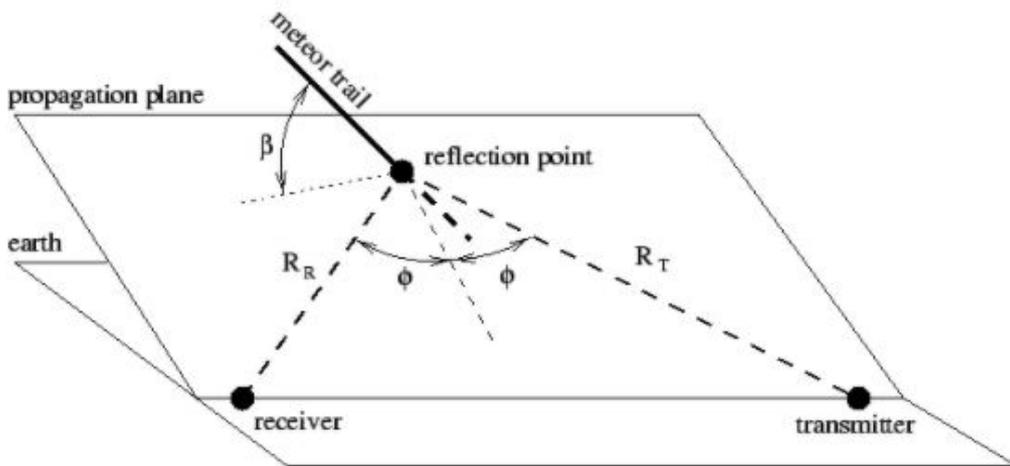


FIGURE 3.3: La géométrie de la réflexion d'une onde radio par une traînée de météore [1].

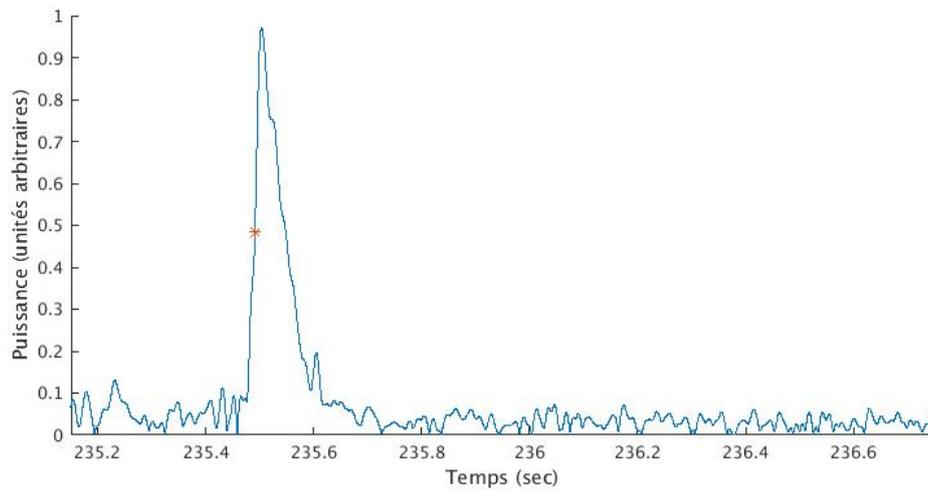


FIGURE 3.4: Le profil de puissance pour un météore "underdense" enregistré par la station de Humain.

## 3.2 La réflexion spéculaire

Une des propriétés fondamentales de la réflexion des ondes radio est qu'elle est spéculaire. Le signal incident fait un angle  $\phi$  avec le vecteur perpendiculaire à la trajectoire du météore. Le signal réfléchi vers le récepteur fera aussi un angle  $\phi$  avec le vecteur normal à la trajectoire. La trajectoire du météore est une droite tangente à un ellipsoïde. Les deux foyers sont l'émetteur et le récepteur.

Pour mieux comprendre la situation, le problème a été réduit à deux dimensions. La figure 3.5 représente la trajectoire d'un météore dans le plan XZ, avec un système bystatique Tx-Rx. Comme la région d'altitude où l'ionisation de la traînée des météores se présente et donc où les réflexions (et aussi les réflexions spéculaires) par les météores peuvent se présenter, ne couvre que 80km à 120km d'altitude, il n'existe pas d'ellipsoïde pour chaque trajectoire de météore qui sera tangente à cette trajectoire. Comme représenté sur la figure 3.5, pour la trajectoire *a*, il n'existe aucune ellipse qui a le transmetteur et le récepteur comme points focaux à laquelle cette trajectoire *a* pourrait être tangente. Pour la trajectoire *b* au contraire, il existe une ellipse qui y est tangente et qui se trouve dans la région d'altitude où la détection est possible. Un récepteur Rx pourrait donc enregistrer un écho provenant de la trajectoire *b*.

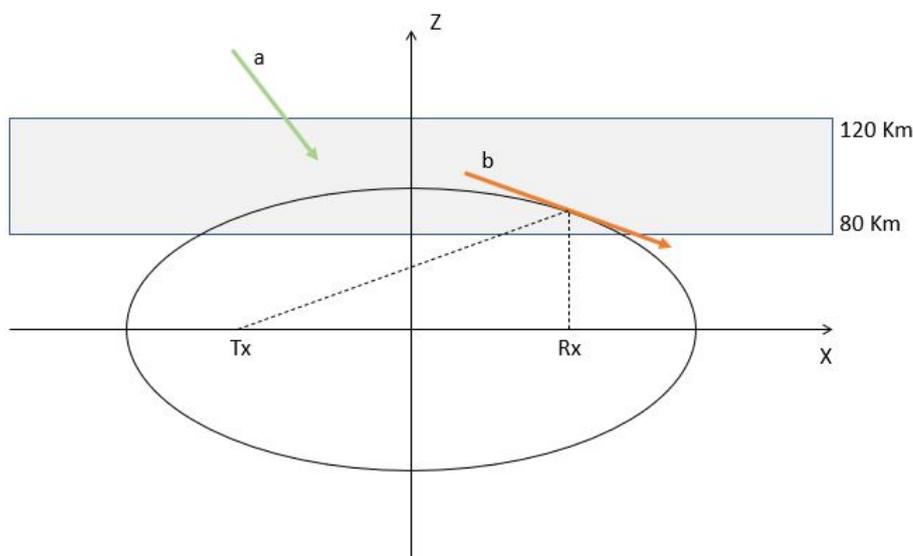


FIGURE 3.5: La réflexion spéculaire d'un météore "underdense". Pour le système Tx-Rx, il y a une réflexion spéculaire pour la trajectoire *b*, mais pas pour la trajectoire *a*.

# Chapitre 4

## Le réseau BRAMS

Le réseau BRAMS est un réseau des stations de réception radio qui enregistrent des échos de météores par la méthode du "forward scattering" (diffusion vers l'avant). BIRA-IASB a entamé ce projet en 2010 avec l'installation de l'émetteur à Dourbes et la mise en place de plusieurs stations de réception. L'hébergement et la gestion de ces stations sont faites dans une collaboration entre professionnels et amateurs. Après dix ans de développement, il y a maintenant environ 40 stations de réception actives (figure 4.1) situées non seulement en Belgique, mais aussi aux Pays-Bas et au Luxembourg. Une de ces stations de réception est un interféromètre situé sur le site radioastronomique de Humain [11] [12] [13]. En utilisant les informations des signaux reçus par les différentes stations de réception, les premiers objectifs du projet BRAMS sont :

1. L'analyse de l'activité des essaims des météores
2. La reconstruction des trajectoires
3. Une fois que les trajectoires des météoroïdes sont reconstruites, la détermination de certains paramètres physiques, comme la distribution de l'ionisation le long de la trajectoire et la masse initiale des météoroïdes

L'objectif 1 est déjà faisable avec une seule station, comme c'est le cas par exemple dans le cadre du projet citoyen *Radio Meteor Zoo*<sup>1</sup>. Pour l'objectif 2, plusieurs stations sont nécessaires et cet objectif sera le thème de cette dissertation.

---

1. [www.radiometeorzoo.be](http://www.radiometeorzoo.be)

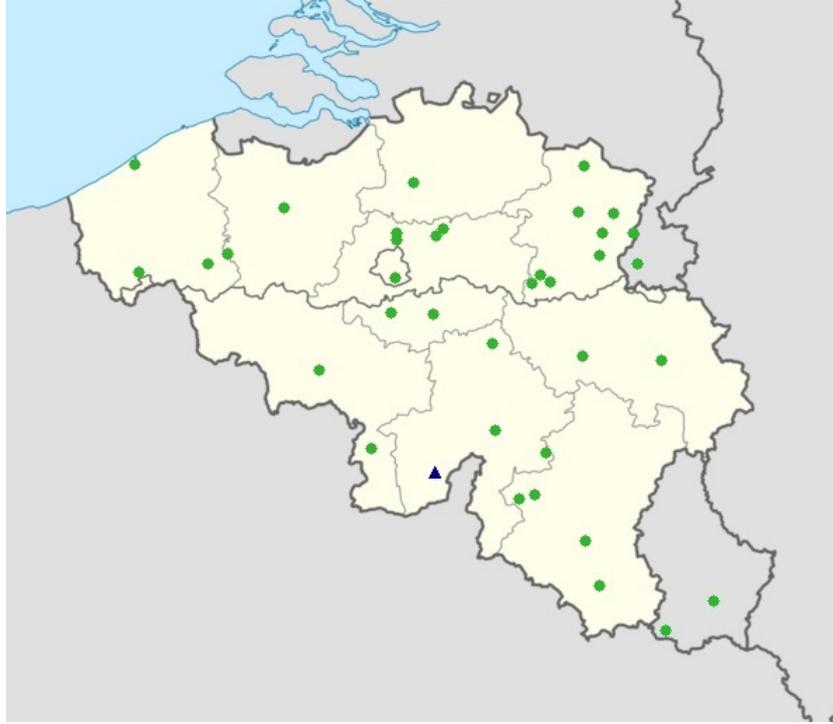


FIGURE 4.1: Les stations du réseau BRAMS avec l'émetteur à Dourbes (triangle bleu) et les stations de réception (points verts), situées en Belgique, au Luxembourg et aux Pays-Bas

## 4.1 L'émetteur de Dourbes

L'émetteur situé à Dourbes consiste en une antenne dipolaire croisée, complétée par une grille métallique de 8m sur 8m (figure 4.2), placée en dessous. Cette grille agit comme plan réflecteur et a été construite pour améliorer le gain dans la direction verticale (figure 4.3). L'antenne émet un signal sinusoïdal, sans aucune modulation, à 49.97MHz avec une puissance d'environ 120W. La fréquence a été choisie pour optimiser la possibilité de réflexion par les météores. En effet, il faut éviter une fréquence trop basse pour éviter les réflexions sur les couches de l'ionosphère et une fréquence trop grande demanderait trop de puissance<sup>2</sup> [14]. La fréquence de l'émetteur de Dourbes est protégée<sup>3</sup>, pour éviter une interférence au niveau des stations de réception par des signaux parasites émis dans cette bande de fréquence.

2. La puissance de l'écho d'un météore varie comme  $\frac{1}{f^3}$

3. Pour le réseau BRAMS, BIRA-IASB achète chaque année le droit d'émettre auprès de l'Institut Belge des Postes et Télécommunications



FIGURE 4.2: L'émetteur de Dourbes est composé d'une antenne dipolaire croisée et d'une grille réfléchrice.

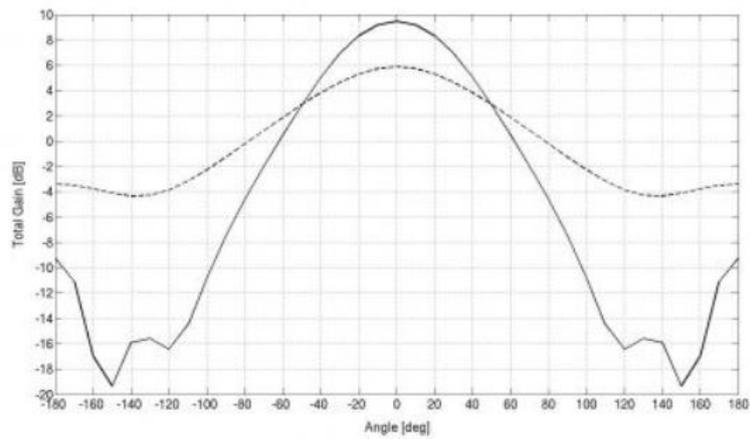


FIGURE 4.3: La grille réfléchrice permet une amélioration du gain théorique dans la direction verticale (courbe continue) par rapport à un émetteur sans grille réfléchrice (courbe pointillée).

## 4.2 Les stations de réception

Il y a actuellement deux types de stations de réception dans le réseau BRAMS : des stations de réception analogiques et des stations de réception digitales. Le principe derrière toutes les stations de réception du réseau BRAMS est le même : chaque station dispose d'une antenne Yagi<sup>4</sup> à trois éléments : un réflecteur, un dipôle et un directeur (en haut à gauche de la figure 4.4) et elles sont orientées verticalement afin que le réflecteur protège l'antenne contre les réflexions venant du sol. Cette orientation permet un gain très proche du gain théorique, ce qui est avantageux vu qu'il est très difficile de faire des mesures du gain in-situ dans les stations BRAMS.

L'antenne est reliée à un récepteur par un câble coaxial avec de faibles pertes. Le signal passe par un récepteur, qui utilise un oscillateur local pour générer une fréquence stable, que l'on choisit à 49.969 MHz et on le combine avec le signal de réception (centré sur 49.970MHz), ce qui nous permet de déplacer le signal en fréquence autour de 1KHz. Le signal est échantillonné et sauvegardé sur un disquedur. Le déplacement du signal vers 1KHz permet une cadence d'échantillonnage suffisante pour assurer la reconstruction du signal. Les données sont enregistrées au format *WAV*, toutes les 5 minutes et il y a donc 288 fichiers *WAV* par station par jour. Un GPS Garmin est utilisé pour la synchronisation temporelle des données, ce qui permet une comparaison précise entre les différentes stations.

En plus, pour les deux types de stations, un circuit électronique développé par BIRA-IASB et appelé *le calibrateur BRAMS* est connecté au système pour injecter un signal de calibration à 49.9705 MHz, soit 500 MHz au-dessus de la fréquence de l'émetteur. Ce signal sert essentiellement à des calibrations de la puissance.

Il y a néanmoins des différences entre les premières stations et les nouvelles stations qui nous détaillons ci-dessous.

### 4.2.1 Les premières stations

Les anciennes stations (figure 4.4) utilisent le récepteur analogique ICOM-R75. Le récepteur utilise un oscillateur local qui n'est pas stabilisé et donc sa fréquence varie avec la température et donc dans le temps (jusqu'à +100 Hz), mais ces variations sont lentes. Après le récepteur, le signal passe par la carte

---

4. Des antennes Yagi sont composées d'un réflecteur, un élément actif et un ou plusieurs directeurs

son externe qui sert comme échantillonneur. Cette carte son est connectée à un ordinateur local, sur lequel le programme freeware *SpectrumLab* est installé. *SpectrumLab*, qui ne fonctionne que sous *Windows*, pilote la carte son en sélectionnant la fréquence d'échantillonnage désirée :  $f_s = 5512\text{Hz}$ . *SpectrumLab* gère aussi la création des fichiers *WAV*.

## 4.2.2 Les nouvelles stations

Pour la configuration la plus récente qui est utilisée (figure 4.5), le récepteur est un récepteur digital RSP2. Contrairement à l'ICOM-R75, son oscillateur local est stabilisé en utilisant une référence externe à 24 MHz fournie par un GPSDO (GPS disciplined Oscillator). Cet oscillateur génère un signal continu à 49.969 MHz, qui est beaucoup plus stable que le signal généré par l'oscillateur dans les premières stations. Le Raspberry Pi, qui pilote le RSP2, échantillonne le signal reçu<sup>5</sup> à 6048 Hz, la fréquence d'échantillonnage disponible la plus proche de 5512 Hz utilisée dans les premières stations [11] [15].

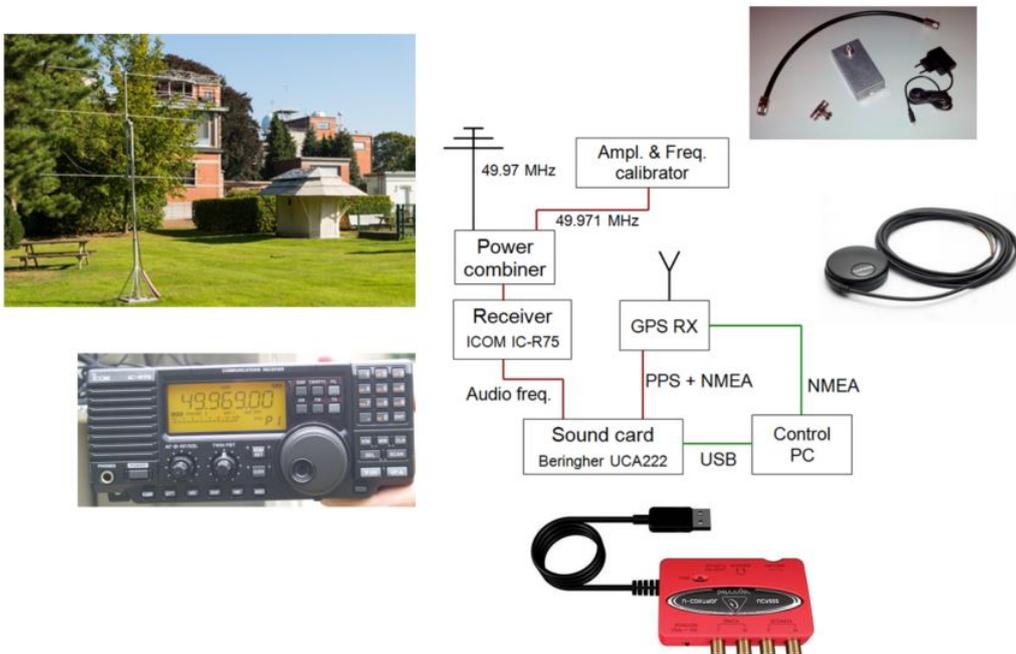


FIGURE 4.4: Configuration typique d'une station de réception analogique BRAMS.

<sup>5</sup>. L'échantillonnage est effectué grâce à un programme écrit en interne par BIRA-IASB, parce que le Raspberry Pi utilise *Linux*, ce qui ne permet pas l'utilisation de *SpectrumLab*

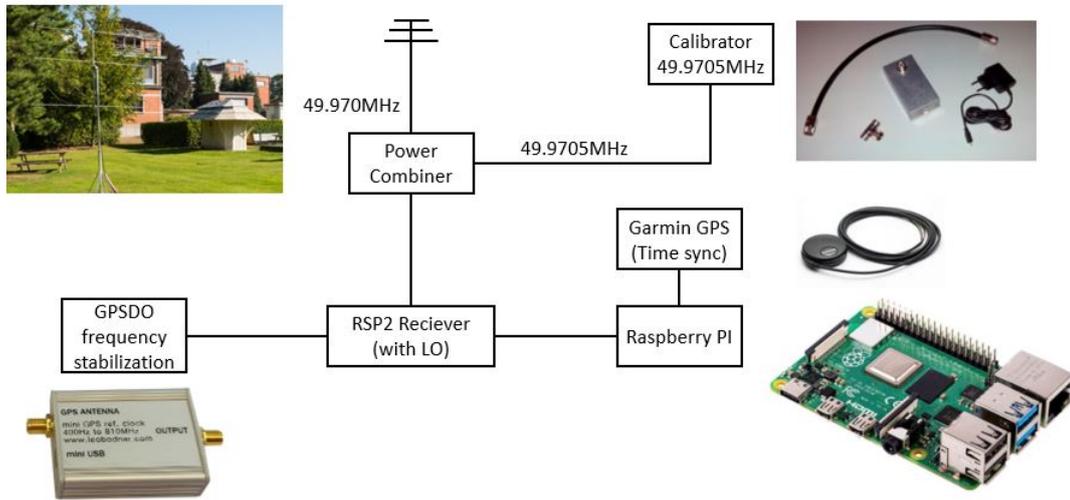


FIGURE 4.5: Configuration typique d'une station de réception digitale BRAMS.

### 4.2.3 L'interféromètre à Humain

La station de réception à Humain est équipée de 5 antennes Yagi identiques qui forment deux ensembles perpendiculaires. Les antennes sont séparées de 2 et 2.5 longueurs d'onde (correspondant à 12m et 15m) respectivement sur chaque axe, par rapport à l'antenne centrale. Les 2 axes sont alignés dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest (figure 4.6). Cette configuration, dites configuration de Jones [16], permet de déterminer la direction d'arrivée du signal par une analyse de la différence de phase entre les trois antennes sur chaque axe. Cette différence de phase dépend de la distance entre les antennes (connue) et de l'angle d'arrivée projetées dans les deux plans orthogonaux, ce qui permet de retrouver l'angle d'arrivée du signal, à savoir son azimuth et son élévation [17].



FIGURE 4.6: L'interféromètre situé à Humain, composé de 5 antennes Yagi en configuration Jones

### 4.3 Les données BRAMS

Les fichiers *WAV* sauvegardés contiennent donc le signal capté par l'antenne, échantillonné à 5512 Hz ou à 6048 Hz. Ces fichiers audio, comme celui présenté à la figure 4.7, sont très difficiles à interpréter, car ils sont composés de bruits entre 0 et 2756 Hz (ou la moitié de la fréquence d'échantillonnage), tandis que les échos des météores apparaissent seulement dans une bande de fréquence d'environ 100 Hz, centrée sur environ 1 KHz<sup>6</sup>. Par contre, si on regarde la distribution de la puissance en fonction de la fréquence au cours du temps, en calculant un spectrogramme, l'interprétation des données devient beaucoup plus simple.

En général, pour le réseau BRAMS, une transformée de Fourier rapide (FFT) sur 16384 ( $2^{14}$ ) points a été choisie pour calculer les spectrogrammes. Ce choix permet une résolution temporelle de 2.97 secondes et une résolution fréquentielle de 0.34 Hz. Ces résolutions sont suffisantes pour discriminer les échos de météores des autres signaux dans les spectrogrammes. A la figure 4.8, un spectrogramme du réseau BRAMS est présenté. Sur cette figure, on distingue un signal à 1000 Hz, qui est le signal direct provenant de l'émetteur. La raison pour laquelle on voit le signal direct est que les stations de réception sont assez proches de l'émetteur et donc la courbure de la terre n'empêche pas la réception de ce signal par les stations de réception. Les traits qui prennent la forme d'un S inversé (A,B,C et D dans la figure 4.8), sont des réflexions sur des avions de ligne volant à proximité de l'émetteur. La forme est due à l'effet Doppler parce que l'avion se déplace par rapport à l'émetteur et par rapport au récepteur.

---

6. La fréquence sur laquelle l'écho est centré dépend entre autre de la stabilité de l'oscillateur local du récepteur.

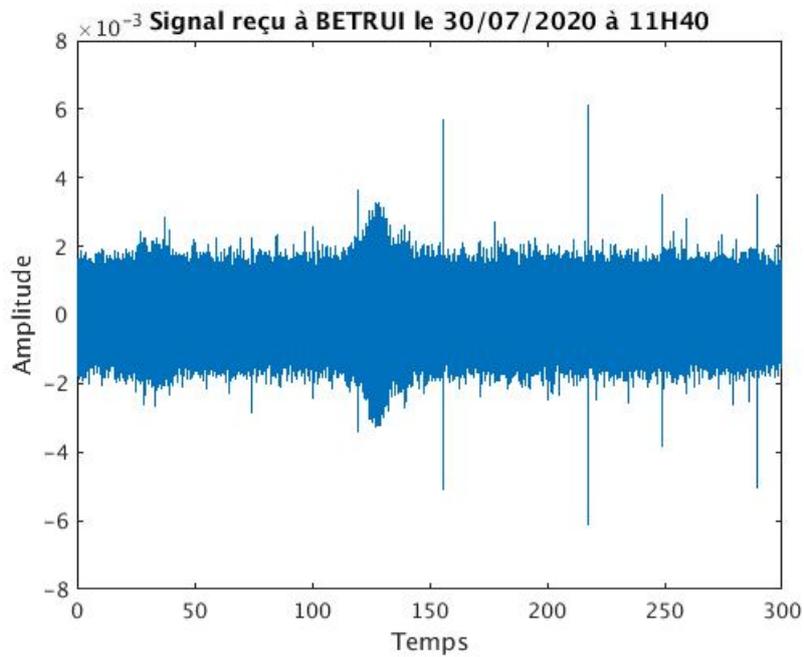


FIGURE 4.7: Le signal reçu par la station BETRUI (30/07/2020 à 11H40) est très difficile à interpréter

Dans la figure 4.8, le reste des signaux sont des échos de météores. Il existe une différence de forme entre les différents échos de météore. Les échos marqués en vert sont probablement des échos des météore underdense, qui apparaissent verticaux à cause de leur durée de vie très courte (une fraction de seconde). L'écho marqué en rouge sur la figure 4.8 est un écho de météore overdense. On tire cette conclusion de la forme irrégulière et de la durée plus longue de l'écho.

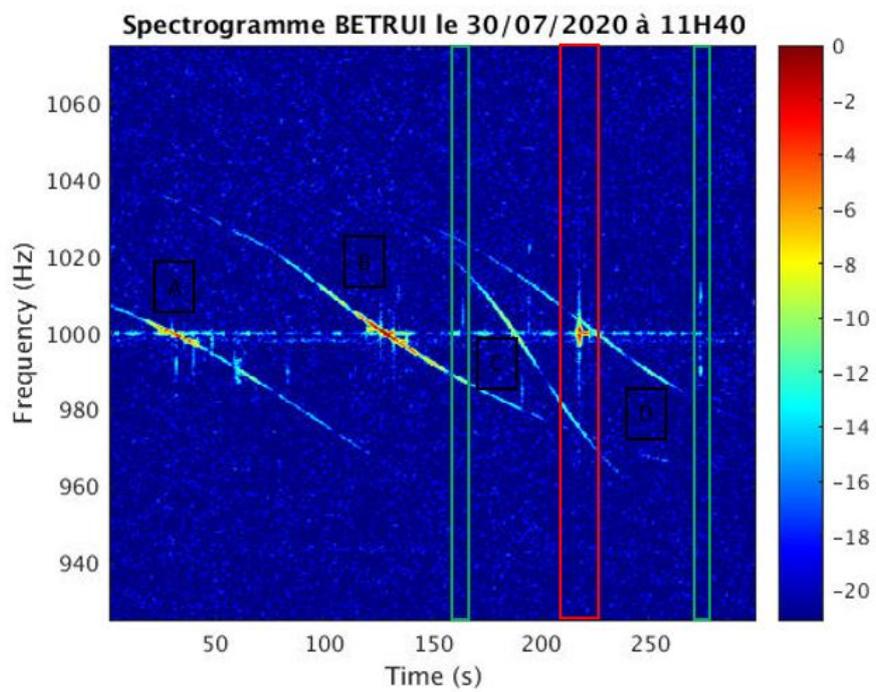


FIGURE 4.8: Spectrogramme pour la station BETRUI (30/10/2020 à 11H40)

# Chapitre 5

## Modèle mathématique

Pour la reconstruction des trajectoires des météores en utilisant le réseau BRAMS, nous travaillerons en plusieurs étapes. Commençons par la définition d'un système référentiel (section 5.1), par rapport auquel nous allons écrire toutes nos équations et grâce auquel nous pourrons comparer nos résultats avec les résultats du réseau des caméras optiques CAMS-BeNeLux (cfr. Chapitre 6 [15]). Ensuite, dans la section 5.2, des équations seront établies qui se basent sur la propriété de la spécularité de la réflexion des ondes radios par les météores. Finalement, dans la section 5.3, nous proposerons trois méthodes pour reconstruire la trajectoire d'un météore en utilisant les équations établies dans la section 5.2. A la fin de cette dernière section, les avantages et désavantages de chaque méthode seront brièvement discutés.

### 5.1 Système référentiel

#### 5.1.1 Système de coordonnées Cartésiennes

Le système de référence choisi aura une implication sur la complexité des équations. Un système de coordonnées cartésiennes est un choix qui permet de facilement calculer les distances. Il est naturel de définir Dourbes, où se trouve l'émetteur BRAMS, comme origine du système de référence. Comme dans des travaux précédents sur le réseau BRAMS on utilise l'axe Nord-Sud comme axe Y et l'axe Est-Ouest comme l'axe X [15] [18], ce choix sera maintenu dans ce travail. L'axe Z sort du plan par le règle de la main droite.

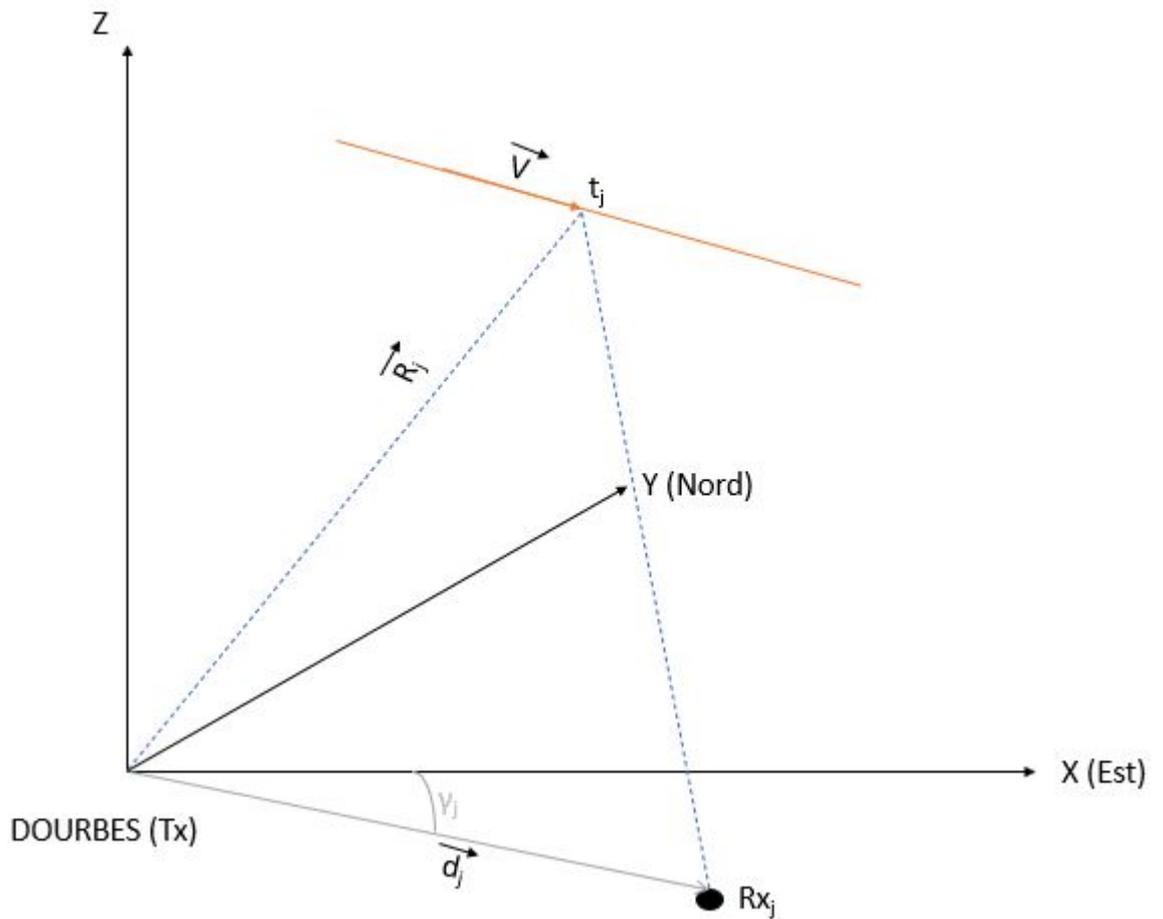


FIGURE 5.1: Le système référentiel du réseau BRAMS

Pour chaque station de réception  $Rx_j$ , on a :

- $d_j$  : la distance entre Dourbes et la station  $j$
- $\gamma_j$  : l'angle entre l'axe X et le vecteur qui connecte la station  $Rx_j$  avec Dourbes

Ceci est visualisé à la figure 5.1. Les coordonnées de la station  $Rx_j$  dans le système de référence cartésien sont donc :

$$\vec{Rx}_j = \begin{pmatrix} d_j \cos(\gamma_j) \\ d_j \sin(\gamma_j) \\ z_j \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

### 5.1.2 Le référentiel canonique d'un ellipsoïde

Si des calculs d'ellipsoïdes doivent être faits, un axe X qui passe par la station de réception avec une origine au milieu entre Dourbes et l'antenne de réception est plus opportun. Ce choix permet en effet d'utiliser alors le référentiel canonique d'un ellipsoïde dont les foyers sont l'émetteur et la station de réception, ce qui simplifie fortement les équations. L'équation d'un ellipsoïde dans ce référentiel est donné par :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (5.2)$$

où a,b et c sont les axes principaux de l'ellipsoïde. Pour transformer des coordonnées d'un référentiel canonique (avec les axes X',Y' et Z' présentés à la figure 5.2) vers le système cartésien centré sur Dourbes, on peut utiliser des matrices de rotation et de translation<sup>1</sup>. On a pour chaque station  $Rx_j$  la matrice de rotation R et la matrice de translation T, qui sont définies par :

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_j) & \sin(\gamma_j) & 0 \\ -\sin(\gamma_j) & \cos(\gamma_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} \frac{-d_j}{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

### 5.1.3 La représentation de la trajectoire d'un météore

Nous pouvons supposer que la traînée ionisée d'un météore peut être représentée par une ligne droite. Cela peut être justifiée par le fait que l'influence des forces Coriolis et l'accélération gravitationnelle sont faibles par rapport à la grandeur de la vitesse du météore : le rayon de courbure maximal induit par ces accélérations est respectivement deux et douze fois le rayon de la Terre [5]. Comme le réseau BRAMS est capable de détecter des météoroïdes de faible masse, la force de frottement peut être négligée dans un premier temps aussi. Dès lors le météore ne subit pas de décélération le long de sa trajectoire. Dans un premier temps nous allons nous contenter de cette hypothèse raisonnable, mais dans une prochaine phase, nous pourrions incorporer un modèle de décélération.

Nous pouvons donc définir la trajectoire du météore par 6 paramètres :

- la position du point de réflexion associé à une station de référence  $Rx_0$   
 $\vec{R}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$

---

1. l'influence de la courbure de la terre est négligée

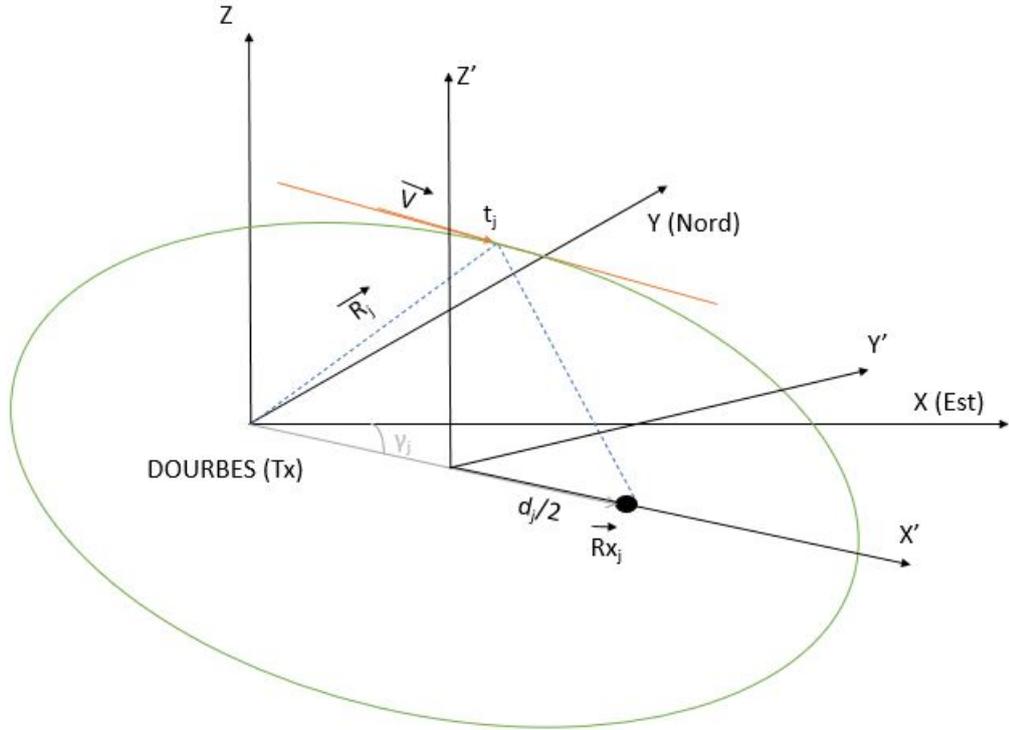


FIGURE 5.2: Le référentiel canonique de l'ellipsoïde pour une station de réception  $Rx_j$

- la vitesse du météore  $\vec{V}=(V_x, V_y, V_z)$ , qui donne donc à la fois la direction et la vitesse totale du météore

La position d'un point de réflexion le long de la trajectoire d'un météore peut alors être écrite pour chaque station de réception  $Rx_j$  :

$$\vec{R}_j = \begin{pmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \Delta t_j \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

où  $\Delta t_j = t_j - t_0$  est la différence de temps de détection entre la première réflexion et la réflexion détectée par la station de réception  $Rx_j$  (cfr. figure 5.1). Dans la détermination de  $\Delta t_j$ , on ne tient pas compte de la différence de temps de parcours de l'onde radio entre les points de réflexion et les différentes stations, parce que l'erreur est plus petite que l'erreur sur les mesures du temps d'apparition des échos.

## 5.2 La réflexion spéculaire

### 5.2.1 Propriété 1 : La distance minimale

Comme décrit par Mazur et al. [2], la propriété de la réflexion spéculaire implique que la distance totale parcourue par l'onde radio entre l'émetteur Tx, le point de la réflexion  $\vec{R}_j$  et la station de réception  $Rx_j$  est minimale quand  $\vec{R}_j$  est le point de réflexion spéculaire. Ceci est en analogie avec la loi de Fermat en optique qui stipule que la lumière choisit le chemin optique le plus court. En termes mathématiques cela se traduit par la dérivée totale de cette distance qui doit être égale à zéro. La distance totale parcourue par une onde partant de Dourbes vers un point  $(X_j, Y_j, Z_j)$  de la trajectoire du météore et puis vers le récepteur  $Rx_j$  dans le référentiel (figure 5.1) centré sur Dourbes s'écrit comme :

$$S = d(0, R_j) + d(R_j, Rx_j) = f(X_j, Y_j, Z_j, V_x, V_y, V_z) \quad (5.5)$$

et donc S est une fonction de six variables, dont 3  $(X_j, Y_j, Z_j)$  qui varient avec le temps au fur et à mesure que la trajectoire est créée.

$$S = \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2} + \sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2} \quad (5.6)$$

La dérivée totale peut être écrite comme :

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial X_j} \frac{dX_j}{dt} + \frac{\partial S}{\partial Y_j} \frac{dY_j}{dt} + \frac{\partial S}{\partial Z_j} \frac{dZ_j}{dt} \quad (5.7)$$

Les dérivées partielles pour la station  $Rx_j$  sont respectivement :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial X_j} &= \frac{X_j}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} + \frac{X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)}{\sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} \\ \frac{\partial S}{\partial Y_j} &= \frac{Y_j}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} + \frac{Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)}{\sqrt{(Y_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} \\ \frac{\partial S}{\partial Z_j} &= \frac{Z_j}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} + \frac{Z_j - z_j}{\sqrt{(Y_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} - \frac{dX}{dt} &= V_x \\ - \frac{dY}{dt} &= V_y \end{aligned}$$

$$- \frac{dZ}{dt} = V_z$$

Nous pouvons écrire la dérivée totale pour la station de réception  $Rx_j$  comme :

$$\begin{aligned} & \frac{X_j \cdot V_x + Y_j \cdot V_y + Z_j \cdot V_z}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} + \\ & \frac{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)) \cdot V_x + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot V_y + V_z \cdot (Z_j - z_j)}{\sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} = 0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Incluant l'équation 5.4 dans l'équation 5.9 en utilisant  $t_j = \Delta t_j$  par simplicité (en supposant  $t_0 = 0$ ), nous donne pour la station  $Rx_j$  :

$$\begin{aligned} & \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j) \cdot V_z}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} + \\ & \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j - z_j) \cdot V_z}{\sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} \\ & = 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

## 5.2.2 Propriété 2 : L'ellipsoïde et son plan tangent

Vu que le point de réflexion spéculaire se trouve sur un ellipsoïde avec l'émetteur et la station de réception comme foyers, nous essayons d'utiliser cette conséquence de la réflexion spéculaire. Considérons l'équation générale d'un ellipsoïde de révolution autour de l'axe  $X'$  avec distance focale  $f$  :

$$\frac{X'^2}{a^2} + \frac{Y'^2}{b^2} + \frac{Z'^2}{b^2} = 1 \quad (5.11)$$

Etant donné que les demi petits-axes peuvent être écrit comme  $b = c = \sqrt{a^2 - f^2}$ , l'équation précédente devient :

$$\frac{X'^2}{a^2} + \frac{Y'^2}{a^2 - f^2} + \frac{Z'^2}{a^2 - f^2} = 1 \quad (5.12)$$

On peut démontrer que l'équation pour le plan tangent dans le référentiel canonique de l'ellipsoïde, qui passe par le point  $(X'_j, Y'_j, Z'_j)$  est donné par :

$$\frac{X' \cdot X'_j}{a^2} + \frac{Y' \cdot Y'_j}{a^2 - f^2} + \frac{Z' \cdot Z'_j}{a^2 - f^2} = 1 \quad (5.13)$$

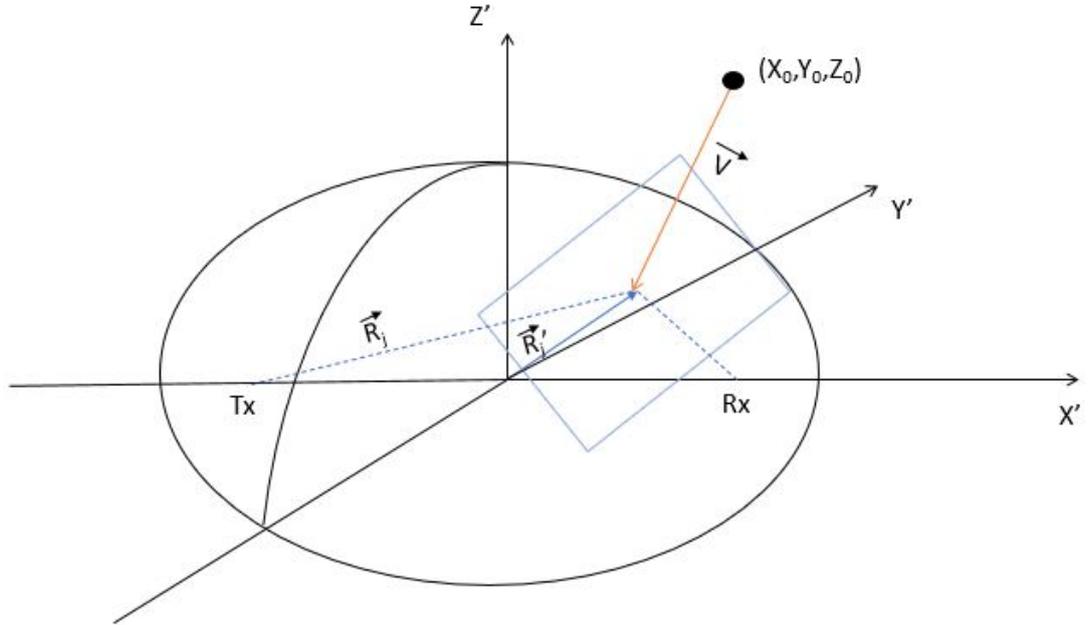


FIGURE 5.3: La trajectoire du météore se trouve dans le plan tangent à l'ellipsoïde passant par le point  $(X'_j, Y'_j, Z'_j)$

Chaque point de réflexion du météore pour d'autres stations se trouve donc dans le plan tangent. Mais en plus de ça, étant donné que la traînée suit une ligne droite, le plan tangent dans laquelle se trouve le traînée du météore doit passer par  $(X_0, Y_0, Z_0)$ . On obtient donc comme contrainte :

$$\frac{X'_0 \cdot X'_j}{a^2} + \frac{Y'_0 \cdot Y'_j}{a^2 - f^2} + \frac{Z'_0 \cdot Z'_j}{a^2 - f^2} = 1 \quad (5.14)$$

dans le référentiel canonique de l'ellipsoïde de la station  $Rx_j$ . Afin d'obtenir cette équation dans le système de coordonnées cartésiennes centré sur Dourbes, on applique les transformations 5.3 ce qui nous donne finalement comme equation :

$$\begin{aligned} & \frac{(X_0 \cdot \cos(\gamma_j) + Y_0 \cdot \sin(\gamma_j) - d_j/2) \cdot (X_j \cdot \cos(\gamma_j) + Y_j \cdot \sin(\gamma_j) - d_j/2)}{a^2} \\ & + \frac{(Y_0 \cdot \cos(\gamma_j) - X_0 \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot (Y_j \cdot \cos(\gamma_j) - X_j \cdot \sin(\gamma_j))}{a^2 - f^2} + \frac{Z_0 \cdot Z_j}{a^2 - f^2} = 1 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Nous devons encore trouver une équation pour  $a$ , qui peut être déduite de la définition de la distance focale d'une ellipse.  $a$  étant le demi grand-axe, pour chaque point  $X_j$  sur l'ellipse nous avons :

$$2a = d(Tx, \vec{X}_j) + d(\vec{X}_j, Rx) \quad (5.16)$$

ou encore :

$$2a = \sqrt{(X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2)} + \sqrt{((X_j - d_j \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2)} \quad (5.17)$$

En plus, la distance focale est donnée par  $f = \frac{d_j}{2}$ . Cette dernière équation combinée avec les équations 5.15 et 5.17, nous donne une équation avec six variables  $(X_0, Y_0, Z_0, V_x, V_y, V_z)$ .

### 5.3 Méthodes pour obtenir une solution pour la trajectoire

Pour reconstruire la trajectoire, nous utilisons les équations précédentes liées à la réflexion spéculaire. Comme expliqué dans la section 5.2, nous avons :

- Pour chaque station, le point de réflexion se trouve sur un ellipsoïde de révolution qui a Dourbes et la station  $j$  comme points focaux
- Le plan tangent à cet ellipsoïde contient la trajectoire du météore et passe par le point  $(X_0, Y_0, Z_0)$
- La dérivée totale de la distance parcourue par les ondes radio par rapport au temps vaut zéro

Nous avons donc un système d'équations non-linéaires qu'on veut minimiser. Etant donné que le système doit être résolu pour 6 inconnues  $(X_0, Y_0, Z_0, V_x, V_y, V_z)$ , il faut au moins six équations. Dans cette section nous proposons trois méthodes :

1. Une méthode basée uniquement sur la mesure des délais temporels
2. Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et les données d'un interféromètre
3. Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et sur la connaissance de la distance parcourue par l'onde radio

Avec la plupart des données du réseau BRAMS actuellement disponibles, seule la méthode 1 peut être utilisée. Pour résoudre ces équations avec les données du réseau BRAMS, il faut se réaliser que nous avons, dans un premier temps, seulement accès aux délais temporels  $t_j$ .

### 5.3.1 Une méthode basée uniquement sur la mesure des délais temporels

La première méthode proposée est basée uniquement sur les délais temporels. Deux possibilités ont été considérées. Pour la première, seule la propriété de la réflexion spéculaire est appliqué sur 6 stations afin de retrouver les 6 inconnues [18], tandis que la deuxième possibilité utilise aussi la propriété du plan tangent. Définissons :

$$\begin{aligned} - F_j &= \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2} \\ - G_j &= \sqrt{((X_j - d_j \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2} \end{aligned}$$

Pour la première configuration, nous pouvons écrire, pour  $j = 1 : 6$  :

$$\begin{aligned} & \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j - z_j) \cdot V_z}{G_j} \\ & + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j) \cdot V_z}{F_j} = 0 \end{aligned} \quad (5.18)$$

Pour la deuxième possibilité, nous ajoutons les équations concernant le plan tangent. En combinant les équations 5.15 et 5.17 nous avons, pour  $j=1 : 6$  :

$$\begin{aligned} & \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j - z_j) \cdot V_z}{G_j} \\ & + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j) \cdot V_z}{F_j} = 0 \\ & 4 \cdot \frac{(X_0 \cdot \cos(\gamma_j) + Y_0 \cdot \sin(\gamma_j) - d_j/2) \cdot (X_j \cdot \cos(\gamma_j) + Y_j \cdot \sin(\gamma_j) - d_j/2)}{(F_j + G_j)^2} + \\ & 4 \cdot \frac{(Y_0 \cdot \cos(\gamma_j) - X_0 \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot (Y_j \cdot \cos(\gamma_j) - X_j \cdot \sin(\gamma_j)) + (Z_0 - z_j) \cdot (Z_j - z_j)}{(F_j + G_j)^2 - d_j^2} = 1 \end{aligned} \quad (5.19)$$

### 5.3.2 Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et les données de l'interféromètre à Humain

Comme décrit dans le chapitre 4, la station de Humain est équipée d'un interféromètre, qui permet d'obtenir la direction d'un point de réflexion. Quand la station de Humain est incluse dans les équations (c'est à dire si pour une

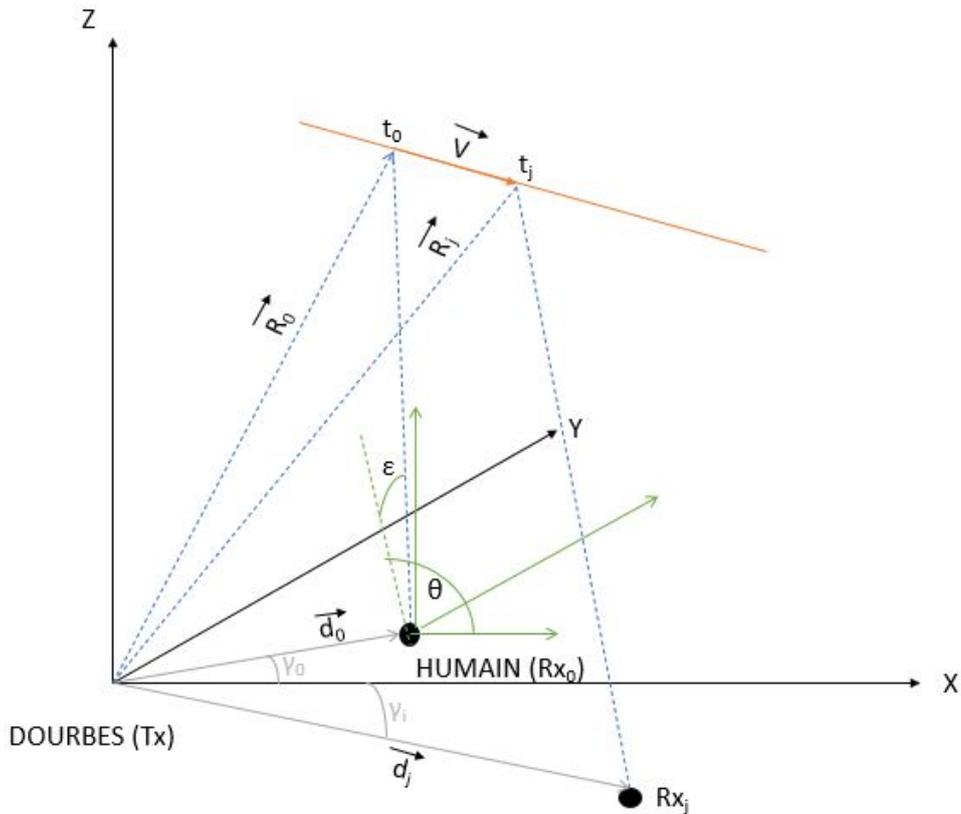


FIGURE 5.4: Reconstruction d'une trajectoire par le réseau BRAMS en incluant l'azimut et l'élévation obtenus par l'interféromètre à Humain.

certaine trajectoire, un écho à Humain existe), deux équations supplémentaires peuvent être utilisées :

- Une équation pour l'azimut  $\theta$
- Une équation pour l'élévation  $\epsilon$

La situation avec l'interféromètre pris en compte est présentée à la figure 5.4. Les résultats obtenus avec l'interféromètre expriment l'azimut  $\theta$  par rapport à l'axe Est ( $0^\circ$  à  $360^\circ$  dans le sens contraire des aiguilles d'une montre) et l'élévation  $\epsilon$  est exprimée par rapport au plan XY ( $0-90^\circ$ ,  $90^\circ$  étant la direction perpendiculaire au plan XY) avec  $(X_H, Y_H, Z_H)$  les coordonnées de la station à Humain. Dans ce cas, la station de Humain est choisie comme station de référence. Mathématiquement, nous obtenons donc un système de six équations pour six variables, pour lequel il nous faut plus que les mesures des délais temporels de quatre stations :

$$\begin{aligned}
& \frac{(X_0 + V_x \cdot t_1 - d_1 \cdot \cos(\gamma_1)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_1 - d_1 \cdot \sin(\gamma_1)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_1 - z_1) \cdot V_z}{\sqrt{(X_1 - d_1 \cdot \cos(\gamma_1))^2 + (Y_1 - d_1 \cdot \sin(\gamma_1))^2 + (Z_1 - z_1)^2}} \\
& + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_1) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_1) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_1) \cdot V_z}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}} = 0 \\
& \frac{(X_0 + V_x \cdot t_2 - d_2 \cdot \cos(\gamma_2)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_2 - d_2 \cdot \sin(\gamma_2)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_2 - z_2) \cdot V_z}{\sqrt{(X_2 - d_2 \cdot \cos(\gamma_2))^2 + (Y_2 - d_2 \cdot \sin(\gamma_2))^2 + (Z_2 - z_2)^2}} \\
& + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_2) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_2) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_2) \cdot V_z}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}} = 0 \\
& \frac{(X_0 + V_x \cdot t_3 - d_3 \cdot \cos(\gamma_3)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_3 - d_3 \cdot \sin(\gamma_3)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_3 - z_3) \cdot V_z}{\sqrt{(X_3 - d_3 \cdot \cos(\gamma_3))^2 + (Y_3 - d_3 \cdot \sin(\gamma_3))^2 + (Z_3 - z_3)^2}} \\
& + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_3) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_3) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_3) \cdot V_z}{\sqrt{X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2}} = 0 \\
& \frac{(X_0 + V_x \cdot t_4 - d_4 \cdot \cos(\gamma_4)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_4 - d_4 \cdot \sin(\gamma_4)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_4 - z_4) \cdot V_z}{\sqrt{(X_4 - d_4 \cdot \cos(\gamma_4))^2 + (Y_4 - d_4 \cdot \sin(\gamma_4))^2 + (Z_4 - z_4)^2}} \\
& + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_4) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_4) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_4) \cdot V_z}{\sqrt{X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2}} = 0 \\
& \tan(\epsilon) = \frac{Z_0 - Z_H}{\sqrt{(X_0 - X_H)^2 + (Y_0 - Y_H)^2}} \\
& \tan(\theta) = \frac{Y_0 - Y_H}{X_0 - X_H}
\end{aligned} \tag{5.20}$$

### 5.3.3 Une méthode basée sur la mesure des délais temporels et sur la connaissance de la distance parcourue par le signal

Si nous connaissons la distance totale parcourue par le signal (de Dourbes vers un point sur la trajectoire, puis vers l'antenne de réception), nous obtenons pour chaque station une équation supplémentaire. En effet, si  $d_{rad,j}$  est la distance parcourue par l'onde radio entre l'émetteur à Dourbes et la station de réception  $j$ , nous pouvons écrire un nouveau système de six équations pour résoudre six variables. Pour  $j = 1, 2, 3$  :

$$\begin{aligned}
& \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j)) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j)) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j - z_j) \cdot V_z}{\sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2}} \\
& + \frac{(X_0 + V_x \cdot t_j) \cdot V_x + (Y_0 + V_y \cdot t_j) \cdot V_y + (Z_0 + V_z \cdot t_j) \cdot V_z}{\sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2}} = 0 \\
& \sqrt{X_j^2 + Y_j^2 + Z_j^2} + \sqrt{(X_j - d_j \cdot \cos(\gamma_j))^2 + (Y_j - d_j \cdot \sin(\gamma_j))^2 + (Z_j - z_j)^2} = d_{rad,j}
\end{aligned} \tag{5.21}$$

Ce dernier système permet d'obtenir une solution pour les six variables en n'utilisant que trois stations.

### 5.3.4 Discussion des trois méthodes

Nous avons établi trois méthodes différentes dans le but de reconstruire les trajectoires des météores. La méthode basée uniquement sur les délais temporels est la plus intéressante, parce qu'elle pourrait être utilisée avec des données provenant d'un grand nombre de stations BRAMS en Belgique.

Pour la méthode 1, il est nécessaire qu'au moins six stations de réception détectent le même météore. Vu que la distance entre les stations est souvent supérieure à 50 km, cette méthode ne peut s'appliquer que pour une partie des données BRAMS enregistrées pendant les premières années. Pour résoudre ce problème, de nouvelles stations ont été installées depuis 2019 afin de créer un réseau plus dense de stations, notamment au Limbourg (figure 4.1). Vu la complexité du système des équations, nous pouvons imposer des contraintes physiques sur certaines variables afin de réduire les solutions possibles. Comme les réflexions spéculaires ne se produisent que dans une région d'altitudes bien spécifique (80 à 120 km), nous pouvons imposer une contrainte sur la variable  $Z_0$ . De plus, tous les autres points de réflexion doivent se trouver dans cette zone. Il est donc possible de rassembler le plus d'écho possibles et de déterminer :

- le premier écho enregistré qui correspond au point de réflexion le plus haut en altitude  $t_{min}$
- le dernier écho enregistré qui correspond au point de réflexion le plus bas en altitude  $t_{max}$

Des équations de la forme :

$$Z_0 + V_z \cdot t_{min} \leq 120km \tag{5.22}$$

et

$$Z_0 + V_z \cdot t_{max} \geq 80km \tag{5.23}$$

## Réseau CMOR

Notons qu'après le début du projet, un système d'équations non-linéaires similaire (mais sous forme vectorielle) a été proposé pour l'analyse des données du réseau CMOR (Canadian Meteor Orbit Radar system) par Mazur et al [2]. CMOR, situé à London (Ontario), est différent du réseau BRAMS parce que c'est un système radar qui envoie des pulses et les autres stations de réception se trouvent dans un rayon de 20km autour de l'émetteur. Cette configuration est représentée par la figure 5.5 avec  $|d_n| \leq 20$  km. En revanche, le réseau BRAMS compte beaucoup plus de stations de réception que le réseau CMOR. Le système d'équations non-linéaires en forme vecto-

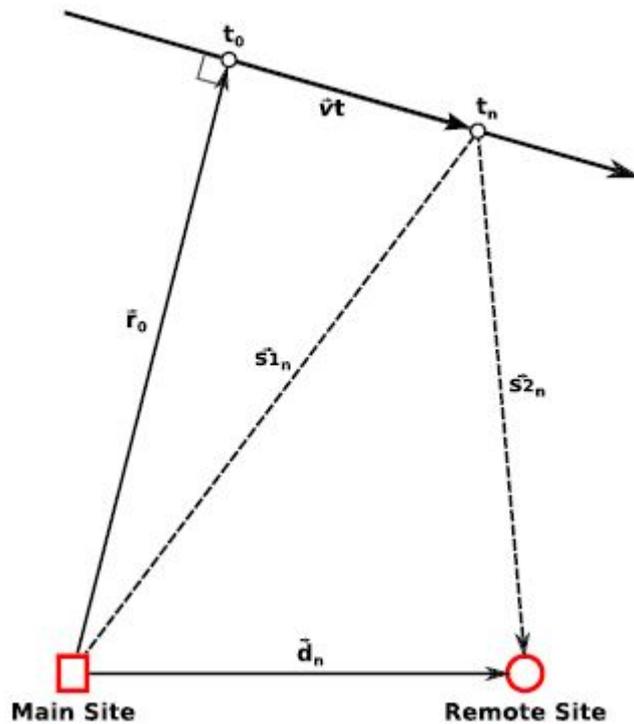


FIGURE 5.5: Principe CMOR : Le site principal ("Main Site") contient l'émetteur et 1 récepteur, le site distant ("Remote Site") ne contient qu'un récepteur ([2]).

rielle, proposé par Mazur et al. [2] a comme but d'obtenir uniquement les vitesses des météores à partir de la mesure des délais temporels. Ce système

en notation vectorielle est formulé par :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} = (r_0^2 + 2tr_0 \cdot \vec{v} + r^2 v^2)^{-1/2} + \\ (r_0^2 + t^2 v^2 + d^2 + 2tr_0 \cdot \vec{v} - 2r_0 \cdot \vec{d} - 2t\vec{v} \cdot \vec{d})^{-1/2} (tv^2 + r_0 \cdot \vec{v} - \vec{v} \cdot \vec{d}) = 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

qui est équivalent à l'équation 5.10. Pour le réseau CMOR, deux simplifications peuvent être faites :

- Comme l'émetteur est un système mono-statique, la condition de specularité impose que la direction vers le point de réflexion de la station principale est orthogonale à la trajectoire, donc :  $r_0 \cdot \vec{v} = 0$
- Toutes les antennes de réception du réseau CMOR se trouvent dans un rayon de 20km autour du radar principal. Vu que les distances parcourues par les ondes radio sont bien plus grandes que les distances entre l'émetteur et les récepteurs, nous pouvons faire l'hypothèse que :  $r_0 + t\vec{v} - \vec{d} \approx r_0 + t\vec{v}$

Nous pouvons alors montrer que l'équation 5.24 se simplifie en :

$$tv^2 + (tv^2 - \vec{v} \cdot \vec{d}) = 0 \quad (5.25)$$

Cette équation permet de retrouver le vecteur vitesse sans devoir chercher la position du premier point de réflexion. Le réseau CMOR permet donc de trouver la vitesse (contenant les trois inconnues  $V_x, V_y$  et  $V_z$ ), à partir de 3 équations. Effectivement, l'équation 5.25 à comme solution :

$$\frac{\vec{v} \cdot \vec{d}}{2v^2} = t \quad (5.26)$$

Cette méthode ne peut pas être utilisée pour le réseau BRAMS, car les simplifications faites pour le réseau CMOR ne sont pas valables : d'un côté, il n'y a pas de station de réception à Dourbes et de l'autre côté les antennes de réception se trouvent à plus de 50km de l'émetteur. Les équations finales utilisées dans ce travail pour les 3 méthodes, ne sont pas appliquées pour le réseau CMOR.

## L'interféromètre à Humain

Pour la méthode 2, nous pouvons utiliser les données de l'interféromètre à Humain, disponibles depuis avril 2015. Grâce à ces données, nous n'avons plus besoin que de la mesure des délais temporels de 3 stations en plus de celle de Humain. Les algorithmes pour retrouver l'azimuth et l'élévation de l'écho

de météore ont été développés. La calibration de l'interféromètre est en phase de finalisation. Dans ce travail, nous allons supposer que l'interféromètre est déjà calibré et que nous retrouvons les valeurs correctes de l'azimuth et de l'élévation. Le désavantage de cette méthode est bien sur qu'elle ne marche que pour les échos détectés par la station de Humain. En outre, il y a moins d'autres stations de réception proche de Humain que par exemple au Limbourg. Cela implique que seulement une petite partie des échos enregistrés par le réseau BRAMS permettront une reconstruction de la trajectoire. Une solution (chère) serait d'installer un deuxième interféromètre, par exemple au Limbourg où il y a déjà suffisamment d'antennes de réception.

### **La connaissance de la distance parcourue par l'onde radio en utilisant un signal continu avec codage de phase**

Le plus grand avantage de cette méthode est le fait que seules trois stations sont nécessaires afin de trouver une solution. Cela permettrait des reconstructions de la trajectoire dans beaucoup de cas, surtout dans la région du Limbourg, où il y a une dizaine d'antennes, proches les unes des autres, une configuration qui fait qu'une détection par plusieurs stations est très probable. Le plus gros défis pour cette méthode est de modifier l'émetteur et les stations de réception pour mesurer la distance parcourue par les ondes radio. Une possibilité serait l'utilisation d'un émetteur avec un signal continu avec codage de phase comme émetteur.

Cette configuration a été étudiée par Vierinen et al [19]. Leur étude suggère que l'émetteur dont un tel système a besoin, est efficace avec une puissance comparable à la puissance de l'antenne à Dourbes. L'expérience de Vierinen et al. a été effectuée avec un émetteur à Juliusruh et un récepteur à Kühlungsborn. L'émetteur émettait un signal continu à une fréquence de 32.55MHz avec un codage de phase par un code à 1000 baud avec une puissance de 30W, synchronisé par un GPSDO. Le récepteur était un interféromètre en configuration Jones, comme celui à Humain. La station de réception possédait aussi un GPSDO pour la synchronisation temporelle. La résolution sur la distance était 1.5km avec une distance maximale de 3000km. Une fois que les météores étaient détectés, une étude de covariance a été effectuée sur le signal reçu afin d'obtenir la distance parcourue par les ondes radio. Les résultats de cet expérience étaient en accord quantitatif avec les mesures faites en parallèle avec un système radar pulsé.

# Chapitre 6

## Validation des méthodes

La reconstruction des trajectoires en utilisant les données BRAMS a été investiguée mathématiquement et trois méthodes différentes ont été proposées. Avant d'utiliser une de ces méthodes sur les données BRAMS, il est important d'avoir un moyen de les valider en ayant un accès indépendant aux trajectoires et vitesses des météores qui sont observés par le réseau BRAMS. Dans ce chapitre et dans ce but, la comparaison des résultats de l'analyse des données du réseau BRAMS avec les données du réseau CAMS-BeNeLux est expliquée. Afin de comprendre pourquoi la comparaison avec le réseau CAMS a été choisie, commençons par une brève description de ce réseau.

### 6.1 Le réseau CAMS

Le réseau CAMS est décrit par Jenniskens et al. [3] [15]. Le réseau CAMS au Benelux<sup>1</sup> est constitué de plus de 50 caméras qui couvrent le ciel au-dessus des territoires belge, néerlandais, luxembourgeois et une partie de l'Allemagne, comme présenté à la figure 6.1. Les caméras utilisées par CAMS ont un champ de vue de  $22^\circ \times 30.2^\circ$  et elles permettent d'atteindre la magnitude +5. L'observation d'un météore par une seule caméra ne suffit pas pour reconstruire sa trajectoire, mais dans le cas où plusieurs caméras enregistrent le même météore (la corrélation est faite par l'indication du temps d'apparition du météore), sa trajectoire et sa vitesse sont calculées. Un choix adéquat des directions de pointage des caméras permet de maximiser le volume utile

---

1. CAMS, qui a vu le jour en 2010 en Californie, a des réseaux dans plusieurs régions du monde, comme par exemple à La Silla au Chili et en Afrique du Sud. Un réseau CAMS a été installé au Benelux, grâce à un grand nombre d'amateurs passionnés.

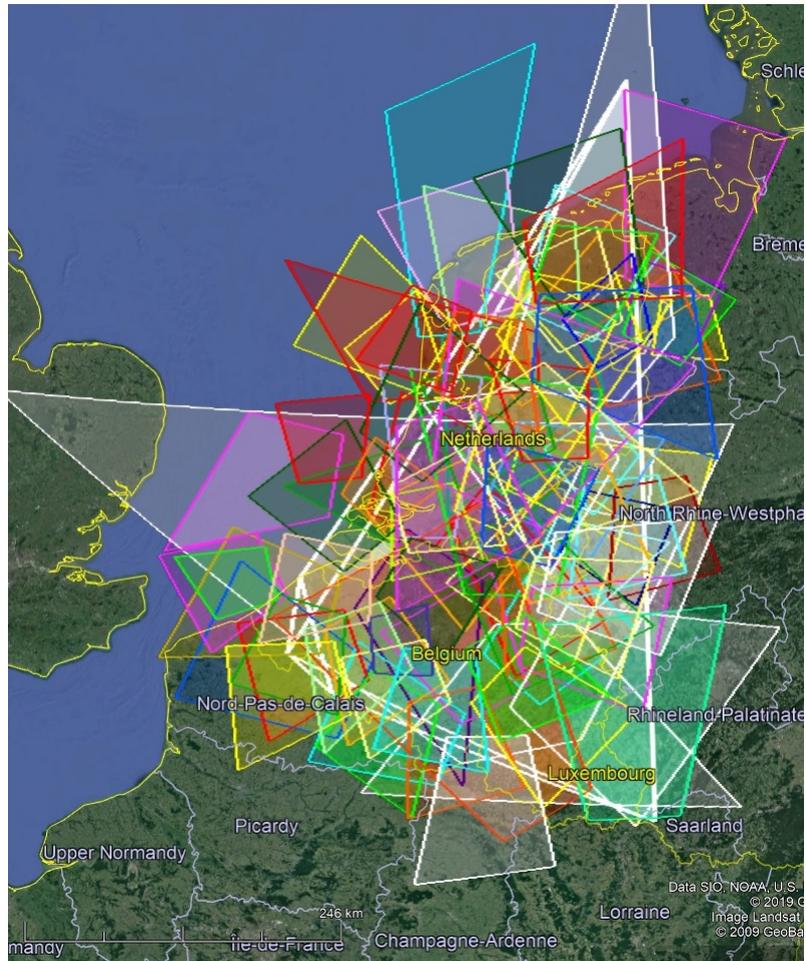


FIGURE 6.1: Projection des champs de vision des caméras du réseau CAMS-Benelux. Le ciel au-dessus du Benelux à 90 km d'altitude est complètement couvert par les champs de vision des différentes caméras.

(80km-120km) couvert par le réseau (présenté à la figure 6.2) [20].

Toutes les trajectoires détectées par le réseau CAMS sont projetées sur une carte du ciel qui est présentée sur le site web de CAMS<sup>2</sup>. Sur ce site web, tous les radiants des météores observés à une certaine date sont affichés (sans détails spécifiques sur les trajectoires individuelles) et ces données sont accessibles par tout le monde. Les paramètres de ces trajectoires sont aussi sauvegardés dans une base de données. Cette base de données appartient à SETI et est accessible seulement par leurs scientifiques. En tant que parte-

2. <http://cams.seti.org/>

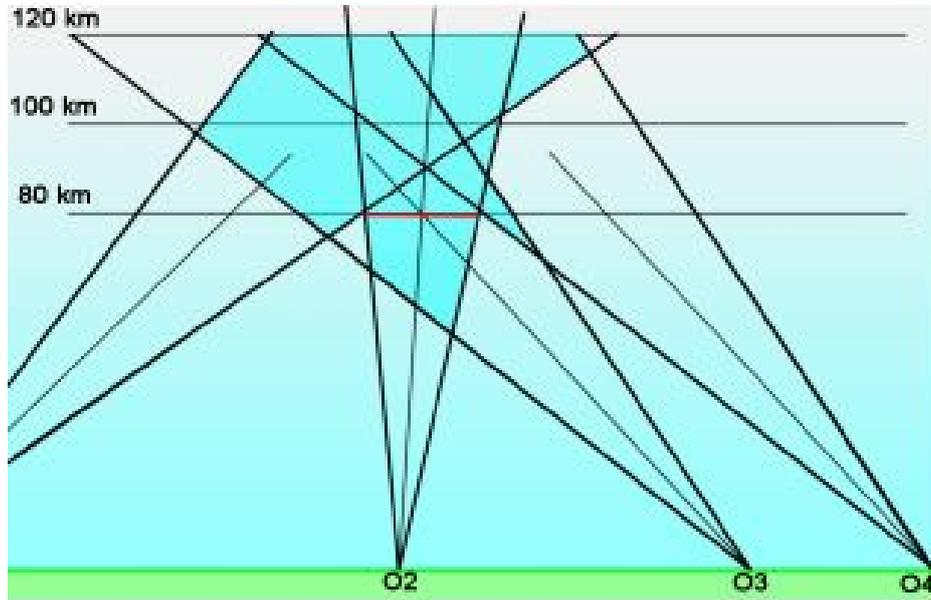


FIGURE 6.2: Optimisation des directions de pointage pour maximiser le volume couvert par le réseau CAMS dans la région 80km-120km en altitude.

naire du projet, BIRA-IASB gère 4 caméras du réseau CAMS-BeNeLux et a eu accès aux résultats obtenus avec les données. Ce sont ces résultats que nous utilisons pendant la phase de validation. Un fichier Excel a été obtenu contenant 948 trajectoires, enregistrées entre le 29 juillet 2020 et le 31 juillet 2020. Les projections au sol de toutes ces trajectoires sont affichées à la figure 6.3, dans le référentiel défini au chapitre 5, avec Dourbes comme origine. Les trajectoires enregistrées se retrouvent partout au-dessus du Benelux et l'ouest de l'Allemagne. Le fichier Excel CAMS contient pour chaque trajectoire les paramètres suivants :

- L'intervalle de temps pendant lequel le météore a été visible par certaines caméras
- La position géographique (longitude, latitude et altitude) des points du début et de la fin de la trajectoire visible
- La vitesse totale  $V_\infty$  correspondant à l'apparition du météore (associée à l'entrée dans l'atmosphère)
- Les paramètres d'accélération  $a_1$  et  $a_2$  modélisés par CAMS<sup>3</sup>
- Les incertitudes (déviations standard  $\sigma$ ) sur les positions, la vitesse et les paramètres d'accélération.

Pour toutes ces trajectoires, il est possible de calculer la position du point

<sup>3</sup> en utilisant le modèle développé par Jacchia et al., qui inclut une décélération exponentielle.

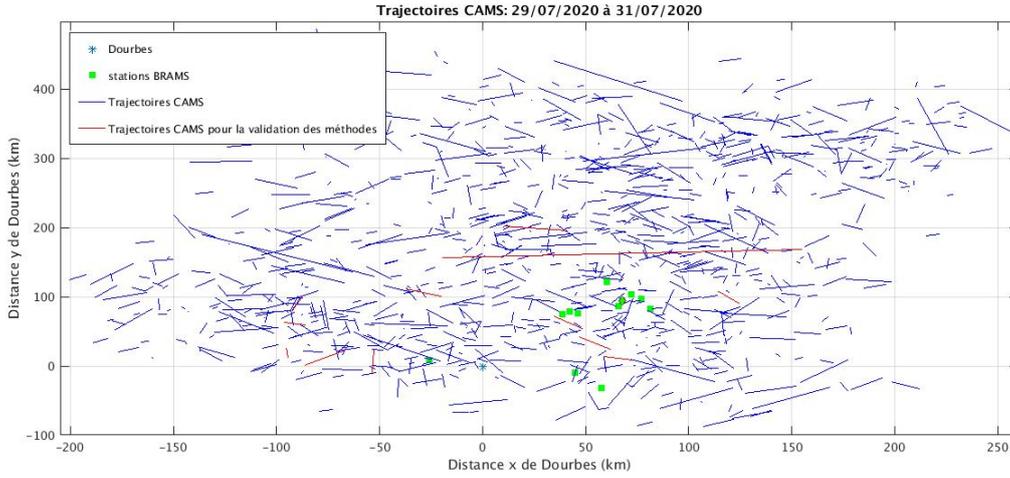


FIGURE 6.3: Les trajectoires CAMS projetées dans le plan horizontal. Les trajectoires en bleu sont toutes les trajectoires enregistrées par CAMS entre le 29 juillet 2020 et le 31 juillet 2020. Les trajectoires en rouge sont celles sélectionnées pour la validation des 3 méthodes développées dans le chapitre 5.

de réflexion spéculaire pour chaque station de réception de manière analytique. Le point de réflexion spéculaire est le point situé sur la trajectoire qui est tangent à l'ellipsoïde de révolution dont l'émetteur et le récepteur sont les foyers. Il est aussi possible de calculer la vitesse à chaque point de la trajectoire en utilisant la formule (Jaccia et al. [21])

$$V(t) = V_{\infty} - |a_1 a_2| \exp(a_2 t) \quad (6.1)$$

Connaissant les paramètres de cet ellipsoïde et de la trajectoire du météore, le temps de réception de l'écho enregistré à la station de réception peut être calculé aussi.

## 6.2 Comparaison

Etant donné que la position du point de réflexion spéculaire doit se trouver dans une altitude comprise entre 80km et 120km et vu que la superficie couverte par CAMS s'étend bien au-delà des limites géographiques de la Belgique, seul un petit nombre de météores observés par le réseau CAMS est aussi détecté par le réseau BRAMS. A l'inverse, il y a aussi énormément d'échos de météores enregistrés par BRAMS qui ne sont pas repris dans la base de données CAMS. La plupart des météores sont trop petits pour créer

un phénomène lumineux dans le ciel, mais ils créent suffisamment d'ionisation pour réfléchir les ondes radio émises par l'émetteur à Dourbes et conduire à la détection d'un écho dans une des stations de réception.

Un deuxième problème qui se pose est le nombre de détections qui sont nécessaires pour la reconstruction d'une trajectoire. Comme élaboré dans le chapitre 5, nous avons besoin d'au moins 3 stations pour la méthode qui utilise le signal avec codage de phase, 4 stations pour la méthode qui utilise l'interféromètre à Humain et au moins 6 stations pour la méthode qui utilise uniquement les délais temporels. En outre, quand trois ou quatre stations de réception peuvent être utilisées, il faut encore que les échos détectés soient bien des échos provenant de météores pour lesquels la condition de la réflexion spéculaire est strictement respectée.

Au final, à partir du fichier Excel, 12 trajectoires ont été sélectionnées pour faire la comparaison. Celles-ci sont les trajectoires rouges dans la figure 6.3 et leurs paramètres sont résumés dans le tableau 6.1. Dans ce tableau, on a de gauche à droite : le numéro de la trajectoire dans le fichier Excel CAMS, la date de l'enregistrement, le temps du début de l'apparition du météore sur les caméras du réseau CAMS appelé  $t_{beg}$ , la vitesse totale du météore calculée avec les données du réseau CAMS et finalement les coordonnées  $X_{Hum}$ ,  $Y_{Hum}$  et  $Z_{Hum}$  du point de réflexion spéculaire théorique pour la station BE-HUMA (afin d'avoir la possibilité de facilement tester les trois méthodes sur les mêmes trajectoires). Ces coordonnées permettent d'avoir une référence afin de pouvoir comparer la position trouvée par une des trois méthodes développées.

Les trois méthodes donnent les trois composantes du point de réflexion spéculaire pour Humain et les trois composantes du vecteur vitesse. La vitesse totale peut être comparée directement avec la valeur de  $V_\infty$  mesurée par CAMS. Les trois composantes de la vitesse peuvent être comparés avec les composantes de  $V_\infty$  projetées dans le référentiel cartésien centré sur Dourbes. Les coordonnées du point de réflexion spéculaire pour Humain peuvent être comparées avec la position théorique sur la trajectoire CAMS (qui est calculée par un code *Matlab* que nous avons écrit).

Trajectoire	Date	$t_{beg}$	$V_{\infty}$ (km/s)	$X_{Hum}$ (km)	$Y_{Hum}$ (km)	$Z_{Hum}$ (km)
79	29/07/20	23 :14 :00	41.96	45.24	57.95	95.37
105	29/07/20	23 :36 :28	41.83	122.45	93.60	99.97
149	30/07/20	00 :17 :18	26.45	-89.21	92.87	89.48
188	30/07/20	00 :51 :27	29.95	-52.92	21.33	88.48
282	30/07/20	01 :44 :28	40.59	-96.02	35.01	88.70
477	30/07/20	22 :07 :58	61.36	-80.56	7.74	102.12
532	30/07/20	22 :56 :54	36.9	39.56	50.58	92.07
536	30/07/20	23 :06 :55	65.07	22.62	199.53	106.10
598	30/07/20	23 :43 :54	70.46	6.91	158.72	103.19
654	31/07/20	00 :21 :21	15.49	67.98	10.19	80.15
709	31/07/20	00 :48 :40	63.7	-32.89	108.71	95.53
773	31/07/20	01 :25 :38	65.68	-94.82	62.32	96.97

TABLE 6.1: Paramètres des trajectoires utilisées pour la comparaison BRAMS-CAMS. Ces trajectoires enregistrées par le réseau CAMS sont également détectées par le réseau BRAMS

# Chapitre 7

## La programmation

Pour tester les méthodes mathématiques et comparer les résultats avec ceux obtenus avec les données CAMS, plusieurs programmes ont été écrits en Matlab. Ce chapitre donne un résumé du contenu de ces programmes, une explication des processus suivis et des idées sur les manières dont les codes peuvent être automatisés.

### 7.1 Détermination des délais temporels

La première étape dans la reconstruction de la trajectoire d'un météore est la détermination précise des délais temporels entre les échos enregistrés par différentes stations de réception. Vu qu'il faut au moins trois stations pour la méthode 3 et six stations pour la méthode 1, on doit identifier les échos dans ces stations et aussi s'assurer que les échos observés dans les

Trajectoire	$V_{\text{inf}}(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$Alt_{\text{max}}$ (km)	$Alt_{\text{min}}$ (km)	$\Delta t$ entre $Alt_{\text{max}}$ et $Alt_{\text{min}}$ (s)
149	26.45	97.72	81.06	1.127
477	61.36	110.30	94.49	0.48
773	65.68	96.37	80.14	0.7746

TABLE 7.1: Intervalle de temps caractéristique sur laquelle le météore est détecté par des stations BRAMS. De gauche à droite : La trajectoire, la vitesse totale du météore, l'altitude maximale correspondant à un écho détecté par une station BRAMS, l'altitude minimale correspondant à un écho détecté par une station BRAMS et le délai entre la détection correspondante à  $Alt_{\text{max}}$  et  $Alt_{\text{min}}$ .

spectrogrammes proviennent du même météore. Pour avoir une idée du délai temporel maximum auquel nous pouvons s'attendre, nous avons calculé les temps d'apparition de l'écho théorique dans plusieurs stations, à partir de quelques trajectoires du fichier Excel CAMS. Pour chaque trajectoire, nous avons calculé pour toutes les stations le temps d'apparition théorique de l'écho et l'altitude correspondante du météore. Ensuite, nous avons exclu les stations pour lesquelles l'altitude de l'écho est inférieure à 80 km ou supérieure à 120km. Ces calculs nous confirment que les délais temporels entre l'écho correspondant à l'altitude maximale du météore et l'écho correspondant à l'altitude minimale du même météore varient entre 0.48 et 1.127 secondes (tableau 7.1). Les délais temporels entre deux stations diminuent quand la vitesse augmente ou quand la trajectoire est plus inclinée. Afin d'inclure une marge, on peut considérer que le délai temporel maximum auquel on peut s'attendre sera environ de 1.5 secondes. Il est alors raisonnable de supposer que si nous mesurons des délais plus grands, cela correspondra à des échos d'autres météores.

Dans un premier temps, l'identification des échos se fait par l'analyse visuelle des spectrogrammes. Au temps théorique de l'apparition de l'écho correspond une colonne du spectrogramme (figure 7.1). On regarde dans cette colonne si il y a un écho d'un météore. Si c'est le cas, la colonne dans laquelle un écho est détecté nous donne un temps approximatif où chercher l'écho dans les données brutes. Dans une étape suivante, cette procédure devra être automatisée. Un programme que nous avons écrit en *Matlab* télécharge tous les fichiers *WAV* disponibles dans la base de données BRAMS et construit un vecteur contenant tous les délais temporels.

On analyse alors le signal brut (puissance en fonction du temps), centré sur le temps approximatif d'apparition de l'écho observé dans le spectrogramme (haut de la figure 7.2). Le signal brut est une superposition de l'écho de météore, éventuellement le signal direct venant de Dourbes et du bruit. Avant de déterminer précisément le temps d'apparition précis du météore, le bruit doit être filtré et le signal direct doit être soustrait. Pour soustraire le signal direct, on le reconstruit en calculant son amplitude, sa fréquence et sa phase au moyen d'un FFT sur un intervalle de temps court [15]. Comme le montre le spectrogramme à la figure 7.1 (à droite), la soustraction du signal direct a été correctement réalisée. Ensuite le signal restant est filtré en utilisant un filtre de Blackman, qui a comme but d'enlever le bruit autour du signal. Comme montré en bas de la figure 7.2, on voit apparaître le profil de l'écho (avec un bon rapport signal/bruit), ce qui permet une détermination précise du temps d'apparition du météore. Pour déterminer ce dernier, on

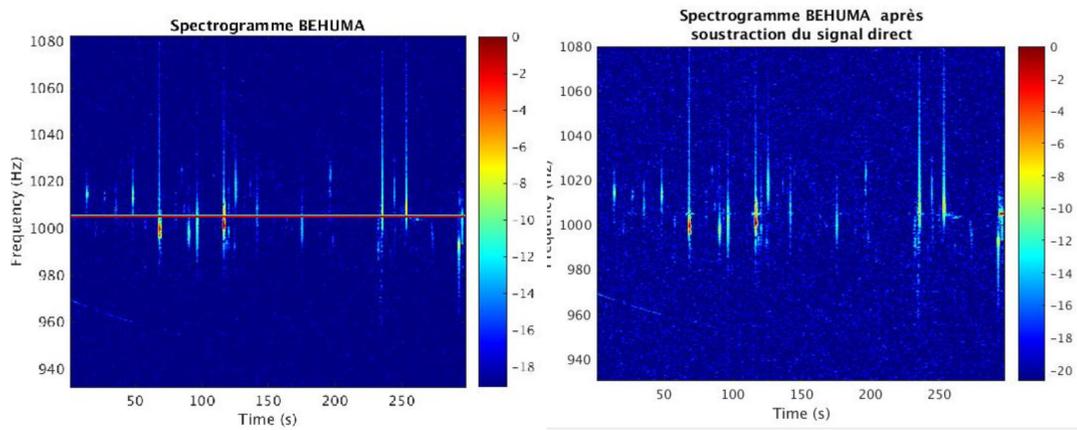


FIGURE 7.1: Gauche : Un spectrogramme pour la station de Humain (BEHUMA 31/07/2020 à 23H40). Droite : Le même spectrogramme après soustraction du signal direct. L'écho étudié à la figure 7.2 apparaît à 23 :43 :56.

utilise le point où le profil de l'écho atteint 50 pourcent de la valeur maximale du pic [22]. Cette façon de définir le temps d'apparition de l'écho est présentée en bas de la figure 7.2 (à droite).

Nous mesurons les temps d'apparition des échos pour toutes les stations. Puis nous choisissons une station de référence pour laquelle  $t_0 = 0$  et qui permet de calculer les délais temporels  $\Delta t_j$  pour les autres stations. Comme déjà expliqué, pour nos calculs, la station de référence sera la station de Humain.

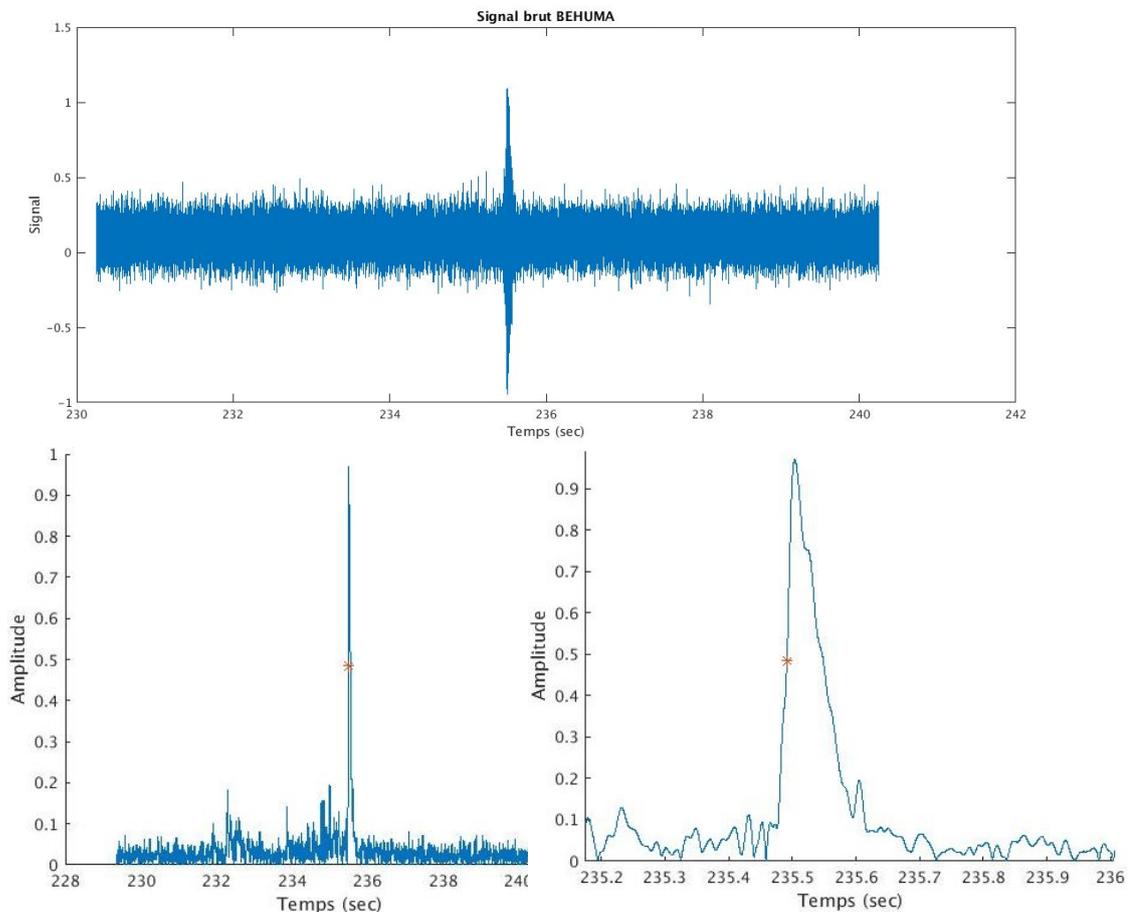


FIGURE 7.2: Exemple de la mesure du temps d'apparition d'un écho de météore pour BEHUMA : 30/07 à 23H4. En haut : le signal brut. En bas : le signal brut filtré avec le signal direct soustrait (gauche) avec un zoom (droite).

## 7.2 Calcul de la trajectoire

Le calcul de la trajectoire nécessite les résultats de deux codes importants :

- Un code qui convertit les coordonnées géodésiques (latitude, longitude, altitude) des stations vers le système référentiel cartésien centré sur Dourbes.
- Un code qui donne les délais temporels par rapport à la station de référence

Une fois que le programme a obtenu ces paramètres, l'utilisateur rajoute les informations venant de l'interféromètre ou les distances parcourues par

la radiation entre l'émetteur et les différents récepteurs<sup>1</sup>. A partir de ce moment, le programme résout un des systèmes non-linéaires, telles qu'on les a développés au chapitre 5 en utilisant la fonction Matlab *lsqnonlin*. Au contraire de la fonction *fsolve*, ce solveur permet l'utilisation de contraintes, telles que imposer une limite sur l'altitude et la vitesse.

Le programme poursuit alors avec les étapes suivantes :

1. Un vecteur avec des conditions initiales pour les variables est créé. Comme plusieurs solutions sont possibles, nous avons besoin de plusieurs vecteurs de départ aussi, afin d'analyser l'influence des conditions de départ sur la solution. nous allons ainsi pouvoir analyser pour quelles vecteurs de départ le système va converger vers la bonne solution. Pour chaque trajectoire CAMS analysée dans ce travail, ce vecteur contenait 100 positions différentes pour  $X_0$  et  $Y_0$  et  $V_z = -5$  km/s à  $-55$  km/s. La valeur pour la vitesse  $V_z$  est forcément négative dans le référentiel défini au chapitre 5. Pour entamer les calculs, les valeurs initiales on été mises à 0 pour les vitesses  $V_x$  et  $V_y$  et à 100km pour  $Z_0$ . Quand l'interféromètre est utilisé, le choix des valeurs de départ pour  $X_0$  et  $Y_0$  est fait dans le quadrant correspondant à l'azimuth et l'élévation obtenus par l'interféromètre pour l'écho. Quand les autres méthodes sont utilisées, il faut estimer les valeurs de départ. Une future méthode pour estimer ces valeurs de départ pourrait se baser sur la détermination du quadrant, basée sur l'ordre dans laquelle les différentes stations ont détecté le météore.
2. Les contraintes sont définies : la vitesse totale par exemple ne peut pas être plus petite que 11.19 km/s et pas plus grande que 72 km/s. Il est raisonnable d'utiliser ces deux limites : la limite basse est basée sur le fait que la vitesse d'échappement de la terre vaut 11.19 km/s, tandis que la limite supérieure est liée à la vitesse d'échappement du système solaire. Il se peut que des météoroïdes d'origine interstellaire passent dans notre atmosphère (ayant une vitesse supérieure à 72 km/s), mais ces cas sont très rares.
3. Un vecteur  $X$  est créé qui est le vecteur de la solution. Nous avons défini :
  - $X(1) = X_0$
  - $X(2) = Y_0$
  - $X(3) = Z_0$
  - $X(4) = V_x$
  - $X(5) = V_y$

---

1. Dans un premier temps cette étape est manuelle, mais une automatisation est possible

- $X(6) = V_z$
- $X(7) = V_{totale} = \sqrt{X(4)^2 + X(5)^2 + X(6)^2}$

4. Finalement le programme calcule une solution pour tous les vecteurs de départ. Les résultats obtenus par le programme vont nous permettre d'analyser les trois méthodes, mais aussi le choix des valeurs de départ. Le programme présente les résultats pour les valeurs définies ci-dessus, mais aussi une projection de la trajectoire dans le plan horizontal et le plan vertical.

Pour la méthode 2, quand l'interféromètre est utilisé, l'azimuth et l'élévation de l'écho sont rajoutés dans les équations du système non-linéaire, mais ils sont aussi utilisés afin d'établir des valeurs de départ pour  $X_0$  et  $Y_0$  raisonnables. Ce choix adéquat permet une meilleure convergence. Pour la méthode du signal codé, l'influence des valeurs de départ sur la solution est beaucoup moins grande.

# Chapitre 8

## Résultats

Dans ce chapitre nous discuterons les résultats obtenus par les codes Matlab pour les trois méthodes. Résumons les trois méthodes :

1. La méthode 1 est la méthode qui utilise uniquement la mesure des délais temporels
2. La méthode 2 est la méthode qui utilise la mesure des délais temporels et les informations de l'interféromètre à Humain
3. La méthode 3 est la méthode qui utilise la mesure des délais temporels et la distance parcourue par l'onde radio en utilisant par exemple un signal avec codage de phase

Les douze trajectoires du fichier CAMS pour lesquelles un nombre suffisant d'échos étaient présents dans les spectrogrammes BRAMS, ont été reconstruites en utilisant les trois méthodes. La trajectoire 105 du fichier excel CAMS est une des trajectoires pour laquelle au moins 6 stations ont détecté un écho du même météore, dont Humain (BEHUMA), ce qui permet de tester les trois différentes méthodes et de comparer les résultats avec ceux obtenus pour la trajectoire CAMS.

### 8.1 La trajectoire 105

Les paramètres de la trajectoire 105 du fichier CAMS sont présentés dans le tableau 8.1. Le point de réflexion spéculaire théorique pour Humain et les composantes du vecteur vitesse calculés à partir des données CAMS, sont présentés dans le tableau 8.2.

Date	29/07/2020
Heure	23 : 36 : 28
Vitesse totale	41.83km/s
$z_{\max}$	100.24km
$z_{\min}$	93.1km
$a_1$	0.068 km
$a_2$	4.049 $s^{-1}$

TABLE 8.1: Paramètres de la trajectoire CAMS 105.

Trajectoire CAMS	105
$X_0$	122.45 km
$Y_0$	93.60 km
$Z_0$	99.97 km
$V_x$	-18.4 km/s
$V_y$	33.58 km/s
$V_z$	-12.56 km/s

TABLE 8.2: Le point de réflexion spéculaire pour BEHUMA et les composantes du vecteur vitesse, calculés pour la trajectoire 105 du fichier Excel CAMS.

## 8.2 Reconstruction de la trajectoire 105 en utilisant la méthode 1

Comme déjà discuté au chapitre 5, la méthode qui n'utilise que les délais temporels ne converge pas nécessairement vers une solution unique. Pour évaluer cela, commençons par un essai sur la trajectoire 105. Pour le calcul de la position du point de réflexion, la station de Humain est la station de référence. La figure 8.1 montre les résultats obtenus en utilisant la méthode 1 en fonction de 100 vecteurs de départ. On observe que les positions  $X_0$  et  $Y_0$  ont une forte tendance à se diriger vers les limites inférieures et supérieures (-250km,+250km) de la domaine de recherche du solveur. La direction du vecteur vitesse (qui est le rapport entre les composantes de la vitesse) est plus ou moins correcte, mais sa valeur absolue peut être très différente de la valeur CAMS.

Pour cette raison, l'équation du plan tangent (5.19) a été ajoutée dans le système à résoudre par le programme Matlab *lsqnonlin*, dans le but d'améliorer la solution pour la position du point de réflexion spéculaire pour Humain. Les résultats venant de ce calcul sont présentés dans le tableau 8.3. Le point de réflexion spéculaire pour Humain obtenu par le calcul se retrouve plus

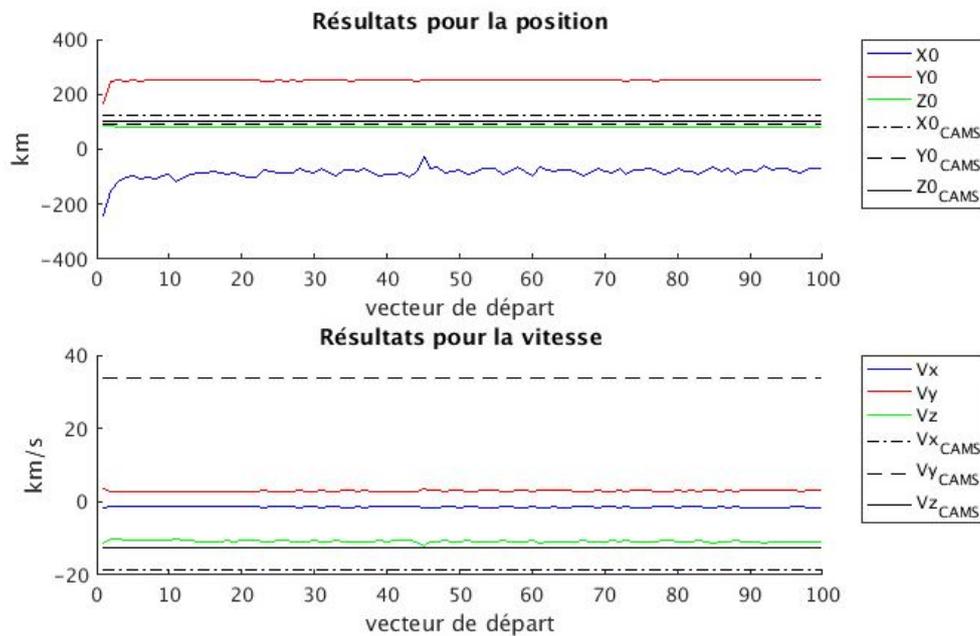


FIGURE 8.1: Les solutions pour la position du point de réflexion pour Humain et les composantes de la vitesse en utilisant la méthode 1, en fonction de 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par le réseau CAMS sont montrés comme comparaison.

proche du point théorique, mais il reste un écart d'environ 100 km. La plus grande erreur se trouve sur la valeur de  $X_0$ , qui est de 121.2 km. La valeur de  $Z_0$  obtenu par le calcul vaut 86.48 km, ce qui correspond à une erreur de 13.49 km sur l'altitude.

La figure 8.3, qui représente la trajectoire reconstruite dans le plan horizontal XY et dans le plan vertical XZ respectivement, nous permet de visualiser les résultats obtenus. Un décalage du point de réflexion spéculaire peut effectivement être observé dans les deux plans, mais l'orientation du vecteur vitesse est plus ou moins correcte. Quant à la valeur absolue de la vitesse totale, nous observons une convergence vers 33.59 km/s (bas de la figure 8.2) pour la plupart des vecteurs de départ. C'est un résultat qui diffère de la valeur CAMS par 19.6%. Des résultats comparables ont été obtenus pour les trajectoires 282 et 709, pour lesquelles il y avait aussi au moins six stations avec des échos dans leurs spectrogrammes.

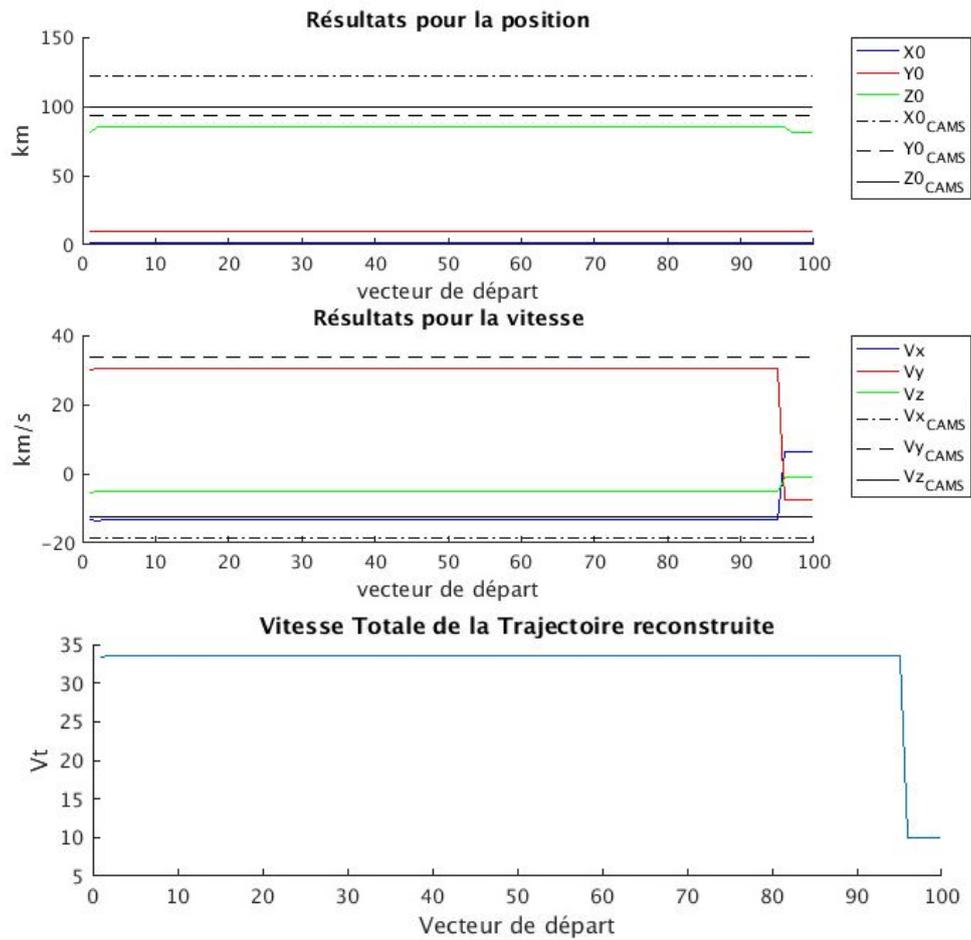


FIGURE 8.2: Les solutions pour la position, les composantes du vecteur vitesse et la valeur absolue de la vitesse totale après un calcul avec la méthode 1 et en incluant l'équation du plan tangent, pour 100 vecteurs de départ.

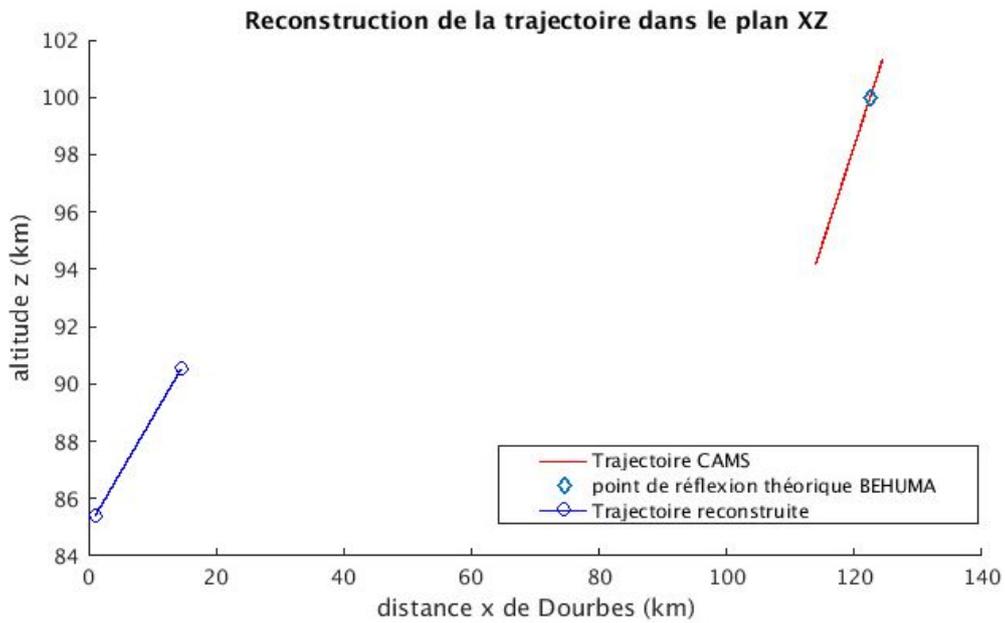
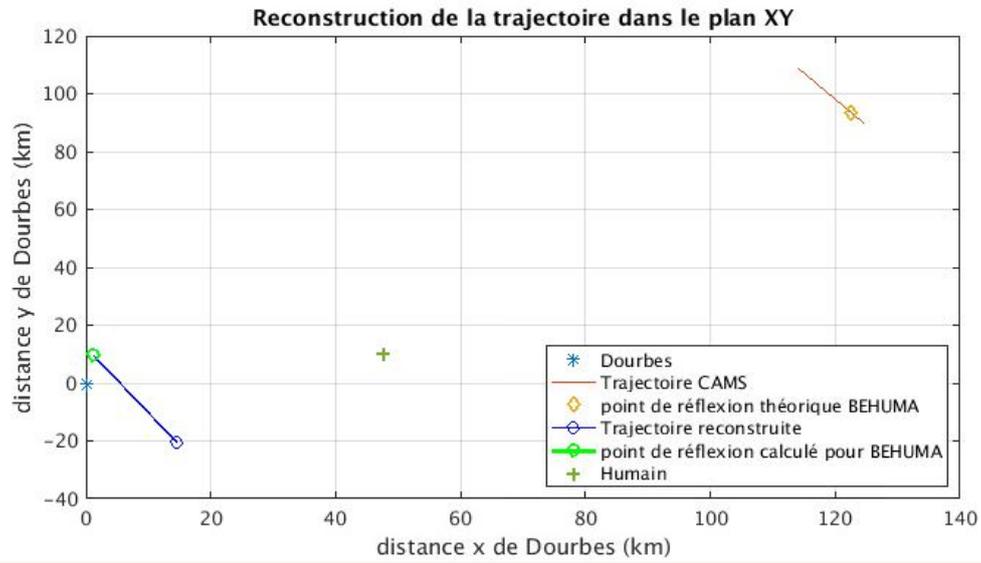


FIGURE 8.3: La Trajectoire 105 reconstruite dans le plan horizontal XY et le plan vertical XZ en utilisant uniquement les délais temporels. Pour comparaison, la trajectoire CAMS est montrée aussi.

### 8.3 Reconstruction de la trajectoire 105 en utilisant la méthode 2

Pour la deuxième méthode, nous rappelons que le programme *lsqnonlin* (qui est une méthode des moindres carrés), effectue un calcul sur 100 vecteurs de départ, choisis en fonction de l'azimuth et de l'élévation de l'écho de météore observé par l'interféromètre. La figure 8.4 présente les trois composantes de la position et les trois composantes de la vitesse, obtenues par cette méthode. De cette figure, nous constatons que la méthode des moindres carrés ne converge pas vers la même solution pour toutes les vecteurs de départ, mais il y a une solution qui se distingue clairement.

La figure 8.5 présente la vitesse totale, qui dépend de la valeur des trois

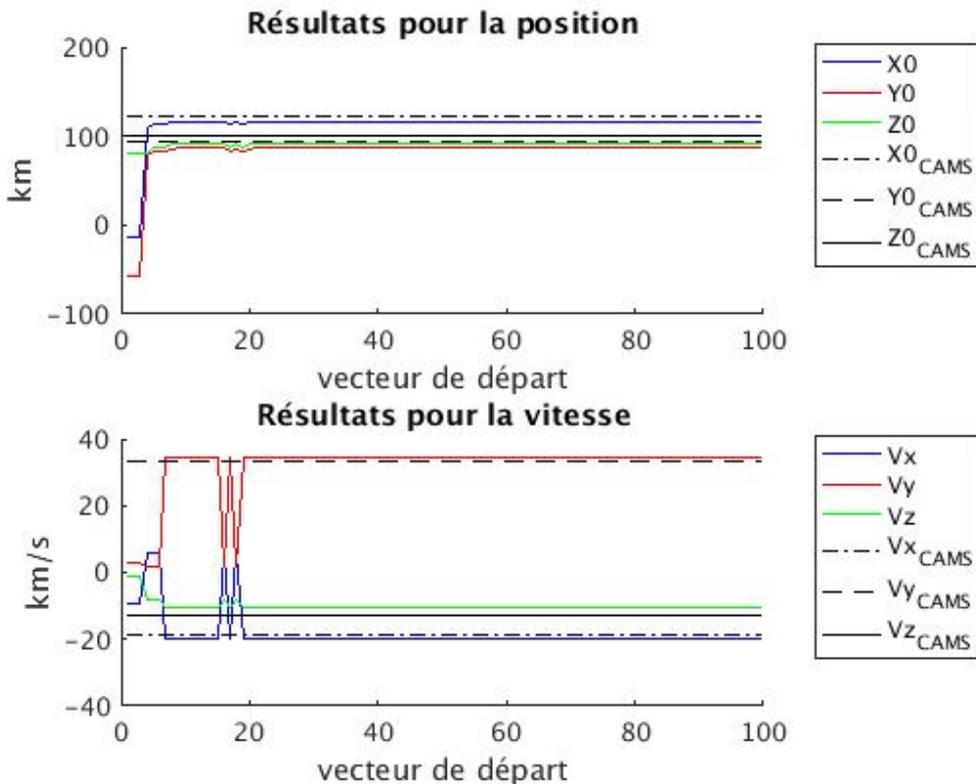


FIGURE 8.4: Les solutions pour la position du point de réflexion pour Humain et les composantes du vecteur vitesse en utilisant la méthode 2, en fonction de 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par le réseau CAMS sont montrées comme comparaison.

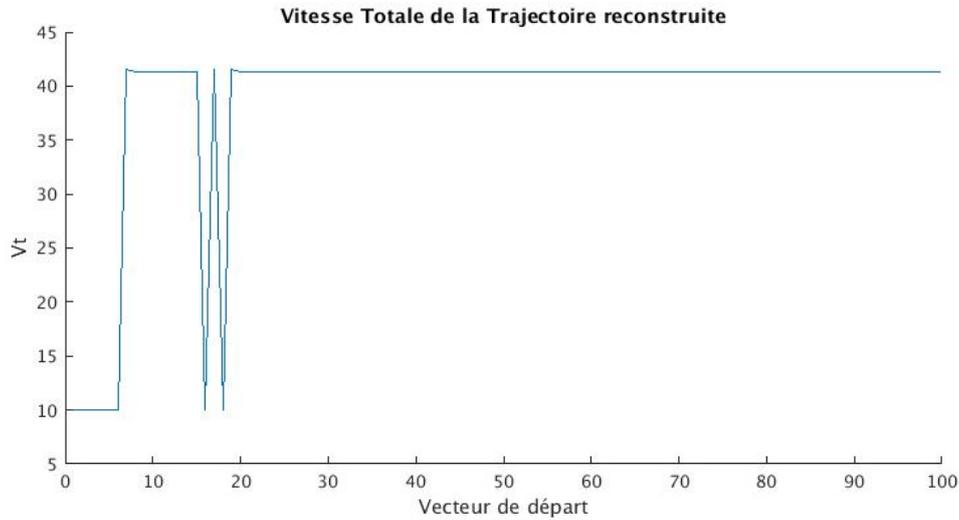


FIGURE 8.5: La vitesse totale pour la trajectoire 105, calculée pour 100 vecteurs de départ en utilisant la méthode 2.

composantes du vecteur vitesse. Dans cette figure, nous observons que la vitesse totale ne prend que deux valeurs : 10 km/s et 41.3 km/s. La solution correspondante à une vitesse totale de 41.3 km/s, vers laquelle la méthode converge pour 93 vecteurs de départ, doit être la bonne, comme le montre la figure 8.4. Dans cette figure, nous observons que pour 93 vecteurs de départ, les valeurs des composantes du point de réflexion spéculaire et les composantes du vecteur vitesse sont très proches des valeurs CAMS (cfr. tableau 8.3 dans la section 8.4), mais il y a par exemple une différence de 8.17 km en altitude du point de réflexion. Pour  $X_0$  et  $Y_0$  il y a une différence de 5.12 km et 6.8 km respectivement. Dans la figure 8.6, nous observons la projection de la trajectoire reconstruite dans le plan horizontal XY et dans le plan vertical XZ. Cette figure nous fait comprendre visuellement que la trajectoire reconstruite est proche de la trajectoire CAMS. La figure 8.6 fait preuve du fait que la trajectoire reconstruite est parallèle à la trajectoire CAMS, mais pas superposée. La raison pour laquelle la différence est petite est que la distance horizontale par rapport à Dourbes est assez petite aussi. Nous constatons que le point de réflexion pour Humain est dans la bonne direction donnée par l'interféromètre, mais que l'erreur sur l'altitude provoque une translation le long de cette direction. Par conséquent, plus l'angle de l'élévation est petit, plus l'erreur sur  $Z_0$  sera grande.

En ce qui concerne les solutions qui ne convergent pas vers la solution CAMS, remarquons qu'elles convergent toutes vers une vitesse totale de 10 km/s, la limite basse mise sur la vitesse totale. Cette tendance est liée à deux choses :

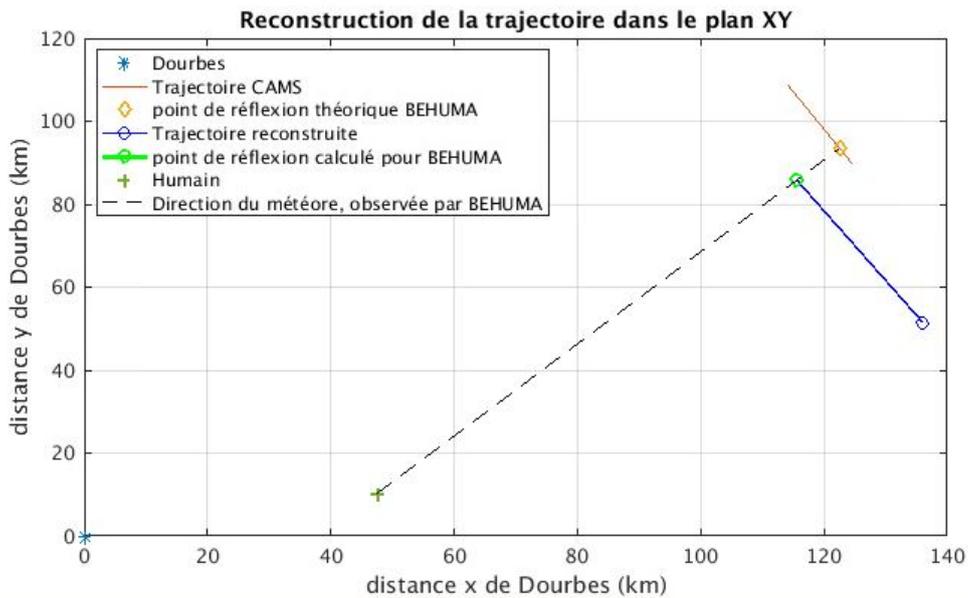
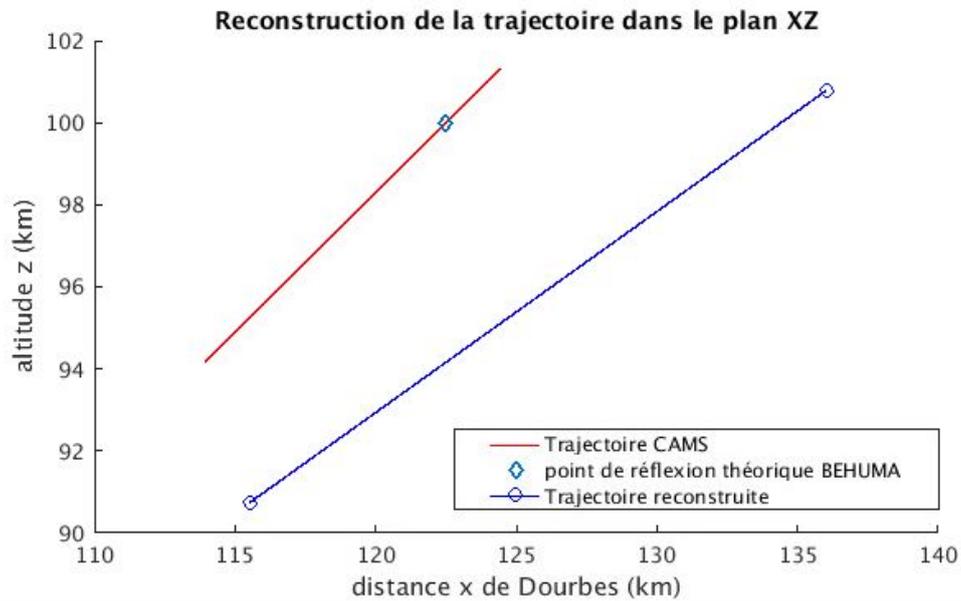


FIGURE 8.6: La trajectoire 105 reconstruite dans le plan vertical XZ (haut) et dans le plan horizontal XY (bas). Les trajectoires CAMS sont montrées pour comparaison. Le point de réflexion spéculaire pour Humain calculé par la méthode 2 se trouve le long de la direction dans laquelle l'interféromètre a observé le météore.

d'un côté l'influence du vecteur de départ et de l'autre côté les paramètres du programme *lsqnonlin* qui déterminent comment la solution va progresser d'une itération à l'autre. Une évaluation de la méthode *lsqnonlin* a montré

Iteration	Func-count	f(x)	Norm of step	First-order optimality	Iteration	Func-count	f(x)	Norm of step	First-order optimality
0	10	2.2134e+06		1.9e+08	0	10	19950.2		3.74e+03
1	20	526146	4.66061	2.46e+07	1	20	1733.7	4.68392	4.68e+03
2	30	126515	2.61178	3.41e+06	2	30	112.643	2.81302	348
3	40	32499.5	2.07738	5.22e+05	3	40	28.0158	1.74683	483
4	50	7493.8	2.27364	9.19e+04	4	50	5.68537	1.06065	1.39e+03
5	60	1193.06	1.69668	1.73e+04	5	60	4.22872	1.92128	261
6	70	69.9525	1.42468	2.92e+03	6	70	1.58442	0.614745	55
7	80	3.29748	1.01232	602	7	80	1.58442	1.2026	55
8	90	2.21985	0.887057	335	8	90	1.10441	0.300651	23.4
9	100	2.00668	0.19315	236	9	100	0.813626	0.601302	124
10	110	1.86609	0.0466545	124	10	110	0.377978	1.2026	29.2
11	120	1.81579	0.0175722	36.2	11	120	0.241192	0.786806	77
12	130	1.81057	0.00617183	4.97	12	130	0.0246189	0.114771	2.22
13	140	1.26198	8.60621	105	13	140	0.0200294	1.37153	0.279
14	150	0.966773	0.174071	0.895	14	150	0.0164715	2.34222	1.44
15	160	0.914411	1.52396	0.819	15	160	0.016305	0.0343926	1.39
16	170	0.911894	0.425699	0.665	16	170	0.0162567	0.000232926	0.234
17	180	0.911767	0.091458	0.64	17	180	0.0162505	0.00561462	0.232
18	190	0.911756	9.77478e-05	0.137	18	190	0.0162483	8.03538e-05	0.0399
19	200	0.911747	0.0204035	0.134	19	200	0.0162404	0.0270643	0.00123
20	210	0.911739	0.00037969	0.471	20	210	0.0162402	0.0159241	2.09e-06
21	220	0.911726	0.00459267	0.418					
22	230	0.911708	0.00132602	0.331					
23	240	0.91169	0.0011867	0.211					
24	250	0.91168	0.00118071	0.0903					
25	260	0.911678	0.000689054	0.0193					
26	270	0.911678	0.000174066	0.00118					

FIGURE 8.7: *lsqnonlin* convergeant vers une fausse solution

FIGURE 8.8: *lsqnonlin* convergeant vers une bonne solution

que pour les premiers vecteurs de départ, la position est gardée constante pendant que d'autres variables comme les composantes du vecteur vitesse sont adaptées dans la mauvaise direction. Pour la plupart des vecteurs de départ, la vitesse totale et ses composantes initialement varient dans la bonne direction et les composantes de la position aussi. Comme on peut constater en regardant les figures 8.7 et 8.8, cela résulte pour quelques vecteurs de départ (dont les 5 premiers) dans plus d'itérations et la somme des moindres carrés ( $f(x)$ ) qui stabilise sur une valeur assez haute. En général, on peut donc dire que le vecteur de départ joue un grand rôle dans la convergence du programme et que, quand le programme converge vers la valeur minimale de la vitesse totale, la solution ne sera pas correcte.

### 8.3.1 Influence de l'erreur sur l'azimuth et l'élévation

Le résultat obtenu par la méthode 2 est dépendant des valeurs de l'azimuth et de l'élévation de l'écho, qui peuvent être obtenus avec les données de l'interféromètre. Dans ce travail, nous avons supposé que nous connaissions ces valeurs (l'azimuth  $\theta = 48.03^\circ$  et l'élévation  $\epsilon = 41.74^\circ$ ). Une erreur sur la direction d'arrivée résultera directement dans une erreur sur la position de la réflexion spéculaire, mais causera indirectement une erreur dans la vitesse totale aussi. Nous avons simulé l'impact d'une erreur en azimuth et élévation donné par l'interféromètre sur la solution. Pour cela, 100 valeurs de l'azimutuh et de l'élévation ont été générées de manière aléatoire autour de la

direction exacte avec une erreur de  $\pm 2^\circ$ . Les résultats sont présentés à la figure 8.9. Pour ces 100 simulations, nous avons obtenu une valeur moyenne

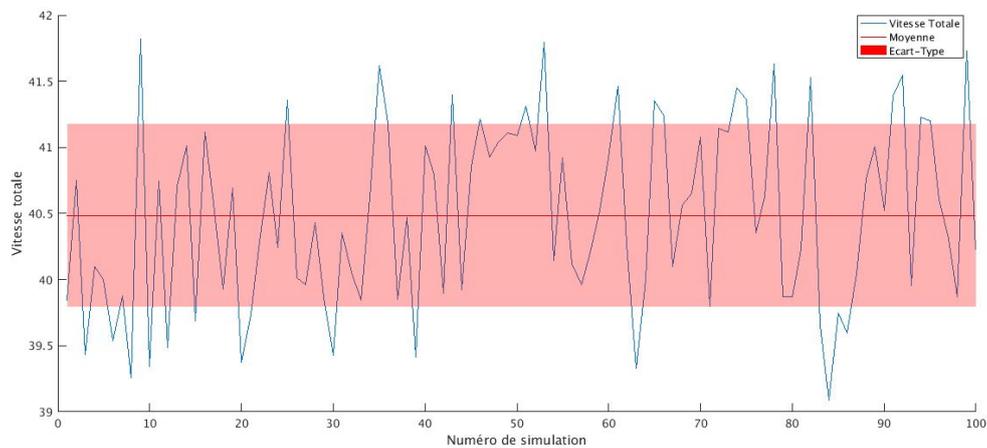


FIGURE 8.9: Influence d'une erreur (jusqu'à  $2^\circ$ ) sur l'azimuth et l'élévation de l'écho sur la détermination de la vitesse totale pour la trajectoire 105.

de 40.48 km/s et un écart-type de 0.69 km/s. Une telle erreur ( $\leq 1$  km/s) reste acceptable.

### 8.3.2 Influence de l'erreur sur la mesure des délais temporels

Il y a deux types d'erreur qui peuvent influencer la solution. Ces deux types sont :

- l'erreur sur la synchronisation de l'horloge du PC ou du Raspberry Pi (cette erreur est de l'ordre de  $\sim 1$  ms pour les PC qui utilisent *Windows* et 0.166ms pour les Raspberry Pi)
- l'erreur sur la définition du début de l'écho de météore qui sert à calculer les délais temporels (c'est à dire 50% du pic lors de la montée initiale)

Nous avons essayé de quantifier l'impact de ces erreurs sur la reconstruction de la trajectoire 105 et de la vitesse correspondante. De la figure 8.10, nous pouvons déduire que tant que le point de réflexion spéculaire identifié par le programme de filtrage se trouve dans la partie montante du signal, le délai temporel correspondant ne dépasse pas 5% du délai temporel moyen. Cette hypothèse a été vérifiée pour les autres trajectoires et il en sort que 5% d'erreur est raisonnable : cette marge est assez grande pour prévenir que le programme de filtrage ne détecte pas la montée du signal et assez petit pour que le délai temporel peut être pris en compte.

Des erreurs sur les délais temporels auront une influence sur la solution. Un calcul Monte-Carlo a été effectué pour 1000 combinaisons des délais temporels aléatoires avec la condition qu'ils ont une erreur maximale de 5% du délai temporel moyen. La figure 8.11 présente la vitesse moyenne et l'écart-type obtenus par ce calcul pour la trajectoire 105. La vitesse moyenne est 40.7 km/s avec un écart-type de 0.834 km/s. On a donc un écart-type qui est comparable à celui causé par l'erreur sur l'azimuth et l'élévation. Ça reste donc une valeur acceptable et on peut conclure que, comme l'échantillonnage par notre filtre est assez élevé, l'erreur sur le temps créé par celle-ci ne dégradera pas significativement le résultat.

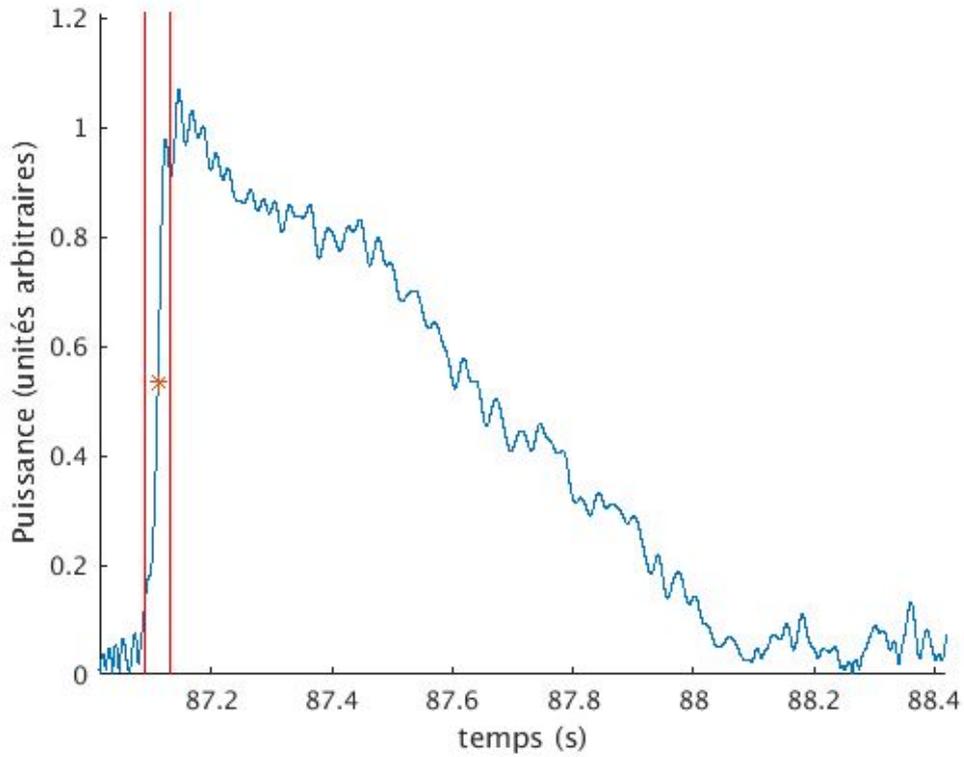


FIGURE 8.10: La région de temps dans laquelle se trouve le début de l'écho identifié par le programme, pour une erreur maximale de 5% de la moyenne des délais temporels utilisés pour la reconstruction de la trajectoire 105.

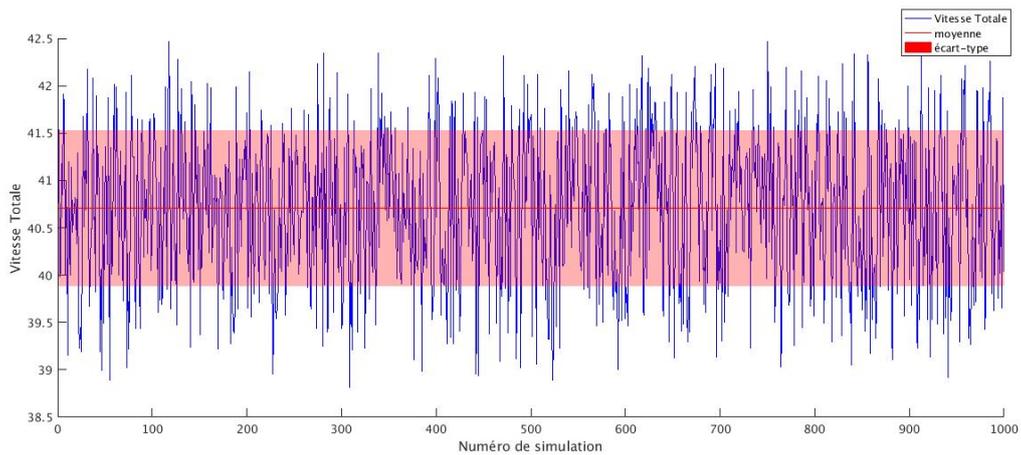


FIGURE 8.11: Influence d'une erreur de 5% sur les délais temporels sur la vitesse totale. La vitesse totale est calculée avec la méthode 2 pour 1000 combinaisons de délais temporels.

## 8.4 Reconstruction de la trajectoire en utilisant la méthode 3

Trajectoire 105	CAMS	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3
$X_0$ (km)	122.45	1.20	116.33	121.73
$Y_0$ (km)	93.60	12.85	86.80	93.93
$Z_0$ (km)	99.97	86.48	91.8	100.27
$V_x$ (km/s)	-18.4	-13.37	-19.95	-18.78
$V_y$ (km/s)	33.58	30.32	34.83	33.76
$V_z$ (km/s)	-12.56	-6.13	-11.18	-11.68

TABLE 8.3: La position du point de réflexion spéculaire pour Humain et les composantes du vecteur vitesse, calculées pour la trajectoire 105 par les trois méthodes et comparées avec les résultats CAMS

Cette méthode devrait donner plus facilement de meilleures solutions pour le vecteur de position, parce qu'à partir de trois stations de réception il y a 6 équations pour 6 variables. De plus, nous avons dans ce cas 2 types d'équations différentes (la dérivée de la distance parcourue et la distance elle-même), appliquées sur le système non-linéaire.

La Figure 8.12 montre la solution pour la trajectoire 105 obtenue avec la méthode 3. Cette figure et le tableau 8.3 montrent que les composantes de la position du point de réflexion spéculaire diffèrent de moins de 1 km des valeurs CAMS et les composantes du vecteur vitesse diffèrent de moins de 1 km/s des valeurs CAMS. La méthode 3 nous donne donc une meilleure solution pour la position du point de réflexion et une solution comparable à celle de la méthode 2 pour les composantes du vecteur vitesse. La valeur absolue de la vitesse totale (figure 8.13) est comparable à celle obtenue en utilisant la méthode 2. Une différence entre les deux méthodes est que la méthode 3 converge pour plus de vecteurs de départ que la méthode 2. La direction du vecteur vitesse est la même que pour les observations CAMS, ce que nous pouvons constater en observant la figure 8.14. La position du point de réflexion pour Humain est quasiment superposée avec celle donnée par le fichier CAMS. On peut conclure que pour la trajectoire 105, les solutions obtenues par les méthodes 2 et 3, sont toutes les deux bonnes en ce qui concerne les composantes de la vitesse, mais que la méthode 3 rend une solution plus précise de la position du point de réflexion spéculaire.

### 8.4.1 Influence de l'erreur sur le temps d'enregistrement

Comme pour la méthode précédente, cette méthode sera aussi influencée par les erreurs sur les délais temporels. La figure 8.15 présente cette influence de nouveau pour une erreur de 5 %. On peut conclure que la valeur moyenne pour la vitesse est de 41.49 km/s avec un écart-type de 0.74 km/s, ce qui reste de nouveau en dessous de 1 km/s et donc acceptable.

### 8.4.2 La différence en vitesse entre CAMS et BRAMS pour la trajectoire 105

La vitesse totale obtenue avec nos méthodes est égale à 40.7 km/s pour la méthode 2 et à 41.49 km/s pour la méthode 3, tandis que la vitesse CAMS  $V_\infty$  est 41.83 km/s. Des différences de 4.3% et 3.2% existent donc pour cette trajectoire. N'oublions pas les paramètres d'accélération qui sont utilisés dans la solution CAMS et non pas dans la solution du réseau BRAMS. En effet, comme la vitesse suit un modèle de décélération donnée par l'équation 6.1, la vitesse CAMS varie le long de la trajectoire enregistrée par les caméras. Pour la trajectoire CAMS 105, la durée d'enregistrement est  $t_{end} = 0.57$  secondes. On peut donc calculer la vitesse du météore à la fin de l'enregistrement.

$$V(0.57) = V_\infty - |4.049s^{-1} \cdot 0.068km| \cdot exp(4.049 \cdot 0.57) = 39.062km/s \quad (8.1)$$

La vitesse CAMS varie donc entre 41.83 km/s et 39.062 km/s le long de sa trajectoire. Quand on compare la valeur avec celle obtenue par les deux dernières méthodes développées pour le réseau BRAMS, il est clair qu'elle se retrouve dans la région  $[V_\infty, V(t_{end})]$ . Il est toutefois important de remarquer que dans les données CAMS, la valeur de la vitesse sera différente pour chaque point de réflexion, ce qui n'est pas le cas dans nos calculs.

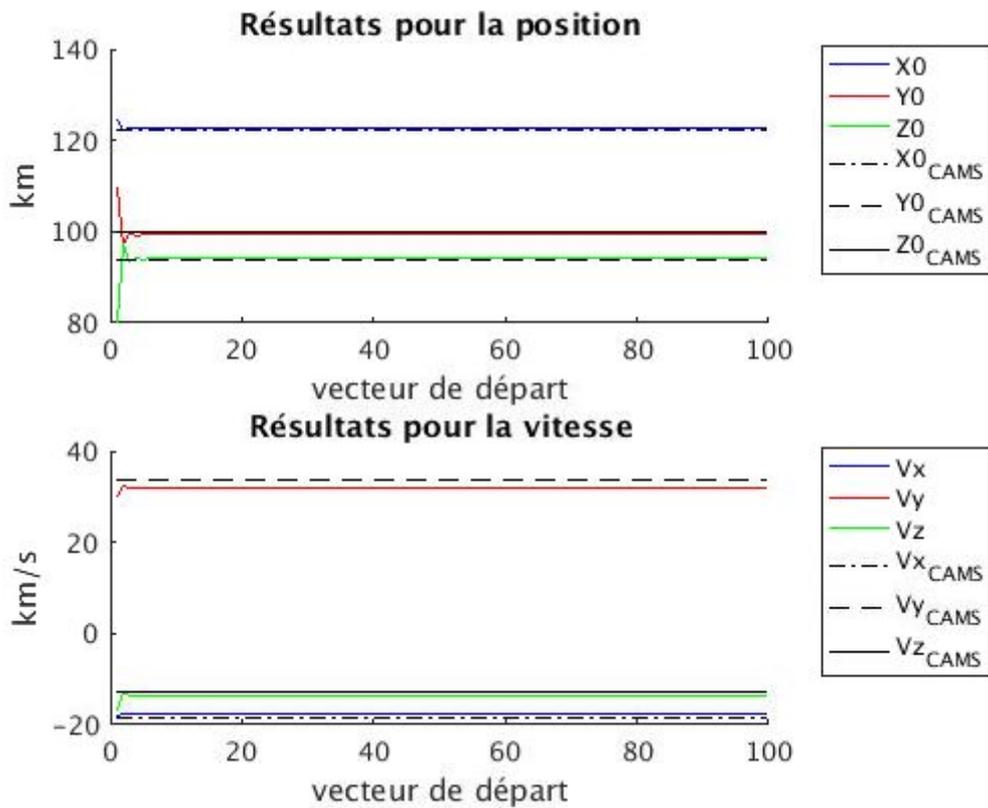


FIGURE 8.12: La solution pour le vecteur de la position du point de réflexion spéculaire pour Humain et le vecteur vitesse de la trajectoire 105, calculées par la méthode 3 pour 100 vecteurs de départ. Les valeurs obtenues par CAMS sont montrées comme comparaison.

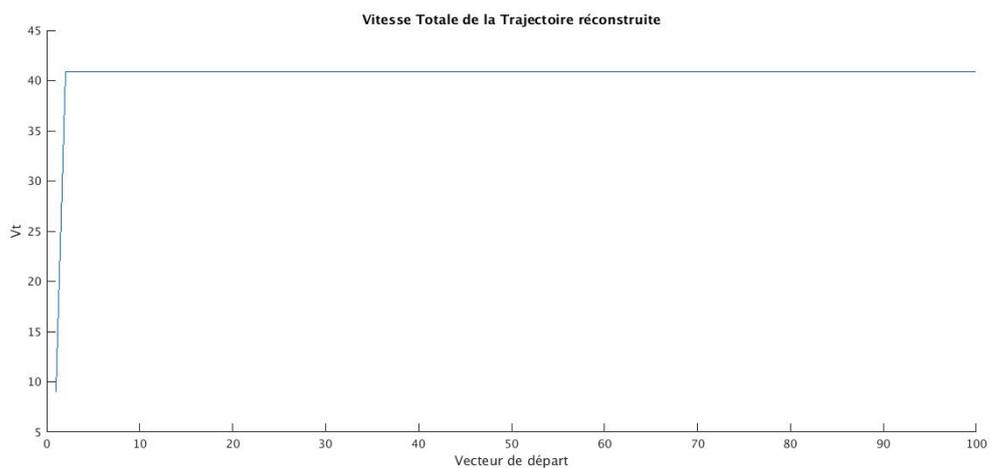


FIGURE 8.13: La vitesse totale de la trajectoire 105 pour 100 vecteurs de départ, calculée par la méthode 3

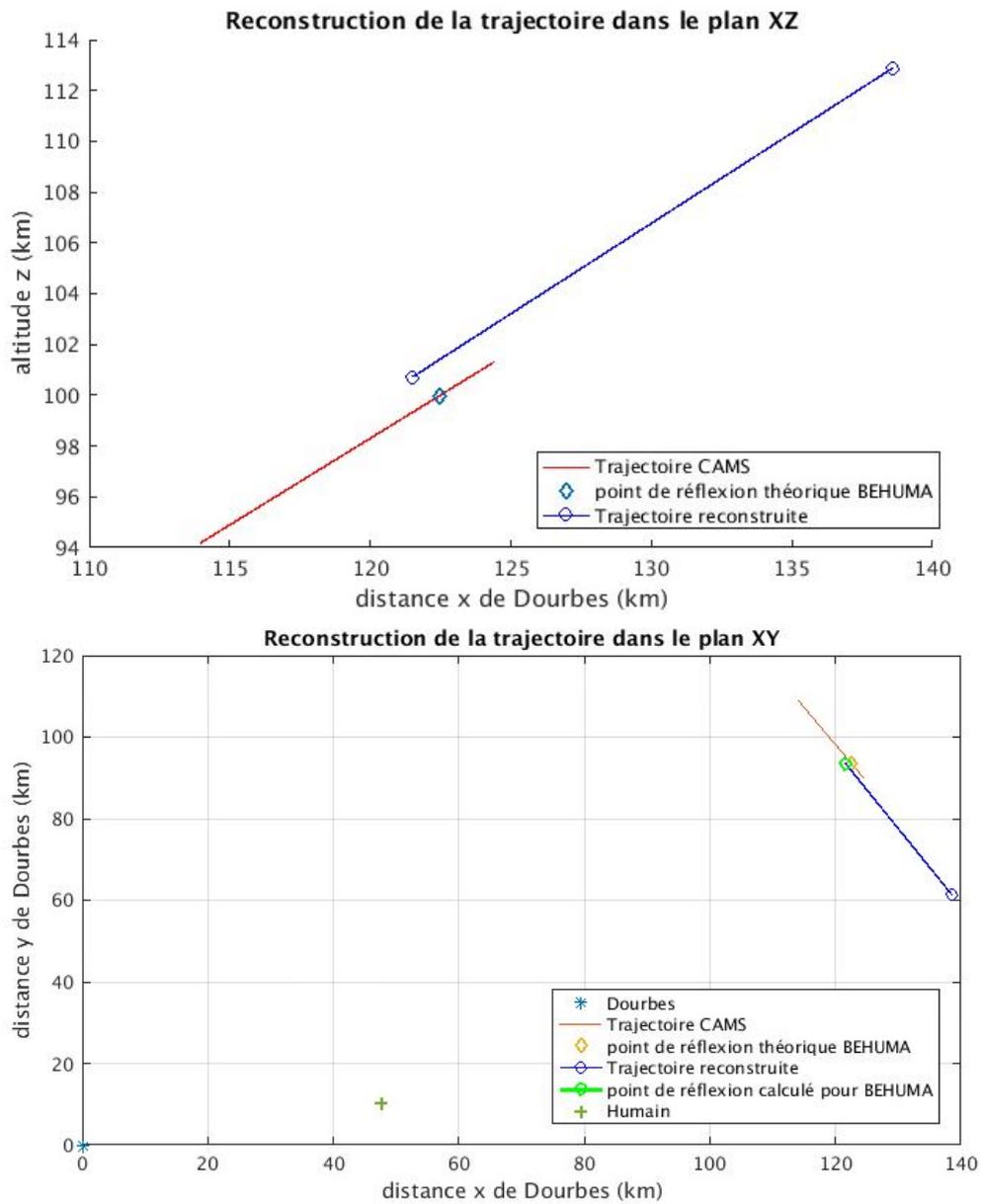


FIGURE 8.14: La trajectoire 105 reconstruite dans le plan XZ (haut) et dans le plan XY (bas) avec la méthode 3. La trajectoire CAMS est montrée pour comparaison.

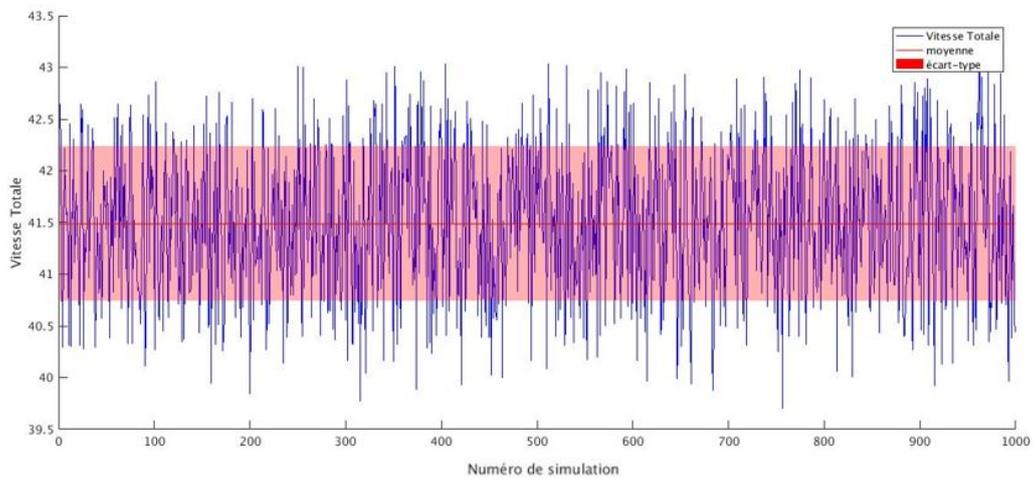


FIGURE 8.15: Influence d'une erreur de 5% sur les délais temporels sur la vitesse totale. La vitesse totale est calculée avec la méthode 3 pour 1000 combinaisons de délais temporels.

## 8.5 Résumé des 12 trajectoires CAMS reconstruites

Dans le fichier CAMS, 12 trajectoires ont été sélectionnées pour lesquelles suffisamment de stations du réseau BRAMS ont enregistré des échos de météore. Pour ces trajectoires une reconstruction était donc possible. Les figures 8.16 et 8.17 présentent toutes ces trajectoires dans le plan horizontal avec respectivement les méthodes 2 et 3. Nous ne présentons pas les résultats de la méthode 1 ici tant que celle-ci ne donne pas de résultats satisfaisants. Avec la méthode 2, on peut déduire que les vecteurs vitesse qui donnent l'orientation des trajectoires projetées dans le plan horizontal, calculées par la méthode 2 sont proches de celles obtenues par CAMS. Le tableau 8.4 présente la différence en position du point de réflexion spéculaire  $\Delta X_0$  et  $\Delta Y_0$  et aussi la différence d'angle d'orientation du vecteur vitesse  $\Delta\alpha$ . Ce tableau confirme les observations dans la figure 8.16 : il y a une différence d'angle d'orientation  $\Delta\alpha$  allant de  $0.25^\circ$  à  $6.8^\circ$ . Par contre, nous observons dans la figure 8.16 et dans le tableau 8.4 que pour certaines trajectoires, la position du point de réflexion par rapport à la station de Humain est décalée le long de l'azimuth dans laquelle le météore a été observé. Pour la trajectoire 709 par exemple, cette décalage est de  $-2.72$  km le long de l'axe X et de  $20.47$  km le long de l'axe Y avec une différence d'angle d'orientation de  $0.88^\circ$ .

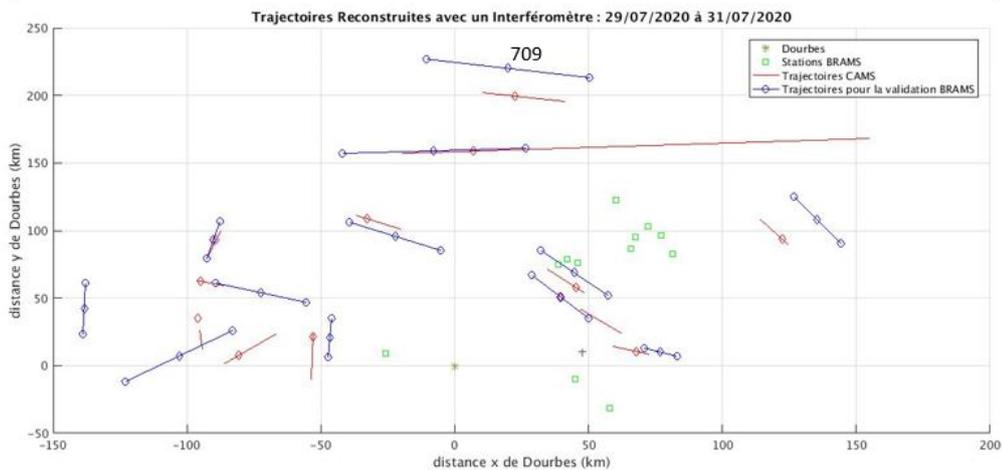


FIGURE 8.16: Les 12 trajectoires CAMS (en rouge) et les trajectoires reconstruites par la méthode 2 (en bleu). Les trajectoires sont projetées dans le plan horizontal.

La deuxième figure contient toutes les trajectoires reconstruites en utilisant la connaissance de la distance parcourue par le signal, comme serait le cas pour un signal avec codage de phase. Nous pouvons observer que la position et l'orientation du vecteur vitesse sont satisfaisantes pour toutes les trajectoires reconstruites par cette méthode. Nous pouvons donc conclure que, comme anticipé dans les sections précédentes, pour la position du point de réflexion, cette dernière méthode est plus précise. Comme le montre le tableau 8.4, la différence en position du point de réflexion spéculaire varie entre 0.25km et 6.7km pour  $\Delta X_0$  et entre 0km et 7.5km pour  $\Delta Y_0$ . La différence d'angle d'orientation  $\Delta\alpha$  varie entre  $0.69^\circ$  et  $11.72^\circ$ . La précision sur le résultat pour l'orientation du vecteur vitesse est comparable pour les deux méthodes.

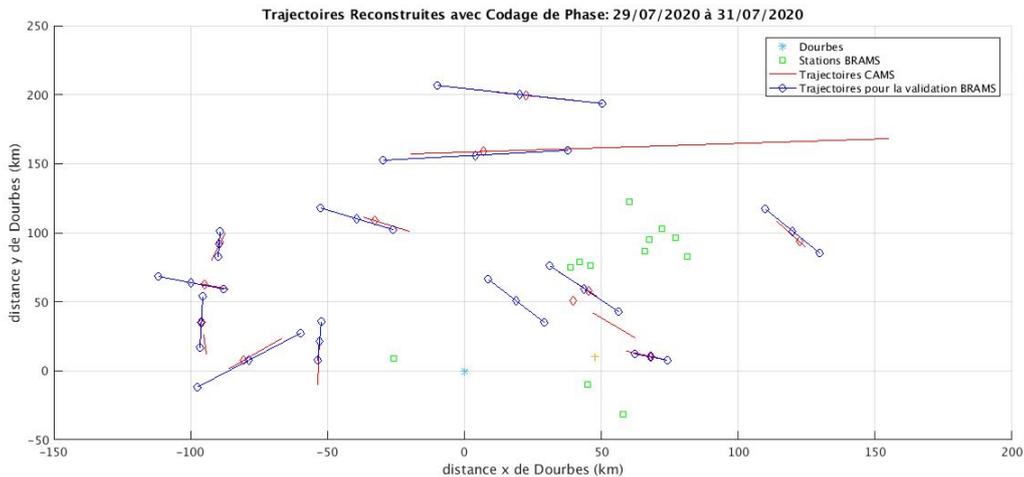


FIGURE 8.17: Les 12 trajectoires CAMS (en rouge) et les trajectoires reconstruites par la méthode 3 (en bleu). Les trajectoires sont projetées dans le plan horizontal.

La comparaison entre les vitesses totales calculées par les méthodes 2 et 3 avec la vitesse totale mesurée par le réseau CAMS est donnée dans le tableau 8.5. Nous voyons que les deux mesures diffèrent de 0.3 à 6 km/s de la vitesse  $V_\infty$  calculée par le réseau CAMS. La différence de vitesse a une tendance à augmenter avec la valeur de la vitesse totale. Comme décrit dans la section 8.4.2, la différence en vitesse totale calculée par nos méthodes peut partiellement être justifiée par l'absence d'un modèle de décélération dans les méthodes 2 et 3. L'exception dans le tableau 8.5 est la trajectoire 477, pour laquelle nos méthodes obtiennent une vitesse totale plus grande que les calculs du réseau CAMS.

Traj	Méthode 2 $\Delta X_{Hum}(km)$	Méthode 3 $\Delta X_{Hum}(km)$	Méthode 2 $\Delta Y_{Hum}(km)$	Méthode 3 $\Delta Y_{Hum}(km)$	Méthode 2 $\Delta\alpha(^{\circ})$	Méthode 3 $\Delta\alpha(^{\circ})$
79	-0.54	-1.61	10.85	1.60	1.29	1.33
105	12.89	-2.62	14.32	7.50	1.58	3.2
149	-1.00	-0.36	0.60	-1.10	4.2	11.72
188	6.19	0.12	-0.68	0.30	1.63	1.74
282	-42.32	-0.10	7.28	0.24	6.8	6.25
477	-22.44	1.82	-0.46	0.16	5	2.36
532	0.08	0.69	0.40	1.59	6.5	7.38
536	-2.72	-2.32	20.47	0.65	0.88	0.69
598	-14.68	-3.00	0.24	-2.75	0.25	2.19
654	8.87	0.28	-0.04	0	3.2	1.73
709	10.60	-6.42	-12.94	1.37	0.25	1.72
773	22.55	-4.91	-8.24	1.53	2.8	1.31

TABLE 8.4: Résumé des différences en coordonnées du point de réflexion spéculaire pour Humain et les différences en orientation ( $\Delta\alpha$ ) du vecteur vitesse dans le plan horizontal, pour la méthode 2 et 3

Traj	$V_{Tot,CAMS}(\frac{km}{s})$	$V_{Tot,Int}(\frac{km}{s})$	$\frac{\Delta V_{Tot,Int}}{V_{Tot,CAMS}}(\%)$	$V_{Tot,CdP}(\frac{km}{s})$	$\frac{\Delta V_{Tot,CdP}}{V_{Tot,CAMS}}(\%)$
79	41.96	43.66	4.1	43.69	4.1
105	41.83	40.7	2.7	41.49	0.7
149	26.45	25.33	4.2	25.02	5.4
188	29.95	29.15	2.6	27.93	6.7
282	40.59	40.0	1.4	38.84	4.3
477	61.36	67.95	10.7	63.65	3.7
532	43.51	39.55	9.1	39.69	8.9
536	65.07	68.02	4.5	68.66	5.5
598	70.46	70.84	0.54	70.143	0.45
654	15.49	14.03	9.4	14.41	6.9
709	63.4	62.00	2.3	61.73	2.6
773	65.86	61.68	6.3	60.28	8.2

TABLE 8.5: Résumé des vitesses totales pour toutes les trajectoires reconstruites avec les méthodes 2 et 3. De gauche à droite : Le numéro de la trajectoire du fichier CAMS, la vitesse totale mesurée par CAMS, la vitesse totale calculée par la méthode 2, la différence relative entre la vitesse calculée avec la méthode 2 et la vitesse mesurée par CAMS, la vitesse totale calculée par la méthode 3, la différence relative entre la vitesse calculée avec la méthode 3 et la vitesse mesurée par CAMS.

## Chapitre 9

# Conclusions et Perspectives

Dans cette dissertation, nous avons développé trois méthodes mathématiques pour reconstruire la trajectoire des météores à partir des données obtenues par le réseau BRAMS. Avoir la capacité de reconstruire les trajectoires est nécessaire pour étudier d'autres aspects des météores avec les données BRAMS. Par exemple, la connaissance de la trajectoire permet de calculer le pic de puissance de l'écho de météore (cfr. chapitre 3), en déduire l'ionisation en différents points de la trajectoire et de déterminer de manière indirecte la masse du météoroïde. La connaissance du radiant du météore permet également de séparer les météores sporadiques des essaims (et de calculer par exemple l'indice de masse [23]).

Nous avons développé des équations qui utilisent les propriétés de la réflexion spéculaire : 1) La dérivée totale de la distance parcourue par l'onde radio doit être égale à zéro et 2) Le point de réflexion spéculaire se trouve sur un ellipsoïde qui a comme points focaux l'émetteur et le récepteur. La conséquence importante de la réflexion spéculaire est l'existence de délais temporels entre l'apparition des échos de météore entre les différentes stations de réception. Sur base de ces propriétés, nous avons utilisé les 3 méthodes suivantes : La méthode 1 utilise uniquement la mesure des délais temporels. La méthode 2 utilise la mesure des délais temporels, mais aussi l'angle de l'azimuth et de l'élévation obtenus par l'interféromètre à Humain et la méthode 3 utilise la mesure des délais temporels et la distance parcourue par les ondes radio. Les méthodes 1 et 2 sont importantes car elles peuvent être appliquées à une grande partie des données existantes du réseau BRAMS, tandis que la méthode 3 est pour le moment hypothétique. Avant de pouvoir utiliser cette méthode, le réseau a besoin de modifications software au niveau de l'émetteur et des stations de réception afin d'obtenir la distance parcourue par les ondes radio, par exemple en utilisant un codage de phase.

Nous avons écrit un programme en *Matlab* qui calcule les délais temporels pour toutes les stations qui ont enregistré des échos d'un météore. Le programme utilise ensuite une des 3 méthodes pour reconstruire la trajectoire du météore. Ce programme a été testé et des données du réseau de caméras optiques CAMS ont été utilisées pour comparer les résultats. Au final, 12 des 948 trajectoires observées par le réseau CAMS lors de 3 nuits du 29 au 31 juillet 2020 ont été sélectionnées, parce que pour ces trajectoires au moins 6 stations dont Humain avaient détecté un écho du même météore qui devait être "underdense". Pour la méthode 1, les résultats sont peu concluants. La position du point de réflexion spéculaire n'est pas retrouvée correctement. Par contre, l'orientation du vecteur vitesse est plus ou moins correcte.

Pour la méthode 2, la position du point de réflexion spéculaire diffère de quelques kilomètres de celle calculée de manière théorique sur la trajectoire CAMS. Cette différence est toujours le long de la direction de l'écho observé par l'interféromètre. L'orientation du vecteur vitesse obtenue par cette méthode est correcte avec une valeur absolue qui diffère pour 9 trajectoires de moins de 4.5% de la valeur mesurée par CAMS. Il y a pour 3 trajectoires une différence en valeur absolue plus grande, entre 9.1% et 10.7 %. Les différences de vitesse peuvent être expliquées par le fait que la vitesse totale mesurée par CAMS est la vitesse au début de la trajectoire et qu'un modèle de décélération est utilisé.

La méthode 3 donne les meilleurs résultats en ce qui concerne la position du point de réflexion spéculaire pour Humain. Les composantes du vecteur de la position diffèrent dans la plupart des cas de moins de 3km de la valeur calculée pour CAMS avec deux exceptions qui remontent à 6.42km et 7.5km respectivement. L'orientation est aussi correcte et la différence en valeur absolue reste en dessous de 5.5% pour 9 trajectoires avec une valeur qui remonte à 8.9% dans le pire cas. En plus de donner les meilleurs résultats, la méthode 3 est efficace parce qu'elle n'a besoin que des mesures obtenues par 3 stations, ce qui augmente fortement le nombre de météores pour lesquels cette méthode sera éventuellement applicable.

Dans ce travail, la reconstruction des données par une des trois méthodes a été faite essentiellement avec des données sélectionnées manuellement. Le programme écrit pour ce travail est capable de calculer les temps d'apparition des différents échos, seulement quand un temps approximatif, basé sur une détection visuelle des échos dans les spectrogrammes correspondants, a été établi. Un futur travail devra automatiser cette procédure pour reconnaître un écho de météore dans le spectrogramme d'une station et ensuite chercher les échos du même météore dans les spectrogrammes de toutes les autres stations.

Dans le développement mathématique, nous avons négligé la différence en altitude entre les différentes stations. Cela implique que la rotation autour de l'axe Y pour passer du référentiel cartésien centré sur Dourbes dans le référentiel canonique de l'ellipsoïde a été négligé. Inclure cette différence d'altitude pourrait donc améliorer les résultats. Néanmoins, comme les angles sont très petits, ceci peut difficilement expliquer que la méthode 1 ne converge pas vers la solution correcte.

En ce moment, il est nécessaire de manuellement sélectionner les équations pour une des 3 méthodes. Inclure la possibilité de sélectionner automatiquement la méthode améliorera le programme. Une dernière étape nécessaire pour le fonctionnement correct de la méthode 2 est la calibration de l'interféromètre. Dans ce travail, nous avons supposé que la direction vers le point de réflexion spéculaire de la station à Humain avait été correctement retrouvée (à une incertitude simulée près). Une fois la calibration de l'interféromètre terminée, les données réellement calculées pour l'azimut et l'élévation de l'écho pourront être utilisées dans cette méthode.

En ce qui concerne le futur développement du réseau BRAMS, il y a aussi des perspectives qui pourraient permettre d'obtenir de meilleurs résultats. Afin de réduire l'erreur sur la position du point de réflexion spéculaire avec la méthode 2, il y a deux possibilités : la première possibilité est l'installation d'un deuxième interféromètre. Ce projet, qui fait partie de la mise-en-place d'un système radar situé à Dourbes, est déjà en cours et la finalisation est prévue pour l'année 2022. Il faut néanmoins tenir compte du fait que le nombre de météores, détectés par les deux interféromètres sera moindre que ceux détectés par le seul interféromètre à Humain. La deuxième possibilité est d'installer plus de stations de réception à proximité de l'interféromètre à Humain pour maximiser le nombre de météores détectés par l'interféromètre et au moins 3 stations.

Finalement, l'introduction d'un codage de phase du signal continu pourrait être considérée, vu que la méthode 3 qui suppose que la distance parcourue par les ondes radio est connue, nous donne les meilleurs résultats. Un futur travail pourrait donc étudier la possibilité d'adapter le signal à Dourbes pour incorporer un codage de phase et de modifier l'analyse des données au niveau des stations de réception pour pouvoir obtenir cette distance.

# Bibliographie

- [1] Wislez J.-M. Forward scattering of radio waves off meteor trails. *Proceedings IMC Brandenburg*, pages 99–117, 1995.
- [2] Mazur M. ; Pokorny P. ; Brown P. ; Weryk R. ; Vida D. ; Schult C. ; Stober G. ; Agrawal A. Precision measurements of radar transverse scattering speeds from meteor phase characteristics. *Radio science*, 55 :1–32, 2019.
- [3] Jenniskens P. ; Gural P. Grigsby B J. ; Newman K. E. ; Borden M. ; Koop M. ; Holman D. Cams : Cameras for allsky meteor surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus*, 216 :40–61, 2011.
- [4] Plane J. Cosmic dust in the earth's atmosphere. *Chem Soc Rev*, 41 :6507–6518, 2012.
- [5] Jeanne S. *Méthode d'analyse statistique appliquée au réseau d'observation européen des météores FRIPON*. Observatoire de Paris, 2001.
- [6] Waleed Saeed Mahgoub Elsayed Madkour. *Low cost applications in astronomy, atmospheric science and communications using radio waves forward scattering from meteor trails*. PhD thesis, Kochi University of Technology, 2017.
- [7] Origins and history of meteors. "[https://www.meteorobs.org/meteor-origin-history/#First\\_Discoveries](https://www.meteorobs.org/meteor-origin-history/#First_Discoveries)", 2021.
- [8] Richard Taibi. The early years of meteor observations in the usa. "<https://amsmeteors.org/about/ams-history/the-early-years-of-meteor-observations-in-the-usa/>".
- [9] Silver G. Irving M. Meteor burst communications systems. 1989.
- [10] McKinley D. *Meteor science and engineering*. McGraw-Hill, 1961.
- [11] Belgian Institute for Space Aeronomy. Brams. "<https://brams.aeronomie.be>", 2021.
- [12] Lamy H. Ranvier S. De Keyser J. Calders S. Gamby E. Verbeeck C. Brams : the belgian radio meteor stations. *Meteoroids : The Smallest Solar System Bodies : Proceedings of the Meteoroids 2010 Conference*

- held in Breckenridge, Colorado, USA, May 24–28, 2010., pages 351–356, 2010.
- [13] Calders S Lamy H. Brams : status of the network and preliminary results. *Proceedings of the IMC, Sibiu, 2011.*, pages 73–76, 2011.
  - [14] Lamy H. et al.. Properties of meteoroids from forward scatterradio observations. *Hypersonic meteoroid entry physics 61th course of the international School of Quantum Electronics Erice, Italy, 3-7 October 2017*, 2017.
  - [15] Silver G. Duerinck P-Y. Internship report : study of coordinated radio and optical observations of meteors with brams and cams networks. Technical report, Université Libre de Bruxelles, 2019.
  - [16] Jones J. ; Webster R. ; Hocking W. An improved interferometer design for use with meteor radar. *Radio Science*, 33 :55–65, 1998.
  - [17] Planquart L. Calibration of brams interferometer. Master’s thesis, Université Libre de Bruxelles, 2019.
  - [18] Lamy H. ; Tétard C. Retrieving meteoroids trajectories using brams data : preliminary simulations. *BRAMS Meeting Euro Space Center*, 2016.
  - [19] Vierinen J. ; Chau J. ; Pfeffer N. ; Clahsen M. ; Stober G. Coded continuous wave meteor radar. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9 :829–839, 2016.
  - [20] Roggemans P. Variation in heights of cams meteor trajectories. *meteor-news.org*, 2 :80–86, 2017.
  - [21] Gural P. A new method of meteor trajectory determination applied to multiple unsynchronized video cameras. *Meteoritics & Planetary Science*, 47 :1405–1418, 2012.
  - [22] Yoshida H. ; Terasawa T. ; Miyamoto H. ; Usui T. ; Yaguchi N. ; Yoshikawa I. The forward scattering meteor radio echo observation using a gps synchronized multiple receiving stations. *Proceedings of conference : Asteroids, Comets, Meteors 2012*, 2013.
  - [23] Blauww R.C. ; Campbell-Brown M.D. ; Weryk R.J. A meteoroid stream survey using the canadian meteor orbit radar – iii. mass distribution indices of six major meteor showers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 414 :3322–3329, 2011.