



Détection temps réel de météores à bord d'un nanosatellite, application au projet Meteorix

Maxime Millet, Nicolas Rambaux, Andrea Petreto, Florian Lemaitre, Lionel Lacassagne

► To cite this version:

Maxime Millet, Nicolas Rambaux, Andrea Petreto, Florian Lemaitre, Lionel Lacassagne. Détection temps réel de météores à bord d'un nanosatellite, application au projet Meteorix. ORASIS 2021, Centre National de la Recherche Scientifique [CNRS], Sep 2021, Saint Ferréol, France. hal-03339645

HAL Id: hal-03339645

<https://hal.science/hal-03339645>

Submitted on 9 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Détection temps réel de météores à bord d'un nanosatellite, application au projet Meteorix

M. Millet^{1,2}, N. Rambaux³, A. Petreto^{1,2}, F. Lemaitre¹, L. Lacassagne¹

¹LIP6, Sorbonne Université, CNRS

²LHERITIER - Alcen

³IMCCE, CNRS, Observatoire de Paris, PSL Université, Sorbonne Université

Résumé

Dans cet article, nous présentons une nouvelle chaîne de traitements pour la détection et le suivi de météores depuis un nanosatellite. Les contraintes d'embarquabilité sont fortes : temps de traitement et consommation électrique. Nous avons donc choisi un ensemble d'algorithmes avec un rapport le plus équilibré possible entre complexité et précision. Les spécificités architecturales ont également orienté nos choix algorithmiques en vue de futures optimisations. La chaîne de traitement présentée ici repose principalement sur une estimation de vitesse par flot optique et des calculs de statistiques circulaires. Si les autres méthodes de l'état de l'art sont efficaces pour la détection de météores depuis le sol, nous montrons que celle présentée ici l'est pour une détection depuis l'espace.

Mots Clef

détection et suivi de météores, flot optique, étiquetage et analyse en composantes connexes, statistiques circulaires, système embarqué, nanosatellite, adéquation algorithme architecture

Abstract

This article introduces a real-time computer vision application for detecting and tracking meteors aboard a nanosatellite where the embedded constraints (execution time and power consumption) are strong. The architectural specifications guided our choices of algorithms for future optimizations. The main parts of this application are the optical flow estimation and the calculation of circular statistics. State of the art applications are effective for ground detection with stationary camera whereas the presented application deals with a camera in motion for space detection. The application is intended to be the payload of the Sorbonne University Meteorix nanosatellite.

Keywords

Detection and tracking of meteors, optical flow, connected component labeling and analysis, circular stats, embedded system, nanosatellite, algorithm & architecture adequacy.

1 Introduction

Dans le cadre du programme Nanolab Academy (anciennement JANUS) du CNES, Sorbonne Université développe un projet de nanosatellite universitaire baptisé Meteorix [1].

Ce projet comporte à la fois des objectifs scientifiques astronomiques – déterminer le flux de météores et de débris spatiaux qui entrent dans l'atmosphère terrestre –, un objectif pédagogique – impliquer les étudiants dans la conception, la réalisation et l'exploitation d'une mission spatiale – mais aussi un objectif scientifique majeur qui est la démonstration d'une chaîne de traitement temps réel embarquée dans le nanosatellite, et ce malgré de fortes contraintes d'embarquabilité.

Nous proposons une méthode de détection des météores basée sur des calculs robustes de flot optique et des statistiques angulaires qui permettent la classification des objets en mouvement.

La section 2 présente le projet Meteorix et son contexte, la section 3 présente un état de l'art des algorithmes de détection de météores existants. La section 4 présente la nouvelle chaîne de traitement et la section 5 un banc de validation pour qualifier celle-ci afin d'éviter de futures régressions qualitatives. La section 6 présente une analyse des résultats obtenus par notre chaîne de traitement. Enfin la section 7 conclut ce travail.

2 Le projet Meteorix

Meteorix est une mission universitaire CubeSat 3U (3 unités cubiques de 10 cm de côté) qui est actuellement en phase de définition du système (dite phase B du développement) et de prototypage de la charge utile. La charge utile de Meteorix est une caméra dans le domaine du visible et une chaîne de traitement dédiée à la détection des météores et débris spatiaux. Le mode « Observation » est activé lorsque le nanosatellite est éclipsé par la Terre et celui-ci surveille l'atmosphère terrestre. Dans ce mode, la caméra pointe au nadir (en direction de la Terre), afin de collecter suffisamment de photons issus des météores et des débris. Le nanosatellite est sur une orbite basse à 500 km d'altitude et le champ de vue de la caméra est de 40°. Cette configuration permet de détecter en moyenne une rentrée sporadique

d'un météore par jour. Le système de sauvegarde est activé lorsqu'un phénomène lumineux correspondant à une rentrée atmosphérique est détecté. Cependant cette détection est complexe à cause des perturbations lumineuses telles que les villes, les orages et la lumière parasite de la Lune réfléchiée sur les nuages de la Terre.

La puissance nécessaire pour tout le fonctionnement du satellite (télécommunication, contrôle d'altitude, contrôle de la température, etc.), est obtenue par la présence des 4 panneaux solaires qui sont déployables (voir figure du nanosatellite dans [1]). La puissance pour la charge utile, caméra et chaîne de détection, est de l'ordre de 2 à 5 W. Ce projet présente donc une forte contrainte sur la puissance électrique disponible à bord.

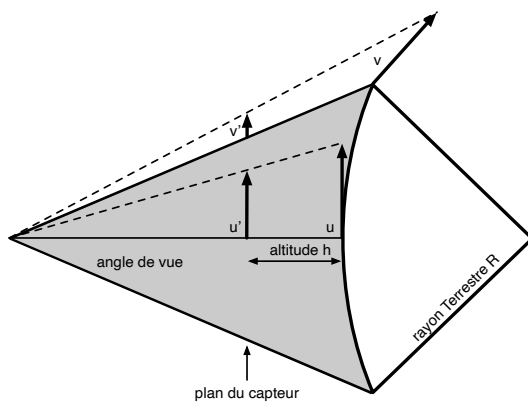


FIGURE 1 – Impact de l'angle de vue sur la projection des vecteurs vitesse sur le plan du capteur (v_0) pour une altitude h faible par rapport au rayon terrestre R , $h \ll R$, l'amplitude des vitesses projetées sont similaires $\|u'\| \simeq \|v'\|$ (figure non à l'échelle).

La vitesse de défilement des objets sur les images est un des critères de détectabilité, voir Section 4. La vitesse de rentrée des météores dans l'atmosphère varie entre 11 et 72 km/s et la vitesse d'un débris spatial est de l'ordre de 8 km/s pour une vitesse du satellite de 7.6 km/s. La vitesse apparente d'un météore ou débris spatial dans les images varie donc de zéro à 80 km/s. La vitesse apparente d'un objet terrestre correspond à la vitesse relative du satellite par rapport à la vitesse de cet objet sur la Terre. La vitesse de défilement du sol est liée à la rotation terrestre. Celle-ci vaut environ 460 m/s pour un point situé à l'équateur. La Figure 1 décrit l'influence de la sphéricité de la Terre sur la vitesse de défilement du sol par rapport à la caméra. La différence de défilement entre un point au centre du capteur, donc au nadir, et un point en bordure sera de 0.01%. C'est-à-dire que la correction est négligeable et la vitesse d'un objet terrestre est dans l'intervalle de 7.2-7.8 km/s.

3 État de l'art

Jusqu'à présent, les différentes techniques de détection ont été développées pour une détection au sol. La détection par vidéo est la plus simple à mettre en oeuvre : une caméra, un ordinateur et une chaîne de traitements suffisent. Ces dernières sont généralement divisées en trois étapes : un étape de pré-traitement, une étape de reconnaissance des météores puis l'extraction de ceux-ci (sous différentes formes possibles : images, vidéo, fichier texte).

En 2005, Molau et Gural [2] passent en revue plusieurs techniques de traitement d'image utilisées et plusieurs chaînes de traitement dont MetRec [3], MeteorScan [4] et UFOCapture [5] qui sont toujours utilisées aujourd'hui, dans leur ensemble ou pour l'étape de reconnaissance des météores dans certains nouveaux projets. Les deux premiers permettent de faire de la détection en temps réel (25 à 30 images/s) avec une probabilité de détection supérieure à 80%. UFOCapture est un programme d'enregistrement des objets en mouvement dans le ciel en temps réel, livré avec l'outil UFOAnalyzer qui permet de classifier ceux-ci (éventuellement comme météores) dans un second temps. Dans ces projets, la reconnaissance des météores se fait par différentes techniques telles que des transformées de Hough, ou du *template matching* comme le décrivent Molau et Gural. Avant cela, une soustraction de plusieurs images est réalisée dans l'étape de pré-traitement pour ne conserver que les objets en mouvement.

En 2009, Gural et Segon [6] proposent dans une nouvelle chaîne de traitement de rassembler jusqu'à 256 images d'entrée dans une image bitmap 3 couleurs pour reconstituer la trace des éventuelles météores. Le canal bleu est utilisé pour stocker les pixels les plus lumineux de cet ensemble d'images, les canaux rouge et vert servent à conserver la dimension temporelle en stockant le numéro d'image de ces pixels. MeteorScan est ensuite utilisé pour l'étape de reconnaissance.

Il existe également des réseaux de caméras dispersées sur une zone géographique et pointées en direction du ciel dans le but de détecter les météores et de calculer leur trajectoire. C'est le cas du projet FRIPON [7] qui combine détection radio et détection optique grâce à environ 250 caméras réparties sur tout le territoire français et en Europe, dans le but de retrouver des fragments de météorites. Pour cela, le projet a conçu une chaîne de traitements parallèle libre, gratuite et multi-plateformes, nommée FreeTure [8]. Les images acquises par la caméra sont placées dans un buffer partagé avec l'étape de détection. Comme précédemment, la détection commence par une étape de pré-traitement où deux images consécutives sont soustraites afin de supprimer les pixels stationnaires. Pour chaque image, des listes d'événements locaux sont construites à partir de régions d'intérêt de $10\text{px} \times 10\text{px}$ s'intersectant entre elles. Pour ajouter la dimension temporelle, des listes d'événements

globaux sont créées. Un événement global correspond à une liste d'événements locaux de plusieurs images qui s'intersectent entre eux. Un événement global sera classifié comme étant un météore en fonction du nombre d'images le composant.

Ces dernières années ont vu l'arrivée de chaînes de traitement utilisant des réseaux de neurones. En 2018, Galindo et Lorena [9] comparent plusieurs réseaux de neurones convolutifs, pré-entraînés avec les collections d'images ImageNet ou Fashion-MNIST puis entraînés avec une petite collection d'images de météores de différentes sources. La meilleure configuration, composée de 18 couches (le minimum testé) et pré-entraînée avec Fashion-MNIST obtient une probabilité de détection de 96% (contre 82% sans pré-entraînement). Ces expériences ont été menées avec un GPU Nvidia Quadro P4000.

En 2019, Gural [10] utilise un réseau de neurones convolutif dans le but de remplacer la confirmation humaine de la classification, c'est donc seulement une partie de la chaîne de traitement. Ce réseau composé de 4 couches met 13ms pour classer des régions d'intérêt de $94\text{px} \times 94\text{px}$ avec une probabilité de détection de 99.94%. Gural a également tenté d'utiliser le réseau directement comme détecteur de météores. Avec des images FullHD, la classification se fait en 8 secondes en utilisant un processeur Intel i7, ce qui est loin d'une cadence temps réel.

En 2020, Cecil et Campbell-Brown [11] proposent aussi pour le réseau de caméras canadien CAMO, un réseau de neurones convolutif de 6 couches afin de remplacer l'intervention humaine de confirmation. Ils expliquent avoir essayé d'entraîner le réseau uniquement avec des images pour s'en servir de détecteur mais que le nombre de faux positifs est trop important. Ils ont donc développé un algorithme de pré-détection (assemblage de plusieurs images, transformées de Hough) servant d'entrée au réseau de neurones. Leur chaîne de traitement complète permet d'atteindre une cadence de traitement de 21 images/s en utilisant un processeur Intel i7 6850k avec une probabilité de détection de 99.8%.

Au final, les réseaux de neurones sont principalement utilisés comme composant de la chaîne de traitement mais nécessitent toujours une étape de pré-traitement utilisant les mêmes techniques de traitement d'images que les autres. Le matériel utilisé pour l'inférence (Intel i7, GPU Quadro) est également plus puissant que celui dont disposera le nanosatellite et n'est pas compatible avec les contraintes énergétiques d'un système embarqué. D'autres réseaux de neurones plus légers pourraient être considérés pour des applications embarquées. Cependant, contrairement aux projets terrestres, nous ne disposons pas de milliers de séquences nécessaires à l'apprentissage machine.

Depuis les débuts de la détection de météores par vidéo (début des années 90) les chaînes de traitement s'appuient sur des techniques de traitement d'image nécessitant une caméra immobile. Celles-ci offrent de très bons résultats mais nécessitent une caméra immobile, les seuls mouvements apparents sont donc ceux des objets célestes et des nuages. Cela ne sera pas le cas dans le projet Meteorix où il faut prendre en compte le mouvement du nanosatellite (7.6 km/s) et du mouvement de la Terre (460 m/s). Cette composition de mouvements rend incompatible l'usage des techniques de pré-traitement abordées précédemment car tous les points bougent d'une image à l'autre.

Les réseaux de neurones ne sont utilisés que pour l'étape de reconnaissance des météores qui nécessite un pré-traitement utilisant les mêmes techniques que précédemment. De plus, l'utilisation d'un réseau de neurones nécessite du matériel puissant mais non adapté à une cadence temps réel et aux contraintes d'embarquabilité du nanosatellite.

C'est pourquoi, nous proposons une nouvelle chaîne de traitement pouvant être optimisée pour fonctionner avec une cadence temps réel et une caméra en mouvement sur du matériel à faible consommation électrique.

4 Chaîne de traitement

Nous proposons une nouvelle chaîne de traitements composée d'algorithmes rapides et robustes pour traiter un flux vidéo continu. La Figure 2 schématise les différentes étapes de celle-ci.

La première étape de cette chaîne est une estimation du flot optique permettant l'obtention d'un vecteur vitesse en tout point de l'image. Nous avons choisi d'utiliser l'algorithme décrit par Horn & Schunk [12] dans une version multi-résolution [13]. Dans la suite, le terme vitesse fera toujours référence à la vitesse apparentes des pixels et des composantes connexes exprimée en pixels par image.

La deuxième étape consiste à créer un masque binaire pour identifier les objets se déplaçant plus vite que le fond de la Terre (éclairs, météores, phénomènes lumineux transitoires...) par un seuillage sur la norme des vecteurs vitesses obtenus à l'étape précédente. Ce seuil a été fixé à 2.5 pixels/image suite à une analyse manuelle des séquences vidéos de l'expérience Meteor de l'Université de Chiba (expérience détaillée en Section 5). Une suite d'opérations de morphologie mathématique est appliquée au masque binaire obtenu : ouverture puis fermeture dans le but d'éliminer les pixels solitaires puis de regrouper les amas de pixels proches.

La troisième étape est un étiquetage en composantes connexes pour passer d'une représentation de pixels à une représentation d'objets.

La quatrième étape est une analyse de ces composantes

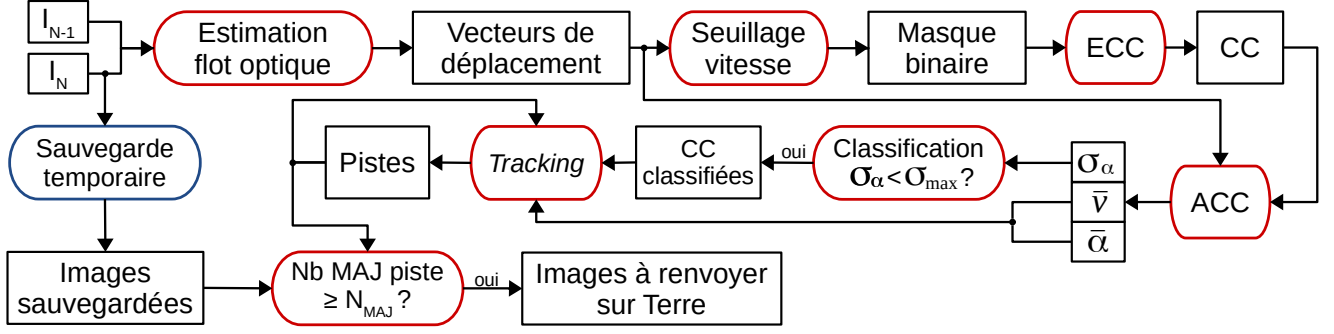


FIGURE 2 – Déroulé de la chaîne de traitement de détection de météores. CC = Composantes Connexes, ECC = Étiquetage en Composantes Connexes, ACC = Analyse en Composantes Connexes, $\bar{v}$ = vitesse moyenne d’une composante connexe, $\bar{\alpha}$ = angle moyen de déplacement d’une composante connexe et σ_α = écart-type angulaire. Les paramètres σ_{max} et N_{MAJ} sont fixés respectivement à 30 degrés et 3 images.

connexes. La vitesse moyenne $\bar{v}$, l’angle moyen de déplacement $\bar{\alpha}$ et son écart-type angulaire σ_α y sont calculés pour chaque composante. Nous utilisons pour cela les formules d’analyse de données circulaires [14] suivantes :

$$C = \sum_{i=1}^n \cos(\alpha_i) \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \sin(\alpha_i) \quad (2)$$

$$R_1 = \sqrt{C^2 + S^2} \quad (3)$$

$$\bar{\alpha} = \text{atan}_2\left(\frac{C}{n}, \frac{S}{n}\right) \quad (4)$$

$$\sigma_\alpha = \sqrt{-2 \times \ln \frac{R_1}{n}} \quad (5)$$

avec :

- n le nombre de pixels de la composante connexe,
- i le i -ème pixel de la composante connexe (et α_i son angle).

La cinquième étape est la classification des composantes connexes en fonction de leur écart-type angulaire σ_α . En effet, de part son mouvement rectiligne, un météore va induire un écart-type angulaire faible : les vecteurs vitesses de ses pixels auront une direction similaire. Au contraire, un éclair étant vu par la caméra comme un phénomène quasi-circulaire se propageant dans toutes les directions, son écart-type angulaire sera élevé.

La sixième étape est le *tracking* temporel des composantes connexes. Il est basé sur un automate à états permettant la création, l’entretien et l’extrapolation de pistes. Le temps d’extrapolation est fixé à 1 seconde (soit 25 images pour les vidéos Chiba). Comme le mouvement apparent d’un météore est rectiligne, un filtrage d’ordre 1 est suffisant (la régression linéaire augmente en précision avec le

temps). Un filtrage de Kalman [15] aurait été plus complexe et plus lent, même optimisé pour les processeurs modernes [16, 17]. Cette étape permet d’éviter de nombreux faux positifs. En effet, le flot optique calculé peut être localement faux entre deux images. Cela peut créer, du point de vue de la chaîne, un mouvement cohérent interprétable comme un météore. Ces erreurs, transitoires et très brèves ne seront pas retenues grâce au *tracking* temporel. Dans notre cas nous considérons qu’un météore est présent si sa piste a été entretenue au moins trois fois (paramètre N_{MAJ}). Les images le contenant peuvent être envoyées sur Terre.

La Figure 3 donne un exemple de résultat des principales étapes de la chaîne de traitement. L’image d’entrée est constituée d’un éclair (en haut, à gauche), d’un météore (en bas, à droite) ainsi que de deux nuages (zones diffuses). Le calcul du flot optique permet de mettre en évidence l’existence de ces 4 objets. Le seuillage sur la vitesse permet d’éliminer les objets les plus lents que sont les nuages et de ne conserver que deux composantes connexes, une pour l’éclair et une pour le météore. L’uniformité de la couleur des angles du météore indique que les vecteurs se déplacent tous dans la même direction. Au contraire, la multiplicité de couleurs des angles de l’éclair indique que ses vecteurs se déplacent tous dans différentes directions. Le filtrage sur l’écart-type angulaire permet donc de les différencier.

Choix des algorithmes

La stratégie qui a guidée la construction de cette chaîne de traitement est l’efficacité pour l’embarquabilité tout en permettant de détecter un maximum de météores (vrais positifs) et minimiser le nombre de faux positifs (évitant la saturation de la mémoire de stockage). Pour cela, il a fallu sélectionner des algorithmes simples (flot optique, *tracking*) ou les plus efficaces comme c’est le cas pour l’étiquetage et l’analyse en composantes connexes où des travaux récents ont rendu ces algorithmes particulièrement rapides

sur CPU [18] et sur GPU [19].

Le choix d'utiliser Horn & Schunk dans une version multi-résolution a été fait car sa simplicité et son schéma itératif se prêtent bien aux optimisations algorithmiques [20]. Cela permet, soit d'augmenter la cadence de traitement, soit, pour une cadence donnée, d'abaisser la fréquence de fonctionnement et donc d'économiser de l'énergie. Pour le moment une configuration facilement vectorisable de cet algorithme a été retenue. Il s'agit de faire 4 étages de 10 itérations avec une interpolation bi-cubique et des calculs flottants sur 32 bits (F_{32}).

Cette configuration étalon peut être implémentée sur la totalité des cartes embarquées que nous prévoyons de tester : Nvidia Jetson (AGX, NX, Nano). Une analyse plus poussée permettra d'étudier l'impact de la précision des calculs (F_{32} ou F_{16} voire F_{13} [21]), du nombre d'étages, d'itérations ou de la nature des interpolations (bi-cubique, bi-linéaire...) sur la qualité du flot obtenu.

5 Banc de validation

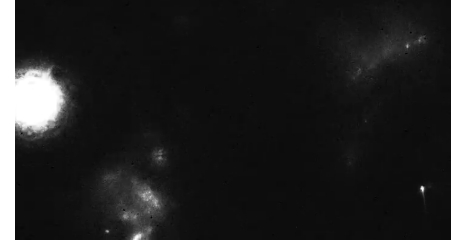
Dans le cadre du projet Meteor [22], l'Université de Chiba au Japon a envoyé à bord de l'ISS une caméra haute résolution filmant la Terre depuis la fenêtre d'observation WORF (*Window Observational Research Facility*) [23]. Les vidéos acquises sont stockées sur disques durs et redescendues sur Terre pour analyse manuelle.

Environ 150 séquences vidéo de cette mission ont été mises à disposition par l'université de Chiba [24], allant de quelques secondes à 40 minutes. Seule une centaine de séquences sont exploitables, les autres étant des séquences zoomées ou dupliquées. Nous avons nommé ces séquences de v00 à v100, le numéro correspond à l'ordre de publication sur Youtube.

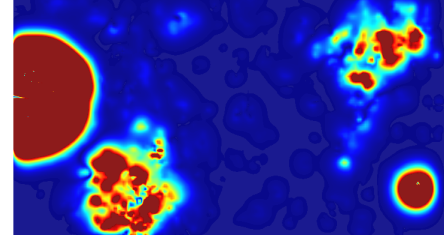
Une analyse manuelle nous a permis de construire une vérité terrain pour chaque séquence exploitable. Ainsi, nous connaissons les dates et les coordonnées d'apparition (x_0, y_0, t_0) et de disparition (x_1, y_1, t_1) des météores présents sur ces séquences. Cette analyse nous a également permis d'estimer précisément la vitesse apparente de la Terre qui est - dans les conditions d'acquisition de la caméra Meteor - de 0.86 pixel/image. En comparant la vitesse apparente de la Terre sur chaque séquence, nous avons aussi pu valider la consistance des enregistrements vidéos disponibles sur Youtube. Cette vitesse est dépendante de la spécification de la caméra utilisée [23] et de l'altitude des prises de vue. Une adaptation sera donc faite pour la caméra du nanosatellite dont l'altitude sera différente de celle de l'ISS.

Ces séquences sont précieuses car très diverses comme le montre la Figure 4. Ce sont également les seules depuis l'espace dont nous disposons et ce sont celles que nous avons utilisées pour évaluer la qualité de notre chaîne de traitement.

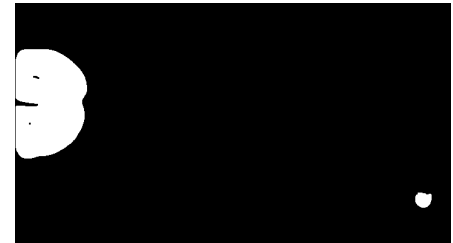
Le banc de validation a pour but de qualifier la chaîne



a) Image d'entrée



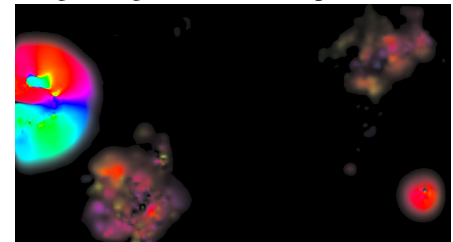
b) Norme de la vitesse



c) Masques binaires



d) Rectangles englobants des composantes connexes



e) Angle des vitesses



f) Tracking, après seuillage sur l'écart-type angulaire

FIGURE 3 – Les différentes étapes de la chaîne de traitement pour l'image 120 de la séquence Chiba v86. La chaîne détecte un éclair et un météore, seul ce dernier est conservé après seuillage sur l'écart-type angulaire.

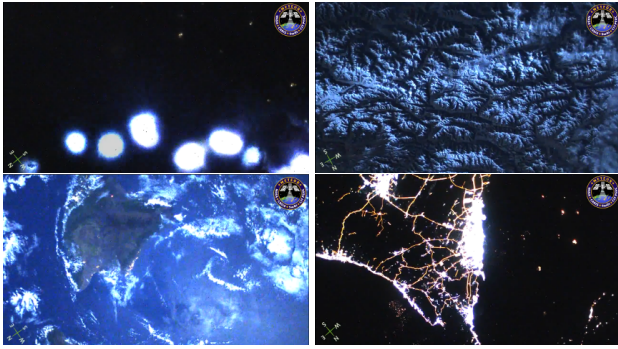


FIGURE 4 – Exemples de séquences Chiba avec de haut en bas et de gauche à droite : éclairs, nuages avec Lune, nuages avec forte illumination de la Lune, nuit avec éclairage urbain et nombreuses saturations lumineuses

de traitement à partir des séquences Chiba et d'empêcher les régressions qualitatives en cas de futures modifications. Grâce aux vérités terrain, il est possible d'interpoler la trajectoire linéaire de chaque météore et de calculer l'angle formé par celle-ci et l'origine du plan.

La validation d'un météore consiste à vérifier que pour chaque détection, le centre de gravité et la trajectoire associés correspondent bien à un météore de la vérité terrain. Le centre de gravité peut ne pas être précisément un point de la trajectoire, c'est pourquoi un parallélogramme d'une largeur de 20 pixels, centré autour de celle-ci est calculé. Si le centre de gravité se trouve dans ce parallélogramme, d'autres conditions sont évaluées pour confirmer la validité de la détection sur cette piste :

- L'angle moyen est proche de l'angle formé par l'interpolation et l'origine du plan
- Le centre de gravité de la piste progresse sur la trajectoire par rapport à celui de la dernière piste validée (respect du mouvement rectiligne)
- L'écart-type angulaire est inférieur à 30 degrés
- La vitesse moyenne est inférieure à 10 px/image

Pour ces deux dernières conditions, les valeurs ont été fixées suite à l'analyse manuelle.

Le banc de validation attribut trois scores pour chaque séquence. Le premier est binaire et indique si le météore a été détecté correctement au moins une fois. Ce score moyenné sur l'ensemble des séquences permet une comparaison rapide avec les scores des autres algorithmes publiés (pour lesquels les conditions de validation ne permettent pas d'être plus précis).

Le deuxième score correspond au ratio du nombre de détections valides par rapport à la vérité terrain et ce, pour l'ensemble des images, de l'apparition à la disparition du météore.

Enfin, un troisième score donne le nombre de faux-positifs. Les faux-positifs sont définis comme des pistes entretenues au moins 3 fois et dont l'écart-type angulaire (inférieur à 30 degrés), la vitesse moyenne (inférieure à 10 px/image) et la

trajectoire (rectiligne) correspondent à ceux d'un météore mais ne sont pas répertoriés dans la vérité terrain.

6 Analyse des résultats

Sur les 101 vidéos Chiba contenant 50 météores, la chaîne de traitement parvient à en détecter 48. Cela donne une probabilité de détection de 96%. Si l'on regarde ce résultat plus finement, image par image, alors les météores sont détectés dans 70% des images en contenant. Pour rappel, nous considérons une caméra en mouvement depuis l'espace qui filme vers la Terre et non pas fixe sur Terre pointée vers le ciel. Pour cette raison nous ne pouvons pas directement comparer ces résultats aux autres chaînes de l'État de l'Art.

Plusieurs raisons font que des météores se retrouvent partiellement détectés. Tout d'abord, il arrive que les premières et/ou dernières images ne soient pas détectées à cause d'erreurs d'approximation des coordonnées de début et de fin du météore dans les vérités terrain. En outre, il est possible qu'un météore se confonde brièvement avec les nuages. Cependant, l'extrapolation du *tracking* temporel permet de retrouver le météore après plusieurs images n'empêchant pas la détection globale.

Malgré la bonne probabilité de détection, l'étape de seuillage sur la vitesse manque de robustesse dans certaines situations.

Par exemple, la séquence v77 montre une scène très nuageuse, dont le fort éclairage de la Lune arrive à saturer une partie des images en blanc, le banc de validation compte 159 faux-positifs alors qu'il n'y a pas de météore dans cette séquence. Sur la séquence v21, très nuageuse également, le météore est détecté avec cinq faux-positifs. Lorsque l'on augmente le seuil à 3 px/image, les faux-positifs sont éliminés et le météore est toujours détecté. En revanche, le météore de la séquence v74 n'est pas détecté car les vitesses de ses pixels sont inférieures au seuil choisi. L'abaissement de ce seuil à 1.5 px/image permet la détection de ce météore mais fait augmenter le nombre de faux positifs.

De plus, l'algorithme de flot optique a besoin d'images texturées pour calculer les gradients et estimer les vecteurs vitesses avec précision. Or, les scènes varient beaucoup, le niveau de texture change lui aussi. Il apparaît donc qu'utiliser un seuil fixe sur la vitesse n'est pas suffisamment robuste pour traiter les différents types de scènes spatiales. La Figure 5 montre cette difficulté de choisir un seuil adapté à toutes les séquences.

Pour remédier à cela, deux propositions sont à l'étude. Premièrement, calculer pour chaque image le mouvement principal, c'est-à-dire l'angle et la vitesse de défilement de la Terre afin d'adapter le seuil à cette vitesse.

Deuxièmement, il est envisageable d'appliquer un seuil plus haut aux composantes connexes se déplaçant dans la même direction que le mouvement principal. Cela permettrait d'éliminer une grande partie des faux-positifs généralement issus de l'éclairage urbain ou des nuages.

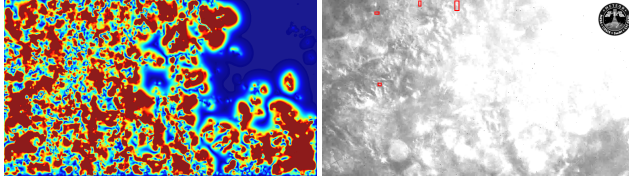


image 36 de v77 : 4 faux-positifs entourés en rouge

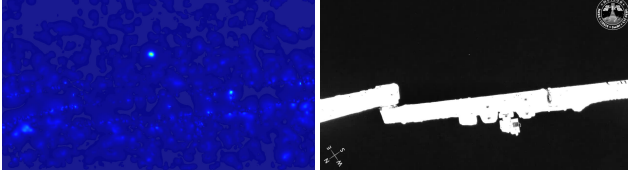


image 83 de v74 : météore non détecté

FIGURE 5 – Normes (gauche) et résultat (droite). Les normes bleues indiquent une vitesse nulle ou proche de zéro, les normes rouges indiquent une vitesse supérieure ou égale à 2.5 px/image (seuil utilisé). Le seuillage est insuffisant pour la séquence v77 mais trop important pour la séquence v74. La saturation en blanc sur v77 donne des normes nulles, cela montre la difficulté d’estimer le flot optique sur certaines scènes.

Un autre point à améliorer est l’enchaînement des opérations de morphologie mathématique qui peuvent provoquer une sur-segmentation en composantes connexes. Celle-ci peut rendre l’écart-type angulaire insuffisant pour déterminer s’il s’agit ou non d’un météore comme le montre la Table 1 et la Figure 7 sur deux images de la séquence v86. Néanmoins, si ce phénomène est limité sur quelques images, le *tracking* permet d’assurer la continuité de la détection.

Enfin, il est à noter que si le projet Meteorix ne s’intéresse qu’aux météores et aux débris spatiaux, la chaîne de traitement est tout de même capable d’identifier d’autres objets tels que les éclairs et les TLE (phénomène lumineux transitoire) [25], qui sont des éclairs de quelques millisecondes, apparaissant au dessus des orages. Cette chaîne pourrait donc servir de base à d’autres projets.

Extension à la détection sur Terre

La chaîne a été conçue pour fonctionner avec une caméra en mouvement dans l’espace mais elle a également été testée avec des séquences de caméras immobiles pointant en direction du ciel. Le site web de SonotaCo [5] contient plusieurs séquences de météores détectés par son logiciel UFOCapture. Notre chaîne de traitement est également capable de les détecter, comme le montre la Figure 6 sur une des séquences du site. Un prochain test pourrait être d’utiliser des séquences de pluie de météores acquises sur Terre par la caméra de Meteorix.

Le point fort étant la discrimination des régions en mouvement par l’écart-type angulaire, cette adaptation passe-

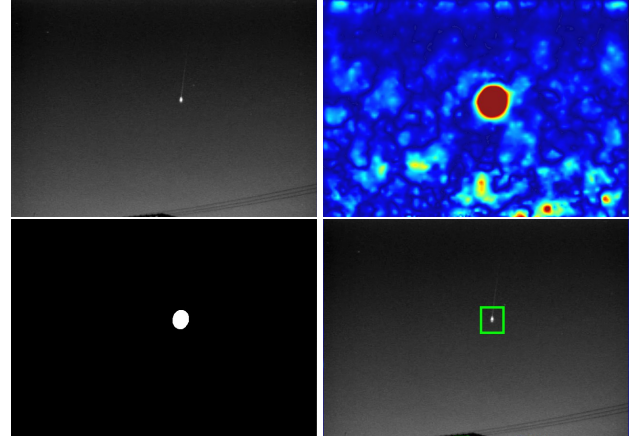


FIGURE 6 – Démonstration de la chaîne de traitement avec la séquence m20050307_040635.wmv de SonotaCo (UFO-Capture).

rait par l’ajout d’un algorithme de détection de mouvement par soustraction de fond, tel que la méthode $\Sigma-\Delta$ [26], afin de ne plus avoir à seuiller les pixels lents et de limiter l’estimation du flot optique uniquement aux parties en mouvement de l’image. Cela permettrait d’augmenter le nombre d’images traitées par seconde ou encore d’utiliser des micro-contrôleurs de plus faible puissance.

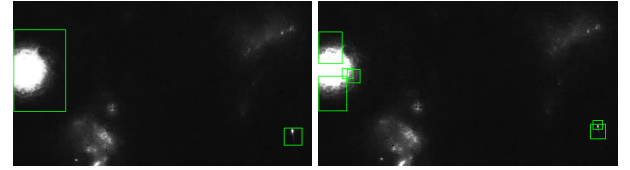


FIGURE 7 – Sur-segmentation en composantes connexes dans la séquence v86. A t=120 (gauche), la chaîne détecte deux composantes connexes correspondant à un éclair et à un météore. A t=123 (droite), l’éclair est fragmenté en 6 composantes connexes et le météore en 2 composantes connexes.

7 Conclusion

Dans cet article, nous proposons une chaîne de traitement pour la détection de météores depuis un nanosatellite. Une approche en adéquation algorithme-architecture a été appliquée afin de trouver des compromis compatibles avec la mission : faible consommation, temps de traitement, taux élevé de reconnaissance. Un banc de validation a également été développé afin de valider qualitativement cette chaîne de traitement et de pouvoir tester différents jeux de paramètres sur l’ensemble des séquences vidéo de l’Université de Chiba, séquences pour lesquelles une vérité terrain a été établie. 96% des météores ont ainsi été détectés et nous obtenons un score de 70% pour une analyse image par image.

A notre connaissance, il s’agit de la première chaîne de traitement dédiée aux météores et débris spatiaux fonction-

	composante connexe	vitesse pixel / image	écart-type angulaire σ_θ
image 120	1	9.3	145
	2	3.7	9.2
image 123	1	4.3	5
	2	3.7	16
	3	2.8	9
	4	2.9	7
	5	3.3	5
	6	5	4

TABLE 1 – Sur-segmentation en composantes connexes dans la séquence v86 : s’il est possible de distinguer le nuage du météore à l’image 120 grâce au filtrage sur σ_α ce n’est plus un critère suffisant pour l’image 123.

nant dans l’espace et respectant des contraintes d’embarquabilité.

Les prochains objectifs sont l’évaluation de l’impact des seuils fixés expérimentalement et l’étude de méthodes de seuillage adaptatives permettant de limiter les faux-positifs avant de passer aux optimisations permettant d’atteindre une cadence de traitement de 25 images par seconde avec une consommation électrique de moins 10W.

Remerciements

Meteorix a reçu le soutien de l’ESEP (Exploration Spatiale des Environnements Planétaires), de Nanolab Academy du CNES, d’IDEX Sorbonne Université, de la région Île de France avec les financements DIM ACAV+ et DIM RFSI.

Références

- [1] N. Rambaux et al. Meteorix : A cubesat mission dedicated to the detection of meteors and space debris. In *ESA NEO and Debris Detection Conference- Exploiting Synergies -ESA/ESOC, Darmstadt, Germany*, 2019.
- [2] S. Molau and P. Gural. A review of video meteor detection and analysis software. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 33 :15–20, 2005.
- [3] S. Molau. The meteor detection software MetRec. page 131, 1999.
- [4] P. Gural. An operational autonomous meteor detector : Development issues and early results. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 25 :136–140, 1997.
- [5] SonotaCo. SonotaCo UFOCapture website.
- [6] P. Gural and D. Segon. A new meteor detection processing approach for observations collected by the croatian meteor network (cmn). *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 37, 2009.
- [7] F. Colas et al. Fripon : a worldwide network to track incoming meteoroids. *Astronomy and Astrophysics (A & A)*, 644 :1–23, 2020.
- [8] Y. Audureau et al. FreeTure : A Free software to capTure meteors for FRIPON. In *Proceedings of the International Meteor Conference, Giron, France*, pages 39–41, 2014.
- [9] Y. Galindo and A. Lorena. Deep transfer learning for meteor detection. pages 528–537, 2018.
- [10] P. Gural. Deep learning algorithms applied to the classification of video meteor detections. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489, 2019.
- [11] D. Cecil and M. Campbell-Brown. The application of convolutional neural networks to the automation of a meteor detection pipeline. *Planetary and Space Science*, 186 :104920, 2020.
- [12] B.K.P. Horn and B.G. Schunck. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17 :185–203, 1981.
- [13] E. Meinhardt-Llopis, J. Sánchez, and D. Kondermann. Horn-schunck optical flow with a multi-scale strategy. *Image Processing on line*, 20 :151–172, 2013.
- [14] N.I. Fisher. *Statistical Analysis of Circular Data*. Cambridge University Press, 1993.
- [15] Rudolph Emil Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. 1960.
- [16] F. Lemaitre, B. Couturier, and L. Lacassagne. Cholesky factorization on SIMD multi-core architectures. *Systems Architecture (JSA)*, pages 1–16, 2017.
- [17] F. Lemaitre, B. Couturier, and L. Lacassagne. Small SIMD matrices for CERN high throughput computing. In *ACM Workshop on Programming Models for SIMD/Vector Processing (PPoPP)*, pages 1–8, 2018.
- [18] F. Lemaitre, A. Hennequin, and L. Lacassagne. How to speed connected component labeling up with SIMD RLE algorithms. In *ACM Workshop on Programming Models for SIMD/Vector Processing (PPoPP)*, pages 1–8, 2020.
- [19] F. Lemaitre, A. Hennequin, and L. Lacassagne. Taming voting algorithms on GPUs for an efficient Connected Component Analysis Algorithm. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2021.
- [20] A. Petreto, A. Hennequin, T. Koehler, T. Romera, Y. Fargeaix, B. Gaillard, M. Bouyer, Q. L. Meunier, and L. Lacassagne. Energy and execution time comparison of optical flow algorithms on SIMD and GPU architectures. In *IEEE International Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing (DASIP)*, pages 1–6, 2018.
- [21] S. Piskorski, L. Lacassagne, S. Bouaziz, and D. Etiemble. Customizing CPU instructions for embedded vision systems. In *Computer Architecture, Machine Perception and Sensors (CAMPSS)*, pages 59–64. IEEE, 2006.
- [22] Chiba. Meteor project <http://www.perc.it-chiba.ac.jp/project/meteor>.
- [23] T. Arai, M. Kobayashi, M. Yamada, T. Matsui, and Cometss Project Team. Meteor Observation HDTV Camera Onboard the International Space Station. In *Lunar and Planetary Science Conference*, page 1610, 2014.
- [24] Chiba. Meteor project image gallery <http://www.perc.it-chiba.ac.jp/project/meteor/gallery.html>.
- [25] S. Soula and O. Van der Velde. Phénomènes lumineux transitoires au-dessus des orages : observation et conditions de production. *La Météorologie*, 2009.
- [26] L. Lacassagne, A. Manzanera, and A. Dupret. Motion detection : fast and robust algorithms for embedded systems. In *IEEE International Conference on Image Analysis and Processing (ICIP)*, pages 3265–3268, 2009.