

Analyse de la réentrée du satellite ERS-2

Cristian Omat

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
Université de Bucarest Doctoral School of Physics
Bucarest, Roumanie
cristian.omat@astro.ro

Mirel Birlan

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides,
CNRS UMR8028, Observatoire de Paris
Paris, France
mirel.birlan@astro.ro

Florent Deleflie

Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides,
CNRS UMR8028, Observatoire de Paris
Paris, France
florent.deleflie@obspm.fr

Vlad Turcu

Institut d'Astronomie de l'Académie Roumaine
Observatoire Astronomique de Cluj-Napoca
Cluj-Napoca, Roumanie
vladturcu@acad-cj.ro

Résumé— Environ 67 ans après le lancement du premier satellite artificiel en orbite terrestre, Spoutnik-1 (4 octobre 1957), les orbites autour de la Terre sont devenues de plus en plus encombrées. Cette tendance à l'agglomération s'est particulièrement accrue au cours des 5 dernières années, avec une augmentation exponentielle du nombre de satellites opérationnels utilisés dans les services de type « internet par satellite ». Selon les études [1] et [2], on estime que d'ici 2030, plus de 100 000 satellites artificiels seront placés en orbite autour de la Terre. Cette tendance est inquiétante à moins que des mesures rapides et cohérentes ne soient prises pour réduire la population de débris spatiaux. Sinon, un scénario apocalyptique comme celui décrit dans [3] devient de plus en plus plausible.

L'un de ces débris spatiaux qui a tourné autour de la Terre plusieurs années après sa mise hors service est le satellite ERS-2. La dernière image reçue d'ERS-2 date du 4 juillet 2011 et après 66 manœuvres de désorbitation, l'altitude du satellite a été abaissée de 780 km à 573 km pour faciliter sa désintégration naturelle due à la traînée atmosphérique. Environ 13 ans plus tard, le satellite ERS-2 a effectué sa rentrée atmosphérique au-dessus de l'océan Pacifique Nord, dans une zone entre l'Alaska et Hawaï, localisée aux coordonnées géographiques suivantes : 37°24'00.0"N et 151°54'00.0"W, à 18:17 CET (17:17 UTC) le 21 février 2024.

L'objectif de ce document est d'évaluer les trajectoires des fragments générés lors de la rentrée et la zone de risque pour les potentielles victimes. Notre analyse repose sur l'hypothèse que tous les systèmes étaient désactivés, les batteries déconnectées et le carburant purgé. Sur la base de ces informations et d'autres données publiées par l'ESA dans [4], nous avons effectué une modélisation du satellite ERS-2 afin d'effectuer des simulations de rentrée atmosphérique avec le logiciel Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis (DRAMA), développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

Mots-clés— ERS-2, satellite, débris, réentrées.

I. INTRODUCTION

Selon les estimations de l'Agence Spatiale Européenne [5], à la date du 15 août 2024, le nombre total de débris spatiaux en orbite autour de la Terre pourrait s'élever à environ 40 500 objets de plus de 10 cm, 1 100 000 objets de 1 cm à 10 cm et 130 millions d'objets entre 1 mm et 1 cm. Au total, cette grande quantité de débris spatiaux a une masse supérieure à 12 900 tonnes [5]. Dans ce contexte, avec plus de 40 500 objets de plus de 10 cm en orbite autour de la Terre, la menace posée par les débris spatiaux est devenue une problématique mondiale majeure.

Un exemple d'objet spatial ayant orbité environ 13 ans après sa mise hors service est celui du satellite ERS-2. Le 5 septembre 2011, après plus de 5500 jours opérationnels, l'altitude du satellite a commencé à être réduite de 780 km à 573 km. Réduire l'altitude d'un satellite est une pratique courante lors des manœuvres de fin de vie pour accélérer sa rentrée dans l'atmosphère terrestre, en raison de la résistance atmosphérique accrue. Bien que le risque de

collision avec d'autres satellites ou débris spatiaux soit réduit à des altitudes plus basses, des risques subsistent jusqu'à la rentrée complète dans l'atmosphère. Une fois l'ERS-2 placé sur sa nouvelle orbite, les procédures de désactivation ont été lancées : tous les systèmes embarqués ont été déconnectés, les systèmes sous pression ainsi que les batteries vidées pour minimiser le risque de création de débris spatiaux ou de causer des dommages à d'autres satellites en cas d'explosion.

Pendant sa phase opérationnelle (29 avril 1996 – 5 septembre 2011), le satellite ERS-2 a été placé sur une orbite héliosynchrone (SSO), un type d'orbite qui maintient une orientation constante par rapport au Soleil. Cette orbite est utilisée pour fournir une source constante d'énergie solaire aux panneaux solaires et pour maintenir une illumination constante lors de l'observation de la Terre [6]. La particularité des orbites héliosynchrones est que le satellite reste toujours dans la même position par rapport au Soleil, et survole les mêmes lieux à la même heure locale. Cela est avantageux pour

les applications d'imagerie et de surveillance, car cela garantit des conditions d'éclairage constantes. De plus, cette orbite quasi-polaire pour le satellite ERS-2 permet de maximiser la surface terrestre survolée, couvrant une large gamme de latitudes au sol. Plus précisément, le satellite ERS-2 a été placé sur une orbite quasi-polaire rétrograde héliosynchrone à une altitude moyenne de 780 km, avec une période orbitale d'environ 100 minutes à une vitesse d'environ 7,5 km par seconde [7].

Dans les jours précédant la rentrée naturelle (non contrôlée), le satellite européen de télédétection 2 (ERS-2) a été observé en rotation alors qu'il descendait à travers l'atmosphère. Il est courant que les satellites montrent un comportement de rotation (roulis) [5] à l'approche de leur rentrée, notamment s'ils ont été désactivés et ne sont plus sous contrôle actif. Les images capturées [10] par les caméras d'autres satellites, via la société australienne HEO, ont montré ce comportement, confirmé également par le radar TIRA (Tracking and Imaging Radar) de l'Institut Fraunhofer (Allemagne).

Le roulement observé lors de la descente pourrait être dû aux forces naturelles agissant sur le satellite. ; en modifiant le rapport surface sur masse moyen, ce comportement aurait contribué à des incertitudes concernant la trajectoire de rentrée et le schéma de fragmentation, nécessitant une surveillance accrue pour assurer la sécurité des autres objets en orbite.

Le satellite ERS-2 a terminé sa rentrée atmosphérique au-dessus de l'océan Pacifique Nord, entre l'Alaska et Hawaï, dans une zone centrée sur les coordonnées géographiques : 37°24'00.0"N et 151°54'00.0"W, à l'heure 18h17 CET (17h17 UTC) le 21 février 2024. Cela représente un décalage de 12 minutes par rapport à la dernière prévision de l'ESA.

La phase de descente a été capturée par le télescope AROAC-T08 (Observatoire Astronomique de Cluj-Napoca) lors de trois nuits : les 16, 18 et 20 février 2024. Ce télescope, avec une ouverture de 80 mm et un rapport focal de f/5, est utilisé pour surveiller les objets en orbite basse terrestre (LEO) et fait partie de la contribution de la Roumanie au réseau de surveillance et de suivi spatial (SST) et est intégré dans le consortium EUSST.

II. SIMULATION DE SURVIE DE L'ENTREE DU ERS-2

En phase de simulation pour évaluer la probabilité d'impact des fragments résiduels sur la Terre et la zone de risque pour les potentielles victimes, nous avons utilisé le logiciel Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis (DRAMA), développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Cet outil est un système d'analyse avancé de la survivabilité lors de la rentrée atmosphérique, qui évalue les risques d'impact au sol pendant les phases opérationnelles et de désorbitation. Il comprend une interface graphique avancée et plusieurs modules, dont SARA (Survivabilité et Évaluation des Risques) pour une analyse approfondie de la rentrée.

DRAMA génère un rapport complet contenant des graphiques et des données d'analyse, fournissant une évaluation détaillée des risques de blessures basée sur les emplacements d'impact des fragments et la densité de population. Cependant, le logiciel nécessite des données d'entrée détaillées.

Nous avons simulé la phase de rentrée atmosphérique du satellite ERS-2 en utilisant des données publiques sur les matériaux composant ses éléments, en particulier celles fournies par l'Agence spatiale européenne (ESA), propriétaire du satellite. Comme il n'était pas clair de savoir si les panneaux solaires étaient détachés avant la rentrée, nous avons modélisé deux scénarios : avec et sans panneaux solaires, en fonction du comportement de roulis observé lors des dernières orbites.

Pour la préparation de la simulation, nous avons consulté la base de données Space-Track [8] pour extraire la dernière valeur d'inclinaison du satellite avant la rentrée, un paramètre crucial pour la précision. La documentation de l'ESA [4] a fourni des détails sur les dimensions et les matériaux des principaux composants, révélant les informations suivantes: dimensions du corps central : 11,8 m x 11,7 m x 2,4 m, longueur des antennes après déploiement: jusqu'à 10 m au total, masse du satellite réduite de 2516 kg à 2294 kg après la purge du carburant, dimensions de la structure principale de support de charge utile: base de 2 m x 2 m, hauteur de 3 m et les dimensions des panneaux solaires: deux ailes de 5,8 m x 2,4 m chacune, avec 22260 cellules solaires.

Notre analyse part du principe que ERS-2 avait été complètement rendu passif avant la rentrée, avec tous les systèmes désactivés, le diffusiomètre de vent replié, les batteries déconnectées et le carburant purgé.

Nous avons utilisé le module SARA (Spacecraft Atmospheric Reentry Analysis) pour effectuer les simulations. Pour calculer le freinage atmosphérique sur le satellite ERS-2, nous avons choisi le modèle de densité atmosphérique NRLMSISE2000, un modèle empirique de référence pour prédire la densité, la température et la composition de l'atmosphère terrestre jusqu'à une altitude de 1000 km. Ce modèle est largement utilisé dans les prédictions de trajectoire des satellites.

Les simulations ont utilisé des conditions initiales basées sur les Two Line Elements (TLE) les plus récents, en supposant le comportement de roulis, reflétant le comportement des fragments détachés. Le type de rentrée et le mode d'exécution calculait à la fois la trajectoire de rentrée et le risque de blessure, avec un seuil de blessure fixé à 15 J. Un paramètre essentiel pour les simulations avec le module SARA 2.1.3 est l'activité solaire le jour de la

rentrée. En utilisant les données de flux solaire [9], nous avons utilisé une valeur de 164 sfu pour le 21 février 2024.

Au cours de la rentrée, chaque composant du satellite subit des effets aérodynamiques et thermiques, et le point de désintégration du corps central (rupture majeure) est crucial pour évaluer le risque et la trajectoire des fragments survivants. Nos simulations ont indiqué une altitude de rupture majeure à 75 km d'altitude.

La carte générée par la simulation avec le logiciel DRAMA (Fig. 1) suggère que les points d'impact des fragments étaient concentrés dans la région arctique, près du Groenland. Cette prédiction est assez proche de la réalité, puisque le satellite ERS-2 a terminé sa rentrée atmosphérique au-dessus de l'océan Pacifique Nord, entre l'Alaska et Hawaii.

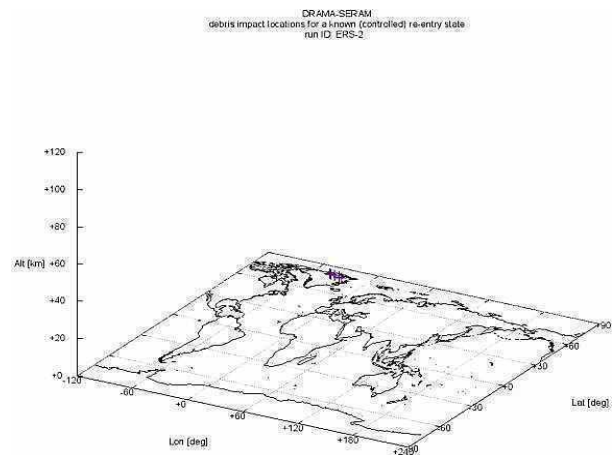


Fig. 1. Lieu de l'impact des débris estimé avec DRAMA-SERAM.

La différence entre le lieu d'impact réel et celui obtenu après les simulations peut s'expliquer par le freinage atmosphérique dans cette zone, le modèle atmosphérique choisi pour les simulations, les paramètres réels du satellite et la configuration obtenue après l'étape de modélisation avec le logiciel DRAMA, la fenêtre de rentrée ou d'autres variables.

Le module Satellite Event Risk Assessment and Mitigation (SERAM) fait partie de l'application DRAMA développée par l'ESA. Il permet d'évaluer les risques associés aux événements accidentels dans l'espace, notamment les collisions entre satellites, débris spatiaux et autres objets en orbite. SERAM analyse la probabilité de ces événements et propose des stratégies de mitigation, comme les manœuvres d'évitement et la gestion des débris, afin de réduire les risques pour les missions spatiales et l'infrastructure satellitaire. Ce module est essentiel pour assurer un environnement spatial sûr et durable.

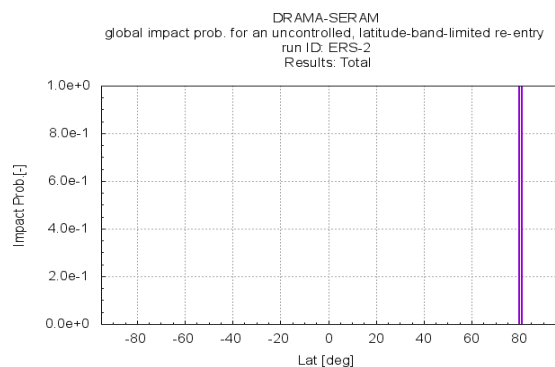


Fig. 2. Probabilité d'impact global pour une rentrée limitée par une bande de latitude (DRAMA-SERAM).

Suite à l'analyse avec DRAMA-SERAM (Fig. 2), on constate sur qu'à cette latitude, les fragments issus de la désintégration du satellite ERS-2 ne représentaient pas de risque pour une population, la latitude de la zone d'impact n'étant pas spécifique pour une zone peuplée.

CONCLUSIONS

L'étude collaborative présentée dans cet article représente une tentative de corrélation entre les données factuelles et celles obtenues à partir des simulations réalisées avec le logiciel DRAMA. L'étude peut être considérée comme une tentative d'évaluation de la précision et de la validité du modèle de simulation, généré à partir d'informations publiques. En général, une bonne concordance entre les deux ensembles de données suggère que la simulation a été correctement calibrée. Dans le cas de nos simulations concernant la rentrée du satellite ERS-2, les résultats montrent un écart minimal par rapport aux données factuelles, mais ils peuvent néanmoins être considérés comme satisfaisants. Si la différence entre le lieu d'impact réel et celui obtenu par simulation avait été plus significative, des ajustements des paramètres du modèle auraient été nécessaires, notamment en

ce qui concerne la modélisation de la forme du satellite et le modèle atmosphérique choisi. Il convient également de noter que, dans ce cas, le comportement de roulis avant la rentrée dans l'atmosphère terrestre peut être considéré comme un facteur ayant induit des erreurs dans la prédiction du lieu d'impact.

RÉFÉRENCES

- [1] Boley, Aaron C., and Michael Byers. "Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth." *Scientific Reports* 11.1 (2021): 1-8.
- [2] Williams, Andrew, et al. "Analysing the impact of satellite constellations and ESO's role in supporting the astronomy community." *arXiv preprint arXiv:2108.04005* (2021).
- [3] Kessler, Donald J., and Burton G. Cour- Palais. "Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 83.A6 (1978): 2637-2646.
- [4] European Space Agency "Bulletin83" (1995)
- [5] European Space Agency (2024)
- [6] Vallado, D. A. "Fundamentals of Astrodynamics and Applications." *Space Technology Library* (2001): 303-323.
- [7] eoPortal (2024).
- [8] Space-Track (2024).
- [9] SpaceWeather (2024).
- [10] HEO (2024).