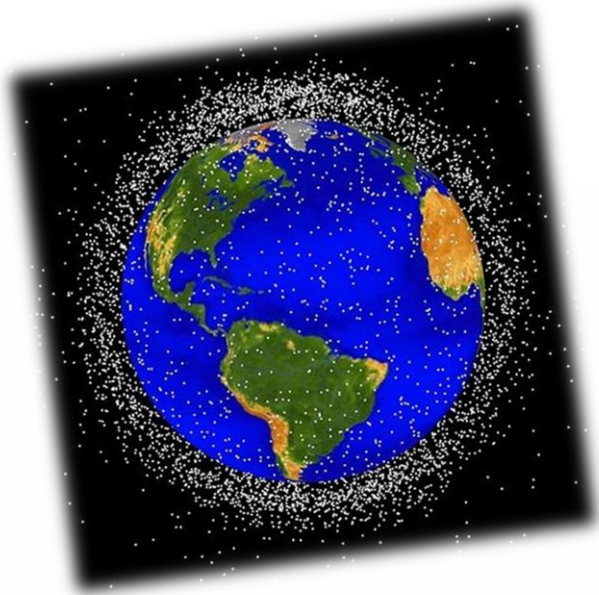


# ÉTUDE THEORIQUE D'UNE MÉTHODE DE DÉPLOIEMENT D'UN FILET DANS L'ESPACE POUR CAPTURER UN SATELLITE



**Etudiants :**

**Pierre BONNET**

**Matthieu GILLES**

**Marie MONTION**

**Romain BOSSET**

**Nabil HADDIYA**

**Julie SIMONEAU**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Didier VUILLAMY**



Date de remise du rapport : 17/06/2013

Référence du projet : STPI/P6/2013 – 7

Intitulé du projet : ***Étude théorique d'une méthode de déploiement d'un filet dans l'espace pour capturer un satellite.***

Type de projet : ***Bibliographie, modélisation***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

***L'objectif du projet est de trouver une solution pour désencombrer le plus possible l'espace qui, à cause de ses déchets, est devenu dangereux pour les nouveaux satellites. Nous avons donc pour but de créer et d'étudier un chasseur de débris qui devra en attraper un maximum pour ensuite se diriger vers l'atmosphère où l'ensemble se consumera.***

Mots-clefs du projet (4 maxi) : ***Satellite, Terre, débris, chasseur.***

## REMERCIEMENTS

Étudiants en deuxième année d'école d'ingénieurs, nos compétences et nos connaissances scientifiques sont en cours d'acquisition et nous ne possédons malheureusement pas tout le bagage nécessaire afin de mener à bien un projet d'une telle ampleur. L'aide et l'implication de nos professeurs encadrant se sont donc avérées d'une importance cruciale.

C'est pourquoi nous tenons tous à remercier notre professeur M. Didier VUILLAMY qui a fait preuve, tout au long du semestre, d'une disponibilité et d'une compréhension remarquables. Nous le remercions grandement pour avoir fait de ce projet un challenge intéressant et plaisant à relever. Il a su nous insuffler de l'intérêt pour le domaine spatial, ce qui fût primordial pour le bon déroulement du projet.

En outre, nous tenons également à exprimer notre gratitude vis-à-vis de M. Thomas BRETEAU qui nous a rapidement appris à manipuler le logiciel Solidworks afin de réaliser notre prototype de chasseur de débris.

Finalement, il nous paraît nécessaire de remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet et tout particulièrement l'INSA de Rouen qui a mis à notre disposition des locaux aménagés et du personnel compétent pour nous aider à réaliser la tâche qui nous a été assignée.



*Photo de l'ensemble du groupe*

## TABLE DES MATIERES

1.	Introduction .....	1
2.	Méthodologie / Organisation du travail .....	1
2.1.	Méthodologie.....	1
2.2.	Organisation du travail .....	2
3.	Travail réalisé et résultats .....	3
3.1.	Les faits.....	3
3.1.1.	Un espace très encombré .....	3
3.1.2.	L'augmentation du nombre de débris : un réel danger.....	3
3.1.3.	Une solution indispensable.....	4
3.2.	Les solutions envisagées .....	5
3.2.1.	Systèmes intégrés au satellite.....	5
3.2.1.1.	« La règle des 25 ans » .....	5
3.2.1.2.	Le système de freinage .....	5
3.2.2.	Chasseurs de gros débris .....	7
3.2.2.1.	Le ravitaillement .....	7
3.2.2.2.	L'OTV .....	7
3.2.2.3.	La voile de freinage .....	7
3.2.2.4.	Le câble en Kevlar .....	8
3.2.3.	Chasseurs de petits débris (taille inférieure à 1 cm) .....	8
3.3.	Notre projet .....	9
3.3.1.	Étude des caractéristiques du chasseur et des débris choisis .....	9
3.3.1.1.	Type de débris ciblé.....	9
3.3.1.2.	Type de chasseur de débris.....	9
3.3.1.2.1.	Description du chasseur.....	9
3.3.1.2.2.	Modes de déploiement du filet.....	11
3.3.2.	Étude des trajectoires et des intersections possibles .....	11
3.3.2.1.	Choix de la trajectoire du chasseur : l'ellipse .....	11
3.3.2.1.1.	Avantage d'une trajectoire elliptique.....	11
3.3.2.1.2.	Rappel sur les caractéristiques d'une ellipse.....	12
3.3.2.2.	Étude du nombre de points d'intersection possibles .....	13



3.3.2.2.1.	1er cas : rpérigée>rdébris ou rapogée<rdébris .....	13
3.3.2.2.2.	2ème cas : rpérigée < rdébris < rapogée .....	14
3.3.3.	Différentes caractéristiques afin de déterminer les vecteurs vitesses du chasseur et du débris.....	14
3.3.3.1.	1er cas : le chasseur est plus rapide que le débris .....	14
3.3.3.1.1.	Détermination de l'orbite .....	14
3.3.3.1.2.	Détermination des vitesses de l'ellipse.....	14
3.3.3.1.3.	Détermination de la vitesse du débris.....	15
3.3.3.1.4.	Détermination des points d'intersection.....	16
3.3.3.1.5.	Détermination des vitesses du débris et du chasseur aux points d'intersection	17
3.3.3.1.6.	Désorbitation du chasseur.....	17
3.3.3.1.7.	Caractéristiques du moteur .....	18
3.3.3.1.8.	Nombre de tirs à effectuer pour la désorbitation .....	18
3.3.3.1.9.	Masse d'ergol consommée .....	19
3.3.3.2.	2 <sup>ème</sup> cas : le débris est plus rapide que le chasseur .....	19
3.3.3.2.1.	Détermination de l'orbite .....	19
3.3.3.2.2.	Détermination des vitesses de l'ellipse.....	19
3.3.3.2.3.	Détermination de la vitesse du débris.....	19
3.3.3.2.4.	Détermination des points d'intersection.....	20
3.3.3.2.5.	Détermination des vitesses du débris et du chasseur aux points d'intersection	20
3.3.3.2.6.	Nombre de tirs à effectuer pour la désorbitation .....	20
3.3.3.2.7.	Masse d'ergol consommée .....	20
3.3.4.	Changement de la trajectoire du chasseur après chaque choc .....	21
4.	Problèmes rencontrés au cours de la réalisation de ce projet .....	22
5.	Conclusions et perspectives.....	24
6.	Bibliographie .....	25
7.	Annexes.....	26
7.1.	Table des illustrations.....	26
7.2.	Tableaux de calculs.....	27



## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre de notre deuxième année à l'INSA, nous devons réaliser un projet de physique. "Étude théorique d'une méthode de déploiement dans l'espace d'un filet pour capturer un satellite", tel est l'intitulé de notre projet. Un intitulé qui nous a tous attirés, dès le premier abord de par son originalité et son lot de mystère. Nous ne savions pas à quoi nous attendre : serait-ce le déploiement d'un filet de pêche ? Ou bien l'étude de quelques fonctionnalités des filets dans le sport ? Nous étions donc impatients de découvrir le fond du projet et motivés pour le mener à bien en toutes circonstances.

À notre grand bonheur, c'est l'espace qui fût à l'honneur. En effet, l'espace est devenu un des principaux problèmes sur lequel beaucoup de scientifiques se penchent car il est infecté de débris spatiaux dont la taille diffère, allant de quelques millimètres à la taille d'un bus. Nous pourrions penser que c'est loin d'être très grave mais nous nous tromperions car ces débris représentent un véritable danger pour les satellites en orbite ainsi que pour la terre dans le cas d'une chute. C'est pourquoi depuis 2009, les collecter et les éliminer est devenue une obsession dorénavant pressante pour les scientifiques qui ont proposé plusieurs solutions que nous avons longuement étudiés.

À notre échelle, nous avons été chargés de penser au problème et essayé d'y apporter une solution pertinente. Dans un premier temps, nous nous sommes donc informés sur les débris spatiaux ainsi que leurs orbites pour se préoccuper dans un second temps de la manière de les collecter voire les éliminer. C'est principalement nos premières séances avec notre professeur qui nous ont aidées. En effet, chacun à tour de rôle proposait des méthodes d'approche du problème ainsi que des solutions dont la pertinence et la faisabilité variaient. Ces séances furent très instructives car elles nous ont permises de toucher du doigt la réalité du problème et y réfléchir par le même biais. Ainsi, nous sommes parvenus à choisir puis à étudier une solution particulière.

Dans ce dossier, nous allons tout d'abord présenter la méthodologie et l'organisation de travail qui ont permis de mener à bien ce projet, puis nous vous expliquerons avec plus de précision les problèmes de l'espace. Dans une troisième partie, nous vous présenterons les solutions déjà envisagées par les scientifiques et enfin notre projet lui-même à travers sa description et son étude.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

### 2.1. Méthodologie

Au début de notre projet, nous nous sommes principalement focalisés sur la compréhension de notre sujet à l'aide des explications, des divers documents que nous a fournis notre professeur M.Vuillamy ainsi que de documents sur Internet. Grâce à toutes ces données, nous nous sommes fixés l'objectif de créer notre propre chasseur de débris.

La première étape a été de déterminer la façon dont notre chasseur approcherait le débris et l'attraperait, notamment pour choisir sa forme et les matériaux qui le constitueraient afin qu'il soit le plus efficace possible. La deuxième étape consistait à étudier la façon dont il se débarrasserait de tous les débris qu'il aurait capturés. Nous avons ensuite créé un document Excel afin de calculer automatiquement les endroits où notre chasseur pourrait éventuellement attraper un débris, la vitesse de chacun (débris et chasseur), la quantité de



carburant nécessaire et d'autres données que nous préciserons par la suite. Avec toutes ces données nous avons donc pu étudier différents cas possibles de manière concrète et en déterminer les avantages et inconvénients. Enfin la phase finale du projet a été la rédaction du dossier et du diaporama pour notre soutenance.

Durant toutes ces périodes, nous avons essayé de répartir au mieux le travail entre les membres du groupe.

## 2.2. Organisation du travail

La communication entre nous ainsi qu'avec le professeur encadrant s'est faite essentiellement par mail ou Facebook. En effet, nous avons créé un groupe sur ce réseau social pour pouvoir échanger le plus rapidement possible nos questions, nos informations ou nos dates de réunion.

Au commencement de notre projet, nos recherches se sont effectuées séparément. Nous les avons ensuite mises sur un Google.docs afin que tout le monde puisse y avoir accès mais aussi pour rassembler l'essentiel des informations trouvées. Afin de pouvoir avancer dans notre projet nous avons opté pour des réunions régulières. Ainsi, nous nous sommes vus toutes les semaines lors de notre heure de projet obligatoire ainsi que tous les jeudis après-midi durant une heure. Le plus souvent nous nous sommes retrouvés dans une salle de cours vide de l'INSA. C'est d'ailleurs durant cette heure que nous avons ensemble créé le document Excel et réfléchi à des possibilités d'amélioration de la capture.

Après avoir réussi à dégager un plan, nous nous sommes répartis les parties (trois groupes de deux) pour plus d'efficacité et de rapidité. Chacun devait mettre sa partie sur le Google.docs mis en place et, durant la semaine précédant le rendu, nous nous sommes réunis pour réaliser les dernières modifications.

Voici un diagramme montrant les différentes étapes de notre projet ainsi que le temps que nous avons alloué à chaque étape :

Projet P6 : Partage du temps																			
SEMAINE	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Recherche documentaire	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Étude théorique				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Création de la feuille Excel	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Création du prototype sur Solidworks										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Rédaction du dossier	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figure 1 : partage du temps du projet





### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Les faits

##### 3.1.1. Un espace très encombré

Plusieurs études prouvent qu'autour de la terre le nombre de débris spatiaux ne cesse d'augmenter. Cependant, pour comprendre l'ampleur de ce phénomène il est nécessaire de définir précisément ce qu'est réellement un "débris". On appelle "débris spatial" tout élément d'une taille supérieure à 10micromètres, créé par l'homme et résultant de la mise hors service d'un satellite ou encore d'un lanceur spatial.

Au total, 15 000 débris de plus de 10 cm, 300 000 débris entre 1 et 10 cm et quelques millions (environ 170) de l'ordre du mm circulent autour de la Terre.

Ils ont une durée de vie pouvant être plus ou moins longue en fonction de l'orbite sur laquelle ils se trouvent. Par exemple, un satellite espion en opération a une durée de vie de 3 jours tandis qu'un satellite géostationnaire une durée de vie de plusieurs millions d'années.

Même si l'espace entier est encombré on peut toutefois remarquer qu'une grande majorité de ces débris se situent sur la LEO (*Low Earth orbit* en anglais ou orbite terrestre basse) c'est-à-dire de 160 à 2000 km au dessus de la Terre.

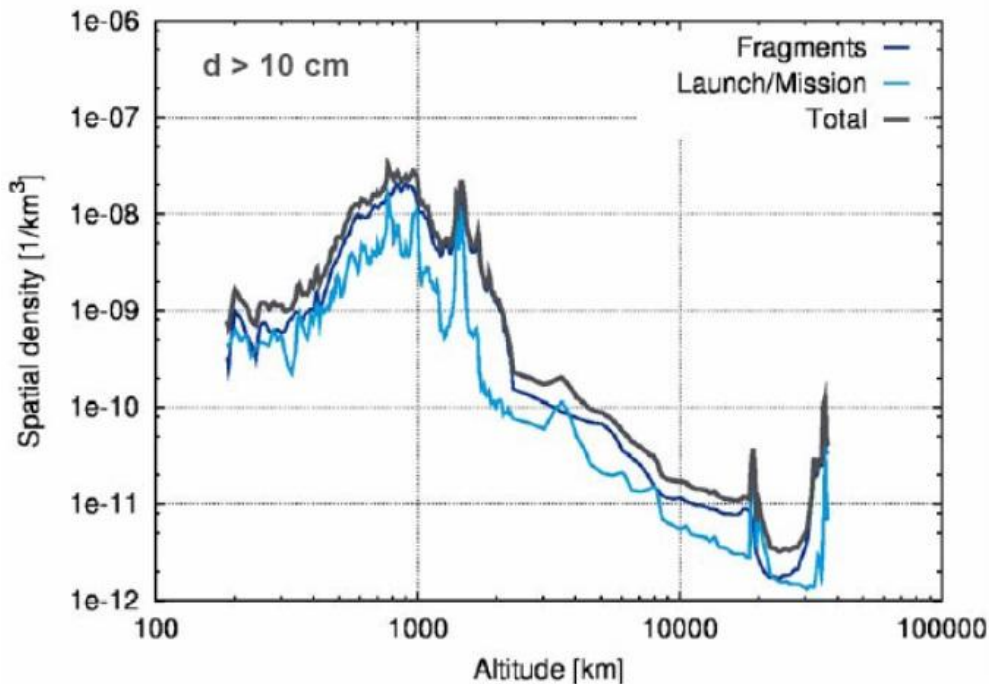


Figure 2 : répartition des débris selon les orbites

##### 3.1.2. L'augmentation du nombre de débris : un réel danger

Les débris gravitent sur des orbites autour de la Terre et sont susceptibles, au cours de leur parcours, de rentrer en collision avec un élément spatial en service comme un satellite, et donc de l'abîmer. En effet, l'énergie cinétique étant proportionnelle au carré de la vitesse, elle augmente avec  $v$  et peut atteindre des valeurs extrêmes. Par exemple, si l'on



prend un débris ayant une masse de 10g, son énergie cinétique s'élèvera à 136 000 joules. Si on considère que sa vitesse est de 39 m/h, sa masse correspondra à celle d'un débris de 140kg. Les dégâts causés par le choc d'un tel débris peuvent donc être conséquents.

Comme nous l'avons dit précédemment, les débris étant des restes de satellite hors service ou de lanceurs spatiaux envoyés par l'homme, nous pourrions penser que pour diminuer leur nombre dans l'espace, il suffirait de diminuer, voire d'arrêter les lancements depuis la Terre. Mais comme le signale Christophe Bonnal, expert senior à la direction des lanceurs du CNES, *"même si on arrêta les lancements, le nombre de débris augmenterait à cause des collisions entre les débris déjà présents dans l'espace"*.

En effet ces derniers peuvent également s'entrechoquer, provoquant ainsi la multiplication de leur nombre. Lorsque qu'un débris (quelle que soit sa taille) rentre en collision avec un gros débris ce dernier "s'éclatera" créant ainsi une multitude de petits débris. Comme par exemple en 2009, la collision entre un satellite de la constellation Iridium et un satellite russe "Cosmos" désactivé a créé 2000 débris supplémentaires. Ainsi, de 1957 à aujourd'hui, le nombre de débris dans l'espace augmente de manière linéaire avec une pente de 220 à 240 débris par an (et ce sont en général des débris de plus de 10 cm !).

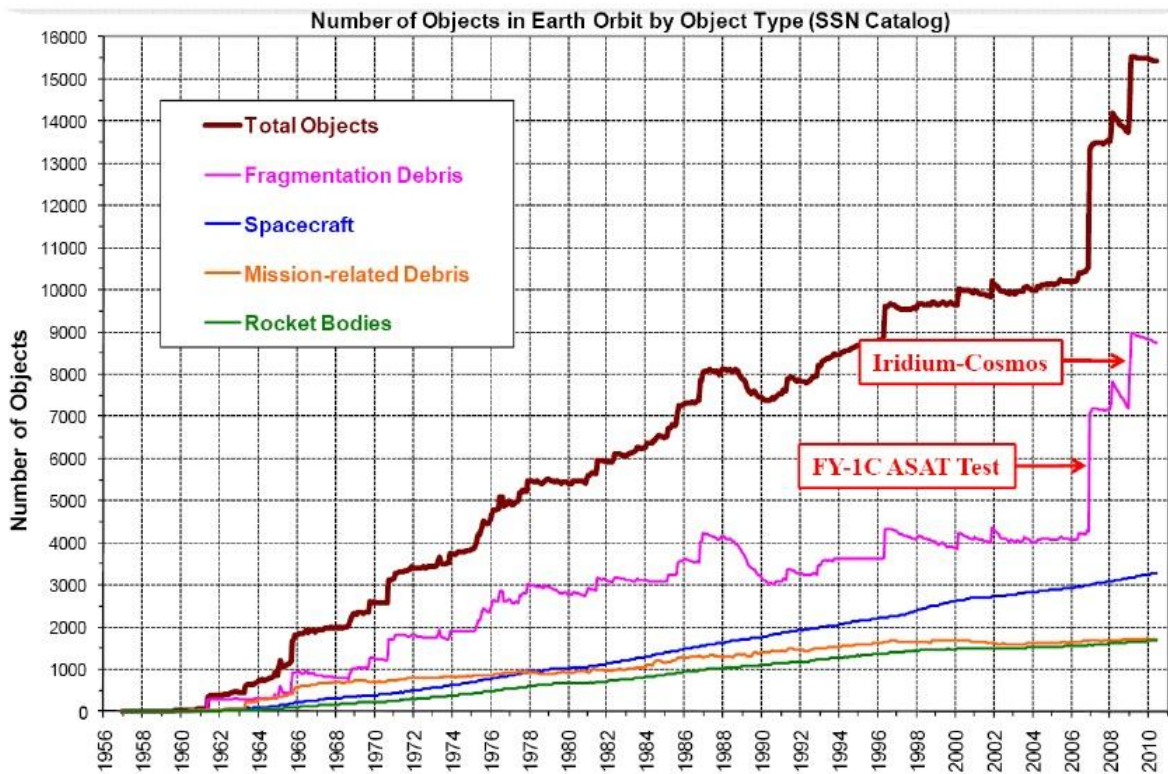


Figure 3 : évolution de la quantité de débris dans l'espace

Cette importante augmentation représente ainsi un réel danger car le risque d'impacts augmente également. Par exemple sur la LEO très encombrée, ce dernier est d'autant plus élevé car le nombre de déchets spatiaux par an augmenterait de 5%.

### 3.1.3. Une solution indispensable

Il devient donc nécessaire de trouver une solution pour "libérer" l'espace afin d'empêcher le risque de collision d'augmenter sans fin, voire même essayer de le diminuer. Pour ce faire, des scientifiques du monde entier essaient de mettre en place des chasseurs



de débris ayant principalement pour rôle, comme leur nom le suppose, de capturer les débris spatiaux afin de s'en débarrasser.

D'après certaines études, pour seulement stabiliser la situation il faut, dans l'idéal, éliminer 5 à 10 gros débris par an. Ceux-ci seraient repérés sur des orbites définies à l'avance afin d'éviter toute perte financière et temporelle. Les critères se baseront essentiellement sur la probabilité de collision et sur le nombre de fragments qu'engendrait cette collision.

Ainsi plusieurs types de chasseurs de débris, que nous allons maintenant vous présenter, sont à l'étude avec pour objectif de :

- ne pas être trop gourmand en énergie
- être capable de capturer plusieurs objets par missions
- être économiquement durable.

### 3.2. Les solutions envisagées

Il faut séparer les moyens dont pourraient disposer les satellites pour se désorbiter eux-mêmes et les moyens extérieurs que nous pourrions mettre en œuvre pour la désorbitation.

#### 3.2.1. *Systèmes intégrés au satellite*

##### 3.2.1.1. « La règle des 25 ans »

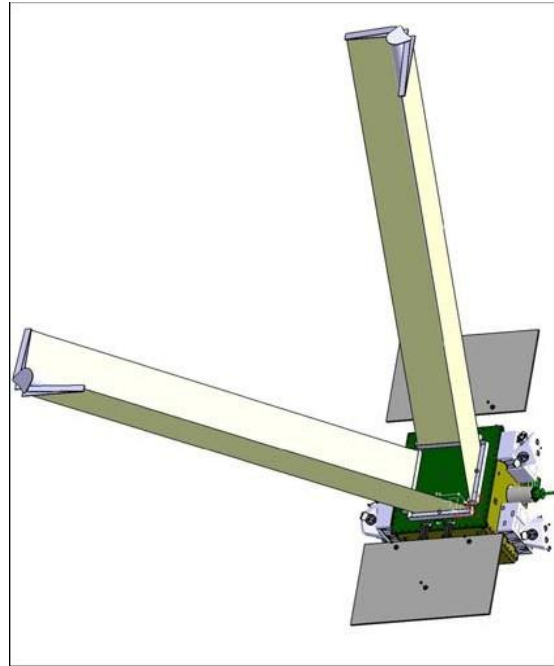
Tout d'abord une règle est apparue nécessaire au niveau international : "la règle des 25 ans". C'est-à-dire que les satellites en orbite basse ne doivent pas rester dans l'espace plus de 25 ans. Ceci a pour but de limiter l'encombrement spatial. Cependant il est impossible d'imposer cette règle aux entreprises qui dirigent ces opérations spatiales. C'est pour cela qu'aujourd'hui seulement 50% des satellites vont être correctement pris en compte en fin de vie. De plus cela voudrait dire que le satellite devra être capable de se désorbiter de lui-même, et utiliser pour ceci son système de propulsion qui consomme beaucoup de carburant. Et il arrive que le satellite soit trop vieux pour pouvoir mettre en œuvre ce genre de procédures.

Dès lors il faut trouver un autre moyen pour changer ce satellite d'orbite qui, en errant dans l'espace terrestre, devient un débris.

##### 3.2.1.2. *Le système de freinage*

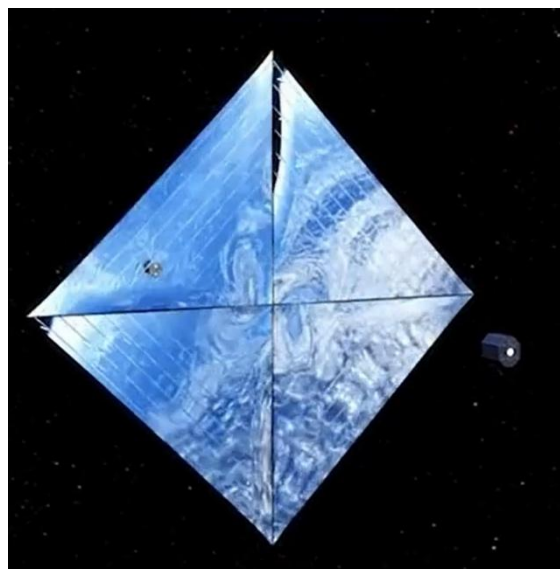
La solution peut venir du satellite lui-même qui peut être équipé d'un système de bras qui, lors de son déploiement va augmenter la portée aérodynamique du débris et va aussi réduire sa vitesse, et donc sa durée de vie dans l'espace en le forçant à se diriger vers l'atmosphère.





**Figure 4 : bras de freinage**

Cependant l'installation de ce type de structures n'est pas encore conduite par les entreprises. Dès lors il pourrait être envisageable de fixer « post-mortem » un système de freinage, au débris. Il a été envisagé ce type de mécanisme et cela pourrait prendre la forme d'une grande voile qui, sur le même principe que les bras précédemment évoqués, modifierait l'aérodynamique globale du satellite, causant ainsi sa désorbitation vers la Terre. De plus si cette voile était réfléchissante, la pression des radiations augmenterait encore la capacité de freinage de la structure. Cependant ce système pose le problème de la difficulté à déterminer l'endroit de chute du satellite. Enfin il nécessite un environnement qui possède une certaine densité de particules, ce qui rend le système de freinage inefficace au-delà de 1000 km d'altitude.



**Figure 5 : voile de freinage**



### 3.2.2. Chasseurs de gros débris

#### 3.2.2.1. Le ravitaillement

Et que faire d'un débris qui serait un satellite en état de fonctionnement qu'on voudrait désorbiter, non équipé d'un tel système et dont le réservoir ne serait pas assez plein pour qu'il exécute une manœuvre de désorbitation par propulsion ? Une des solutions serait de le ravitailler, avec un satellite ravitailleur, comme on le fait déjà pour des satellites en cours d'utilisation. Le satellite-débris pourrait alors activer ses propulseurs et se désorbiter. Une seule mission pourrait ainsi permettre de faire disparaître plusieurs satellites.

Néanmoins ce système pose deux problèmes. D'une part, il faudrait être sûr que le satellite ne soit pas trop vieux et toujours en état de fonctionner. D'autre part, avec ce système le ravitailleur deviendrait alors un chasseur puisqu'il devrait relier un appareil qui ne coopérerait pas pour la mise en contact des deux satellites. La saisie « au vol » d'un débris, et surtout de telle manière à pouvoir le ravitailler, pose énormément de difficultés.

Si le débris se trouve être un autre corps qu'un satellite ou qu'il en est un mais qu'il n'est plus en état de fonctionnement, il n'est plus question alors d'utiliser son propre système de propulsion.

#### 3.2.2.2. L'OTV

Pour chasser ces gros débris, nous pouvons également envisager une méthode développée par le CNES, qui consiste en un satellite nommé OTV. Il s'approche du débris, s'y accroche en conservant une direction et un sens similaire, et vient ensuite attraper le débris à l'aide d'un bras robotique. Dès qu'il s'y est accroché, il va ensuite le faire descendre vers l'atmosphère où ce dernier pourra se consumer.

Le débris a cependant besoin d'une force extérieure qui va l'entraîner vers l'atmosphère. Cette force peut-être amenée par l'ajout d'un kit de désorbitation sur ce dernier pouvant être, par exemple, un moteur à propulsion solide. Cette solution peut-être intéressante car elle permettra au chasseur d'envoyer de nombreux débris dans l'atmosphère, mais le principal problème consiste à fixer le kit de désorbitation sur le débris.



Figure 6 : l'OTV

#### 3.2.2.3. La voile de freinage

Une autre solution serait de remplacer le kit de désorbitation par une voile de freinage, comme celle évoquée ci-dessus, mais là encore le problème de la fixation de cette voile de freinage sur le débris persiste.





De plus, l'approche avec précision du chasseur sur le débris nécessite une grande quantité d'énergie, sans oublier que le rapprochement du chasseur à une si petite distance entraîne un fort risque de collision.

### 3.2.2.4. Le câble en Kevlar

Il serait également possible de remplacer le bras articulé du chasseur de débris par un harpon. Le câble en Kevlar servirait à attraper le débris et aussi à le désorbiter. Après capture du débris par le harpon, le câble viendrait placer le débris sur une orbite plus basse que celle du chasseur. En conséquence, le débris aura tendance à avancer plus vite que le chasseur, entraînant une tension du câble puis une rupture. L'extrémité basse du câble et le débris vont descendre davantage, jusqu'à l'atmosphère, tandis que la partie haute du câble et le chasseur vont remonter plus vite, positionnant en même temps le chasseur sur une autre orbite pour attraper un autre déchet.

Cette solution présente deux avantages par rapport à la précédente : le chasseur n'a plus à s'approcher aussi près du débris, et comme il n'y a pas de kit de désorbitation, la question de fixation de ce kit sur le débris ne se pose même pas.

Le seul inconvénient est la difficulté pour le chasseur de planter le harpon dans le débris dû à la distance entre ces deux objets.

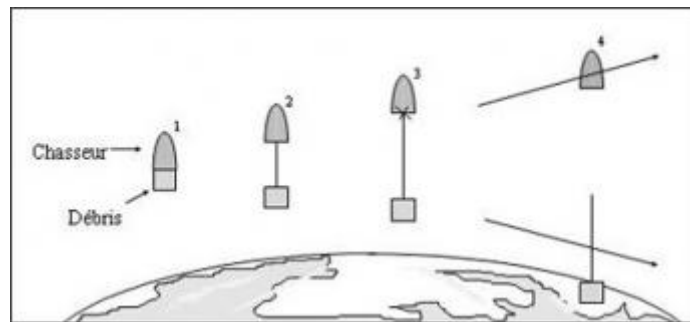


Figure 7 : le câble de Kevlar

### 3.2.3. Chasseurs de petits débris (taille inférieure à 1 cm)

Malgré leurs tailles, les petits débris représentent aussi un danger pour les projets spatiaux. L'idée principale avancée pour se débarrasser de ces débris est l'utilisation d'un laser. Il a été envisagé soit de tirer depuis la Terre, soit de mettre en orbite le laser. L'objectif n'est pas la désintégration du débris mais plutôt sa fragmentation de manière à ce que les infimes fragments servent à freiner le déchet pour le redescendre. Cela éviterait le problème de l'accrochage des débris mais cela en soulève d'autres. Notamment celui de la capacité actuelle des lasers qui rend difficile la visée d'un débris depuis la Terre. De plus l'atmosphère atténuerait la puissance du tir. Il suffirait à ce moment-là de l'envoyer dans l'espace mais cela semble impossible à cause des problèmes géopolitiques que causerait une arme si puissante dans l'espace.





*Figure 8 : le laser*

Il reste maintenant à traiter le problème des débris compris entre 1 et 10 cm, appelés moyens débris. La dernière solution, celle que nous avons plus particulièrement étudiée, est celle du filet, qui permettrait de ramasser en continu ce genre de moyens débris.

### **3.3. Notre projet**

#### **3.3.1. Étude des caractéristiques du chasseur et des débris choisis**

A l'aide de toutes ces solutions possibles, nous avons tenté, pour ce projet, de choisir et d'étudier celle qui conviendrait le mieux à la récupération de débris spatiaux que ce soit du point de vue économique, technique mais également pratique.

##### **3.3.1.1. Type de débris ciblé**

Dans un premier temps, il est essentiel de déterminer le type de débris que nous cherchons à capturer afin de déterminer ensuite, le plus précisément possible, le type de chasseur le plus avantageux pour notre projet. Souhaitant utiliser une technique de filet, nous avons donc décidé de nous restreindre aux débris mesurant 1 à 10 cm. En effet ceux de plus de 10 cm sont déjà identifiés sur Terre puis harponnés un à un, et ceux de moins d'1 cm engendrent moins de dégâts.

##### **3.3.1.2. Type de chasseur de débris**

###### **3.3.1.2.1. Description du chasseur**

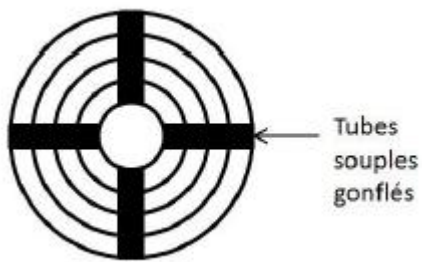
Nous pouvons alors choisir notre chasseur de débris. D'après l'intitulé de notre projet, nous avons étudié le chasseur constitué d'un filet.

Pour effectuer ce type d'activité la matière du filet doit être à la fois souple et résistante. C'est pourquoi nous avons choisi le kevlar. Nous nous sommes plus précisément focalisés sur du kevlar 49 pour sa légèreté et sa résistance aux forces de couple ou de torsion susceptibles d'être causées par l'arrivée des débris spatiaux sur le filet. En effet, il a de plus, une résistance spécifique en traction de  $2,5 \times 10^6 \text{ N.m.kg}^{-1}$ , c'est-à-dire qu'il est

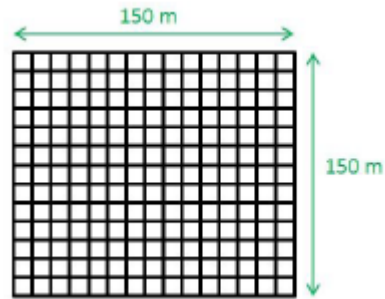


près de 5 fois plus résistant que l'acier. De plus, il permet d'absorber les vibrations mais aussi d'amortir le choc causé par l'arrivée des débris sur le filet. Enfin, nous avons choisi une maille de 0,5 cm.

Concernant sa forme, nous avons tout d'abord pensé à des filets plans, circulaires ou rectangulaires. Cependant, après réflexion, ces propositions montrent quelques limites. En effet, pour capturer plusieurs débris à la suite par exemple, il serait difficile de redéployer le filet une fois le premier débris capturé.

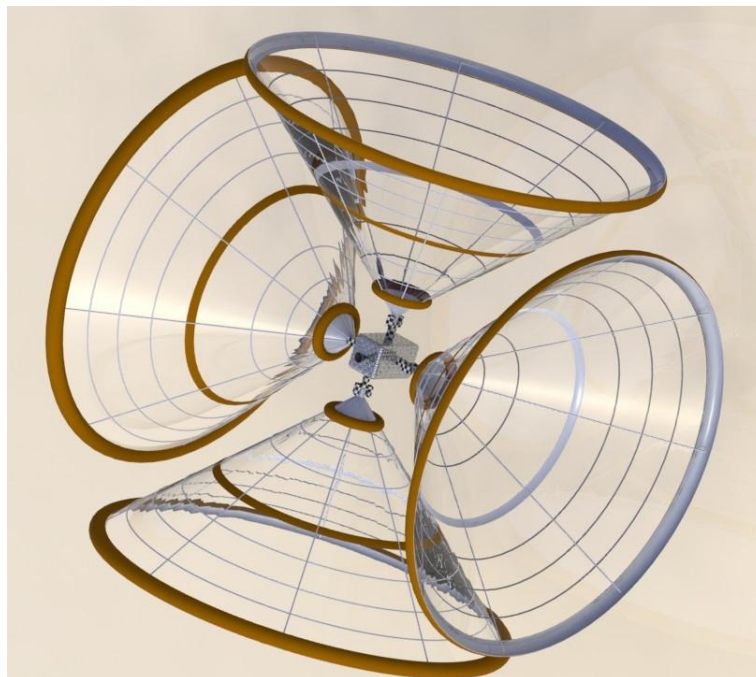


**Figure 9 : filet de forme conique**



**Figure 10 : filet plan**

Nous avons donc trouvé une autre solution : un filet de forme conique. Ainsi les débris entreraient dans le cône et s'accrocheraient au filet. Ce dernier va se déformer sous l'effet du choc, mais sa structure lui permet de reprendre sa forme initiale après avoir absorbé le choc. Cependant, après avoir étudié les cas possibles d'attaque de débris (étudiés plus en détail par la suite), nous avons décidé de nous arrêter sur un chasseur équipé de 4 filets coniques entourant ce dernier. Ainsi, cela permettra non seulement d'augmenter la surface de capture mais également de protéger de chasseur de toute arrivée latérale de débris.



**Figure 11 : prototype du chasseur de débris**





### 3.3.1.2.2. Modes de déploiement du filet

En ce qui concerne le déploiement de notre filet, nous avons émis quelques idées :

- *type ressort/parapluie* : cela permettrait, après avoir balayé toute une surface de l'espace de refermer le filet afin de récupérer l'ensemble des débris.
- *rotation du filet* : technique utilisée également par les pêcheurs.
- *4 bras métalliques* : ces bras se déploieraient afin d'étendre notre filet.
- *tubes gonflés*.

Finalement nous avons décidé que chaque filet sera équipé de tubes gonflables car ils permettent non seulement un déploiement facile de ce dernier mais également leur fermeture une fois la capture finie. De plus, lors de la capture de débris, ces boudins "suivraient" le filet et amortiraient facilement le choc.

### 3.3.2. Étude des trajectoires et des intersections possibles

Après avoir clairement défini quel type de chasseur nous allons examiner, il est indispensable d'étudier les intersections, les trajectoires et les vitesses de ce dernier ainsi que les débris qu'il va capturer. Il faut noter cependant que, dans le cadre de notre projet, nous nous baserons essentiellement sur des calculs théoriques. Ainsi le résultat peut être différent dans la réalité à cause des événements possibles pouvant perturber le déroulement de la capture.

#### 3.3.2.1. Choix de la trajectoire du chasseur : l'ellipse

##### 3.3.2.1.1. Avantage d'une trajectoire elliptique

Pour qu'il y ait une capture possible il faut avoir des points d'intersection entre la trajectoire du débris et celle du chasseur. Nous aurions pu choisir une trajectoire circulaire mais le chasseur serait alors resté constamment sur la même orbite. Or il faut que tout l'espace soit "nettoyé".

Nous avons donc décidé de donner au chasseur une trajectoire elliptique. De cette manière, celui-ci pourra capturer des débris sur différentes orbites. Notons que sur une orbite elliptique, la vitesse change en tout point de la trajectoire, et en particulier à des valeurs particulières à l'apogée et au périhélie avec (respectivement  $v_A$  et  $v_P$ ). Une fois l'apogée, le périhélie et l'excentricité de l'ellipse déterminés (que nous rappellerons par la suite) la vitesse du chasseur sera fixée.

Les débris seront alors susceptibles d'arriver sur le chasseur par l'arrière, sur le côté ou encore par l'avant, ce qui justifie le choix de 4 filets en forme de cônes. Ils permettront, comme dit précédemment, non seulement de favoriser la capture mais aussi d'éviter toute dégradation causée par l'arrivée de débris sur celui-ci.



### 3.3.2.1.2. Rappel sur les caractéristiques d'une ellipse

Afin de pouvoir étudier précisément les intersections entre le chasseur et les débris, nous devons tout d'abord rappeler quelques formules caractéristiques de l'ellipse. Voici donc son schéma et les distances associées.

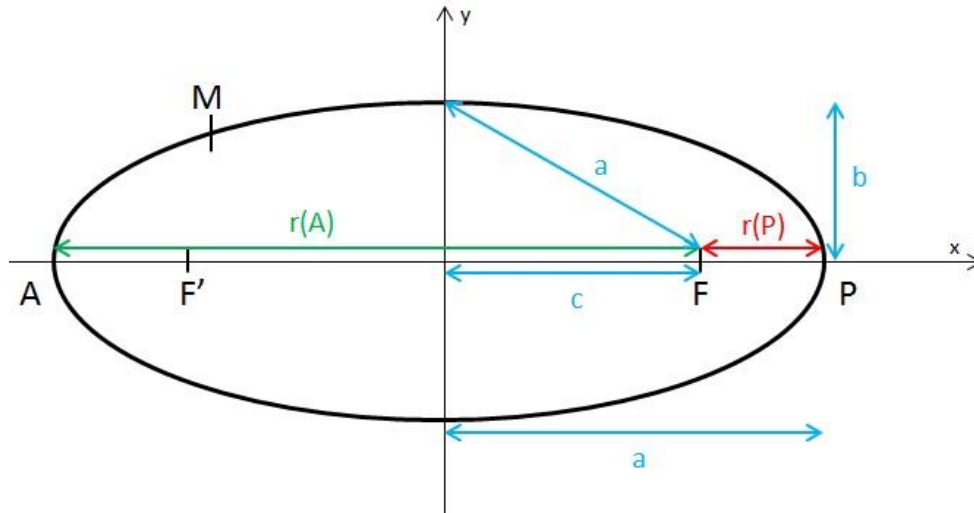


Figure 12 : représentation d'une ellipse

- Avec :
- **F, F'** : foyers de l'ellipse. **F** représente aussi le centre de la Terre dans notre projet.
  - **P** : le périégée de l'ellipse.
  - **A** : l'apogée de l'ellipse.
  - **r(P)** : rayon au périégée par rapport au centre de la Terre placé en F.
  - **r(A)** : le rayon à l'apogée.
  - **a** : demi grand axe de l'ellipse.
  - **b** : demi petit axe de l'ellipse.
  - **c** : distance des foyers par rapport au centre de l'ellipse
  - **h<sub>périégée</sub>** : l'altitude du périégée par rapport à la surface de la terre
  - **h<sub>apogée</sub>** : l'altitude de l'apogée

Au départ  $r_t$  est connu,  $h_p$  et  $h_A$  le sont aussi puisque nous les auront fixés à l'avance. A l'aide de ces trois données, nous allons vous montrer que nous pouvons calculer toutes les autres caractéristiques de l'ellipse.

Tout d'abord, le centre de la Terre se situe au foyer F. On sait donc que :

$$r(P) = r_t + h_{périégée} \text{ et } r(A) = r_t + h_{apogée}.$$

Puis nous pouvons voir sur le schéma que  $a = \frac{r(P)+r(A)}{2}$ .

Or  $r(P) = a(1 - e)$ . Nous trouvons alors l'excentricité  $e$  de l'ellipse avec  $e = -\frac{r(P)-a}{a}$ .

De plus  $e = \frac{c}{a}$ , donc nous obtenons  $c$  avec  $c = e \times a$ .



À l'aide du schéma, nous pouvons remarquer aussi que  $c^2 + b^2 = a^2$ . Nous obtenons donc que  $b = \sqrt{c^2 - a^2}$ .

Il ne nous reste plus qu'à déterminer le paramètre  $p$  de l'ellipse.

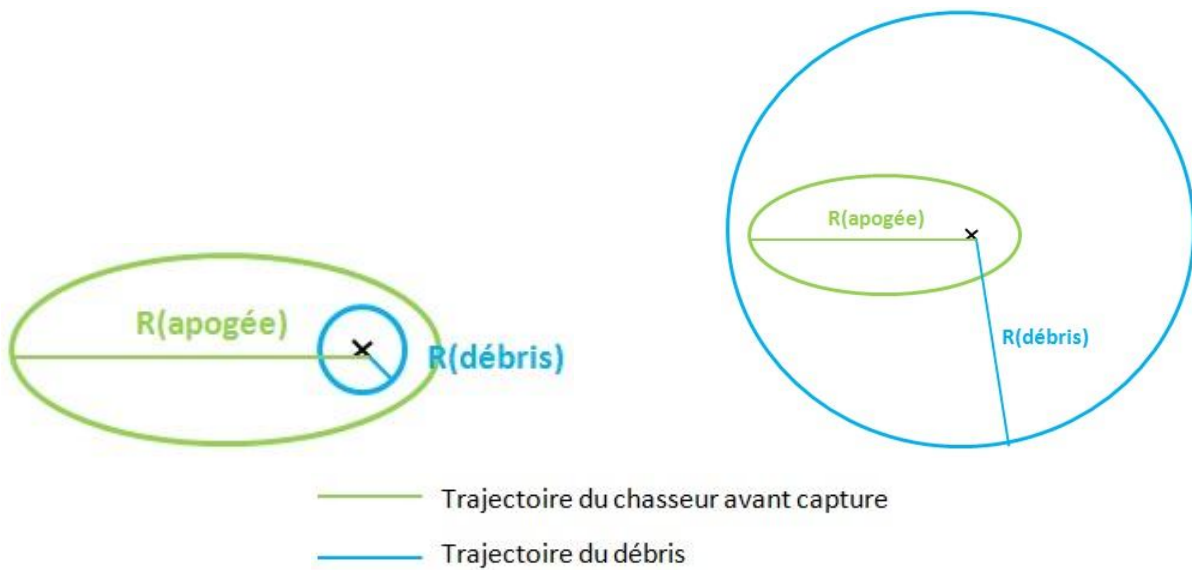
Nous savons que  $r = \frac{p}{1+e \cos \theta}$ . Prenons le cas où le chasseur est situé au périégée. Nous aurons alors  $\theta = 0$  et  $r = r(P)$  donc :  $r(P) = \frac{p}{1+e}$ .

Connaissant  $r(P)$  et  $e$  on en déduit  $p = r(P)(1 + e)$ .

Grâce à ce schéma nous avons donc pu relier toutes les caractéristiques de l'ellipse entre elles, ce qui nous a servi pour la création d'un programme Excel composée de quatre feuilles (voir tableaux de calculs 1, 2, 3 et 4). C'est à l'aide de ce programme que nous avons trouvé et étudié les différents points d'intersections possibles entre les trajectoires du débris et du chasseur.

### 3.3.2.2. Étude du nombre de points d'intersection possibles

#### 3.3.2.2.1. 1er cas : $r_{périégée} > r_{débris}$ ou $r_{apogée} < r_{débris}$



**Figure 13 : cas d'aucun point d'intersection**

Or, on sait que  $r_{périégée}$  ( $r(P)$ ) est le rayon minimal de l'ellipse et  $r_{apogée}$  ( $r(A)$ ) son rayon maximal. Donc si on a  $r_{périégée} > r_{débris}$  ou si  $r_{apogée} < r_{débris}$ , il n'y aura pas de points d'intersection et donc pas de capture possible à étudier. Ce qui est d'ailleurs visible sur les schémas.



**3.3.2.2. 2ème cas :  $r_{p\grave{e}rig\acute{e}e} < r_{d\acute{e}bris} < r_{apog\acute{e}e}$**



**Figure 14 : cas d'intersections**

Comme nous pouvons le voir sur ce schéma descriptif on aura donc uniquement deux intersections possibles entre une orbite de débris et celle de notre chasseur. C'est ce 2ème cas que nous allons étudier plus précisément durant la suite de ce rapport.

**3.3.3. Différentes caractéristiques afin de déterminer les vecteurs vitesses du chasseur et du débris**

Concernant l'étude des vecteurs vitesses du chasseur et du débris, il existe deux cas possibles. Afin de mieux comprendre ce qu'il se passe dans chaque cas, nous allons vous expliquer la théorie (écrite en **noir**) à l'aide de cas concrets (écrits en **bleu**).

**3.3.3.1. 1er cas : le chasseur est plus rapide que le débris**

**3.3.3.1.1. Détermination de l'orbite**

En premier lieu, il a été nécessaire de déterminer une orbite précise. C'est pour cela que nous avons donc choisi de fixer les dimensions de l'orbite du débris. Ayant centrés précédemment la capture de nos débris sur ceux essentiellement situés sur des LEOs, (entre 160 et 2000 km) nous avons choisi de fixer dans un premier temps notre débris à une altitude de 1000 km.

Concernant l'ellipse décrivant la trajectoire du chasseur nous prendrons pour l'apogée une altitude de **1800 km** et le périégée une altitude de **600 km**. Sachant que le rayon de la Terre est de 6378km on pourra déterminer  $r(A)$  et  $r(P)$ .

$r(A) = 8178 \text{ km}$  et  $r(P) = 6978 \text{ km}$ .

De plus, nous choisissons **1000km** pour altitude du débris, ce qui nous donne  $r_{d\acute{e}bris} = 7378 \text{ km}$ . (voir tableau de calculs 1 : respectivement lignes 7,8 et 24)

Une fois ces données trouvées, notre feuille Excel retrouve facilement a, b, c, e, p (à l'aide des formules démontrées précédemment) comme le montre le tableau de calculs 1. (respectivement lignes 9, 20, 19, 18 et 17)

**3.3.3.1.2. Détermination des vitesses de l'ellipse**

Pour étudier les vitesses, on commence par étudier l'énergie totale du chasseur. Celle-ci est la somme de son énergie potentielle et de son énergie cinétique.



Ainsi on pourra écrire :  $E_{\text{totale}} = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r} = -\frac{\mu}{2a}$ . Dans notre cas on obtient une énergie totale  $E_{\text{totale}} = -2,63 \times 10^7 \text{ J.kg}^{-1}$  (voir tableau de calculs 1 : ligne 14 ou 15). L'énergie est négative ce qui est cependant normal car l'énergie est définie à une constante près et nous avons choisi cette constante de sorte que pour un point situé à l'infini sa vitesse soit nulle. Dans ce cas, son énergie totale est nulle, d'où la présence d'une constante nulle dans l'expression de l'énergie. Et de ce fait pour notre ellipse, l'énergie est plus faible que 0 donc est négative.

Ayant l'expression de l'énergie totale on pourra en déduire les valeurs de  $v(P)$  et  $v(A)$ , en remplaçant dans l'expression précédente  $v$  et  $r$  successivement par  $v(A)$ ,  $r(A)$  puis par  $v(P)$ ,  $r(P)$ . Nous obtenons donc :  $v(A) = \sqrt{\frac{2(E_{\text{totale}} + \mu)}{r(A)}}$  et  $v(P) = \sqrt{\frac{2(E_{\text{totale}} + \mu)}{r(P)}}$ .

L'application numérique nous donne alors :  $v(P) = 7851 \text{ m.s}^{-1}$  et  $v(A) = 6699 \text{ m.s}^{-1}$  (voir tableau de calculs 1 : respectivement lignes 11 et 16) correspondant donc aux vitesses du chasseur à l'apogée et au périégée.

Nous pouvons vérifier nos résultats expérimentaux à l'aide de la formule du moment cinétique  $\sigma$ . En effet, on a pour tout point M appartenant à l'ellipse :

$$\vec{\sigma} = \vec{FM} \wedge \vec{v(M)} = \text{cst} = \vec{K}$$

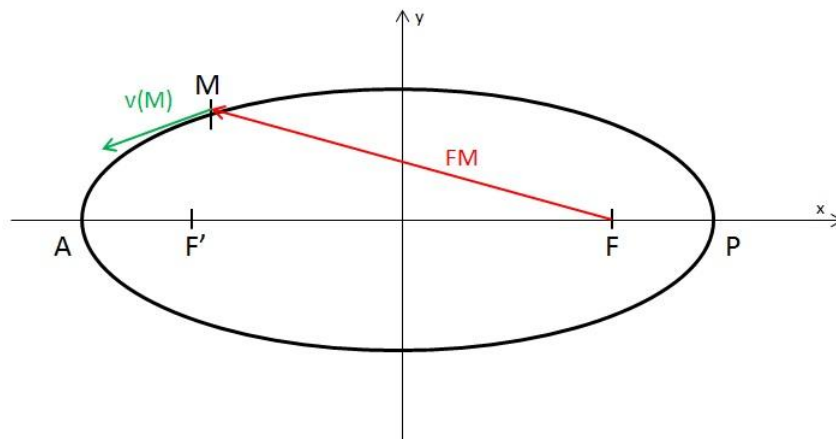


Figure 15 : schéma explicatif du moment cinétique constant

avec **FM** : la distance entre le foyer de l'ellipse et un point M situé sur cette ellipse

**v(M)** : la vitesse au point M

**K**: une constante

Particulièrement, au périégée et à l'apogée nous obtenons l'égalité suivante :  $K = r(P) \times v(P) = r(A) \times v(A)$ . Sachant que  $r(P) < r(A)$ , il faut que la vitesse au périégée soit plus importante que celle à l'apogée, nos résultats sont donc cohérents.

### 3.3.3.1.3. Détermination de la vitesse du débris

Rappelons que pour le débris nous avons choisi une trajectoire circulaire. Ainsi on se trouve dans le cas où  $e = 0$  et  $v = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$ . Ainsi,  $v_{\text{débris}} = \sqrt{\frac{\mu}{r_{\text{débris}}}}$ ,  $\mu$  étant la constante de



gravité. En appliquant la formule précédente on aura,  $v_{\text{débris}} = 7350 \text{ m.s}^{-1}$ . (voir tableau de calculs 1 : ligne 25)

### 3.3.3.1.4. Détermination des points d'intersection

Mais calculer les vitesses n'est pas suffisant, il faut surtout déterminer les points d'intersection des deux orbites. Pour cela, nous avons pris différentes valeurs de  $\theta$  allant de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  (voir figure 16 ci-dessous). Puis, nous avons déterminé, en fonction de ces angles  $\theta$ , les différentes positions possibles le long des orbites et enfin les coordonnées des vecteurs vitesses en ces points (voir tableau de calculs 2).

Voici quelques formules qui nous ont servi à la réalisation de notre deuxième feuille Excel :

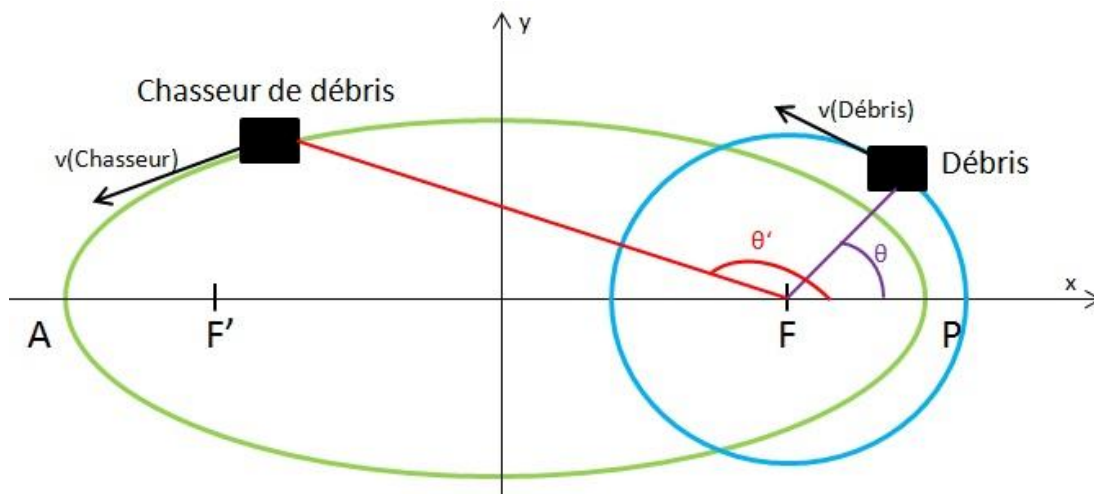


Figure 16 : schéma représentant les positions du débris et du chasseur

- Positions du débris par rapport à la Terre :

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{débris}/\text{Terre}} &= r_{\text{débris}} \times \cos \theta \\ y_{\text{débris}/\text{Terre}} &= r_{\text{débris}} \times \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

où  $\theta$  est l'angle permettant de déterminer la position du débris par rapport à la Terre

- Positions de l'ellipse par rapport a la Terre:

$$\left. \begin{aligned} x_{\text{ellipse}/\text{Terre}} &= a \times \cos \theta' - x_{\text{Terre}} \\ y_{\text{ellipse}/\text{Terre}} &= b \times \sin \theta' \end{aligned} \right\}$$

où  $\theta'$  est l'angle permettant de déterminer la position du chasseur par rapport à la Terre

Ayant maintenant les coordonnées du chasseur et du débris, nous pouvons déterminer et comparer leur distance par rapport à la Terre. Lorsque ces dernières sont égales, nous obtenons ainsi les coordonnées de nos points d'intersection.

Pour la distance débris/Terre comme nous l'avons montré avant

$\text{distance}_{\text{débris}/\text{Terre}} = 7378 \text{ km}$  tandis que pour la distance ellipse/Terre on obtient :

$$\text{distance}_{\text{ellipse}/\text{Terre}} = \sqrt{x_{\text{ellipse}/\text{Terre}}^2 + y_{\text{ellipse}/\text{Terre}}^2}$$



Dans notre cas concret, on obtient deux points d'intersection (voir tableau de calculs 2 : cases colorées en vert) :

- 1<sup>er</sup> point d'intersection :

$$\text{distance}_{\text{débris}/\text{Terre}} = 7378 \text{ km} \text{ et } \text{distance}_{\text{ellipse}/\text{Terre}} = 7372,8 \text{ km}$$

- 2<sup>ème</sup> point d'intersection :

$$\text{distance}_{\text{débris}/\text{Terre}} = 7378 \text{ km} \text{ et } \text{distance}_{\text{ellipse}/\text{Terre}} = 7473,8 \text{ km}$$

On remarque bien que l'écart entre ces deux distances n'étant que de quelques kilomètres (5,2 km ou 95,8 km) les angles  $\theta$  correspondants  $\theta = 70^\circ$  et  $\theta = 280^\circ$  peuvent effectivement correspondre aux deux angles des deux points d'intersection possibles.

### 3.3.3.1.5. Détermination des vitesses du débris et du chasseur aux points d'intersection

Nous pouvons alors déterminer les vitesses du débris et du chasseur en ces points. Pour cela nous utilisons la formule suivante :

$$\vec{v}_{\text{débris}} = v_{x \text{ débris}} \vec{U}_x + v_{y \text{ débris}} \vec{U}_y = -v_{\text{débris}} \times \sin \theta \vec{U}_x + v_{\text{débris}} \times \cos \theta \vec{U}_y$$

Numériquement, nous obtenons : (voir tableau de calculs 2 : respectivement cases S14, V14, S35 et V35)

- 1<sup>er</sup> point d'intersection :  $v_{\text{débris}} = 7558,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $v_{\text{chasseur}} = 7719,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
- 2<sup>ème</sup> point d'intersection:  $v_{\text{débris}} = 7558,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $v_{\text{chasseur}} = 7608,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La vitesse du débris est bien légèrement plus faible que celle du chasseur, le chasseur capture donc le débris par l'arrière.

### 3.3.3.1.6. Désorbitation du chasseur

Capter des débris spatiaux est essentiel, mais encore faut-il pouvoir s'en débarrasser après la capture afin de diminuer réellement leur nombre autour de la planète. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver un moyen de désorbiter le chasseur de débris afin de le ramener sur Terre.

Le principe de la désorbitation est le suivant : faire des tirs de freinage au péri-gée afin de réduire la vitesse du chasseur. Ces tirs auront une durée finie, de façon à optimiser la consommation d'ergol. Nous pouvons par exemple choisir une valeur de **500 secondes**. Notons que ce point (le péri-gée) sera considéré comme immobile durant la manœuvre. Après chaque tir de freinage, le chasseur changera d'orbite et celle-ci aura à chaque fois, un demi-axe moins important que celui de la précédente. Cette manœuvre sera effectuée plusieurs fois jusqu'à l'entrée du débris dans l'atmosphère terrestre où il sera consumé.





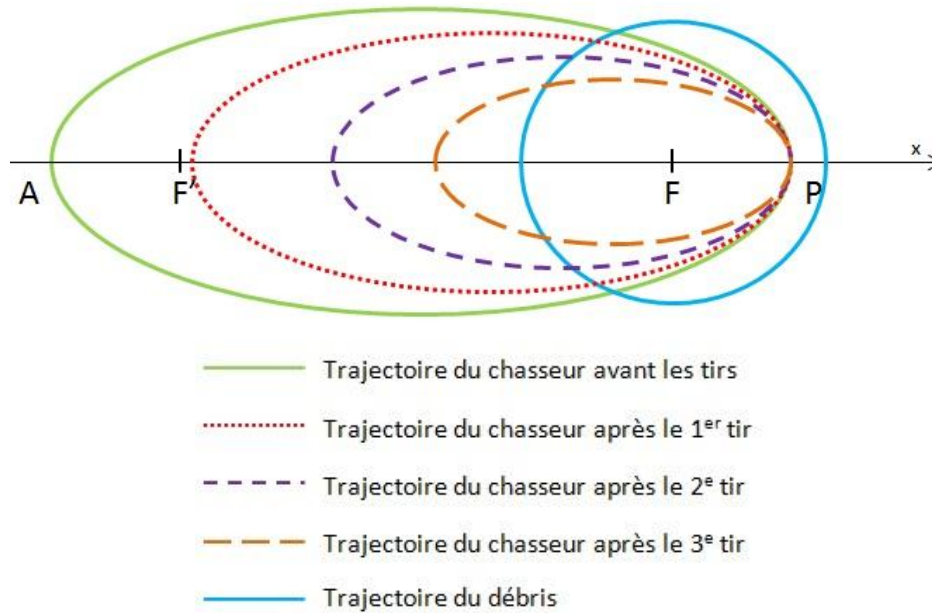


Figure 17 : schéma représentant la désorbitation

Nous avons donc appliqué ce principe à un cas précis à l'aide de calculs effectués sur Excel.

### 3.3.3.1.7. Caractéristiques du moteur

Pour la désorbitation il est nécessaire de prévoir quel type de moteur affecter au chasseur. Nous avons pensé après discussion avec notre professeur à un moteur à hydrazine (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>). En effet, l'hydrazine est un composé chimique qui peut assurer la propulsion dans le moteur sans avoir recours à de la combustion. Au moyen d'une réaction exothermique de décomposition sur un catalyseur, il permet de produire l'énergie nécessaire afin d'assurer la poussée. Nous avons donc choisi un moteur avec une poussée de 20N environ pour permettre la désorbitation.

Or notons que l' $I_{sp}$  est une caractéristique d'un moteur qui représente la poussée produite par kg d'ergols brûlés éjectés (il s'agit donc de l'impulsion spécifique) et que :

$$\text{Poussée} = Q * g_0 * I_{sp}$$

avec **Q**: débit massique

$$g_0 = 9,81 \text{ m.s}^{-1}.$$

Désirant une poussée de 20N, nous trouvons alors quel débit propulsif nous devons avoir.

Enfin il a fallu estimer la masse du moteur afin de prévoir l'énergie. Nous l'avons fixée à **50 kg**.

### 3.3.3.1.8. Nombre de tirs à effectuer pour la désorbitation

Nous avons ensuite étudié l'évolution de différents paramètres en fonction du nombre de tirs de freinage effectué. A l'aide de nos résultats, nous remarquons donc que l'altitude de l'apogée diminue au fur et à mesure des tirs. D'ailleurs, au **35<sup>ème</sup> tir** l'altitude de l'apogée





devient inférieure à celle du périgée. L'apogée sera alors à **596 km** (voir tableau de calculs 3 case M54) alors que le périgée, étant fixe, il reste à **600 km**. Nous continuons les tirs et au **50<sup>ème</sup>** tir l'apogée sera à **115 km** d'altitude. Il rentre ainsi dans l'atmosphère et commence à se consumer.

### 3.3.3.1.9. Masse d'ergol consommée

Nous pouvons donc estimer la masse d'ergol consommée lors de la désorbitation par la succession des consommations associées à chaque tir. Pour cela nous ferons la différence entre la masse initiale du chasseur et celle du chasseur au **50<sup>ème</sup>** tir.

$$\begin{aligned} \text{Masse d'ergol} &= \text{masse chasseur initiale} - \text{masse chasseur au } 50^{\text{ème}} \text{ tir} \\ &= 50 - 43,1 \\ &= 6,9 \text{ kg.} \end{aligned}$$

**6,9 kg** d'ergol auront été consommés pour la désorbitation dans ce cas précis.

### 3.3.3.2. 2<sup>ème</sup> cas : le débris est plus rapide que le chasseur

Nous allons maintenant vous présenter le 2<sup>ème</sup> cas possible. Ayant déjà déterminé toutes les formules, nous allons seulement donner nos résultats expérimentaux et leurs analyses.

#### 3.3.3.2.1. Détermination de l'orbite

Concernant l'ellipse décrivant la trajectoire du chasseur nous prendrons cette fois-ci pour l'apogée une altitude de **600 km** et le périgée une altitude de **400 km**. On obtient donc **r(A) = 6978 km** et **r(P) = 6778 km**. De plus **r<sub>débris</sub> = 6938 km**. (Voir tableau de calculs 4 : respectivement lignes 7,8 et 24)

#### 3.3.3.2.2. Détermination des vitesses de l'ellipse

Dans ce nouveau cas, nous obtenons une énergie totale **E<sub>totale</sub> = -2,90 × 10<sup>7</sup> J.kg<sup>-1</sup>** (voir tableau de calculs 4 : ligne 14 ou 15). Elle reste toujours négative, ce qui est cohérent.

Toujours à l'aide des formules stipulées précédemment, l'application numérique concernant les vitesses à l'apogée et au périgée, nous donne : **v(P) = 7724 m.s<sup>-1</sup>** et **v(A) = 7702 m.s<sup>-1</sup>** (voir tableau de calculs 4 : respectivement lignes 11 et 16) correspondant donc aux vitesses du chasseur au périgée et à l'apogée. Nos résultats sont vérifiés car sachant que **r(P) < r(A)**, la vitesse au périgée est bien plus importante que celle à l'apogée.

#### 3.3.3.2.3. Détermination de la vitesse du débris

Dans ce nouveau cas, la vitesse du débris est de **v<sub>débris</sub> = 7579 m.s<sup>-1</sup>**. (voir tableau de calculs 4 : ligne 25).



### 3.3.3.2.4. Détermination des points d'intersection

Deux points d'intersection sont de nouveau observables (voir tableau de calculs 5 : cases colorées en vert) :

- 1<sup>er</sup> point d'intersection :

$$\text{distance}_{\text{débris}/\text{Terre}} = 6938 \text{ km et } \text{distance}_{\text{ellipse}/\text{Terre}} = 6928 \text{ km}$$

- 2<sup>ème</sup> point d'intersection :

$$\text{distance}_{\text{débris}/\text{Terre}} = 6938 \text{ km et } \text{distance}_{\text{ellipse}/\text{Terre}} = 6942,3 \text{ km}$$

On remarque bien que l'écart entre ces deux distances n'étant que de quelques kilomètres (10km ou 4,3km) les angles  $\theta$  correspondants  $\theta = 120^\circ$  et  $\theta = 230^\circ$  peuvent effectivement correspondre aux deux angles des deux points d'intersection possibles.

### 3.3.3.2.5. Détermination des vitesses du débris et du chasseur aux points d'intersection

Numériquement, nous obtenons : (voir tableau de calculs 5 : respectivement cases S19, V19, S30 et V30)

- 1<sup>er</sup> point d'intersection :  $v_{\text{débris}} = 7579,9 \text{ m. s}^{-1}$  et  $v_{\text{chasseur}} = 7502,3 \text{ m. s}^{-1}$
- 2<sup>ème</sup> point d'intersection :  $v_{\text{débris}} = 7579,9 \text{ m. s}^{-1}$  et  $v_{\text{chasseur}} = 7471,6 \text{ m. s}^{-1}$

La vitesse du débris est bien légèrement plus grande que celle du chasseur. C'est donc le débris qui vient à la rencontre du chasseur.

### 3.3.3.2.6. Nombre de tirs à effectuer pour la désorbitation

Comme dans le premier cas, nous avons gardé pour masse du moteur **50 kg**. A l'aide de nos résultats, nous remarquons donc que l'altitude de l'apogée diminue toujours au fur et à mesure des tirs. D'ailleurs, au bout du **7<sup>ème</sup> tir** seulement, l'altitude de l'apogée devient inférieure à celle du périégée. L'apogée sera alors à **396,61 km** (voir tableau de calculs 6 case M26) alors que le périégée, étant fixe, il reste à **400 km**. Nous continuons les tirs et au **17<sup>ème</sup> tir** l'apogée sera à **112,01 km** d'altitude (voir tableau de calculs 6 case M36). Il rentre ainsi dans l'atmosphère et commence à se consumer.

### 3.3.3.2.7. Masse d'ergol consommée

Nous pouvons donc estimer la masse d'ergol consommée lors de la désorbitation.

$$\begin{aligned} \text{Masse d'ergol} &= \text{masse chasseur initiale} - \text{masse chasseur au } n^{\text{ème}} \text{ tir} \\ &= 50 - 47,8 \\ &= 2,2 \text{ kg.} \end{aligned}$$



2,2 kg d'ergol auront été consommés pour la désorbitation dans ce cas précis. Il est normal d'avoir besoin de moins d'ergol lorsque la vitesse du débris est plus importante que celle du chasseur, car ce dernier n'aura pas besoin d'accélérer pour l'attraper mais il n'aura qu'à l'attendre tout simplement.

Il est cependant nécessaire de préciser que toutes ces données ne tiennent pas compte des évènements inattendus pouvant perturber la capture lors du lancement et que nous nous basons uniquement sur un cas idéal.

### 3.3.4. Changement de la trajectoire du chasseur après chaque choc

L'une des perturbations que nous n'avons pas prise en compte est qu'après chaque capture, la trajectoire elliptique du chasseur est déviée. Pour mieux comprendre ce phénomène, voici un schéma qui explique ce changement :

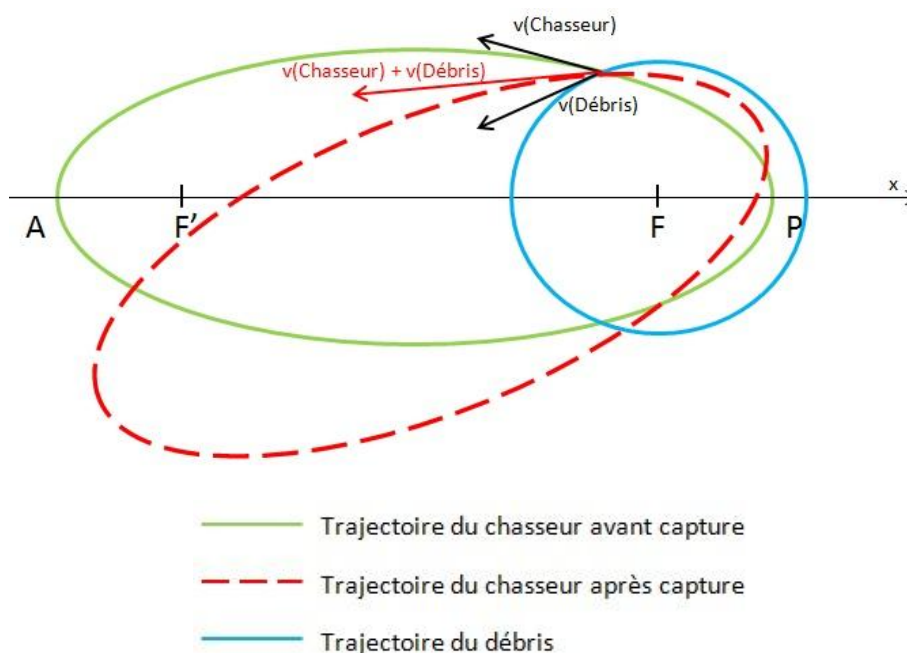


Figure 18 : changement de la trajectoire du chasseur après chaque capture

Ce phénomène s'explique mathématiquement. En effet, nous avons vu précédemment que pour tout point M appartenant à l'ellipse :  $\vec{\sigma} = \overrightarrow{FM} \wedge \overrightarrow{v(m)} = \overrightarrow{cst} = \vec{K}$ , ce qui est vrai pour le débris et pour le chasseur :

$$\vec{\sigma}_d = \text{moment cinétique du débris} = \overrightarrow{TM} \wedge \overrightarrow{v_d} \times m_d = \overrightarrow{cst}$$

Où :

- **TM** est la distance entre le centre de la Terre et le débris
- **v<sub>d</sub>** est la vitesse du débris
- **m<sub>d</sub>** est la masse du débris

$$\vec{\sigma}_c = \text{moment cinétique du chasseur} = \overrightarrow{TC} \wedge \overrightarrow{v_c} \times m_c = \overrightarrow{cst}$$

Où :

- **TC** est la distance entre le centre de la Terre et le chasseur



- $v_c$  est la vitesse du chasseur
- $m_c$  est la masse du chasseur

Avant la capture, nous savons que  $\vec{\sigma}_{\text{tot}} = \vec{\sigma}_d + \vec{\sigma}_c = \overline{\text{TM}} \wedge \overline{\text{V}}_d \times \mathbf{m}_d + \overline{\text{TC}} \wedge \overline{\text{V}}_c \times \mathbf{m}_c$ .

Après la capture, nous avons aussi que  $\vec{\sigma}_{\text{tot}} = \overline{\text{TC}} \wedge (\mathbf{m}_c + \mathbf{m}_d) \overline{\text{V}}_{\text{après capture}}$ .

Où :

- $\text{TC}$  est la distance entre le centre de la Terre et le chasseur à l'endroit de la capture
- $\overline{\text{V}}_{\text{après capture}}$  est la vitesse du chasseur après la capture
- $m_c + m_d$  est la masse du chasseur après la capture

Nous obtenons donc une égalité qui indique ce changement de "direction" de l'ellipse :

$$\overline{\text{TC}} \wedge (\mathbf{m}_c + \mathbf{m}_d) \overline{\text{V}}_{\text{après capture}} = \overline{\text{TM}} \wedge \overline{\text{V}}_d \times \mathbf{m}_d + \overline{\text{TC}} \wedge \overline{\text{V}}_c \times \mathbf{m}_c$$

De plus, nous pouvons trouver les caractéristiques de cette nouvelle ellipse grâce à l'énergie totale du chasseur. En effet, on sait que  $E_{\text{tot}} = \mathbf{m}_{\text{tot}} \left( \frac{V_{\text{après capture}}^2}{2} - \frac{\mu}{\text{TC}} \right)$  mais aussi que  $E_{\text{tot}} = -\frac{\mu}{2a}$  où  $a$  est le demi axe de la nouvelle ellipse.

Comme le moment se conserve, nous pouvons obtenir  $\overline{\text{V}}_{\text{après capture}}$ . De plus, nous connaissons l'endroit de la capture donc  $\text{TC}$  ainsi que  $E_{\text{tot}}$  grâce à notre feuille Excel. Enfin,  $\mu$  est la constante gravitationnelle géocentrique donnée. Nous pouvons alors isoler  $a$ , qui nous donnera tous les autres paramètres de la nouvelle ellipse.

#### 4. PROBLEMES RENCONTRES AU COURS DE LA REALISATION DE CE PROJET

Ce projet possède de multiples dimensions. Il nécessite des connaissances scientifiques dans de larges domaines (mathématique, physique, thermodynamique, astronomique, mécanique du point, mécanique spatiale, et même la science des matériaux) ce qui a représenté une importante difficulté car nous ne les avons pas forcément. Il a donc fallu faire beaucoup de recherches, simplement pour comprendre ce que nous devons faire.

Toutefois, la principale difficulté que nous avons rencontré est le choix des créneaux libres pour nous réunir et mettre en commun nos recherches et avancées du projet. En effet ayant tous des emplois du temps très différents les uns des autres nous n'avons trouvé qu'un seul créneau de libre, en dehors de l'heure de projet avec notre professeur (le jeudi après-midi). Nous avons tout de même essayé de régler ce problème en créant un groupe facebook et un google.docs comme énoncé précédemment afin de pouvoir travailler séparément. Mais il est clair que le travail à distance présente quelques inconvénients. En effet, il fallait être rigoureux quand au respect de la distribution de chaque tâche et même si le google.docs est muni de commentaires, c'est beaucoup plus simple de confronter ses idées en réalité que devant un ordinateur.



Nous avons également eu un peu de mal à cerner la véritable finalité de ce projet. Il était difficile d'évaluer ce que l'on attendait de nous. Fallait-il réaliser de fond en comble le chasseur de débris, ou simplement étudier quelles sont les problématiques qui s'appliquent au lancement du filet ? Ce n'est que quelques semaines avant le rendu que nous avons réussi à poser clairement les objectifs de notre projet.

Ensuite, comment aborder la masse d'information que nous avons à notre disposition et comment l'exploiter concrètement ? En effet celui-ci nécessitait beaucoup de connaissances qui, pour la plupart d'entre nous, étaient jusqu'à lors inconnues ou encore oubliées. Il a donc fallu nous y replonger afin de répondre aux différentes attentes de ce projet. Évidemment, Mr Vuillamy était là pour nous soutenir dans les recherches. Ainsi, nous avons pu surmonter la barrière des connaissances grâce à notre professeur mais aussi grâce aux livres de la bibliothèque universitaire et à internet.

Enfin, pour concevoir le prototype en CAO (Conception Assistée par Ordinateur), il a fallu attendre d'acquérir les compétences nécessaires du logiciel "Solidworks" (acquises en cours de CTI3). Ce n'est donc qu'à la fin du semestre que nous avons pu modéliser intégralement le chasseur de débris.

Ces problèmes rencontrés nous ont permis d'acquérir de la rigueur dans la gestion du temps de groupe et personnelles mais aussi dans la gestion des tâches pour être au plus efficace lors de nos réunions.



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En guise de conclusion, il est important de souligner la grande utilité d'un tel projet dans notre cursus d'ingénieurs. Une utilité visible à différents niveaux dont, bien évidemment le côté humain d'une part et le côté cognitif d'autre part. Dans un monde où le travail d'ingénieur est étroitement lié au travail de groupe, il est important de prendre part à de tels projets permettant de développer notre capacité d'entente et de coopération qui peut s'avérer décisive dans nos carrières respectives. D'autant plus qu'ici nous étions confrontés de manière frontale à un problème dont les solutions sont encore débattues par une communauté scientifique qualifiée. C'est ainsi que ce projet s'est distingué des autres projets auxquels nos études ont pu nous confronter, c'est-à-dire que d'une part nous avons dû faire face à un problème dans sa globalité, dont tous les aspects devaient rentrer en compte pour sa résolution. Ceci a mis à l'épreuve notre capacité à confronter des informations, à prendre du recul et notre capacité décisionnelle. D'autre part, nous avons l'habitude de tenter la résolution de problèmes dont l'issue était déterminée. C'est pourtant ce genre de projet qui se rapproche le plus de notre futur en tant qu'ingénieurs.

Outre son apport humain, ce projet nous a permis de mettre à l'épreuve nos connaissances acquises au préalable et les renforcer par moment. Face à un problème scientifique, nous avons été forcé de mettre en commun les outils intellectuels que nous essayons d'accumuler depuis le début de nos études. Ici ce sont surtout nos connaissances en mécanique qui ont été mises à l'épreuve en vue de l'étude des trajectoires des débris ainsi que celles des chasseurs.

Dans ce cadre, l'implication de notre professeur M Vuillamy à nos côtés pour nous recadrer et nous proposer les bonnes démarches ainsi que quelques idées novatrices, nous a permis d'accélérer notre travail afin de mener à bien notre projet. Nous avons ainsi réussi, dans la mesure de nos capacités, à proposer une solution au problème des débris spatiaux.

Pour approfondir le sujet, nous pourrions par la suite simuler l'efficacité de notre chasseur en modélisant l'ensemble des débris spatiaux, la Terre, et notre chasseur en orbite. Nous pourrions ainsi plus précisément estimer le nombre de débris que le chasseur pourrait capturer en fonction de sa surface de capture et de sa durée de vie. De plus, nous pourrions chercher à connaître le nombre de chasseur comme celui-ci à envoyer dans l'espace pour stopper l'augmentation du nombre naturel de petit débris.



## 6. BIBLIOGRAPHIE

### Liens internet :

- <http://www.universcience.tv/video-chasseur-de-debris-spatiaux-1648.html>, valide à la date du 12/04/2013
- <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/8617-gp-quel-chasseur-de-debris-pour-demain-.php>, valide à la date du 12/04/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/xdxrkn\\_chasseur-de-debris-spatiaux-jde-jui\\_tech#.Ubn4r5zKvjp](http://www.dailymotion.com/video/xdxrkn_chasseur-de-debris-spatiaux-jde-jui_tech#.Ubn4r5zKvjp), valide à la date du 12/04/2013
- <http://www.cnes-jeunes.fr/web/CNES-Jeunes-fr/8532-les-futurs-eboueurs-de-l-espace.php>, valide à la date du 12/04/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/x476uo\\_les-debris-spatiaux\\_tech#.Ubn5IJzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/x476uo_les-debris-spatiaux_tech#.Ubn5IJzKvjp), valide à la date du 25/04/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/xdxrkn\\_chasseur-de-debris-spatiaux-jde-jui\\_tech#.Ubn5TJzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/xdxrkn_chasseur-de-debris-spatiaux-jde-jui_tech#.Ubn5TJzKvjp), valide à la date du 25/04/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/xprkgc\\_debris-nettoyer-l-espace\\_tech#.Ubn5fJzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/xprkgc_debris-nettoyer-l-espace_tech#.Ubn5fJzKvjp), valide à la date du 02/05/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/x90ch8\\_encombremets-spatiaux-et-capturs\\_news#.Ubn5nZzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/x90ch8_encombremets-spatiaux-et-capturs_news#.Ubn5nZzKvjp), valide à la date du 02/05/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/xzmq71\\_350-experts-au-chevet-des-debris-spatiaux\\_tech#.Ubn52pzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/xzmq71_350-experts-au-chevet-des-debris-spatiaux_tech#.Ubn52pzKvjp), valide à la date du 09/05/2013
- [http://www.dailymotion.com/video/xw2hwl\\_a-la-poursuite-des-debris-spatiaux\\_tech#.Ubn6IJzKvjp](http://www.dailymotion.com/video/xw2hwl_a-la-poursuite-des-debris-spatiaux_tech#.Ubn6IJzKvjp), valide à la date du 09/05/2013
- <http://www.societechimiquedefrance.fr/produit-du-jour/hydrazine.html>, valide à la date du 20/05/2013
- [http://artemis.univ-mrs.fr/im2/mecaspa/COURS\\_LA/COURS01/LANCEUR1.htm](http://artemis.univ-mrs.fr/im2/mecaspa/COURS_LA/COURS01/LANCEUR1.htm), valide à la date du 20/05/2013

### Diaporamas :

- NASA, *The top 10 questions for active debris removal* de J-C.LIOU.
- ACADEMIE INTERNATIONALE D'ASTRONAUTIQUE, *Mass removal from Orbit : incentives and potential solutions* de H.KLINKRAD (ESA) et N.L.JOHNSON (NASA)





## 7. ANNEXES

### 7.1. Table des illustrations

<i>Figure 1 : partage du temps du projet.....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2 : répartition des débris selon les orbites.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 3 : évolution de la quantité de débris dans l'espace.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 4 : bras de freinage .....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 5 : voile de freinage.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 6 : l'OTV.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 7 : le câble de Kevlar.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 8 : le laser.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 9 : filet de forme conique.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 10 : filet plan.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 11 : prototype du chasseur de débris.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 12 : représentation d'une ellipse.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 13 : cas d'aucun point d'intersection.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 14 : cas d'intersections.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 15 : schéma explicatif du moment cinétique constant.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 16 : schéma représentant les positions du débris et du chasseur.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 17 : schéma représentant la désorbitation.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 18 : changement de la trajectoire du chasseur après chaque capture.....</i>	<i>21</i>





## 7.2. Tableaux de calculs

Concernant tous les tableaux de calculs, les cases coloriées en jaune représentent les données que nous pouvons modifier.

Tableau de calculs 1 : cas où le chasseur est plus rapide que le débris

Cette feuille de calcul permet de déterminer les caractéristiques de la trajectoire elliptique du chasseur et celle circulaire du débris.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	altitude apogée du chasseur (km)	1800									
2	altitude périégée du chasseur (km)	600									
3											
4	constante de gravité : $\mu$ (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	3,99E+14									
5	rayon terrestre : Rt (km)	6378									
6	accélération de la pesanteur : G0 (m/s <sup>2</sup> )	9,80665									
7	r_apogée (km)	8178									
8	r_périégée (km)	6978									
9	a_demi grand axe (km)	7578									
10	energie totale (J/kg)	-2,63E+07									
11	V_périégée (m/s)	7,8517E+03									
12	K apparaissant dans la vitesse aréolaire : produit R*Vitesse (m <sup>2</sup> /s)	5,48E+10									
13	la vitesse aréolaire depuis la vitesse aréolaire (m/s)	6699,54									
14	energie en apogée verif (J/kg)	-2,63E+07									
15	energie en périégée verif (J/kg)	-2,63E+07									
16	V_apogée (m/s)	6699,543									
17	parametre de la conique (p)	7,530E+06									
18	e, excentricité	0,079									
19	c, parametre de l'ellipse (km)	600									
20	b, demi petit axe (km)	7554,210									
21	verif r_périégée	6978									
22	e = (ra - rp)/(ra + rp)	0,079									
23	Altitude du débris (km)	1000									
24	rayon de la trajectoire du débris	7378									
25	vitesse du débris	7350,405									
26	periode de trajectoire débris	6306,774									
27	periode de trajectoire chasseur	6564,947									
28											
29											
30											
31											

Danger : est utilisé dans la feuille

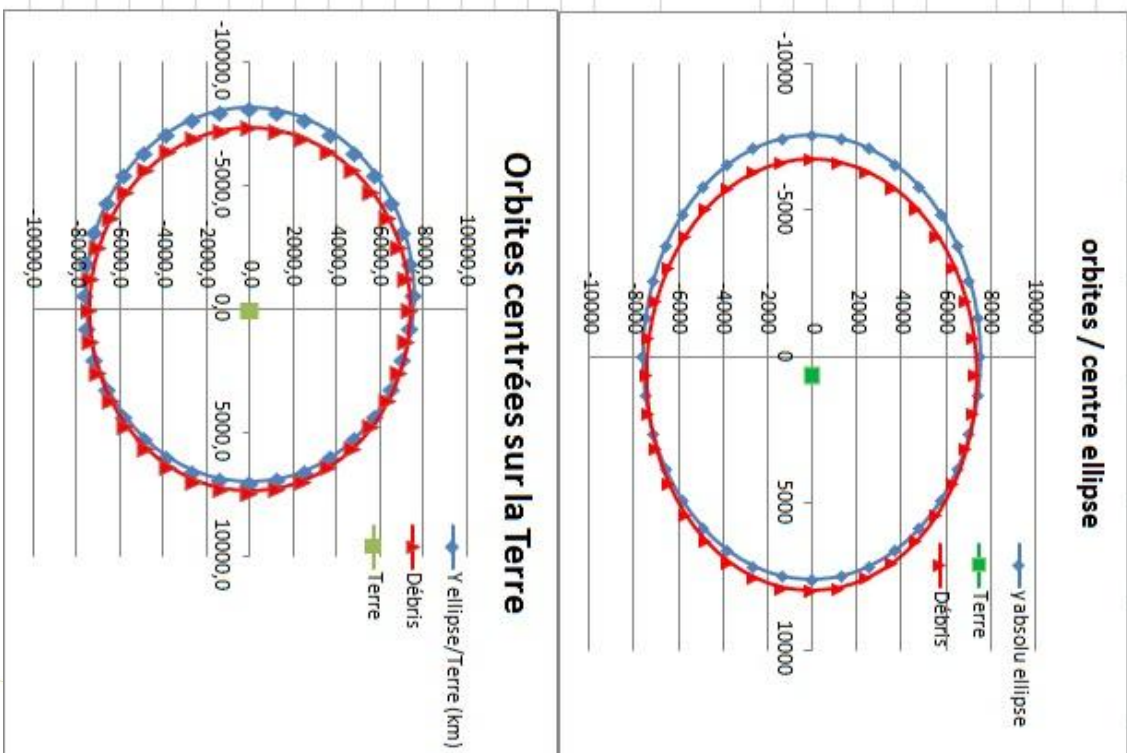


Tableau de calculs 2 : cas où le chasseur est plus rapide que le débris

Cette feuille permet de déterminer les coordonnées des points d'intersections (cases colorées en vert) entre le débris et le chasseur. Ainsi les courbes du graphique représentent leurs trajectoires et les points rouges indiquent leurs intersections.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
3	0,0792				1211,37	#####															
4	7378	Reference 1																			
5		feuille Debris																			
6																					
7	0	7578	0	600	0	0	6978,0	0,0	6978,0	0,0	7378,0	0,0	7378,0	0,0	6978,0	0,0	7350,4				
8	0,1745	7462,9	1311,8			10	7865,9	1281,2	6862,9	1311,8	7265,9	1281,2	7378,0	6987,1	-1276,4	7238,7					
9	0,3491	7121	2583,7			20	7533,1	2523,4	6521,0	2583,7	6933,1	2523,4	7378,0	7014,2	-2514,0	6907,1					
10	0,5236	6562,8	3777,1			30	6989,6	3689,0	5962,8	3777,1	6389,6	3689,0	7378,0	7058,4	-3675,2	6365,7					
11	0,6981	5805,1	4855,7			40	6251,9	4742,4	5205,1	4855,7	5651,9	4742,4	7378,0	7188,4	-4724,7	5630,8					
12	0,8727	4871,1	5786,8			50	5342,5	5651,8	4271,1	5786,8	4742,5	5651,8	7378,0	7192,3	-5630,7	4724,8					
13	1,0472	3789,1	6542,1			60	4289,1	6389,5	3189,1	6542,1	3689,1	6389,5	7378,0	7278,0	-6365,6	3675,3					
14	1,2217	2591,9	7098,6			70	3123,5	6933,0	1991,9	7098,6	2523,5	6933,0	7378,0	7372,8	-6907,1	2514,1	7558,1	#####	#####		
15	1,3962	1316	7439,4			80	1991,9	7378,0	7378,0	7439,4	1991,9	7378,0	7473,8	-7238,7	1276,5						
16	1,5708	0,1237																			
17	1,7453	-1315,8																			
18	1,9198	-2591,7																			
19	2,0944	-3788,9																			
20	2,2689	-4870,9																			
21	2,4434	-5805																			
22	2,618	-6562,6																			
23	2,7925	-7120,9																			
24	2,967	-7462,8																			
25	3,1416	-7578																			
26	3,3161	-7462,9																			
27	3,4906	-7121,1																			
28	3,6652	-6562,9																			
29	3,8397	-5805,3																			
30	4,0142	-4871,3																			
31	4,1887	-3789,3																			
32	4,3633	-2592,2																			
33	4,5378	-1316,3																			
34	4,7123	-0,3712																			
35	4,8869	1315,5																			
36	5,0614	2591,5																			
37	5,2359	3788,6																			
38	5,4105	4870,7																			
39	5,585	5804,8																			
40	5,7595	6562,5																			
41	5,9341	7120,8																			
42	6,1086	7462,8																			
43	6,2831	7578																			
44																					

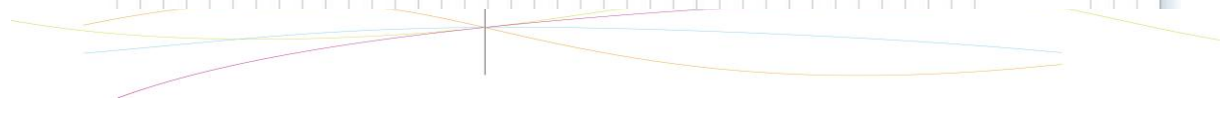
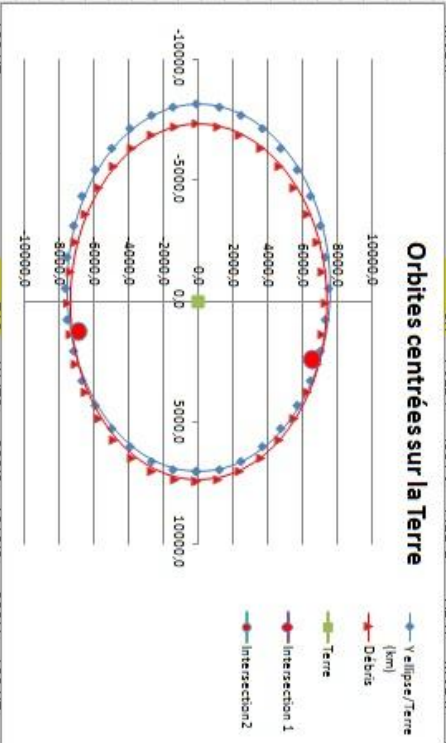




Tableau de calculs 3 : cas où le chasseur est plus rapide que le débris

Cette feuille permet de déterminer l'évolution de l'altitude de l'apogée (dernière colonne) en fonction du nombre de tir d'ergol (première colonne). Lorsque cette altitude est inférieure à 120km, cela signifie que le chasseur est entré dans l'atmosphère et va se consumer.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
	NO de tir	energie initiale (J/kg)	masse initiale du chasseur avec débris pour le tir demandé (kg)	vitesse du chasseur au moment de la rampe (m/s)	energie absorbée au freinage (J/kg)	energie finale du chasseur avec débris (J/kg)	nouvelle altitude après le tir (km)	altitude de l'apogée (km)	vitesse au moment de la rampe (m/s)	masse consommée dans le tir (kg)	validité du tir (s)	Apogée (km)	Altitude de l'apogée (km)						
19	1	-2,69E+07	5,00E+01	7851,66	#####	#####	7559,95	6978,00	7843,65	0,14	Tir péning	8141,89	1763,89						
20	2	-2,64E+07	4,99E+01	#####	#####	#####	7541,94	6978,00	7835,63	0,14	Tir péning	8105,89	1727,89						
21	3	-2,64E+07	4,97E+01	#####	#####	#####	7524,00	6978,00	7827,58	0,14	Tir péning	#####	1691,93						
22	4	-2,65E+07	4,93E+01	#####	#####	#####	7506,10	6978,00	7819,51	0,14	Tir péning	#####	1656,20						
23	5	-2,66E+07	4,94E+01	7819,51	#####	#####	7488,26	6978,00	7811,41	0,14	Tir péning	#####	1620,52						
24	6	-2,66E+07	4,93E+01	7811,41	#####	#####	7470,47	6978,00	7803,29	0,14	Tir péning	#####	1584,94						
25	7	-2,67E+07	4,92E+01	#####	#####	#####	7452,73	6978,00	7795,15	0,14	Tir péning	#####	1549,46						
26	8	-2,67E+07	4,90E+01	7795,15	#####	#####	7435,05	6978,00	7786,99	0,14	Tir péning	#####	1514,09						
27	9	-2,68E+07	4,89E+01	#####	#####	#####	7417,41	6978,00	7778,80	0,14	Tir péning	#####	1478,83						
28	10	-2,69E+07	4,87E+01	#####	#####	#####	7399,83	6978,00	7770,58	0,14	Tir péning	7821,66	1443,66						
29	11	-2,69E+07	4,86E+01	#####	#####	#####	7382,30	6978,00	7762,35	0,14	Tir péning	#####	1408,60						
30	12	-2,70E+07	4,85E+01	#####	#####	#####	7364,82	6978,00	7754,09	0,14	Tir péning	7751,64	1373,64						
31	13	-2,71E+07	4,83E+01	#####	#####	#####	7347,39	6978,00	7745,81	0,14	Tir péning	7716,78	1338,78						
32	14	-2,71E+07	4,82E+01	7745,81	#####	#####	7330,01	6978,00	7737,50	0,14	Tir péning	#####	1304,02						
33	15	-2,72E+07	4,80E+01	#####	#####	#####	7312,68	6978,00	7729,16	0,14	Tir péning	#####	1269,36						
34	16	-2,73E+07	4,79E+01	7729,16	#####	#####	7295,17	6978,00	7720,81	0,14	Tir péning	7612,80	1234,80						
35	17	-2,73E+07	4,78E+01	7720,81	#####	#####	7278,43	6978,00	7712,43	0,14	Tir péning	#####	1200,34						
36	18	-2,74E+07	4,76E+01	#####	#####	#####	7260,99	6978,00	7704,02	0,14	Tir péning	#####	1165,98						
37	19	-2,74E+07	4,75E+01	#####	#####	#####	7243,86	6978,00	7695,59	0,14	Tir péning	#####	1131,72						
38	20	-2,75E+07	4,73E+01	#####	#####	#####	7226,77	6978,00	7687,13	0,14	Tir péning	7441,48	1093,48						
39	21	-2,75E+07	4,72E+01	7687,13	#####	#####	7209,75	6978,00	7678,65	0,14	Tir péning	7407,51	1029,51						
40	22	-2,76E+07	4,70E+01	#####	#####	#####	7192,75	6978,00	7670,14	0,14	Tir péning	#####	995,63						
41	23	-2,77E+07	4,69E+01	7670,14	#####	#####	7175,82	6978,00	7661,61	0,14	Tir péning	#####	961,85						
42	24	-2,78E+07	4,68E+01	7661,61	#####	#####	7158,93	6978,00	7653,05	0,14	Tir péning	7306,17	928,17						
43	25	-2,78E+07	4,68E+01	7661,61	#####	#####	7142,08	6978,00	7644,47	0,14	Tir péning	#####	894,58						
44	26	-2,79E+07	4,68E+01	#####	#####	#####	7125,29	6978,00	7635,86	0,14	Tir péning	#####	861,08						
45	27	-2,80E+07	4,63E+01	#####	#####	#####	7108,54	6978,00	7627,23	0,14	Tir péning	7172,37	794,37						
46	28	-2,80E+07	4,62E+01	7618,56	#####	#####	7091,84	6978,00	7618,56	0,14	Tir péning	#####	827,68						
47	29	-2,81E+07	4,61E+01	7618,56	#####	#####	7075,18	6978,00	7609,87	0,14	Tir péning	7172,37	794,37						
48	30	-2,82E+07	4,59E+01	#####	#####	#####	7058,57	6978,00	7601,16	0,14	Tir péning	7139,15	761,15						
49	31	-2,82E+07	4,58E+01	7601,16	#####	#####	7042,01	6978,00	7592,42	0,14	Tir péning	7106,02	728,02						
50	32	-2,83E+07	4,56E+01	#####	#####	#####	7025,50	6978,00	7583,65	0,14	Tir péning	#####	694,99						
51	33	-2,84E+07	4,55E+01	#####	#####	#####	7009,02	6978,00	7574,85	0,14	Tir péning	#####	662,05						
52	34	-2,84E+07	4,54E+01	#####	#####	#####	6992,60	6978,00	7566,03	0,14	Tir péning	#####	629,20						
53	35	-2,85E+07	4,52E+01	#####	#####	#####	6976,22	6978,00	7557,18	0,14	Tir apog	#####	596,44						
54	36	-2,86E+07	4,51E+01	7557,18	#####	#####	6959,88	6978,00	7548,30	0,14	Tir apog	6941,76	563,76						
55	37	-2,86E+07	4,49E+01	#####	#####	#####	6943,59	6978,00	7539,39	0,14	Tir apog	6909,18	531,18						
56	38	-2,87E+07	4,47E+01	#####	#####	#####	6927,34	6978,00	7530,46	0,14	Tir apog	#####	498,69						
57	39	-2,88E+07	4,47E+01	#####	#####	#####	6911,14	6978,00	7521,50	0,14	Tir apog	#####	466,28						
58	40	-2,88E+07	4,45E+01	7521,50	#####	#####	6894,98	6978,00	7512,50	0,14	Tir apog	6871,97	433,97						

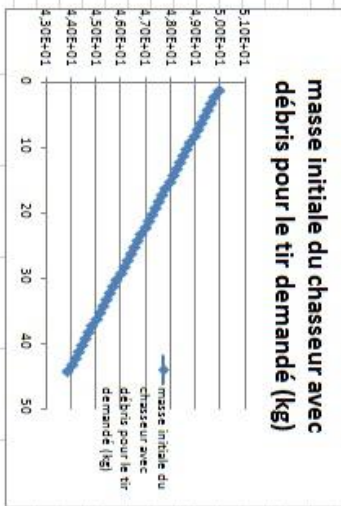
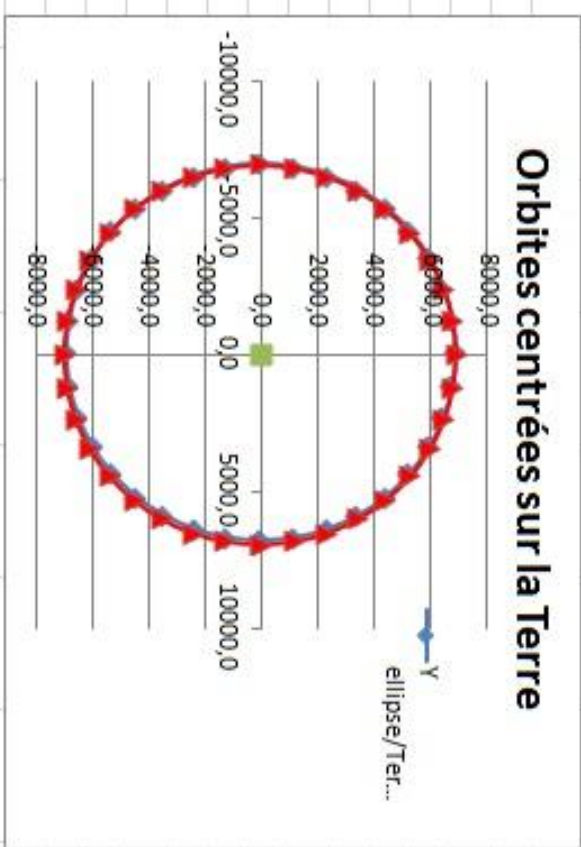
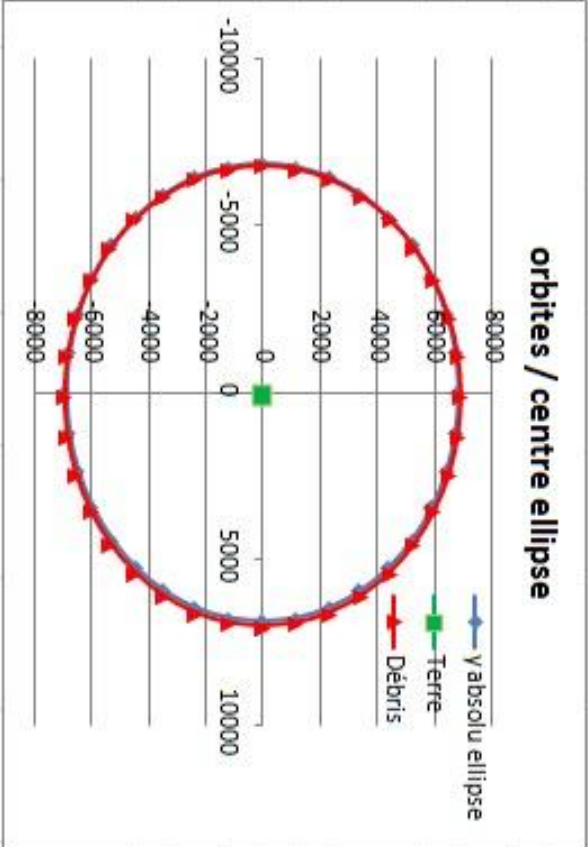


Tableau de calculs 4 : cas où le débris est plus rapide que le chasseur

Cette feuille de calcul permet de déterminer les caractéristiques de la trajectoire elliptique du chasseur de débris et celle circulaire du débris.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	altitude apogée du chasseur (km)	600							
2	altitude périégée du chasseur (km)	400							
3									
4	constante de gravité : mu (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	3,99E+14							
5	rayon terrestre : Rt (km)	6378							
6	accélération de la pesanteur : G0 (m/s <sup>2</sup> )	9,80665							
7	r_apogée (km)	6978							
8	r_périégée (km)	6778							
9	a, demi grand axe (km)	6878							
10	energie totale (J/kg)	-2,90E+07							
11	V_périégée (m/s)	7,7244E+03							
12	K apparaissant dans la vitesse aréolaire : produit R*Vitesse (m <sup>2</sup> /s)	5,24E+10							
13	vitesse à l'apogée depuis la vitesse aréolaire (m/s)	7503,00							
14	energie en apogée venif (J/kg)	-2,90E+07							
15	energie en périégée venif (J/kg)	-2,90E+07							
16	V_apogée (m/s)	7502,997							
17	parametre de la conique (p)	6,877E+06							
18	e, excentricité	0,015							
19	c, parametre de l'ellipse (km)	100							
20	b, demi petit axe (km)	6877,273							
21	venif r_périégée	6778							
22	e = (ra -rp)/(ra +rp)	0,015							
23	Altitude du débris (km)	560							
24	rayon de la trajectoire du débris	6938							
25	vitesse du débris	7579,899							
26	periode de trajectoire débris	5751,098							
27	periode de trajectoire chasseur	5676,656							





**Tableau de calculs 5 : cas où le débris est plus rapide que le chasseur**

Cette feuille permet de déterminer les coordonnées des points d'intersections (cases colorées en vert) entre le débris et le chasseur. Ainsi les courbes du graphique représentent leurs trajectoires et les points rouges indiquent leurs intersections.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
	teta ellipse	teta ellipse	x absolu ellipse	y absolu ellipse	Xterre	Yterre	teta debris	teta debris	X absolu debris	Y absolu debris	X ellipse/Terre	Y ellipse/Terre	X debris/Terre	Y debris/Terre	verif distance debris/Terre	distance ellipse/Terre	Vx debris (m/s)	Vy debris (m/s)	Vx debris (m/s)	Vy debris (m/s)	Vx chasseur (m/s)	Vy chasseur (m/s)
7	0	0	6878	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6938,0	6778,0	0,0	7579,9				
8	10	0,174531	6773,51	1194,214			10	10	3856,9	5856,9	5856,9	5856,9	5856,9	5856,9	6938,0	6779,5	-1316,2	7464,7				
9	20	0,349062	6463,214	2352,142			20	20	4090,9	4090,9	4090,9	4090,9	4090,9	4090,9	6938,0	6794,0	-2592,5	7122,8				
10	30	0,523593	5956,541	3438,604			30	30	2090,9	2090,9	2090,9	2090,9	2090,9	2090,9	6938,0	6791,4	-3789,9	6564,4				
11	40	0,698124	5268,886	4420,588			40	40	990,9	990,9	990,9	990,9	990,9	990,9	6938,0	6801,4	-4872,2	5806,6				
12	50	0,872656	4421,141	5268,257			50	50	0	0	0	0	0	0	6938,0	6813,7	-5806,5	4872,3				
13	60	1,047187	3439,065	5955,856			60	60	-1000,0	-1000,0	-1000,0	-1000,0	-1000,0	-1000,0	6938,0	6828,0	-6564,3	3790,0				
14	70	1,221718	2352,497	6462,493			70	70	-2090,9	-2090,9	-2090,9	-2090,9	-2090,9	-2090,9	6938,0	6843,8	-7122,7	2592,6				
15	80	1,396249	1194,45	6772,774			80	80	-3090,9	-3090,9	-3090,9	-3090,9	-3090,9	-3090,9	6938,0	6860,6	-7464,7	1316,3				
16	90	1,57078	0,112296	6872,273			90	90	-4090,9	-4090,9	-4090,9	-4090,9	-4090,9	-4090,9	6938,0	6878,0	-7579,9	0,1				
17	100	1,745311	-1194,23	6772,813			100	100	-5090,9	-5090,9	-5090,9	-5090,9	-5090,9	-5090,9	6938,0	6895,4	-7464,8	-1316,1				
18	110	1,919842	-2352,29	6462,57			110	110	-6090,9	-6090,9	-6090,9	-6090,9	-6090,9	-6090,9	6938,0	6912,2	-7122,8	-2592,3				
19	120	2,094373	-3438,87	5955,968			120	120	-7090,9	-7090,9	-7090,9	-7090,9	-7090,9	-7090,9	6938,0	6928,0	-6564,5	-3789,8				
20	130	2,268904	-4420,97	5268,401			130	130	-8090,9	-8090,9	-8090,9	-8090,9	-8090,9	-8090,9	6938,0	6942,3	-5806,7	-4872,1				
21	140	2,443436	-5268,74	4420,76			140	140	-9090,9	-9090,9	-9090,9	-9090,9	-9090,9	-9090,9	6938,0	6954,6	-4872,4	-5806,4				
22	150	2,617967	-5956,43	3438,799			150	150	-10090,9	-10090,9	-10090,9	-10090,9	-10090,9	-10090,9	6938,0	6964,6	-3790,1	-6564,3				
23	160	2,792498	-6463,14	2352,333			160	160	-11090,9	-11090,9	-11090,9	-11090,9	-11090,9	-11090,9	6938,0	6972,0	-2592,7	-7122,7				
24	170	2,967029	-6773,47	1194,435			170	170	-12090,9	-12090,9	-12090,9	-12090,9	-12090,9	-12090,9	6938,0	6976,5	-1316,5	-7464,7				
25	180	3,14156	-6878	0,224568			180	180	-13090,9	-13090,9	-13090,9	-13090,9	-13090,9	-13090,9	6938,0	6978,0	-0,2	-7579,9				
26	190	3,316091	-6773,55	-1193,99			190	190	-14090,9	-14090,9	-14090,9	-14090,9	-14090,9	-14090,9	6938,0	6976,5	1316,0	-7464,8				
27	200	3,490622	-6463,29	-2351,99			200	200	-15090,9	-15090,9	-15090,9	-15090,9	-15090,9	-15090,9	6938,0	6972,0	2592,2	-7122,9				
28	210	3,665153	-5956,65	-3438,41			210	210	-16090,9	-16090,9	-16090,9	-16090,9	-16090,9	-16090,9	6938,0	6964,6	3789,7	-6564,5				
29	220	3,839684	-5269,03	-4420,42			220	220	-17090,9	-17090,9	-17090,9	-17090,9	-17090,9	-17090,9	6938,0	6954,6	4872,0	-5806,7				
30	230	4,014216	-4421,31	-5268,11			230	230	-18090,9	-18090,9	-18090,9	-18090,9	-18090,9	-18090,9	6938,0	6942,3	5806,3	-4872,5				
31	240	4,188747	-3439,26	-5955,74			240	240	-19090,9	-19090,9	-19090,9	-19090,9	-19090,9	-19090,9	6938,0	6928,0	6564,2	-3790,2				
32	250	4,363278	-2352,71	-6462,42			250	250	-20090,9	-20090,9	-20090,9	-20090,9	-20090,9	-20090,9	6938,0	6912,2	7122,7	-2592,8				
33	260	4,537809	-1194,67	-6772,74			260	260	-21090,9	-21090,9	-21090,9	-21090,9	-21090,9	-21090,9	6938,0	6895,4	7464,7	-1316,6				
34	270	4,71234	-0,33689	-6872,27			270	270	-22090,9	-22090,9	-22090,9	-22090,9	-22090,9	-22090,9	6938,0	6880,6	7579,9	-0,4				
35	280	4,886871	1194,008	-6772,85			280	280	-23090,9	-23090,9	-23090,9	-23090,9	-23090,9	-23090,9	6938,0	6860,6	7464,8	1315,9				
36	290	5,061402	2352,075	-6462,65			290	290	-24090,9	-24090,9	-24090,9	-24090,9	-24090,9	-24090,9	6938,0	6843,8	7122,9	2592,1				
37	300	5,235933	3438,676	-5956,08			300	300	-25090,9	-25090,9	-25090,9	-25090,9	-25090,9	-25090,9	6938,0	6828,0	6564,6	3789,6				
38	310	5,410464	4420,797	-5268,55			310	310	-26090,9	-26090,9	-26090,9	-26090,9	-26090,9	-26090,9	6938,0	6813,7	5806,8	4871,9				

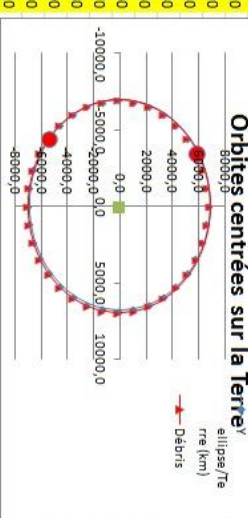


Tableau de calculs 6 : cas où le débris est plus rapide que le chasseur

Cette feuille permet de déterminer l'évolution de l'altitude de l'apogée (dernière colonne) en fonction du nombre de tir d'ergol (première colonne). Lorsque cette altitude est inférieure à 120km, cela signifie que le chasseur est entré dans l'atmosphère et va se consumer.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
19	NO de tir	energie initiale (J/kg)	masse initiale du chasseur avec débris pour le tir (kg)	vitesse du chasse pèriegee (m/s)	ènergie absorbèe au freinage, ramenèe au Kg (J/kg)	ènergie finale du chasseur avec les débris (J/kg)	nouvea u demi grand axe après le tir (km)	↳ pèriegee (km)	nouvelle vitesse au pèriegee après le tir (m/s)	mass e consommèe dans le tir (kg)	validitè du tir ou pèriegee (km)	Apogèe (km)	Altitude de l'apogèe (km)
20	1	-2,90E+07	5,00E+01	#####	6,18E+04	#####	6863,36	6778,00	7716,39	0,14	Tir pèriegee	#####	570,73
21	2	-2,90E+07	4,99E+01	7716,39	6,19E+04	#####	6848,76	6778,00	7708,36	0,14	Tir pèriegee	6919,53	541,53
22	3	-2,91E+07	4,97E+01	#####	6,20E+04	#####	6834,20	6778,00	7700,31	0,14	Tir pèriegee	#####	512,40
23	4	-2,92E+07	4,96E+01	7700,31	6,21E+04	#####	6819,67	6778,00	7692,24	0,14	Tir pèriegee	6861,35	483,35
24	5	-2,92E+07	4,94E+01	#####	6,22E+04	#####	6805,18	6778,00	7684,14	0,14	Tir pèriegee	#####	454,36
25	6	-2,93E+07	4,93E+01	7684,14	6,23E+04	#####	6790,72	6778,00	7676,02	0,14	Tir pèriegee	#####	425,45
26	7	-2,94E+07	4,92E+01	#####	6,25E+04	#####	6776,30	6778,00	7667,88	0,14	Tir pèriegee	6774,61	396,61
27	8	-2,94E+07	4,90E+01	#####	6,26E+04	#####	6761,92	6778,00	7659,72	0,14	Tir pèriegee	#####	367,84
28	9	-2,95E+07	4,89E+01	#####	6,27E+04	#####	6747,57	6778,00	7651,53	0,14	Tir pèriegee	6717,13	339,13
29	10	-2,95E+07	4,87E+01	7651,53	6,28E+04	#####	6733,25	6778,00	7643,32	0,14	Tir pèriegee	#####	310,50
30	11	-2,96E+07	4,86E+01	#####	6,29E+04	#####	6718,97	6778,00	7635,08	0,14	Tir pèriegee	#####	281,94
31	12	-2,97E+07	4,85E+01	#####	6,30E+04	#####	6704,72	6778,00	7626,82	0,14	Tir pèriegee	6631,45	253,45
32	13	-2,97E+07	4,83E+01	#####	6,31E+04	#####	6690,51	6778,00	7618,54	0,14	Tir pèriegee	#####	225,03
33	14	-2,98E+07	4,82E+01	7618,54	6,33E+04	#####	6676,33	6778,00	7610,23	0,14	Tir pèriegee	#####	196,67
34	15	-2,99E+07	4,80E+01	7610,23	6,34E+04	#####	6662,19	6778,00	7601,90	0,14	Tir pèriegee	#####	168,38
35	16	-2,99E+07	4,79E+01	7601,90	6,35E+04	#####	6648,08	6778,00	7593,54	0,14	Tir pèriegee	6518,16	140,16
36	17	-3,00E+07	4,78E+01	#####	6,36E+04	#####	6634,01	6778,00	7585,16	0,14	Tir pèriegee	6490,01	112,01
37	18	-3,00E+07	4,76E+01	7585,16	6,37E+04	#####	6619,96	6778,00	7576,75	0,14	Tir pèriegee	6461,93	83,93
38	19	-3,01E+07	4,75E+	#####	6,38E+04	#####	6605,91	6778,00	7568,34	0,14	Tir pèriegee	6433,91	55,91
39	20	-3,02E+07	4,73E+	#####	6,39E+04	#####	6591,86	6778,00	7559,93	0,14	Tir pèriegee	6405,93	27,96
40	21	-3,02E+07	4,72E+	#####	6,40E+04	#####	6577,81	6778,00	7551,52	0,14	Tir pèriegee	6377,96	0,08
41	22	-3,03E+07	4,70E+	#####	6,41E+04	#####	6563,76	6778,00	7543,11	0,14	Tir pèriegee	6349,99	-27,74
42	23	-3,04E+07	4,69E+	5,10E+01	6,42E+04	#####	6549,71	6778,00	7534,70	0,14	Tir pèriegee	6322,51	-55,49
43	24	-3,04E+07	4,68E+	5,00E+01	6,43E+04	#####	6535,66	6778,00	7526,29	0,14	Tir pèriegee	6295,03	-83,18
44	25	-3,05E+07	4,66E+	4,90E+01	6,44E+04	#####	6521,61	6778,00	7517,88	0,14	Tir pèriegee	6267,46	-110,80
45	26	-3,06E+07	4,65E+	4,80E+01	6,45E+04	#####	6507,56	6778,00	7509,47	0,14	Tir pèriegee	6239,89	-138,36
46	27	-3,06E+07	4,63E+	4,70E+01	6,46E+04	#####	6493,51	6778,00	7501,06	0,14	Tir pèriegee	6212,32	-165,85
47	28	-3,07E+07	4,62E+	4,60E+01	6,47E+04	#####	6479,46	6778,00	7492,65	0,14	Tir pèriegee	6184,72	-193,28
48	29	-3,08E+07	4,61E+	4,50E+01	6,48E+04	#####	6465,41	6778,00	7484,24	0,14	Tir pèriegee	6157,13	-220,64
49	30	-3,08E+07	4,59E+	4,40E+01	6,49E+04	#####	6451,36	6778,00	7475,83	0,14	Tir pèriegee	6130,06	-247,94
50	31	-3,09E+07	4,58E+	4,30E+01	6,50E+04	#####	6437,31	6778,00	7467,42	0,14	Tir pèriegee	6102,82	-275,18
51	32	-3,09E+07	4,56E+	#####	6,51E+04	#####	6423,26	6778,00	7459,01	0,14	Tir pèriegee	6075,63	-302,35
52	33	-3,10E+07	4,55E+	#####	6,52E+04	#####	6409,21	6778,00	7450,60	0,14	Tir pèriegee	6048,43	-329,46
53	34	-3,11E+07	4,54E+01	#####	6,53E+04	#####	6395,16	6778,00	7442,19	0,14	Tir pèriegee	6021,24	-356,51

