

# AVEC NOS ÉLÈVES

## Comment détourner un astéroïde et, à toutes fins utiles, sauver le monde ?

Floriane Michel, enseignante de physique chimie au lycée La Pléiade (38).

*Que faire si un astéroïde dit géocroiseur présentait un véritable danger pour notre planète ? Depuis 2013 un groupe de scientifiques, mais aussi de juristes, de sociologues se réunissent tous les deux ans pour envisager tous les scénarios possibles et les diverses solutions les plus adaptées à chaque cas.*

Le premier pas sur la Lune fut l'objet de beaucoup d'émerveillements mais eut également un intérêt moins connu : découvrir que les cratères circulaires de la Lune ne provenaient pas d'une activité volcanique mais bien d'impacts d'astéroïdes, mettant ainsi à jour la vulnérabilité de notre planète bleue. Si depuis cette époque, les scientifiques furent actifs sur le sujet, il faudra attendre plusieurs dizaines d'années et notamment l'observation de la comète Shoemaker-Levy 9 s'enfonçant dans la surface gazeuse de Jupiter pour que les politiques prennent conscience du problème.

Plusieurs échelles de dangerosité des astéroïdes furent alors créées. Leurs caractéristiques telles que la masse ou l'envergure furent alors couplées à la probabilité d'un impact pour classer les risques encourus par la Terre. Une collision avec un astéroïde même de quelques mètres peut provoquer de gros dégâts à l'échelle d'une ville ; au-dessus d'une centaine de mètre d'envergure, les conséquences seront mondiales. Pour se préparer à cette éventualité, un groupe de scientifiques, mais aussi de juristes, sociologues et autres corps de métiers se regroupent tous les deux ans depuis 2013 pour participer à la « Planetary Defense Conference ». Un scénario fictif est alors proposé, comme un jeu de rôle, et les participants du monde entier tentent de se coordonner pour qu'il y ait le moins de dégâts possible. L'objectif est d'anticiper les obstacles techniques mais aussi politiques de la mise en place d'une réaction mondiale coordonnée.

### Une déviation le plus tôt possible

La détection des astéroïdes le plus tôt possible est un enjeu majeur de la prévention des impacts. Agir plus tôt permet de réduire l'intensité de la déviation nécessaire à imposer à un astéroïde et de la rendre ainsi techniquement plus accessible.

Pour bien comprendre, il est important d'avoir des ordres de grandeur en tête. Un astéroïde tel

qu'Apophis qui mesure 330 m d'envergure pourrait être dévié suffisamment pour éviter un impact par un satellite d'une tonne (5 fois moins lourd qu'un étage d'Ariane 5). Cependant, cela n'est le cas que si cette déviation est réalisée au moins une dizaine d'années en amont de la catastrophe. En effet, l'idée n'est pas tant de dévier les astéroïdes que de retarder leur passage au point d'impact. Une accélération imposée au corps céleste à l'aphélie de son orbite elliptique autour du Soleil engendrera une petite modification de sa vitesse et de sa trajectoire mais surtout un allongement de sa période. L'astéroïde mettant plus de temps pour parcourir son orbite, il arrivera « en retard » au niveau du point d'impact. Si sa période est modifiée très légèrement mais plusieurs révolutions avant la collision, ce retard sera alors multiplié d'autant, réduisant ainsi la probabilité d'une collision.

À l'inverse, si nous ne disposons que d'une orbite avant la date supposée de l'impact, il faut imposer une modification de la période bien plus conséquente. Apophis a une période orbitale de 0,89 an soit environ un an. Si une modification de sa période orbitale de cent secondes est opérée dix ans en avance, le retard cumulé sera donc multiplié par dix avant l'impact, soit mille secondes de différence, ce qui, à la vitesse de déplacement de la Terre (30 km/s) peut faire une grande différence. Si cette même modification est réalisée seulement deux ans avant l'impact, alors le retard de l'astéroïde ne sera que de 200 secondes. Il faudrait donc que la déviation soit plus forte pour atteindre les mille secondes nécessaires et les contraintes techniques plus grandes.

Dans leur arsenal, les scientifiques possèdent en particulier trois techniques complémentaires qui permettent de dévier un astéroïde, chacune plus ou moins adaptée en fonction de sa taille mais également du temps disponible pour agir.

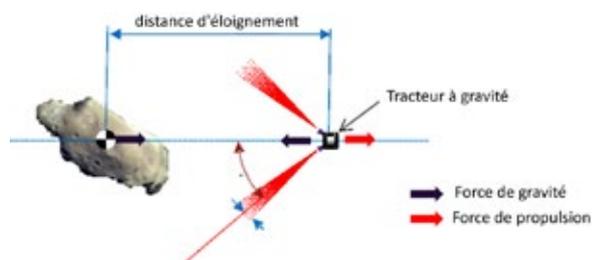
## L'explosion nucléaire

La technique la plus spectaculaire et favorite des films d'action est l'explosion nucléaire. Celle-ci est surtout envisagée pour les astéroïdes de plus d'un kilomètre d'envergure. L'idée première est d'envoyer une charge explosive à la rencontre de l'astéroïde et de le pulvériser en petits morceaux. Un des risques cependant est qu'un ou plusieurs débris soit suffisamment gros pour ne pas être détruit par l'atmosphère et engendrer des dégâts sur Terre. Une variante possible est de faire exploser la charge nucléaire à proximité mais sans toucher l'astéroïde. Le souffle généré par l'explosion pourra alors le dévier suffisamment pour qu'il évite la Terre. L'avancement du savoir sur ce sujet pose cependant question du fait qu'on utilise des charges nucléaires et qu'il serait inconvenant qu'elles tombent dans de mauvaises mains.

Cette technique est également la moins susceptible d'être utilisée à court terme en particulier en raison de l'absence de contrôle sur de nombreux paramètres qui sont difficilement modélisables. De plus, depuis 1998, la NASA a recensé la grande majorité des astéroïdes géocroiseurs de plus d'un kilomètre d'envergure qui seraient susceptibles de couper l'orbite terrestre dans le siècle à venir et sur lesquels cette technique serait la plus efficace. Les astéroïdes de moins d'un kilomètre d'envergure sont ceux qui nous posent le plus de problèmes. En plus d'être plus difficilement détectables, certains peuvent cependant générer des dégâts à l'échelle mondiale. En fonction du temps disponible avant la collision, une des deux techniques suivantes peut être utilisées.

## Attracteur gravitationnel

L'objectif de cette technique est d'envoyer un satellite à la rencontre de l'astéroïde. Il se placera alors assez proche de celui-ci (de l'ordre de 200 m environ) et de ce fait, sera lié à lui grâce à la gravité. Les propulseurs du satellite pourront alors générer des impulsions et ainsi lentement dévier l'astéroïde dans la direction voulue.



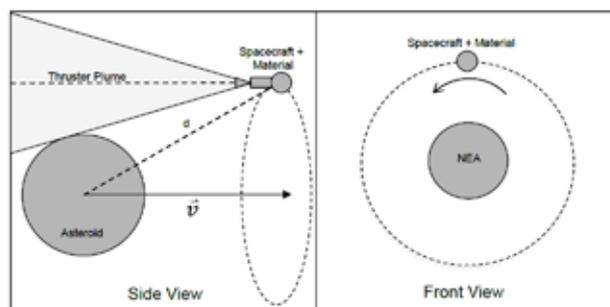
**Fig.1.** Principe d'un attracteur gravitationnel  
(d'après C. Foster, J. Bellerose, D. Mauro, B. Jaroux).

Dans le cas où le satellite est placé devant l'astéroïde, si les gaz sont éjectés dans la direction de celui-ci, ils

le repousseront, ayant ainsi un effet contraire à celui recherché. Il est alors envisagé de diriger les tuyères avec un angle d'une cinquantaine de degrés de façon à éviter l'astéroïde.

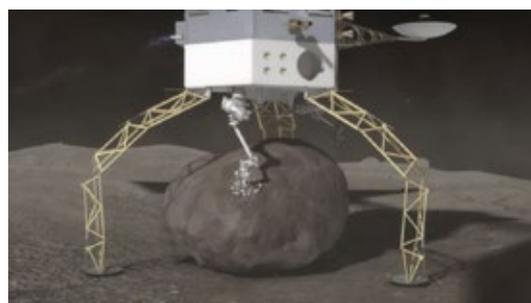
L'inconvénient est qu'une partie de la force de propulsion est perdue car elle a une composante perpendiculaire à la direction de la déviation.

Les scientifiques ont alors envisagé de mettre le satellite en orbite autour de l'astéroïde. De cette manière, les gaz ne sont pas projetés sur l'astéroïde.



**Fig.2.** La méthode de tractage en spirale  
(crédits : D. D. Mazanek, D. M. Reeves, J. B. Hopkins, D. W. Wade, M. Tantardini, H. Shen).

Un paramètre essentiel à prendre en compte pour que cette technique soit efficace est la masse du satellite. Plus celle-ci est grande, plus elle aura la capacité de tirer « fort » l'astéroïde. Plusieurs approches ont été envisagées pour rendre l'attraction la plus forte possible comme par exemple placer plusieurs satellites sur l'orbite, ou sur plusieurs orbites afin d'obtenir une masse cumulée plus grande. Une autre méthode est que le satellite puisse se poser sur l'astéroïde et y ramasser une ou plusieurs roches.



(Crédit : NASA/AMA, Inc.)

**Fig.3.** Système de capture en opération.

Un inconvénient cependant est que si la force exercée sur l'astéroïde est plus grande, la force exercée par celui-ci sur le satellite est également plus grande. Le satellite est alors obligé d'utiliser plus de carburant que si sa masse était plus faible pour rester à distance constante de l'astéroïde, ce qui dans certains cas, peut également être contreproductif. Cette technique a donc des avantages pour des astéroïdes de l'ordre de 100 à 300 m d'envergure. Au-delà de 300 m, le temps gagné en augmentant la masse du satellite est faible et donc peu rentable.

## Impacteur cinétique

Cette technique consiste à envoyer un satellite, appelé impacteur, s'écraser sur l'astéroïde à une vitesse suffisamment grande (de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de km/h) pour le dévier. Une première mission de reconnaissance est absolument nécessaire pour connaître précisément sa forme et sa composition. Si l'astéroïde a une structure type « éponge », le choc n'aura pas le même effet que s'il s'agit de roches ou de glace. Dans ce dernier cas, les chances de réussites sont d'autant meilleures que l'impact peut également générer des expulsions de roches qui, grâce à la conservation de la quantité de mouvement, pourront jusqu'à doubler voire tripler la déviation de l'astéroïde. Le point d'impact du satellite doit être très bien défini et atteint avec une précision de l'ordre du mètre. Dans le cas contraire, la collision pourrait induire des mouvements de rotation de l'astéroïde sur lui-même et diminuer la déviation souhaitée.

Une mission de ce type appelé Deep Impact a été menée par la NASA en 2005. L'objectif était de lancer un impacteur de 372 kg sur la comète Tempel 1 à une vitesse de 10,2 km/s (avec une énergie équivalente à 4,8 tonnes de TNT) afin de créer un cratère et de pouvoir étudier le cœur de la comète. Il en a résulté une déviation de la comète en modifiant sa vitesse à l'aphélie de 0,000 1 mm/s.

Pour faire des tests, la NASA et l'ESA se sont accordés pour monter une mission double nommée AIDA (Asteroid Impact & Deflection Assessment). Celle-ci sera réalisée grâce à deux satellites, Dart et Hera. Dart, l'impacteur qui ira s'écraser sur l'astéroïde est fabriqué par la NASA. La cible est un astéroïde double, Didymos (800 m de diamètre) et sa petite « lune » surnommé Didymoon (160 m de diamètre). L'objectif est de taper sur la petite lune et d'en modifier la trajectoire autour de son corps central.

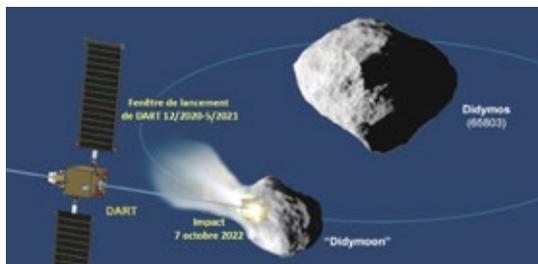


Fig.4. Déroulement de l'impact de DART sur Didymoon.

Il a été choisi de réaliser un impact sur un objet plus lent relativement à son corps central qu'un astéroïde autour du Soleil pour que la perturbation soit plus visible et donc plus facilement mesurable. Une variation de 6 mm/s est faible sur un astéroïde qui va à 30 km/s alors qu'elle augmentera la période

de rotation de Didymoon de 7 min soit de 1 %. Ce travail de mesure de l'effet de l'impact de DART sera réalisé par Hera, l'orbiteur fabriqué par l'ESA. Grâce à un radar, ce satellite permettra également d'étudier la structure interne de l'astéroïde. Le lancement de Dart est prévu pour 2022 et celui d'Hera pour 2026.

## Bilan

Toutes ces techniques sont complémentaires et leur utilisation dépend de la masse de l'astéroïde, de sa structure et du temps à notre disposition pour le dévier. Sur la figure ci-dessous, il est possible de retrouver les conditions les plus favorables pour chaque technique : l'explosion nucléaire pour les astéroïdes les plus grands, le tracteur gravitationnel pour ceux détectés le plus longtemps en avance...

D'autres méthodes sont à l'étude telles que la modification de l'effet Yarkovsky (force résultante de l'écart entre absorption solaire et émission thermique par rayonnement, il faudrait peindre l'astéroïde en blanc par exemple ?) ou bien la possibilité d'éjecter de la masse des astéroïdes grâce à des satellites posés sur leur surface.

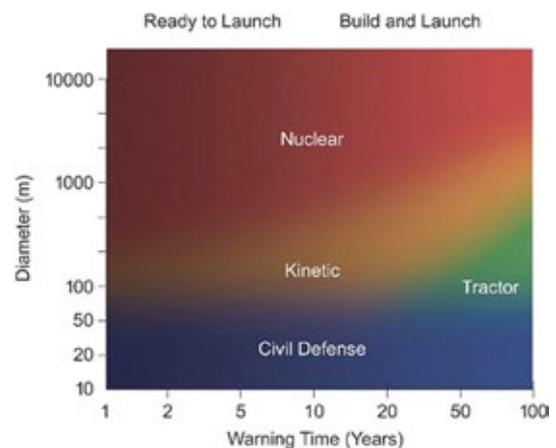


Fig.5. Comparaison entre quatre types de techniques de défense planétaire en fonction du diamètre de l'astéroïde et du temps restant pour réagir (crédit Tim Warchock).

Un obstacle majeur à l'utilisation d'une des techniques de déviation est cependant diplomatique. En effet, si les calculs montrent qu'un pays va être touché par un impact d'astéroïde, le fait de le dévier peut donc déplacer temporairement ce point d'impact sur d'autres pays. La communication et la coordination entre les habitants de la Terre sont donc essentielles.

Si on peut compter sur les scientifiques pour avancer sur le sujet, la dimension mondiale du problème laisse une grande place à la diplomatie et à la coopération entre les pays que l'on espère plus dynamique et productive que celle autour du changement climatique.

## Deux propositions d'activités avec les élèves

L'exercice qui suit est adapté pour des élèves de 1<sup>re</sup> spécialité physique chimie. On y trouve les notions de variation de vecteur vitesse, de force d'attraction gravitationnelle et la formule simplifiée du principe fondamental de la dynamique.

### Un tracteur gravitationnel pour dévier un astéroïde

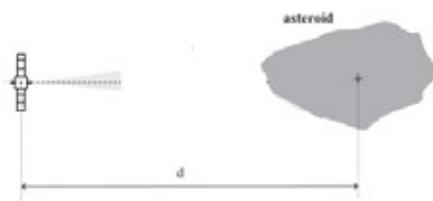
Pour dévier un astéroïde, il a d'abord été imaginé de lui amarrer des propulseurs qui pourraient alors facilement dévier sa trajectoire. Cependant, cette technique nécessite de bien connaître la surface de l'astéroïde et de trouver un moyen d'y fixer les propulseurs, ce qui n'est pas chose aisée. Il a alors été proposé de ne pas poser le propulseur sur l'astéroïde mais d'utiliser la méthode du tracteur gravitationnel.

#### Document 1

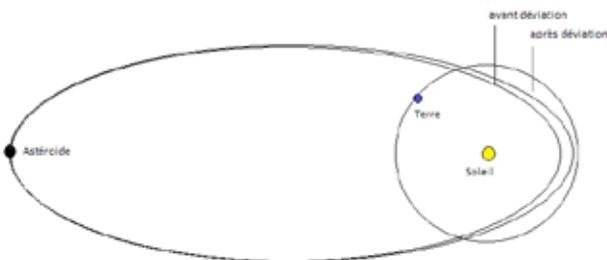
Le tracteur gravitationnel est une méthode qui utilise l'attraction gravitationnelle mutuelle entre le géocroiseur (l'astéroïde) et un engin spatial. Ce dernier se maintient à une distance constante du géocroiseur en utilisant une propulsion électrique. Par sa masse il exerce une force très légère sur l'astéroïde qui dans la durée modifie suffisamment l'orbite. (Source : Wikipédia).

#### Document 2

Tracteur gravitationnel



Document 3 Exemple de modification de trajectoire pour éviter la collision. Le schéma n'est pas à l'échelle.



#### Document 4 : un cas concret

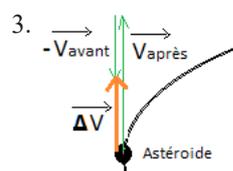
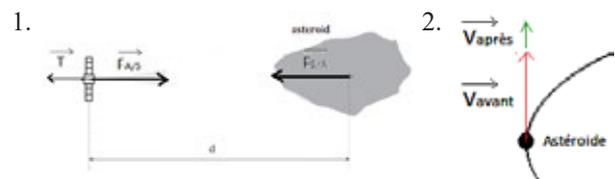
Un cas concret. L'astéroïde Apophis est un astéroïde qui a pendant quelques années préoccupé la communauté scientifique car il avait une probabilité de 2,7 % d'entrer en collision avec la Terre, risque écarté depuis. Il mesure environ 330 m d'envergure et a une masse  $M = 4 \times 10^{10}$  kg. Les scientifiques estiment qu'il pourrait suffire d'augmenter la norme du vecteur vitesse d'un astéroïde de ce type de  $2 \times 10^{-6}$  m/s au niveau de l'aphélie pour qu'il évite la Terre. Cette valeur n'est valable que si la menace est détectée plus de 10 ans en avance ; plus on attend, plus la variation de vitesse imposée devra être grande. Un satellite de masse  $m = 5$  tonnes pourrait être lancé par Ariane 5 par exemple et se positionner à  $d = 240$  m du centre de gravité

de l'astéroïde. Ils seraient alors liés gravitationnellement. Le satellite pourrait alors exercer une force de poussée en évacuant des gaz et ainsi dévier l'astéroïde.

#### Questions

- Sur le document 2, tracer la force d'attraction gravitationnelle du satellite sur l'astéroïde et de l'astéroïde sur le satellite sans soucis d'échelle. Tracer la force de poussée appliquée par les gaz sur le satellite.
- Sur le document 3, en supposant que la direction du vecteur vitesse ne change pas, tracer, sans soucis d'échelle, les vecteurs vitesses de l'astéroïde sans la déviation et après la déviation.
- Construire alors le vecteur variation de vitesse qu'il faut imposer à l'astéroïde pour modifier son orbite. En déduire dans quelle direction les astronomes doivent placer le satellite « tracteur ».
- Donner l'expression de la norme de la force qu'applique le satellite sur Apophis.
- Soit  $\Delta t$  le temps durant lequel il faut appliquer cette force pour obtenir la variation de vitesse voulue. En appliquant le principe fondamental de la dynamique sur Apophis, donner l'expression du temps  $\Delta t$  en fonction de la masse  $m$  du satellite, de la norme du vecteur variation de vitesse et de la distance  $d$  entre le satellite et l'astéroïde. Ce temps dépend-t-il de la masse de l'astéroïde ?
- Calculer le temps nécessaire pour dévier Apophis dans les conditions décrites dans le document 4.
- Donner l'expression de la force qu'applique Apophis sur un satellite à une distance  $d$ .
- Sachant que le débit de carburant utilisé par la sonde est directement proportionnel à cette force, comment évolue ce débit si l'astéroïde est deux fois plus lourd ? Quelles sont alors les conséquences pour une mission de déviation d'un astéroïde ?

#### Correction



Pour pouvoir dévier l'astéroïde, le satellite doit être positionné dans la direction du vecteur variation du vecteur vitesse.

$$4. F_{s/A} = \frac{G M m}{d^2}$$

5.  $M \frac{\Delta v}{\Delta t} = F_{s/A} = \frac{G M m}{d^2}$  donc  $\Delta t = \frac{\Delta v \times d^2}{G m}$  Ce temps est donc indépendant de la masse de l'astéroïde.

$$6. \Delta t = \frac{\Delta v \times d^2}{G m} = \frac{2 \times 10^{-6} \times 240^2}{6,674 \times 10^{-11} \times 5 \times 10^3} = 3,45 \times 10^5 \text{ s} = 4 \text{ jours}$$

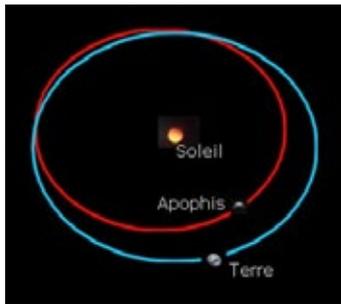
$$7. F_{A/s} = \frac{G M m}{d^2}$$

8. Si la masse de l'astéroïde double, alors la force qu'exerce Apophis sur le satellite double également. Pour se maintenir à 240 m, il lui faudra donc doubler le débit du carburant et donc consommer son carburant deux fois plus vite, ce qui peut inclure de ne pas terminer la déviation. Une autre solution serait d'emmener deux fois plus de carburant avec toutes les contraintes que cela génère.

*Ce deuxième exercice est adapté pour des élèves de terminales, spécialité physique-chimie sur la troisième loi de Kepler*

### Déviation d'un astéroïde

L'astéroïde Apophis est un astéroïde qui a pendant quelques années préoccupé la communauté scientifique car il avait une probabilité de 2,7 % d'entrer en collision avec la Terre, risque écarté depuis.



(Crédit Vikidia/Fraf)

Cependant, il sert souvent de base à des modélisations pour comprendre comment un astéroïde pourrait être dévié s'il devait entrer en collision avec la Terre.

#### Document 1 Données sur l'astéroïde Apophis

Masse	$4 \times 10^{10}$ kg
Envergure	330 m
Vitesse moyenne	30,728 km/s
Demi grand axe	137,995 Gm

**Document 2** Principe général de la déviation d'un astéroïde  
Les scientifiques ont inventé plusieurs techniques pour permettre de dévier un astéroïde dont celles-ci :

- la méthode dite du tracteur gravitationnel qui consiste à modifier la vitesse de l'astéroïde en plaçant à son côté un satellite qui va l'attirer par gravitation ;
- la méthode de l'impacteur cinétique qui consiste à envoyer un satellite taper un astéroïde à grande vitesse.

Les astronomes pensent alors pouvoir modifier le demi grand axe de l'ellipse de l'orbite de l'astéroïde d'environ 2 000 km. Cette modification augmentera alors la valeur de la période orbitale de l'astéroïde autour du Soleil (troisième loi de Kepler) et engendrera « un retard » de l'astéroïde par rapport au moment de la collision. La Terre aura donc le temps de s'éloigner du point d'impact. Si cette opération est faite suffisamment en avance, « le retard » s'accumulera alors d'année en année, laissant plus de marge à la Terre pour filer.

#### Document 3 Troisième loi de Kepler

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

Avec T la période de révolution de la planète autour du Soleil, a le demi grand axe de l'ellipse, G la constante gravitationnelle, M la masse du Soleil.

**Données** masse du Soleil :  $1,989 \times 10^{30}$  kg

$G = 6,674 \ 30 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Vitesse de la Terre autour du Soleil : 29,78 km/s

Diamètre de la Terre : 12 742 km

#### Résolution de problème

Dans les conditions décrites dans les documents, combien d'années en amont de la collision faut-il procéder à la déviation de l'astéroïde pour que la Terre se soit éloignée de 10 diamètres terrestres du point de collision ?

#### Questions plus détaillées

1. Combien de temps faut-il retarder l'astéroïde pour que la Terre puisse s'éloigner de 10 diamètres terrestres ?
2. De combien la période orbitale de l'astéroïde est-elle allongée par an si on modifie la vitesse de l'astéroïde comme indiqué dans le document 2 ?
3. Combien d'années avant l'impact faut-il effectuer la déviation pour atteindre ce « retard » ?

#### Correction

$$v = \frac{d}{t} \text{ donc } t = \frac{d}{v} = \frac{10 \times 12\ 742}{29,78} = 4278 \text{ s}$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \text{ donc } T = \sqrt{\frac{a^3 \times 4\pi^2}{GM}} \text{ donc}$$

$$T_{\text{avantdéviation}} = \sqrt{\frac{(137,995 \times 10^9)^3 \times 4\pi^2}{6,67430 \times 10^{-11} \times 1,9891 \times 10^{30}}} = 2,79540 \times 10^7 \text{ s}$$

$$T_{\text{aprèsdéviation}} = \sqrt{\frac{(137,995 \times 10^9 + 2 \times 10^6)^3 \times 4\pi^2}{6,67430 \times 10^{-11} \times 1,9891 \times 10^{30}}} = 2,79546 \times 10^7 \text{ s}$$

$$T_{\text{aprèsdéviation}} - T_{\text{avantdéviation}} = 600 \text{ secondes}$$

La période orbitale est donc modifiée d'environ 600 secondes.

$$4\ 278/600 = 7,1 \text{ ans.}$$

Il faut donc que la déviation ait lieu 7,1 ans plus tôt pour que l'astéroïde arrive 4 278 secondes en retard et que la Terre se soit donc déplacée de 10 diamètres terrestres plus loin.

Un grand merci à Christophe Bonnal du CNES pour ses explications et relectures !

#### Quelques sources

[https://selenianboondocks.com/wp-content/uploads/2015/05/IAA-PDC-15-04-11\\_Final.pdf](https://selenianboondocks.com/wp-content/uploads/2015/05/IAA-PDC-15-04-11_Final.pdf)

[https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation\\_cr/827\\_compte\\_rendu.pdf](https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation_cr/827_compte_rendu.pdf)

<https://www.franceculture.fr/emissions/la-methode-scientifique/la-methode-scientifique-emission-du-mardi-03-mars-2020>

<https://lejournel.cnr.fr/articles/comment-devier-un-asteroide-tueur>

<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01667223/document>