

Dionysis Konstantinou · Corina Toma



Voyage dans l'espace



INTRODUCTION

Imaginez un voyage d'une planète à une autre. Pourquoi devons-nous d'abord voyager en cercles au lieu d'aller tout droit ? Avant de commencer notre voyage, nous devons prendre en considération les facteurs suivants : la vitesse de révolution de notre planète de départ, la vitesse nécessaire du vaisseau spatial, le moment optimal de lancement du vaisseau spatial (si nous le manquons, nous dépasserons la planète cible sans la remarquer) et l'économie de carburant du voyage (après tout, nous n'avons pas de station d'essence dans l'espace). Dans cette unité d'enseignement, les élèves étudient comment un vaisseau spatial arrive sur une orbite circulaire près d'une planète puis la manière dont il voyage d'une planète à l'autre sur une orbite de transfert de Hohmann. L'unité peut être étudiée par des élèves âgés de 12 à 19 ans et les sujets concernés sont : la physique, les mathématiques, l'informatique et la biologie.

RESSOURCES

Les élèves ont besoin des ressources suivantes : ordinateur Intel Double cœur avec 2Go de RAM, carte graphique 3D accélératrice ; système d'exploitation : Windows, Mac OSX ou Linux ; résolution d'affichage : min. 1024x768 ; logiciels installés : Oracle Java JRE 1.6 ; modèle de licence : LGPL, accès à Internet.

Pour cette unité d'enseignement, deux applications logicielles Java ont été créées : «Orbiting and Escaping» et «Solar System Travel» (voir www.science-on-stage.de).

CONTENU

Nous devons réviser la loi de l'attraction universelle de Newton, les quantités du mouvement circulaire, les lois de Kepler et l'énergie potentielle et cinétique dans le champ gravitationnel.

Mouvement circulaire autour d'une planète et libération de l'influence de la planète

Les élèves doivent se familiariser avec la valeur des caractéristiques physiques durant le mouvement circulaire d'un satellite autour d'une planète ou durant le mouvement orbital d'une planète. Ils doivent étudier la vitesse de la trajectoire circulaire aussi proche que possible de la planète et la vitesse nécessaire de libération du champ gravitationnel de cette planète. Ils peuvent trouver les formules de ces deux vitesses en utilisant le logiciel : «Orbiting and Escaping» et vérifier les valeurs avec le logiciel «Solar System Travel».

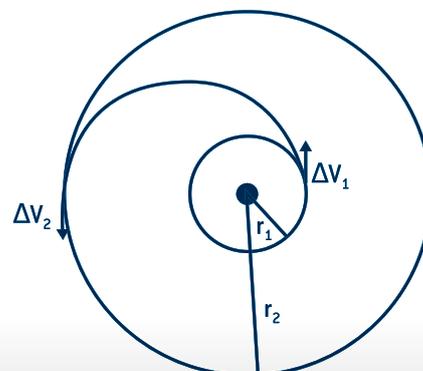
L'application «Orbiting and Escaping» est basée sur «Le modèle de montagne de Newton». Isaac Newton formula une expérience hypothétique : si nous montons au sommet de la plus haute montagne de la Terre et que nous y lançons horizontalement un projectile avec la vitesse appropriée, si l'atmosphère n'avait pas existé, nous aurions fait de ce projectile un satellite artificiel en orbite circulaire autour de la Terre.

Voyager d'une planète à l'autre sur une orbite de transfert de Hohmann

En utilisant l'application «Solar System Travel», les élèves doivent choisir à partir de quelle planète et vers quelle planète ils veulent voyager. En cliquant sur le bouton Hohmann, ils peuvent voir l'ellipse de transfert entre les planètes. L'ellipse déplace sa position avec la rotation de la planète de départ. Elle attend le bon moment lorsque les positions des planètes rendent le voyage possible. L'application montre le vaisseau spatial voyageant entre les planètes et calcule le temps nécessaire pour atteindre son but.

Le transfert de Hohmann peut être effectué avec de petites quantités de poussées uniquement au début et à la fin du voyage. Sur l'ellipse, la consommation de carburant est minimale car les variations d'énergie cinétique sont les plus faibles. Pour voyager d'une orbite de rayon r_1 vers une autre orbite de rayon r_2 , une trajectoire elliptique est utilisée avec l'axe majeur $= r_1 + r_2$, appelée orbite de transfert de Hohmann ①.

① Trajectoire de Hohmann



Le vaisseau spatial doit changer sa vitesse deux fois, au début de la trajectoire elliptique et à la fin, lors du delta v d'impulsion de vitesse $[\Delta v]$. Ce changement de vitesse

est une mesure de l'«effort» requis pour changer de trajectoire en effectuant une manœuvre orbitale.

On suppose que le vaisseau spatial se déplace sur l'orbite circulaire initiale du rayon r_1 à la vitesse v_1 et sur l'orbite circulaire finale du rayon r_2 à la vitesse v_2 . La force gravitationnelle est égale à la force centrifuge :

$\frac{GMm}{r^2} + \frac{mv^2}{r}$, où M est la masse du soleil, m la masse du vaisseau spatial et G la constante gravitationnelle. Les vitesses v_1 et v_2 sont données par :

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{r_1}} \quad \text{et} \quad v_2 = \sqrt{\frac{GM}{r_2}}.$$

Le transfert se compose de l'impulsion de vitesse Δv_1 qui propulse le vaisseau spatial dans une orbite de transfert elliptique et une autre impulsion de vitesse Δv_2 qui propulse le vaisseau spatial dans l'orbite circulaire de rayon r_2 , à la vitesse v_2 . L'énergie totale du vaisseau spatial est la somme des énergies cinétique et potentielle et est égale à la moitié de l'énergie potentielle sur l'axe semi-majeur a :

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r} = \frac{GMm}{2a}, \quad \text{où} \quad a = \frac{r_1 + r_2}{2}.$$

La solution de cette équation donne la vitesse au point initial de la trajectoire elliptique (perihelion) v'_1 et la vitesse au point final de la trajectoire elliptique (aphelion) v'_2 :

$$v'_1 = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_1} - \frac{2}{r_1+r_2} \right)} = v_1 \sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}}$$

$$\text{et} \quad v'_2 = \sqrt{GM \left(\frac{2}{r_2} - \frac{2}{r_1+r_2} \right)} = v_2 \sqrt{\frac{2r_1}{r_1+r_2}}.$$

In this case, the changes in velocities are :

$$\Delta v_1 = v'_1 - v_1 = v_1 \left(\sqrt{\frac{2r_2}{r_1+r_2}} - 1 \right)$$

$$\text{et} \quad \Delta v_2 = v_2 - v'_2 = v_2 \left(1 - \sqrt{\frac{2r_1}{r_1+r_2}} \right).$$

Important

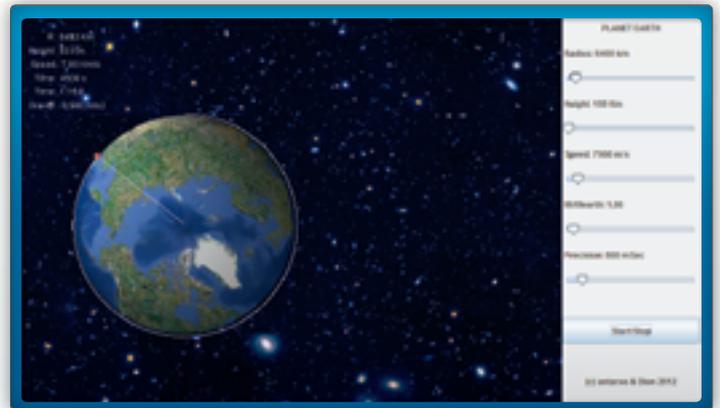
Si $\Delta v_1 > 0$, cela signifie que la poussée du vaisseau spatial va permettre d'accélérer, si $\Delta v_1 < 0$, la poussée du vaisseau spatial va permettre de décélérer.

Le temps de transfert du perihelion à l'aphelion est donné par la troisième loi de Kepler :

$$t = \pi \sqrt{\frac{(r_1 + r_2)^3}{8GM}}.$$

Attente du moment opportun

La configuration des deux planètes dans leurs orbites est cruciale ; la planète de destination et le vaisseau spatial doivent arriver au même point dans leurs orbites respectives autour du soleil et en même temps. Cette exigence d'alignement donne naissance au concept des «fenêtres de lancement».



Activités des élèves utilisant l'application «Orbiting and Escaping»

Comment trouver la première et la seconde vitesse cosmique ? Les élèves peuvent trouver la vitesse circulaire autour de la Terre (première vitesse cosmique) et la vitesse de libération (la seconde vitesse cosmique) avec l'option «Earth» de l'applet. Ils peuvent voir ce qui se produit lorsque la vitesse initiale est supérieure ou inférieure à la première vitesse cosmique.

Comment définir deux formules utilisant cette application ?

Les élèves détermineront les formules donnant la vitesse circulaire d'une orbite satellite autour d'un corps céleste et la vitesse de libération de ce corps utilisant une méthode expérimentale fondamentale. Par ce processus, ils pourront appréhender les aspects spécifiques de la théorie de la gravitation universelle de Newton. Au premier niveau, les élèves trouveront chaque des formules comme de proportionnalité, en collectant et en traitant des don-



nées à partir de l'application. L'approche du niveau supérieur consiste à définir le coefficient de cette proportionnalité pour les transformer en égalité.

L'option «Green planet» (tout autre ajustement excepté $M_i/M_{\text{Earth}} = 1$ and radius = 6400 km, où M_i est la masse de la planète exprimée en masses de la Terre) permet aux élèves de définir la formule de la vitesse de trajectoire circulaire. Dans ce but, ils choisissent une valeur pour le rayon de la planète et écrivent la vitesse de l'orbite circulaire pour différentes valeurs de la masse de la planète. Lorsqu'ils arrivent à la conclusion de la dépendance entre la vitesse circulaire et la masse de la planète, ils doivent formuler cette conclusion comme proportionnalité. En répétant les mêmes étapes pour une valeur fixe de la masse de la planète et des valeurs variables de R (rayon + altitude), les élèves arriveront à une seconde proportionnalité.

La procédure permettant de trouver la formule de la vitesse circulaire autour d'une planète sera terminée lorsque les élèves changeront la proportionnalité en égalité. Ils commenceront par unifier les deux proportionnalités en une seule. Puis ils traceront un graphique $v_2 = f(M_i/R)$ (où M_i est calculée en kg, avec $M_{\text{Earth}} = 6 \cdot 10^{24}$ kg. Le coefficient angulaire du graphique indique le coefficient permettant aux élèves de trouver l'égalité.

En appliquant les mêmes idées et en suivant les mêmes étapes qu'à l'activité précédente, les élèves peuvent définir la formule indiquant la vitesse de libération, v_{escape} .

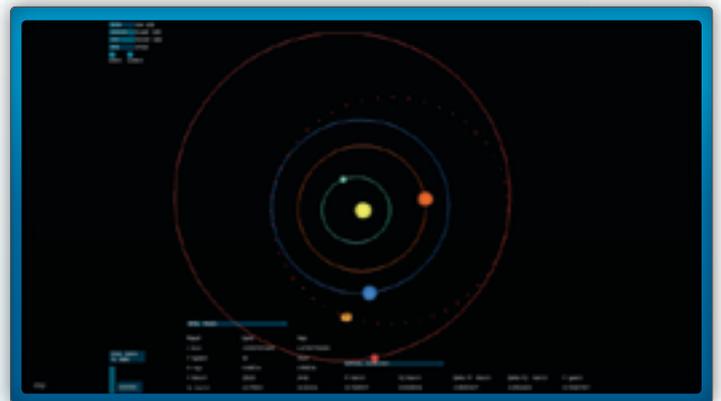
Activités des élèves utilisant l'application «Solar System Travel»

Les élèves exécutent l'application et peuvent choisir un voyage d'une planète vers une autre. Ils peuvent lire les valeurs des vitesses initiales de chaque planète et de la

trajectoire de Hohmann et les vérifier avec la formule qui vient d'être créée par le premier applet.

Les élèves peuvent changer l'angle de vue des orbites en utilisant la touche MAJ et zoomer en avant et en arrière avec la molette de la souris.

La trajectoire elliptique de Hohmann (pointillé) suit un mouvement de rotation qui suit la planète de départ du vaisseau. Les élèves cliquent sur le bouton Hohmann et attendent que l'ellipse s'arrête. A ce moment les configurations des planètes sont favorables pour que le vaisseau commence son voyage.



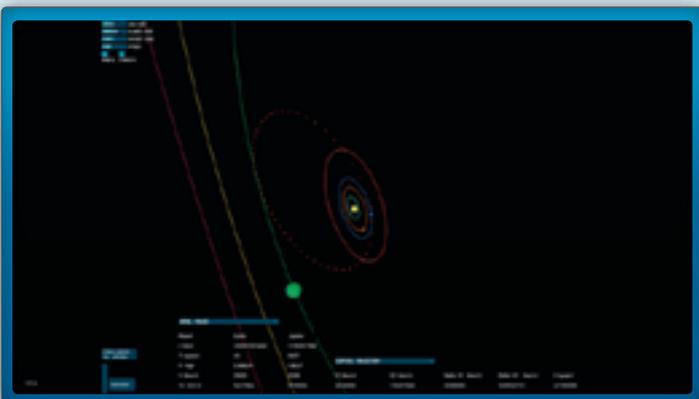
Etudier les vitesses orbitales et les périodes orbitales pour différentes planètes

Les élèves peuvent en conclure que les vitesses des planètes décroissent et que les périodes orbitales croissent avec l'augmentation du rayon orbital. Les élèves peuvent tracer des graphiques de la vitesse des planètes et l'évolution de la période des planètes avec un rayon orbital croissant $r, v = f(r)$ et $T = f(r)$.

Comparaison entre différentes impulsions de vitesse nécessaires (delta-v)

Les élèves doivent choisir une orbite de transfert de Hohmann de la Terre vers Venus ou Mercure. Ils peuvent observer que le $\Delta v_i < 0$. S'ils voyagent vers l'une des autres planètes, plus éloignée du soleil, ils observeront que le $\Delta v_i > 0$. Ils pourront en conclure que si l'on envisage de voyager d'une petite orbite vers une plus grande, le vaisseau spatial doit accélérer et, vice-versa, si l'on envisage de voyager d'une grande orbite vers une plus petite, le vaisseau spatial doit décélérer. La consommation de carburant est la même.

Vitesses delta-v versus vitesses de libération v_e



Si les élèves écrivent dans une table les valeurs delta-v pour chaque voyage et la vitesse de libération v_e pour chaque planète, ils pourront observer que, dans certains cas, les deux valeurs sont très proches. Par exemple, il est impossible d'aller de la Terre à Uranus sur une orbite de Hohmann, donc d'autres solutions doivent être trouvées.

Domages possibles sur le corps des astronautes

En utilisant l'application, les élèves doivent comparer le temps de transfert t pour différents voyages. Ils peuvent réaliser que le temps de voyage nécessaire est beaucoup plus long si l'on tient compte de la «fenêtre de lancement» appropriée. Dans ce cas, ils doivent tenir compte des conséquences physiologiques d'un voyage prolongé dans l'espace en microgravité (par exemple affaiblissement des os et surcharge des muscles cardiaques) soumis aux radiations des rayons X et gamma (endommagement des cellules) et dans des conditions d'accélération longitudinale (surconcentration du sang au niveau de la tête ou des pieds des astronautes). Les élèves doivent rechercher des informations sur les dommages biologiques d'un voyage dans l'espace et préparer des affiches sur ce sujet.

CONCLUSION

En effectuant ces simulations, les élèves seront capables de comparer leurs connaissances sur le système solaire et le voyage dans l'espace. Cela élargira leur horizon et leur fera prendre conscience des différents problèmes concernant le voyage dans l'espace. Comme nous l'avons déjà souligné, ce concept interdisciplinaire implique non seulement la physique et l'informatique, mais également la biologie et les mathématiques.

Pour développer ce sujet, les élèves pourront également découvrir les perturbations qui pourraient apparaître durant ce type de voyage, telles que la perturbation du corps, la perturbation de la pression atmosphérique et la perturbation due à la radiation solaire. Ils pourront également essayer d'utiliser d'autres manœuvres orbitales comme l'assistance gravitationnelle (gravitational slingshot) et l'effet Oberth.

