

## 2 Une des découvertes majeures de Voyager : les glaces d'Europe.

### 2.1 Quelques informations sur Europe.

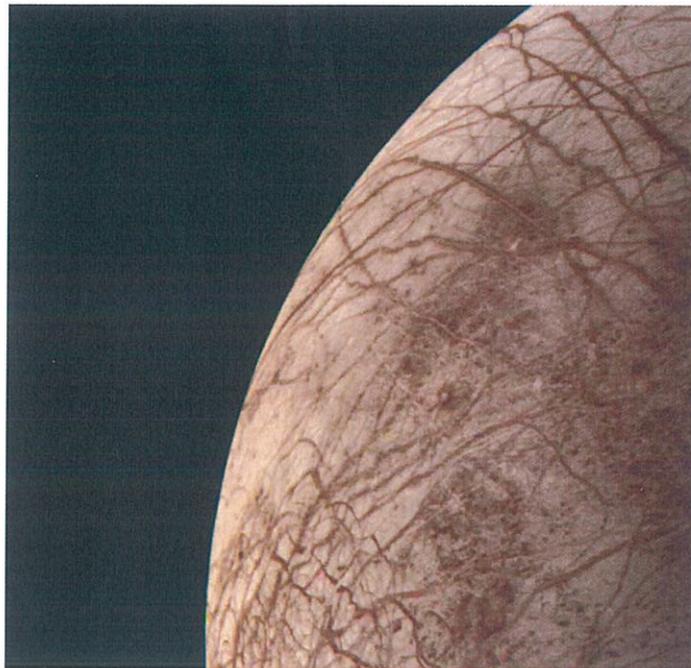


FIGURE 4 – Europe, satellite de Jupiter, sur lequel des fractures sont visibles dans la croûte glacée. Crédit NASA.

#### **L'histoire d'Europe.**

64 satellites naturels gravitent autour de Jupiter. Un grand nombre d'entre eux a été découvert par les sondes Voyager, lancées en 1977 et Galileo, lancée le 18 octobre 1989.

Néanmoins, les quatre principales lunes furent découvertes par Galilée en 1610 : Io, Europe, Ganymède et Callisto (de la plus proche à la plus lointaine de Jupiter). Ces quatre satellites naturels de Jupiter sont nommés, depuis lors, satellites galiléens.

Le 9 juillet 1979, la sonde Voyager 2 envoie une image d'Europe. Son analyse révèle la présence de glace et laisse supposer la présence d'un océan sous l'épaisse couche de glace.

Dans le cadre du programme Cosmic Vision (2015-2025), l'Agence Spatiale Européenne (ESA) a décidé de poursuivre l'exploration du système solaire en construisant une sonde baptisée JUICE (JUperiter ICy moons Explorer).<sup>3</sup>

---

3. Source : D'après Athena Coustenis (CNRS, Observatoire de Paris Meudon), Michel Blanc (École Polytechnique), Olivier Grasset (Université de Nantes), Pierre Drossart (CNRS, LESIA, observatoire de Paris)

### **L'eau sur Europe.**

Plusieurs faits ont amené les planétologues à émettre l'hypothèse de l'existence d'un océan sous la banquise superficielle de 10 km d'épaisseur.

Tout d'abord, l'albédo d'Europe est très élevé et, sur les images, Europe présente une surface très lisse, sans relief notable, sans trace d'impacts de météorites mais recouverte d'une multitude de crevasses pouvant s'étendre sur des milliers de kilomètres. L'aspect de la surface montre qu'elle est soumise à des mouvements analogues à ceux d'une banquise. (Ces mouvements sont liés au fait que la glace peut glisser facilement sur l'eau sous-jacente.) On observe également quelques disques circulaires qui ne présentent pas de bords relevés comme les cratères d'impact. D'autre part, étant donné qu'Europe se trouve près de Jupiter, elle subit des forces de gravitation différentielle (forces de marée) qui produisent de l'énergie et l'hypothèse est avancée que les forces de marée génèrent, par frottement, suffisamment de chaleur pour permettre l'existence d'un océan liquide sous la croûte glacée, et la possibilité d'une forme de vie sous la surface de glace est alors évoquée.

### **De la vie sur Europe ?**

L'éventualité de la présence d'eau liquide sur Europe a immédiatement amené les scientifiques pluridisciplinaires qui s'intéressent aux planètes à s'interroger sur l'éventualité d'une forme de vie sous-marine dans cet océan. En 1978, ce débat prend une nouvelle tournure lorsque l'exploration de la dorsale mid-atlantique par de petits sous-marins permet de révéler la présence, près des geysers sous-marins, de différentes espèces animales : poissons, crabes albinos et bactéries vivant à l'intérieur même de sources chaudes. Cette découverte, qui a modifié les vues traditionnelles sur les conditions indispensables au développement de la vie, a renforcé sérieusement l'hypothèse concernant l'existence d'une certaine forme de vie dans l'océan d'Europe. Dès lors, de nombreuses idées de missions ont été proposées pour percer cette banquise et rechercher la présence d'organismes dans l'eau qui existe peut-être sous cette glace. Mais un élément nouveau apparaît le 12 décembre 2013 lors de la mise en ligne d'un article intitulé *Transient Water Vapor at Europa's South Pole* dans la revue Science : le télescope spatial Hubble est parvenu à détecter des jets de vapeur à la surface d'Europe. Ces panaches seraient hauts de quelques 200 km, au travers des fissures de la croûte glacée d'Europe.

Cette découverte pourrait y faciliter la recherche d'éventuelles formes de vie. En 2030, la sonde spatiale JUICE parviendra aux abords de Jupiter et de ses lunes et l'une de ses missions sera précisément de détecter la présence d'éventuelles formes de vie sur les lunes glacées. Sous réserve que ces panaches soient bel et bien connectés à l'océan liquide situé sous la surface d'Europe, cela signifie que l'étude, par la sonde JUICE, de la composition chimique des jets de vapeur d'eau pourrait apporter de nombreuses informations sur les caractéristiques de cet océan liquide situé sous la surface d'Europe<sup>4</sup>.

---

4. Source : D'après Guy Moreels, Observatoire de Besançon, et ESA

### Carte d'identité d'Europe, satellite naturel de Jupiter <sup>5</sup> :

Distance Soleil Jupiter $D_{SJ}$	778 millions de km, soit 5,2 ua
Masse de Jupiter $M_J$	$1,898 \cdot 10^{27}$ kg
Distance minimale Jupiter Europe $D_{JE \min}$	664 860 km
Distance maximale Jupiter Europe $D_{JE \max}$	671 100 km
Diamètre d'Europe $2 \cdot R_E$	3122 km
Masse d'Europe $M_E$	$4,8 \cdot 10^{22}$ kg
Durée du "jour" (révolution sur elle même) $\tau_J$	3,55 jours terrestre
Durée d'une "année" (révolution autour de Jupiter) $\tau'_J$	3,55 jours terrestre
Atmosphère	dioxygène $P \simeq 10^{-6}$ Pa
Température (moyenne) de surface	$T_s \simeq 100$ K

## 2.2 L'observation d'Europe au cours du temps.

En janvier 1610, Galilée alors à l'Université de Padoue lève sa lunette vers le ciel et observe avec sa lunette les 4 plus grosses lunes de Jupiter. Cette lunette, de longueur 93,2 cm, est en bois et cuir, et est décorée à la mode italienne. L'objectif est constitué d'une lentille plan convexe de 37 mm de diamètre diaphragmée à 15 mm et ayant 2 mm d'épaisseur en son centre. Sa distance focale est de 980 mm. L'oculaire divergent a été perdu, la lentille mesurait 22 mm de diamètre pour -47,5 mm de distance focale. Cette lunette grossit 21 fois et présente un champ de 15' d'arc.

18. Donner un ordre de grandeur des limites de la plage de vision nette d'un oeil humain emmétrope et de sa limite de résolution angulaire.
19. Comment le conservateur de l'"Istituto e Museo di Storia della Scienza" à Florence (Italie), où est conservée la lunette de Galilée, a-t-il pu reconstituer les informations sur l'oculaire manquant ?
20. Quel est l'intérêt de diaphragmer la lentille objectif ?
21. Vérifier la cohérence des informations avec la valeur du grossissement.
22. Comment Galilée voyait-il Europe à travers sa lunette, comme un objet ponctuel ou un objet étendu ? Un calcul d'ordre de grandeur est attendu.
23. **(QP)** Un élève de 1ère S a trouvé sur Internet l'affirmation suivante :  
 "La mesure du champ d'une lunette se fait en dirigeant la lunette immobile vers une étoile équatoriale (une étoile équatoriale se trouve sur l'écliptique), et en chronométrant son temps de passage, en seconde de temps, dans le champ d'observation. On divise par quatre le nombre trouvé et on obtient le diamètre angulaire du champ, en minute d'arc." <sup>6</sup>  
 Aider le à comprendre si cette affirmation est juste.
24. Sur le site de la NASA, on peut lire : "The resolution of the Voyager narrow-angle television

5. Source : D'après Need-To-Know Things About Europa, NASA

6. D'après <http://www.astro-gresivaudan.fr/uranie/index.php3?choix=4>

cameras is sharp enough to read a newspaper headline at a distance of 1 km.”<sup>7</sup> Comparer la résolution de cette caméra avec celle de la lunette de Galilée évoquée ci-dessus, utilisée par un observateur.

25. Le télescope Hubble a été capable de détecter la présence de jeyser de vapeur d'eau sur Europe. Comparer la résolution de cet instrument avec les deux autres outils précédemment cités.

### 2.3 Quelques caractéristiques de la trajectoire d'Europe.

26. Justifier qu'en première approximation, la trajectoire d'Europe puisse être supposée circulaire autour de Jupiter de rayon  $D_{JE}$ . Donner l'expression de  $v_0$  la vitesse sur cette trajectoire circulaire. Faire l'application numérique.
27. Exprimer l'énergie mécanique  $E_m$  de ce satellite en orbite circulaire. La comparer à l'énergie potentielle  $E_p$  et l'énergie cinétique  $E_c$  sur cette trajectoire. Ces relations étaient-elle prévisibles ?
28. Comparer et commenter la durée du "jour" et de "l'année" sur Europe.

De manière plus précise, Europe possède une trajectoire elliptique, de foyer O, d'équation polaire

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

de paramètre  $p$  et d'excentricité  $e$ .

On suppose en outre qu'à un instant pris pour origine des temps, la vitesse est orthoradiale de module  $v'_0$  et la distance Jupiter-Europe minimale.

29. Que dire de l'énergie mécanique  $E_m$  ?
30. Dessiner l'allure de la trajectoire elliptique en précisant bien où est Jupiter.
31. Dans le cas ci-dessus, donner l'expression de  $r_{min}$  et  $r_{max}$  en fonction de  $p$  et  $e$ . Les placer sur le dessin précédent.
32. Calculer numériquement  $p$  et  $e$ .
33. Déterminer l'expression du champ de gravitation créé par Europe seul à sa surface en formulant des hypothèses raisonnables sur la répartition des masses en son sein.

### 2.4 Étude de l'eau sur Europe.

34. Commenter la particularité graphique du diagramme de phase de l'eau visible sur le diagramme pression-température de la figure 5. L'associer à une autre propriété singulière de l'eau.
35. Compte tenu du diagramme P-T de la figure 5, quelle pression est nécessaire pour trouver la présence d'eau liquide ?
36. Cette condition peut-elle être remplie à la surface d'Europe ? Expliquer les divers états possibles de l'eau à la surface d'Europe.

---

7. La résolution de la caméra numérique de petite ouverture angulaire de Voyager est telle qu'elle permettrait de lire les gros titres des journaux à 1 km de distance.

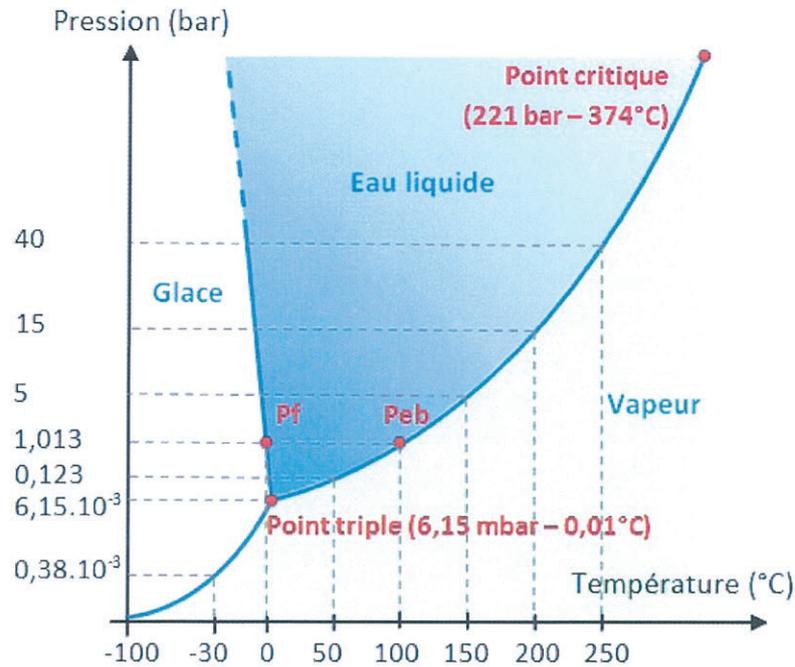


FIGURE 5 – Diagramme pression-température de l'eau, (source : ENS Lyon).

Les questions qui suivent abordent certains aspects énergétiques d'Europe.

37. On suppose l'existence d'eau liquide sous la glace. Estimer numériquement la puissance thermique perdue par diffusion de la chaleur à travers les glaces d'Europe. L'ordre de grandeur de la conductivité thermique de la glace est  $1 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ .  
Le candidat sera amené à prendre des initiatives pour le choix des valeurs de certains grandeurs physiques.

Une hypothèse avancée pour expliquer l'apport d'énergie nécessaire pour compenser ces pertes de chaleur par diffusion est la présence d'un coeur radioactif dans le satellite Europe, à l'image de notre Terre.

38. Sachant que la réaction nucléaire sur Terre libère une puissance de  $44 \text{ TW}^8$ , et en supposant que l'énergie nucléaire libérée est proportionnelle à la masse de l'astre, estimer la puissance produite par le coeur radioactif d'Europe.

Une autre hypothèse qui est évoquée dans le texte ci-avant est celle de l'énergie provenant des forces différentielles de marées.

8. La chaleur de la Terre et la géothermie, Pierre Thomas, ENS Lyon - Laboratoire de Géologie de Lyon [http : //planet - terre.ens - lyon.fr/article/chaleur - Terre - geothermie.xml](http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml)

39. Quelle est l'origine physique de la force de marée ? Une réponse précise est attendue. Justifier à partir des caractéristiques du mouvement d'Europe, l'importance des forces de marées sur Europe.
40. Citer d'autres processus pouvant intervenir dans le bilan énergétique d'Europe.

### 3 Le chemin de Voyager vers les confins de notre système solaire.

#### 3.1 Lanceur et mouvement à force centrale.

La sonde Voyager, de centre A, de masse  $m$  est observée depuis une planète, de centre P, de masse  $M$ .

Pendant la durée où la planète et la sonde interagissent intensément, le référentiel planétocentrique, lié au centre de la planète, sera supposé galiléen. Pendant cette durée, le système planète satellite est considéré comme isolé.

À un instant pris comme origine des temps, la sonde est située en  $A_0$ , à la distance  $r_0$  de P et de vitesse  $v_0$ , et tel que  $\overrightarrow{PA_0} \wedge \vec{v}_0 \neq \vec{0}$ . (La vitesse  $v_0$  utilisée ici est sans lien avec la définition donnée dans la partie précédente et ne fait référence qu'à la vitesse du satellite à l'instant pris pour origine des temps.)

41. Exprimer la force  $\vec{F}$  d'interaction exercée par la planète sur la sonde. Justifier le nom de force centrale. La grandeur  $r$  désignera dans la suite la distance  $PA$ .
42. Établir l'expression de l'énergie potentielle  $Ep(r)$  en supposant l'énergie potentielle nulle à l'infini.
43. Montrer que la trajectoire de la sonde est plane. Détailler votre réponse à un niveau post-baccalauréat et préciser où l'hypothèse  $\overrightarrow{PA_0} \wedge \vec{v}_0 \neq \vec{0}$  intervient dans la démonstration de la planéité du mouvement.

Dans le plan du mouvement, le mouvement de la sonde est décrit dans la base polaire  $(\vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$  du référentiel planétocentrique.

44. Montrer que les deux grandeurs cinématiques  $r$  et  $\theta$  qui décrivent le mouvement dans le plan sont liées. On déterminera la constante des aires  $C$  en fonction de la valeur du moment cinétique.
45. Donner l'expression de l'énergie potentielle effective  $Ep_{eff}(r)$  et justifier son intérêt.
46. Tracer l'allure de  $Ep_{eff}(r)$  et discuter les divers types de trajectoires possibles en fonction de la valeur de l'énergie mécanique.

### 3.2 L'assistance gravitationnelle.

En 1961, Michael Minovitch, stagiaire au Jet Propulsion Laboratory, le laboratoire des sondes Voyager, propose d'utiliser l'effet d'assistance gravitationnelle (ou "fronde gravitationnelle") pour faciliter l'exploration du système solaire. L'effet d'assistance gravitationnelle consiste à utiliser les planètes pour accélérer (ou le cas échéant, décélérer) une sonde.

Les informations suivantes ont été collectées :

*Un des succès les plus frappants de l'effet d'assistance gravitationnelle est probablement le cas de la sonde Voyager, lancée en 1977 pour un long périple d'exploration des planètes Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Ce trajet, sans utiliser l'effet d'assistance gravitationnelle, aurait dû prendre, dans le meilleur des cas, à peu près 30 ans, or Voyager n'a mis "que" 12 ans pour atteindre Neptune. Ainsi, en utilisant l'effet d'assistance gravitationnelle à plusieurs reprises (près de chacune des planètes) comme le montre la figure 7, le temps du voyage a été divisé par deux ! Voyager a aussi bénéficié d'une configuration particulièrement favorable des planètes permettant de minimiser le trajet parcouru et qui ne se reproduit qu'une fois tous les 176 ans environ.*

*Du point de vue de la planète, l'engin suit une trajectoire hyperbolique, tracée de son point d'entrée dans la sphère d'influence de la planète jusqu'à sa sortie. À ces points, la vitesse de l'engin est la même, mais son orientation est différente.*

*Du point de vue du Soleil, l'orientation et l'intensité de la vitesse de l'engin changent. Si la concavité de la trajectoire de la sonde est dirigée dans le même sens que le mouvement de la planète (donné par l'orientation de  $\vec{v}_{P/C}$  le vecteur vitesse de la planète dans le référentiel de Copernic), la sonde est durablement accélérée, et le gain en vitesse obtenu est de l'ordre de grandeur de la vitesse de la planète. Comme celle-ci est comparable à la vitesse de la sonde, le gain en vitesse sur tout le trajet, et par suite le gain en temps et en carburant sont donc appréciables. Du point de vue énergétique, la sonde récupère une partie de l'énorme énergie que possède la planète du fait de son mouvement de rotation autour du Soleil.<sup>9</sup>*

47.  $\vec{v}_{P/C}$  désigne le vecteur vitesse de la planète dans le référentiel de Copernic,  $\vec{v}_{A/P}$  celui de la sonde dans le référentiel de la planète (référentiel planétocentrique), avant son passage au voisinage de cette dernière, et  $\vec{v}'_{A/P}$  le vecteur vitesse de la sonde dans le référentiel de la planète après son passage au voisinage de cette dernière.

Compléter en respectant l'échelle les schémas de la figure 10 de l'annexe 5.4, à rendre avec la copie en faisant clairement apparaître  $\vec{v}_{A/P}$ ,  $\vec{v}'_{A/P}$ ,  $\vec{v}_{A/C}$ ,  $\vec{v}'_{A/C}$ . Pour ce faire, on supposera que  $||\vec{v}_{A/P}|| \simeq ||\vec{v}_{P/C}||$ .

Commenter alors la phrase extraite du site web ENS lyon-Eduscol : "si la concavité de la trajectoire de la sonde est dirigée dans le même sens que le mouvement de la planète (donné par l'orientation de  $\vec{v}_{P/C}$ ), la sonde est durablement accélérée."

48. Justifier à l'aide de la figure 7 et d'un calcul en ordre de grandeur, la phrase suivante : "le gain

---

9. Source : D'après Wikipédia et d'après ENS Lyon Eduscol. Gabrielle Bonnet. 24 - 10 - 2003

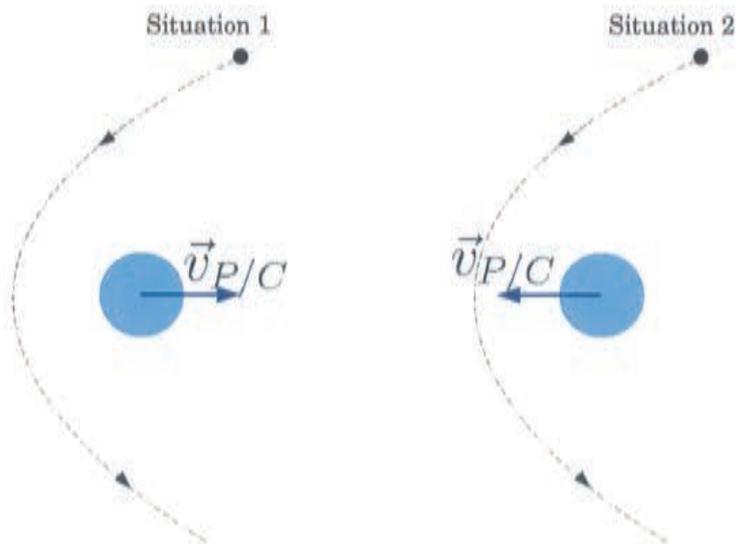


FIGURE 6 – Effet d'assistance gravitationnelle, deux situations différentes.  $\vec{v}_{P/C}$  désigne le vecteur vitesse de la planète dans le référentiel de Copernic. Un schéma analogue à rendre avec la copie se trouve en annexe 5.4, figure 10.

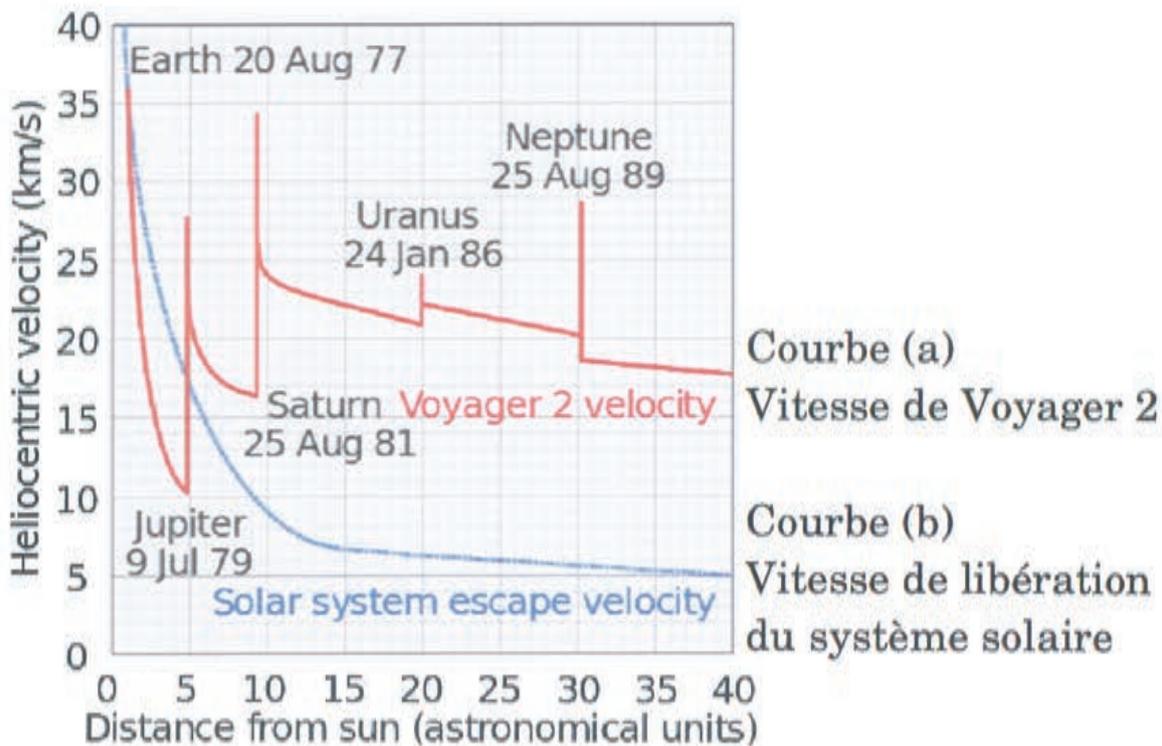


FIGURE 7 – Effet d'assistance gravitationnelle.

en vitesse obtenu [par effet d'assistance gravitationnelle] est de l'ordre de grandeur de la vitesse de la planète." Vous vous limiterez à l'étude de l'action de Jupiter sur la sonde Voyager.

49. À partir des deux courbes de vitesse de la figure 7, expliquer l'intérêt de l'utilisation de l'effet d'assistance gravitationnelle quant à l'objectif de la mission Voyager d'explorer les confins de notre système solaire. Vous vous limiterez à l'étude de l'action de Jupiter sur la sonde Voyager.
50. (QP) Un professeur souhaite réaliser une activité d'ouverture sur l'effet d'assistance gravitationnelle pour des élèves de terminale S.

Le professeur propose à ses élèves les schémas de la figure 8 qui décrivent le choc frontal élastique d'une balle sur un camion.

Rédiger un texte accessible à des élèves de terminale S expliquant le gain de vitesse observé pour la balle.

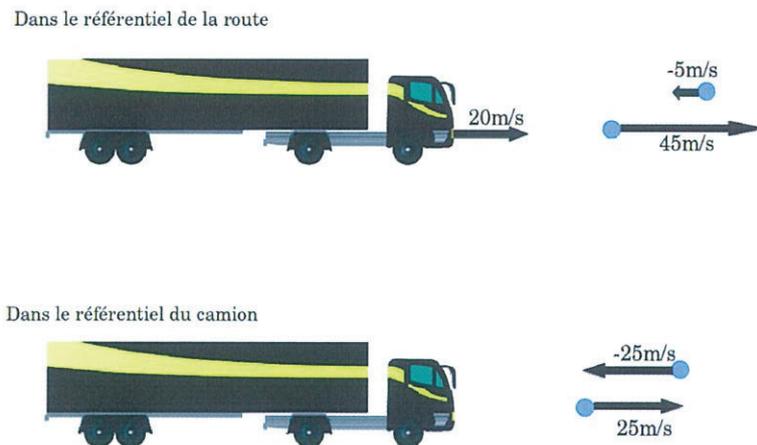


FIGURE 8 – Illustration de l'effet d'assistance gravitationnelle : choc frontal élastique d'une balle sur un camion. D'après Tammy Humphrey [www.mathscience.com.au](http://www.mathscience.com.au) Notes on the Slingshot effect

51. Un décalage en fréquence apparaît entre l'émission et la réception des ondes électromagnétiques lors de la télécommunication avec Voyager depuis la Terre, quelle en est l'origine physique ? Expliquer comment a pu être obtenue la courbe de la figure 7 représentant la vitesse de la sonde Voyager lors de son exploration du système solaire.

52. (QP) On souhaite illustrer cet effet à partir d'un exemple sur les ondes sonores émises par un camion.

Retrouver à partir de la figure 9 la relation entre  $\lambda_0$  la longueur d'onde émise par le camion,  $\lambda'$  et  $\lambda''$  la longueur d'onde perçue par un observateur immobile situé sur la trajectoire du camion, respectivement derrière et devant le camion. On introduira les grandeurs physiques nécessaires. À votre avis quels sont les avantages et inconvénients du schéma de la figure 9 pour aider les élèves à interpréter le décalage en fréquence. Des arguments précis sont attendus.

Vous pouvez vous référer aux extraits du programme de terminale S, annexe 5.2.

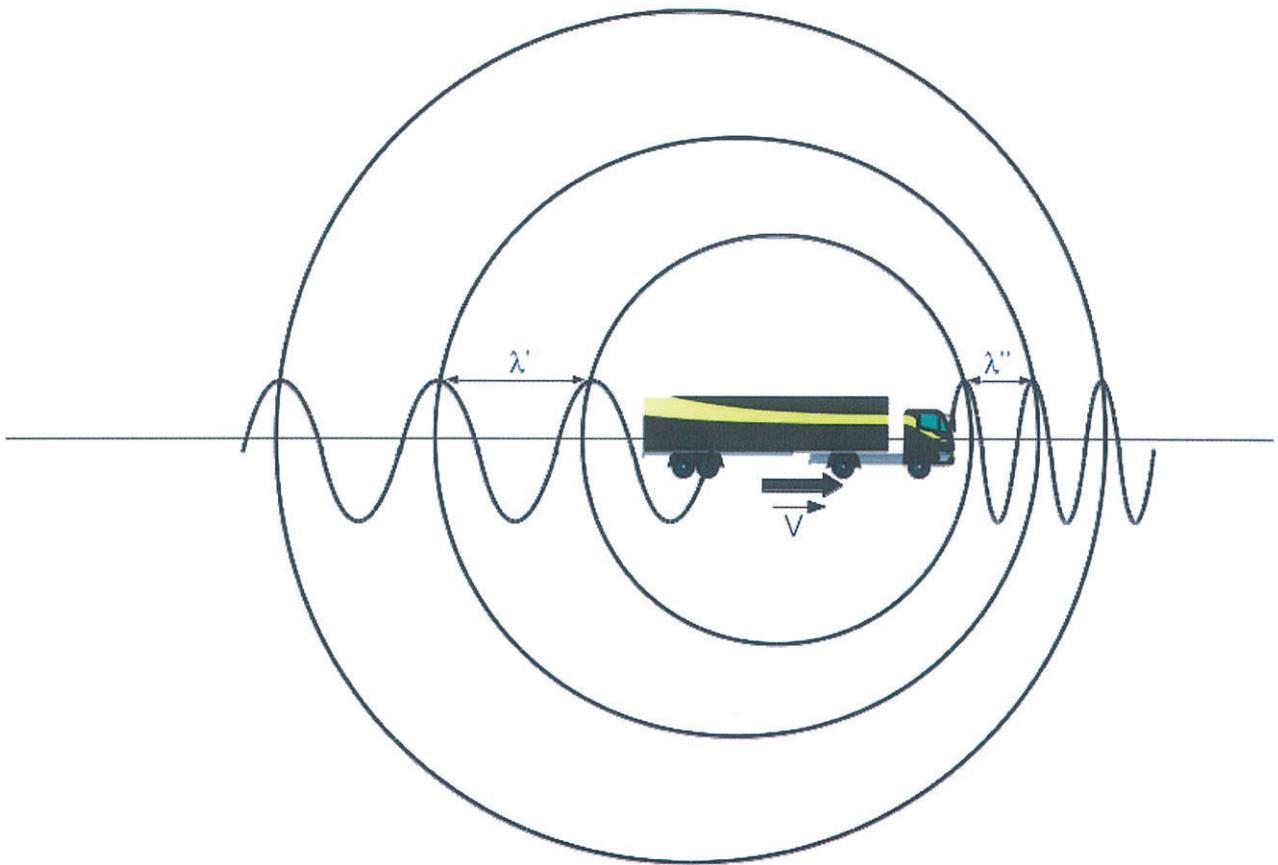


FIGURE 9 – Illustration d'ondes sonores émises par un camion en mouvement.