

La vitesse de libération – Mise au point

Je suis tombé sur [une vidéo](#) du célèbre professeur Fabrizio Bucellaⁱ, qui répond à la question : « est-ce qu'un cerf-volant peut atteindre l'espace ? »

Sans rentrer dans le détail de la réponse, l'argument principal est que « La vitesse de libération de l'attraction terrestre est de 11 km/s ($\cong$ 40 000 km/h), et qu'il n'existe aucun vent capable d'amener le cerf-volant à cette vitesse. Conclusion : le cerf-volant n'atteindra pas l'espace ».

Ce qui est **totale**ment FAUX.

Si je souhaite faire ce petit mot, c'est parce que cet argument est répété à longueur de vulgarisation, et que, non seulement il présente très mal les choses, mais de plus il induit beaucoup d'incompréhension, de fausses représentations et une vision erronée des sciences spatiales.

Mais d'abord, jouons

Commençons par un petit jeu : « *On dirait qu'on serait une fusée...* »

Vous pouvez faire l'expérience à peu près n'importe où : placez-vous sous un arbre avec une grosse branche basse (mais plus haute que vous). Sur la branche, installez un(e) ami(e) qui a des envies de hauteur, ou des instincts de chimpanzé. Donnez une corde à votre pote arboricole. Il/elle est assuré sur la branche, il tient la corde qui pend dans le vide. Félicitations : vous venez de créer un moteur¹. Pour l'instant il n'est fixé sur aucun « véhicule ».



Placez-vous à présent sous l'arbre, en prenant votre plus belle pose verticale, bras vers le haut. Félicitations : vous venez de créer une fusée. Une fusée sans moteur, mais une fusée quand même. Et devinez quoi : un moteur, il y en a un pas loin !

Attrapez la corde qui pend. Félicitations : Vous (oui, vous) êtes maintenant officiellement une fusée sur son pas de tir, à laquelle un moteur est fixé (la corde et la personne dans l'arbre)

L'installation du jeu est terminée. Passons au déroulement.

Temps 1 : Les deux personnes (la fusée et le moteur) tiennent la corde, mais personne ne tire dessus, elle est lâche : le moteur est éteint.

Temps 2 : L'ami(e) tire sur la corde et la tend. Vous sentez un début de légère tension dans vos bras : le moteur est en train de s'allumer.

¹ Un moteur est un dispositif qui convertit une forme d'énergie quelconque en énergie mécanique (en mouvement) : le moteur d'une voiture convertit l'énergie contenue dans l'essence (ou l'électricité de la batterie) en tours de roues. Ici le « carburant » est le sucre apporté aux muscles de l'ami(e) dans l'arbre, et ses muscles la convertissent en énergie mécanique : la montée de la corde avec vous au bout.

Temps 3 : l'ami(e) tire plus fort, la corde se tend et tend vos bras : ça tire ! Pourtant vos pieds sont toujours sur le sol, parce que la force avec laquelle la corde est tirée vers le haut ne suffit pas à compenser votre poids (on notera d'ailleurs que l'effort à fournir sera d'autant plus important que vous êtes pesant(e), CQFD). Le moteur monte en régime, mais n'apporte pas assez de force (d'énergie) pour vous soulever. La fusée (ou vous, suivez un peu !) reste toujours sur son pas de tir.



Temps 4 : l'ami(e) a mangé des épinards, et tire enfin suffisamment fort pour contrecarrer votre poids, qui vous assure de rester les pieds sur terre. Vous vous soulevez. Si votre ami ne veut pas vous arracher les bras, il tirera juste *un peu plus* que l'équilibre de votre poids : vous vous élevez doucement.

Temps 5 : l'ami(e) continue de tirer : s'il tire de plus en plus fort, vous vous élèverez de plus en plus vite. Mais s'il maintient une traction constante, vous continuerez de vous élever lentement, en douceur.

Si l'ami(e) veut vous amener sur la branche, il a deux solutions :

- Soit il tire progressivement sur la corde jusqu'à votre arrivée sur la branche : il donnera alors de l'énergie de façon contrôlée, constante et mesurée.
Avantage : vous vous élèverez lentement, mais sans avoir mal aux bras.
Inconvénient : l'ami(e) doit faire constamment attention à tirer de façon suffisante, constante, et douce. Cela demande un(e) ami(e) avec plus de compétences.

- Mais votre ami(e) peut aussi être pressé(e) et vouloir vous amener d'un seul coup. Il va alors tirer brutalement et très fort sur la corde. Vous serez catapulté(e) en haut et, si la traction brutale a été suffisamment bien dosée, vous partirez comme un boulet, ralentirez durant la montée (la Terre et la Gravité vous rappellent à leur bon souvenir), et arrivez comme une fleur sur la branche.

Avantage : Il suffit d'un ami qui tracte suffisamment fort. Pas besoin de gérer la montée.

Inconvénient : Vous allez devoir avoir un physique surhumain pour résister au choc de la traction brutale.



Fin du jeu ? Pas tout-à-fait. Poursuivons le jeu... dans notre tête !

Imaginons maintenant (c'est le principe du jeu dans la tête) que la branche de l'arbre est haute de millions de kilomètres (sans doute un séquoia mutant...), que la corde suffisamment longue et légère, que votre ami(e) n'est jamais fatigué, et que vous êtes des organismes résistant à l'espace² : l'ami(e) peut alors continuer de tirer, toujours avec une force juste supérieure à ce qu'il faut pour contrecarrer votre poids. Il vous amènera, tout en douceur, jusqu'à lui, sur sa branche **située largement au-delà de l'attraction terrestre**.

Vous aurez bien été **extrait(e) à l'attraction terrestre**, en conservant constamment une vitesse minimale.

² Ça fait beaucoup de choses à imaginer, mais c'est le principe d'une expérience de pensée : s'abstraire de tout ce qui rend l'expérience impossible en pratique, mais n'a pas de rapport direct avec l'expérience en question.

Aaah, on a bien joué. Prenons un goûter bien mérité, et revenons à notre vidéo.



Selon l'argument de la vidéo, tout objet qui souhaite se libérer de l'attraction terrestre **doit atteindre la vitesse fatidique de 11 km/s**. S'il ne l'atteint pas, il retombe inmanquablement sur Terre.

Paradoxe à tribord !

C'est malin, nous voilà maintenant face à une contradiction :

- D'un côté, on nous dit qu'il faudrait aller à Mach 33 (oui, 21 fois plus rapide qu'un avion Rafale en vitesse de fuite, et 50% plus rapide que la Station Spatiale Internationale sur son orbite) si on veut quitter la Terre
- De l'autre on a vu lors de notre jeu qu'on peut quitter l'attraction terrestre en allant aussi lentement qu'on veut. Et le fait qu'on ait qualifié cette expérience de « jeu » n'enlève rien à la qualité de l'observation.

Est-ce à dire que nous devons trouver qui raconte n'importe quoi, entre les professeurs et la physique ? N'exagérons pas. Il faut simplement « remettre les choses à plat et au carré »

Étude et levée du paradoxe

On a tous vu une fusée décoller de son pas de tir : cela se passe exactement tel que dans notre jeu.

Elle monte d'abord très lentement (forcément, elle part à l'arrêt), puis accélère pour atteindre des vitesses élevées à mesure que l'atmosphère oppose moins de résistance, et que la fusée accumule de l'énergie.

L'énergie de la fusée lui vient de son carburant, consommé par ses moteurs. Le fait qu'elle pourra décoller ou non dépend de la quantité de carburant qu'elle est capable de consommer.



Le but est de vaincre son propre poids. Si la fusée ne consomme un carburant suffisant pour lui apporter l'énergie nécessaire (les moteurs commencent à s'allumer), la poussée sera inférieure à son poids et la fusée ne bougera pas.

Si le carburant utilisé produit la même poussée que ce que représente son poids (les moteurs montent en régime), elle sera à la limite de bouger. Elle sera toujours posée, mais « en suspension ».

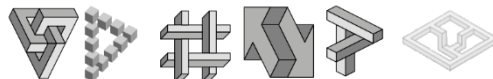
Si la fusée utilise le carburant nécessaire pour obtenir une poussée supérieure à ce que son poids représente (moteurs à plein régime), alors la poussée vers le haut sera supérieure à son poids, et la fusée décollera.



Trois conclusions s'enchaînent à partir de là :

- D'une part, il suffit que l'énergie fournie par le carburant consommé soit « juste au-dessus » de la valeur du poids pour que la fusée décolle. La seule chose qui va changer sera la façon dont la fusée va accélérer.
- Il découle la chose suivante si la fusée consomme à chaque instant une quantité de carburant qui assure une poussée juste supérieure à son poids, alors elle continuera à monter (la terre attire moins la fusée que ce que les moteurs la poussent en haut), mais très, très lentement, puisque la différence est dérisoire.
- Enfin, la conclusion de tout cela : il est possible, à chaque instant, que la fusée monte à une **vitesse ridiculement faible**, mais monte quand même. Par ailleurs, dans notre raisonnement, il n'y a pas de limite théorique de temps au-delà de laquelle la fusée devrait atteindre une vitesse donnée. La physique nous indique que ce mouvement de montée très lente peut se dérouler indéfiniment, donc à une altitude « infinie », et donc bien au-delà de l'attraction terrestre. Elle se sera donc bien extraite de l'attraction terrestre, avec une vitesse constamment ridiculement inférieure aux 40 000 km/h donnés au début.

Un paradoxe n'est jamais magique, ni surnaturel. Lorsque nous sommes face à un paradoxe, la solution est **toujours** la même : il y a une erreur quelque part. Cette erreur peut être une erreur de théorie, de raisonnement, de formulation, etc.



Trouvons l'erreur, nous résoudrons le paradoxeⁱⁱ.

Notre expérience de pensée semble cohérente : elle ne fait qu'exploiter les lois de la mécanique, validées depuis des siècles. De plus le cadre de cette expérience est tout ce qu'il y a de banal : deux personnes, une corde, un arbre.

Que dit la théorie ? Que la vitesse de la fusée doit être de 11 km/s, mais n'en dit pas plus. Des questions peuvent se poser : est-ce que cette vitesse est la vitesse de départ (au décollage) ? La vitesse d'arrivée (la fusée aura échappé à toute attraction terrestre quand elle aura atteint les 11 km/s mais pas avant) ? La vitesse de 11 km/s doit-elle être constante ? Est-ce que dès que la fusée atteint 11km/s, quelle que soit son altitude et sa trajectoire, alors elle a nécessairement échappé à l'attraction terrestre ? Ce qu'on nous dit de la théorie est très flou à ce niveau.

Un point que l'on peut remarquer : plus on est loin de la Terre (et donc plus loin de sa masse), moins la gravité est intense. Cela veut dire qu'à grande distance, la gravité est très faible, et ne nécessite certainement pas une telle vitesse.

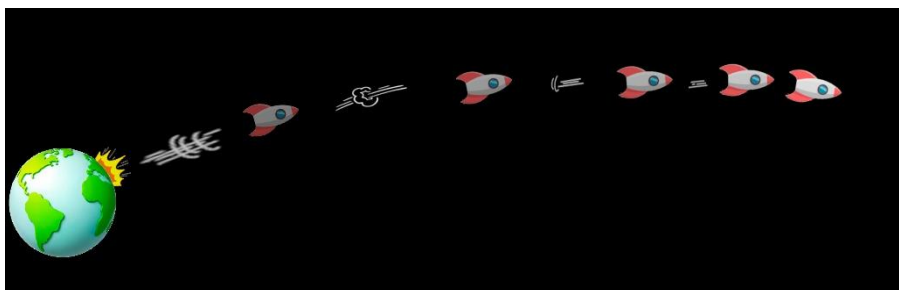
La vérité sur la vitesse de libération

Nous sommes maintenant outillés pour comprendre ce que signifie cette « vitesse de libération ».

Ce que dit précisément la théorie sur la vitesse de libération, c'est qu'elle se place dans le cas où l'ami tire un grand coup sur la corde pour donner toute l'énergie nécessaire au départ, et que nous atterrissions en douceur sur la branche, après avoir « rendu » toute notre vitesse à la gravité.

Partant de cette situation du jeu, la formulation réelle de la vitesse de libération devient « *La vitesse de libération est la vitesse à laquelle un objet doit être lancé à la verticale pour que, à force d'être ralenti par la gravité de plus en plus faible, il finit par s'arrêter pile lorsque l'attraction terrestre s'arrête* »

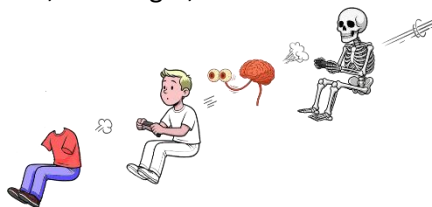
On donne donc toute l'énergie d'un coup à la fusée, et on le laisse vivre sa vie dans moteur, sans corde, sans rien (on parle de *trajectoire balistique*). La fusée part donc directement à 40 000 km/h ; puis elle est progressivement ralentie par l'attraction terrestre. À une distance suffisamment grande, le dernier « reliquat » d'attraction terrestre à cette altitude finira d'arrêter la fusée à un endroit où il n'y aura plus aucune gravité terrestre. La fusée n'a plus aucun poids, elle flotte dans le vide.



La fusée est catapultée à 40 000 km/h : la gravité la freine progressivement, mais de moins en moins, à mesure que la fusée est loin de la Terre. La fusée ralentit, pour s'arrêter pile à la limite de l'attraction terrestre.

Variations

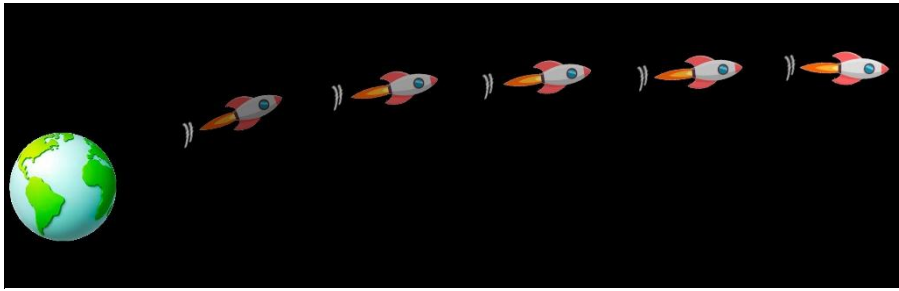
On l'a vu, la formulation de la théorie se place dans le cadre où on donne toute l'énergie nécessaire à la fusée au départ. Mais on sait bien que, pour passer de 0 à 40 000 km/h en une nanoseconde (pour ne pas dire un temps nul), il faudrait une puissance de catapulte totalement délirante, irréalisable en pratique. Par ailleurs, avec un choc d'une telle violence, la fusée, les satellites, les astronautes, etc., tout serait instantanément volatilisé, désintégré, anéanti³.



Mais la mécanique n'oblige absolument pas à délivrer toute l'énergie d'un seul coup : elle peut être distillée progressivement. Dans ce cas, l'apport énergétique étant moins grand, l'accélération sera d'autant plus faible. C'est la raison pour laquelle les fusées ont des moteurs : pour apporter l'énergie suffisante pendant suffisamment longtemps. C'est également pour cela que vous avez fait appel à un(e)

³ Dans l'aviation/spatial, on mesure généralement l'accélération en 'g'. 1 g = tomber en chute libre. Les astronautes d'Apollo se sont entraînés à supporter 7 g lors de leur retour sur Terre. On considère que 45-50 g sont mortels. Si on catapulte la fusée à sa vitesse de libération, on peut calculer que l'accélération subie serait de 1 121 687 831 276 g (oui : mille milliards de g !).

ami(e) pour vous monter sur la branche, plutôt qu'une catapulte au sol : pour qu'il vous hisse progressivement, au lieu de faire une pile de galettes de votre colonne vertébrale.



La fusée est équipée d'un moteur : l'énergie nécessaire pour échapper à l'attraction terrestre est délivrée progressivement, ce qui permet de contrôler sa vitesse pour arriver au même point que la fusée sans moteur, mais aussi lentement qu'on le souhaite.

Conclusion

Nous venons de montrer qu'une théorie, si juste soit-elle, doit être formulée correctement, sous peine d'introduire confusion et contresens pour le public.

Ainsi, la prochaine fois qu'on vous soutiendra que, « pour quitter l'attraction terrestre, il **faut** atteindre la vitesse minimale de 40 000 km/h », vous saurez quoi répondre : c'est une vitesse **théorique**, dans un cas très particulier (irréalisable sans doute jusqu'à la fin des temps), et sans aucune valeur pratique.

Dans un prochain billet, nous parlerons du cachalot qui vous saute sur la tête pour vous faire parvenir à la vitesse de plantation au fond de l'océan.

Notes

ⁱ Fabrizio Bucella est docteur en physique, professeur des universités en physique et mathématiques à l'Université Libre de Bruxelles. Il chronique la science pour la RTBF et La Libre Belgique. La qualité de sa vulgarisation, son ton particulier, sa façon de traiter ses sujets avec humour et de parler autant de questions fondamentales de physique que de situations du quotidien en fait un auteur et un intervenant apprécié de toutes les générations.

ⁱⁱ Voici listés ici quelques paradoxes célèbres, avec leur résolution. La présentation est extrêmement succincte pour ne pas se perdre en démonstration. La plupart d'entre elles se trouvent facilement en ligne.

1. Paradoxe de Zénon d'Elée : si vous voulez vous déplacer vers une destination, vous devez faire la moitié du trajet. Mais avant de faire la moitié du trajet, vous devez parcourir le quart. Pour parcourir le quart, vous devez parcourir le 8^{ème}, etc. Il y aura toujours la moitié de quelque chose à parcourir, si petit soit-elle. La conséquence est que vous n'arriverez jamais à destination, puisque vous ne serez jamais parti. Or on sait bien que ce n'est pas ce qui se passe.
Solution : le problème vient du 'etc.' : on sous-entend qu'on devra parcourir la moitié de la moitié de..., cela à l'infini. Or, « passer à l'infini » n'est jamais anodin en mathématique, et ne peut se faire sans conséquence. Ici, les mathématiques nous disent que si on ajoute $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, etc. **jusqu'à l'infini**, le résultat est 1 : la totalité du trajet.
2. Paradoxe de Galilée : Galilée a utilisé ce paradoxe pour réfuter la thèse d'Aristote selon laquelle les objets lourds tombent plus vite que les légers. Mais Galilée propose d'attacher un objet lourd avec un objet léger : l'objet attaché est plus lourd que n'importe quel des objets de départ, et donc devrait tomber plus vite. Mais l'objet léger attaché à l'objet lourd freine l'ensemble, « fait parachute ». Donc tombera moins vite que l'objet lourd seul. Ce qui est une contradiction.
Solution : la thèse d'Aristote est fausse, et la théorie doit être revue (les objets tombent tous intrinsèquement à la même vitesse, mais il faut prendre en compte les frottements de l'air)
3. Paradoxe des lunes de Jupiter : les lois de Kepler permettent de prédire très précisément les orbites des planètes, des lunes, et ce depuis des siècles. L'observation des lunes de Jupiter échappait à cette loi universelle : tantôt elles étaient « en avance », tantôt elles étaient « en retard » sur les prévisions.
Solution : le cadre théorique n'était pas complet : la lumière a une vitesse finie, contrairement à ce qu'on pensait. Si Jupiter est loin, la lumière met plus de temps à nous parvenir, et les lunes sont en retard. Si Jupiter est près, la lumière a moins de trajet jusqu'aux télescopes, et les lunes sont « en avance ».
4. Paradoxe des jumeaux : 2 jumeaux sont sur Terre. L'un part pour un voyage à une vitesse proche de celle de la lumière. La théorie dit qu'il retrouvera son jumeau bien plus vieux que lui lorsqu'il reviendra. Mais la relativité indique qu'il n'y a pas de point de vue privilégié : le jumeau resté sur Terre pourrait dire que c'est lui qui s'éloigne de son frère et non l'inverse. Alors c'est lui qui devrait être le plus jeune à leurs retrouvailles.
Solution : le raisonnement est faux : la théorie de la Relativité Restreinte ne s'applique qu'aux objets qui se déplacent l'un par rapport à l'autre « sans accélération ». Or le jumeau dans la fusée accélère, voyage, décélère, fait demi-tour (accélération circulaire), réaccélère, revient et décélère. Le cadre de l'expérience n'autorise absolument pas à utiliser la Relativité Restreinte telle quelle.

On peut en citer ainsi des dizaines.

Sources

Paradoxe de Zénon d'Elée: [sur Wikipedia](#)

Paradoxe (expérience de pensée) de Galilée : [sur Wikipedia](#)

Paradoxe des lunes de Jupiter : [sur Wikipedia](#)

Paradoxe des jumeaux : [sur Wikipedia](#)

La chaîne de Fabrizio Bucella : [sur YouTube](#) [sur Instagram](#)

La vitesse de libération : [sur Wikipedia](#)

Un site qui présente la vitesse de libération de façon erronée : [sur OrionPX](#) . On y lit : « La vitesse de libération représente la vitesse minimale à atteindre pour échapper à la gravité d'un astre. Ce qui veut dire qu'une fusée censée aller dans l'espace doit atteindre au minimum cette vitesse pour ne pas retomber sur Terre. ».

