

Conférence Maths C2+ : La modélisation de l'effet Magnus

Jérôme Bastien

Centre de Recherche et d'Innovation sur le Sport – Université Lyon I

Juin 2016

Document en ligne

Ce document est disponible à l'url suivante

<http://utbmjb.chez-alice.fr/MathC2+/index.html>

Voir http://utbmjb.chez-alice.fr/MathC2+/modelisation_magnus_transparents.pdf

Un exemple (vidéo)

Voir la deux vidéo suivante relative au lancer de poids :

<http://youtu.be/R4nCFtg4YfM>

Quel geste doit faire le sportif?

- Quelques paramètres gouvernent le mouvement.
- Les optimiser pour que la distance horizontale parcourue par le poids soit la plus importante possible.
- On choisit d'optimiser par rapport à l'angle de lancer.
- La trajectoire du poids est une parabole, que l'on sait déterminer.

Quel geste doit faire le sportif?

- Quelques paramètres gouvernent le mouvement.
- Les optimiser pour que la distance horizontale parcourue par le poids soit la plus importante possible.
- On choisit d'optimiser par rapport à l'angle de lancer.
- La trajectoire du poids est une parabole, que l'on sait déterminer.

Quel geste doit faire le sportif?

- Quelques paramètres gouvernent le mouvement.
- Les optimiser pour que la distance horizontale parcourue par le poids soit la plus importante possible.
- On choisit d'optimiser par rapport à l'angle de lancer.
- La trajectoire du poids est une parabole, que l'on sait déterminer.

Quel geste doit faire le sportif?

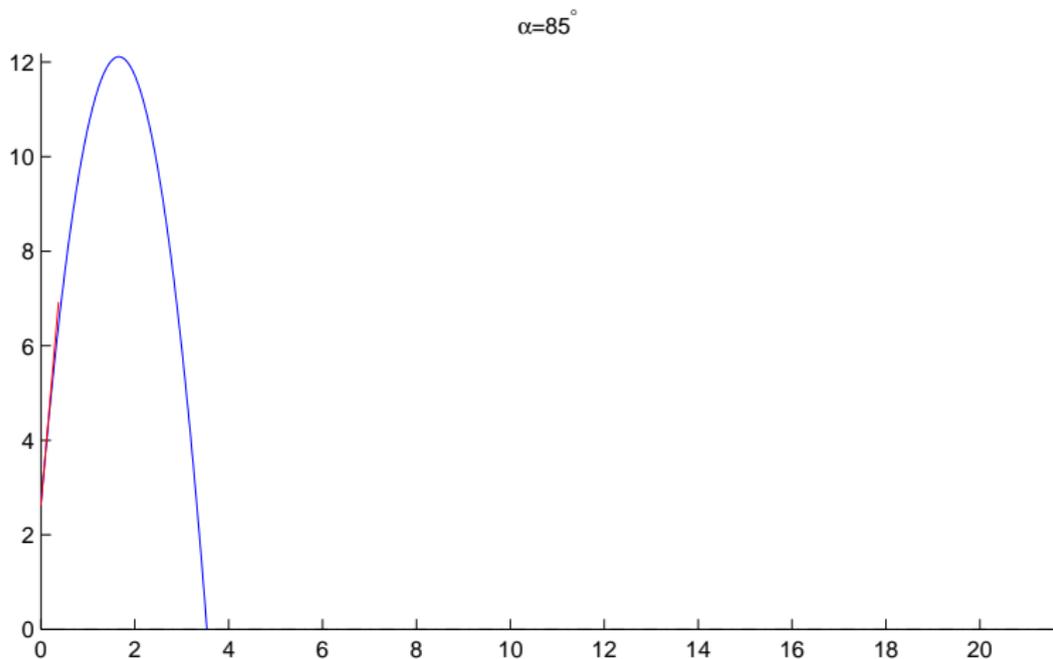
- Quelques paramètres gouvernent le mouvement.
- Les optimiser pour que la distance horizontale parcourue par le poids soit la plus importante possible.
- On choisit d'optimiser par rapport à l'angle de lancer.
- La trajectoire du poids est une parabole, que l'on sait déterminer.

Quelques trajectoires où l'angle varie

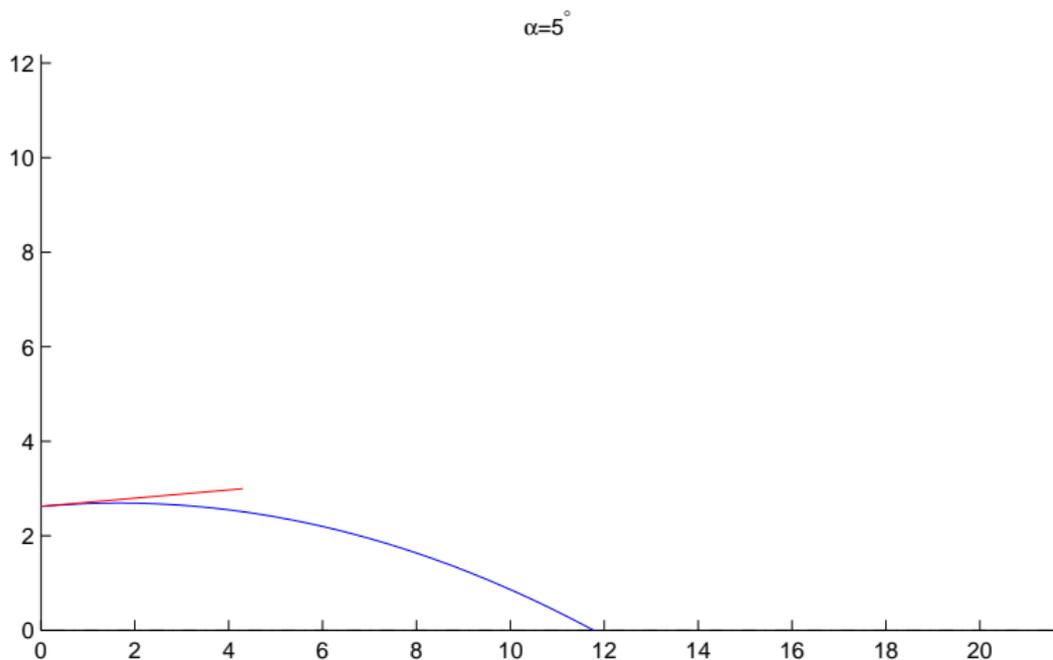
Sur les figures qui suivent, on montre les différentes paraboles calculées pour v_0 donné et l'angle d'envol, α variant dans $]0, 90[$.

▶ passer les figures

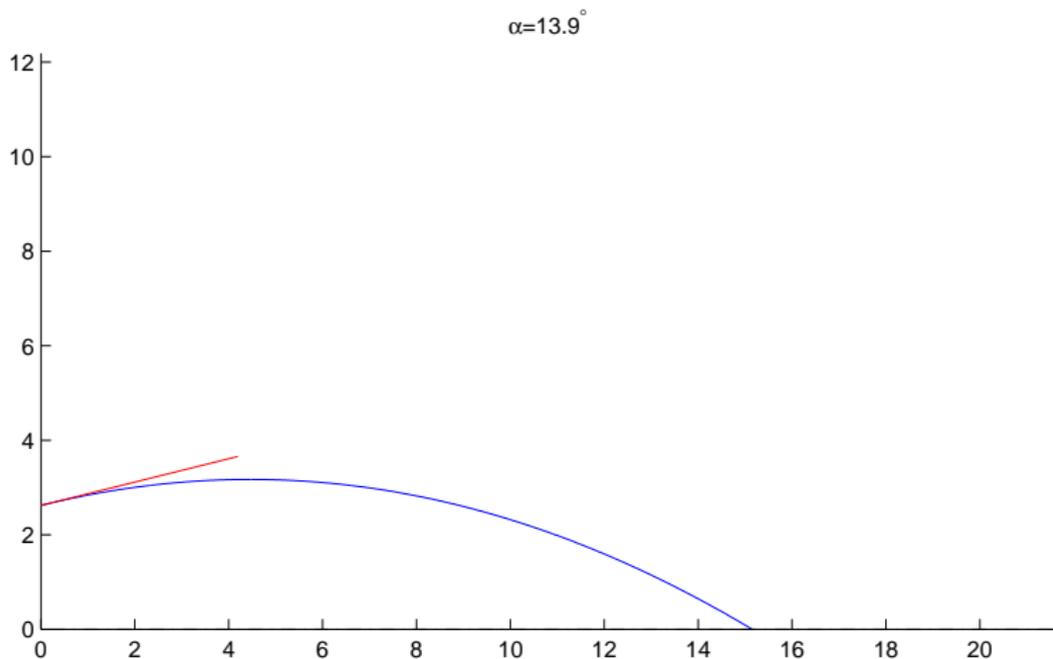
Quelques trajectoires où l'angle varie



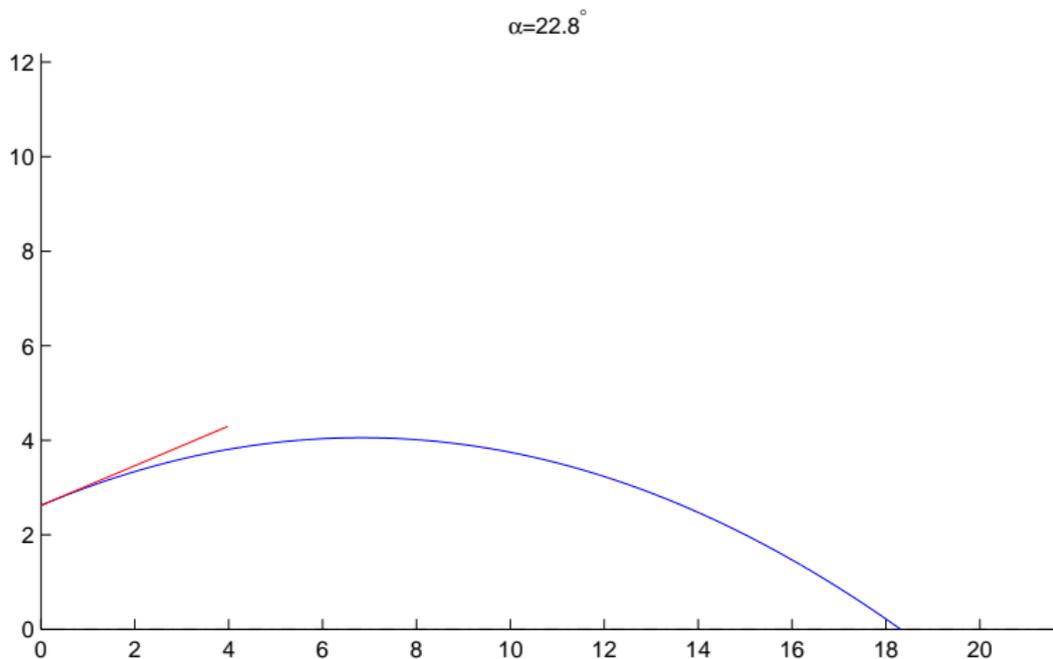
Quelques trajectoires où l'angle varie



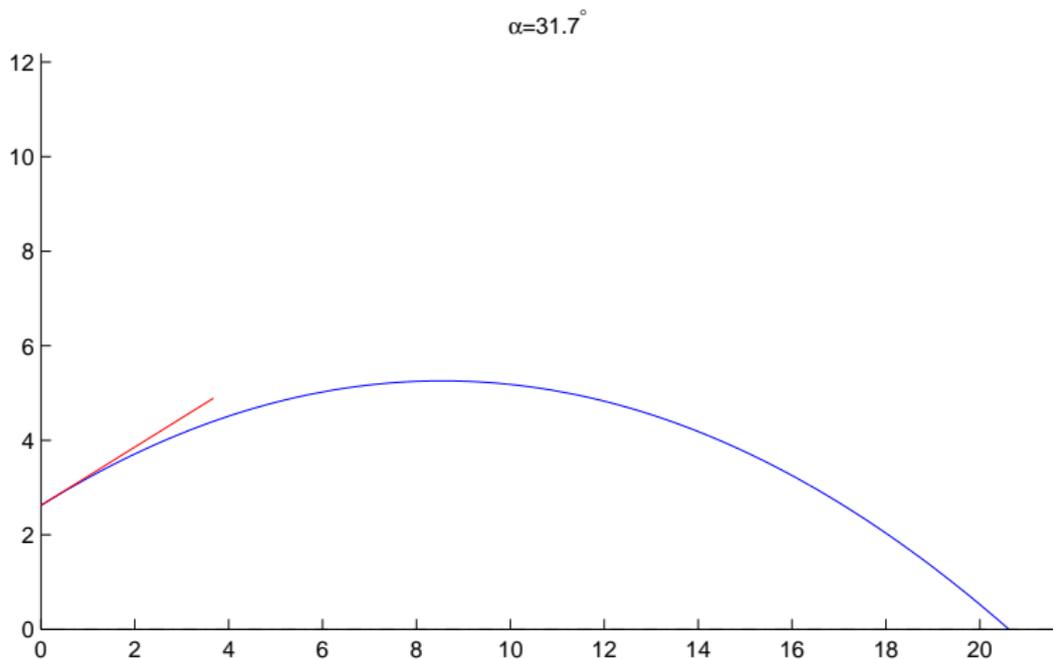
Quelques trajectoires où l'angle varie



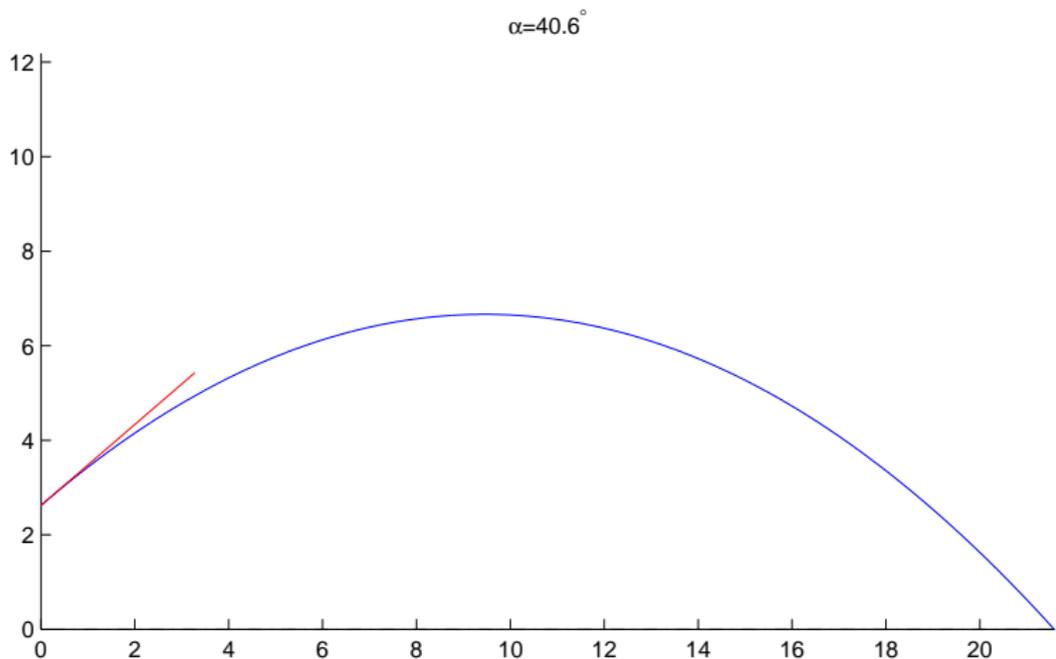
Quelques trajectoires où l'angle varie



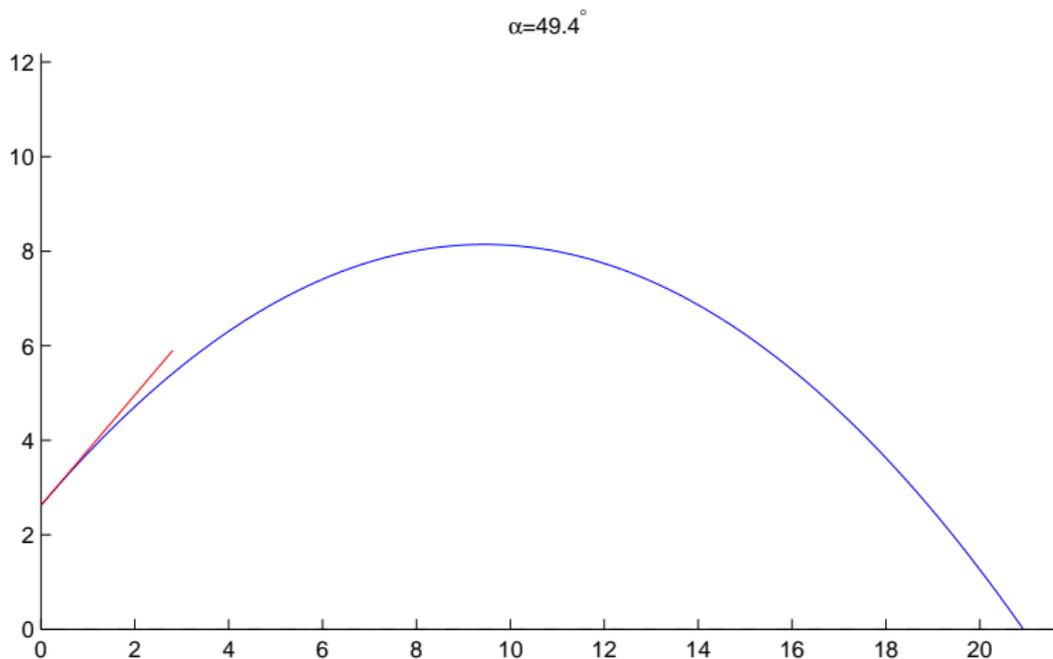
Quelques trajectoires où l'angle varie



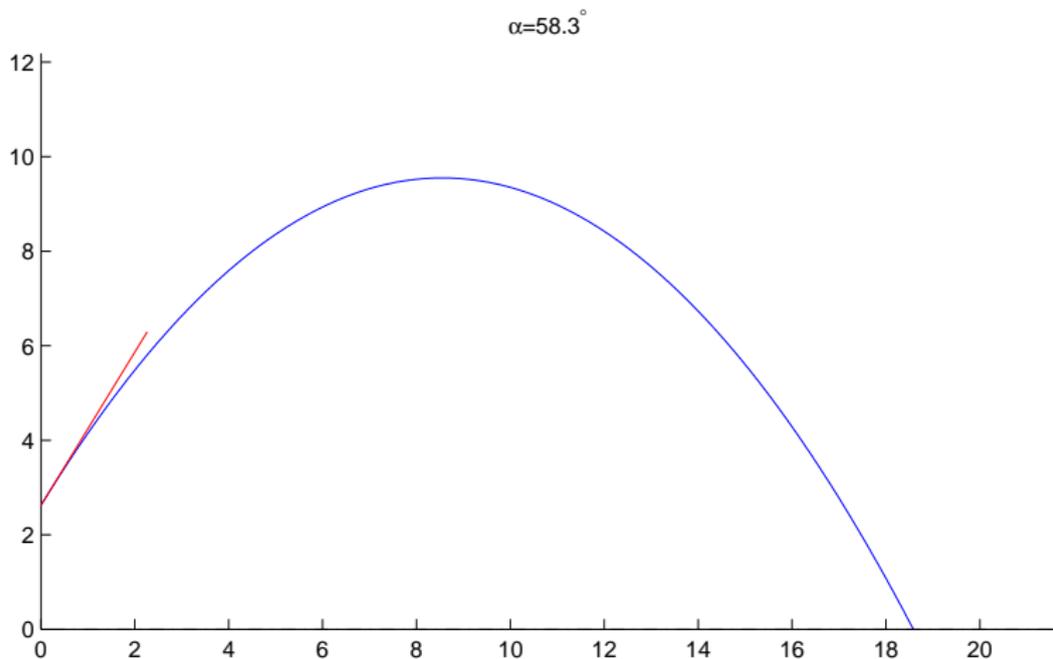
Quelques trajectoires où l'angle varie



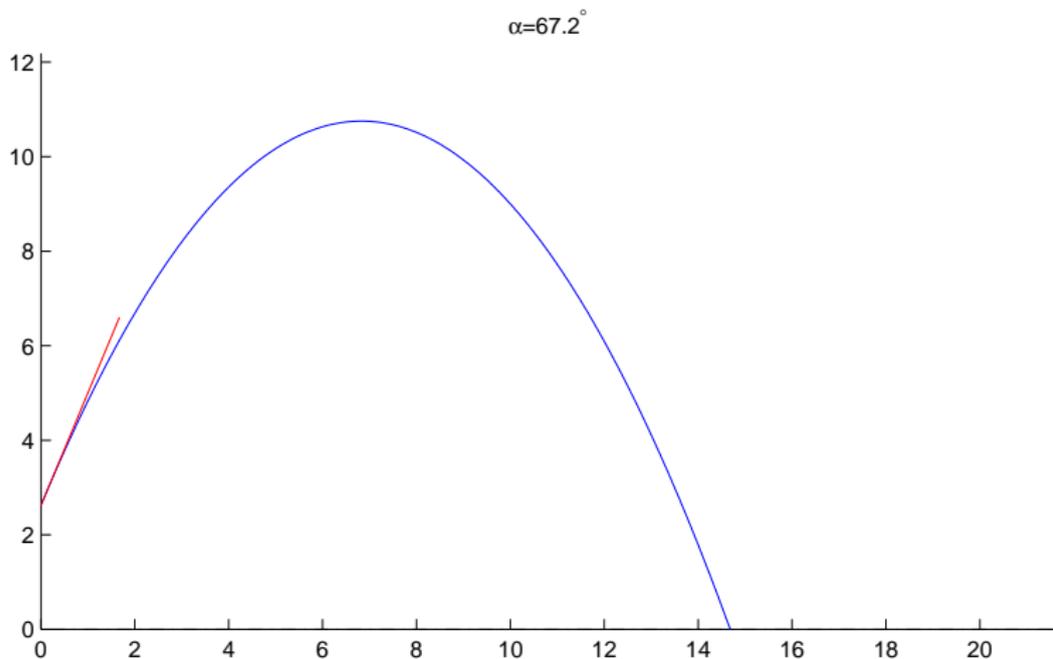
Quelques trajectoires où l'angle varie



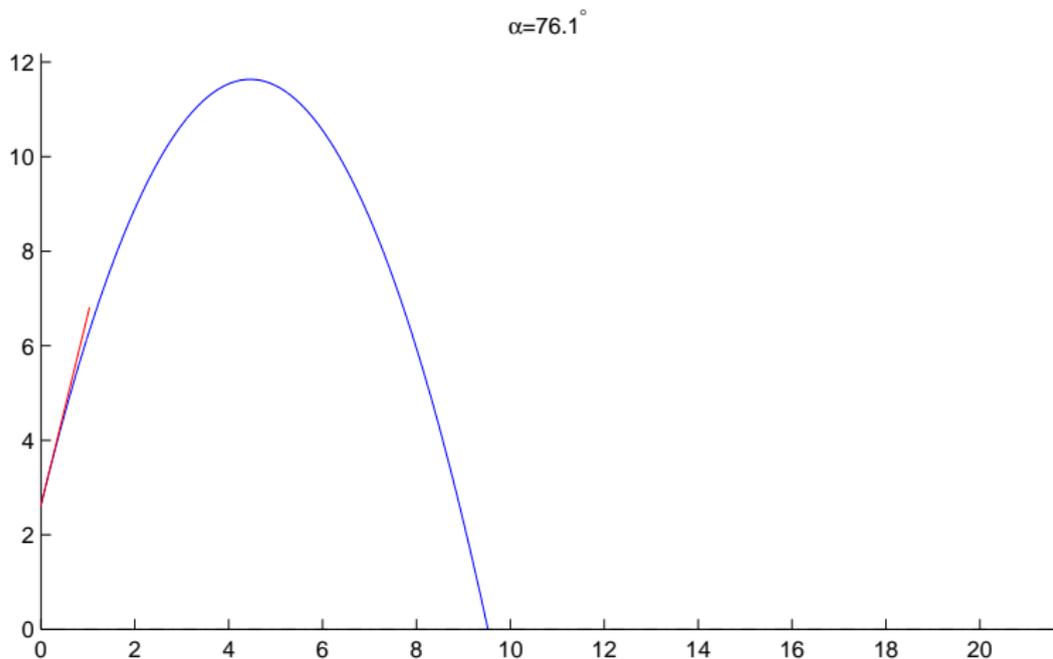
Quelques trajectoires où l'angle varie



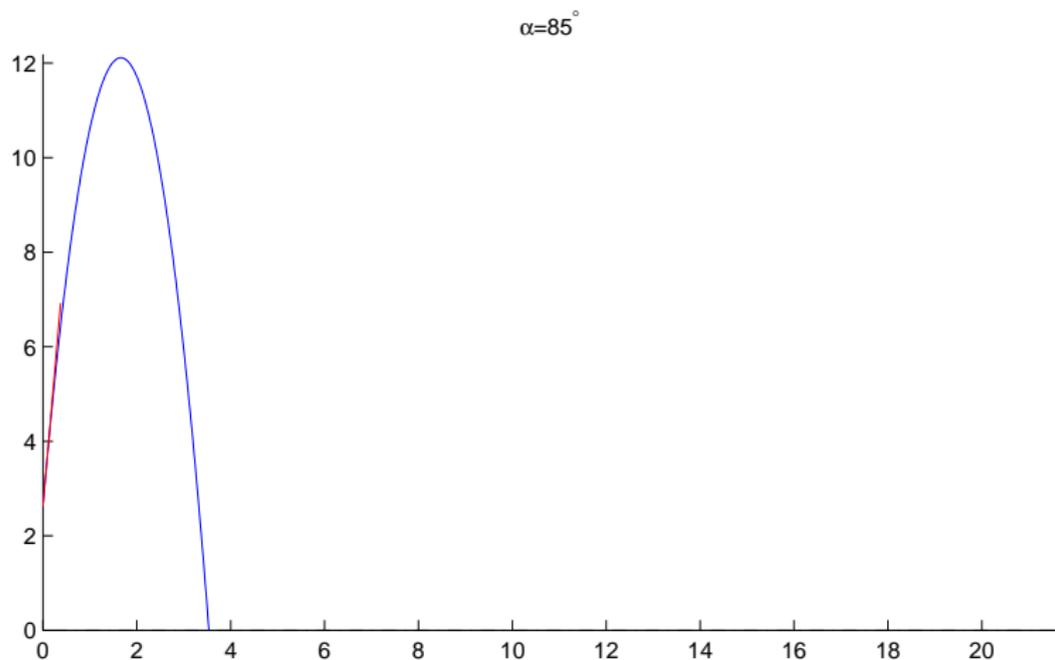
Quelques trajectoires où l'angle varie



Quelques trajectoires où l'angle varie



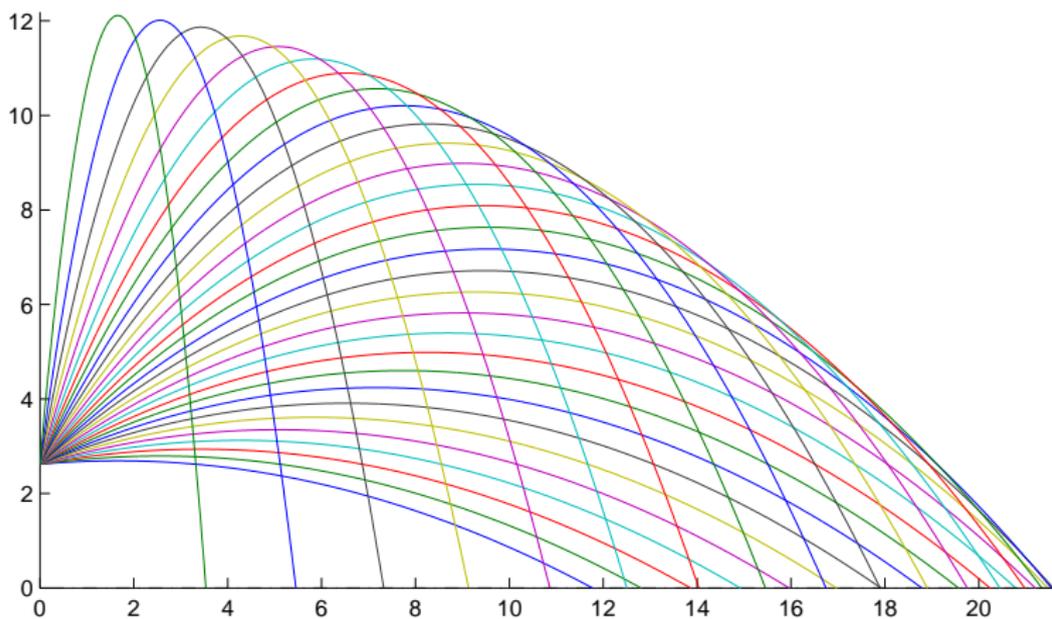
Quelques trajectoires où l'angle varie



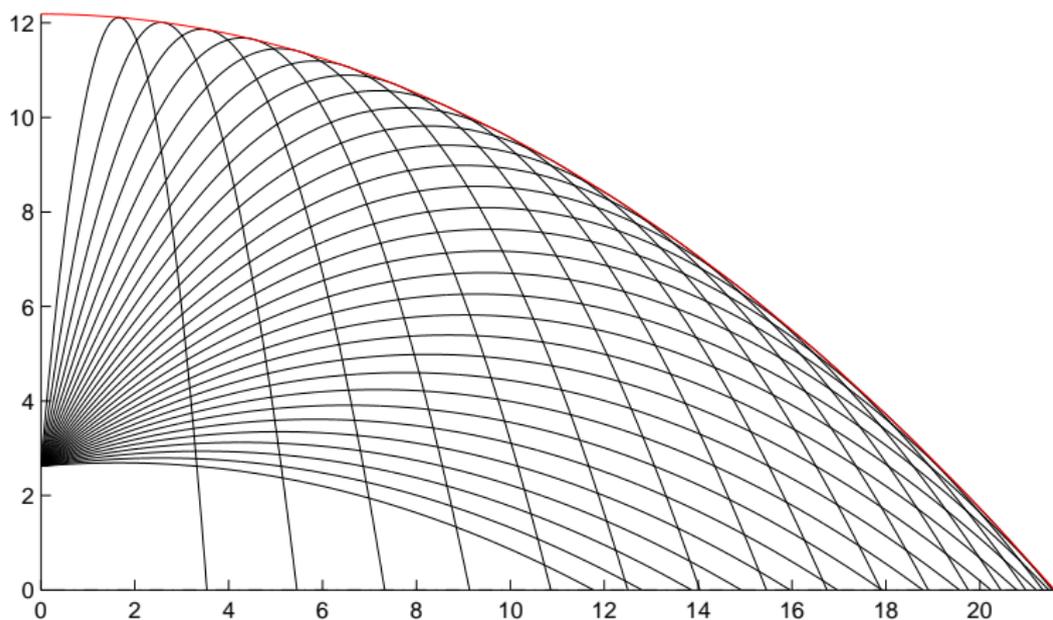
Quelques trajectoires où l'angle varie

▶ [revenir au début des figures](#)

Ensemble des trajectoires

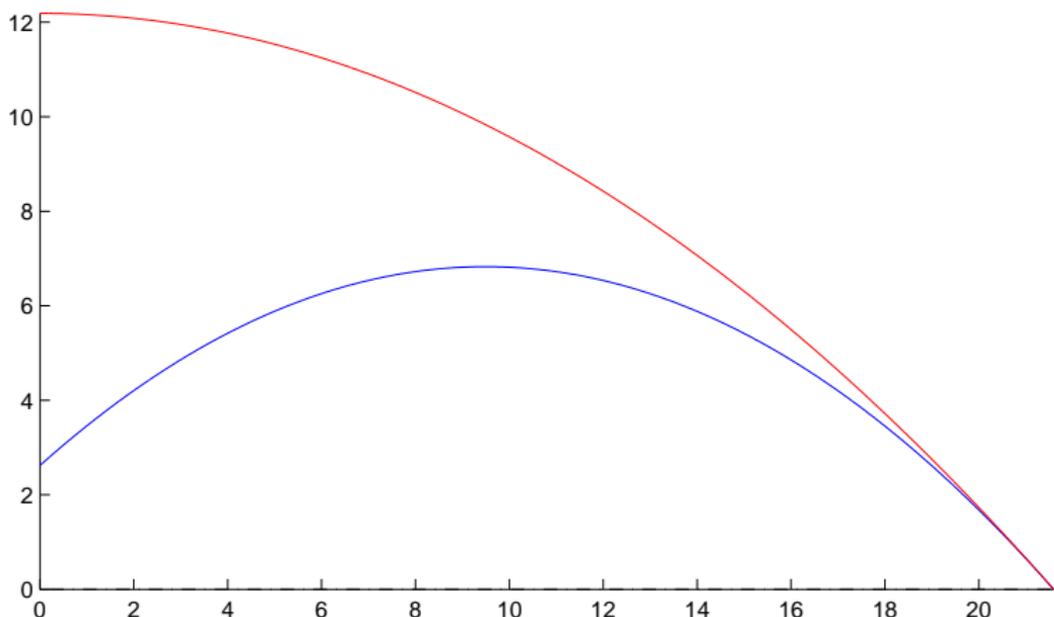


Ensemble des trajectoires avec la parabole de sûreté



Angle optimal

Après calculs, on peut montrer que l'angle optimal correspond à un angle de $\alpha = 41.54^\circ$ pour une distance égale à $x = 21.59$ m.



Début de la balistique

Les premiers calculs de balistique datent du seizième siècle.
Comme souvent, les calculs militaires ont donc servi à mieux comprendre des expériences « civiles », ici la chute libre !

Début de la balistique

Les premiers calculs de balistique datent du seizième siècle. Comme souvent, les calculs militaires ont donc servi à mieux comprendre des expériences « civiles », ici la chute libre !

Exemple de la météorologie

- Proviennent de calculs fort complexes.
- Exécutés sur de très puissants ordinateurs.
- Des équations (dites différentielles) gouvernent de façon simplifiée les comportements des masses d'air
- À partir d'observations, on détermine par le calcul les températures, pression, hydrométrie dont on déduit le temps.

Exemple de la météorologie

- Proviennent de calculs fort complexes.
- Exécutés sur de très puissants ordinateurs.
- Des équations (dites différentielles) gouvernent de façon simplifiée les comportements des masses d'air
- À partir d'observations, on détermine par le calcul les températures, pression, hydrométrie dont on déduit le temps.

Exemple de la météorologie

- Proviennent de calculs fort complexes.
- Exécutés sur de très puissants ordinateurs.
- Des équations (dites différentielles) gouvernent de façon simplifiée les comportements des masses d'air
- À partir d'observations, on détermine par le calcul les températures, pression, hydrométrie dont on déduit le temps.

Exemple de la météorologie

- Proviennent de calculs fort complexes.
- Exécutés sur de très puissants ordinateurs.
- Des équations (dites différentielles) gouvernent de façon simplifiée les comportements des masses d'air
- À partir d'observations, on détermine par le calcul les températures, pression, hydrométrie dont on déduit le temps.

Deux exemples vidéos

Voir les deux vidéo suivantes relatives à l'effet Magnus et son application au football :

<http://www.youtube.com/watch?v=IKto5H7cVQA>

<http://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/s--WslELNt4--/1348091010756291175.gif>

Deux exemples vidéos

Voir les deux vidéo suivantes relatives à l'effet Magnus et son application au football :

<http://www.youtube.com/watch?v=IKto5H7cVQA>

<http://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/s--WslELNt4--/1348091010756291175.gif>

Deux autres exemples vidéos

Deux autres vidéos :

<http://www.youtube.com/watch?v=m12ne6YzUuM>

http://www.dailymotion.com/video/x96ctk_vortex-sur-mirage-2000-visu-en-souf_tech

Quelles sont vos réactions face à ces vidéos. Les trajectoires du ballon ou du boomerang sont-elles des paraboles? Sauriez-vous l'expliquer?

Deux autres exemples vidéos

Deux autres vidéos :

<http://www.youtube.com/watch?v=m12ne6YzUuM>

http://www.dailymotion.com/video/x96ctk_vortex-sur-mirage-2000-visu-en-souf_tech

Quelles sont vos réactions face à ces vidéos. Les trajectoires du ballon ou du boomerang sont-elles des paraboles? Sauriez-vous l'expliquer?

Un solide simple

Un joueur de football donne un coup de pied dans un ballon, posé au sol. On suppose donc connus certains paramètres relatifs au ballon (position et vitesse initiales, masse, dimension ...) et on cherche à prédire la trajectoire du ballon.

Les observations de Kepler

Au cours du dix-septième siècle, l'astronome Kepler observe les trajectoires des astres autour du soleil ou de la terre et en déduit la nature elliptique de celles-ci.

Cela constitue une rupture avec les modèles précédents, qui considéraient les trajectoires comme circulaires.

Il en déduit aussi de façon empirique la loi des aires : lors de sa révolution autour du soleil, la vitesse d'un astre est plus grande quand il est proche du soleil.

Les observations de Kepler

Au cours du dix-septième siècle, l'astronome Kepler observe les trajectoires des astres autour du soleil ou de la terre et en déduit la nature elliptique de celles-ci.

Cela constitue une rupture avec les modèles précédents, qui considéraient les trajectoires comme circulaires.

Il en déduit aussi de façon empirique la loi des aires : lors de sa révolution autour du soleil, la vitesse d'un astre est plus grande quand il est proche du soleil.

Les observations de Kepler

Au cours du dix-septième siècle, l'astronome Kepler observe les trajectoires des astres autour du soleil ou de la terre et en déduit la nature elliptique de celles-ci.

Cela constitue une rupture avec les modèles précédents, qui considéraient les trajectoires comme circulaires.

Il en déduit aussi de façon empirique la loi des aires : lors de sa révolution autour du soleil, la vitesse d'un astre est plus grande quand il est proche du soleil.

Les lois de Newton

Élaborées entre 1679 et 1687, les lois de Newton constituent la base de la mécanique classique [GS86].

- 1 Une particule soumise à aucune force (ou à des forces dont la somme est nulle) a un mouvement de translation rectiligne uniforme.
- 2 L'accélération d'une particule soumise à des forces est égale à la somme des forces divisée par sa masse.

Ces lois vont fournir une équation (différentielle) permettant de connaître la trajectoire du ballon.

Les lois de Newton

Élaborées entre 1679 et 1687, les lois de Newton constituent la base de la mécanique classique [GS86].

- 1 Une particule soumise à aucune force (ou à des forces dont la somme est nulle) a un mouvement de translation rectiligne uniforme.
- 2 L'accélération d'une particule soumise à des forces est égale à la somme des forces divisée par sa masse.

Ces lois vont fournir une équation (différentielle) permettant de connaître la trajectoire du ballon.

Les lois de Newton

Élaborées entre 1679 et 1687, les lois de Newton constituent la base de la mécanique classique [GS86].

- 1 Une particule soumise à aucune force (ou à des forces dont la somme est nulle) a un mouvement de translation rectiligne uniforme.
- 2 L'accélération d'une particule soumise à des forces est égale à la somme des forces divisée par sa masse.

Ces lois vont fournir une équation (différentielle) permettant de connaître la trajectoire du ballon.

Les lois de Newton

Élaborées entre 1679 et 1687, les lois de Newton constituent la base de la mécanique classique [GS86].

- 1 Une particule soumise à aucune force (ou à des forces dont la somme est nulle) a un mouvement de translation rectiligne uniforme.
- 2 L'accélération d'une particule soumise à des forces est égale à la somme des forces divisée par sa masse.

Ces lois vont fournir une équation (différentielle) permettant de connaître la trajectoire du ballon.

Les planètes

Newton fait de plus l'hypothèse d'une force de gravitation en $1/r^2$.
Ces lois et l'hypothèse de la force de gravitation en $1/r^2$ ont permis à Newton de montrer la nature conique de certaines trajectoires de planètes connues de notre système solaire.
Il retrouve donc les observations de Kepler qui valident ainsi son hypothèse d'une force en $1/r^2$.
Les coniques, fort connues des Grecs, avaient disparu du champ des mathématiques !

Les planètes

Newton fait de plus l'hypothèse d'une force de gravitation en $1/r^2$. Ces lois et l'hypothèse de la force de gravitation en $1/r^2$ ont permis à Newton de montrer la nature conique de certaines trajectoires de planètes connues de notre système solaire.

Il retrouve donc les observations de Kepler qui valident ainsi son hypothèse d'une force en $1/r^2$.

Les coniques, fort connues des Grecs, avaient disparu du champ des mathématiques !

Les planètes

Newton fait de plus l'hypothèse d'une force de gravitation en $1/r^2$.
Ces lois et l'hypothèse de la force de gravitation en $1/r^2$ ont permis à Newton de montrer la nature conique de certaines trajectoires de planètes connues de notre système solaire.

Il retrouve donc les observations de Kepler qui valident ainsi son hypothèse d'une force en $1/r^2$.

Les coniques, fort connues des Grecs, avaient disparu du champ des mathématiques !

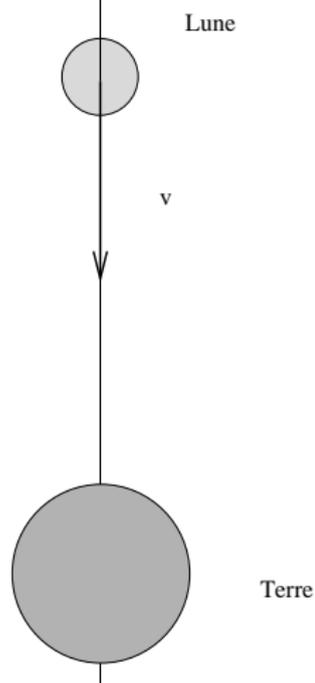
Les planètes

Newton fait de plus l'hypothèse d'une force de gravitation en $1/r^2$. Ces lois et l'hypothèse de la force de gravitation en $1/r^2$ ont permis à Newton de montrer la nature conique de certaines trajectoires de planètes connues de notre système solaire.

Il retrouve donc les observations de Kepler qui valident ainsi son hypothèse d'une force en $1/r^2$.

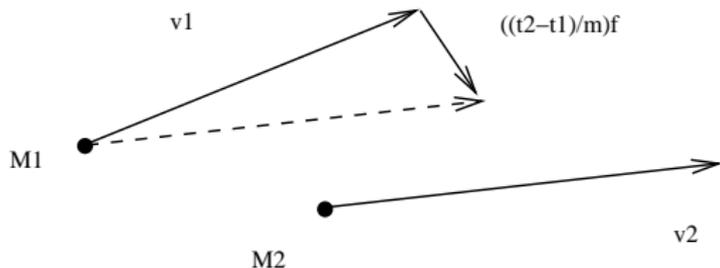
Les coniques, fort connues des Grecs, avaient disparu du champ des mathématiques !

La lune s'écrase sur la terre !



Si la lune était animée (à un instant donné) d'une vitesse nulle, ou exactement dirigée vers la terre, elle se serait écrasée sur la terre.

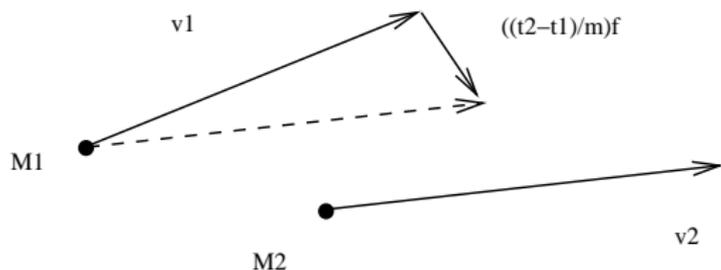
Modification de la vitesse par la force entre t_1 et t_2 .



Rappelons que, d'après la deuxième loi de Newton, un objet soumis à une force \vec{f} voit sa vitesse modifiée par la force.

L'accélération est approximativement une variation de vitesse et si on considère \vec{v}_1 (resp. \vec{v}_2) la vitesse du point M_1 (resp. M_2) à l'instant t_1 (resp. t_2), on a

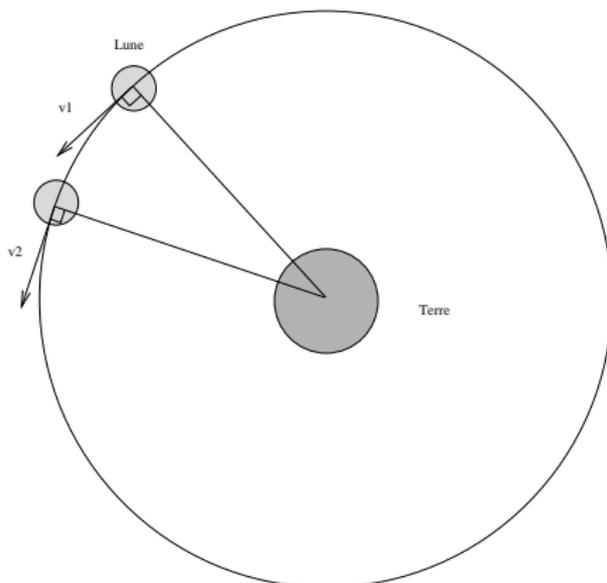
$$\vec{v}_2 \approx \vec{v}_1 + ((t_2 - t_1)/m)\vec{f}.$$

Modification de la vitesse par la force entre t_1 et t_2 .

Rappelons que, d'après la deuxième loi de Newton, un objet soumis à une force \vec{f} voit sa vitesse modifiée par la force. L'accélération est approximativement une variation de vitesse et si on considère \vec{v}_1 (resp. \vec{v}_2) la vitesse du point M_1 (resp. M_2) à l'instant t_1 (resp. t_2), on a

$$\vec{v}_2 \approx \vec{v}_1 + ((t_2 - t_1)/m)\vec{f}.$$

La lune tombe constamment sur la terre.



La lune a une trajectoire possède peu près circulaire. À chaque instant la lune tombe sur la terre, puisque sa vitesse est modifiée par l'attraction de la terre. Elle a une vitesse qui l'emporte dans son élan et elle reste à une distance à peu près constante de la terre.

Le ballon sans aucune force

Si le ballon ou le poids n'est soumis à aucune force, la première loi de Newton prévoit une trajectoire rectiligne uniforme.

Cette trajectoire est donc connue, grâce à la connaissance de la position initiale et de la vitesse initiale (qu'il conservera) et la formule

$$v = \frac{d}{t}.$$

Naturellement, cette hypothèse est trop simple, car la trajectoire réelle du ballon n'est pas celle-ci !

Le ballon sans aucune force

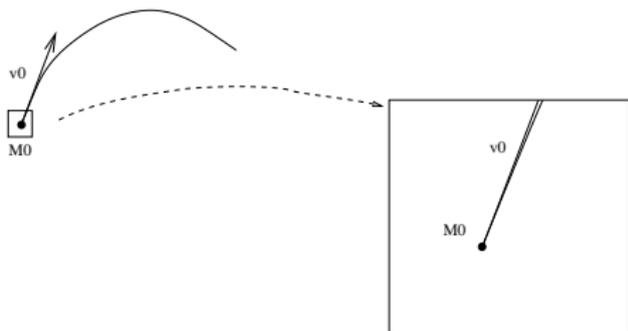
Si le ballon ou le poids n'est soumis à aucune force, la première loi de Newton prévoit une trajectoire rectiligne uniforme.

Cette trajectoire est donc connue, grâce à la connaissance de la position initiale et de la vitesse initiale (qu'il conservera) et la formule

$$v = \frac{d}{t}.$$

Naturellement, cette hypothèse est trop simple, car la trajectoire réelle du ballon n'est pas celle-ci !

La trajectoire au tout début du mouvement



Quelques soient les forces en présence, au tout début du mouvement, l'hypothèse de l'absence de force est toujours approximativement vraie !

Le ballon comme satellite de la terre !

Si on considère maintenant que le ballon est attiré par la terre avec une force en $1/r^2$, proportionnelle à la masse du ballon, où r est la distance qui va du centre de la terre au ballon, celui-ci est ... un satellite de la terre !

Ce sont les lois des mouvements newtoniens des planètes autour du soleil ou des satellites d'une planète.

Le ballon comme satellite de la terre !

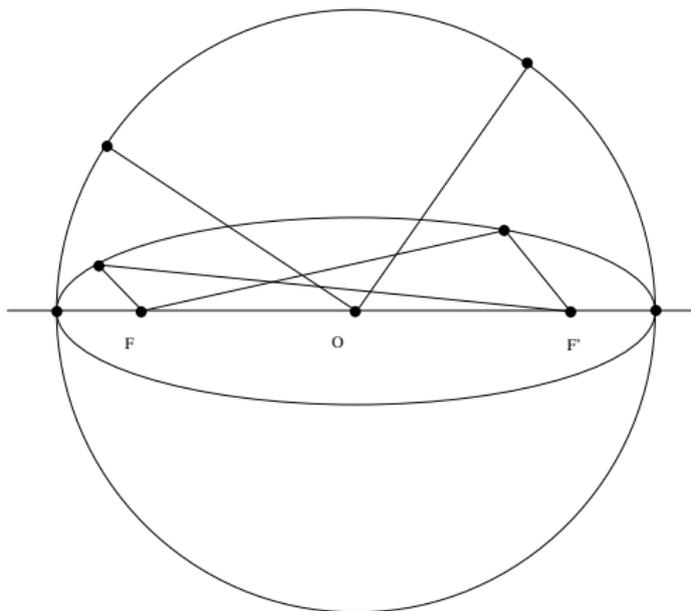
Si on considère maintenant que le ballon est attiré par la terre avec une force en $1/r^2$, proportionnelle à la masse du ballon, où r est la distance qui va du centre de la terre au ballon, celui-ci est ... un satellite de la terre !

Ce sont les lois des mouvements newtoniens des planètes autour du soleil ou des satellites d'une planète.

Le ballon comme satellite de la terre !

Si la force de gravitation est l'unique force agissant sur un point matériel alors sa trajectoire est une conique (ellipse, parabole ou hyperbole).

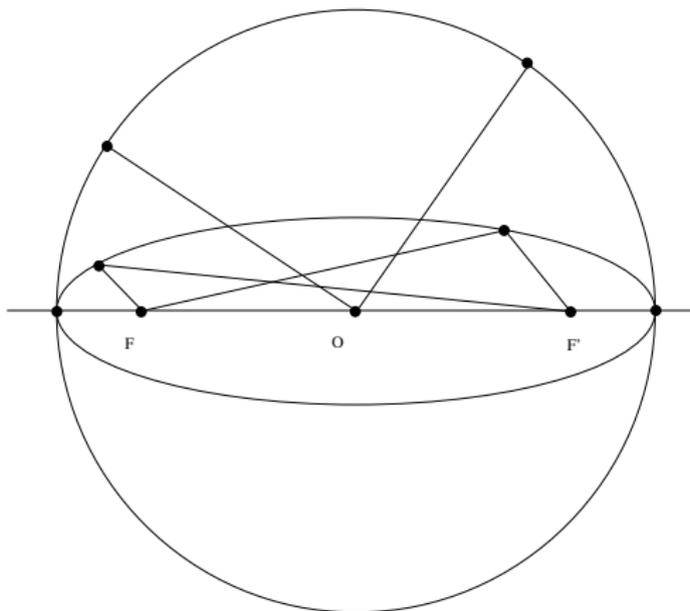
Définition de l'ellipse (et du cercle) par foyers



M appartient à l'ellipse si et seulement si $MF + F'M = C$.

Cas particulier du cercle : M appartient au cercle si et seulement si $2MO = C$.

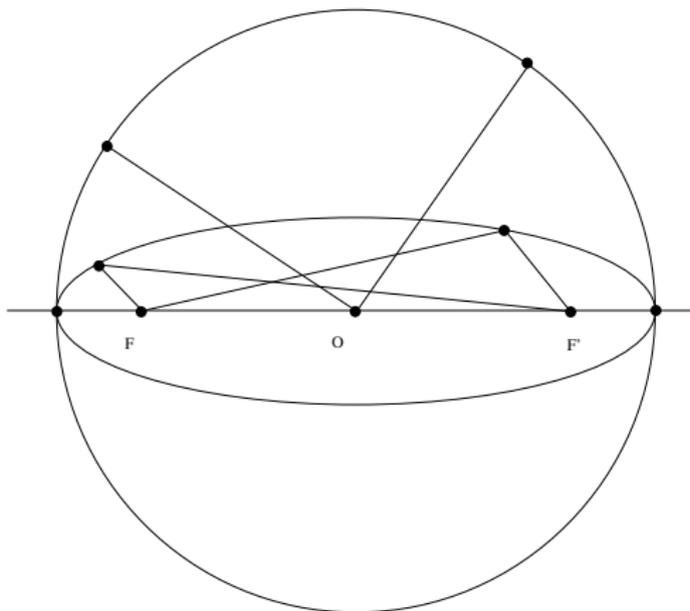
Définition de l'ellipse (et du cercle) par foyers



M appartient à l'ellipse si et seulement si $MF + F'M = C$.

Cas particulier du cercle : M appartient au cercle si et seulement si $2MO = C$.

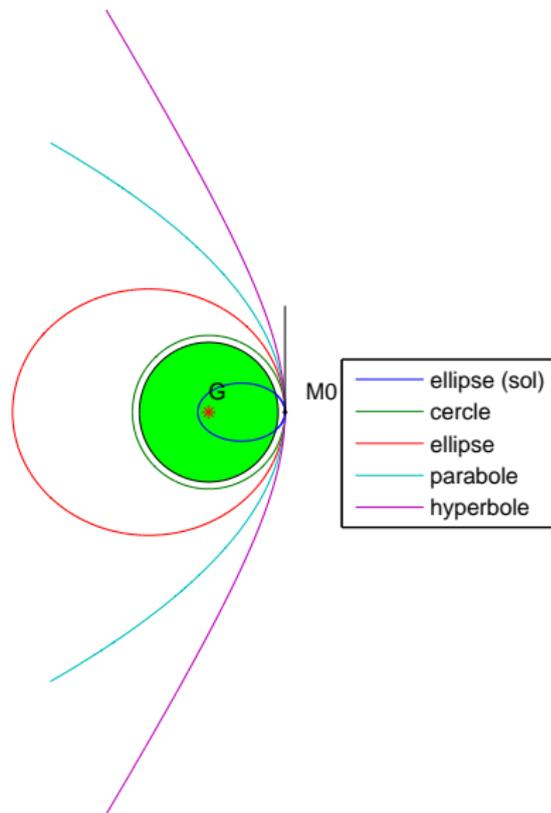
Définition de l'ellipse (et du cercle) par foyers



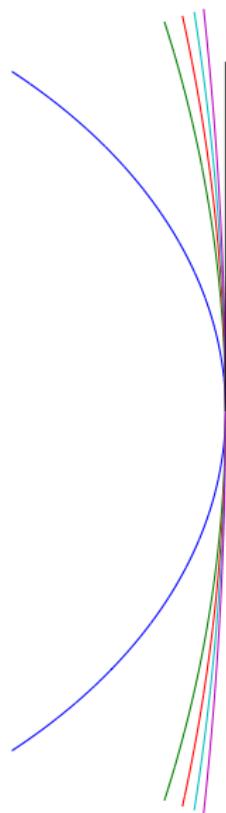
M appartient à l'ellipse si et seulement si $MF + F'M = C$.

Cas particulier du cercle : M appartient au cercle si et seulement si $2MO = C$.

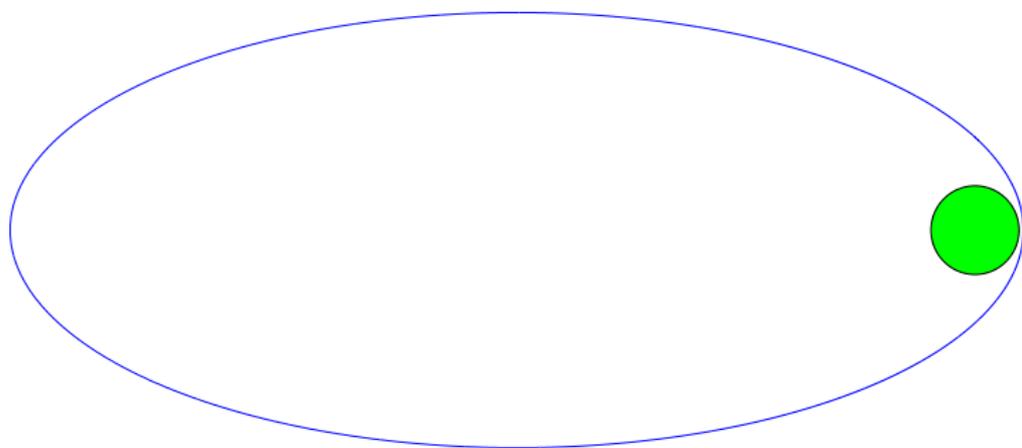
Les trois types de trajectoires possibles



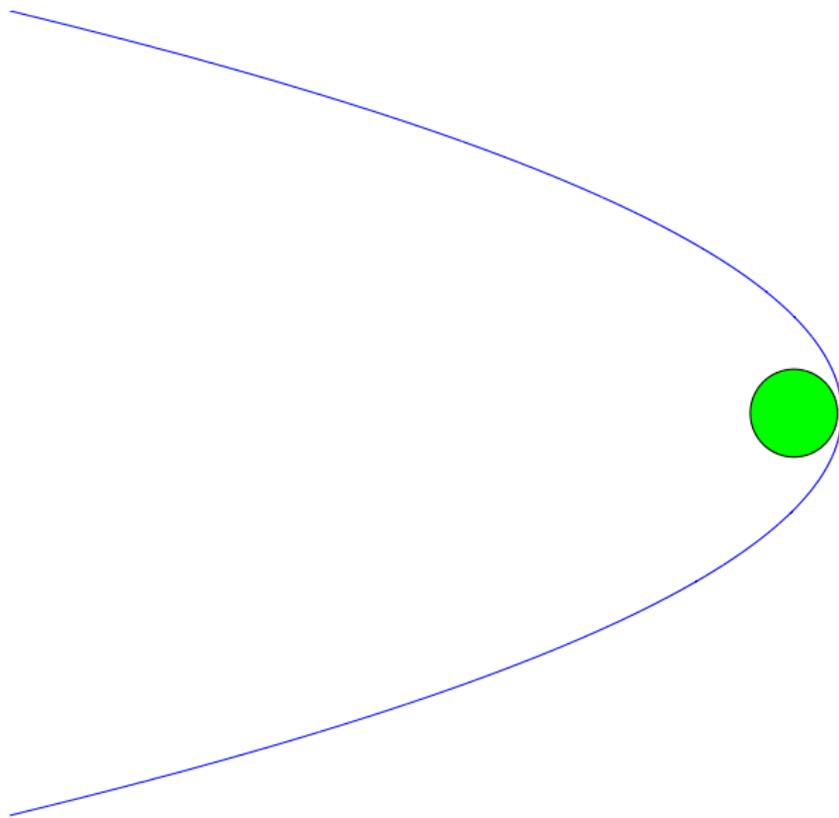
Au tout début du mouvement : presque rectiligne uniforme.



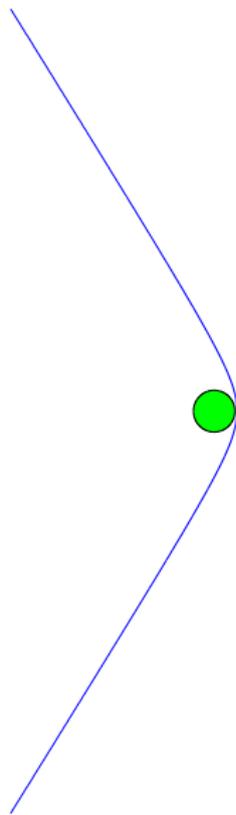
Une grande ellipse (excentricité proche de 1).



La parabole vue de plus loin.



L'hyperbole vue de plus loin.



D'autres conditions initiales (très faible vitesse)

Attention, ces calculs ne sont valables que si la seule force extérieure est la force de gravitation.

Ainsi, ils ne sont plus valables si d'autres forces ne sont plus négligeables (frottement de l'air ou action d'autres astres, comme la lune ou le soleil).

De plus les deux vitesses de libérations v_1 et v_2 sont de l'ordre de 30 000 et 40 000 km/h. Ainsi,

- pour le ballon de football ou le poids, seule la trajectoire correspondant aux très faibles vitesses est valide.
- pour les satellites, ces courbes décrivent le mouvement une fois qu'ils ont quitté l'atmosphère terrestre, après une phase de propulsion (avec fusée). Le satellite ne doit pas être trop éloigné de la terre (sinon l'influence de la Lune et du Soleil, non négligeables, doivent être pris en compte).

D'autres conditions initiales (très faible vitesse)

Attention, ces calculs ne sont valables que si la seule force extérieure est la force de gravitation.

Ainsi, ils ne sont plus valables si d'autres forces ne sont plus négligeables (frottement de l'air ou action d'autres astres, comme la lune ou le soleil).

De plus les deux vitesse de libérations v_1 et v_2 sont de l'ordre de 30 000 et 40 000 km/h. Ainsi,

- pour le ballon de football ou le poids, seule la trajectoire correspondant aux très faibles vitesses est valide.
- pour les satellites, ces courbes décrivent le mouvement une fois qu'ils ont quitté l'atmosphère terrestre, après une phase de propulsion (avec fusée). Le satellite ne doit pas être trop éloigné de la terre (sinon l'influence de la Lune et du Soleil, non négligeables, doivent être pris en compte).

D'autres conditions initiales (très faible vitesse)

Attention, ces calculs ne sont valables que si la seule force extérieure est la force de gravitation.

Ainsi, ils ne sont plus valables si d'autres forces ne sont plus négligeables (frottement de l'air ou action d'autres astres, comme la lune ou le soleil).

De plus les deux vitesses de libérations v_1 et v_2 sont de l'ordre de 30 000 et 40 000 km/h. Ainsi,

- pour le ballon de football ou le poids, seule la trajectoire correspondant aux très faibles vitesses est valide.
- pour les satellites, ces courbes décrivent le mouvement une fois qu'ils ont quitté l'atmosphère terrestre, après une phase de propulsion (avec fusée). Le satellite ne doit pas être trop éloigné de la terre (sinon l'influence de la Lune et du Soleil, non négligeables, doivent être pris en compte).

D'autres conditions initiales (très faible vitesse)

Attention, ces calculs ne sont valables que si la seule force extérieure est la force de gravitation.

Ainsi, ils ne sont plus valables si d'autres forces ne sont plus négligeables (frottement de l'air ou action d'autres astres, comme la lune ou le soleil).

De plus les deux vitesses de libérations v_1 et v_2 sont de l'ordre de 30 000 et 40 000 km/h. Ainsi,

- pour le ballon de football ou le poids, seule la trajectoire correspondant aux très faibles vitesses est valide.
- pour les satellites, ces courbes décrivent le mouvement une fois qu'ils ont quitté l'atmosphère terrestre, après une phase de propulsion (avec fusée). Le satellite ne doit pas être trop éloigné de la terre (sinon l'influence de la Lune et du Soleil, non négligeables, doivent être pris en compte).

D'autres conditions initiales (très faible vitesse)

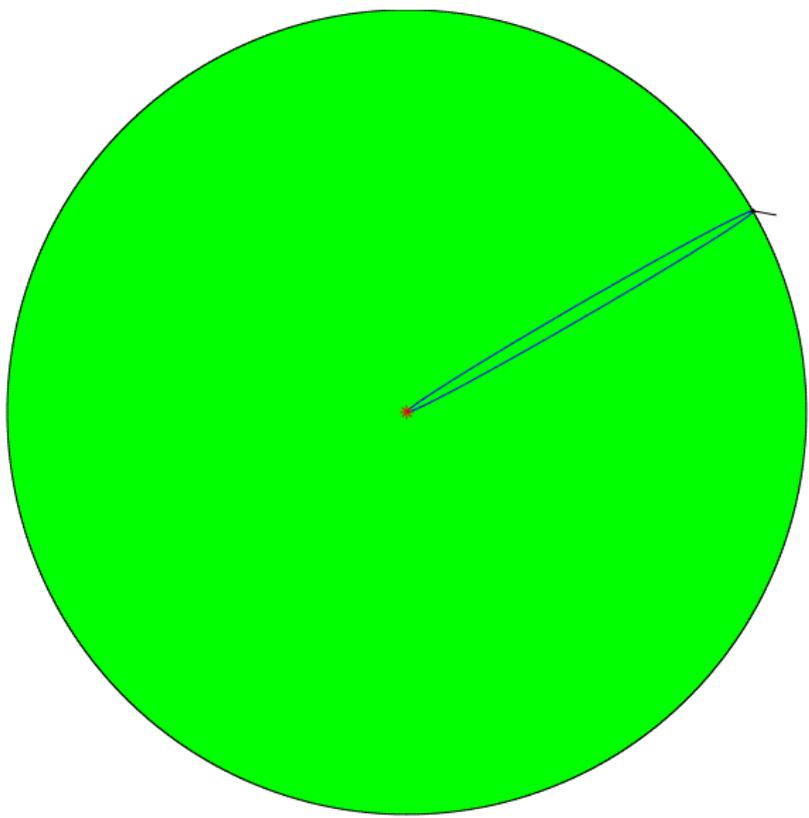
Attention, ces calculs ne sont valables que si la seule force extérieure est la force de gravitation.

Ainsi, ils ne sont plus valables si d'autres forces ne sont plus négligeables (frottement de l'air ou action d'autres astres, comme la lune ou le soleil).

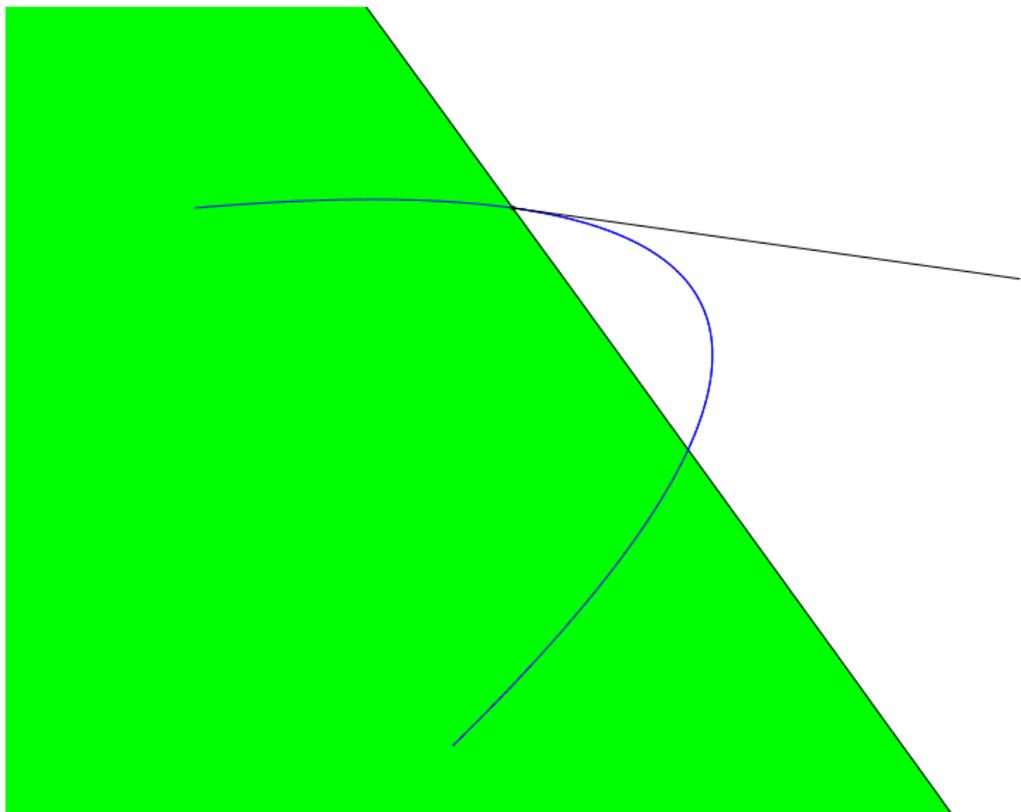
De plus les deux vitesses de libérations v_1 et v_2 sont de l'ordre de 30 000 et 40 000 km/h. Ainsi,

- pour le ballon de football ou le poids, seule la trajectoire correspondant aux très faibles vitesses est valide.
- pour les satellites, ces courbes décrivent le mouvement une fois qu'ils ont quitté l'atmosphère terrestre, après une phase de propulsion (avec fusée). Le satellite ne doit pas être trop éloigné de la terre (sinon l'influence de la Lune et du Soleil, non négligeables, doivent être pris en compte).

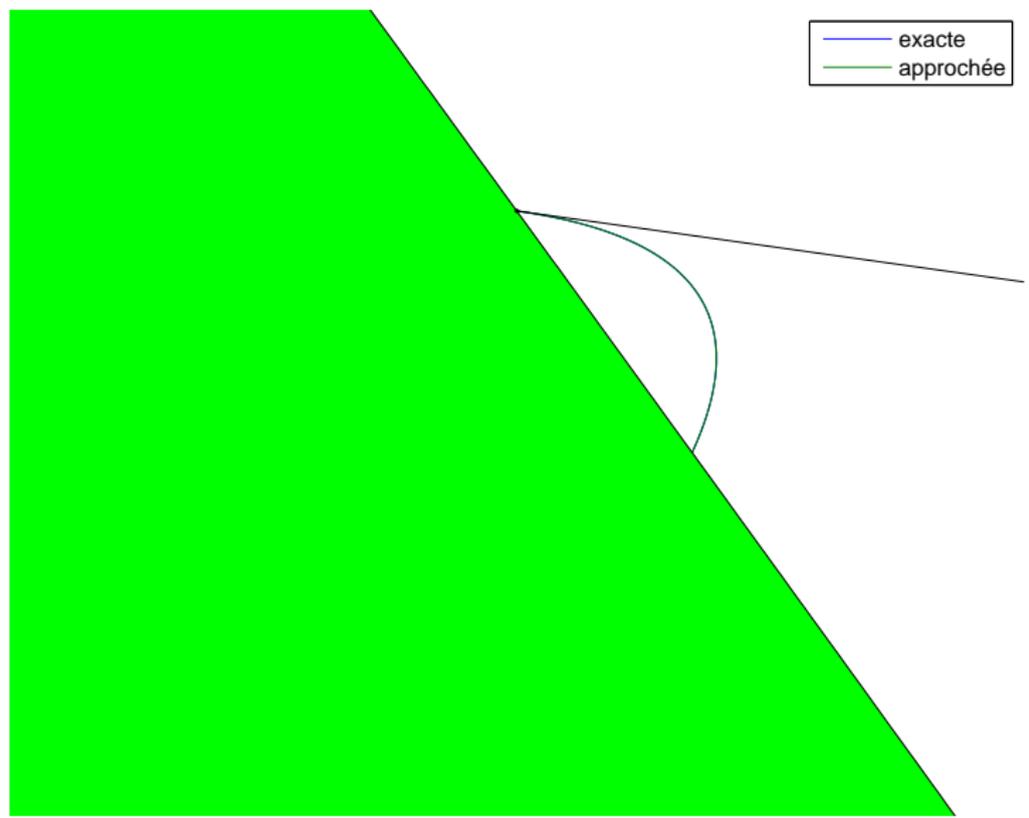
D'autres conditions initiales (très faible vitesse)



D'autres conditions initiales (très faible vitesse); zoom



D'autres conditions initiales (très faible vitesse); zoom



L'approximation usuelle de la force de gravitation uniforme

Comme dans les images précédentes, si les vitesses sont faibles, le mouvement du ballon ou du poids sera confiné dans une zone de petite dimension.

Ainsi, la force appliquée au ballon, force centripète et non uniforme en $1/r^2$, peut être remplacée par une force uniforme, verticale, tournée vers le bas.

On est dans le cas de la chute libre et la trajectoire est une parabole.

L'approximation usuelle de la force de gravitation uniforme

Comme dans les images précédentes, si les vitesses sont faibles, le mouvement du ballon ou du poids sera confiné dans une zone de petite dimension.

Ainsi, la force appliquée au ballon, force centripète et non uniforme en $1/r^2$, peut être remplacée par une force uniforme, verticale, tournée vers le bas.

On est dans le cas de la chute libre et la trajectoire est une parabole.

L'approximation usuelle de la force de gravitation uniforme

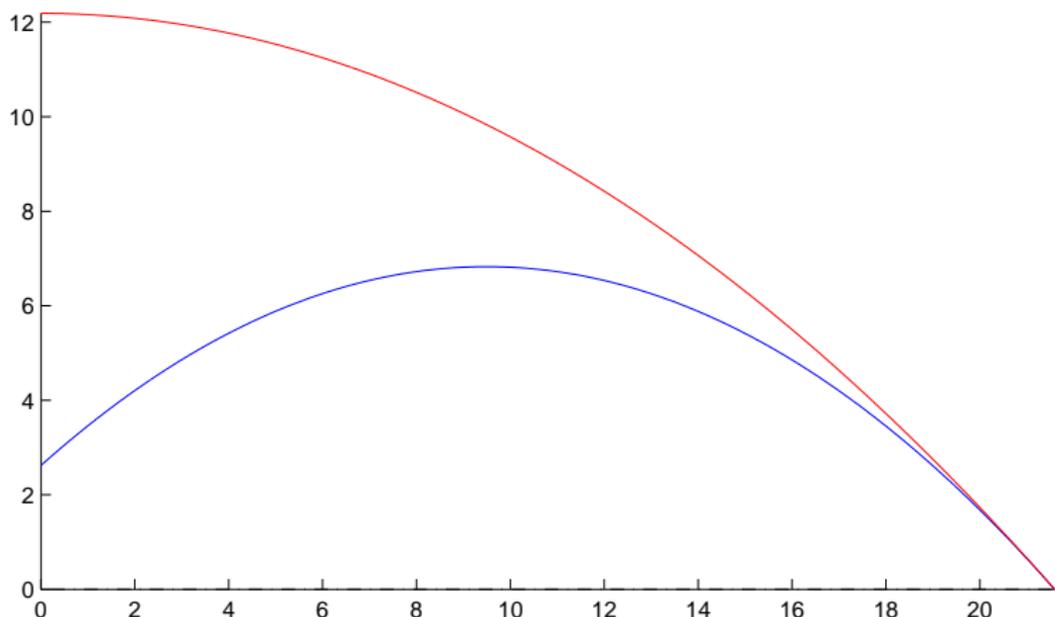
Comme dans les images précédentes, si les vitesses sont faibles, le mouvement du ballon ou du poids sera confiné dans une zone de petite dimension.

Ainsi, la force appliquée au ballon, force centripète et non uniforme en $1/r^2$, peut être remplacée par une force uniforme, verticale, tournée vers le bas.

On est dans le cas de la chute libre et la trajectoire est une parabole.

Angle optimal

Après calculs, on peut montrer que l'angle optimal correspond à un angle de $\alpha = 41.54^\circ$ pour une distance égale à $x = 21.59$ m.



Idées du calcul

L'accélération, d'après la seconde lois de Newton, est uniforme verticale, dirigée vers le bas.

Ainsi, la vitesse horizontale est constante, tandis que la vitesse verticale est linéaire en fonction du temps ; si la vitesse verticale initiale est positive, elle est d'abord positive (tournée vers le haut) puis négative (tournée vers le bas).

On en déduit que l'abscisse du ballon est linéaire tandis que l'ordonnée du ballon est quadratique en fonction du temps :

$$\begin{aligned}x(t) &= v_{0x}t, \\y(t) &= -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t.\end{aligned}$$

Connaissant la position et la vitesse initiale du ballon, on connaît donc sa position (et sa vitesse) à tout instant.

Idées du calcul

L'accélération, d'après la seconde lois de Newton, est uniforme verticale, dirigée vers le bas.

Ainsi, la vitesse horizontale est constante, tandis que la vitesse verticale est linéaire en fonction du temps ; si la vitesse verticale initiale est positive, elle est d'abord positive (tournée vers le haut) puis négative (tournée vers le bas).

On en déduit que l'abscisse du ballon est linéaire tandis que l'ordonnée du ballon est quadratique en fonction du temps :

$$\begin{aligned}x(t) &= v_{0x}t, \\y(t) &= -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t.\end{aligned}$$

Connaissant la position et la vitesse initiale du ballon, on connaît donc sa position (et sa vitesse) à tout instant.

Idées du calcul

L'accélération, d'après la seconde lois de Newton, est uniforme verticale, dirigée vers le bas.

Ainsi, la vitesse horizontale est constante, tandis que la vitesse verticale est linéaire en fonction du temps ; si la vitesse verticale initiale est positive, elle est d'abord positive (tournée vers le haut) puis négative (tournée vers le bas).

On en déduit que l'abscisse du ballon est linéaire tandis que l'ordonnée du ballon est quadratique en fonction du temps :

$$\begin{aligned}x(t) &= v_{0x}t, \\y(t) &= -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t.\end{aligned}$$

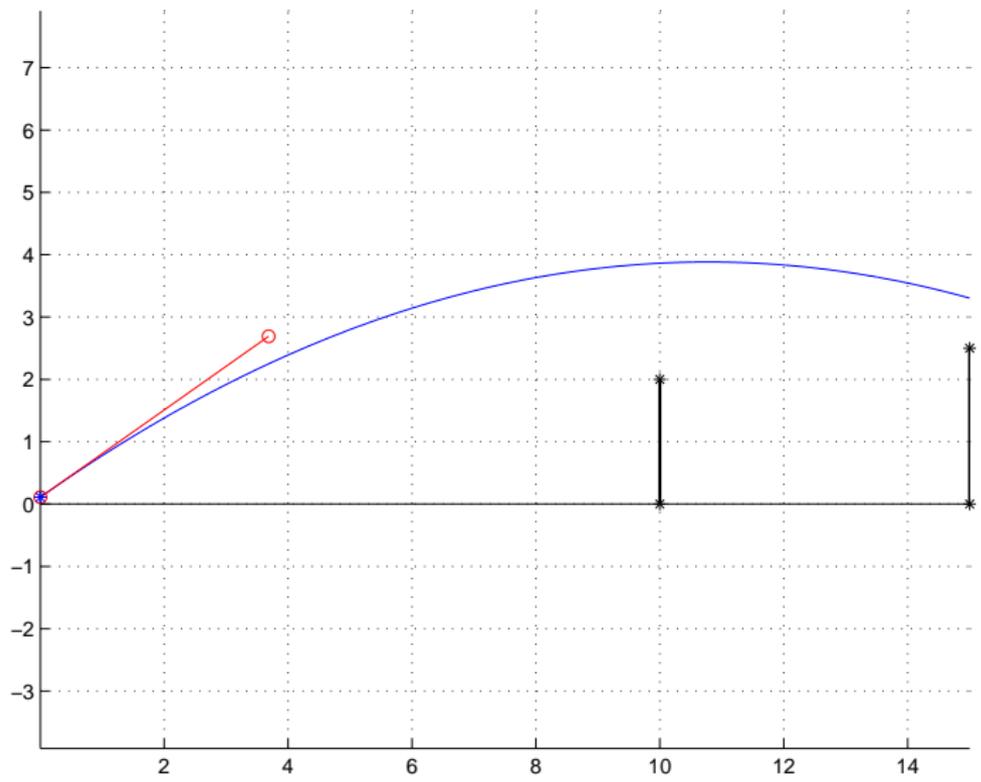
Connaissant la position et la vitesse initiale du ballon, on connaît donc sa position (et sa vitesse) à tout instant.

Exemple : les données (football)

On se place dans le cadre du football. Le joueur est situé à une distance $d_2 = 15$ m de la ligne de but et à une distance $d_1 = 10$ m du mur formé par les joueurs adverses. La hauteur h_1 du mur est évaluée à $h_1 = 2$ m et celle des buts à $h_2 = 2.5$ m. On supposera que la la vitesse initiale du ballon est de 15 ms^{-1} et son angle d'envol de 35° . Le rayon du ballon est égal à $R = 0.11$ m.

Exemple : la courbe

Dessin de la parabole de la chute libre



Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

La courbe précédente n'est pas conforme avec les tirs habituels, qui passent sous la barre.

En effet, cette modélisation ne prend en compte que le poids du ballon, alors qu'il frotte sur l'air visqueux environnant.

Pour simplifier, on suppose que la rotation de la balle se fait autour d'un axe horizontal.

Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

La courbe précédente n'est pas conforme avec les tirs habituels, qui passent sous la barre.

En effet, cette modélisation ne prend en compte que le poids du ballon, alors qu'il frotte sur l'air visqueux environnant.

Pour simplifier, on suppose que la rotation de la balle se fait autour d'un axe horizontal.

Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

La courbe précédente n'est pas conforme avec les tirs habituels, qui passent sous la barre.

En effet, cette modélisation ne prend en compte que le poids du ballon, alors qu'il frotte sur l'air visqueux environnant.

Pour simplifier, on suppose que la rotation de la balle se fait autour d'un axe horizontal.

Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

« Lorsqu'une balle en rotation se déplace dans l'air, elle va par frottement modifier la vitesse du courant d'air autour d'elle. L'effet sera dissymétrique : d'un côté la balle entraîne l'air qui accélère. De ce côté la pression diminue. De l'autre côté la balle freine l'écoulement d'air et la pression augmente. On aura donc une différence de pression et la balle va se déplacer du côté où la pression est plus faible. Selon la vitesse de rotation de la balle, la position des points où la vitesse est respectivement minimale et maximale (et donc le sens de la force appliquée) varie.

Par exemple, si la balle roule au sol, la vitesse relative de l'air par rapport à sa surface supérieure augmentera. Si elle tourne de la même façon en l'air, la vitesse de l'air par rapport à sa surface inférieure diminuera. On aura une légère surpression en haut et une légère dépression en bas de la balle, ce qui la plongera plus vite vers le sol. »

Cet effet est utilisé au tennis, golf,

Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

« Lorsqu'une balle en rotation se déplace dans l'air, elle va par frottement modifier la vitesse du courant d'air autour d'elle. L'effet sera dissymétrique : d'un côté la balle entraîne l'air qui accélère. De ce côté la pression diminue. De l'autre côté la balle freine l'écoulement d'air et la pression augmente. On aura donc une différence de pression et la balle va se déplacer du côté où la pression est plus faible. Selon la vitesse de rotation de la balle, la position des points où la vitesse est respectivement minimale et maximale (et donc le sens de la force appliquée) varie.

Par exemple, si la balle roule au sol, la vitesse relative de l'air par rapport à sa surface supérieure augmentera. Si elle tourne de la même façon en l'air, la vitesse de l'air par rapport à sa surface inférieure diminuera. On aura une légère surpression en haut et une légère dépression en bas de la balle, ce qui la plongera plus vite vers le sol. »

Cet effet est utilisé au tennis, golf,

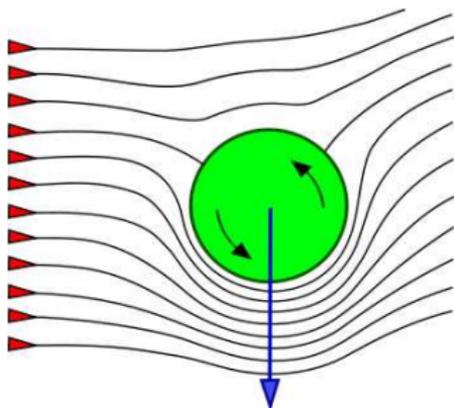
Prise en compte de la force de frottement de l'air (effet Magnus)

« Lorsqu'une balle en rotation se déplace dans l'air, elle va par frottement modifier la vitesse du courant d'air autour d'elle. L'effet sera dissymétrique : d'un côté la balle entraîne l'air qui accélère. De ce côté la pression diminue. De l'autre côté la balle freine l'écoulement d'air et la pression augmente. On aura donc une différence de pression et la balle va se déplacer du côté où la pression est plus faible. Selon la vitesse de rotation de la balle, la position des points où la vitesse est respectivement minimale et maximale (et donc le sens de la force appliquée) varie.

Par exemple, si la balle roule au sol, la vitesse relative de l'air par rapport à sa surface supérieure augmentera. Si elle tourne de la même façon en l'air, la vitesse de l'air par rapport à sa surface inférieure diminuera. On aura une légère surpression en haut et une légère dépression en bas de la balle, ce qui la plongera plus vite vers le sol. »

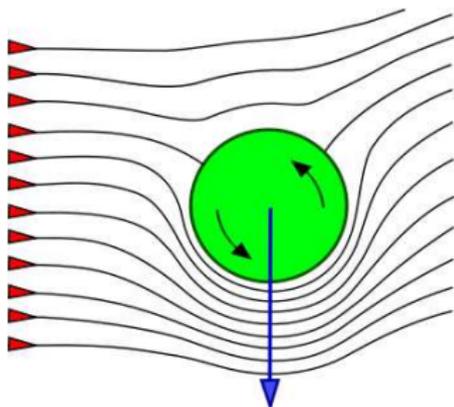
Cet effet est utilisé au tennis, golf,

Les lignes de courant



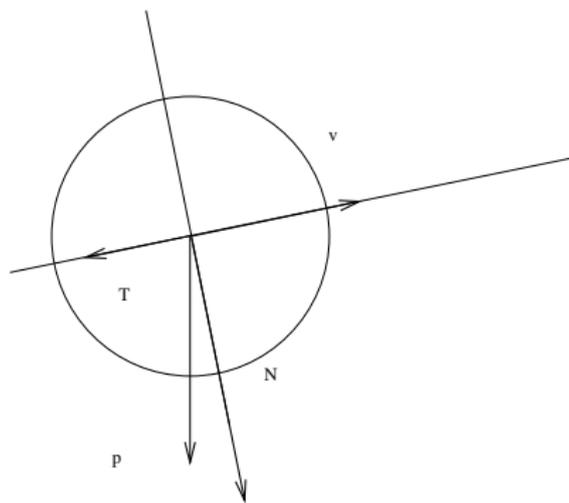
On peut voir la vitesse des particules, entraînées par le ballon, plus grande dans la partie inférieure que dans la partie supérieure. Le ballon reçoit donc une force verticale dirigée vers le bas.

Les lignes de courant



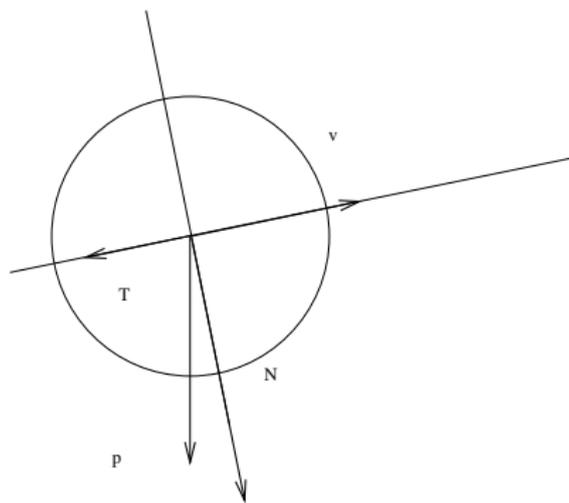
On peut voir la vitesse des particules, entraînées par le ballon, plus grande dans la partie inférieure que dans la partie supérieure. Le ballon reçoit donc une force verticale dirigée vers le bas.

La force de portance



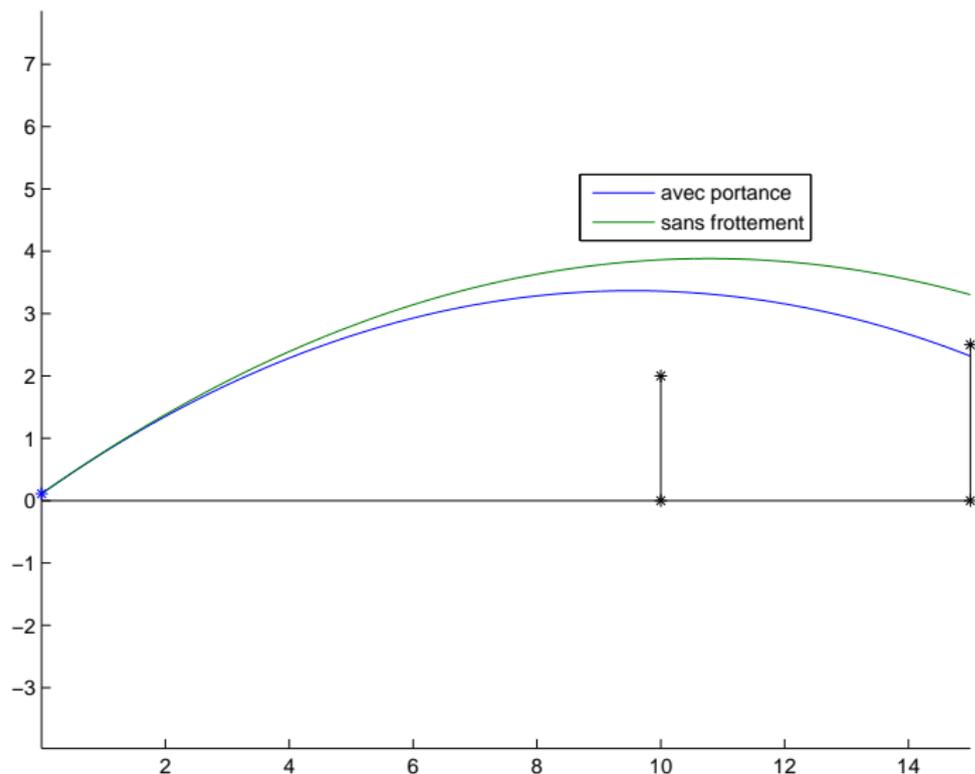
L'objet est soumis à son propre poids $\vec{p} = m\vec{g}$ et à la force de portance \vec{F}_P . La force de traînée \vec{F}_T est négligée (cela devient vite faux sur des trajectoires plus longues).

La force de portance



L'objet est soumis à son propre poids $\vec{p} = m\vec{g}$ et à la force de portance \vec{F}_P . La force de traînée \vec{F}_T est négligée (cela devient vite faux sur des trajectoires plus longues).

Exemple : la courbe avec et sans portance



Deux exemples vidéos

Voir les deux vidéo suivantes relatives à l'effet Magnus et son application au football :

<http://www.youtube.com/watch?v=IKto5H7cVQA>

<http://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/s--WslELNt4--/1348091010756291175.gif>

Deux exemples vidéos

Voir les deux vidéo suivantes relatives à l'effet Magnus et son application au football :

<http://www.youtube.com/watch?v=IKto5H7cVQA>

<http://i.kinja-img.com/gawker-media/image/upload/s--WslELNt4--/1348091010756291175.gif>

Nombreuses modélisations plus fines de l'effet Magnus

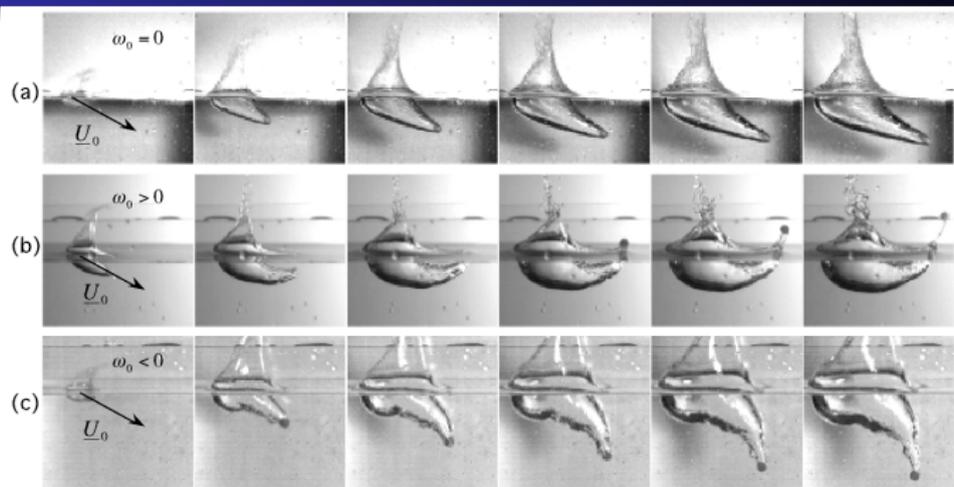


Figure 3. Effect of spin on the trajectory of a sphere (density ρ_s) after impact in water: (a) $U_0 = 33 \text{ m s}^{-1}$, $R = 3.5 \text{ mm}$, $\rho_s = 1410 \text{ kg m}^{-3}$, $\omega_0 = 0 \text{ rad s}^{-1}$, time step between images $\Delta t = 2 \text{ ms}$. (b) $U_0 = 20 \text{ m s}^{-1}$, $R = 2.4 \text{ mm}$, $\rho_s = 920 \text{ kg m}^{-3}$, $\omega_0 = 1740 \text{ rad s}^{-1}$, $\Delta t = 3.75 \text{ ms}$. (c) $U_0 = 24 \text{ m s}^{-1}$, $R = 2.4 \text{ mm}$, $\rho_s = 920 \text{ kg m}^{-3}$, $\omega_0 = -1740 \text{ rad s}^{-1}$, $\Delta t = 3.2 \text{ ms}$. The trajectory bends only if spin is present and the sign of its curvature changes with the sign of the spin.

Cette figure est extraite de [Dup+10], où des calculs montrant la possible apparition de spirales ont été menés. Ils ont été validés par une comparaison à l'expérience.

- [Dup+10] G. Dupeux, A. Le Goff, D. Quéré et C. Clanet. "The spinning ball spiral". Dans : *New Journal of Physics* 12 (2010). doi : 10.1088/1367-2630/12/9/093004.
- [GS86] H. Gié et J.-P. Sarmant. *Mécanique, volume 1*. Ouvrage disponible à la bibliothèque Sciences de Lyon 1 (cote : 531 GIE, 4 ième étage). Paris : Technique et documentation (Lavoisier), 1986.