Une boule de pétanque tombe-elle aussi vite qu'une balle de tennis ? jusqu'au comportement de tout corps en mouvement dans un fluide ! Et qu'en est-il des rebonds des balles de sport !

L'idée est comprendre les principes fondamentaux de la chute des corps et plus généralement des forces qui s'exercent sur des corps en déplacement. Et de comprendre le rôle de la gravité, de la poussée d'Archimède, des forces possibles de traînée visqueuse et d'autres forces due à une répartition particulière de la pression autour de l'objet (forces de résistance à l'avancement dites aérodynamiques ou hydrodynamiques).

Pourquoi certains corps chutent plus vite que d'autres (une sphère chute plus vite dans un gaz que dans un liquide, mais peut aussi flotter, pourquoi un avion vole ! Pourquoi éventuellement une sphère peut avoir en chute libre une trajectoire non rectiligne ! Pourquoi certaines balles rebondissent différemment suivant leur constitution ou la surface..

Dans la nature, plein de corps tombent bizarrement ! Les flocons de neige tombent moins vite que des gouttes d'eau de pluie dont la taille va influencer la vitesse de chute (pluie battante, bruine marine). Les feuilles mortes qui se séparent des branches en automne, quel régal de les voir décrire des trajectoires irréalistes !

Une feuille de papier A4 froissée tombe différemment qu'une feuille normale qui s'approchant du sol peut encore planer sur plusieurs mètres. Un paquet de feuilles lancé du 4ème étage va se diviser et au final on aura une répartition au sol qui n'est jamais reproductible (transition vers le chaos), de plus elles ne toucheront pas le sol en même temps.

En sport, un javelot, un disque, un poids, une flèche ont des trajectoires différentes, pourtant si on fait la comparaison entre le poids des objets, (en supposant qu'un athlète de haut niveau a à peu près la même puissance) les records du monde de distance ne sont dans la même proportionnalité.
En sports de balles (tennis, tennis de table, golf, base-ball, football)… le fait d'imprimer un effet brossé, lifté, coupé/slicé confère des trajectoires très différentes. Un footballeur peut tirer un corner directement dans le but sans qu'il y ait du vent. Il a bien des explications ! Aérodynamiques !

A propos de vent, il modifie la trajectoire des gouttes de pluie ou des flocons de neige ; Dans le blizzard, les trajectoires sont quasi-horizontales. Est-ce qu'on peut faire une somme vectorielle de la vitesse de chute verticale du flocon sans vent et de la vitesse horizontale du vent ?
Un coureur de 100 mètres de haut niveau, sans vent, court en 10 secondes, cela veut-il dire qu'avec un vent défavorable de face de 2 m/s, il ne peut plus parcourir 8 m/s, donc avec un tems de 12,5 secondes ? Certainement pas.

En **dynamique des bulles** dans un liquide, les observations de base sont nombreuses :

- remontée des bulles dans un verre d'eau pétillante ou de champagne (tiens c'est bizarre il y a des bulles qui restent collées à la paroi).
- Remontée de grosses bulles dans des colonnes d'eau (celles qu'on voit parfois dans les boutiques en décoration) Il y en a qui se rattrapent en remontant, se dépacent, d'autres se scindent, on dit qu'elles coalescent.

D'ailleurs une goutte de pluie n'est pas sphérique. En **dynamique des gouttes,** observer un robinet qui goutte (rupture filamentaire), une goutte qui tombe sur une surface solide ou sur une surface liquide au repos est un régal, cela donne des images de toute beauté. Pareil pour une orque d'aquarium qui en retombant mouille une grande partie des spectateurs. Une goutte liquide posée sur une surface solide n'est pas sphérique, et suivant la nature du liquide on n'aura pas la même géométrie de goutte.	

D'autres anomalies : il y a des satellites qui restent en vol orbital stationnaire (pourtant ils devraient tomber sous l'effet de l'attraction terrestre ?

On pourra aussi s'intéresser à la formation et à l'avancée des dunes dans le désert, ou aux dunes sous-marines, à la sédimentation du sable dans les rivières, au charriage d'alluvions, aux avalanches de neige ou sous-marines… et l'on touche alors au secteur des **milieux dits granulaires**. Prenez une mangeoire cylindrique pour oiseaux et remplissez là de graines de tournesols. Parfois un amas de graines est temporairement bloqué entre 2 zones sans graines et il faut redéclencher l'écoulement vers le bas. Pareil à une échelle industrielle (type silo à grain)
Du comportement d'un corps unique à celui d'un ensemble de particules, il n'y a qu'un pas et l'on est dans le domaine des **écoulements diphasiques** plus général.

Comment s'en sortir :

A la base pour vous aider, vous avez les théorèmes de base de la Mécanique :

- conservation de l'énergie, de quantité de mouvement
- loi de Newton
- théorème d'Archimède
-

Mots-clés un peu scientifiques :
Viscosité (dynamique ou cinématique) d'un fluide, Traînée d'un corps, coefficient de traînée, tension de surface, capillarité, force de frottement, sinon : pesanteur, chute libre, poussée d'Archimède

Simplicio. – Votre explication est tout à fait admirable ; pourtant j'ai du mal à penser qu'une balle de fusil tombe aussi vite qu'un boulet de canon.

Salviati. – Pourquoi ne pas dire un grain de sable aussi rapidement qu'une meule ? Mais, Simplicio, je sais que vous n'allez pas prendre exemple sur tous ceux qui font dévier la discussion de son véritable sujet en s'arrêtant à un de mes propos auquel manque une paille de vérité, et qui derrière cette paille, occultent les erreurs des autres qui sont grosses comme des poutres. Aristote dit : « une boule de métal de 100 livres, tombant d'une hauteur de 100 pieds touchera le sol avant qu'une boule pesant 1 livre ait parcouru 1 pied ».
Moi je dis qu'elles arrivent au sol en même temps. Lorsqu'on fait l'expérience, on trouve que la plus grosse a deux doigts d'avance sur la plus petite ; vous n'allez pas profité de ces deux doigts pour cacher les 99 pieds d'Aristote, ni faire remarquer la petite erreur que j'ai faite, et passer sous silence la très grosse qu'il a commise.

Galileo Galilei, *Discours et démonstrations mathématiques à propos des deux sciences nouvelles*, 1638.

A) Description du mouvement

Expérience 1 :
Observez les animations disponibles sur le bureau de l'ordinateur ou trouvées sur la toile.
Commenter les différents graphiques de chaque animation.

Expérience 2 :
Prendre 2 feuilles A4. Faire une boule de papier avec l'une des feuilles.
Laisser tomber la feuille et la boule de papier de la même hauteur.
Répétez l'opération 3 à 4 fois . Que constatez-vous ?

Expérience 3 :
Lâcher une balle de golf dans une colonne d'eau 'assez longue' et étudier la vitesse de chute

Expérience 4 :
Prendre des balles de différents diamètres, matières.. et étudier leur chute et leur rebond

Expérience 5 :

Tableau de *G. Bezzuoli* (1841).
L'homme qui montre un livre de la main droite est Galilée.
Il fait la démonstration de l'une de ses expériences à l'aide d'une bille roulant sur un plan incliné.

On dispose d'une planche à inclinaison variable, d'une bille en acier et d'un chronomètre.
Calculer l'accélération de la bille en acier pour différentes inclinaisons de la pente.
Que se passe-t-il lorsque la planche est à 90° par rapport au sol ?
De quel type de mouvement s'agit-il ?
A quelles forces est soumise la bille ?
On pourra aussi enregistrer la chute verticale à l'aide d'une caméra et faire un traitement des données informatiques (Regressi,RegAVI…)
Sphere de 15,5 mm, masse 15,17 g, densité 7700 kg/m3
Refaire l'expérience avec d'autres balles

Expérience de chute avec frottement possible : Le cas des Tubes à chute de bille JEULIN :

 Tube Ø 130 x 500 mm	*But : Permet la mise en évidence de plusieurs phases lors de la chute de bille dans un fluide.* **Visualisation des phases d'accélération et de vitesse limite** **Influence de la masse sur la vitesse limite** **Acquisition du mouvement par vidéo** **Modélisation par la méthode d'Euler** **Modèle théorique pour la force de frottement :** linéaire F = k.v En loi de puissance $F = kv^n$ Fluide : huile Masse volumique $\rho_f = 860 kg/m^3$ Viscosité dynamique : μ = 0.765 Pa.s Viscosité cinématique : ν = 0.00089 m^2/s

Caractéristiques techniques :

Rayon de la bille R_b : 12,5 mm

Bille : plastique rose, noyau acier
Masse volumique de la bille ρb : $2{,}58.10^3$ $kg.m^{-3}$
Bille : plastique rose, noyau acier
Masse volumique de la bille ρb : 4,49 10^3 $kg.m^{-3}$
Accélération et vitesse limite : vl quasi instantannée
Modèle théorique pour la force de frottement : F = k.v

Bille :, noyau acier
Masse volumique de la bille ρb : 8,06 10^3 $kg.m^{-3}$
Accélération et vitesse limite : vl quasi instantannée
Modèle théorique pour la force de frottement : $F = k.v^2$

<u>Calcul de la vitesse terminale de chute :</u>

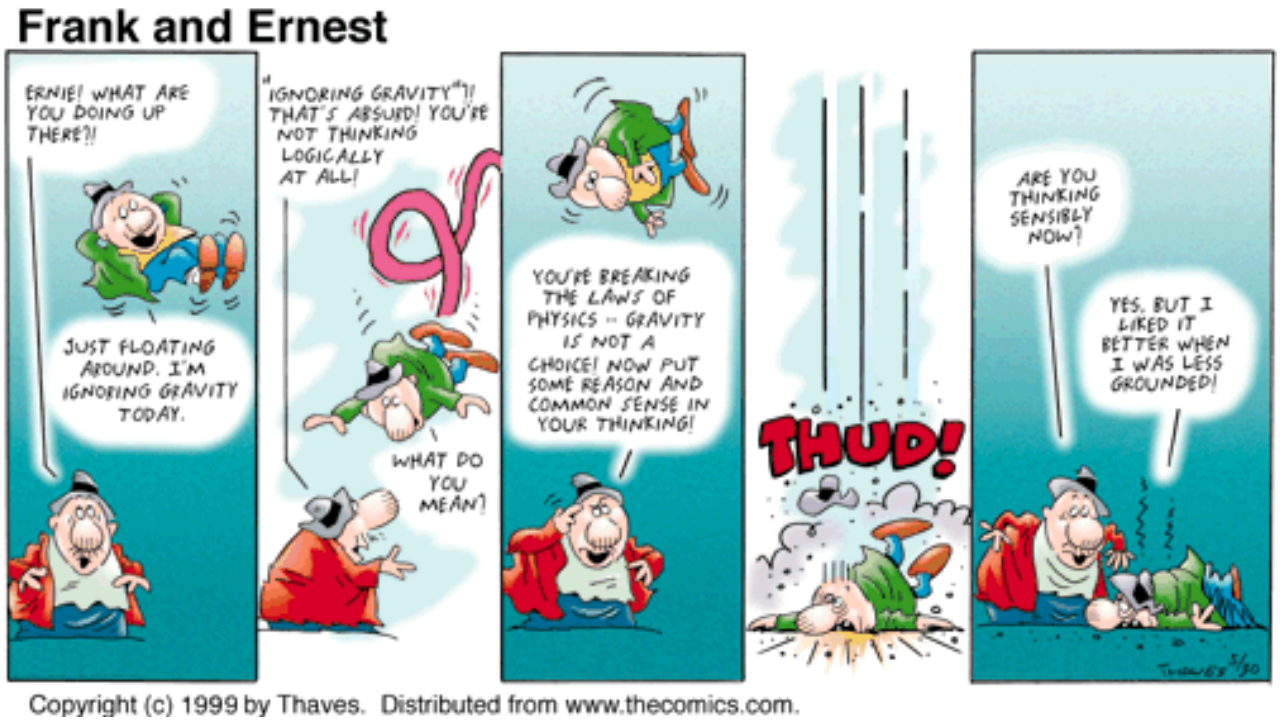
On pourra utiliser un programme de résolution de l'équation du mouvement fait maison **(TERMVELNEW.EXE)**,

Pas le plus convivial, mais scientifiquement performant et tournant sous dos, qui demande respectivement :

- le diamètre de la sphère en mètres (ici 0.025)
- la viscosité cinématique du fluide (ici 0.00089)
- la masse volumique du fluide (860)
- la masse volumique de la sphere (selon la colonne utilisée)

mais autant utiliser les ressources WEB à condition de comprendre la physique sous-jacente. Dans les universités anglo-saxonnes en particulier, il existe à présent des outils performants les applications **<u>javascripts applets calculators.</u>**

Exemple de calculateur de vitesse terminale de chute en régime de Stokes (faible nombre de Reynolds)
http://www.ajdesigner.com/phpstokeslaw/stokes_law_terminal_velocity.php
Un site actuellement indisponible jusque vers le 5 au 10 avril
http://www.processassociates.com/process/separate/termvel.htm



Expériences de chute et de rebond

Une boule de pétanque tombe-t-elle aussi vite qu'une balle de tennis ?

Au cours de votre démarche expérimentale, vous préciserez les hypothèses formulées et les expériences qui permettent de les valider.
La conclusion vous permettra de formuler un protocole opératoire raisonnable afin de répondre à la question posée.

Sports de balles

Thématique :
Vitesse de chute, vitesse de roulement sur plan incliné, force de frottement, coefficient de restitution après choc/rebond…
On pourra utiliser les différentes balles mises à disposition, mesurer poids et diamètre, essayer de quantifier leur temps de chute ou de roulement, voire leur hauteur de restitution après un premier rebond

Sport	Diamètre (mm)	Masse (g)	Coefficient de restitution
Tennis	65,1 +/– 1,6	58	0,80
Squash	40	24	
Cricket	71,9	156	0,45
Ping-pong	40	2,5	0,92
golf	42,7	46	0,80
Base-ball	73,6	145	?
Football	223	430	0,6
Basket	243,8	630	0,75
Handball	190	450	0,75
Hockey	75x25	160	?
Poids (lancer)	110	7260	?

Balles de golf :

Forme des balles. La balle présente 330 (balle anglaise) ou 336 (balle américaine) fossettes. Mais il y a des variantes…

Vitesse initiale typique 75 m/s et environ 3500 tours/mn de rotation vers l'arrière (back spin).

Comparer le poids de la balle à la force de Magnus.

Crise de traînée sur une balle de golf.

sites :

- http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/josh_fritts/index.html
- http://www.linternaute.com/science/divers/pourquoi/06/balles-golf/balles-golf.shtml
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Golf

Article : *Aeodynamics of Sports Balls*, R.D. Mehta, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 17, pp. 151-189, 1985.

Billard

Loi de collision, frottement, centre de percussion. Effet « rétro ».

Sur la toile : Livre de Ron Shepard, « Amateur Physics for the Amateur Pool Player »

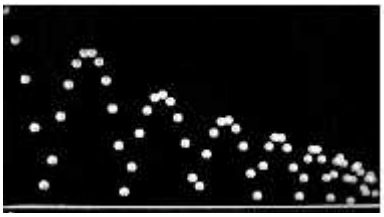
sur internet : http://www.sfbilliards.com/shepard_apapp.pdf

Coefficient de restitution

Coefficient de restitution. On définit le coefficient de restitution e d'une balle sur une surface comme le rapport des vitesses après et avant le choc.

Mesurer quelques coefficients de restitutions (balles de tennis, billes diverses, balle de squash, superballe, boule de pâte à modeler). Le résultat dépend-il de la surface (matériau, rugosité) utilisé ? Pourquoi trouve-t-on $e < 1$.

- Choc élastiques et chocs mous.
- Cas d'une vitesse normale et d'une vitesse tangentielle.
- Cas d'une balle tournant sur elle-même.
- Le carreau à la pétanque.



Rebonds successifs d'une balle

Tennis

Un tennisman frappe la balle à une hauteur $h = 2{,}40$ m. Le vecteur vitesse de la balle est dirigé vers le bas, fait une angle $\alpha = 10^\circ$ avec l'horizontale et a une valeur $V_0 = 30$m/s

a) Etablir les équations paramétriques du mouvement de la balle.

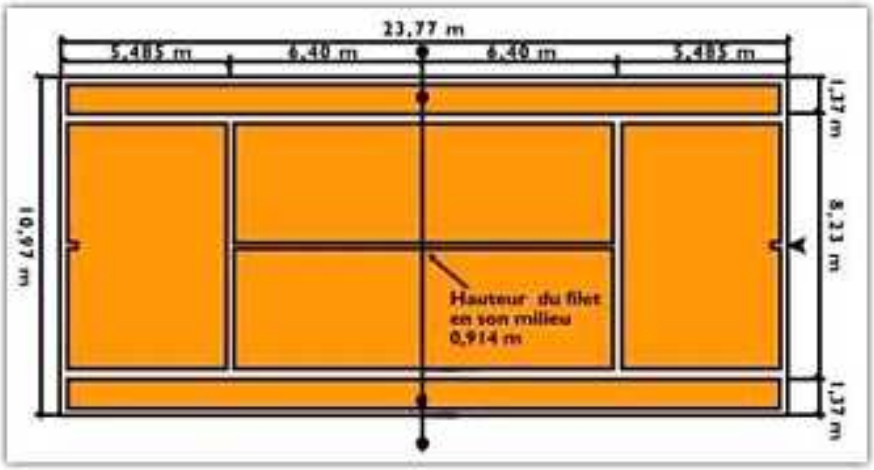
b) En déduire l'´equation de la trajectoire.

c) La balle passera-t-elle au-dessus du filet de 0,91 m situé à 11,89 m du serveur ?

d) Quelle sera la vitesse de la balle en touchant le sol ?

Sites :

- http://wings.avkids.com/Tennis/Book/
- http://www.physics.usyd.edu.au/~cross/tennis.html



Dimensions d'un court de tennis

Choc Frontal :
http://fr.wikibooks.org/wiki/M%C3%A9canique%2C_enseign%C3%A9e_via_l%27Histoire_des_Sciences%2C_le_choc_frontal#Exercice_de_TP-cours

Rebonds de balle
Films de jonglage
http://perso.orange.fr/cloon/pages/fichiers/ressources_videos_rebond.htm

http://www.linternaute.com/science/divers/pourquoi/06/balle-rebond/balle-rebond.shtml

Pourquoi... les balles de tennis rebondissent ?

Quand on jette un caillou ou une tomate, on ne s'attend pas à ce que l'objet rebondisse et nous revienne en main. Et pourtant, quand on lance une balle, c'est ce qui se produit. Une évidence qui s'explique par la physique.

Pour qu'un objet rebondisse, il faut qu'il ait conservé de l'énergie après le contact avec le sol.

Energie conservée, rebond assuré

D'où vient cette énergie ? Au départ, un lanceur, en propulsant un objet, lui fournit une vitesse, c'est-à-dire une énergie cinétique. L'objet possède également un poids dont la poussée dépend de son altitude. L'énergie qui en découle, c'est l'énergie potentielle de pesanteur. Jusque là, pas de différence entre l'énergie d'une balle lancée de celle d'un caillou envoyé en l'air.

Lors de la descente au sol, l'objet perd de l'énergie de pesanteur puisqu'il tombe, mais il gagne de la vitesse et donc de l'énergie cinétique. Puis c'est le contact. Pour rebondir et remonter, l'objet doit avoir conservé de l'énergie après le choc.

Sur du sable, support déformable et non élastique, une balle rebondit très mal.
© Dany CARN
Galerie photos de L'internaute

Etre élastique c'est efficace...

Facile pour une balle : elle est élastique. Le matériau qui la constitue peut se déformer sans dissiper l'énergie du choc. De plus, à l'intérieur, l'air qui s'y trouve est aussi élastique : il se comporte comme un ressort. Lors de l'impact, il se comprime légèrement puis se détend, forçant l'enveloppe à reprendre sa forme ronde initiale. En se reformant, la balle fait pression sur le sol et remonte. Puis, une fois que toute son énergie cinétique est utilisée, elle retombe, et ainsi de suite.

Bien sûr, des déperditions énergétiques interviennent et mettent un terme à ce mouvement. Pour qu'une balle de tennis rebondisse plusieurs fois, la déformation, lors du choc, doit rester localisée autour du point d'impact et la balle doit reprendre sa forme rapidement. C'est le cas si son revêtement est à la fois élastique et rigide. Plus le temps de contact est bref, moins le sol a le temps de prendre de l'énergie à la balle. La force du rebond est alors élevée.

"L'air qui se trouve dans la balle est élastique : il se comporte comme un ressort. "

Mais tous les matériaux ne sont pas élastiques ! Une balle trop molle, comme un ballon dégonflé, où l'air est sous une faible pression, se déforme en touchant terre et absorbe l'énergie de la collision. Il ne lui en reste donc pas assez pour rebondir. Même cas de figure pour une tomate jetée au sol.

De son côté, le caillou, lui, transmet l'énergie du choc au sol. Mais là, c'est le sol qui se déforme et absorbe toute l'énergie : une trace apparaît à terre et la pierre ne rebondit pas. Il se passe d'ailleurs le même phénomène si on lance une balle sur du sable.

... ne pas se déformer, c'est encore mieux !

Enfin, sachez que ce ne sont pas les petites balles rebondissantes qui montrent les meilleurs rebonds : ces balles très élastiques sont constituées de polymères, de longues chaînes de molécules identiques, qui peuvent se contracter comme des accordéons sans perte d'énergie. Elles se déforment donc légèrement.

Or, il est possible d'obtenir un rebondissement encore meilleur lorsqu'aucun des deux protagonistes (objet et sol) ne se déforme. Dans ce cas, l'énergie n'est pas dissipée lors du choc et est intégralement réutilisée dans le rebond. On parle de chocs élastiques. Ils se produisent quand une bille d'acier est lâchée sur une surface très dure, en acier, verre ou ivoire. La bille peut alors rebondir jusqu'à cent fois de suite !

Sophie Fleury, L'Internaute

- **En savoir plus**
- **Pourquoi... les balles de golf ne sont pas lisses ?**
- **Pourquoi... les élastiques s'étirent ?**

http://www-lms.univ-poitiers.fr/sport/cours/master1/prog_equip_sportif/Ch9_Sols_Sportifs.pdf

Les forces de frottement

Expérience 6 :
On dispose d'un dispositif à mobile autoporteur à coussin d'air.
Calculer la vitesse du mobile le long de sa trajectoire.
Que remarquez-vous ?
De quel type de mouvement s'agit-il ?

Expérience 7 :
Lancer un carboglace sur différentes surfaces.
Lancer maintenant un cube de même gabarit sur les mêmes surfaces
Que constatez-vous ?

Expérience 8 :
mesure de la viscosité d'un liquide : manip de sédimentation

-une grande éprouvette graduée
-des billes légères en plastique (billes de cartouches d'encre)
-un liquide visqueux
-un agitateur en verre
-une balance de précision
-un pied à coulisse
-un chronomètre avec temps intermédiaires

Laisser doucement tomber une bille à la surface du liquide. La placer au centre de l'éprouvette et l'enfoncer pour qu'elle coule. Relever le temps à chaque passage devant les graduations principales de l'éprouvette. Tracer $z=f(t)$ (on remarque que la vitesse seuil est atteinte dès les premiers millimètres de course), et en déduire la vitesse de chute. Si on connaît la masse et le rayon des billes, et la masse volumique du fluide, on peut en déduire la viscosité dynamique du fluide (formule de Stokes, vérifier qu'on est bien à bas nombre de Reynolds…)

Rem : cette manip marche très bien, mais le problème est la mesure de la masse et du diamètre des billes. Essayer une variante (à tester !!): remplacer les billes par des gouttes d'eau qui chutent dans l'huile. La taille des gouttes d'eau peut être contrôlée avec une burette, et on peut mesurer leur masse (et donc leur taille) en pesant un grand nombre de gouttes.

Comportement d'une sphère - Sédimentation

Pour des particules de masse m, de masse volumique ρ_P, de volume V tombant ou remontant à une vitesse constante U dans un fluide au repos de masse volumique ρ_F la force de traînée induite par la répartition de pression statique et les forces visqueuses contrebalance l'effet de la force de gravité (le poids mg) et de la poussée d'Archimède. On est loin de le chute libre simplement engendrée par la force induite de gravité qui pourrait exister sous une cloche sous vide (une plume chute alors aussi vite qu'une boule de pétanque, si cela est vrai, c'est fulgurant comme résultat , non ??)

$$\frac{1}{2}C_D\rho_F U^2 S = (\rho_P - \rho_F)gV$$

Pour une sphère de diamètre D : $S = \pi.D^2/4$ et $V = \pi D^3/6$

Et on définit alors un nombre de Reynolds sans dimension Re = U.D/ν , où ν est la viscosité cinématique du fluide

L'analyse dimensionnelle révèle que le coefficient de traînée C_D ne dépend que du nombre de Reynolds Re. On montre facilement que :

$$C_D \,\mathrm{Re}^2 = \frac{4}{3}D^{*3}$$

où $D^* = D.\left[\frac{(s-1)g}{\nu^2}\right]^{1/3}$ et un diamètre sans dimension et $s = \frac{\rho_P}{\rho_F}$ densité relative

Pour des particules de Stokes (Re « 1): $C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}$

Un lissage empirique de Schiller and Naumann, 1933, (pour Re < 800) donne :

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}(1+0.15)^{0.687}$$

Cas des faibles nombres de Reynolds, particules à comportement Stokien

Equation du mouvement d'une particule dans un fluide de vitesse u_f :

$$\frac{du_p}{dt} = \left(1-\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)g - \frac{3}{4}\frac{\rho_f}{\rho_p}\frac{C_D}{D}u_r^2$$ où $u_r = u_p - u_f$ est la vitesse de glissement de la particule

Dans un fluide au repos u_f est nul.

A l'équilibre, dans un fluide au repos $u_r = u_p, u_f = 0$

$$\frac{du_p}{dt} = \left(1-\frac{\rho_f}{\rho_p}\right)g - \frac{3}{4}\frac{\rho_f}{\rho_p}\frac{C_D}{D}u_r^2 = 0$$

Et la vitesse terminale U de la particule vaut :

$$U = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{D}{C_D}\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right)}$$

Pour des nombre de Reynolds particulaires faibles $\mathrm{Re} = Du_r \rho_f / \mu < 1$

$C_D = \dfrac{24}{\mathrm{Re}}$ et la force de traînée est $F = 3\pi\mu D u_r$ traînée dite visqueuse, due à la couche limite laminaire et à la répartition de pression autour de la sphère :

$$U = \frac{gD^2}{18\mu}(\rho_p - \rho_f)$$

Exemple de vitesse de chute terminale d'une sphère de verre (ρ_p = 2500kg/m^3) tombant dans de l'air (ρ_f = 1,2 kg/m^3, μ = 1,7 10^{-5} kg/ms) :

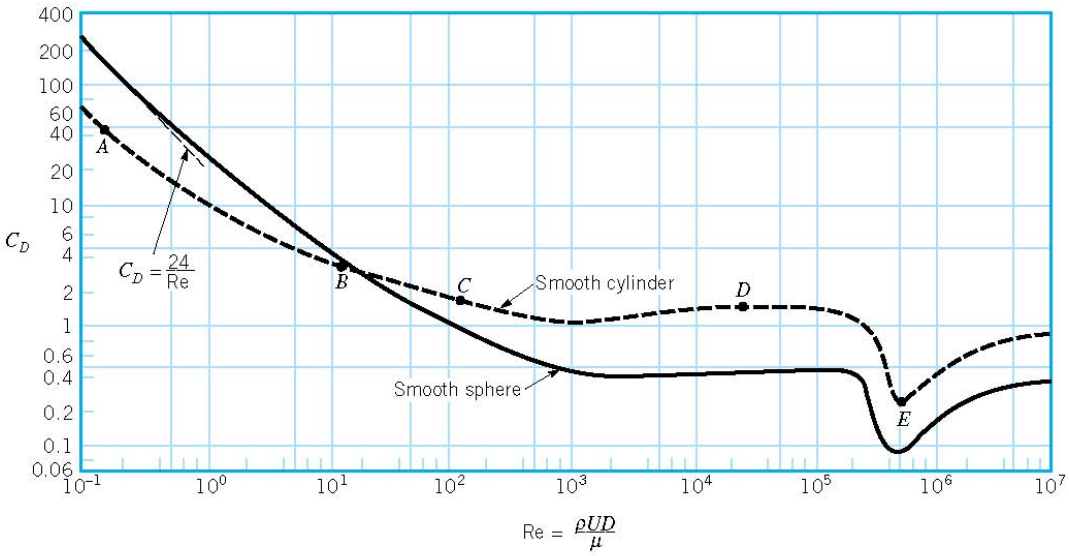
D = 50 µm → U = 0,20 m/s, Re = 0,71 dominance visqueuse
D = 500 µm → U = 17,59 m/s, Re = 6209 dominance inertielle

Case	ρ (kg/m^3)	ρ_p (kg/m^3)	μ (Pa s)	R	v_0 (m/s)	Re
Small grain of sand settling in water at 20ºC	1000	3500	10^{-3}	50 µm	0.014	0.68
Small aqueous aerosol droplet settling in air at 1 atm and 15 ºC	1.23	1000	1.73×10^{-5}	50 µm	0.315	1.12
Small air bubble rising in water at 20ºC	1000	1.25	10^{-3}	100 µm	-0.022	2.18
Large air bubble rising in honey at 20ºC	1300	1.25	10	1.25 cm	-0.041	0.06

Variables
C_D = coefficient de traînée
U = vitesse de sédimentation (settling velocity)
D = particle diameter
S = Surface projetée de la particule (particle projected area)
V = volume de la particule
g = acceleration due to gravity
ν = viscosité cinématique du fluide

References

Cheng, N.-S., 1997, A simplified settling velocity formula for sediment particles, ASCE J. Hydraulic Engineering, 123, 149



(a)

Coefficient de Traînée d'un cylindre et d'une sphère lisse en fonction du nombre de Reynolds

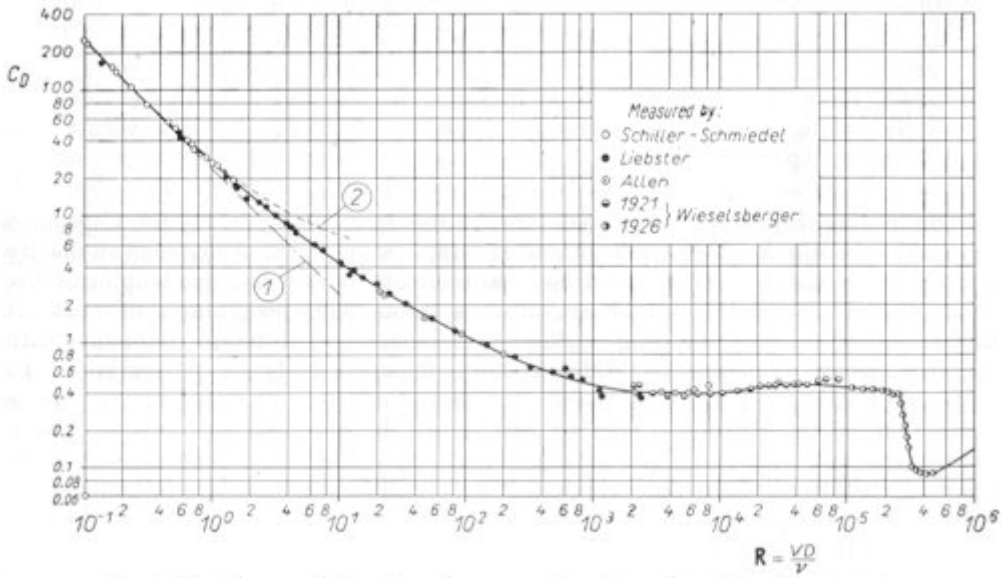
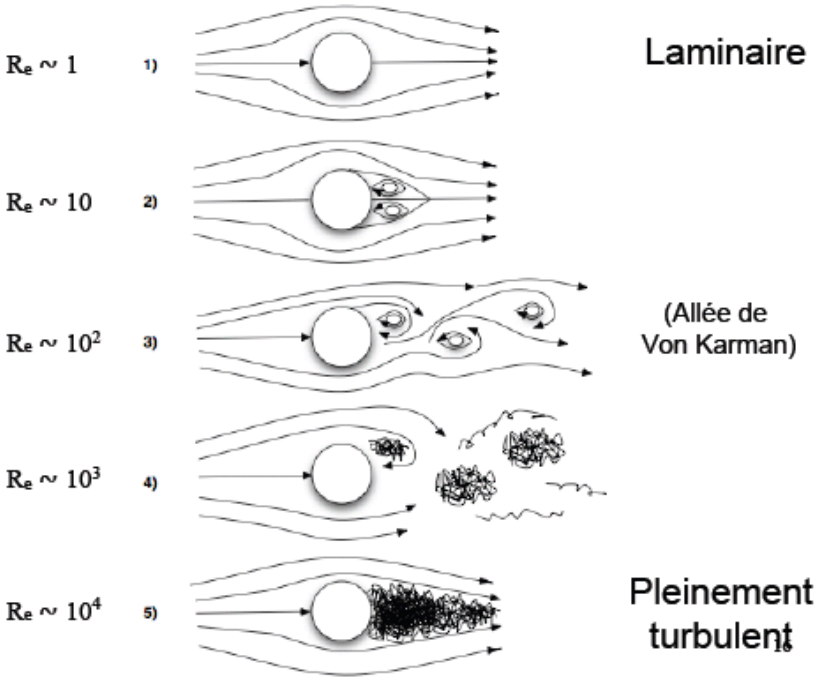


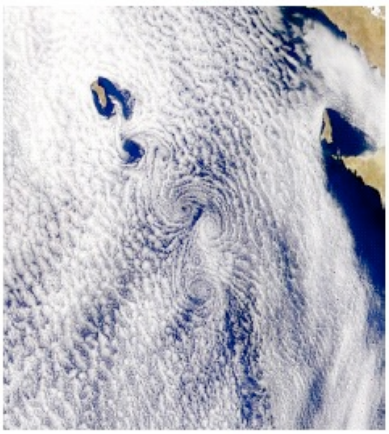
Fig. 1.5. Drag coefficient for spheres as a function of the Reynolds number
Curve (1): Stokes' theory, eqn. (6.10); curve (2): Oseen's theory, eqn. (6.13)

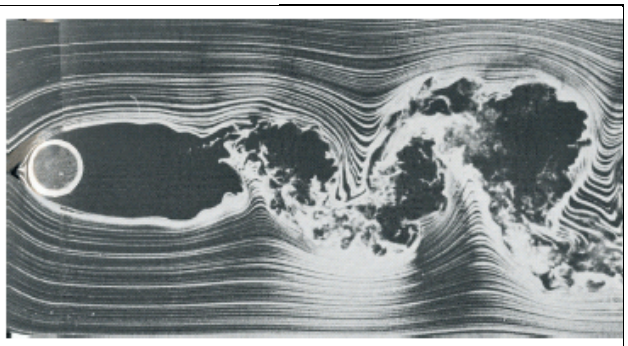
The drag coefficient for a sphere as a function of Reynolds Number, as given by Schlichting, H. *Boundary Layer Layer Theory.* 4th ed., McGraw-hill Book Co., 1960.

Ecoulement (sillage) autour d'un cylindre à vitesse (nombre de Reynolds) de plus en plus grande



Ecoulement dans le sillage de l'île de Guadalupe





Corke & Nagib (1982)

Griffin (1982)

Ecoulement derrière un cylindre

Sillage d'un navire échoué provoqué par le courant océanique

Extrait du projet Face de l'Institute of Energy Technology
(Lasse Rosendahl, Aalborg University)

Aerodynamic response time - briefly

- Momentum response time
  - indicates how fastly a particle can respond to a change in flow velocity.

$$\rho_p V \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \xrightarrow{\text{if DRAG dominant}} \frac{1}{2} C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \rho_f |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v})$$

(Equation of motion)

$$\Rightarrow \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \underbrace{\frac{C_D \mathrm{Re}_p}{24}}_{\text{=1 for Stokes flows (Rep<1)}} (\vec{u} - \vec{v})$$

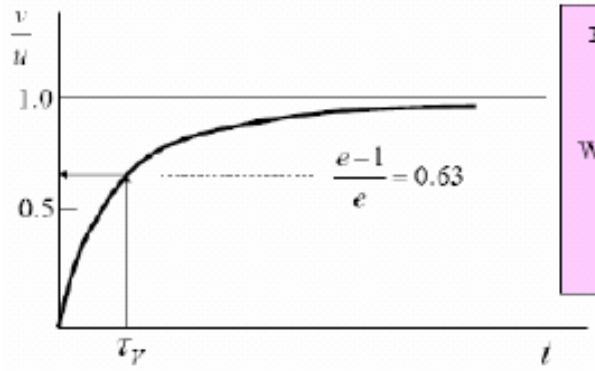
Particle relative Reynolds number:

$$\mathrm{Re}_p = \frac{|\vec{u} - \vec{v}| d_p}{\nu}$$

$$\Rightarrow \tau_v = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (s)$$

(Momentum response time)

$$\Rightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{u - v}{\tau_v} \quad (1D) \xrightarrow[t=0:\ v=0]{u = \text{constant}} \frac{v}{u} = 1 - \exp(-\frac{t}{\tau_v})$$



Ex

$$\tau_v = \frac{\rho_d D^2}{18\mu}$$

Water droplet in standard air:

$D = 100\mu$ m

$\tau_v = 30$ms

Dans un fluide au repos

$$\frac{du_P}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{C_D}{D} u_P^2$$

Si le nombre de Reynolds est faible, $C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} = \frac{24\mu}{u_P D \rho_f}$ et la force de traînée est $F = 3\pi\mu D u_P$,

et $$\frac{du_P}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g - \frac{3}{4} \frac{\rho_f}{\rho_p} \frac{C_D}{D} u_P^2 = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g - \frac{18}{\rho_p} \frac{\mu}{D^2} u_P = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) g - \frac{u_P}{\tau_P}$$

La vitesse de chute limite est $U = \frac{gD^2}{18\mu}(\rho_p - \rho_f)$ et le temps de relaxation $\tau_P = \frac{\rho_P D^2}{18\mu}$

L'équation du mouvement s'écrit : $\frac{du_P}{dt} = \frac{U}{\tau_P} - \frac{u_P}{\tau_P}$

Cette équation différentielle linéaire a pour solution : $u_P = U\left[(1 - \exp(t/\tau_P)\right]$

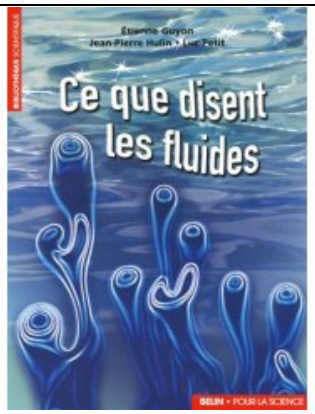
Si la particule a une vitesse nulle au départ (t=0, u_P=0)

Pour comprendre ce que le milieu fluide désire nous révéler, rien de mieux qu'un livre de base :

Ce que disent les fluides !! ou La sience des Ecoulements en Images

http://www.amazon.fr/Ce-que-disent-fluides-%C3%A9coulements/dp/2701135575
http://www.editions-belin.com/csl/page.asp?path=iSci-iSciBib-tSciBib003557&search=hulin
http://www.editions-belin.com/illus/2006/3557.html

Un livre élémentaire écrit par des scientifiques reconnus (Auteurs du livre Hydrodynamique Physique) :



23,5 Euros
2005, 18,5 x 24,5 cm, 160 pages, impression en quadrichromie, nombreuses illustrations en couleurs, code Belin 003557, ISBN 2-7011-3557-5, EAN 9782701135571

Présentation de l'éditeur
Pourquoi la buée se condense-t-elle en gouttes sur les toiles d'araignée ? Par quel mécanisme des rides apparaissent-elles au fond de l'eau ? Pourquoi les nuages se groupent-ils si souvent en rouleaux ? Comment naissent les subtiles larmes du vin ? Les écoulements sont omniprésents : domestiqués dans les conduites ou les barrages, ou dangereusement
sauvages dans les coulées de lave, les glissements de terrain, les tsunamis ou les cyclones. Leurs étonnantes structures, leurs formes et leurs rythmes nous sont familiers depuis l'enfance, mais savons-nous toujours les décrypter ? Ce livre invite le lecteur à découvrir la physique des fluides à travers des sujets très variés. Tourbillons, houle, turbulence, avalanches, mascarets, écoulements sanguins, etc. sont ainsi traités en détail, chacun en une double
page illustrée. Si l'explication rigoureuse des phénomènes en jeu est systématiquement présentée, ce formidable voyage n'oublie pas en effet de faire la part belle à l'image, souvent époustouflante. Le livre que beaucoup attendaient sur le sujet, rédigé avec la plus grande clarté par des chercheurs de renom, vulgarisateurs hors pair.

Biographie de l'auteur
Étienne Guyon est directeur honoraire de l'École normale supérieure de la rue d'Ulm et chercheur à l'ESPCI (Paris). Il a également dirigé le Palais de la Découverte jusqu'en 1990.
Jean-Pierre Hulin est directeur de recherche au CNRS et mène ses recherches au FAST (Orsay).
Luc Petit est professeur à l'université de Nice-Sophia Antipolis et chercheur au Laboratoire de physique de la matière condensée.

Compléments sur la chute 'libre'

· Le secret des longs drives / Balles de golfs
Aérodynamique des balles de sports (R. Mehta, NASA)
http://widget.ecn.purdue.edu/~me610/balls.html
http://fr.wikipedia.org/wiki/Balle_de_golf
http://www.linternaute.com/imprimer/science/divers/pourquoi/06/balles-golf/balles-golf.shtml
http://www.linternaute.com/science/divers/pourquoi/06/balle-rebond/balle-rebond.shtml

. Magnus et les balles qui tournent
Carlos 1.mov
http://physicsweb.org/article/world/11/6/8
http://www.real-page.de/videos.htm

· Stokes et la sédimentation
Une vidéo sympa issue de l'équipe d'Elisabeth Guazelli (dite Babette), Directrice de Recherches au CNRS, IUSTI Marseille, Responsable de l'équipe Ecoulements de Milieux Granulaires, équipe très performante
http://www.editions-belin.com/illus/2006/3557t_spheres.mp4

document E. Guazelli (IUSTI ; Marseille) t_spheres.mp4 (3464 ko)
Brady J.F. and Bossis G., « Stokesian dynamics Ann. Rev. », *Fl.Dyn* . 20 111 (1988)
R. Blanc et E. Guyon, « La physique de la sédimentation », *La Recherche* **22**, 866 (1991)

La chute tortueuse des feuilles mortes
http://dragonfly.tam.cornell.edu/

Site de Hans Herrmann (anciennement à Stuttgart, à présent au brésil)
Un film numérique sur la chute de corps ovales (analogie avec une feuille)
http://www.ica1.uni-stuttgart.de/~hans/filmOblate.mpg
Un excellent film d'expérience de sédimentation
http://www.ica1.uni-stuttgart.de/~hans/suspension_teil.mpa

http://www.ica1.uni-stuttgart.de/~hans/sedimentation.html

http://www.ica1.uni-stuttgart.de/~hans/suspension_teil.mpa

Mouvement parabolique de tir (principe des artilliers)

Si l'on néglige le frottement de l'air, tout objet une fois lancé aura un mouvement parabolique (en tout cas son centre de masse *G*). En effet il n'est alors plus soumis qu'à la force d'attraction terrestre $\vec{f} = m.\vec{g}$ *(2ème loi de Newton ???).*

Soit une balle lancée à l'instant $t = 0$ depuis une hauteur et avec une vitesse initiale faisant un angle avec la direction horizontale

Le principe fondamental de la dynamique (seconde loi de Newton) s'écrit,

$$m\vec{a} = \sum_i \vec{f}_i = m\vec{g}$$

en projetant sur les axes Ox et Oy où l'axe *Oy* est dirigé vers le haut et $g > 0$.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0, \frac{d^2y}{dt^2} = -g$$

En intégrant une fois en temps et en tenant compte des composantes de la vitesse initiale ($V_0\cos\alpha_0$, $V_0\sin\alpha_0$) :

$$\frac{dx}{dt} = V_0 \cos\alpha_0, \frac{dy}{dt} = V_0 \sin\alpha_0 - gt$$

La position à chaque instant t est alors donnée par l'intégrale des équations précédentes, avec comme position de départ x(0) = 0 et y(0) = h_0

$$x(t) = V_0 \cos\alpha_0 .t, y(t) = V_0 \sin\alpha_0 .t - \frac{1}{2}gt^2 + h_0$$

C'est l'équation de la trajectoire paramétrée par le temps *t*. On peut trouver une équation explicite en éliminant la variable *t*. La première équation donne en effet : $t(x) = x / V_0 \cos\alpha_0$, soit en remplaçant dans la deuxième :

$$y(x) = -\frac{1}{2}g\frac{x^2}{(V_0 \cos\alpha_0)^2} + x.tg\alpha_0 + h_0$$

Pour tout *x* il existe une courbe passant par *y*(*x*). La réciproque n'est pas vrai est il existe des points de l'espace *M*(*x; y*) qui avec un module donné de la vitesse initiale *V0* ne peuvent être atteints par la balle. Ils correspondent au cas où l'équation du second degré en *x* n'admet pas de solutions réelles. Les points que l'on peut atteindre sont à` l'intérieur de la « parabole de sécurité » et ils peuvent être atteints par deux angles de tir.

Exercice : On considère une balle de masse *m* supposée ponctuelle et soumise uniquement à l'accélération constante de la gravité $\vec{g}$. On néglige ici l'effet de l'air et donc des frottements.

1) Ecrire les équations du mouvements pour une balle lancée avec la vitesse initialeV_0 faisant un angle α avec l'axe horizontal *Ox* à partir d'un point origine (x_0,y_0) = (0,*h*).

2) Calculer la trajectoire de la balle. Calculer le point de contact avec le sol en fonction de V_0, α et *h*.

3) Montrer qu'un point (*x; y*) = (*L;* 0) ne peut être atteint qu'à certaines conditions.