



**UNIVERSITÉ
PARIS-SUD 11**



Université Paris-Sud 11

Licence 1



Phys 135 :
PHYSIQUE du SPORT



NOTES DE COURS
&
TRAVAUX DIRIGES



Marc Rabaud



2009/2010

M. RABAUD,
Laboratoire FAST, Bât. 502 – 91405 ORSAY CEDEX
Tél. : 01 69 15 80 87 – Fax : 01 69 15 80 60 – e-mail : rabaud@fast.u-psud.fr
(Version du 20 février 2012)

Table des matières

1	Introduction	7
2	Sports de balle	11
2.1	Parabole de tir	11
2.2	Effet de l'air	13
2.2.1	Chute verticale	14
2.3	Loi de collision	14
2.4	Tennis	15
2.5	Tennis de table	16
2.6	Le basket	17
2.7	le billard	17
2.8	Le bowling	17
2.9	Football	17
2.10	Rugby	18
2.11	Golf	18
3	Analyse dimensionnelle et similitude	19
3.1	Exemple de la traînée d'une sphère	19
3.2	Notion de similitude	21
3.2.1	Similitude pour une maquette de navire	21
3.2.2	Pourquoi les enfants marchent-ils facilement pieds-nus sur les gravillons ?	21
3.2.3	Pourquoi un animal de 50 m de haut ne peut-il exister sur Terre ?	21
4	Métabolisme	23
4.1	Fonctionnement des muscles	23
4.1.1	Les trois régimes de fonctionnement musculaire	23
4.2	VO2 max	25
4.3	Fréquences cardiaques	26
4.4	Puissance maximale développée	27
4.5	Temps de réaction	27
4.6	Morphologie par sport	28
4.7	Exercices	28
5	Athlétisme	31
5.1	La marche ? Un problème d'oscillateur ?	31
5.1.1	Période des oscillations d'un pendule pesant	31
5.2	La course à pied	32

5.2.1	Le modèle de Hill-Keller pour les courses de sprint	33
5.2.2	Les courses de fond	35
5.3	Lancé du poids	36
5.4	Saut à la perche	37
5.5	Saut en hauteur	37
5.5.1	Pourquoi les animaux sautent-ils tous à peu près à la même hauteur?	37
5.6	Saut en longueur	38
5.7	Décathlon	38
6	Sports de glisse	39
6.1	Ski	39
6.1.1	Frottement sur la neige	39
6.1.2	Frottement de l'air	40
6.2	Roller ou patineur à glace ou ski de fond	40
6.3	Saut à ski	40
7	Sports d'eau	43
7.1	Natation	43
7.2	Voile	44
7.3	Aviron, canoë et kayak	45
7.4	Surf	47
7.5	Plongée	47
7.5.1	Evolution de la pression avec la profondeur	47
7.5.2	La poussée d'Archimède	48
7.5.3	La compressibilité de l'air	48
7.5.4	Optique et acoustique sous-marine	49
7.6	Plongeon	49
8	Autres sports	51
8.1	Cyclisme	51
8.1.1	Couples et forces	52
8.1.2	Effet du frottement de l'air :	52
8.1.3	Calcul de puissance pour un cycliste :	52
8.1.4	Dopage :	52
8.1.5	Equilibre du vélo :	52
8.1.6	Sites :	53
8.2	Escalade	53
8.3	Saut à l'élastique	53
8.4	Tir à l'arc	53
8.5	Parachutisme	54
8.6	Vol à voile, parapente et deltaplane	54
8.7	Les ricochets	54
8.8	Le yo-yo	54
8.9	Bâton du diable	55

9	Références générales	57
9.1	Livres :	57
9.2	Revue :	57
9.3	Sur la toile :	57
9.4	Films :	57
9.5	CD :	58
10	TD et examens : Sports et Physique	61
10.1	Exercices	61
10.2	Examen de décembre 2008 : Dimensionnement d'une planche à voile	62
10.3	Examen de décembre 2007 : Physique de l'aviron	64
10.3.1	Equilibre statique du skiff	64
10.3.2	Mouvement du skiff sous l'action d'une force propulsive constante F_0	64
10.3.3	Mouvement du skiff sous l'action d'une puissance constante P_0	65
10.3.4	Influence du nombre de rameurs	66
10.4	Examen de juin 2007 : Puissance dissipée par un cycliste	67
10.5	Examen de janvier 2007 : sauts divers	69
10.6	Examen de janvier 2006 : Tennis	73
10.6.1	Andy Roddick au service !	73
10.6.2	Lettre de candidature (1 page environ).	73

Chapitre 1

Introduction

Ce polycopié est issu d'un cours d'option de 25 heures en première année de Licence. Il est très préliminaire et doit donc être amélioré ! Vous pouvez y participer en envoyant vos commentaires et suggestions à rabaud@fast.u-psud.fr. Merci.

Discipline	Record homme	Nom (date)	Record femme	Nom (date)
100 m	9 s 58	Usain Bolt (2009)	10 s 49	Florence Griffith-Joyner (1988)
110 m haies	12 s 87	D. Robles (2008)	12 s 21	Yordanka Donkova (1988)
200 m	19 s 19	Usain Bolt (2009)	21 s 34	Florence Griffith-Joyner (1988)
400 m	43 s 18	Michael Johnson (1999)	47 s 60	Marita Koch (1985)
400 m haies	46 s 78	Kevin Young (1992)	52 s 34	Yuliya Pachonkina (2003)
800 m	1 mn 41 s 11	Wilson Kipketer (1997)	1 mn 53 s 28	Jamilla Kratochvilova (1983)
1500 m	3 mn 26 s 00	Hicham El Guerrouj (1998)	3 mn 50 s 46	Qu Yunxia (1993)
3000 m steeple	7 mn 53 s 63	Said Saaef Shaheen (2004)	9 mn 01 s 59	Gulnara Samitova (2004)
5000 m	12 mn 37 s 35	Kenenisa Bekele (2004)	14 mn 11 s 15	Tirunesh Dibaba (2008)
10000 m	26 mn 17 s 53	Kenenisa Bekele (2005)	29 mn 31 s 78	Wang Junxia (1993)
Marathon (42,195 km)	2 h 03 mn 59 s	Haile Gebreselassie (2008)	2 h 15 mn 25 s	Paula Radcliffe (2003)
400 m haie	47 s 78	Kevin Young (1992)	52 s 34	Yuliya Pachonkina (2003)
20 km marche	1 h 17 mn 16 s	V. Kanaykin (2007)	1 h 25 mn 41 s	Olimpiada Ivanova (2005)
50 km marche	3 h 34 min 15 s	D. Nizhegorodov (2008)	-	-
Perche	6,14 m	Sergueï Bubka (1994)	5,06 m	Yelena Isinbayeva (2009)
Saut en hauteur	2,45 m	Javier Sotomayor (1993)	2,09 m	Stefka Kostadinova (1987)
Longueur	8,95 m	Mike Powell (1991)	7,52 m	Galina Chistyakova (1988)
Triple saut	18,29 m	Jonathan Edwards (1995)	15,50	Inessa Kravets (1995)
Javelot	98,48 m	Jan Zelezny (1996)	71,70 m	Osleidys Menendez (2005)
Poids	23,12 m	Randy Barnes 1990	22,63	Nadezhda Lisovskaya (1987)
Disque	74,08 m	Jurgen Schult (1986)	76,80 m	Gabrielle Reinsch (1988)
Marteau	86,74 m	Yuriy Sedykh (1986)	78, 61 m	Tatyana Lysenko (2007)

Discipline	Record homme	Nom (date)	Record femme	Nom (date)
100 m nage libre	47,84 s	Pieter Hoogenband (2000)	53,52 s	Jodie Henry (2004)
Cyclisme (heure)	56,375 km	Chris Boardman (1996)	46,065 km	Leontien Zijlaard-Van Moorsel (2003)
Voile (vitesse)	93,65 km/h	Alexandre Caizergues (2008)	83,75 km/h	Sjoukje Bredenkamp (2008)

TABLE 1.1 – Tableau des principaux records du monde

Chapitre 2

Sports de balle

Sports	diamètre (mm)	masse (g)	coefficient de restitution
Tennis	65,1 ± 1,6	58	0,80
Squash	40	24	0,12 (à 23 °) et 0,3 (à 45 °)
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	0,752
Hockey	75×25	160	
Poids (lancer)	110	7260	

TABLE 2.1 – Tableau des tailles et des masses de différentes balles

2.1 Parabole de tir

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 l'attraction terrestre $\vec{p} = m\vec{g}$.

Soit une balle lancée à l'instant $t = 0$ depuis une hauteur h_0 et avec une vitesse initiale \vec{V}_0 faisant un angle α_0 avec la direction horizontale (voir figure 2.1).

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

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

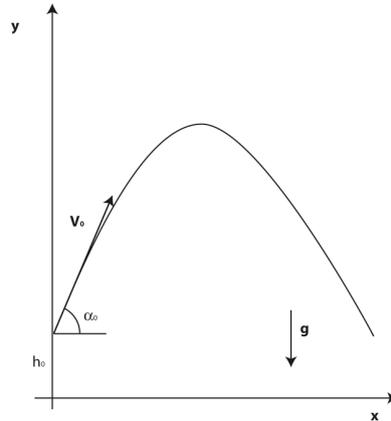


FIGURE 2.1 – Trajectoire parabolique d’une balle lancée avec une vitesse \vec{V}_0 dans le champ de gravité.

En projetant sur les axes Ox et Oy il vient :

$$\ddot{x} = 0 \quad (2.1)$$

$$\ddot{y} = -g \quad (2.2)$$

où l’axe Oy est dirigé vers le haut et $g > 0$.

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

$$\dot{x} = V_0 \cos \alpha_0 \quad (2.3)$$

$$\dot{y} = V_0 \sin \alpha_0 - gt. \quad (2.4)$$

La position à chaque instant est alors :

$$x(t) = V_0 \cos \alpha_0 t \quad (2.5)$$

$$y(t) = V_0 \sin \alpha_0 t - \frac{1}{2}gt^2 + h_0. \quad (2.6)$$

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 :

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

Pour tout x il existe une courbe passant par $y(x)$. La réciproque n’est pas vraie : il n’existe pas de points de l’espace $M(x, y)$ qui, avec un module donné de la vitesse initiale V_0 , 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 mouvement pour une balle lancée avec la vitesse initiale \vec{V}_0 faisant un angle α avec l'axe horizontal Ox à partir d'un point origine $(x_0, y_0) = (0, h_0)$.

2) Calculer la trajectoire de la balle. Calculer le point de contact avec le sol en fonction de V_0 , α et h_0 .

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

4) Montrer que pour atteindre un point au sol le plus loin possible il faut choisir un angle α qui dépend de h_0 . Vérifier que pour $h_0 = 0$ on trouve $\alpha = \pi/2$.

2.2 Effet de l'air

L'effet de l'air sur la trajectoire d'une balle peut être important.

Dans l'air on nomme **force de traînée** (drag en anglais) la force de frottement opposée au vecteur vitesse de la balle. On peut montrer qu'elle s'écrit comme :

$$F_D = 1/2 \rho_{air} V^2 A C_D(Re),$$

où ρ_{air} est la masse volumique de l'air (environ 1 kg/m^3 à température ambiante), V la vitesse de la balle, A la section de la balle perpendiculaire au mouvement (πR^2 pour la section d'une sphère) et C_D un coefficient sans dimension qui dépend un peu de la vitesse à travers le nombre de Reynolds ($Re = VR/\nu$ où $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ est la viscosité de l'air) comme le montre la figure 2.2.

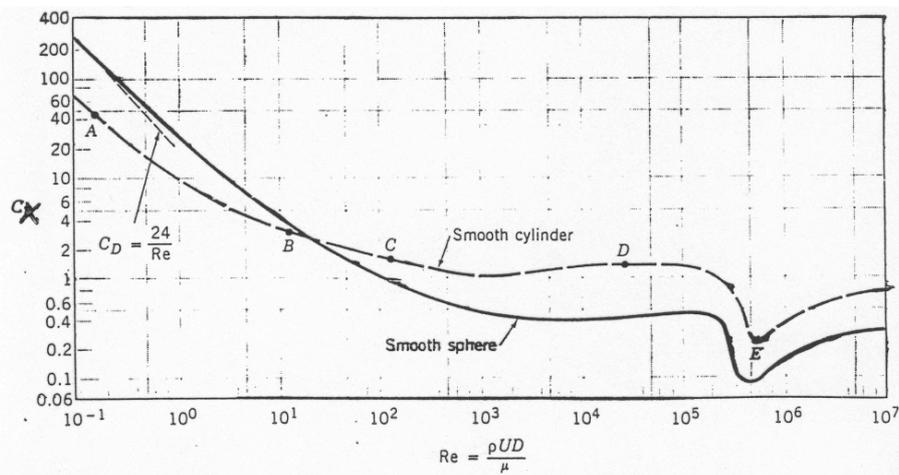


FIGURE 2.2 – Evolution de la traînée adimensionnée d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds. Noter les échelles logarithmiques.

A cette force de traînée peut aussi s'ajouter **une force de portance** (lift en anglais) perpendiculaire au vecteur vitesse. Cette force est positive ou négative selon le sens de rotation de la balle sur elle-même. Tous les effets de balle sont dus à cette force aussi appelée force de Magnus. On peut montrer que cette force s'écrit pour une balle en rotation à la vitesse angulaire Ω :

$$F_L = \rho_{air} V R^3 \Omega C_L(Re),$$

où C_L est une coefficient sans dimension.

On peut estimer l'importance relative de ces 2 forces en les comparant au poids de la balle. Si elles sont faibles elles auront peu d'effet et la trajectoire sera parabolique (exemple du lancer de poids) mais si elles sont importantes on ne peut plus les négliger bien que les calculs soient alors bien plus complexes. En effet ces forces changent de directions comme le vecteur vitesse et il faut recourir au calcul numérique sur ordinateur.

Un seul cas peut se résoudre simplement, c'est le cas de la chute verticale, sans vitesse initiale ni rotation.

2.2.1 Chute verticale

Soit un objet soumis simplement à son poids et à une force de traînée F_D avec un coefficient C_D que l'on supposera constant. En prenant un axe vertical orienté vers le bas la seconde loi de Newton s'écrit :

$$m \frac{dv}{dt} = mg - 1/2 \rho_{air} \pi R^2 C_D v(t)^2$$

que l'on peut réécrire

$$\frac{dv}{dt} = g \left[1 - \left(\frac{v(t)}{v_\infty} \right)^2 \right]$$

avec

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_{air} \pi R^2 C_D}}.$$

Cette vitesse v_∞ correspond en effet à la vitesse limite à temps long lorsque la force de traînée compense le poids et donc que l'accélération de la balle est nulle. Pour intégrer cette équation on peut écrire :

$$\frac{dv(t)}{\left[1 - \left(\frac{v(t)}{v_\infty} \right)^2 \right]} = g dt$$

et remarquer que le membre de droite peut aussi s'écrire comme la différence de 2 fractions

$$dv \left[\frac{1}{1 - \frac{v(t)}{v_\infty}} + \frac{1}{1 + \frac{v(t)}{v_\infty}} \right] = 2g dt$$

soit en intégrant

$$\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1 + v(t)/v_\infty}{1 - v(t)/v_\infty} \right) = t/\tau$$

avec $\tau = v_\infty/g$

soit encore en introduisant la fonction tangente hyperbolique :

$$\boxed{v(t) = v_\infty \tanh(t/\tau)}.$$

Tracer cette fonction et décrire la dynamique de la balle à temps court et à temps long.

2.3 Loi de collision

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 $e < 1$.

Exercice : Ecrire h_n la hauteur du n -ème rebond d'une balle lâchée sans élan d'une hauteur h_0 en fonction du coefficient de restitution e . Calculer la durée du rebond n ainsi que la durée totale T_n depuis le premier rebond. On montrera en particulier que pour $n \rightarrow \infty$ il existe toujours de petit rebond dans ce modèle mais que pourtant la balle s'arrête en un temps fini T_∞ !

- 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.

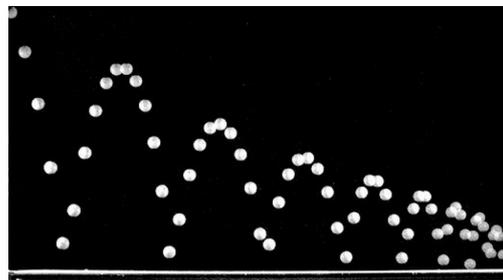


FIGURE 2.3 – Rebonds successifs d'une balle

2.4 Tennis

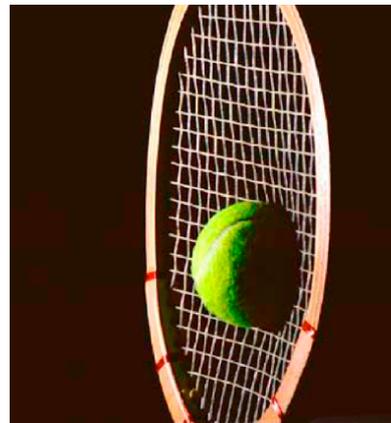


FIGURE 2.4 – Collision d'une balle de tennis et d'une raquette

Activités :

- Chercher sur internet comment fonctionnent les radars mesurant la vitesse des balles au service.
- Loi de collision.
- Qu'est-ce qui différencie une surface "rapide" d'une surface "lente" ? Discuter le cas du gazon, de la terre battue et des surfaces synthétiques.

- Centre de percussion. Montrer que si l'on suspend une raquette par son manche et qu'on envoie dessus une balle de tennis, la raquette tournera dans un sens ou dans l'autre selon la hauteur du choc. En déduire l'existence d'un « centre de percussion » où la rotation est nulle.

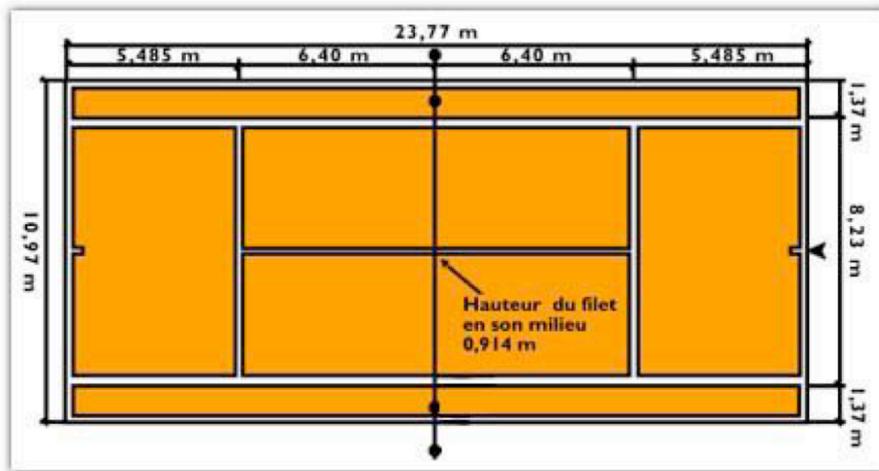


FIGURE 2.5 – Dimension d'un cours de tennis

Exercice : Service au tennis. Dans un manuel d'apprentissage du tennis on peut lire le conseil suivant concernant le service : « Frappez la balle devant vous de façon à donner à la balle une vitesse au-dessous de la direction horizontale ».

Un tennismen frappe la balle à une hauteur $h = 2,40$ m. Le vecteur vitesse de la balle est dirigé vers le bas, fait un angle $\alpha = 10^\circ$ avec l'horizontale et a une valeur $V_0 = 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. a) Etablir les équations paramétriques du mouvement de la balle.

- En déduire l'équation de la trajectoire.
- La balle passera-t-elle au-dessus du filet de 0,91 m situé à 11,89 m du serveur ?
- 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>

2.5 Tennis de table

Au tennis de table les effets sur les balles (coupées, liftées, top spin, side spin, etc) sont très importants. En effet comme la balle est légère il est possible de donner de fortes rotations à la balle, ce qui modifie les trajectoires et les rebonds. La force de Magnus sur une balle en rotation sur elle-même est proportionnelle à la vitesse de la balle \vec{U} et à son vecteur vitesse angulaire $\vec{\Omega}$. La direction de la force est donnée par la relation : $\vec{F}_{Magnus} \propto \vec{\Omega} \wedge \vec{U}$.

Exercice : Sachant qu'une balle de tennis de table a un diamètre de 40 mm et un poids de 0,0245 N, quelle doit être l'ordre de grandeur de sa vitesse angulaire pour que la force de Magnus soit comparable à son poids si elle est lancée à 10 m/s ? Quel sera alors sa trajectoire si on la frappe en backspin ?

2.6 Le basket

A discuter :

- Parabole de tir lors d'un lancer franc.
- Dribble. Coefficient de restitution. Effet de la rotation de la balle.

Lancer franc : L'anneau du panier est à 3,05 mètres, à un diamètre de 45 cm. Le panneau est lui à 1,2 mètre du fond du terrain. La ligne de lancé franc est à 5,8 mètres du fond du terrain. Pour un lancé à partir d'une hauteur de 1,8 m, donner la vitesse initiale de lancé en fonction de l'angle de tir.

2.7 le billard

A discuter :

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

Pour en savoir plus :

- *La pratique du billard*, Régis Petit, Pour la Science **246**, avril 1998, p. 94-97.
- Livre de Ron Shepard, « Amateur Physics for the Amateur Pool Player », http://www.sfbilliards.com/shepard_apapp.
- <http://videobillard.free.fr/simu/experience.htm#biblio>

2.8 Le bowling

A discuter :

- Loi de collision. centre de percussion.
- frottement.
- Effet « gyroscopique ».

Article : *Le strike facile au bowling*, Patrick David, Pour la Science **251**, septembre 1998, p. 106-108. Chapitre du livre *Yo-yo, billard, boomerang... Physique des objets tournants*, Belin 2001.

2.9 Football

A discuter :

- Loi de collision. centre de percussion.



- Effet « Magnus ».
- Balles brossées, coupées, liftées. La force de portance s'écrit : $F_L \propto \rho V \Omega R^2$.

Pour en savoir plus :

- **Livre :** *La science du football*, John Wesson, Belin, Pour la Science, 2004.
- <http://physics.unl.edu/outreach/football.html>
- <http://www.esj-lille.fr/atelier/magan2/foot/>

2.10 Rugby

Article : *Le vol de l'ovale*, J.-M. Courty et E. Kierlik, Pour la Science, Septembre 2007.

2.11 Golf

A discuter :

- Loi de collision. Effet de la masse et de la souplesse du club.
- Crise de traînée sur une balle de golf (figure ??). Forme des balles. La balle présente 330 (balle anglaise) ou 336 (balle américaines) fossettes.
- Balles brossées, coupées, liftées. La force de portance s'écrit : $F_L \propto \rho V \Omega R^2$. Comparer le poids de la balle à la force de Magnus. Vitesse initiale typique 75 m/s et environ 3500 tour/mn de rotation vers l'arrière (back spin).

Pour en savoir plus :

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

Chapitre 3

Analyse dimensionnelle et similitude

Les mathématiciens et les physiciens théoriciens résolvent des équations adimensionnées dont les paramètres et les coefficients sont des nombres réels ou complexes. Pourtant concrètement le physicien cherche des relations entre des quantités qui ont une dimension ; des forces, des énergies, des viscosités, des tailles ou des masses volumiques par exemple. Ces dimensions sont toutes exprimables dans une base de dimensions, par exemple le Système International (SI), ou simplement masse, longueur et temps dans la plupart des applications en mécanique. Ce choix n'est pas unique, on peut par exemple préférer un système construit avec une force, une énergie, etc. Nous savons qu'une équation, pour avoir un sens, doit être "homogène en dimension". Mais on peut aller un peu plus loin, et prédire à partir d'une hypothèse réaliste sur les paramètres pertinents la dépendance d'une quantité en fonction des autres variables et d'un certain nombre de "nombres sans dimension" dont la mécanique des fluides est si friande.

Présentons maintenant la méthode de l'analyse dimensionnelle avant d'étudier un exemple au § 3.1.

• **Attention**, l'analyse dimensionnelle est un outil extrêmement puissant, mais aussi très dangereux ! Si l'on oublie ou si l'on se trompe sur le choix des variables physiques à considérer le résultat devient faux. Le « sens physique » doit permettre de sélectionner les variables indépendantes pertinentes.

3.1 Exemple de la traînée d'une sphère

Appliquons maintenant ce théorème sur un premier exemple concret. On cherche à calculer la force de traînée d'une sphère dans un liquide visqueux. On recherche une solution stationnaire F_D du problème. De quoi peut-elle dépendre ? Certainement du rayon R de la sphère, de la vitesse U de déplacement de l'obstacle par rapport au liquide et de la viscosité ν du liquide, quantité qui différencie par exemple le mouvement dans l'eau du mouvement dans du miel. L'analyse dimensionnelle nous donne :

- dimension de R , une longueur. Ce que l'on note $[R] = L$.
- $[U] = L/T$ où T est un temps.
- $[\nu] = L^2/T$.
- $[F_D] = ML/T^2$ où M est une masse.

Comme il n'y a pas de masse dans les trois premières variables on ne peut pas avoir d'équation du type $F_D = f(R, U, \nu)$. Il y a forcément une autre variable contenant une unité de masse qui intervient

dans le problème. Peut-être la masse volumique ρ du fluide. Attention si l'on met ici autre chose comme la masse volumique de la sphère, ou sa masse, ... on peut trouver des résultats justes au niveau des dimensions mais incorrects au point de vue de la physique. L'intuition physique a donc beaucoup d'importance à ce niveau. Formellement on peut tout à fait mettre ici la masse de l'expérimentateur, ou même celle de sa belle-mère, mais ce n'est pas forcément pertinent !

Supposons donc que nous écrivions que $F_D = f(R, U, \nu, \rho)$ nous aurons donc à satisfaire l'équation aux dimensions $[F_D] = [R]^\alpha [U]^\beta [\nu]^\gamma [\rho]^\delta$ soit $ML/T^2 = L^\alpha (L/T)^\beta (L^2/T)^\gamma (M/L^3)^\delta$. Ce qui nous donne un système de 3 équations et 4 inconnues, avec par exemple comme solution $\delta = 1, \gamma = 2 - \alpha, \beta = \alpha$ avec α libre. On peut donc écrire

$$F_D = R^\alpha U^\alpha \nu^{2-\alpha} \rho F(Re)$$

où $Re = \frac{U 2R}{\nu} = \frac{UD}{\nu}$ est appelé le nombre de REYNOLDS et c'est le seul nombre sans dimensions que l'on peut fabriquer avec les variables R, U, ν, ρ (vérifier le). On peut écrire une forme équivalente plus simple :

$$F_D = \rho U^2 R^2 F'(Re).$$

On définit souvent le coefficient de traînée (sans dimension), C_D parfois aussi appelé C_x en français par :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A},$$

où $A = \pi R^2$ est l'aire de la section de l'obstacle.

Notre analyse dimensionnelle nous prédit que $C_D = f(Re)$. C'est en effet ce que l'on observe expérimentalement (figure ??). A faible nombre de REYNOLDS on démontre le résultat exact $C_D = 24/Re$. Ceci montre que la force de traînée F_D augmente d'abord comme la vitesse à faible Re puis comme le carré de la vitesse lorsque $C_D \approx cste$, sauf au moment du décrochement appelé crise de traînée pour $Re \approx 400\,000$.

Lorsque le Reynolds n'est pas très petit devant l'unité, OSEEN a calculé le terme correcteur (valable si $Re \leq 5$) : $C_D = \frac{24}{Re} (1 + \frac{3}{16} Re)$.

Il existe ensuite des formules empiriques approchées qui donnent d'assez bon résultats jusqu'à la crise de traînée ($Re \leq 400\,000$) par exemple la relation de WHITE :

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4.$$

• Applications :

- Calculer de la traînée sur une balle de tennis à 200 km/h. $R = 33$ mm, $\nu_{air} = 15 \cdot 10^{-6} m^2/s$, $\rho_{air} = 1,29 Kg/m^3$. Comparer au poids de la balle ($M = 50$ g).

Notons que si la sphère n'est pas lisse (cas d'une balle de golf par exemple, du duvet de la balle de tennis) il apparaît au moins une nouvelle variable sans dimension (par exemple le rapport rugosité/rayon).

De même s'il existe plus d'une dimension (ellipsoïde plutôt que sphère par exemple) alors l'analyse dimensionnelle prédit l'existence d'au moins un autre nombre sans dimension, par exemple le rapport grand axe sur petit axe a/b si on a affaire à une ellipsoïde de révolution. Ensuite le problème peut aussi dépendre de l'angle α entre l'axe de l'ellipsoïde et l'écoulement. Alors on aura $C_D = f(Re, a/b, \alpha)$.

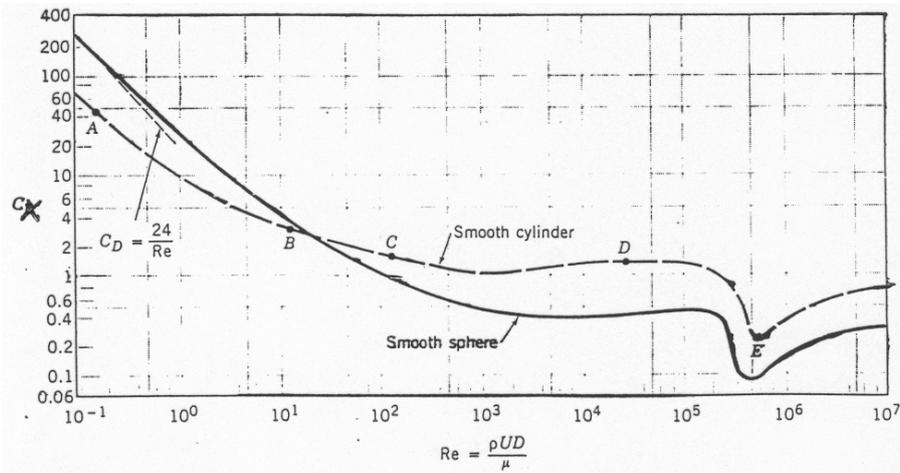


FIGURE 3.1 – Evolution de la traînée adimensionnée d’une sphère en fonction du nombre de REYNOLDS. Noter les échelles logarithmiques.

3.2 Notion de similitude

On dit que deux problèmes sont similaires s’ils sont gouvernés par les mêmes nombres sans dimension. Par exemple s’ils ont le même rapport d’aspect (même rapport de taille). Alors résoudre l’un des problèmes, c’est aussi résoudre l’autre. Prenons quelques exemples.

3.2.1 Similitude pour une maquette de navire

Le sillage d’un bateau et en particulier la traînée que l’eau exerce sur la coque peut être décomposée en plusieurs termes, en particulier la traînée de forme — caractérisé par le coefficient $C_D = f(Re)$ — et la traînée de vague — caractérisée par un coefficient $C_{vague} = f(Fr)$ où $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$ est le nombre de FROUDE. La traînée de vague correspond à l’énergie transportée à l’infini par les ondes de surface. Pour faire une maquette en similitude, il conviendrait de choisir une échelle de réduction de toutes les dimensions géométriques et d’avoir le même nombre de REYNOLDS et le même nombre de FROUDE pour bien respecter la part relative de traînée de forme et de traînée de vague. Mais on vérifie aisément que c’est impossible, en tout cas en conservant l’eau comme fluide porteur et sans modifier \vec{g} ! Lorsque l’on fait des essais de traction sur maquette en bassin d’essais de carène il convient de travailler soit en ”similitude de REYNOLDS” soit en ”similitude de FROUDE”.

3.2.2 Pourquoi les enfants marchent-ils facilement pieds-nus sur les gravillons ?

Si on suppose les enfants et les adultes homothétiques, leur poids est proportionnel à leur volume L^3 alors que la surface des pieds est proportionnelle à L^2 . En conséquence la pression exercée par les gravillons sur la plante des pieds est proportionnelle à L . Plus on est grand, plus ça fait mal !

3.2.3 Pourquoi un animal de 50 m de haut ne peut-il exister sur Terre ?

Là aussi si on fait croître de façon homothétique (sans changer la forme) la taille d’un animal, son poids augmente comme L^3 alors que la section de ses fémurs par exemple croît comme L^2 . La

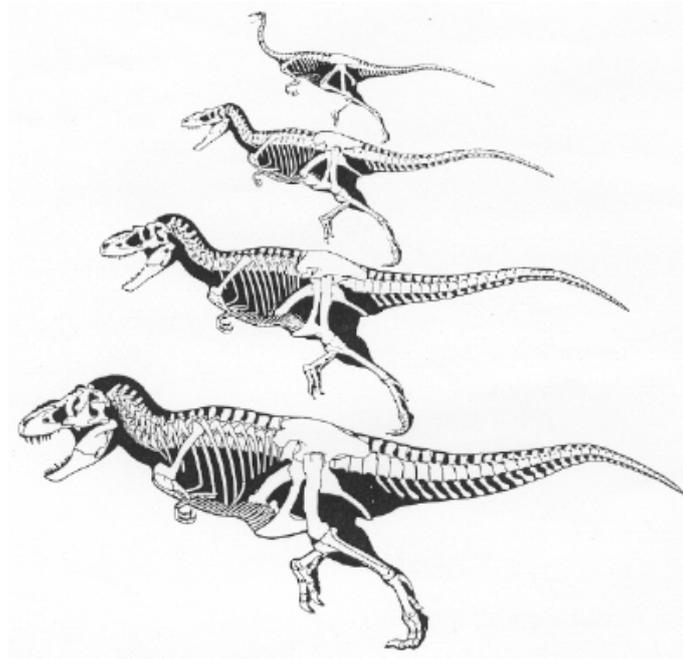


FIGURE 3.2 – Comparaison des tailles et donc des rapports d'aspect des squelettes de théropodes. Du plus petit au plus grand, un ornithomimus (165 kg), deux tyrannosaures (750 kg et 2500 kg) et un tyrannosaure rex (6000 kg). D'après [3] p. 126.

contrainte de compression sur chaque fémur augmente donc comme L . S'il existe une contrainte maximale avant rupture de l'os, il existe une taille maximum pour cette espèce d'animaux.

En l'occurrence, un fémur de mammouth n'est pas homothétique à un fémur de héron, et la figure 3.2 montre que les os de théropodes (dinosaures sans doute ancêtres des oiseaux) ne sont pas homothétiques lorsque l'on passe du plus petit (160 kg) au plus gros (6000 kg).

Chapitre 4

Métabolisme

Nous consommons de l'ordre de 3000 Calories/jour soit 12 Mjoule/jour soit 140 Watts de puissance moyenne. Environ 75% de cette énergie est transformée en chaleur (chauffage et métabolisme de base de la vie sédentaire). Mais nous pouvons développer une puissance bien plus grande et un sportif de haut niveau peut fournir un effort de l'ordre de 300 Watts pendant plusieurs heures.

A titre d'exemple, calculer l'énergie potentielle correspondant à une randonnée en montagne avec une montée de 1000 m. Estimer la puissance dissipée si vous le faites en 3 heures.

4.1 Fonctionnement des muscles

Activité : dans un livre de SVT, chercher les mots suivants : fibre musculaire, actine et myosine, sarcomère, moteur moléculaire. On pourra aussi consulter le site : <http://prevost.pascal.free.fr/theorie/muscle/contraction.htm>

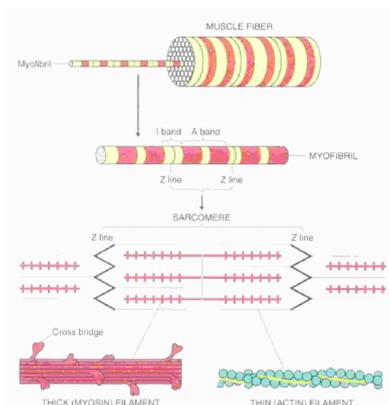


FIGURE 4.1 – Schéma d'un moteur moléculaire

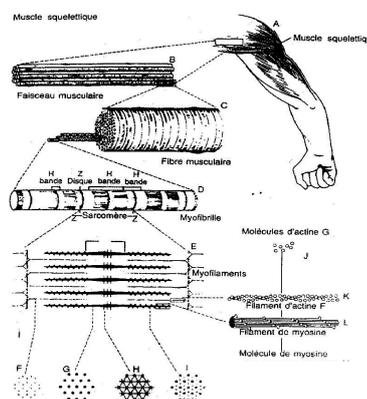


FIGURE 4.2 – Schéma des fibres musculaires

4.1.1 Les trois régimes de fonctionnement musculaire

Les deux premiers correspondent à des efforts **anaérobiques** (sans apport d'oxygène) le dernier aux efforts **aérobiques**.

- Aux temps très courts (1 à 2 secondes) : Dans ce régime l'ATP (Adénosine Triphosphate) stocké localement dans les muscles est transformé en ADP (Adénosine diphosphate). Dans ce cas la

puissance est proportionnelle au volume des muscles. Un champion peut produire une puissance instantanée de 2500 Watts !

- Pendant une dizaine de secondes, le sportif peut produire 20 à 50 kJoule en cassant le glycogène (mais il fabrique alors de l'acide lactique ce qui peut provoquer des courbatures si sa concentration est trop élevée) et l'ADP est aussi régénéré en ATP par la phosphocréatine.
- Dans ce troisième régime, mis en route après l'échauffement, les muscles brûlent des hydrates de carbone, du sucre ou des graisses. La puissance motrice maximale fournie est alors de l'ordre de 400 Watts pour un cycliste professionnel en montagne alors qu'elle est de l'ordre de 150 Watts pour un cycliste amateur !

Mais il existe un fort recouvrement entre ces trois régimes (figure 4.3).

Le fonctionnement d'un muscle est basé au niveau local sur le déplacement relatif des filaments d'actine et des filaments de miosine (figure 4.1). Les moteurs moléculaires localisés sur ces filaments, environ 1000 par filament, développent une force élémentaire de l'ordre de 10^{-12} Newtons et se déplacent seulement de 10 nanomètres environ. Ces filaments sont rassemblés dans des microfibrilles, elles-mêmes regroupées en fibres (figure 4.2). Le muscle du biceps est constitué par exemple de 750 fibres environ alors que le jumeau interne en a 1700. Grâce à l'arrangement des filaments à la fois en série et en parallèle un muscle strié peut se contracter de quelques centimètres et développer une force d'environ 60 N/cm^2 et ceci avec une vitesse maximum de l'ordre de 3,5 fois la longueur du muscle par seconde.

Le rendement énergétique musculaire est de l'ordre de 40 à 50%.

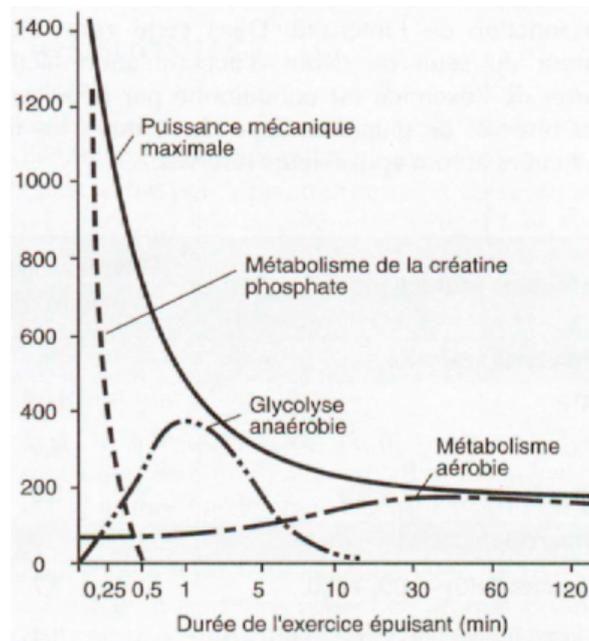


FIGURE 4.3 – Puissance en Watts en fonction du temps d'effort, montrant les 3 régimes de fonctionnement musculaire et leurs recouvrements.

4.2 VO2 max

Lors d'un effort le besoin en dioxygène augmente, l'amplitude et la fréquence de la respiration augmente, ainsi que la fréquence cardiaque. Le VO_2 Max est la mesure du débit maximum d' O_2 effectivement absorbé dans le sang. Il se mesure lors d'un test d'effort maximum en mesurant le volume et la concentration en O_2 de l'air expiré. On peut aussi l'estimer lors d'un test d'effort et en mesurant la fréquence cardiaque, en utilisant un « nomogramme » (figure 4.4).

Il s'exprime soit en litre d' O_2 gazeux consommé par minute soit en relatif (en millilitres d' O_2 consommé par minute et par kilogramme). Il est par exemple de l'ordre de 3 litres par minute ou de 40 millilitre par kilo et par minute pour un homme non entraîné de 30 ans. Le VO2Max augmente avec l'entraînement en endurance (augmentation du volume des alvéoles des poumons, du volume du cœur et du diamètre des artères et des capillaires).

Le débit sanguin à l'effort peut être de l'ordre de 35 l/mn.

La figure 4.5 donne par exemple le VO2 max d'une centaine de coureurs de marathon en fonction de leur temps de course. Il y a une nette corrélation. La vitesse de course du marathonien augmente avec son VO2Max.

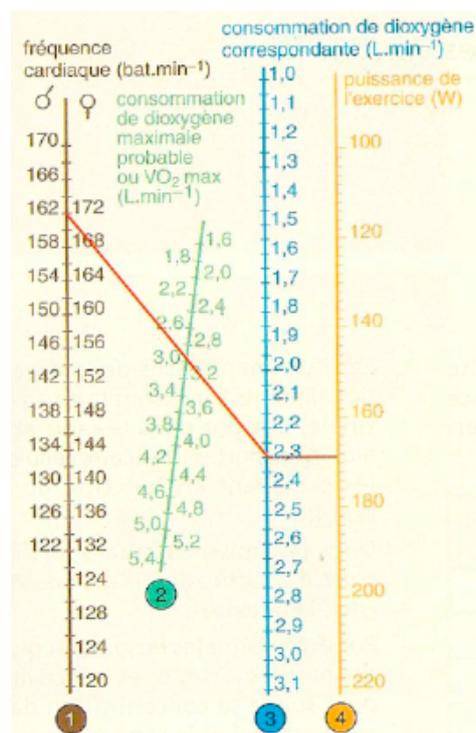


FIGURE 4.4 – Nomogramme pour l'estimation du VO_2 max. Par exemple pour un exercice physique de puissance 168 watts, la fréquence cardiaque d'un homme est mesurée à 162 bat/mn. Par projection horizontale on déduit de la puissance une consommation de dioxygène de 2,3 litres/mn. En reliant cette valeur au point 162 bat/mn on lit la valeur du VO_2 max (3 l/mn).

Exercice : Chercher des valeurs typiques de VO_2 Max pour un homme non entraîné de 30 ans ou pour un champion olympique.

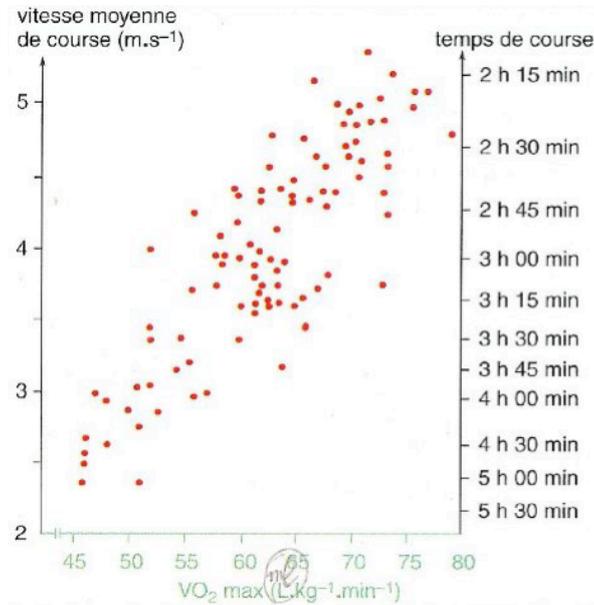


FIGURE 4.5 – Performance de différents marathoniens en fonction de leur VO_2 max (en millilitres par kilogramme et par minute).

4.3 Fréquences cardiaques

La fréquence cardiaque f peut se mesurer en prenant son pouls ou un peu plus précisément avec un cardio-fréquencemètre. Elle varie entre une fréquence minimale (FCmin) de l'ordre de 50 à 60 pulsations par minute au repos à une fréquence maximale (FCM) qui dépend de l'âge et de l'entraînement. On peut la mesurer au cours d'un effort intense mais le plus souvent on l'estime comme égale à $220 - l'age$. Par exemple $FCM \approx 200$ pulsations par minute à 20 ans et 180 à 40 ans. C'est une donnée physiologique qui varie peu malgré l'entraînement.

La connaissance de sa FCM est importante pour le sportif, elle distingue les efforts en endurance, lorsque $f < 80\%$ de FCM, des efforts en résistance, $f > 80\%$ de FCM.

En fonction de votre âge vous pouvez estimer votre FCM et remplir la dernière colonne du tableau suivant :

Type d'effort	% de la FCM	Fréquence cardiaque
Repos	30 %
Marche	40 %
Footing lent	60 %
Endurance fondamentale	70 %
Endurance active	80%
Résistance douce	90%
Résistance active	95%

Le seuil d'effort aérobie correspond à environ 85% de la FCM.

Pour en savoir plus : <http://www.conseils-courseapied.com/frequence-cardiaque-course-a-pied.html>

Activité : Mesurer vos fréquences cardiaques (en battement par minute) au repos, pendant la marche, pendant un footing ou lors d'un effort important. Compte-tenu d'une capacité cardiaque de l'ordre de 175 cm^3 (dépend du volume du cœur) en déduire les débits sanguins correspondant et les relier alors au $\dot{V}O_2 \text{ Max}$.

4.4 Puissance maximale développée

La table suivante donne quelques valeurs du flux de chaleur (en Watt par m^2) en fonction de l'activité. Sachant que pendant un effort intense on peut produire sur un temps de l'ordre de l'heure environ 350 Watts, calculer le flux de chaleur et le « met » correspondant. Indication : pour calculer l'aire d'une personne on peut utiliser la formule empirique : $A = 0,202M^{0,425} H^{0,725}$, ou M est la masse exprimée en kg et H la hauteur en mètre. Par exemple pour une personne de 1,70 mètres pesant 70 kg on trouve une surface de $1,8 \text{ m}^2$.

Activité	(W/m ²)	met
Repos, couché	46	0,8
Repos, assis	58	1
Activité légère, assis	70	1,2
Activité légère, debout	93	1,6
Activité moyenne, debout	116	2
Marche à plat (2 km/h)	110	1,9
Marche à plat (3 km/h)	140	2,4
Marche à plat (4 km/h)	165	2,8
Marche à plat (5 km/h)	200	3,4

TABLE 4.1 – Production d'énergie métabolique (AFNOR, 1995). Le « met » correspond au métabolisme moyen d'une personne assise au repos.

4.5 Temps de réaction

Pour beaucoup de sports les temps de réaction doivent être faibles. C'est particulièrement le cas en escrime, en tennis de table ou au tennis. Le temps de réaction tient compte du temps de propagation de l'information reçue par le récepteur (l'œil par exemple) vers le cerveau, de son traitement et du temps de retour de l'ordre de mouvement vers les muscles et de leur temps de contraction. Il faut compter entre un à trois dixièmes de seconde comme temps typique de réaction. Dans certains cas, les réactions sont de type réflexe et peuvent être un peu plus rapide.

Prenons le cas du tennis. Avec un service à 200 km/h, la balle parcourt environ 5 m par 1/10^{ème} de seconde. Il ne faut donc pas traîner pour réagir !

4.6 Morphologie par sport

A un haut niveau de compétition il y a clairement une corrélation entre le physique d'un sportif adulte et le sport qu'il pratique. Un lanceur de marteau n'a pas la même morphologie qu'un sauteur en hauteur, qu'un coureur de 100 m ou que d'un marathonien. On pourra tracer les grandes lignes des caractéristiques demandées a priori par différents sports, et à partir des mensurations de quelques athlètes (poids, taille, Indice de Masse Corporelle. . .) montrer graphiquement l'existence d'une corrélation.

L'IMC autrement dit l'indice de masse corporelle est défini comme le rapport de la masse sur la taille au carré. Son unité est donc le kg/m² et des valeurs typiques sont de l'ordre de 21 à 23 kg/m² (http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_masse_corporelle).

L'IMG est l'indice de masse grasse est un pourcentage des masses grasses par rapport à la masse totale. Une valeur typique est de l'ordre de 20 à 25 % (http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_masse_grasse).

4.7 Exercices

1. En mangeant une gaufre au chocolat, Arthur emmagasine 200 kcal. Pour dépenser ce surplus énergétique, il décide d'escalader une montagne. De quelle hauteur doit-il s'élever s'il pèse 60 kg ? (On ne considère que l'énergie de gravité.)
2. Au repos calculer l'apport de dioxygène en estimant le volume pulmonaire, la fréquence respiratoire. Idem lors d'un effort intense.
3. En estimant le volume cardiaque à 100 cm³ utiles, estimer le débit sanguin pour une fréquence cardiaque de 60 bpm (battements par minute) et de 180 bpm.
4. « **Mon sang n'a fait qu'un tour !** ». En combien de temps un globule rouge repasse-t-il par le cœur ? On considérera une personne de 70 kg, dont le sang représente 7 % de la masse. Au repos on considérera que le volume systolique est de 0,1 litre et que le cœur bat à 67 bpm.
5. La figure 4.6 montre le fonctionnement du biceps. L'avant-bras en position horizontale peut se modéliser par une barre articulée. Le poids P de l'avant bras est de 12 N, supposé appliqué au barycentre. Trouver la tension T exercée par le biceps et la force E exercée par l'articulation du coude. Si maintenant la main tient un poids de 50 N calculer les nouvelles forces T et E .

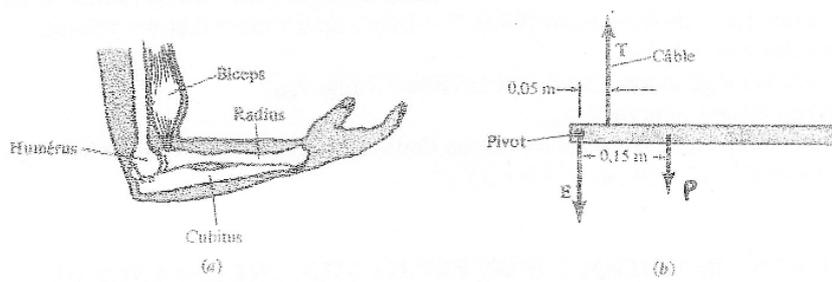


FIGURE 4.6 – Schéma du fonctionnement du biceps (a) et modélisation (b).

Chapitre 5

Athlétisme

5.1 La marche ? Un problème d'oscillateur ?

Pourquoi marche-t-on à une certaine vitesse et pas beaucoup plus lentement ou beaucoup plus vite (on préfère alors courir) ? C'est que nous profitons de la fréquence propre d'oscillation de nos jambes.

Pour un pendule simple, masse ponctuelle m pendue au bout d'un fil de longueur l , les petites oscillations ont une période $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ où g est l'accélération de la gravité. Vous pouvez le retrouver soit par analyse dimensionnelle, soit par le bilan des forces et la seconde loi de Newton.

5.1.1 Période des oscillations d'un pendule pesant

Soit un pendule constitué d'une masse ponctuelle m pouvant osciller librement sous l'action de la gravité au bout d'une tige de longueur l . On recherche une expression pour la période T des oscillations.

1. Si l'on suppose que $T = f(l)$ uniquement, l'analyse dimensionnelle nous montre que c'est impossible.
2. Si l'on suppose que $T = f(l, g)$ l'analyse dimensionnelle prédit que $T \propto \sqrt{l/g}$ ce qui n'est pas mal du tout sachant que le résultat exact pour de petites oscillations est $T = 2\pi\sqrt{l/g}$!
3. Si l'on suppose que $T = f(l, g, a)$ où a est l'amplitude horizontale des oscillations on trouve $T = \sqrt{l/g} F(a/l)$.
4. Si l'on suppose que $T = f(l, g, m)$ on trouve que T ne peut pas dépendre de m sans dépendre d'autres variables faisant intervenir la dimension d'une masse.
5. enfin si l'on suppose que $T = f(l, g, m, \eta, a)$ où η est la viscosité de l'air, on voit apparaître d'autres nombres sans dimensions possibles.

En réalité pour une jambe, où la masse est répartie il faut faire un calcul de mécanique du solide en faisant le bilan des moments et en introduisant le « moment d'inertie » I de la jambe. Si l'on considère pour simplifier que la jambe est un cylindre homogène de longueur $2l$ on trouve alors pour la période des petites oscillations :

$$T = 2\pi\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)\sqrt{\frac{l}{g}},$$

ce qui n'est pas très différent du résultat donné par la mécanique du point.

Faire osciller nos jambes avec un période plus faible ou plus forte que cette période naturelle ou période de résonance est bien plus fatigant.

De la période on peut en déduire le nombre de pas par minute $N = 2T/60$ le facteur 2 vient du fait que nous effectuons deux pas pendant une période d'oscillation (une jambe avance pendant $T/2$, l'autre pendant la demi période suivante). Si l'on compte que l'angle maximum d'oscillation est de l'ordre de $\theta_0 = 15^\circ$ on en déduit la longueur du pas $4l \sin \theta$ et donc la vitesse naturelle de marche $V = 4l \cos \theta / T$. On peut remarquer que le nombre de Froude, qui compare la vitesse de déplacement à la quantité \sqrt{gl} est : $Fr = V/\sqrt{gl} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sin \theta_0$. Il ne dépend que de l'amplitude de l'angle et il indépendant de la longueur des jambes et de la valeur de la gravité (il serait le même sur la Lune !).

Le tableau 5.1 donne quelques valeurs de ces quantités pour différents animaux.

Exercice : Calculer la vitesse de marche d'un homme sur la Lune.

Animal	1/2 longueur de jambe	période	Nombre de pas/mn	Vitesse	Nbre de Froude
	l (m)	T (s)	N/mn	V (m/s)	Fr
fourmi	0,001		1638	0,027	xx
chien	0,15		134	0,33	xx
homme	0,5	1,64	73	0,6	xx
cheval	0,6	xx	xx	xx	xx
Girafe	1	xx	xx	xx	xx
Tyrannosaure rex	1	xx	xx	xx	xx

TABLE 5.1 – Tableau donnant la vitesse de marche de différents animaux ($\theta_0 = 15^\circ$).

La transition entre la marche et d'autres allures est caractérisée par la valeur du nombre de Froude. Des études expérimentales montrent que la plupart des animaux passent du pas à une allure sautée lorsque $Fr \approx 0,5$. Pour les animaux on distingue le trot d'abord puis le galop pour $Fr \approx 1$.

Des chercheurs ont récemment cherché à montrer que l'éléphant savait galoper (voir le site <http://news-service.stanford.edu/news/2003/april9/elephants-49.html>) !

La figure 5.1 montre la consommation de dioxygène du cheval aux différentes allures. On y voit clairement que pour chaque allure il existe une vitesse qui minimise la consommation énergétique.

Article : *Les déplacements des vertébrés*, Jean-Pierre Gasc, Pour la Science **141**, 1989, p. 56-65.

5.2 La course à pied

On ne cours pas à la même vitesse un 100 m, un 800 m ou un marathon. A partir des temps de record du monde actuels (voir tableau 1.1 page 9) on peut tracer deux courbes du temps de course (hommes et femmes) en fonction de la distance (figure 5.4). Si on fait ce tracer en échelle log-log on s'aperçoit que les temps sont très bien ajustés par des lois empiriques : $T = aL^b$ avec $a = 0,058$ et $b = 1,108$ pour les hommes et $a' = 0,063$ et $b' = 1,111$ pour les femmes.

On peut aussi tracer la vitesse moyenne de course $\bar{u} = L/T$ qui décroît rapidement en fonction de la distance du sprint mais ne décroît que faiblement avec la vitesse pour les courses de fond (figure

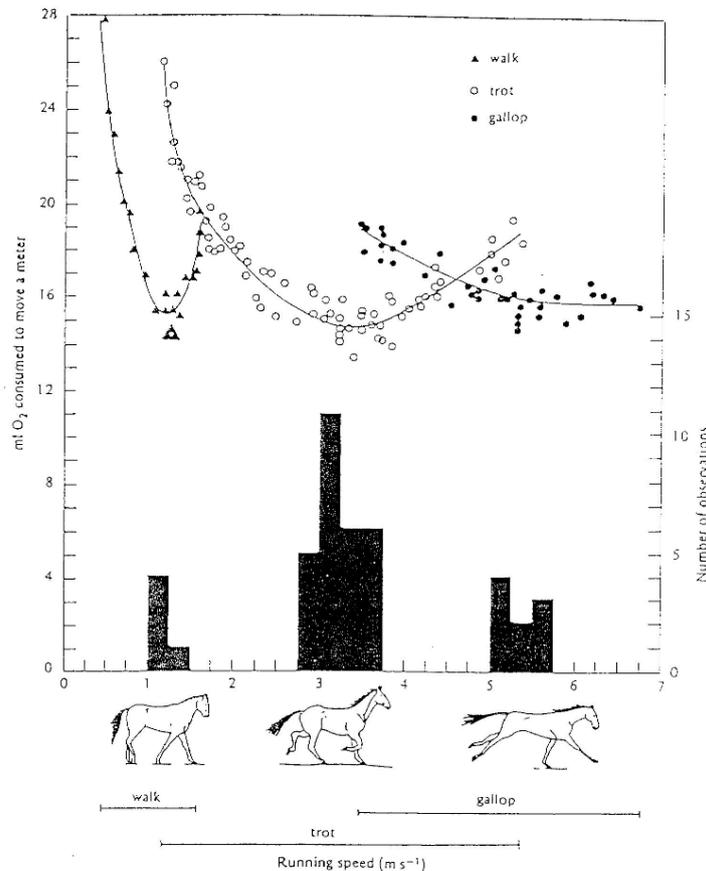


FIGURE 5.1 – Consommation de dioxygène du cheval aux différentes allures (d'après Hoyt et Taylor, 1981).

5.5).

5.2.1 Le modèle de Hill-Keller pour les courses de sprint

Ce modèle est le modèle minimal permettant d'expliquer la constatation expérimentale qu'un coureur de 100 m a d'abord une forte accélération au démarrage puis une vitesse pratiquement constante sur la fin. Il est décrit par exemple dans le livre de Banks (2002) page 300. Il est basé sur l'idée que la course de sprint est contrôlée par la force musculaire du coureur, alors qu'une course de fond est contrôlée par l'énergie du coureur. L'idée est d'appliquer la seconde loi de Newton projetée sur l'axe horizontal au coureur de masse m , en supposant d'une part que ses muscles lui procure une force de propulsion constante F positive mais aussi une force de résistance qui s'oppose au mouvement et qui croît avec la vitesse u : $F_r = -Au$. Cette force tient compte du frottement de l'air (faible comme on le verra) mais surtout de la dissipation interne d'énergie dans les muscles lorsque la vitesse augmente.

On a donc $m \frac{du}{dt} = F - Au$ que l'on peut réécrire :

$$\frac{du}{dt} = F^* - \frac{u}{\tau}, \quad (5.1)$$

en notant $F^* = F/m$ et $\tau = m/A$. Le paramètre τ est homogène à un temps, ce sera un temps caractéristique de la course.

Cette équation peut s'intégrer, avec la condition initiale que $u(t = 0) = 0$. On trouve

$$u(t) = U_{max} [1 - \exp(-t/\tau)],$$

avec $U_{max} = \tau F^*$.

Tracer l'allure de cette courbe. On pourra faire un développement limité de $u(t)$ au temps court. Montrer que la tangente à l'origine coupe l'asymptote à l'instant τ .

En intégrant encore une fois avec la condition initiale $x(t = 0) = 0$ il vient :

$$x(t) = U_{max} [t - \tau + \tau \exp(-t/\tau)].$$

Si on prend par exemple un enregistrement de la course de Carl Lewis sur 100 m en 9,86 s, on obtient les données suivantes : $\tau = 1,27$ s, et $U_{max} = 11,65$ m/s. On en déduit alors $F^* = 9,19$ N/kg soit $F = 735$ N si la masse de sprinter est $m = 80$ kg.

Exercices :

1. Calculer son énergie cinétique maximum ainsi que sa puissance maximum de poussée de la force F ainsi que le travail de la force F sur toute la course. Calculer l'accélération initiale du sprinter. Comparer à l'accélération de la gravité et en déduire que le sprinter est incliné d'un angle α avec la verticale. En déduire que l'utilisation de pointes sous les chaussures est fortement recommandée !
2. **Effet du vent** La limite de vent favorable pour qu'un record d'athlétisme soit homologué est de 2 m/s. Estimer la force de traînée due au vent relatif pour un coureur courant à 11 m/s un jour sans vent et à la même vitesse mais poussé par un vent de 2 m/s. On utilisera la relation donnant la force de traînée $F_D = \frac{1}{2}\rho U^2 A C_D$. Est-ce un gros avantage ? Comparer cette force à la force de poussée F du sprinter.
3. **Effet de la température** En athlétisme et particulièrement pour un 100 mètres il paraît que l'on ne peut espérer battre un record du monde par temps froid. Ceci est sans doute dû à l'augmentation de la force de traînée avec une baisse de température. En effet de 30°C à 10°C, la masse volumique de l'air ρ_{air} augmente d'environ 10 % ce qui augmente d'autant la force de traînée $F_D = \frac{1}{2}\rho U^2 A C_D$. Ce résultat vous paraît-il significatif ?



FIGURE 5.2 – Course à pied



FIGURE 5.3 – Ligne d'arrivée en course à pied

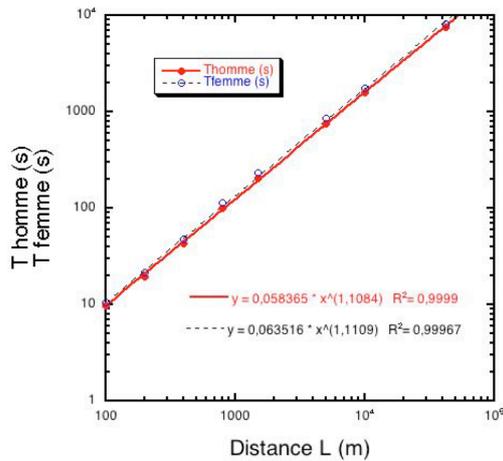


FIGURE 5.4 – Temps des records du monde en course à pied (homme et femme) en fonction de la distance, tracés en échelle log-log.

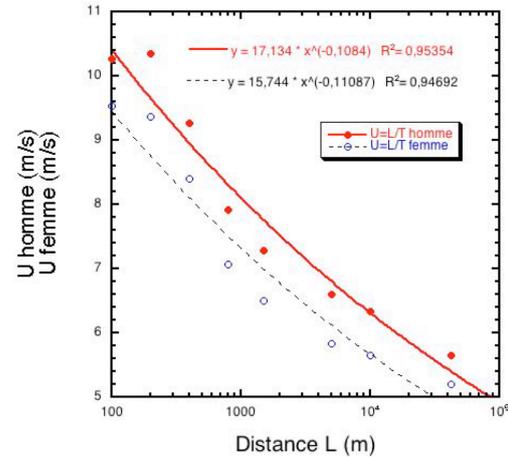


FIGURE 5.5 – Vitesse moyenne de course des records du monde en course à pied (homme et femme) en fonction de la distance, tracés en échelle linéaire-log.

4. **Un nouveau record.** Lors des jeux olympiques de 2012 à Londres un coureur réalise un temps de 9,5 secondes au 100 mètres. Si l'on considère qu'il accélère de manière constante pendant les 50 premiers mètres et maintient ensuite une vitesse constante dans la suite, quelle est la valeur de son accélération au démarrage ? Comparer à l'accélération de la gravité \vec{g} . En déduire l'angle moyen d'inclinaison vers l'avant de son corps.

5.2.2 Les courses de fond

En course de fond, la vitesse moyenne dépend très peu de la distance (figure 5.5). De plus la phase d'accélération est courte et donc négligeable devant le temps de course ($\tau \ll T$). L'équation 5.1 se limite donc à $F = mu/\tau$ et la vitesse est pratiquement constante pendant toute la course lorsqu'un record est recherché (par contre lors de championnats, la tactique conduit parfois à des ralentissements ou des accélérations d'un coureur pour lacher les autres concurrents). Contrairement au sprint où c'est la puissance (la force F) qui détermine le temps de course, en fond c'est plutôt la gestion de l'énergie qui contrôle le temps de course. Si on note $E(t)$ l'énergie disponible correspondant au dioxygène disponible dans les muscles, on peut écrire :

$$\frac{dE}{dt} = \sigma - Fu.$$

Le terme σ est un terme positif qui représente l'apport d'énergie aérobie par la respiration et la circulation sanguine (en excès par rapport à la consommation au repos). Il est supposé constant pendant toute la course et sa valeur est d'autant plus élevée que le coureur a un bon VO₂max (voir 4.2 page 25). Le terme Fu représente la puissance dissipée à chaque instant de la course, terme qui en régime permanent s'écrit $Fu = mu^2/\tau$.

Par intégration on trouve donc :

$$E(t) = E_0 + (\sigma - mu^2/\tau)t,$$

où E_0 est l'énergie disponible initialement dans les muscles.

Pour une course longue ($L > 400$ m), le coureur se doit d'avoir consommé toute l'énergie disponible à l'arrivée, soit $E(T) = E_0 + (\sigma - mu^2/\tau)T = 0$.

On en déduit alors dans le cadre de ce modèle que la vitesse de course s'écrit :

$$u = \sqrt{\left(\frac{E_0}{T} + \sigma\right) \frac{\tau}{m}}.$$

Exercices :

1. Que vaut la vitesse pour les courses très longues ? Tracer l'allure de la fonction $u(T)$. En résolvant une équation du second degré écrire la fonction $u(L)$ et tracer la.
2. En prenant une vitesse moyenne sur un marathon, et un temps $\tau = 2$ s, calculer la valeur de σ/m . Comparer à une valeur typique d'apport d'énergie aérobie de 50 W/kg.
3. Estimer l'énergie initiale en supposant que sans apport aérobie toute l'énergie serait dissipée sur une course de 400 m.
4. Montrer que si l'on suppose que toute la puissance dissipée Fu est évacuée sous forme thermique par transpiration au niveau de la peau et donc que ce taux d'évaporation est proportionnel à la surface du corps, on peut trouver une lois simple entre le diamètre des coureurs et leur vitesse de course. On approximera le coureur par un cylindre.

5.3 Lancé du poids

Trouver la distance de lancé si $h = 1,80$ m, $V_0 = 1,4$ m/s et $m = 7,257$ kg.



FIGURE 5.6 – lancé du poids



FIGURE 5.7 – Lancé du javelot



FIGURE 5.8 – Lancé du disque

5.4 Saut à la perche

Notions abordées

- Comparer l'énergie cinétique maximum d'un coureur et l'énergie potentiel maximum d'un sauteur à la perche. Ces deux grandeurs sont-elles reliées ? En est-il de même pour le saut en hauteur.
- Energie stockée dans la perche (Pour la Science Juillet-Aout 2004)
- Trajectoire du centre de gravité. A partir du film d'un saut à la perche montré que le centre de gravité peut passer sous la barre alors que l'athlète passe au-dessus de barre !



FIGURE 5.9 – Saut à la perche

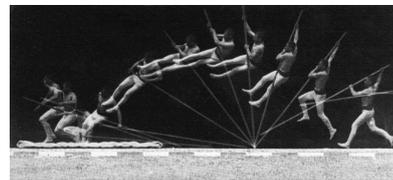


FIGURE 5.10 – Photos d'E. Marrey de saut à la perche avec une perche rigide (vers 1890).

5.5 Saut en hauteur

5.5.1 Pourquoi les animaux sautent-ils tous à peu près à la même hauteur ?

(D'après [4] p. 53 et [3] p. 209). Tous les animaux sautent de l'ordre de 1 mètres, et même si c'est 2m45 pour le champion Sotomayor ce n'est pas 10 mètres ni 10 centimètres. L'ordre de grandeur est donc le mètre. Et ceci est aussi vrai pour une puce qui saute de l'ordre de 400 fois sa hauteur. Pourquoi ?

Le poids varie comme L^3 et l'énergie mécanique à fournir pour atteindre une hauteur h est $E = mgh \sim L^3h$. Or la force que peut développer un muscle, ici les cuisses, est au premier ordre proportionnel à sa section (L^2) alors que le travail W qu'il peut fournir est le produit de la force par le déplacement (ici la contraction du muscle proportionnel à sa longueur L), soit $W \sim L^2 \times L = L^3$. L'égalité $E = W$ conduit à une hauteur h de saut indépendante au premier ordre de la taille de l'animal L !

Au deuxième ordre, les puces sautent plutôt de l'ordre de 20 cm et les léopards de 2m50. On peut penser au frottement de l'air pour diminuer les performances des puces, mais le calcul montre que cela conduit seulement à une diminution de 10 %. Par contre l'accélération que peuvent supporter les animaux est peut être en cause. En effet les animaux sauteurs comme les félins ont une poussée très longue (pattes arrières qui se déplient). Si les animaux sautent à la même hauteur h ils ont la même vitesse de décollage V donné par $\frac{1}{2}mV^2 = mgh$. D'autre part la durée de la poussée est de l'ordre de $\tau = L/V$. Leur accélération est donc $a \sim V/\tau \sim V^2/L \sim h/L$. En sautant à la même hauteur, les animaux ne subissent pas la même accélération, les plus petits sont soumis à la plus forte accélération. On trouve pour une puce une accélération de l'ordre de $300g$ ce qui doit poser d'important problème aux structures internes !

5.6 Saut en longueur

- Estimer la vitesse maximum d'un coureur. En déduire la distance maximum de saut avec un angle de saut à 45° . Quel est le problème ?

5.7 Décathlon

Problème du barème de point. Voir l'article de la revue Tangente n° 107 (novembre-décembre 2005).

Chapitre 6

Sports de glisse

6.1 Ski



FIGURE 6.1 – Virage en ski



FIGURE 6.2 – Skating en ski de fond

6.1.1 Frottement sur la neige

A l'arrêt sur une pente très faible, un ski ne va pas glisser. Comme tout objet solide il est soumis à une force de frottement statique. Depuis Coulomb on sait que la force maximum de frottement est donné par $T_{Max} = \mu_s N$, où N est la composante du poids perpendiculaire au sol. Pour une brique sur une planche ce coefficient est par exemple de l'ordre de $\mu_s = 0,5$. Pour un bon ski sur une neige dure il est beaucoup plus faible par exemple de l'ordre de 0,02. L'existence d'une force maximum de frottement qui s'oppose au mouvement fait qu'il existe un angle α maximum que peut faire la pente avec l'horizontale. Cet angle ne dépend ni de l'aire de l'objet en contact ni du poids de l'objet. Il ne dépend que de la nature microscopique des contacts. Au moment du glissement un petit schéma permet de montrer que $\mu_s = \tan \alpha_{Max}$. Au-delà de cet angle le ski glisse et il existe une force de frottement de glissement *dynamique* $T_{Max} = \mu_d N$. En général le coefficient de frottement dynamique μ_d est inférieur au coefficient de frottement statique.

Exercice : Montrer que pour $\alpha_{Max} > \alpha_{Max}$ le mouvement du skieur est un mouvement à accélération constante (on négligera le frottement de l'air). Calculer la vitesse atteinte par un skieur sur une pente de 10° au bout de 100 mètres si $\mu_d = 0,02$. Quelle aurait été sa vitesse si l'on néglige le frottement dynamique.

La force de frottement dynamique travaille puisqu'il y a glissement. Ce travail chauffe les points de contact entre le ski et la neige et fond celle-ci. Il existe alors un frottement moindre à condition que le ski ne soit pas entièrement mouillé (cas de la neige fondue). C'est pour éviter cette

étalement de l'eau sous le ski que les semelles sont réalisés en matière hydrophobe ou que du fard y est déposé.

6.1.2 Frottement de l'air

En réalité assez vite il faudra tenir compte du frottement de l'air sur le skieur. Compte-tenu des vitesses typiques et de la taille d'un skieur, le nombre de Reynolds qui caractérise l'écoulement ($Re = Ud/\nu_{air}$) est tel que l'écoulement est turbulent et l'on peut alors prendre la formule approchée suivante pour la force de traînée exercée par l'air sur le skieur : $D = \frac{1}{2}\rho_{air}U^2 A C_D$. A est l'aire de la section maximum de l'obstacle perpendiculairement au déplacement et C_D est le coefficient de traînée, il est approximativement constant à ces hauts nombres de Reynolds mais il dépend de la forme de l'obstacle (de la position plus ou moins aérodynamique du skieur dans le cas qui nous intéresse). Pour une sphère, $C_D \approx 0,4$.

Exercices :

1. Pour quelle vitesse U la force de frottement de l'air devient supérieur à la force de frottement de glissement entre les skis et la neige.
2. Ecrire l'équation du mouvement sur la même pente d'angle constant. Montrer qu'en présence de frottement de l'air il existe une vitesse limite V_{lim} atteinte par le skieur à temps long. Estimer cette vitesse limite pour un skieur de 80 kg de section $A = 0,5 \text{ m}^2$.

L'intégration de cette équation différentielle est délicate mais l'on trouve que en partant d'une vitesse nulle le skieur atteint une vitesse U au bout d'une distance x , avec

$$U(x) = V_{lim} \sqrt{[1 - \exp(-x/L)]}.$$

- Calculer la longueur L . Quelle sera la vitesse atteinte par le skieur au bout de 100 mètres ? Comparer cette valeur au résultat précédent où le frottement de l'air était négligeable.
3. Dans le cas du "KL" (Kilomètre Lancé dont le record est de 251,40 km/h) quelle est la part du frottement solide sous les skis et des frottements de l'air ? Pourquoi ces skieurs portent-ils des casques profilés à l'arrière et des ailerons fixés aux mollets ? Pour être un bon descendeur, vaut-il mieux être lourd ou léger ?

6.2 Roller ou patineur à glace ou ski de fond

Justification du mouvement de « pas de patineur ». Prise d'appui.

6.3 Saut à ski

Activités :

- Lire l'article « Un saut plein de gravité », J-M Courty, É. Kierlik, Pour la Science n° 292 février 2002, pp 106-107.
- Trajectoire parabolique ?
- Effet de portance ?

Exercice : Saut à ski. Un skieur saute d'un tremplin avec une vitesse initiale de 25 m/s dirigée suivant l'horizontal. A partir de l'extrémité du tremplin, la piste descend avec une pente constante de 35° par rapport à l'horizontale. Calculez la durée du saut ainsi que la distance parcourue par le skieur avant de toucher le sol. On néglige le frottement de l'air.

Pour en savoir plus :



FIGURE 6.3 – Saut à ski



FIGURE 6.4 – Autre saut à ski

- « Un saut plein de gravité », J-M Courty, É. Kierlik, Pour la Science n ° 292 février 2002, pp 106-107.
- http://www.pourlascience.com/php/pls/article_integral.php?idn3=162
- <http://www.math.utah.edu/~eyre/rsbfaq/physics.html>
- http://www.toolesmenuires.com/maine_info.html
- *Neige, glisse et ski*, Revue du Palais de la Découverte, n ° 264, janvier 1999.
- *Ski : le chemin le plus court n'est pas le plus rapide*, G. Reinisch, La Recherche : 241, p. 356 (1992).

Chapitre 7

Sports d'eau

7.1 Natation

Notions pouvant être abordées :

- Calcul de la traînée visqueuse et de la traînée inertielle. Traînée de forme et traînée de vague.
- Vitesse limite de coque ($V_{max} = \sqrt{gL}$). Effet de la profondeur de la piscine, de la gravité \vec{g} .
- Pourquoi la brasse est-elle plus efficace sous l'eau qu'en surface ?
- Maillot en peau de requin. Est-ce vraiment efficace ?
- Le papillon. Effet de l'onde de déformation du corps.
- Le crawl : mains écartés ou serrés ?
- Comparer les temps d'un record de 100 m en nage libre et en course à pied. Il y a environ un facteur 5, pourquoi ? Nager 4 km est-il comparable en dépense énergétique à courir un marathon ? Si oui le facteur est de l'ordre de 10. Pourtant la masse volumique de l'eau est 1000 fois plus grande que la masse volumique de l'air.



FIGURE 7.1 – Combinaison de natation

Pour en savoir plus ...

- http://www.chez.com/nager/technique/elements_techniques.htm
- <http://membres.lycos.fr/carboclarck/natati/sompeda.htm>



FIGURE 7.2 – Voilier de la dernière transat 6.50 naviguant au planing.

7.2 Voile

Un voilier utilise aussi des forces de portance pour avancer avec ou contre le vent. Pour lui la portance ne sert pas à équilibrer le poids (la poussée d'Archimède s'en charge). Par contre il a deux sortes d'ailes : ses voiles et sa quille. Les premières subissent l'écoulement du vent apparent (vent relatif mesuré dans le référentiel du bateau) avec son intensité et sa direction. Sa quille ou sa dérive subit elle l'écoulement de l'eau lié à la vitesse du bateau et à son angle de dérive. L'équilibre des forces de portance et de traînée, mais aussi des couples de retournement appliqués par ces forces, font tout le plaisir et la subtilité de la voile ! Par exemple les bateaux modernes peuvent aller plus vite que le vent réel (mesuré par un bateau immobile) et ce dans toutes les directions !

Les figures suivantes illustrent deux cas classiques : la remontée au près (figure 7.3) et la descente au portant (figure 7.4).

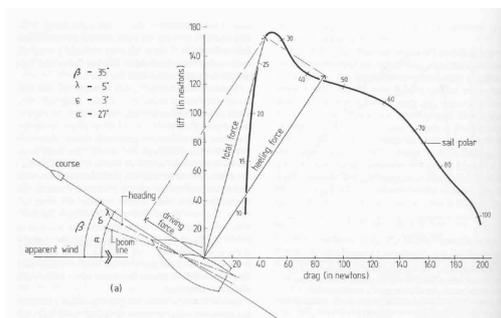


FIGURE 7.3 – Portance sur une grand-voile au près. D'après [2] p. 62

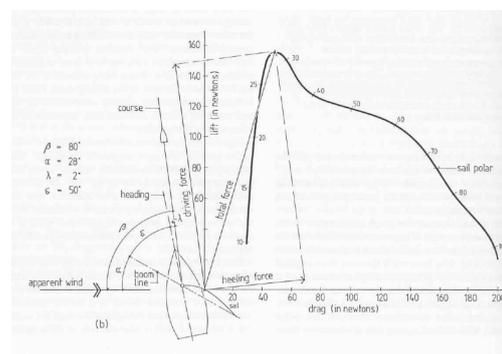


FIGURE 7.4 – Portance sur une grand-voile au largue. D'après [2] p. 62.

Notons que pour un voilier, en plus de la traînée de friction visqueuse (lié à la surface mouillée), de la traînée de pression (lié à la forme de la coque), de la traînée induite (lié à l'angle de dérive de la

coque) il faut ajouter la traînée de vague (énergie consommée dans la génération des vagues).

Notions abordées

- Equilibre des forces.
- Traînée.
- Record de vitesse.
- Vent apparent
- Fonctionnement des voiles. Loi de Bernoulli.
- Vitesse limite de coque. Le planning, le surf.
- polaires Eiffel

Exercices

1. Calculer le fardage (force de traînée) dû au mât de 20 mètres de haut d'un voilier dans un vent de 30 Nœuds (≈ 60 km/h) si $R = 10$ cm (le C_D d'un cylindre est environ le double de celui d'une sphère dans cette gamme de nombre de Reynolds).
2. Calcul de la traînée sur une plaque plane infiniment mince. Pour une plaque mince de largeur b et de longueur l (dans le sens de l'écoulement) on pose $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} = f(Re, b/l)$, où $A = b \times l$ et $Re = Ul/\nu$. On suppose que $b \ll l$. Pour $Re < 10^5$ on trouve expérimentalement $C_D = 1,33 Re^{-1/2}$ et pour $Re > 10^6$ on trouve $C_D^{1/2} \log(Re C_D) \approx 0,242$ ([1] p. 307). Calculer la force de traînée sur la quille d'un monocoque de type "60 pieds open". On prendra $b = 3$ m, $l = 0,5$ m, $U = 10$ Nœuds, $\rho = 10^3$ kg/m³ et $\nu = 10^{-6}$ m²/s. On trouve alors $C_D \approx 3,7 \cdot 10^{-3}$ et $F_D = 73$ N. On trouverais certainement nettement plus en tenant compte de l'incidence non nulle de la quille.
3. On suppose que la force de traînée T sur une coque n'est fonction que de sa vitesse U , de sa longueur L , de la masse volumique de l'eau ρ et de la gravité g . Montrer par analyse dimensionnelle que l'on peut écrire

$$T = \rho U^2 L^2 f(Fr)$$

où l'on note $Fr = U/\sqrt{gL}$ le nombre de Froude et où $f(Fr)$ est une fonction inconnue.

Pour en savoir plus...

- <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/sailing.html>
- *Autant en emporte le vent*, Pour la Science **247**, mai 1998, p. 25.
- <http://ej.iop.org/links/rrLhPUHA9/pkyZU4262xGKk-luav5vpA/ej8103>

7.3 Aviron, canoë et kayak

- Calcul de la traînée de coque
- Importance du sillage de vague et du nombre de Froude
- Position favorable en "V".
- Puissance développée. Nombre optimum de barreur.

Les compétitions d'aviron se pratiquent sur des bateaux étroits comportant 1, 2, 4 ou 8 rameurs plus un barreur éventuellement. Nous allons essayer de comprendre pourquoi un bateau avec 8 rameurs ne va pas huit fois plus vite qu'un bateau ayant un seul rameur.

On supposera que tous les rameurs ont la même masse, $M = 72$ kg, et développent la même puissance musculaire, $P_m = 500$ W. On suppose de plus que tous les bateaux ont à peu près la même forme, c'est-à-dire que leur volume est proportionnel à L^3 et que leur masse M_0 est négligeable devant



FIGURE 7.5 – Skiff (un rameur)



FIGURE 7.6 – Aviron en 8 barré

N	$L(m)$	$b(m)$	$d(m)$	$M_0(kg)$	$T(mn : s)$
1	7,9	0,30	0,24	14	6 :36
2	10	0,36	0,26	27	6 :04
4	13	0,57	0,30	50	5 :37
8	18	0,61	0,37	96	5 :19

TABLE 7.1 – Tableau donnant en fonction du nombre de rameurs (N) les longueurs (L), largeurs (b), profondeurs (d) et poids à vide (M_0) des bateaux sans barreur et les temps des records (T) sur 2000 m pour les hommes.

la masse de leur équipage. En utilisant le théorème d'Archimède, écrire une relation dimensionnelle entre le poids de l'équipage et la longueur du bateau. Une fois lancés les bateaux vont à une vitesse constante v . On supposera alors que la force de traînée visqueuse peut s'écrire $F_D = \rho C_D v^2 L^2$ et qu'elle est égale et opposée à la force propulsive de l'équipage. Comment peut-on calculer cette force en fonction de la puissance musculaire individuelle et de la vitesse du bateau ? En égalisant la force propulsive à la force de traînée, et en éliminant la longueur du bateau montrer que la vitesse de progression peut s'écrire :

$$v = \frac{N^{1/9} P_m^{1/3}}{\rho^{1/9} M^{2/9}},$$

où N est le nombre de rameurs. En déduire que le temps de course ne diminue que lentement avec le nombre de rameur et pas proportionnellement à ce nombre comme le montre le tableau 7.1.

Pour en savoir plus...

- **Article** : "Les bateaux à propulsion humaine", A. Brooks, A. Abbott et D. Gordon Wilson, p. 153-161, dans *Les bateaux. Des trières aux voiles de course*, Bibliothèque Pour la Science, 1999.
- « La Physique de l'aviron », Pour la Science n° 288, octobre 2001, <http://aviron.aix.les.bains.free.fr/doc/physique.htm>
- **Problème** : "Du nombre optimal de rameur", M. Fermigier, dans *Hydrodynamique Physique*, p. 141-143, Dunod, 1999.

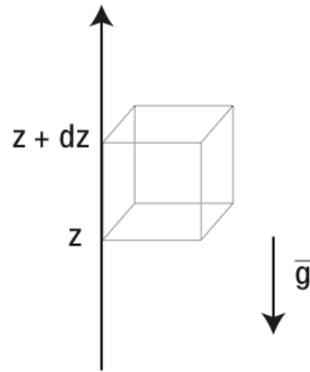


FIGURE 7.7 – Volume élémentaire d'eau en équilibre hydrostatique.

7.4 Surf

Vitesse des vagues. Forme des vagues.

Site : <http://www.exploratorium.edu/theworld/surfing/physics/index.html>

7.5 Plongée

7.5.1 Evolution de la pression avec la profondeur

L'unité officielle de pression dans le Système International (SI) est le Pascal (Pa), c'est-à-dire 1 Newton par mètre carré : $1 Pa = 1 N/m^2$. Cette valeur est très faible comparée à la pression atmosphérique. On utilise donc souvent son multiple l'hectopascal (1 hPa = 100 Pa). La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer vaut par définition 1 atm = 1013,250 hPa.

Il existe un très grand nombre d'autres unités de pression encore utilisées :

- Le bar. Par définition 1 bar = 10^5 Pa.
- L'atmosphère : 1 atm = 1013,250 hPa.
- Le $kg/m^2 \approx 10$ Pa sur Terre.
- Le PSI, unité anglo-saxones utilisées par exemple pour régler la pression des pneus de vélo. C'est l'abréviation de "Pound per Square Inch", la livre par pouce carré valant ... 45,965 Pa sur Terre.

Sur une surface quelconque on calcule la force appliquée par la relation :

$$\vec{df} = -p \vec{dS}.$$

La pression dans un liquide augmente avec la profondeur selon la relation : $P(z) = P_0 + \rho gz$. Démontrons le.

Considérons un cube de fluide au repos dont les faces basse et haute sont respectivement à l'altitude z et $z + dz$, c'est-à-dire que nous considérons l'axe Oz dirigé vers le haut et donc opposé au sens de l'accélération de la gravité \vec{g} (figure 7.7). Les forces de pression sur chaque face s'écrivent $\vec{df} = -p \vec{dS}$ avec \vec{dS} dirigé vers l'extérieur du cube (normale sortante).

L'équilibre des forces horizontales (ici uniquement de pression) s'écrit : $df_x(x) + df_x(x+dx) = 0$. Soit $p(x)dS - p(x+dx)dS = -\frac{\partial p}{\partial x} dS dx = 0$. Et finalement $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$. De même on trouve $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$. La pression ne varie pas dans les directions horizontales.

L'équilibre des forces verticales de pression et de gravité s'écrit :

$$df_z(z) + df_z(z + dz) - \rho d\tau g = 0,$$

où par convention $\|\vec{g}\| = g > 0$. Soit

$$p(z)dS - p(z + dz)dS - \rho dS dz g = - \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) dS dz = 0.$$

Et finalement

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g.$$

On peut donc écrire sous forme vectorielle : $\vec{\nabla} p = \rho \vec{g}$.

Pour un liquide incompressible et homogène ρ ne dépend pas de la pression p ni de la position. L'équation de la pression s'intègre facilement et l'on trouve :

$$\boxed{p(z) = p(0) - \rho g z}.$$

Avec z dirigé vers le haut (si z était dirigée vers le bas un signe $+$ remplace le signe $-$). La pression dans le fluide diminue avec l'altitude et augmente avec la profondeur. Par exemple en mer, si on choisit $z = 0$ en surface $p(0) = p_{atm}$ et z dirigé vers le bas $p(z) = p_{atm} + \rho g z$. En plongée, à une profondeur de l'ordre de 10 m la pression est égale à deux fois la pression atmosphérique. En apnée le volume de vos poumons est donc pratiquement diminué de moitié ! Par 3200 m de profondeur au large de la Galice, l'épave du tanker "Prestige" est soumise à une pression de 321 fois la pression atmosphérique soit une force équivalente à 3210 tonnes par m^2 de coque.

7.5.2 La poussée d'Archimède

Expérience du ludion.

7.5.3 La compressibilité de l'air

- Equation du gaz parfait $PV = nRT$. Danger de surpression pulmonaire à la remontée.
- Composition de l'air : 79 % d'azote (N_2) et 20,9 % de dioxygène (O_2) plus un peu de gaz rares.
- Notion de pression partielle.
- Notion de pression de vapeur saturante. Dissolution d'un gaz dans un liquide. Nécessité des paliers de décompression pour les plongées profondes. Courbe de sécurité.
- Risques d'anorexie (si $P_{O_2} \leq 0,11$ atm) ou d'hyperoxie (si $P_{O_2} \geq 1,7$ atm). Calculer la pression partielle du dioxygène en fonction de la profondeur. Montrer qu'il y a risque d'hyperoxie au-delà de -70 m.

-
-

A cause de cette dissolution de l'azote dans le sang, il existe une durée maximum de séjour en fonction de la profondeur maximum atteinte, au-delà de laquelle il faut effectuer des paliers de décompression. Le tableau suivant donne ces durées maximum.

Profondeur (m)	Durée
12	2 heures
20	60 mn
35	25 mn
45	5 mn
60	0 mn

7.5.4 Optique et acoustique sous-marine

- Réfraction : Les rayons lumineux sont réfractés lors du passage à l'interface entre l'air et l'eau. La loi de Snell-Descartes permet de connaître le changement d'angle : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$. L'indice est proche de 1 dans l'air et de 4/3 dans l'eau. Un bâton plongé dans l'eau semble « cassé ».

- Absorption des couleurs : L'eau n'est pas vraiment transparente, et chaque longueur d'onde est absorbée exponentiellement selon la loi $I(\lambda) = I_0 \exp(-z/L(\lambda))$. La longueur d'onde caractéristique $L(\lambda)$ est de l'ordre de 8 mètres. En plongée, la couleur rouge a disparu à -10 m, le jaune à -30 mètres.

Il y a le même phénomène dans l'atmosphère pour les ultra-violets. Atténué au niveau de la mer ils sont intenses en altitude !

- Acoustique : Les sons se propagent beaucoup plus vite dans l'eau (près de 1500 m/s) que dans l'air ($c = 330$ m/s au niveau du sol).

Exercice : 1) Calculer le volume de gaz contenue dans une bouteille de 15 litres gonflée à la pression de 200 bars. En supposant qu'une personne inspire 1 litre d'air à chaque inspiration toutes les 10 secondes, combien de temps peut-il respirer en surface avec ce type de bouteille. Même question à -20 m, -40 et -60 m.

Pour en savoir plus...

- « La plongée, connaissance et technique », G. Poulet et R. Bariniou, Denoël (1970).
- perso.wanadoo.fr/joel.talon/.webloc, http://fr.wikipedia.org/wiki/Plonge_sous-marine

7.6 Plongeon

Le corps humain est un solide déformable, ce qui fait que la variété des mouvements possibles est très grande car le corps, par un travail des forces intérieures, peut faire varier son moment d'inertie I . La vitesse angulaire et l'axe de rotation peuvent alors varier durant le vol. C'est ce que fait le plongeur (ou le gymnaste), qui par un mouvement des bras peut déclencher et arrêter une vrille. Notons toutefois que le centre de gravité garde toujours un mouvement parabolique (si les forces de portance ou de frottement de l'air sont négligeables).

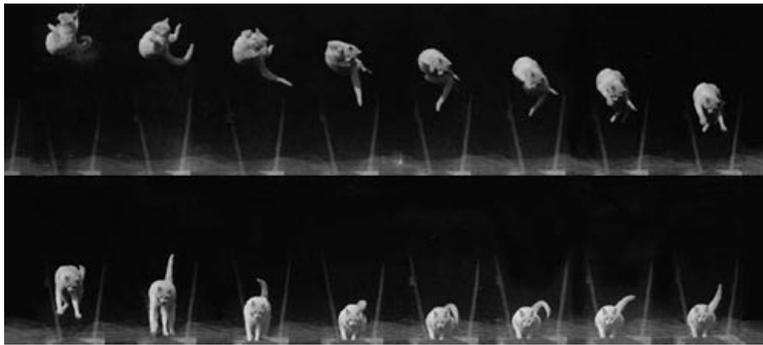


FIGURE 7.8 – Photos d'Etienne-Jules Marey montrant le retournement d'un chat.

Chapitre 8

Autres sports

8.1 Cyclisme

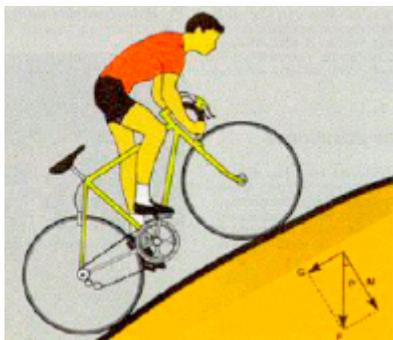


FIGURE 8.1 – Cycliste en montée



FIGURE 8.2 – Cycliste dans un virage

1. Un cycliste est arrêté en haut d'une pente raide inclinée à 30° . Quelle est la force qui retient ses roues au sol, sachant que la masse de l'ensemble cycliste-vélo est de 80 kg ? (Donner la nature, la grandeur et l'orientation de la force, ainsi que le coefficient de frottement statique qui relie la force de frottement à la force normale).
2. Le cycliste est arrêté en haut d'une pente inclinée à 10° . Lorsqu'il décide de lâcher les freins, il descend sans pédaler. Si l'on néglige la résistance de l'air, quelle sera sa vitesse au bout de 50 mètres ?
3. Le vélo comporte 21 vitesses, par un agencement de trois plateaux au niveau du pédalier (ayant un nombre de dents n_1 de 28, 38 et 48) et de 7 pignons sur la roue arrière (ayant un nombre de dents n_2 de 14, 16, 18, 20, 22, 24 et 34). Comment fonctionne la transmission du vélo ?

Faire un schéma. Évaluez le lien entre le rapport de transmission d'un vélo (nombre de tours du pédalier divisé par le nombre de tours de la roue arrière) et le nombre de dents de chaque roue dentée. Qu'est-ce qui peut influencer le rendement d'une transmission ? Calculer le rapport de transmission maximum et le rapport minimum de ce vélo.

4. En terrain plat on suppose que le cycliste de masse M exerce une force égale à son poids sur une des pédales. Quel doit être la position de la pédale pour que la force propulsive soit la plus grande ? Calculer la force propulsive qu'exerce le sol sur la roue arrière ? De quoi dépend-elle aussi ?

8.1.1 Couples et forces

Donner des valeurs typiques de nombre de dents des plateaux et des pignons pour un vélo de course (en plaine et en montagne) et un VTT. Exemples : Plateaux : 48 ou 38 ou 28. Pignons : 28, 24, 21, 18, 16, 14 ou 12.

- Calculer les rapports de démultiplication. Quel est le rapport entre les forces appliqués sur les pédales et la force appliquée par la roue arrière sur le sol ? Quel est le rapport des moments ? Quel est le rapport des puissances ?

- Frottement sur la chaussée : Peut-on faire du vélo sur une patinoire ? Pourquoi utilise-t-on des pneus en caoutchouc, déformable ? Estimer des valeurs de coefficients de friction (rapport entre la force normale et la force tangentielle au moment du glissement). Trouver sur internet des valeurs typiques.

8.1.2 Effet du frottement de l'air :

Diminution de la traînée. Effet peloton.

Consulter le site : http://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/bicycle_aero.html

8.1.3 Calcul de puissance pour un cycliste :

Application au vol humain. Exercice dans M. Fermigier, "Hydrodynamique Physique", Dunod (1999) et article de Pour la Science n° 296, Juin 2002.

8.1.4 Dopage :

Dans un article du journal « Le Monde » du 27/01/07 l'ancien président du centre médico-sportif de Lyon estime qu'une simple bouffée d'un spray anti-asthme permet d'améliorer la consommation d'oxygène de 0,3 litre et donc d'améliorer la puissance d'environ 20 watts. Pour un coureur de 80 kg, équipé avec son vélo, grim pant une pente de 8 % à une vitesse de 20 km/h, ce serait un gain de 1 km/h ou encore 3 minutes sur un col de 20 km. Etes-vous d'accord avec ces chiffres ?

8.1.5 Equilibre du vélo :

L'équilibre du cycliste est dynamique. Contrairement à une idée reçue, il n'est pas dû à un effet gyroscopique. Par contre la chasse de la fourche de vélo est une donnée très importante. On peut consulter avec profit le site suivant <http://www.aviation-fr.info/dom/dominique24.php>.

Exercice :

1. Peut-on monter une pente en monocycle ? Faire un dessin et comparer le point de contact au sol avec la position du barycentre.
2. A quelle vitesse faut-il rouler pour se mouiller le moins possible en vélo ? On suppose que la pluie tombe par un jour sans vent à la vitesse V_p (par exemple 4,5 m/s) et que la concentration de l'eau dans l'air est C (par exemple 1 gramme par m^3 d'air. Calculer la masse d'eau tombant par heure sur chaque m^2 au sol. En déduire la hauteur d'eau tombée en une heure. A l'arrêt et en considérant que les épaules représentent une surface de $0,12 m^2$, qu'elle quantité d'eau reçoit le cycliste par heure ?
3. Le cycliste décide de rouler à la vitesse V_c . La vitesse relative de la pluie par rapport à notre bonhomme devient V . Calculer V en fonction de V_p et V_c . L'eau tombe maintenant sur ces épaules et sur sa face avant. Montrer que plus il va vite, plus il est mouillé. Oui mais plus il va vite moins il reste longtemps sous la pluie pour une distance donnée à parcourir L . Estimer la quantité d'eau reçue par km parcouru. Montrer qu'il existe une vitesse optimale qui minimise la quantité d'eau reçue. D'après « la bicyc'lette », numéro 8, janvier 98 ; association Place au Vélo, Nantes.

8.1.6 Sites :

1. http://fontanilcyclisme.phpnet.org/eva/rubrique.php?id_rubrique=53
2. http://fontanilcyclisme.phpnet.org/espace_adherents/entrainement/puissance_dev5.html
3. <http://assoc.wanadoo.fr/ffcfranchecombe/techniqueentrainementbo786.htm>
4. http://fontanilcyclisme.phpnet.org/eva/article-imprim.php?id_article=46
5. <http://www.exploratorium.edu/cycling/>
6. <http://www.efluids.com/efluids/pages/bicycle.htm>

8.2 Escalade

- Descendre en rappel.
- Adhérence sur dalle.
- Facteur de chute.

Pour en savoir plus :

- <http://www.grimporama.com/francais/technique/facteur.htm>
- *L'escalade*, Jearl Walker, Pour la Science **142**, 1989, p. 98-101.

8.3 Saut à l'élastique

- On donne les caractéristiques techniques d'un élastique (25 mètres de long, allongement statique de 30 cm/kg, résistance 4500 kg). Vérifier si le saut d'un pont à 103 mètres de haut pour une personne de 80 kg peut se faire en toute sécurité.

8.4 Tir à l'arc

Energie élastique stockées, force de traînée sur la flèche, énergie dissipée dans le planté dans la cible.

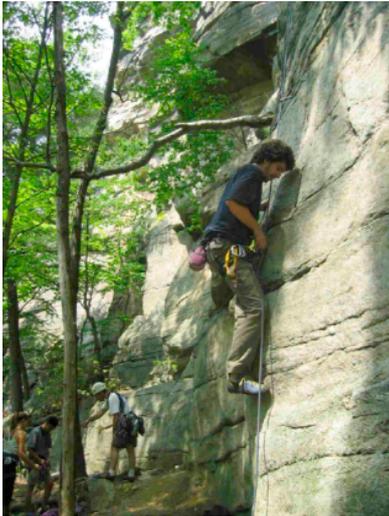


FIGURE 8.3 – Escalade en falaise

8.5 Parachutisme

Estimer la vitesse limite de chute libre, avec et sans parachute. Surface de voileure.

Exercice : Le dernier James Bond James Bond veut sauter d'un avion vers un bateau qu'il poursuit. L'avion vole à 500 m au-dessus de l'eau avec une vitesse de 707 km/h . A l'instant initial le bateau se trouve à une distance horizontale de 3000 m . Une seconde plus tard, le bateau est situé à 2800 m . A quel moment James Bond doit-t-il sauter sachant qu'il ouvrira son parachute au tout dernier moment et que l'on négligera la résistance de l'air.

8.6 Vol à voile, parapente et deltaplane

Pour en savoir plus :

- Vol plané.
- Ascendances thermiques.
- Vol de pente.
- Vol de gradient (« Dynamic Soaring »).
- Calcul de la vitesse « optimum »(minimum de consommation).

8.7 Les ricochets

Voir l'article du bulletin de la Société Française de Physique (janvier 06) de Ch. Clanet et de La Recherche (juin 2003) de L. Bocquet. Voir aussi le site <http://physique-ricochet.societeg.com/index.php>

8.8 Le yo-yo

Voir l'article dans le livre « Yo-yo, billard, boomerang... : La physique des objets tournants », Editions Belin, 2001 et l'exercice http://www.fast.u-psud.fr/~moisy/teaching/meca_dev1_04.pdf.

8.9 Bâton du diable

Voir l'article http://en.wikipedia.org/wiki/Devil_sticks. La notion de moment d'inertie et de centre de percussion est très importante.

Chapitre 9

Références générales

9.1 Livres :

- *Maths et Sport, le sport en équations*, Bibliothèque Tangente, Editions Pole 2004.
- *Petits problèmes de physique*, François Graner, Springer.
- *Towing Icebergs, Falling Dominoes, and other adventures in applied Mathematics*, Robert B. Banks, 2002.
- *Les bateaux. Des trières aux voiles de course*, Bibliothèque Pour la Science, 1999.
- *The Physics of Sports*, Editeur Angelo Armenti Jr., American Institute of Physics, 1992.
- *Physique pour les sciences du Sport*, A. Durey, Masson, 1997.
- [3] *On Size and Life*, Th. A. McMahon and J.T. Bonner, Scientific American Library, 1983.
- *Physique pour les sciences du Sport*, A. Durey, Masson, 1997.
- *Physiologie du sport : Bases physiologiques des activités physiques et sportives*, H. Monod, R. Flandrois et H. Vandewalle, Masson, 2007.
- *Physiologie du sport et de l'exercice*, J.H. Wilmore et D.L. Costill, de Boeck, 2006.

9.2 Revues :

- *Maths et Sport*, Hors Série n° 19, Tangente, Ellipses 2002.

9.3 Sur la toile :

- Base de donnée sur les records d'athlétisme :
<http://www.ifrance.com/BiblioSports/Athletic/Records/Chronology/Chronology.htm>

9.4 Films :

C'est pas sorcier : Diverses émissions de télévision d'excellent niveau scientifique. Existe aussi en DVD.

- "Faire du sport, c'est Physique et Chimique"
- "La Transat en solitaire"
- "Le Billard"
- "Le grand Schuss"

- "Le Tennis"
- "Les fous du vélo"
- "Les sorciers font du ski"
- "Parachute, parapente : le grand frisson"
- "Sélection pour les jeux olympiques d'hiver".

9.5 CD :

- *La science des mouvements humains. Sports, école, entraînement* : A. Junqua et al.

Bibliographie

- [1] S. Candel. *Mécanique des fluides*. Dunod, 1995.
- [2] R. Garrett. *Symmetry of sailing : The physics of sailing for yachtsmen*. Sheridan House, 1987.
- [3] Th. A. McMahon and J. T. Bonner. *On Size and Life*. Scientific American Library, 1983.
- [4] D'Arcy Thompson. *Forme de croissance*. Edition du Seuil, 1994.

Chapitre 10

TD et examens : Sports et Physique

10.1 Exercices

1. Un tir au foot.

Un bon joueur de football peut frapper une balle et l'envoyer à 70 m.

- Calculer la vitesse initiale si l'on néglige le frottement de l'air et s'il tire à 30° .
- En supposant que la force de frottement de l'air s'écrit $F_D = \frac{1}{2}\rho U^2 A C_D$ avec $C_D \approx 0.4$ et A la section de la balle, calculer le rapport entre cette force de traînée et le poids de la balle à l'instant initial. Le frottement de l'air est-il négligeable ?
- En tenant compte du frottement de l'air, la balle arrive-t-elle plus ou moins loin ?

2. Un drive long au golf

Un bon joueur de golf peut frapper la balle et l'envoyer à 300 m.

- Calculer la vitesse initiale si l'on néglige le frottement de l'air et s'il tire à 60° .
- En supposant que la force de frottement de l'air s'écrit $F_D = \frac{1}{2}\rho U^2 A C_D$ avec $C_D \approx 0.4$ et A la section de la balle, calculer le rapport entre cette force de traînée et le poids de la balle à l'instant initial. Le frottement de l'air est-il négligeable ?
- En tenant compte du frottement de l'air, la balle arrive-t-elle plus ou moins loin ?

3. Calcul de la surface d'un parachute

On cherche à calculer la taille d'un parachute pour un largage de vivres. On veut qu'une caisse de masse $M = 100\text{kg}$ arrive au sol avec une vitesse comparable à une chute libre de $h = 3\text{ m}$.

- Calculer la vitesse de collision de la caisse lâchée de h sans parachute.
- En supposant que la force de frottement en présence d'un parachute s'écrit $F_D = \frac{1}{2}\rho U^2 A C_D$ avec $C_D \approx 1.4$ et A la surface du parachute, calculer la vitesse limite de chute de la caisse en fonction de A .
- Calculer A pour que cette vitesse limite soit égale à la vitesse de chute libre sur une hauteur h .

4. La balançoire. (Résonance paramétrique)

Un enfant de masse M est debout sur une balançoire (modèle « escarpolette »). Lorsqu'il est debout, son centre de gravité est à la distance l de l'axe de rotation. Lorsqu'il se met accroupi (rapidement) il augmente cette distance de Δl .

a) A partir de vos souvenirs expérimentaux retrouver le mouvement qui permet de donner de l'énergie au système et décrire ce qu'il se passe.

On schématise ce mouvement par celui d'un pendule simple sauf pendant deux instants très brefs où l'action de l'enfant crée un mouvement radial très rapide ; une fois au passage au point le plus haut de sa trajectoire vers l'arrière (de A à B) puis à la verticale du point de suspension (de C à D) ensuite l'enfant reste immobile jusqu'au prochain passage au point le plus haut de sa trajectoire vers l'arrière où il recommence son manège.

b) Calculer la relation qui existe entre deux valeurs successives de l'amplitude maximale d'oscillation $\theta_0, \theta_1 \dots \theta_n, \dots$

c) Partant d'une valeur initiale faible ϵ pour l'angle θ , au bout de combien de périodes la balançoire pourra-t-elle atteindre l'horizontale ?

d) Comment l'enfant peut-il y arriver plus tôt ?

Inspiré de l'article : *L'art de la balançoire*, Jearl Walker, Pour la Science **139**, 1989, p. 99-101. Chapitre du livre *Yo-yo, billard, boomerang... Physique des objets tournants*, Belin 2001.

10.2 Examen de décembre 2008 : Dimensionnement d'une planche à voile



FIGURE 10.1 – Un planchiste en pleine glisse.

On souhaite concevoir une nouvelle planche à voile de « milieu de gamme » pour un public d'un niveau « amateur ». On notera L la longueur de la planche, h sa largeur et e son épaisseur, M la masse du véliplanchiste tout équipé, gréement compris (mât, voile, wishbone). On prendra $M = 80$ kg pour les applications numériques.

1. **Volume de la planche.** En s'inspirant de mesures prises sur des planches du marché, on choisit le rapport $L/h = 4$ et $h/e = 7$. Estimer le volume V de la planche. Que vaut V si $L = 260$ cm.

10.2. EXAMEN DE DÉCEMBRE 2008 : DIMENSIONNEMENT D'UNE PLANCHE À VOILE 63

On exprimera V en litres. En quoi ce volume va-t-il conditionner l'utilisation de la planche ?

- Poids de la planche.** On suppose que la masse volumique moyenne de la planche est $\rho_p = 100 \text{ kg/m}^3$. Calculer sa masse m_p de la planche si $L = 260 \text{ cm}$.
- Flottabilité de la planche.** Afin que la planche ne soit pas trop technique, on souhaite choisir L pour qu'à l'arrêt la planche avec son planchiste debout dessus soit *totale*ment immergée dans l'eau mais affleure la surface. Faire un schéma représentant cette situation. En déduire une relation entre la poussée d'Archimède \vec{F}_{Archi} , m_p , M et g l'accélération de la gravité. Pour une navigation sur un lac de montagne on prendra $\rho_e \approx 1000 \text{ kg/m}^3$. En déduire le volume V de la planche nécessaire et donc la longueur L convenable. Le résultat dépendra-t-il de l'altitude du lac ? Pourquoi ? Comment avoir le même résultat sur la flottaison avec un plus grand longueur de planche ?
- Inclinaison du planchiste.** A partir de la photographie de la figure 10.1, estimer l'angle β que fait le planchiste avec le plan vertical médian contenant l'axe longitudinal de la planche. Faire un schéma dans un plan transverse à la planche et représenter les vecteurs poids, poussée d'Archimède et force transverse F_T exercée par la voile sur le planchiste. On rappelle que sur une planche à voile, le pied du mat est libre de s'incliner dans toutes les directions. Pouvez-vous estimer F_T ? On pourra introduire H hauteur du point d'application de F_T et d la distance du centre de gravité du planchiste avec le plan vertical médian.
- Force transverse sur la voile.** Dans la suite on supposera que la force transverse peut s'écrire : $F_T = C_T \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} V_{\text{app}}^2 S$ où S est la surface de la voile. Quelle est la dimension de C_T ? Calculer C_T pour un vent apparent de 30 km/h et une surface de voile de 7 m^2 . On prendra $\rho_{\text{air}} \approx 1,1 \text{ kg/m}^3$.
- Surface de voile.** On souhaite maintenant conseiller à l'acheteur la surface de voile à choisir en fonction de la force du vent et du poids du véliplanchiste. On estime que le planchiste exerce une force transverse sur la voile de l'ordre de la moitié de son propre poids et que $C_T \approx 1$. Exprimer la vitesse du vent apparent correspondant au mieux à une surface de voile donnée S et à une masse M . A.N. Calculer la vitesse du vent apparent conseillée pour $S = 5 \text{ m}^2$ et pour $S = 8,5 \text{ m}^2$, pour $M = 80 \text{ kg}$.
- Calcul du vent réel.** Donner la relation vectorielle qui relie le vent réel \vec{V}_{reel} (vent mesuré par un observateur immobile), le vent apparent \vec{V}_{app} mesuré sur la planche et la vitesse de la planche \vec{U}_0 . Faire un schéma. Vérifier le résultat pour une planche immobile et pour une planche se déplaçant dans le sens du vent réel à 90% de V_{reel} . Pour un vent apparent de 30 km/h et une planche se déplaçant dans une direction perpendiculaire au vent apparent à la vitesse de 20 km/h , calculer la vitesse du vent réel et sa direction. Faire un schéma.
- Un planche au planning.** A partir de la figure 10.1 on estime qu'à la vitesse \vec{U}_0 la planche n'est pas enfoncée dans l'eau et que sa « surface mouillée » (surface de la planche qui touche réellement l'eau) est S_m . Expliquer qualitativement quel phénomène permet à la planche de sortir de l'eau. Faire un schéma explicatif. En déduire la surpression moyenne exercée par l'eau sous la planche. On pourra prendre les valeurs $m_p = 20 \text{ kg}$ et $S_m = 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$. Quels sont les paramètres qui peuvent augmenter cette force de portance dynamique ?
- Saut de vague.** En supposant le planchiste glissant à $U_0 = 10 \text{ m/s}$, estimer à quelle hauteur maximum il peut décoller sur une vague. Préciser les hypothèses faites. Ce résultat vous semble-t-il raisonnable ? On pourra s'appuyer sur les raisonnements développer pour le saut à la perche et le saut en longueur pour améliorer la prédiction.

10.3 Examen de décembre 2007 : Physique de l'aviron



FIGURE 10.2 – Un skiff, embarcation monoplace pour les compétitions d'aviron.

10.3.1 Equilibre statique du skiff

Un rameur de masse M monte dans un bateau (un skiff, figure 10.2) de masse M_0 , de longueur L , de largeur b et de profondeur d .

Pour les applications numériques on prendra : $M = 70$ kg, $M_0 = 14$ kg, $L = 8$ m, $b = 0,30$ m, $d = 0,25$ m, et $\rho = 1000$ kg/m³ pour la masse volumique de l'eau.

1. **Question de cours** : les épreuves d'aviron ayant lieu généralement sur 2000 mètres et durant de l'ordre de 8 minutes, s'agit-il d'efforts à dominance anaérobie, aérobie ou les deux ? Justifier votre réponse.
2. Le bateau et le rameur sont immobiles sur la ligne de départ. Faire un schéma et représenter les forces en présence. En appliquant le théorème d'Archimède, écrire une relation entre le volume immergé V_{im} , la masse volumique de l'eau ρ et le poids de l'ensemble.
3. Justifier que le volume immergé peut s'écrire $V_{im} = \alpha Lbd$. Que représente le produit Lbd ? Que représente α ? A partir du résultat de la question précédente, calculer numériquement V_{im} et en déduire α .

10.3.2 Mouvement du skiff sous l'action d'une force propulsive constante F_0

Au top départ, le rameur propulse son embarcation en appliquant une force horizontale moyenne constante sur les avirons et donc sur l'eau. On note F_0 la force propulsive dans la direction des x croissants. Pour les applications numériques on pourra prendre $F_0 = 500$ N.

1. Appliquer la seconde loi de Newton (principe fondamental de la dynamique) en négligeant toute forme de frottement. En projetant sur l'axe $0x$ en déduire qu'il existe une accélération constante

- que l'on calculera. Calculer $v(t)$ et tracer l'allure de la vitesse $v(t)$ du bateau. A.N. Calculer la vitesse pour $t = 1$ s et $t = 5$ s.
- On s'intéresse maintenant à l'existence d'une force de frottement fluide F_D . Pour des nombres de Reynolds $Re = vb/\nu$ (v est la vitesse du bateau, b sa largeur et ν la viscosité cinématique de l'eau) supérieurs à 1000 on peut modéliser cette force par la relation $F_D = C_D \rho v^2 b d$ avec $C_D \approx \text{Cste}$. Par homogénéité de cette équation en déduire la dimension de C_D . Quelle est la direction de cette force ?
 - Expliquer qualitativement qu'au bout d'un certain temps le bateau atteindra une vitesse limite v_{lim} . Quelle relation existera-t-il alors entre la force propulsive et la force de traînée F_D ? Calculer la vitesse limite. En supposant que $C_D = 0,15$, faire l'application numérique.
 - Tracer qualitativement (sans la calculer) l'allure de la fonction $v(t)$ à partir du top de départ ($t = 0$). On fera apparaître sur le schéma la relation $v(t)$ obtenue précédemment sans force de frottement ainsi que la vitesse limite v_{lim} . Estimer le temps mis pour atteindre la vitesse limite en calculant le temps τ pour lequel la vitesse sans frottement est égale à la vitesse limite trouvée à la question précédente. Application numérique. Cette valeur vous semble-t-elle conforme à la réalité ?
 - Sachant que les compétitions se font généralement sur 2000 mètres et que le record olympique en skiff est de 7 minutes et 16 secondes, calculer la vitesse moyenne. Justifier que l'on peut assimiler cette vitesse moyenne à la vitesse limite. En déduire une nouvelle valeur du coefficient de traînée C_D . A. N.
 - Calculer le nombre de Reynolds correspondant à la vitesse moyenne (on donne $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'eau). Est-il supérieur à 1000 ? Conclusion ?
 - Vitesse limite de coque.** Pour une embarcation se déplaçant à la surface de l'eau on sait qu'il existe aussi une résistance de vagues qui devient très importante si le nombre de Froude (rapport $Fr = v/\sqrt{gL}$) devient de l'ordre de 1. Calculer ce rapport dans le cas présent. Est-il important de tenir compte ici de cette force de traînée supplémentaire ? Justifier l'avantage d'avoir un bateau très allongé.

10.3.3 Mouvement du skiff sous l'action d'une puissance constante P_0

On reprend le problème précédent mais en supposant cette fois-ci que le rameur développe une puissance moyenne constante P_0 plutôt qu'une force constante. Pour les applications numérique on pourra prendre $P_0 = 500$ W.

- En revenant à la définition du travail d'une force, $dW = \vec{f} \cdot d\vec{l}$, et de la puissance $P = dW/dt = \vec{f} \cdot \vec{v}$, montrer que l'on peut alors écrire pour la puissance propulsive $P_0 = f(t)v(t)$. Si l'on néglige pour l'instant la force de frottement fluide, montrer qu'en multipliant la seconde loi de Newton par $v(t)$ on peut trouver une équation différentielle simple pour $v^2(t)$ que l'on intégrera. Que vaut $v(t)$ au bout de 1 et de 5 secondes ? Tracer l'allure de la vitesse $v(t)$ du bateau dans ce cas. Comparer au cas précédent (question II 1).
- En tenant compte maintenant de la force de traînée F_D , montrer qu'il existe à chaque instant une puissance dissipée P_D . Comment P_D varie-t-elle avec $v(t)$? En égalisant cette puissance dissipée et la puissance propulsive en déduire qu'il existe une nouvelle vitesse limite que l'on calculera. En supposant que $C_D = 0,15$, faire l'application numérique.

- Tracer sans calcul l'allure de la fonction $v(t)$. On fera apparaître sur le schéma la relation $v(t)$ obtenue à sans force de frottement ainsi que la vitesse limite. Estimer le temps mis pour atteindre la vitesse limite en calculant le temps τ pour lequel la vitesse sans frottement est égale à la vitesse limite trouvée à la question précédente. Application numérique.

10.3.4 Influence du nombre de rameurs



FIGURE 10.3 – Aviron en 8 barré

Les compétitions d'aviron se pratiquent sur des bateaux étroits comportant 1, 2, 4 ou 8 rameurs plus un barreur éventuellement. Nous allons essayer de comprendre pourquoi un bateau avec 8 rameurs ne va pas huit fois plus vite qu'un bateau ayant un seul rameur. Nous considérerons uniquement des cas sans barreur.

On supposera que les N rameurs ont la même masse, $M = 70$ kg, et développent la même puissance musculaire, $P_0 = 500$ W. On suppose de plus que tous les bateaux ont à peu près la même forme, c'est-à-dire que leur volume est proportionnel à L^3 et que leur masse M_0 est négligeable devant la masse de leur équipage.

- En utilisant le théorème d'Archimède, écrire une relation dimensionnelle de proportionnalité entre le nombre N de rameurs et la longueur L du bateau.
- Une fois lancés les bateaux vont à une vitesse limite constante v . On supposera que la force de traînée visqueuse peut s'écrire $F'_D = \rho C'_D v^2 L^2$. Ecrire la puissance dissipée par cette force de traînée. Avec quelle puissance de la vitesse varit-elle ?
- Calculer la puissance fournie par un équipage de N rameurs. Ecrire que la puissance motrice est égale à la puissance dissipée lorsque le bateau avance à une vitesse constante.
- En éliminant la longueur du bateau entre les relations obtenues à la question 1 et à la question 3, montrer que la vitesse de progression peut s'écrire :

$$v \sim \frac{N^{1/9} P_0^{1/3}}{\rho^{1/9} M^{2/9}},$$

où N est le nombre de rameurs.

- Le résultat précédent est-il en accord avec les données du tableau 10.1 et avec la figure 10.4 ? Quel serait le temps de course pour un bateau à 16 rameurs ?

6. En supposant que la puissance des rameurs varie comme leur taille l au carré alors que leur masse varie comme l^3 , vaut-il mieux un équipage de grands lourds ou de petits légers ?

N	$T(\text{mn} : \text{s})$
1	6 :36
2	6 :04
4	5 :37
8	5 :19

TABLE 10.1 – Tableau donnant en fonction du nombre N de rameurs le temps T (en minutes et secondes) du record olympique masculin sur 2000 m pour des bateaux sans barreur.

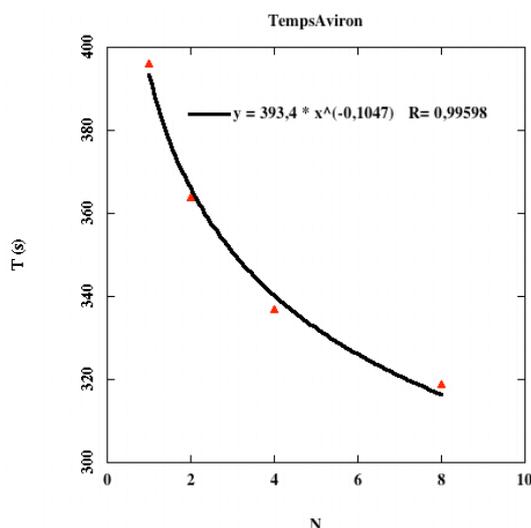


FIGURE 10.4 – Evolution du temps sur 2000 m en fonction du nombre de rameurs. Ajustement par une loi de puissance.

10.4 Examen de juin 2007 : Puissance dissipée par un cycliste

Un cycliste de masse m avec son vélo s'attaque à un col de première catégorie en montagne. Pour les applications numériques, à effectuer à chaque fois que possible, vous prendrez : $m = 80 \text{ kg}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ et $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ pour la masse volumique de l'air.

- a) Que vaut la force de pesanteur ? Calculer le travail de cette force lorsque le cycliste s'élève d'une hauteur h . Calculer la variation d'énergie potentiel correspondante. Cette quantité dépend-elle du chemin suivi ? Pourquoi s'agit-il d'une énergie minimum dépensée par le cycliste ? A.N. pour $h = 1000 \text{ m}$.

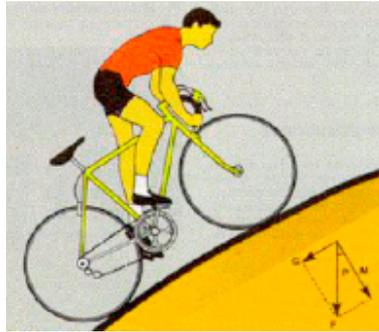


FIGURE 10.5 – Un grimpeur en montagne.

b) Calculer la puissance moyenne minimum dissipée pour s'élever d'une hauteur h en un temps T . A.N. $h = 1000$ m en $T = 2$ heures, $T = 1$ heure et $T = 1/2$ heure. Compte tenu du rendement des muscles, quelle est l'ordre de grandeur de la puissance réelle dissipée par les muscles par rapport à cette puissance minimum ?

c) Sachant un bon sportif amateur transmet à son vélo une puissance moyenne sur une heure de l'ordre de 250 watts, vos résultats vous semblent-ils compatibles ? En combien de temps ce sportif pourra-t-il monter les 1000 m de la côte ?

d) On suppose maintenant que la route descend avec un angle constant α . Exprimer le temps T pour descendre d'une hauteur h en fonction de la vitesse V du cycliste et de l'angle α .

On veut tenir compte maintenant des frottements que l'on supposera réduit au seul frottement de l'air et l'on négligera le vent.

e) Lors d'une campagne de mesure, par un jour sans vent, on détermine la vitesse limite de descente en roue libre du même cycliste sur une pente faisant l'angle α avec l'horizontal. Ecrire l'équilibre des forces et en déduire l'expression de la force de frottement F en fonction de m , g et α . On mesure expérimentalement différentes vitesses limites V_{lim} en fonction des valeurs suivantes de l'angle α :

α	V_{lim}
2°	30 km/h
4°	50 km/h
6°	60 km/h
8°	70 km/h
10°	80 km/h

f) Montrer que le rapport $A \approx F/V_{lim}^2$ est à peu près constant. Quelle est la dimension de A si on exprime les vitesse en m/s ? On écrit souvent la force de frottement de l'air sous la forme $F = 1/2\rho V_{lim}^2 S C_D$. En estimant à $S = 0,5$ m² la section du cycliste, estimer le coefficient de traînée

C_D . Cette valeur vous semble-t-elle raisonnable ?

g) Comment s'exprime la puissance dissipée par cette force de frottement. Avec quelle puissance de V_{lim} varie-t-elle ?

h) Notre cycliste monte une pente à 5° à la vitesse de 20 km/h. Calculer la puissance nécessaire pour vaincre la gravité et la puissance nécessaire pour vaincre le frottement de l'air. En déduire la puissance totale nécessaire. Pour qu'elle angle de la pente les deux expressions seraient égales ?

10.5 Examen de janvier 2007 : sauts divers



FIGURE 10.6 – Un superbe site pour le saut à l'élastique (<http://elastic.free.fr>).

I : Calcul d'un saut à l'élastique

Au catalogue de votre fournisseur habituel de matériel pour le saut à l'élastique, vous trouvez les spécifications suivantes pour l'achat d'un faisceau d'élastiques : longueur à vide $L_0 = 25$ m, allongement statique 30 cm/kg, résistance maximale 4500 kg.

a) Calculer l'allongement statique pour la charge maximum et en déduire la longueur maximale avant rupture L_{max} . Commentaires ?

Vous voulez installer cet élastique pour un saut à partir d'un pont à 103 mètres au-dessus de l'eau (figure 10.6). Vous faites 80 kg. Est-ce bien raisonnable ? Avant de sauter, répondez à ces quelques questions. On rappelle que l'énergie élastique stockée dans un ressort s'écrit $E_{elas} = \frac{1}{2}k(L - L_0)^2$.

b) A partir de l'allongement statique, écrire la raideur k de l'élastique. Quel est l'unité de raideur ? A la fin de toutes les oscillations, quelle est votre hauteur d'arrêt au-dessus de l'eau ?

c) Décrire pendant les différentes phases du saut les transferts entre énergie potentielle de gravité, énergie cinétique et énergie potentielle élastique.

d) Par conservation de l'énergie totale calculer l'allongement maximum de l'élastique. On pourra poser $y = (L - L_0)/L_0$ et $a = 2mg/KL_0$ et résoudre l'équation du second degré en y . A quelle hauteur au-dessus de l'eau vous arrêtez vous alors pour la première fois ? Que vaut alors la force de traction sur vos pieds ?

e) Pourquoi ne faut-il pas prendre un élastique trop raide ? Pourquoi ne pas le prendre très mou ? Expliquer pourquoi il vaut mieux que l'élastique ne soit pas trop « élastique » et qu'il dissipe un peu l'énergie.

II : Calcul d'un tremplin de saut à ski

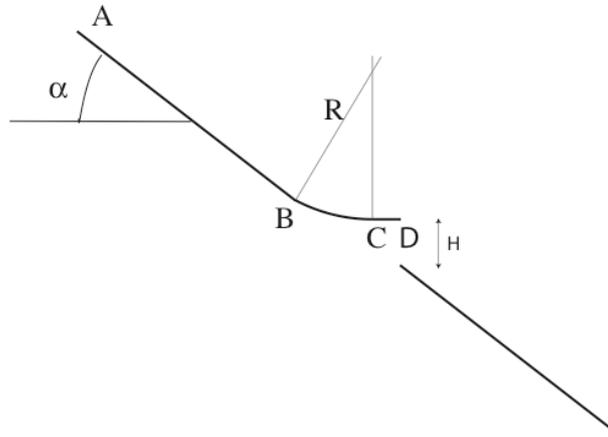


FIGURE 10.7 – Schéma du tremplin de saut.

Les prochains jeux olympiques d'hivers auront lieu en 2010 à Vancouver (Canada). Vous avez été sélectionné . . . non pas pour sauter mais pour construire le futur grand tremplin de saut ! Vous devez donc faire quelques calculs et les justifier, pour toutes les phases du saut : la prise d'élan, le vol et l'atterrissage. Cet examen est inspiré de l'article « Un saut plein de gravité » de J-M Courty et E. Kierlik (Pour la Science n° 292 février 2002, pp. 106-107).

Géométrie du tremplin et paramètres du skieur :

Le tremplin sera constitué d'une partie rectiligne AB de 50 mètres (figure 10.7) faisant un angle $\alpha = 35^\circ$ avec l'horizontale suivie d'une partie BC en arc de cercle de rayon $R = 90$ m, et d'un petit segment pratiquement horizontal CD.

Tout équipé le skieur type pèse environ 80 kg et mesure 1,80 mètre de haut et 40 cm de largeur moyenne. Dans la position aérodynamique dite « de l'œuf » sa hauteur n'est plus que de 1 mètre et sa largeur n'est pas modifiée. On prendra $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ comme valeur de l'accélération de la gravité et $\rho_{\text{air}} = 1,29 \text{ kg/m}^3$ pour la masse volumique de l'air à 0° C .

1) Phase de prise d'élan.

On considère tout d'abord le skieur dans sa prise d'élan sur la piste rectiligne AB. On néglige pour l'instant les frottements de glissement des skis sur la neige et les frottements de l'air.

a) Faire un schéma et décrire les deux forces en présence. Ecrire la seconde loi de Newton et la projeter sur l'axe Os dirigé vers le bas le long de la pente. On notera $s(t)$ la distance entre le point A et la position du skieur à l'instant t et \ddot{s} son accélération.

b) Intégrer cette équation en supposant que le skieur a une vitesse nulle en $s = 0$ à $t = 0$.

c) Calculer la distance atteinte au bout de 4 secondes. Que vaut alors la vitesse ? Le résultat dépend-il de la masse du skieur ?

d) En arrivant en B, de quelle altitude h le skieur est-il descendu ? En déduire la variation de son énergie potentielle de gravité. En écrivant la conservation de l'énergie totale en déduire l'énergie cinétique du skieur. Calculer la vitesse en B et comparer au résultat de la question précédente.

On tient maintenant compte de l'existence d'une force de frottement de glissement opposée au mouvement et proportionnelle à la force appliquée par le skieur perpendiculairement au sol.

e) Justifier que la force de frottement s'écrit $\vec{f}_{neige} = -\mu(mg \cos \alpha)\vec{e}_s$. Ecrire dans ce cas la seconde loi de Newton pour le skieur en mouvement ainsi que sa projection dans le sens de la pente.

f) Montrer que le skieur ne peut glisser sur la pente que si l'angle α est supérieur à une valeur minimum α_0 que l'on calculera pour $\mu = 0,05$.

g) Calculer l'énergie dissipée par cette force de frottement sur une distance de 1 mètre. Que devient cette énergie ?

Dès que la vitesse devient significative on ne peut plus ignorer la force de frottement de l'air. Nous supposons que cette force de traînée peut s'écrire :

$$f_{air} = -\frac{1}{2}\rho_{air}U^2 AC_D \quad (10.1)$$

où A est l'aire de la plus grande section du skieur exposée au vent et où C_D est le coefficient de traînée que nous prendrons constant et de l'ordre de 0,4.

h) Calculer pour quelle vitesse U la force de traînée de l'air pour une position « de l'œuf » devient supérieure à la force de frottement de glissement. On supposera dans la suite que cette condition est toujours vérifiée et l'on négligera donc la force de frottement solide f_{neige} devant f_{air} .

i) Ecrire la seconde loi de Newton. Montrer que si la partie AB du tremplin était très longue il existerait une vitesse limite $V_0 = \sqrt{\frac{2mg \sin \alpha}{\rho_{air} AC_D}}$. Calculer V_0 .

j) Montrer que la fonction $U(s) = V_0 \sqrt{1 - \exp(-s/L)}$ qui donne la vitesse du skieur en fonction de la distance parcourue est solution de l'équation différentielle trouvée. Montrer que $L = \frac{m}{\rho_{air} AC_D}$ et calculer la numériquement. Que caractérise cette longueur L ? Le skieur a-t-il le temps d'atteindre sa vitesse limite sur notre tremplin ? Calculer en B le rapport $U(s_B)/V_0$.

2) Phase d'envol

Après la pente rectiligne, le skieur arrive dans une zone en forme d'arc de cercle de rayon de courbure R . On suppose qu'il y rentre avec une vitesse $V_B = 12$ m/s et qu'il garde cette vitesse dans toute la courbe (jusqu'en C).

a) Calculer la force centrifuge $m V_B^2/R$ à laquelle il est soumis et comparer la à son poids. Quelle est alors le poids apparent du skieur ? Quelle est l'action des muscles des cuisses pour garder la même position fléchie ?

b) Au point C expliquer pourquoi cette force centrifuge disparaît. En déduire que le skieur va naturellement se déplier et se retrouver debout sur le petit segment CD.

3) Phase de vol plané

a) Après son décollage au point D le skieur est supposé avoir une vitesse $V_D = 20$ m/s et une direction horizontale. Quel serait la trajectoire du centre de gravité du skieur si l'on pouvait négliger l'effet de l'air ?

b) On suppose que le point D est à une hauteur $H = 3$ mètres au-dessus de la piste, piste qui continue à descendre avec la même pente α avec l'horizontale (figure 10.7). En projetant la seconde loi de Newton sur un axe Ox horizontal et Oz vertical, trouver graphiquement ou par le calcul l'intersection de la trajectoire du skieur avec la piste. Quelle sera la distance parcourue sur la pente depuis le pied du tremplin ? Quel est l'angle entre la trajectoire et la piste au moment de la réception ? Comment peut-on diminuer cet angle ?

On va maintenant essayer de tenir compte du frottement de l'air. On comparera l'effet de l'air sur le skieur à l'effet de l'air sur une aile d'avion et on considérera qu'en plus de la force de traînée f_{air} supposée inchangée il apparaît une force de portance \vec{L} perpendiculaire à la trajectoire.

c) Calculer la force de traînée f_{air} lorsque $V = V_D$ sachant que maintenant le corps est déplié. Comparer au poids.

d) On suppose que la force de portance est de l'ordre de 300 Newtons. Calculer la « finesse » du skieur, c'est-à-dire le rapport L/f_{air} . Au vue des figures 10.8 et 10.9, comment faut-il se placer pour augmenter cette finesse ? Quel est l'ordre de grandeur de l'angle entre le corps du skieur et l'horizontal ? Comparer à l'angle des ailes d'un avion ou d'un oiseau en train de planer.



FIGURE 10.8 – Vue de face du sauteur pendant la phase de vol. Noter la position en « V » des skis et des bras.



FIGURE 10.9 – Vue de côté du sauteur.

10.6 Examen de janvier 2006 : Tennis

10.6.1 Andy Roddick au service !

Nous allons étudier le service au tennis. Andy Roddick détient le record du service le plus rapide avec une mesure enregistrée au radar à 219 km/h.

On suppose que la balle est frappée à une hauteur $h = 2,40$ m.

Distance de la ligne de fond de court au filet $L = 11,89$ m, hauteur du filet $H = 0,91$ m. On donne la masse d'une balle de tennis $m = 58$ grammes et son rayon $R = 33$ mm. Masse volumique de l'air $\rho = 1 \text{ kg/m}^3$.

1) Energie cinétique initiale. Calculer en m/s la vitesse u_0 de la balle lancée par A. Roddick. Quelle est l'énergie cinétique initiale de la balle ? Préciser l'unité.

2) Angle de tir. On notera α l'angle de la vitesse initiale avec la direction horizontale et l'on notera négativement les angles de tir vers le bas. On suppose que la trajectoire de la balle reste dans un plan perpendiculaire au filet. Si on néglige la force de gravité, quel est l'angle de tir pour passer juste au-dessus du filet (sans toucher) ? Faire un schéma. Quel est alors le temps de vol de la balle T entre la raquette et le filet ? Où atterrit cette balle ? Le service est-il valable ?

3) Effet de la gravité. Pour estimer la courbure de la trajectoire sous l'effet de la gravité, calculer la hauteur de chute au bout d'un temps T d'une balle lâchée sans vitesse initiale dans le champ de gravité ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Estimer le nouvel angle de tir.

4) Effet de l'air. On tient compte maintenant des forces de frottement de l'air. On suppose que cette force est opposée à la direction de la vitesse et s'écrit $f_D = \frac{1}{2}\rho u^2 C_x A$, où ρ est la masse volumique de l'air, et A la surface de la section maximale de la balle. Quelle est la dimension du coefficient C_x ? Calculer à l'instant initial le rapport de cette force de traînée au poids de la balle (on prendra $C_x = 0,5$). La force de traînée est-elle négligeable devant le poids ?

En négligeant l'effet de la gravité, en supposant que la force de traînée reste égale à sa valeur initiale, et en utilisant la seconde loi de Newton, estimer la vitesse de la balle au bout du temps T .

10.6.2 Lettre de candidature (1 page environ).

En vous aidant du texte ci-dessous (en particulier le paragraphe en gras) présenter vos arguments pour convaincre le "centre d'expertise scientifique appliquée au sport" du « Team Lagardère » de vous recruter. En prenant des exemples vous montrerez en particulier en quoi votre formation scientifique et votre formation en « Physique du Sport » peuvent leur être utile.

Extrait du journal Le Monde du 14 décembre 2005.

Le Team Lagardère veut mettre experts et technologies à la disposition des sportifs Depuis Singapour et la claque reçue du Comité international olympique (CIO), qui a préféré Londres à Paris pour les Jeux de 2012, on croyait le sport français occupé à plein temps à panser ses plaies, les épaules tombantes, des antidépresseurs plein les poches. Sonné comme un boxeur, sans ressort. Mais, presque six mois après cet échec, quelques voix se font entendre ici où là pour reparler d'avenir.

Ainsi va naître le Team Lagardère. Présenté officiellement mardi 13 décembre, ce concept d'un genre inédit se propose de réunir, en un même lieu, le stade Jean-Bouin de Paris, un savant cocktail d'experts et des outils d'aide à la performance. Une version en miniature de l'Institut national du sport et de l'éducation physique (Insep), mais résolument plus moderne, et nettement plus élitiste. "Notre

cible, ce sont les sportifs professionnels”, précise Christian Miller, un spécialiste de la biomécanique et de la physiologie, débauché de l’Insep pour diriger le ”centre d’expertise scientifique appliquée au sport” du Team Lagardère.

A en croire ses géniteurs, l’idée serait née d’une rencontre, deux années en arrière. Une main tendue d’Arnaud Lagardère, patron du groupe du même nom (le Groupe Lagardère est actionnaire du Monde SA), à Richard Gasquet et à Gaël Monfils. Les deux espoirs du tennis français peinaient alors à grimper les dernières marches vers le plus haut niveau. Arnaud Lagardère a fait le tri parmi leur entourage, puis épluché son carnet d’adresses pour associer aux deux jeunes pousses les meilleurs tuteurs du marché. *Confortés par les bons résultats* (Richard Gasquet pointe actuellement au 17ème rang mondial, Gaël Monfils au 31ème), *nous avons eu envie d’aller plus loin en construisant quelque chose d’original, un concept innovant, une alliance du public et du privé*, explique Arnaud Molinié, directeur délégué du groupe, en charge du projet. Le résultat ne ressemble à rien de connu. Hébergé par le Paris Jean-Bouin, le Team Lagardère s’appuie sur les structures et les installations de ce club centenaire de l’Ouest parisien. Mais son apparence le rapproche plus d’un centre d’études que d’une association sportive traditionnelle. Christian Miller explique : ”Nos travaux, nos expériences, se font en présence de l’athlète, pendant l’entraînement, et non pas dans l’isolement d’un laboratoire. C’est de la recherche appliquée, au premier sens du terme.”

RADARS, CAMÉRAS ET CAPTEURS

A Jean-Bouin, un court de tennis sera équipé de radars, de caméras et de capteurs dans le sol. Il permettra d’étudier, en vrai, la gestuelle du joueur. Les capacités musculaires et énergétiques des athlètes pourront être évaluées par des systèmes de mesure issus de la recherche scientifique. Aujourd’hui, la différence se fait par la qualité du geste et de l’entraînement, assure Xavier Moreau, le directeur du Team, une figure incontournable du tennis français, préparateur physique de l’équipe de France de Fed Cup. Et nous avons besoin pour cela de pouvoir disposer d’outils de très haute technologie.

Ces douze derniers mois, le projet a creusé ses racines dans un terrain familier du groupe, le tennis. En plus de Richard Gasquet et Gaël Monfils, Mary Pierce et Paul-Henri Mathieu ont rejoint l’équipe, accompagnés d’une poignée de joueurs plus modestes. Amélie Mauresmo n’en est pas, mais elle a sollicité ses techniciens, en fin de saison, pour profiter à son tour de leurs compétences. Arnaud Molinié n’en fait pas mystère : ”Le Team Lagardère a vocation à devenir omnisports. Très vite, il comptera des athlètes venus d’autres disciplines.” Précision : les nouvelles recrues devront toutes rejoindre l’une ou l’autre des sections du Paris Jean-Bouin, comme l’a fait Mary Pierce. Une convention signée avec la Fédération française de rugby mettra le coûteux appareillage de la ”plate-forme technique et scientifique” à la disposition de l’équipe de France, dans la perspective de la Coupe du monde 2007. Un accord semblable pourrait être conclu avec la Fédération française d’athlétisme, approchée ces derniers temps par les parrains du projet. Le tennis de table figure aussi en bonne place parmi les sports jugés prioritaires. Ses meilleurs espoirs devraient très prochainement bénéficier de la structure et des moyens du Team. La petite histoire veut que l’envie de donner un coup d’accélérateur à son idée serait venue à Arnaud Lagardère dans l’avion du retour de Singapour, le 7 juillet, au lendemain du camouflet olympique. Pour ”rebondir”, résume Arnaud Molinié.
