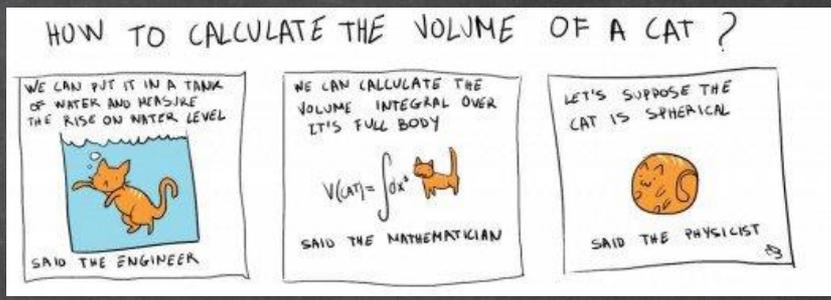


Physique (in)certaine

La construction de la démarche
scientifique

COURS 4: Quelle place pour les certitudes en physique ?

De la modélisation de nos méconnaissances jusqu'aux erreurs



Incertitudes

Il faut bien justifier le titre de
ce cours...

Erreur et incertitude

- Erreur
 - ✓ Différence entre la valeur « vraie » et la valeur mesurée
 - ✓ La valeur « vraie » est inconnue
 - Mon erreur aussi devenait idéal(e)
- Incertitude
 - ✓ Évaluation de l'importance de l'erreur possible
 - ✓ On parle aussi de marge d'erreur
- Écriture d'une mesure
 - ✓ Longueur mesurée avec une règle graduée
 - Longueur mesurée: $L = 21.4$ cm
 - Incertitude $\Delta L =$ incertitude estimée = 0.1 cm
 - Résultat: $L = 21.4 \pm 0.1$ cm
- Est-ce que cela signifie que
 - ✓ $21.3 \leq L \leq 21.5$ (cm) ?
 - Probablement mais pas de manière certaine
 - ΔL quantifie une erreur « typique »

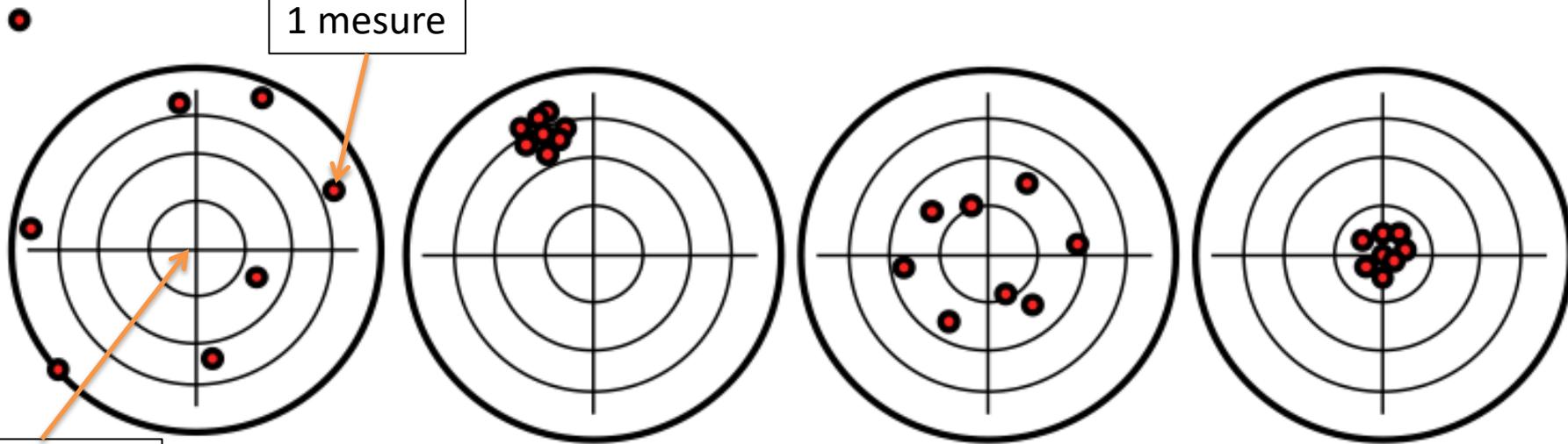
Précision et exactitude

Ni précis ni exact

Précis mais... pas exact

Exact mais... pas précis

Exact et précis

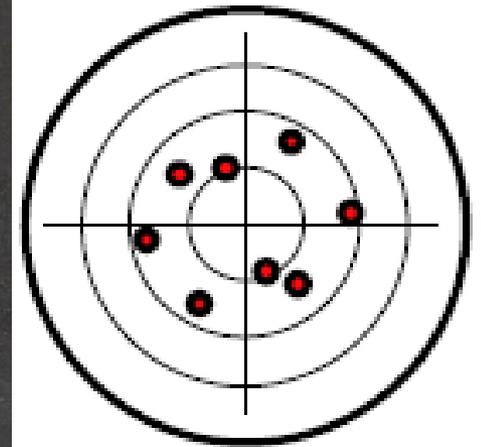


La distance entre le centre et **un point rouge** = erreur d'une mesure

Incertitude statistique

- On parle d'incertitude **statistique** lorsque celle-ci pourrait être corrigée par un nombre infini de mesures
 - ✓ Erreur aléatoire
 - ✓ On se trompe, mais la moyenne sur un grand nombre de mesure permettra de tendre vers le résultat exact
- On effectue toujours un nombre fini de mesure

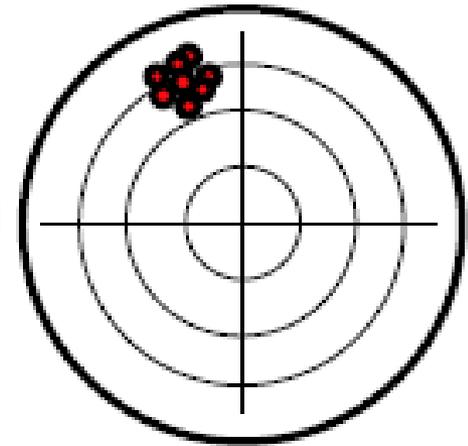
Exact mais... pas précis



Incertitude systématique

- On parle d'incertitude systématique si répéter un grand nombre de mesures (et faire la moyenne) ne réduit pas l'erreur de mesure
- Exemple:
 - ✓ Une montre en retard de 10 minutes.
 - ✓ Une appareil mal étalonné
 - ✓ Un paramètre caché qui fausse la mesure
 - Température qui dilate l'appareil
 - ✓ Etc.

Précis mais... pas exact

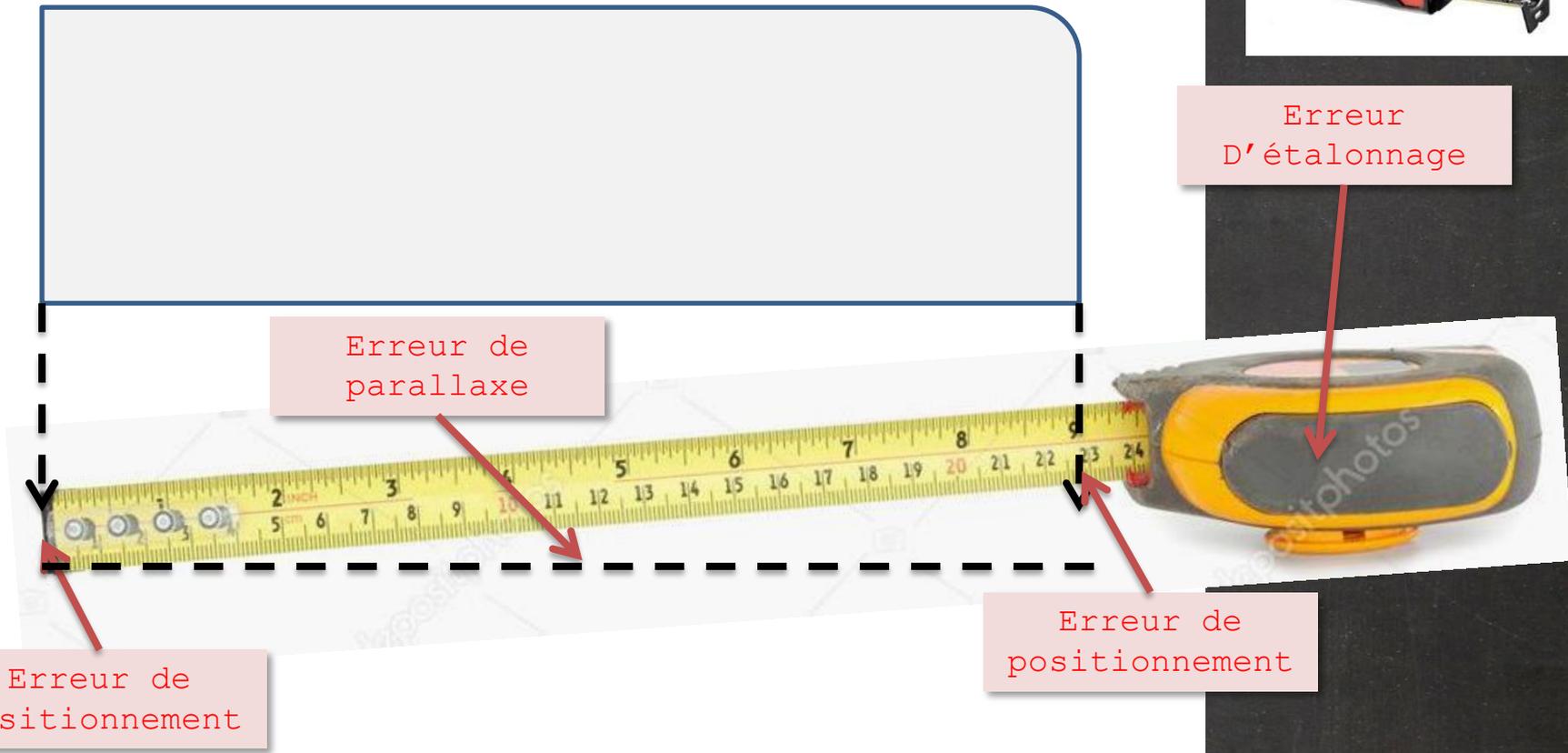


Les erreurs s'accumulent...

- Exemple longueur d'une pièce mesurée avec un mètre ruban:



Erreur
D'étalonnage



Erreur de
parallaxe

Erreur de
positionnement

Erreur de
positionnement

Il faut combiner les incertitudes

- Arsenal mathématique pour combiner les incertitudes
 - ✓ Surface = $S = l \times L \Rightarrow \Delta S = S \times (\Delta l/l + \Delta L/L)$
- Problème: les sources d'erreurs sont parfois corrélées entre elles...
 - ✓ Exemple:
 - La surface de la pièce dépendra des erreurs sur la Largeur et la longueur qui peuvent partager des sources d'erreur communes (mauvais étalonnage du mètre-ruban)

L'étude fine des incertitudes est indispensable

Une mesure sans incertitude n'a aucun sens

L'incertitude fixe le nombre de chiffres significatifs

$L = 21.083480534098 \pm 1.5$

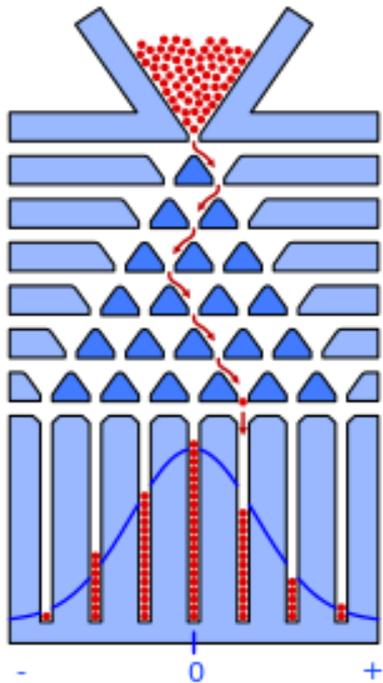


$L = 21.1 \pm 1.5$

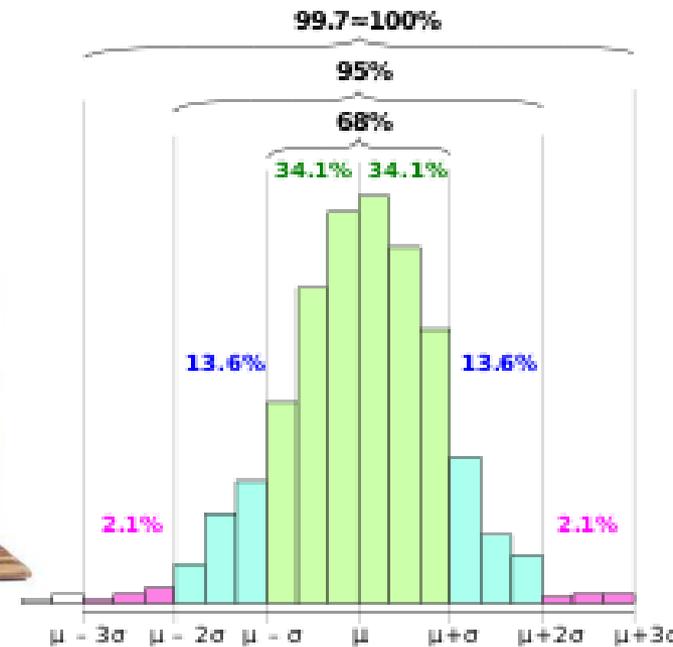


Retour sur la planche de Galton

<https://youtu.be/rNTFDRhF6Ag>



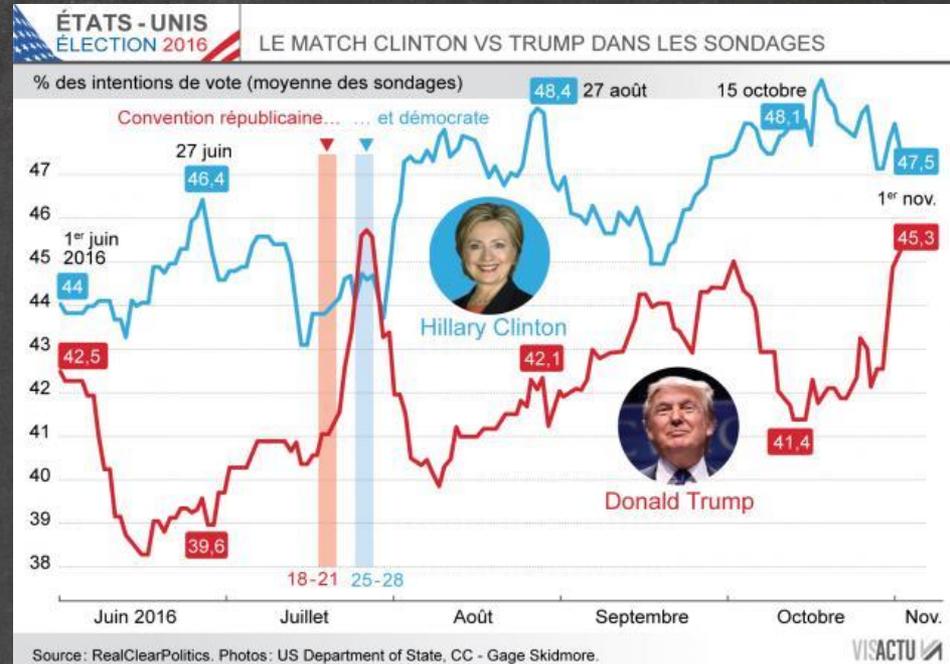
Jeu du Fakir



La loi normale permet de quantifier la distribution des écarts à la moyenne

Erreur et sondages

- Marge d'erreur
 - ✓ ~ incertitude statistique
 - ✓ Nombre de sondés $N \sim 1000$
 - ✓ Proportion de vote $p \sim 45\%$
- Écart type Δp
 - ✓ Englobe 68% des cas
- Intervalle de confiance à 99% avec $p \sim 0,5$
 - ✓ $2.58 \times \Delta p$
 - $\sim 1,29 / \sqrt{N} \sim 0,04$
- D'autres sources d'erreurs systématiques
 - ✓ Les fameux « redressements »
 - ✓ Les sondés mentent
 - ✓ Les sondés changent d'avis
 - ✓ Les sondés subissent des biais



$$\text{Écart-type} = \sqrt{\frac{p(1-p)}{N}}$$

$$\text{Marge d'erreur (99 \%)} = 2,58 \times \sqrt{\frac{0,5(1-0,5)}{N}} = \frac{1,29}{\sqrt{N}}$$

Les sondages ne sont pas certains

Écart entre les 2 candidats

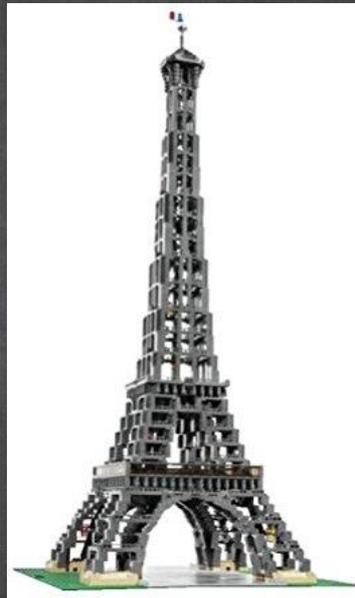
Intervalle de confiance du sondage à 99%

Différence de pourcentages :	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %
1 % marge d'erreur	50,0	83,6	97,5	99,8	100	100	100	100	100	100	100
2 % marge d'erreur	50,0	68,8	83,7	92,9	97,5	99,3	99,8	100	100	100	100
3 % marge d'erreur	50,0	62,8	74,3	83,7	90,5	94,9	97,5	98,9	99,6	99,8	99,9
4 % marge d'erreur	50,0	59,7	68,8	76,9	83,7	89,0	93,0	95,7	97,5	98,7	99,3
5 % marge d'erreur	50,0	57,8	65,2	72,2	78,4	83,7	88,1	91,5	94,2	96,2	97,6
6 % marge d'erreur	50,0	56,5	62,8	68,8	74,3	79,3	83,7	87,4	90,5	93,0	95,0

Probabilité statistique que le candidat en tête le soit réellement

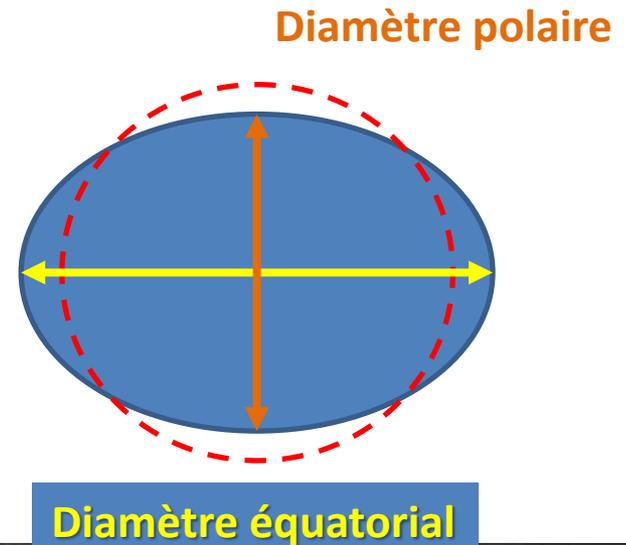
1 chance sur 3 de se tromper...

La modélisation

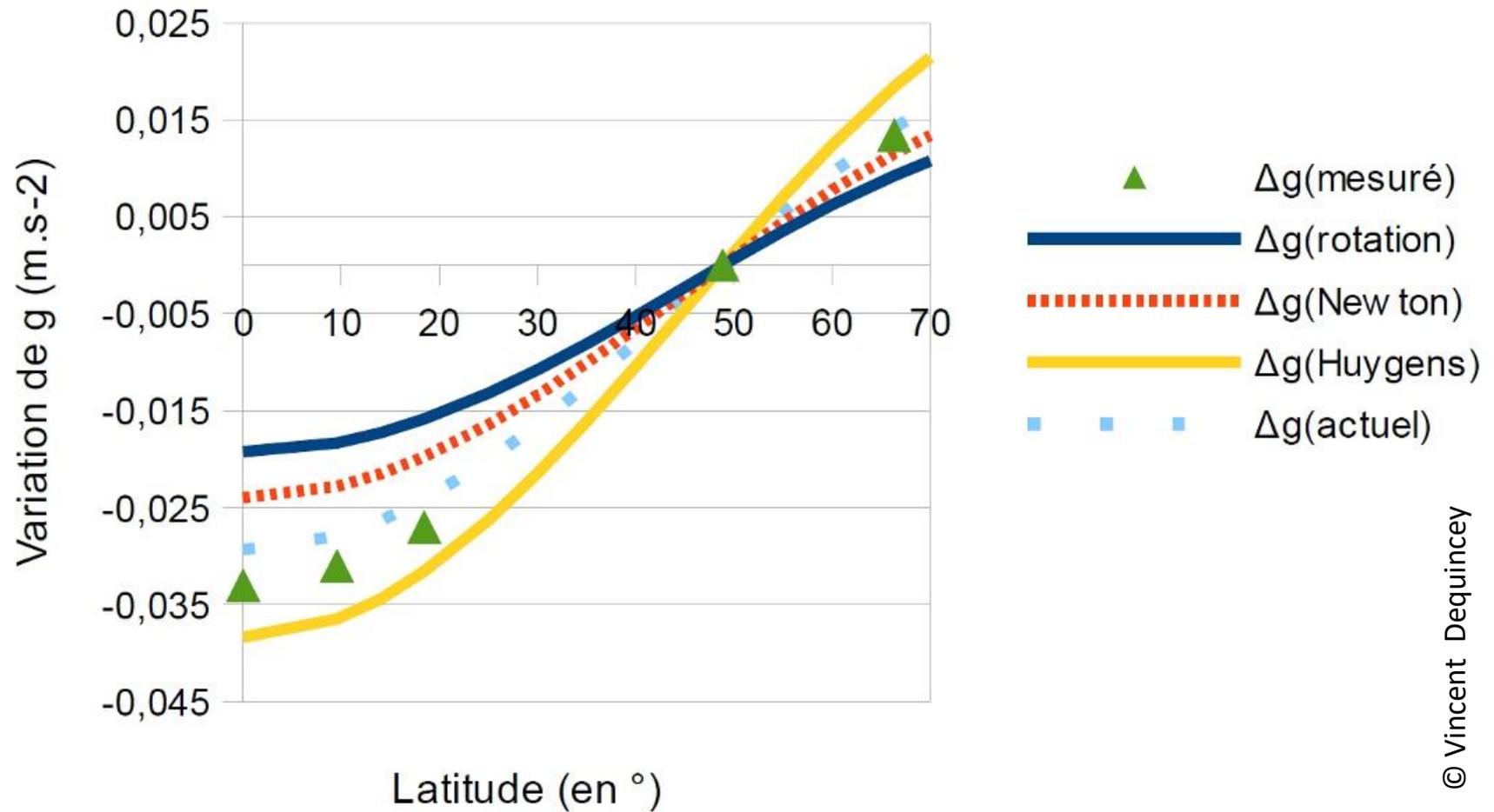


Modéliser c'est se tromper ?

- Difficulté de prendre en compte tous les paramètres
 - ✓ Simplification
 - Assumer une part d'erreur
 - ✓ Modélisation
 - Prise en compte des éléments essentiels
 - Négliger le reste
 - Évaluer l'erreur associée
- Exemple
 - ✓ Modélisation sur la forme
 - LA terre est aplatie aux pôles



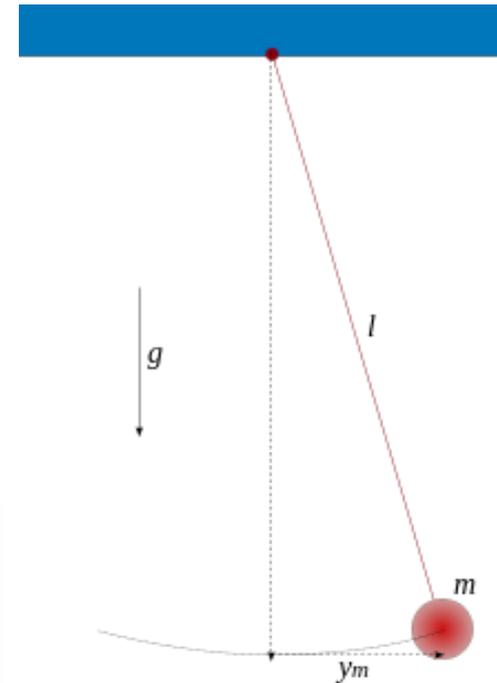
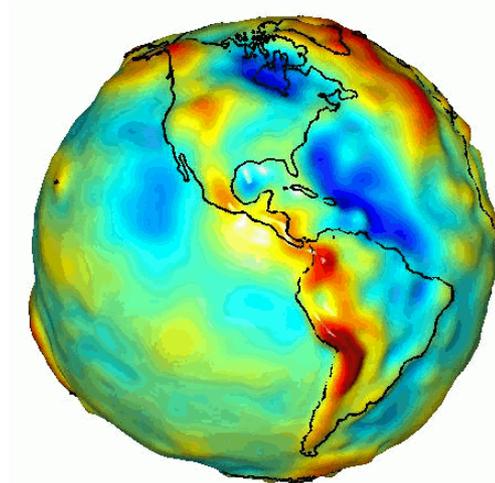
La pesanteur varie avec la latitude



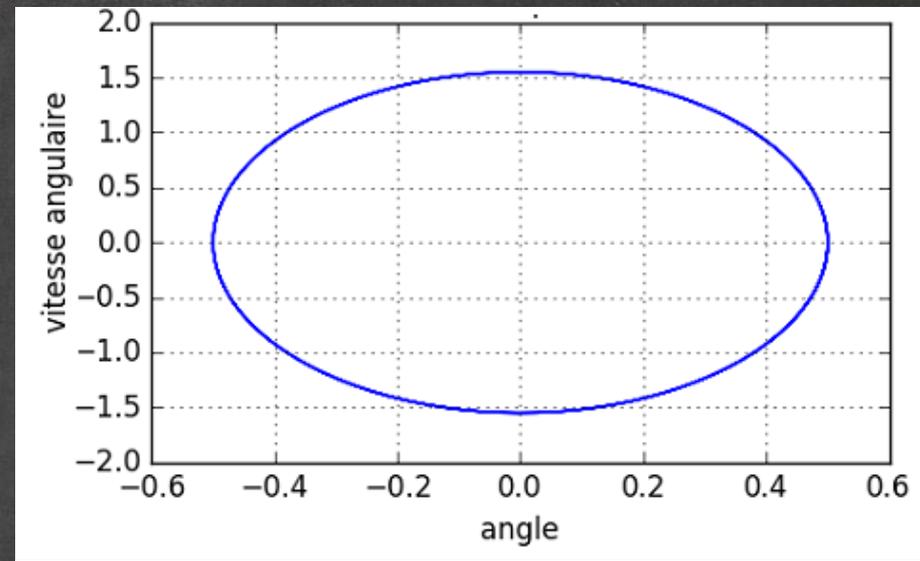
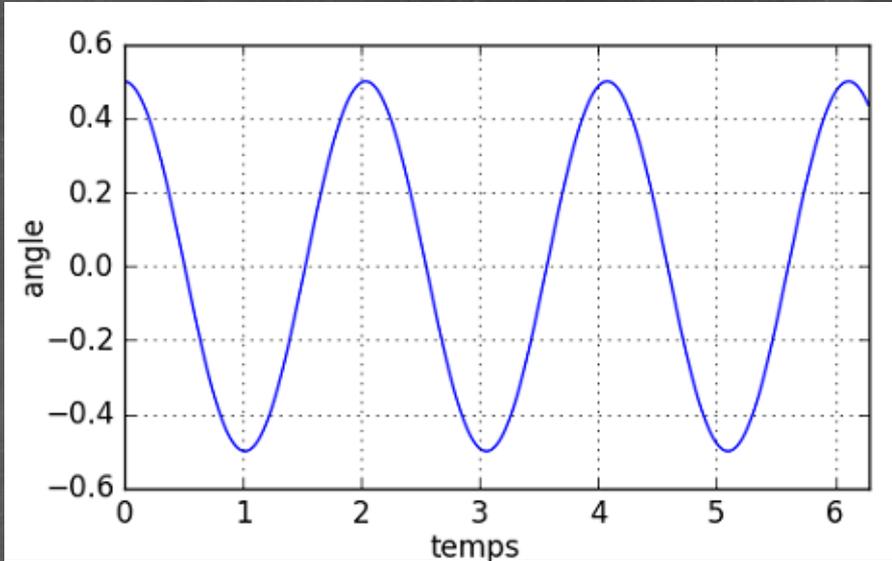
© Vincent Dequincey

Le pendule dans un plan

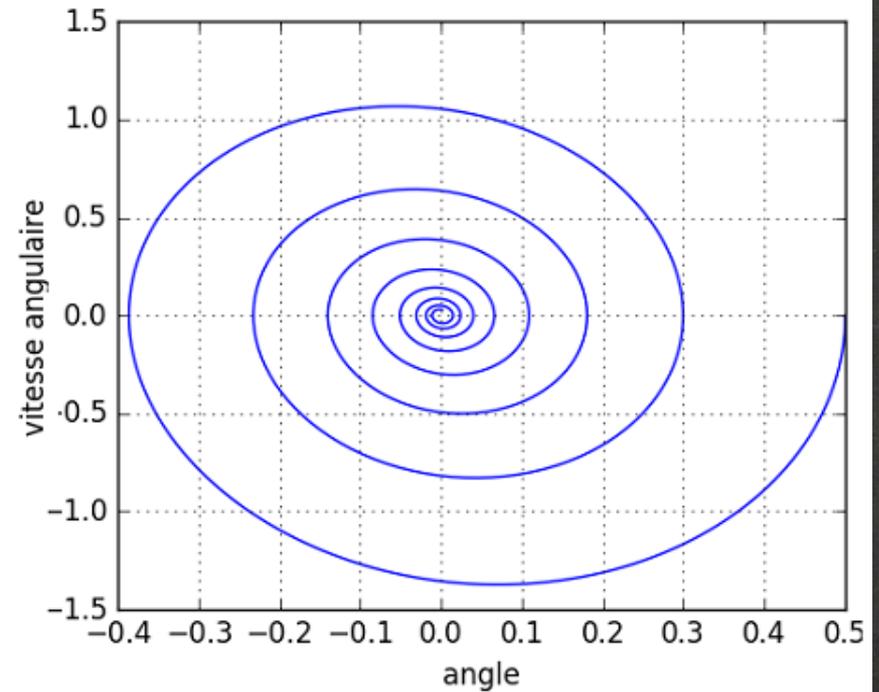
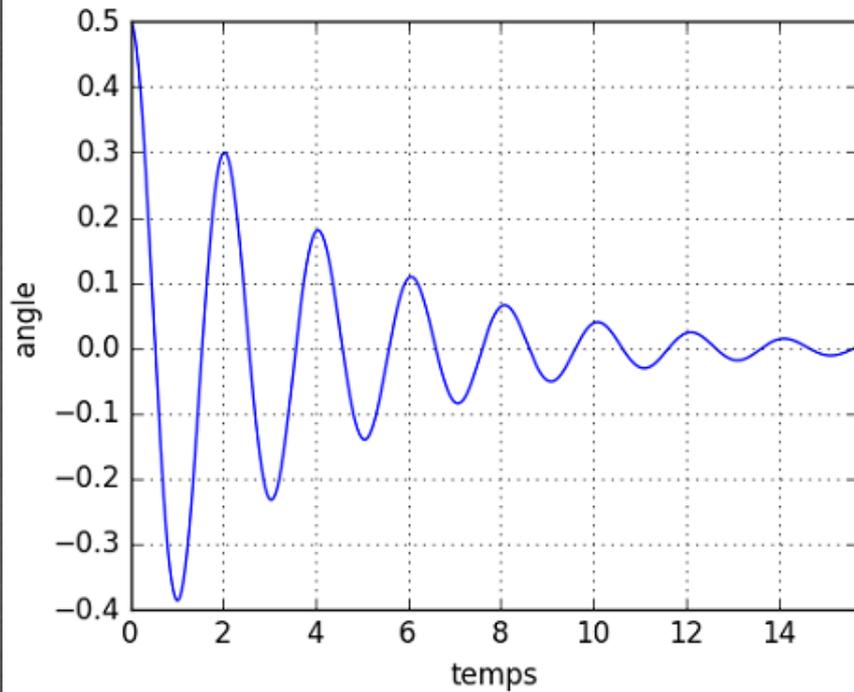
- Fil rigide
 - ✓ Le fil ne se déforme pas
- Fil beaucoup plus léger que le pendule
 - ✓ Masse du fil négligé
- Oscillation du fil sans frottement
 - ✓ Pas de frottement au point d'attache
- Bille assez petite
 - ✓ Pas de frottement de l'air
- g = valeur moyenne
 - ✓ $g \sim 9.81 \text{ m/s}^2$



Angle sans frottement



Angle avec frottement



Limites de la modélisation

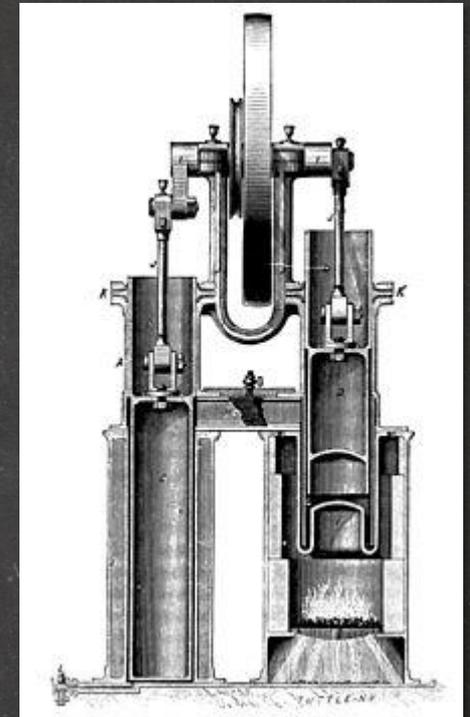
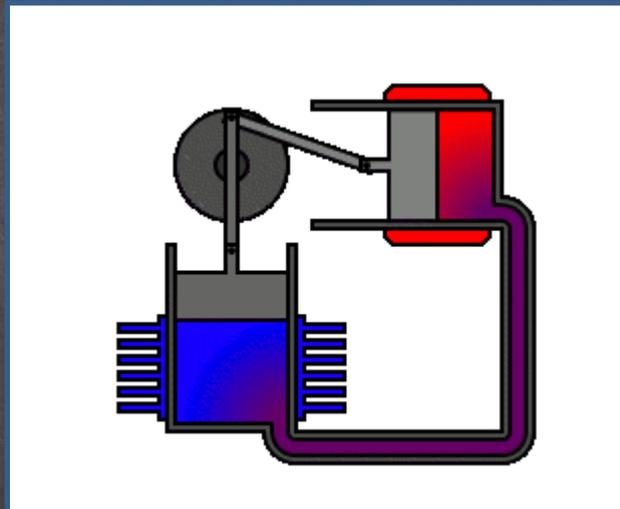
- La modélisation a des limites:
 - ✓ la qualité d'un modèle dépend principalement de la qualité de la théorie physique
- Interprétation des résultats
 - ✓ Erreurs de compréhension
- Si Désaccord théorie expérience
 - ✓ Mauvaise théorie ?
 - ✓ Mauvaise modélisation ?

Énergie

Une grandeur universelle :
La monnaie d'échange commune à
toutes les phénomènes physiques

Le moteur de Stirling

- Production d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique.



Le radiomètre de Crookes (1873)



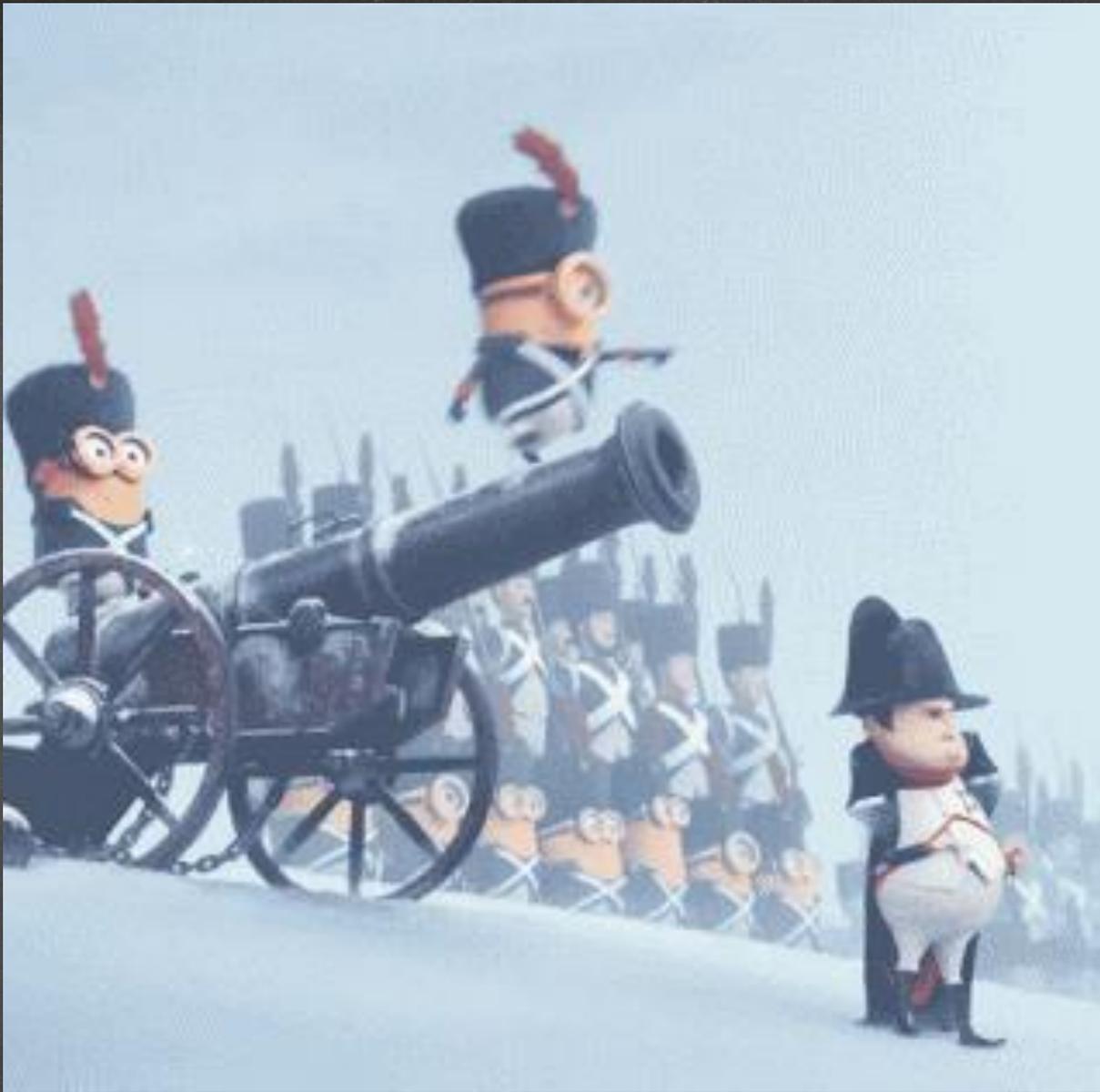
La mécanique de Newton

$$F = m a$$

Force = masse × accélération

- Énergie cinétique: $E_c = \frac{1}{2}mv^2$
- Grandeur conservée: la quantité de mouvement
 - ✓ Quantité de mouvement = $p = m \times v = \text{masse} \times \text{vitesse}$
- p total conservé
 - ✓ $p = m_1v_1 + m_2v_2 + \dots$
- Exemples
 - ✓ Pétanque
 - ✓ Billard
 - ✓ Recul d'une arme





Le pendule de Newton

- https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=0LnbyjOyEQ8
 - ✓ 1 boule, 2 boules, 3 boules lancées

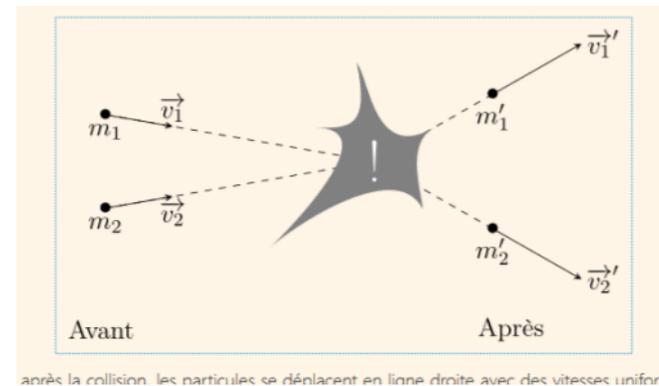
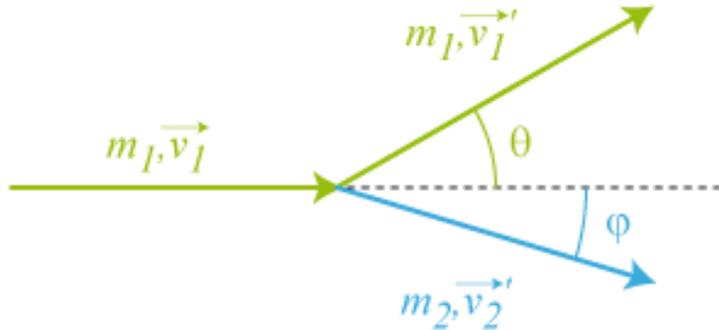




Why science teachers
should not be given
playground duty.

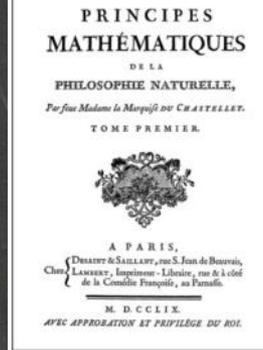
Chocs élastiques et inélastiques

- Choc élastique
 - ✓ p et E_c conservés
 - ✓ Si masses égales <https://www.youtube.com/watch?v=gFvv3rVCV0I>
 - ✓ Si masses inégales <https://www.youtube.com/watch?v=bHYgvkYKk5M>
- Choc Inélastique (mou)
 - ✓ Seul p conservé
 - ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=OE1RUZaQ8X4>



La naissance du concept d'énergie

« Jamais une femme ne fut si savante qu'elle, et jamais personne ne mérita moins qu'on dit d'elle : c'est une femme savante. (...) Elle ne parlait jamais de science qu'à ceux avec qui elle croyait pouvoir s'instruire, et jamais n'en paria pour se faire remarquer. »
Voltaire, « Préface historique », in I. Newton, Principes mathématiques de la philosophie naturelle, traduit du latin par feu la marquise Du Châtelet.



- De Newton jusqu'au XIXe siècle, les mots de la physique n'ont pas un sens aussi précis
 - ✓ Force = force, énergie ou puissance
 - ✓ Force vive = Énergie
- Leibniz (1686)
 - ✓ Leibniz montre que la quantité $m \cdot v^2$, appelée « force vive », se conserve.
- ἐνέργεια / *enérgeia*. Ce terme grec originel signifie « force en action »
 - ✓ Bernouilli emploie le terme en 1717
- Émilie du Chatelet (1706–1749)
 - ✓ Popularise les forces vives
 - ✓ Traduction de Newton
 - Et corrections
- Coriolis: $\frac{1}{2} m v^2$



On a vu au chap. 13. qu'il est démontré par la théorie de Galilée que les espaces que la gravité fait parcourir aux corps qui tombent vers la terre, sont comme les carrés des vitesses : donc les forces vives que les corps acquièrent en tombant, sont aussi comme les carrés de leurs vitesses, puisque ces forces sont comme les espaces. [...]

§. 368. Toutes les expériences ont confirmé depuis cette découverte, dont on a l'obligation à M. de Leibnits, & elles ont fait voir que dans tous les cas, la force des corps qui sont dans un mouvement actuel, & fini, est proportionnelle aux carrés de leurs vitesses multipliés dans leur masse, & cette estimation des forces est devenue un des principes les plus féconds de la Mécanique.

L'énergie a plusieurs formes

- Au XIXe siècle, on sait que:
 - ✓ la chute d'un poids donné d'une même hauteur produit toujours le même échauffement
 - ✓ si la vitesse finale n'est pas nulle, la hausse de température est moindre
 - ✓ De même un échauffement pourra produire une dilatation
 - ✓ Une augmentation de pression permettra de déplacer une masse
- Le total est toujours conservé
 - ✓ naît le concept scientifique d'énergie
 - ✓ C'est une grandeur qui possède une propriété:
- L'énergie se conserve dans tous les phénomènes sous différentes formes (pression, hauteur, chaleur, vitesse, rotation, lumière, usure, consommation de charbon, etc.)

Transformation de l'énergie

- L'énergie a de multiples formes
 - ✓ Chimique
 - ✓ Chaleur ou frottement
 - ✓ Potentielle
 - ✓ cinétique
- Difficulté de faire un bilan complet
 - ✓ Explique pourquoi le concept a pris du temps à émerger
- Frottements
 - ✓ En apparence, les lois de conservations n'en sont pas
 - ✓ Frottement = perte d'énergie cinétique (transformation en chaleur)

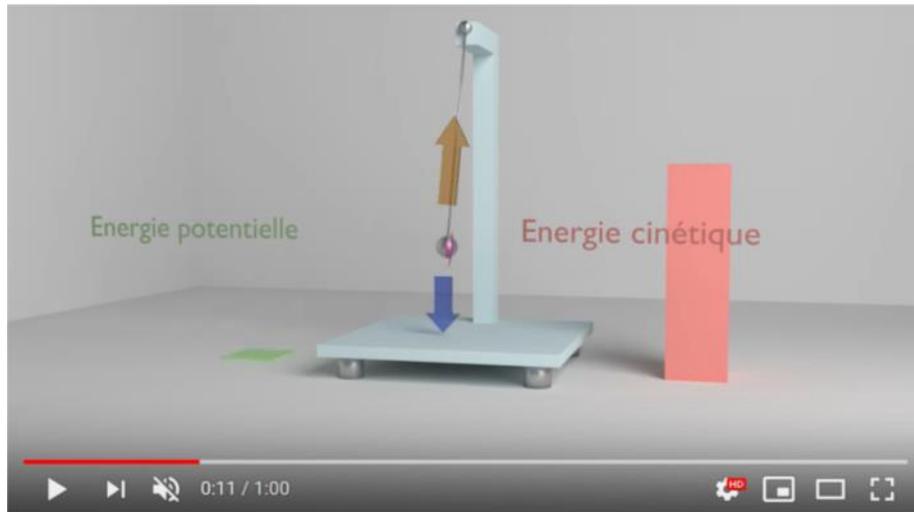
Définitions de l'énergie

- Mesure de la capacité d'un système à travailler
- Variation d'énergie
 - ✓ $dE = \text{Force} \times \text{petit déplacement} = F \times dx$
- 2 formes d'énergie
 - ✓ Énergie potentielle E_p (emmagasinée, chimique, nucléaire, pesanteur, etc.)
 - ✓ Énergie cinétique $E_c =$ énergie du mouvement
 - Énergie totale = énergie potentielle + énergie cinétique



Exemple du pendule

- https://www.youtube.com/watch?v=ivay_xRlat0

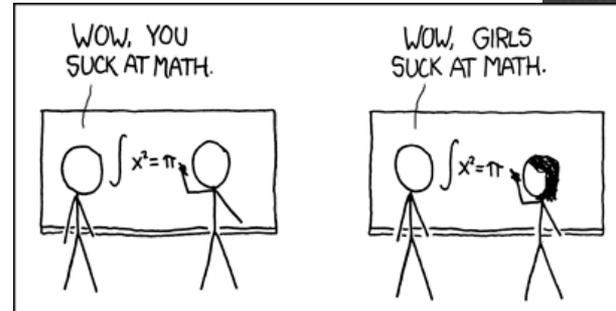


L'énergie change de forme
mais se conserve au total



Le fabuleux théorème de Noether

- *Emmy Noether* (1882–1935)
« le génie mathématique créatif
le plus considérable produit
depuis que les femmes ont eu
accès aux études supérieures »
(Einstein)



- Équivalence symétrie (invariance) et
grandeur conservée

- ✓ Temps – énergie :

- Les lois physiques ne dépendent pas du temps

- ✓ Position – quantité de mouvement

- Les lois physiques ne dépendent pas de l'espace

- ✓ Direction – moment cinétique

- Les lois physique ne dépendent pas de la direction

- Pilier de la physique moderne

- ✓ Relativité

- ✓ mécanique quantique

- ✓ Invariances

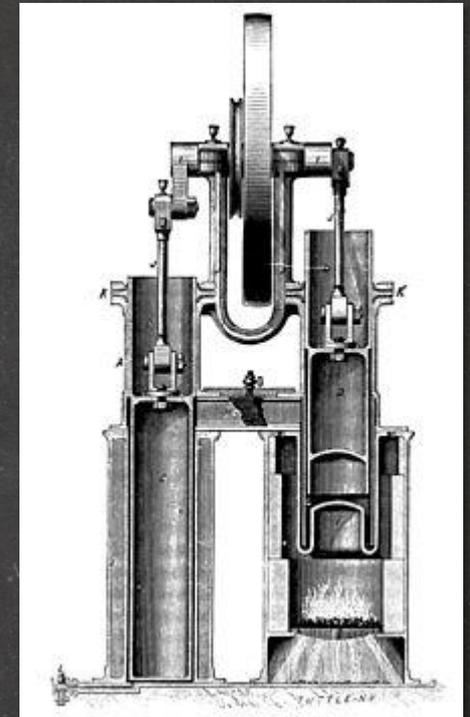
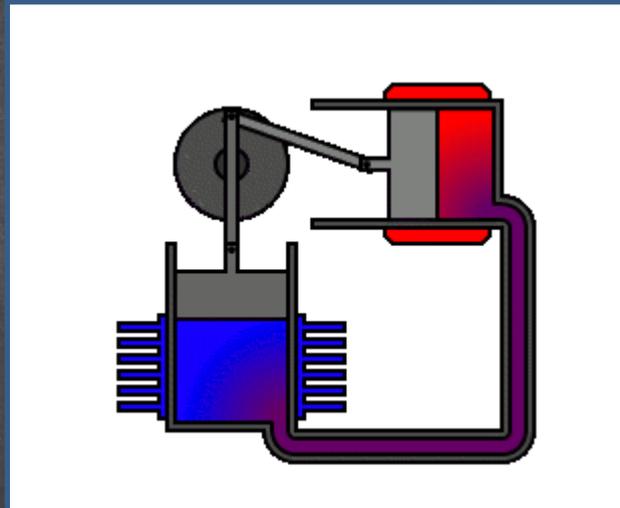
Invariance = Lois de
conservations

unités

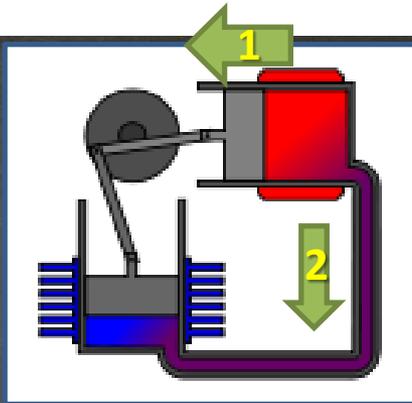
- Unité de l'énergie:
 - ✓ Le Joule (J) = travail d'une force d'un Newton sur 1 mètre
 - ✓ Le Calorie (C) = énergie pour élever d'1 degré un gramme d'eau
 - ✓ Le kilocalorie = 1000 calories (appelé Calorie par les nutritionnistes)
- Puissance:
 - ✓ Énergie par seconde en Watt (W) = 1 Joule par seconde
- Unité dérivée
 - ✓ Le watt-heure (Wh) ou le kilowattheure (kWh)

Le moteur de Stirling

- Production d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique.

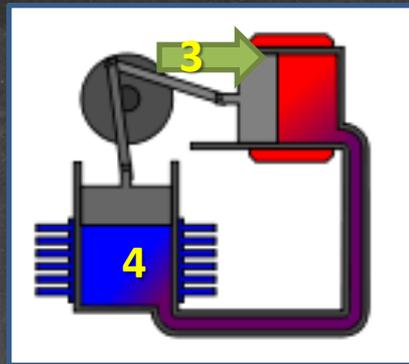


Moteur de Stirling



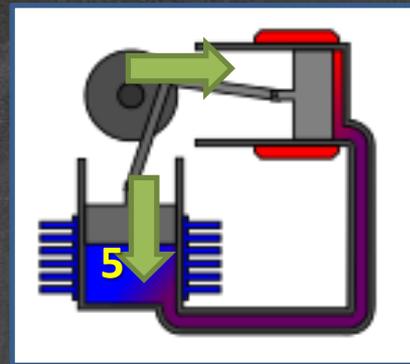
(1) Le gaz de travail, chauffé au contact des parois du **cylindre chaud**, tend à occuper plus de place et repousse le **piston chaud** au fond de sa course (vers la gauche). (2) Lorsqu'il est arrivé en butée, l'expansion du gaz se poursuit en direction du **cylindre froid** et repousse le **piston froid** (vers le haut). Ces mouvements sont transmis à la roue.

Chauffage isochore
(V constant)



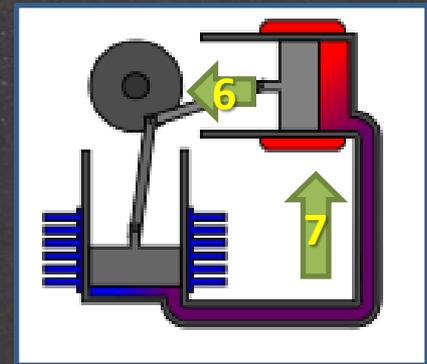
Le gaz est maintenant à son volume maximal. (3) La roue transmet son mouvement au **piston chaud** (vers la droite), (4) ce qui envoie la plus grande partie du gaz vers le **cylindre froid**, où il va se refroidir.

Détente isotherme
(T constant)



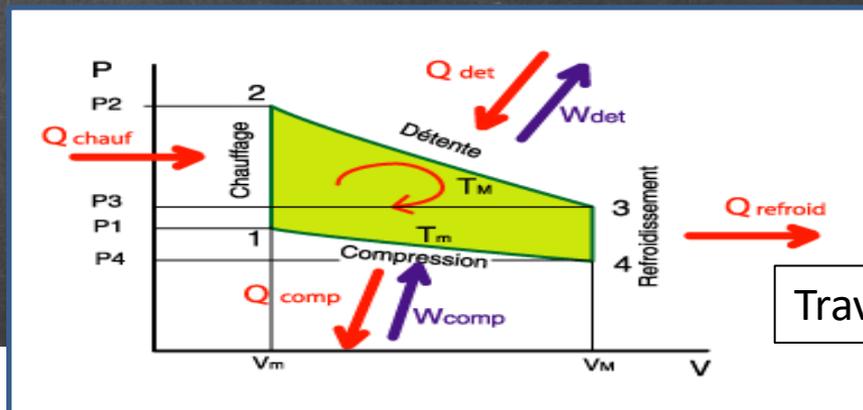
(5) Presque tout le gaz est maintenant dans le **cylindre froid** et le refroidissement du gaz continue. La pression du gaz est à son minimum. Il se contracte et le **piston froid** redescend.

Refroidissement
isochore
(V constant)



(6) Le gaz est maintenant à son volume minimum et le **piston chaud** est tiré vers la gauche par la roue et les transmissions. (7) Le gaz est ainsi aspiré dans le **cylindre chaud**. Comme il se réchauffe, son volume augmente et le cycle recommence.

Compression
isotherme
(T constant)

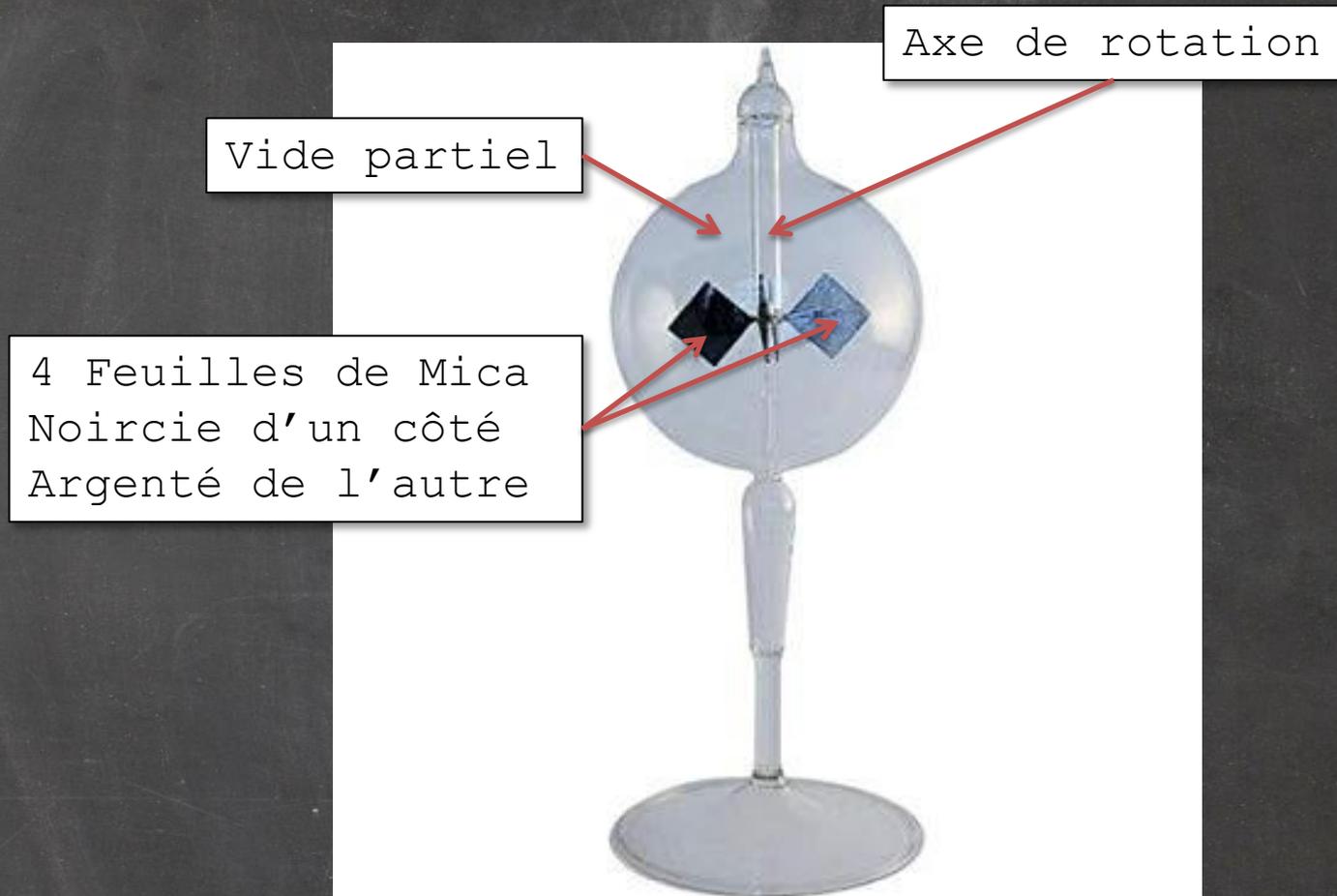


$$\text{Travail fourni} = W_{\text{det}} - W_{\text{comp}}$$

Le moteur de Stirling

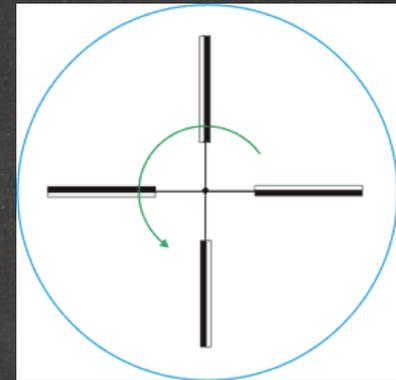
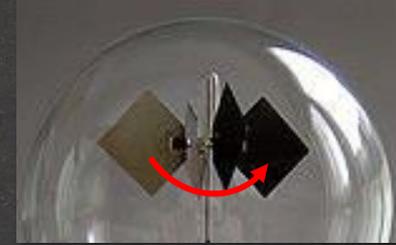
- Production d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique.
 - ✓ Pas d'explosion, silencieux, pas de vibration
 - ✓ Pas d'échange de gaz avec l'extérieur
 - ✓ Fonctionne avec n'importe quelle source de chaleur
 - ✓ Faible rendement (30% max), peu réactif, conception délicate

Le radiomètre de Crookes (1873)

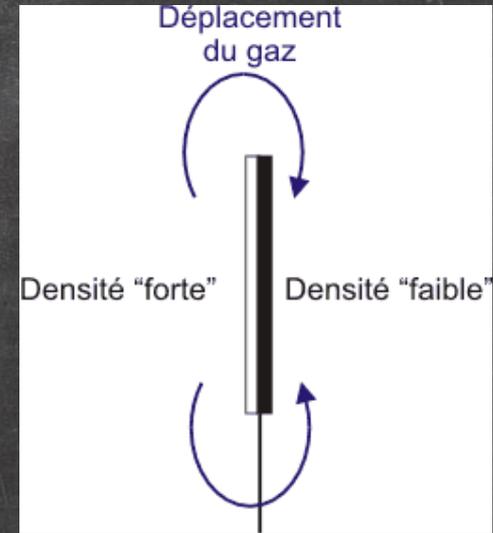
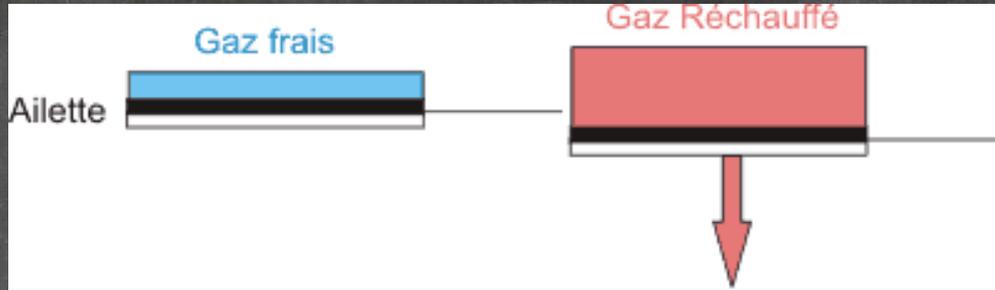


Explications concurrentes

- L'observation dépend de la pression
 - ✓ À pression atmosphérique (100 000 Pa):
 - rien ne tourne
 - ✓ À faible pression (100 Pa)
 - La face sombre « pousse » en présence de certaines sources (soleil, certaines lampes, fer à repasser, etc.)
 - ✓ À très faible pression (1 Pa)
 - Le phénomène cesse
 - ✓ Avec un vide poussé
 - Les ailettes tournent dans l'autre sens



À faible pression:

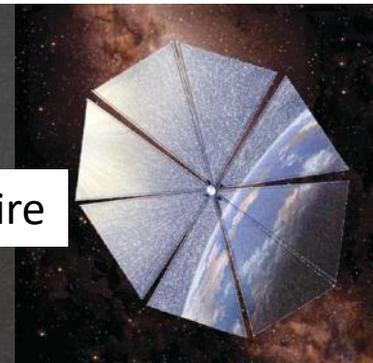


À pression quasi nulle

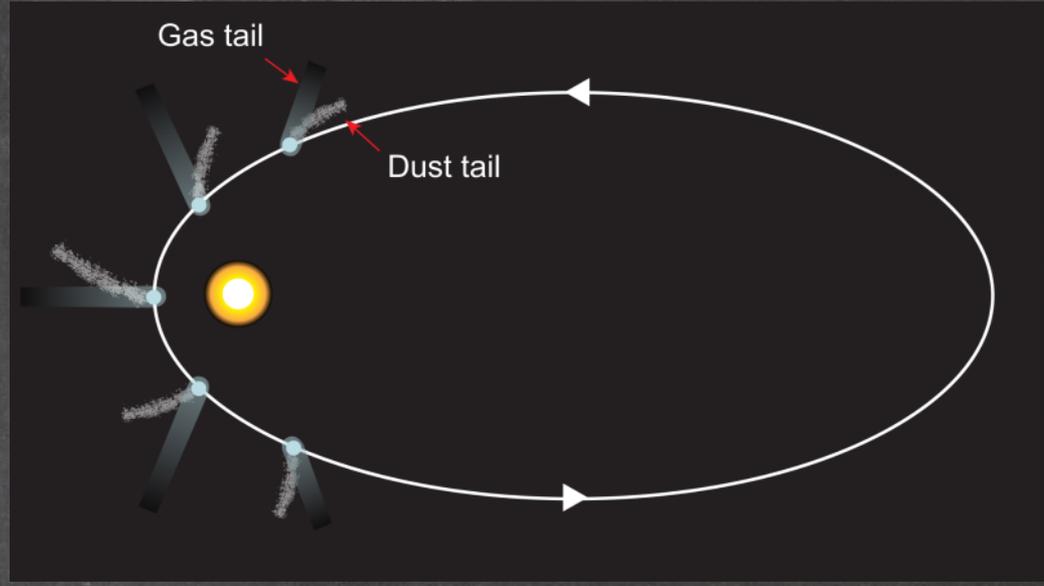
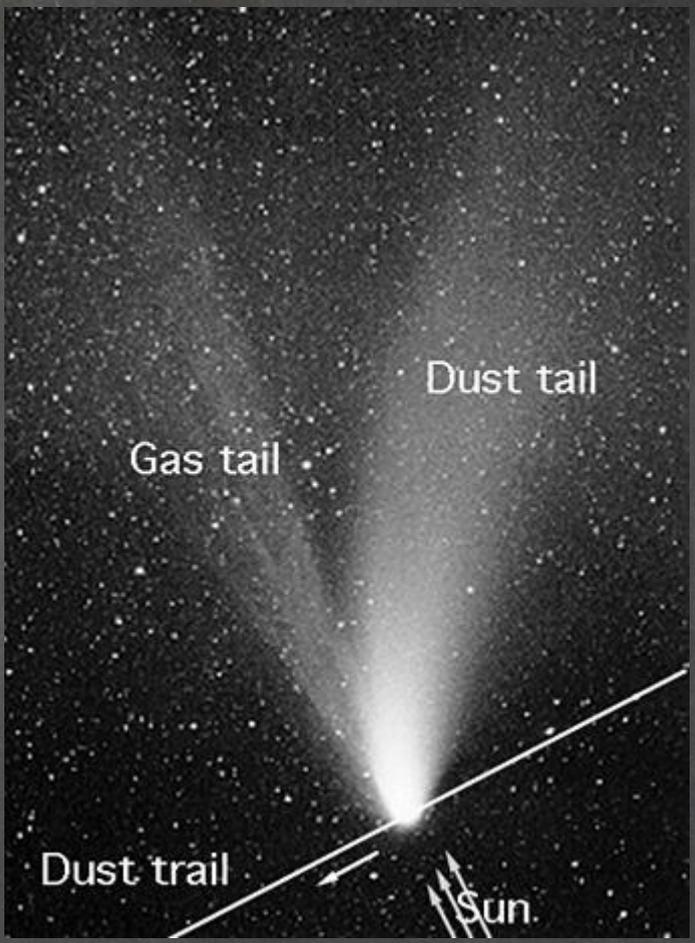
Pression de radiation de la lumière

$$p = \frac{h}{v \cdot c}$$

Vent solaire



La queue des comètes et la pression de radiation - ou vent solaire (dans le vide)



Par Юкатан — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=49018539>

L'énergie dans le langage commun

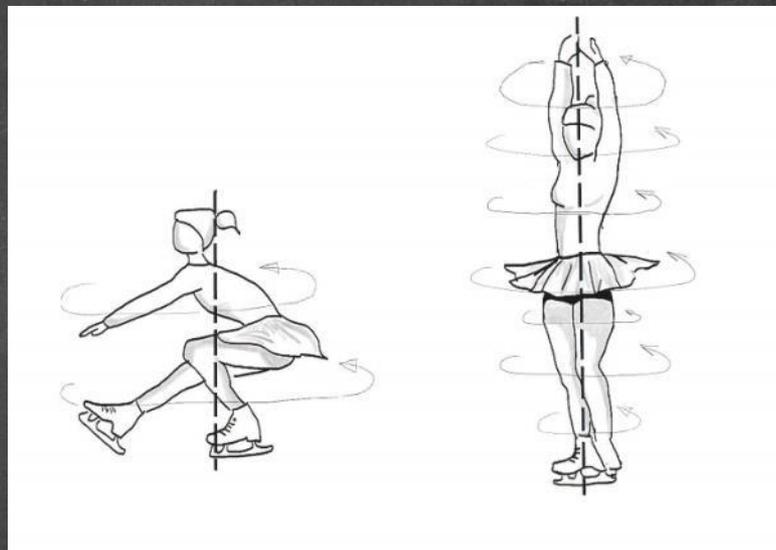
- Sens courant
- Sens dans d'autres disciplines
 - ✓ philosophie
 - ✓ Économie
 - ✓ Nutrition
 - ✓ Spiritualité
 - ✓ Ésotérisme
 - ✓ Médecines alternatives
 - Force vitale
 - Médecine douce ?
 - Médecine naturelle ?
 - Homéopathie
 - dosage 1CH (Centésimale Hahnemanniène) = 1/100
 - 12 CH = 10^{-24}
 - Au delà de 9 CH = moins d'une molécule
- Effet physique supposé mais aucun lien avec la moindre théorie physique ou chimique
- Ce qui est affirmé sans preuve peut être rejeté sans preuve.
 - ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=wtJwVZGuiOY>
- Aspect humain essentiel

Médecine alternatives

<http://www.charlatans.info/questionnaire.shtml>

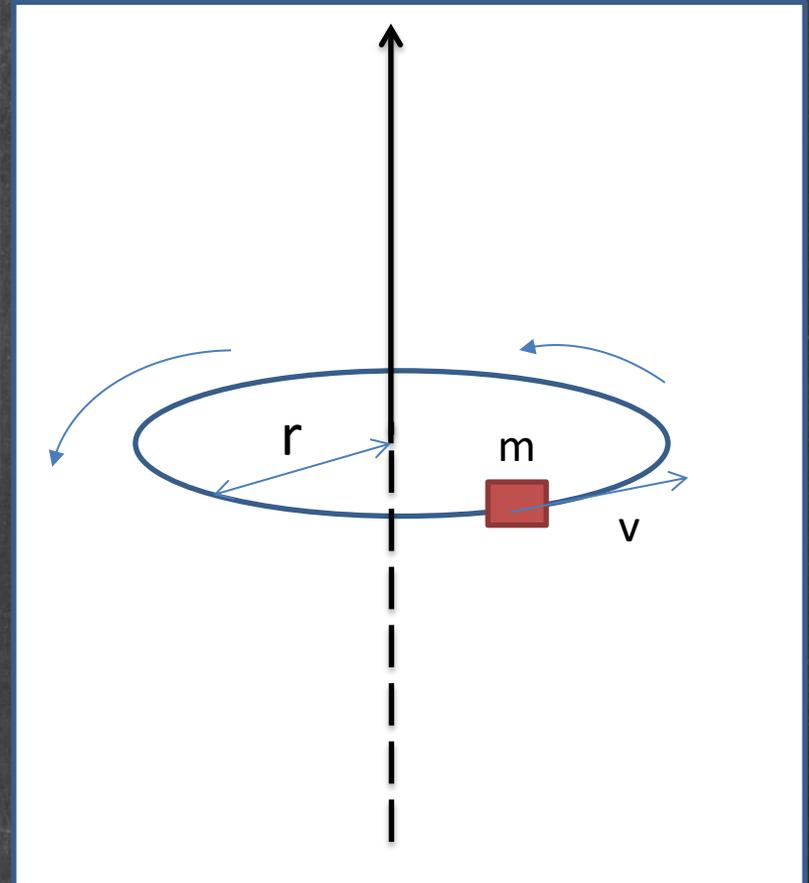
- Y a-t-il un "inventeur" ? Et est-il le seul à détenir les preuves de l'efficacité de cette thérapie ?
- Est-ce que la thérapie prétend couvrir l'ensemble des maladies ?
- Cette thérapie ou cette "science" existe-telle depuis des millénaires ? Et malgré tout, elle n'a toujours pas fait ses preuves ou reste controversée ?
- Est-elle est très populaire ailleurs, dans d'autres pays que le nôtre ?
- Prétend-t-on qu'il y a un complot pour prévenir son utilisation ? Que la thérapie est tellement efficace qu'elle mettrait ipso facto les médecins au chômage ?
- Dit-on pouvoir faire des diagnostics, mais attention : "énergétiques" et non pas conventionnels ?
- Est-ce qu'on vous dit que si vous avez le cancer, c'est parce vous l'avez voulu ou mérité ?
- La théorie remet-elle en question d'autres sciences comme la biologie, la physique ou la chimie ?
- Est-ce qu'on compare le fondateur à Galilée ?
- Est-ce que la thérapie en question est ancienne et ne s'est à peu près pas modifiée depuis des siècles ?

Le moment cinétique



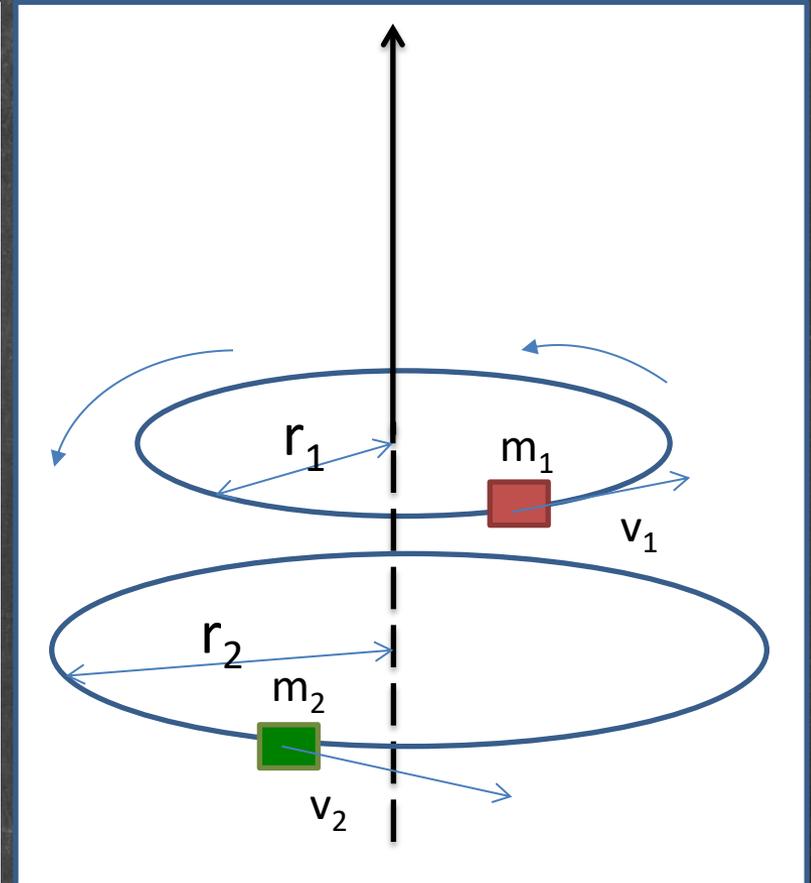
Le moment cinétique

- Quantité de mouvement
 - ✓ $p = m \cdot v$
- Rayon de rotation
 - ✓ r
- Moment cinétique L
 - ✓ $L = r \times p = r \times m \times v$



Le moment cinétique

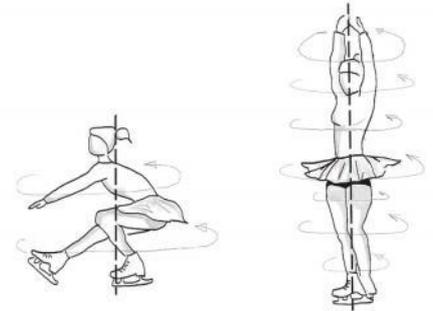
- Quantité de mouvement
 - ✓ $p = m \cdot v$
- Rayon de rotation
 - ✓ r
- Moment cinétique L
 - ✓ $L = r \times p = r \times m \times v$
- Le moment cinétique est additif
 - ✓ $L_1 = r_1 \times m_1 \times v_1$
 - ✓ $L_2 = r_2 \times m_2 \times v_2$
 - ✓ $L_{\text{total}} = L_1 + L_2$



Chaise tournante

- La chaise tournante
 - ✓ <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/transcoded/1/18/BehoudImpulsmoment.ogv/BehoudImpulsmoment.ogv.240p.vp9.webm>
- Patinage
 - ✓ <https://www.youtube.com/watch?v=HMUT1fPYbas>

$$\text{Constante} = L = r \times p =$$



- Durée du jour
 - ✓ 24 heures aujourd'hui
 - ✓ ~ 23 heures il y a 100 millions d'années !
 - - 2 millisecondes par siècle
 - ✓ Faible dissipation d'énergie (marées)

Date	Période géologique	Nombre de jours par an ¹¹	Durée du jour ¹²
+ ??? millions d'années	Future	350	25 heures
Présent	Actuelle	365	24 heures
- 100 millions d'années	Jurassique	380	23 heures
- 200 millions d'années	Permien	390	22,5 heures
- 300 millions d'années	Carbonifère	400	22 heures
- 400 millions d'années	Silurien	410	21,5 heures
- 500 millions d'années	Cambrien	425	20,5 heures
- 1200 millions d'années	Sténien	493,2	17,7 heures
- 2500 millions d'années	Archéen	714	12,3 heures
- 4500 millions d'années (âge de la Terre)	Hadéen	1434	6,1 heures

Physique et représentation du réel

- Réalisme
 - ✓ le monde décrit par la science est le monde « réel » ou « véritable ».
 - ✓ l'existence et la constitution du monde sont indépendantes des théories scientifiques.
- Antiréalisme
 - ✓ (empiriste, positivistes, constructivistes)
 - ✓ Les théories de la physique sont au choix des fictions, des constructions logiques ou des éléments d'un processus intellectuel d'appréhension du monde.

Fin

Dernier cours la semaine prochaine:
Est-ce si simple ?

Ma Bohême (1870)

Je m'en allais, les poings dans mes poches crevées ;
Mon paletot aussi devenait idéal :
J'allais sous le ciel, Muse ! et j'étais ton féal ;
Oh ! là là ! que d'amours splendides j'ai rêvées !

Mon unique culotte avait un large trou.
- Petit-Poucet rêveur, j'égrenais dans ma course
Des rimes. Mon auberge était à la Grande-Ourse.
- Mes étoiles au ciel avaient un doux frou-frou

Et je les écoutais, assis au bord des routes,
Ces bons soirs de septembre où je sentais des gouttes
De rosée à mon front, comme un vin de vigueur ;

Où, rimant au milieu des ombres fantastiques,
Comme des lyres, je tirais les élastiques
De mes souliers blessés, un pied près de mon cœur !