

# Physique – mécanique & électromagnétisme

## Mise à niveau



Dr. Raphaël Butté

*Semestre du printemps 2025*

## *Mon parcours académique*

---

- Doctorat en physique, Université Claude Bernard, Lyon, France, 2000
- Postdoctorat, Université de Sheffield, Royaume-Uni, 2000-2003
- Postdoctorat (≡ Coll. scientifique non permanent) au Laboratoire en Semiconducteurs Avancées pour la Photonique et l'Électronique (LASPE), EPFL, 2004-2010
- Collaborateur scientifique permanent, LASPE, EPFL, 2010-2016
- Maître d'enseignement et de recherche (MER), LASPE, EPFL, 2016-présent

*Contact: CH A3 465, [raphael.butte@epfl.ch](mailto:raphael.butte@epfl.ch)*

## ***Mon parcours académique***

---

- Doctorat en physique, Université Claude Bernard, Lyon, France, 2000
- Postdoctorat, Université de Sheffield, Royaume-Uni, 2000-2003
- Postdoctorat (≡ Coll. scientifique non permanent) au Laboratoire en Semiconducteurs Avancées pour la Photonique et l’Électronique (LASPE), EPFL, 2004-2010
- Collaborateur scientifique permanent, LASPE, EPFL, 2010-2016
- Maître d’enseignement et de recherche (MER), LASPE, EPFL, 2016-présent

Recherche scientifique : étude des semiconducteurs III-V, nanostructures quantiques, propriétés optoélectroniques, nanophotoniques, interaction lumière-matière, physique des LEDs et (nano-)lasers

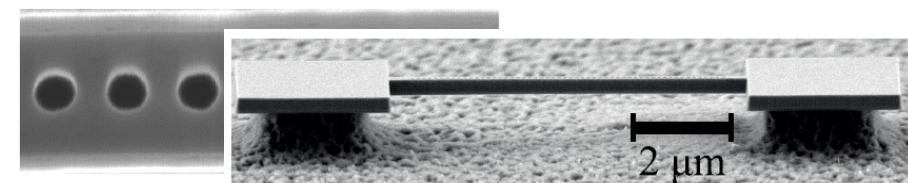
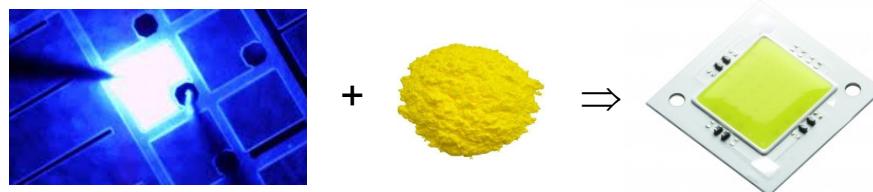
*Contact: CH A3 465, [raphael.butte@epfl.ch](mailto:raphael.butte@epfl.ch)*

## Mon parcours académique

---

- Doctorat en physique, Université Claude Bernard, Lyon, France, 2000
- Postdoctorat, Université de Sheffield, Royaume-Uni, 2000-2003
- Postdoctorat (≡ Coll. scientifique non permanent) au Laboratoire en Semiconducteurs Avancées pour la Photonique et l'Électronique (LASPE), EPFL, 2004-2010
- Collaborateur scientifique permanent, LASPE, EPFL, 2010-2016
- Maître d'enseignement et de recherche (MER), LASPE, EPFL, 2016-présent

Recherche scientifique : étude des semiconducteurs III-V, nanostructures quantiques, propriétés optoélectroniques, nanophotoniques, interaction lumière-matière, physique des LEDs et (nano-)lasers



Contact: CH A3 465, [raphael.butte@epfl.ch](mailto:raphael.butte@epfl.ch)

## ***Structure du cours***

---

- 28 leçons de 2 périodes
- 14 sessions d'exercices de 2 périodes
- Site web : <https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15842> (PREPA-033)
- Thématiques du semestre

## ***Structure du cours***

---

- 28 leçons de 2 périodes
- 14 sessions d'exercices de 2 périodes
- Site web : <https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15842> (PREPA-033)
- Thématiques du semestre

1. Introduction
2. Mouvement dans le plan
3. Dynamique
4. Énergie
5. Oscillateur harmonique
6. Rotation à deux dimensions

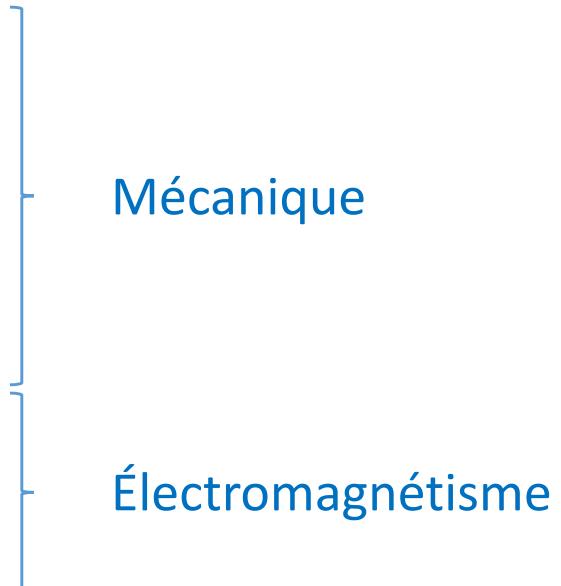


## ***Structure du cours***

---

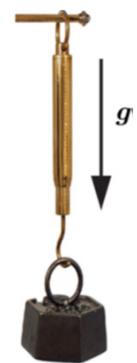
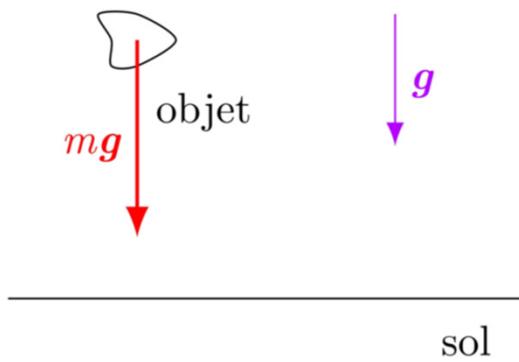
- 28 leçons de 2 périodes
- 14 sessions d'exercices de 2 périodes
- Site web : <https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15842> (PREPA-033)
- Thématiques du semestre

1. Introduction
2. Mouvement dans le plan
3. Dynamique
4. Énergie
5. Oscillateur harmonique
6. Rotation à deux dimensions
7. Électrostatique
8. Circuits à courant continu
9. Induction magnétique



## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

---

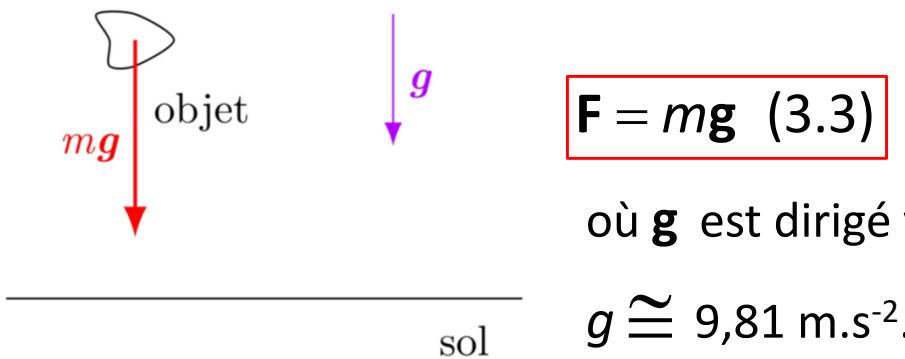


Exemple :

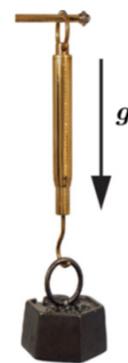
Remarques :

## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

Près de la surface de la terre, le champ de gravitation a une norme  $g = \frac{GM}{r^2}$  qui est quasiment constante (car  $r \approx$  cste). Dans ce cas, la force de la gravitation est appelée le poids.



où  $\mathbf{g}$  est dirigé vers le centre de la terre et  $\|\mathbf{g}\| = g \approx 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .

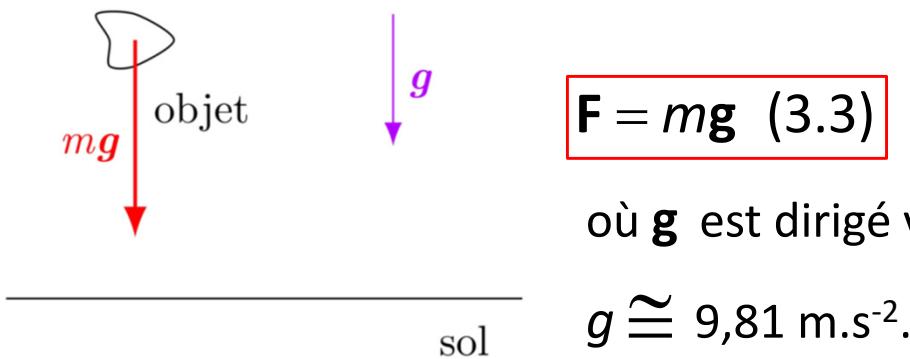


Exemple :

Remarques :

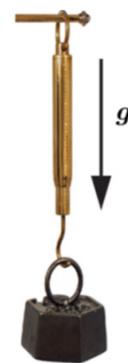
## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

Près de la surface de la terre, le champ de gravitation a une norme  $g = \frac{GM}{r^2}$  qui est quasiment constante (car  $r \approx$  cste). Dans ce cas, la force de la gravitation est appelée le poids.



$$\mathbf{F} = mg \quad (3.3)$$

où  $\mathbf{g}$  est dirigé vers le centre de la terre et  $\|\mathbf{g}\| = g \approx 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .



### Exemple :

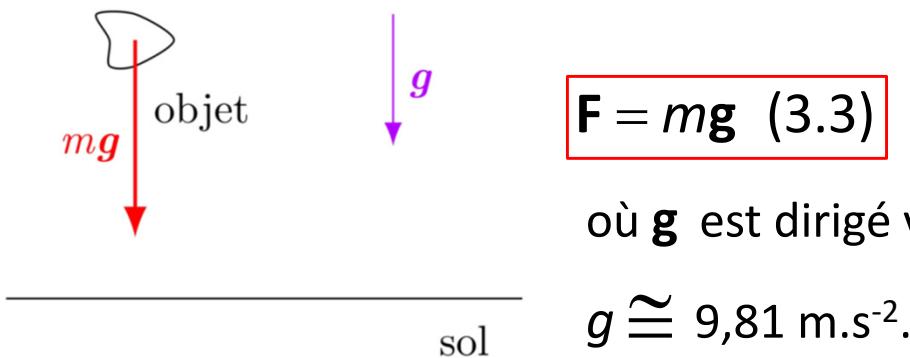
Objet en chute libre. Dans ce cas, la seule force que subit l'objet est son propre poids.

Alors,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a} \Rightarrow mg = m\mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{a}(t) = \mathbf{g} \quad \forall t$ .

### Remarques :

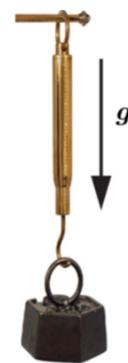
## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

Près de la surface de la terre, le champ de gravitation a une norme  $g = \frac{GM}{r^2}$  qui est quasiment constante (car  $r \approx$  cste). Dans ce cas, la force de la gravitation est appelée le poids.



$$\mathbf{F} = mg \quad (3.3)$$

où  $\mathbf{g}$  est dirigé vers le centre de la terre et  $\|\mathbf{g}\| = g \approx 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ .



### Exemple :

Objet en chute libre. Dans ce cas, la seule force que subit l'objet est son propre poids.

Alors,  $\mathbf{F} = m\mathbf{a} \Rightarrow mg = m\mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{a}(t) = \mathbf{g} \quad \forall t$ .

### Remarques :

- L'accélération est constante et égale à  $\mathbf{g}$  (MUA).
- L'accélération est indépendante de la masse  $m$ .

## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

---

Expérience :



## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

---

Expérience : Chute libre de Galilée (Torricelli)



## Structure des slides : 3.3.1 Forces à distance

Expérience : Chute libre de Galilée (Torricelli)



1. Lorsqu'on fait le vide dans l'enceinte, l'accélération de la bille est la même que celle de la plume :  $a = g$
2. Dans l'air, la force de frottement a pour effet de freiner davantage la plume. Les accélérations ne sont pas les mêmes.



## ***But de la physique et objectifs du cours***

---

But de la physique

Objectifs du cours

# ***But de la physique et objectifs du cours***

---

## **But de la physique**

Comprendre et décrire les phénomènes naturels par des lois aussi générales que possible et permettant d'établir des prédictions.

## **Objectifs du cours**

# ***But de la physique et objectifs du cours***

---

## **But de la physique**

Comprendre et décrire les phénomènes naturels par des lois aussi générales que possible et permettant d'établir des prédictions.

## **Objectifs du cours**

- Modéliser conceptuellement un système physique
- Transcrire mathématiquement le modèle physique
- Développer un savoir-faire via la résolution de différents problèmes
- Adopter une approche systématique (et raisonnée)
- Maîtriser les outils mathématiques dans le contexte de la physique
- Apprendre à déterminer les limites des modèles et des théories

## *Illustration : cas de la chute libre*

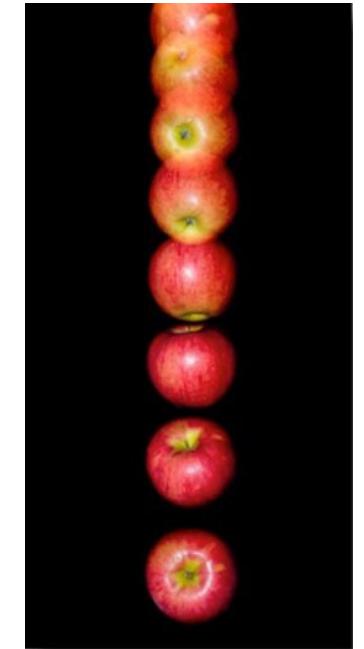
---

Observation #1 :

Observation #2 :

Loi :

Observation #3 :



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

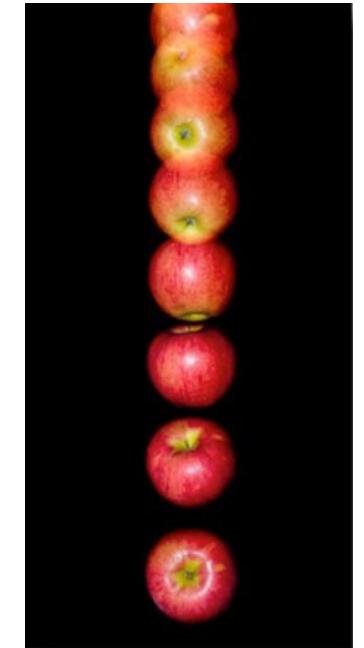
Observation #1 :

Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

Observation #2 :

Loi :

Observation #3 :



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

### Observation #1 :

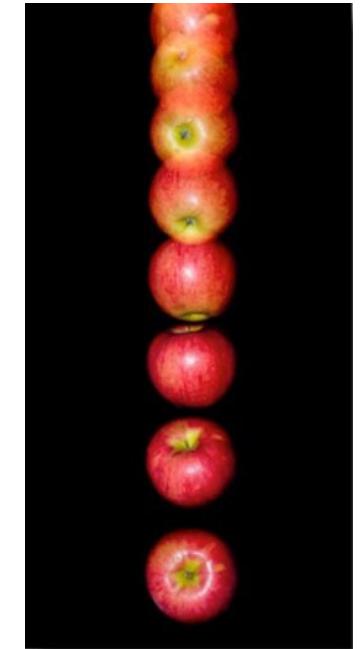
Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

### Observation #2 :

Lorsqu'on lâche deux objets (deux pommes), ils tombent de manière similaire.

Loi :

### Observation #3 :



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

### **Observation #1 :**

Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

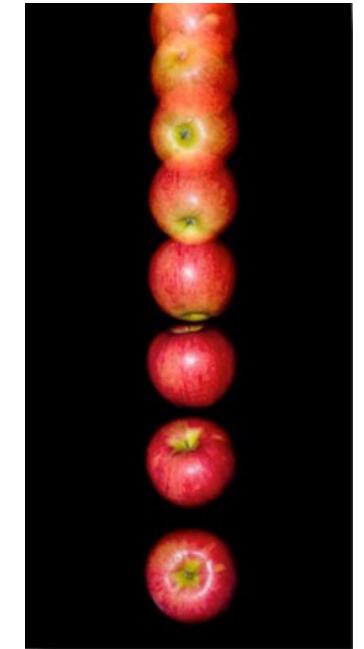
### **Observation #2 :**

Lorsqu'on lâche deux objets (deux pommes), ils tombent de manière similaire.

### **Loi :**

Tout objet tombe de manière similaire (mouvement de chute libre similaire).

### **Observation #3 :**



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

### **Observation #1 :**

Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

### **Observation #2 :**

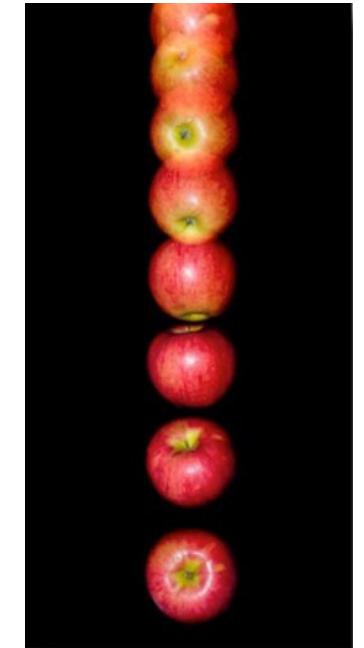
Lorsqu'on lâche deux objets (deux pommes), ils tombent de manière similaire.

### **Loi :**

Tout objet tombe de manière similaire (mouvement de chute libre similaire).

### **Observation #3 :**

Lorsqu'on lâche une pomme et une plume, celles-ci ne tombent pas de la même manière.



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

### **Observation #1 :**

Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

### **Observation #2 :**

Lorsqu'on lâche deux objets (deux pommes), ils tombent de manière similaire.

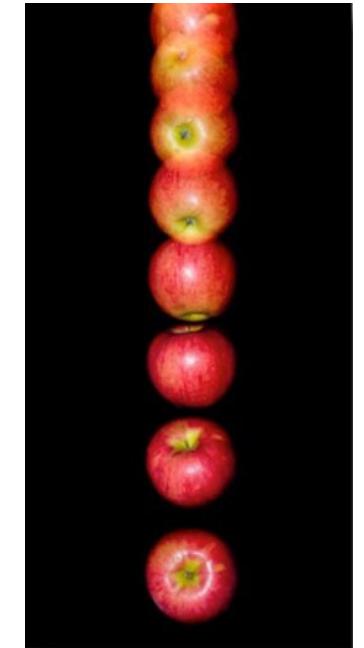
### **Loi :**

Tout objet tombe de manière similaire (mouvement de chute libre similaire).

### **Observation #3 :**

Lorsqu'on lâche une pomme et une plume, celles-ci ne tombent pas de la même manière.

1. On rejette la loi édictée précédemment comme étant fausse.



## *Illustration : cas de la chute libre*

---

### **Observation #1 :**

Lorsqu'on lâche un objet tel qu'une pomme, il tombe.

### **Observation #2 :**

Lorsqu'on lâche deux objets (deux pommes), ils tombent de manière similaire.

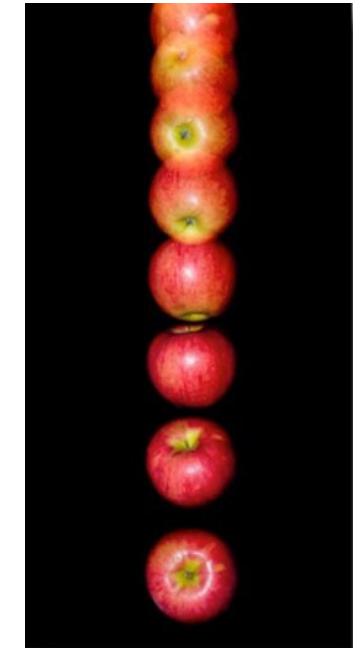
### **Loi :**

Tout objet tombe de manière similaire (mouvement de chute libre similaire).

### **Observation #3 :**

Lorsqu'on lâche une pomme et une plume, celles-ci ne tombent pas de la même manière.

1. On rejette la loi édictée précédemment comme étant fausse.
2. On complète la loi en incluant une cause supplémentaire (présence de frottements).



## *De l'importance de la physique expérimentale*

---

Citation de James Clerk Maxwell (père fondateur de l'électromagnétisme moderne)

## *De l'importance de la physique expérimentale*

---

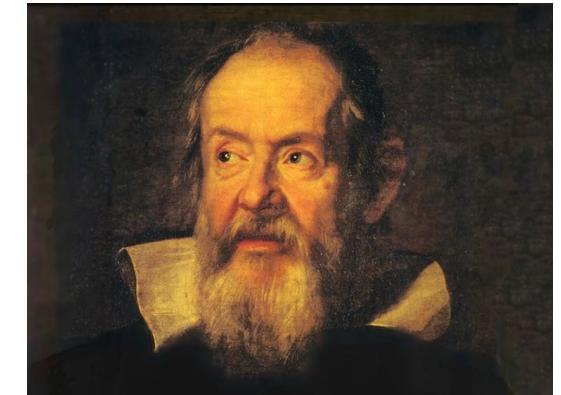
Citation de James Clerk Maxwell (père fondateur de l'électromagnétisme moderne)

« Je n'ai pas de raison de penser que l'intelligence humaine soit capable de conceptualiser les lois physiques en se basant uniquement sur ses propres ressources sans faire appel aux résultats expérimentaux.

De telles tentatives se sont toujours soldées par des théories artificielles et pleines de contradictions. »

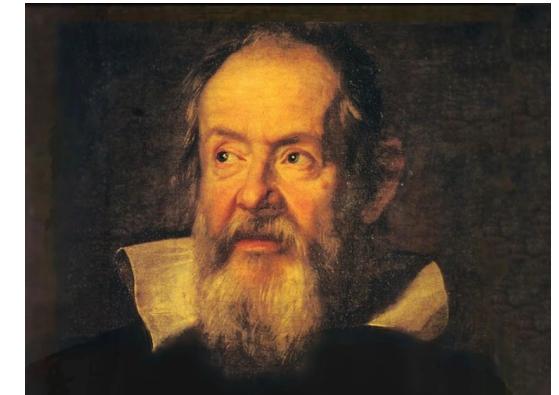
## *Expérience : chute libre de Galilée (réalisée par Torricelli)*

---



## *Expérience : chute libre de Galilée (réalisée par Torricelli)*

---

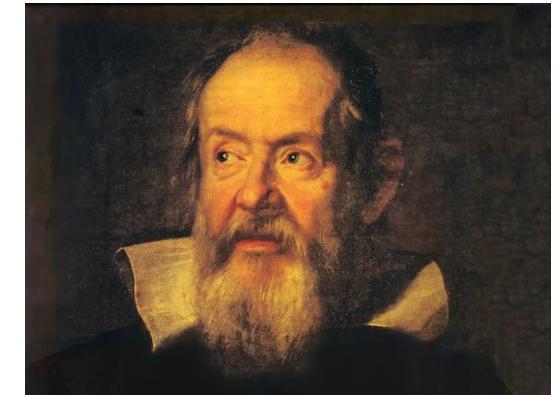


1. Lorsqu'on fait le vide dans l'enceinte (i.e., en l'absence de frottement), le mouvement de chute libre de la bille en acier est le même que celui de la plume (i.e., les deux corps subissent la même accélération).



## *Expérience : chute libre de Galilée (réalisée par Torricelli)*

---



1. Lorsqu'on fait le vide dans l'enceinte (i.e., en l'absence de frottement), le mouvement de chute libre de la bille en acier est le même que celui de la plume (i.e., les deux corps subissent la même accélération).
2. Dans l'air, c'est-à-dire en présence de frottement, le mouvement de chute libre de la plume est plus fortement freiné que celui de la bille en acier.



## *Expérience : amortissement par frottement interne*

---



## ***Expérience : amortissement par frottement interne***

---

1. On tord les deux ressorts de manière identique autour de leur axe de symétrie.



## ***Expérience : amortissement par frottement interne***

---

1. On tord les deux ressorts de manière identique autour de leur axe de symétrie.

2. L'œuf cuit oscille en torsion avec très peu d'amortissement.



## ***Expérience : amortissement par frottement interne***

---

1. On tord les deux ressorts de manière identique autour de leur axe de symétrie.

2. L'œuf cuit oscille en torsion avec très peu d'amortissement.

3. L'œuf cru a un mouvement d'oscillation en torsion fortement amorti dû au frottement interne généré par son intérieur liquide.



## *Expérience : mouvement chaotique (double pendule)*

---



## ***Expérience : mouvement chaotique (double pendule)***

---

1. On lâche les deux pendules au même moment depuis une position quasiment identique.



## ***Expérience : mouvement chaotique (double pendule)***

---

1. On lâche les deux pendules au même moment depuis une position quasiment identique.

2. Malgré la similarité des conditions initiales, le mouvement de chaque pendule n'est pas corrélé dans le temps. On parle de mouvement chaotique (effet papillon, etc.).



## ***Expérience : mouvement chaotique (double pendule)***

---

1. On lâche les deux pendules au même moment depuis une position quasiment identique.

2. Malgré la similarité des conditions initiales, le mouvement de chaque pendule n'est pas corrélé dans le temps. On parle de mouvement chaotique (effet papillon, etc.).

3. Le comportement chaotique est à la base de nombreux systèmes naturels, tels que la météo ou le climat, etc.



## *Expérience : chute libre et rotation (problème du cabestan)*

---



## ***Expérience : chute libre et rotation (problème du cabestan)***

---

1. Un objet (ici un verre à pied) positionné à la verticale à une certaine hauteur  $h$  par rapport au sol est relié par une corde inextensible à une masselotte qui forme un angle droit avec la verticale ( $\alpha = -\pi/2$ ). À l'instant  $t = 0$ , le verre se trouve non loin de l'axe de rotation de la masselotte.



## ***Expérience : chute libre et rotation (problème du cabestan)***

---

1. Un objet (ici un verre à pied) positionné à la verticale à une certaine hauteur  $h$  par rapport au sol est relié par une corde inextensible à une masselotte qui forme un angle droit avec la verticale ( $\alpha = -\pi/2$ ). À l'instant  $t = 0$ , le verre se trouve non loin de l'axe de rotation de la masselotte.
2. On lâche la masselotte sans vitesse initiale ce qui entraîne la chute libre du verre positionné à la verticale. La masselotte effectue un mouvement de rotation en spirale autour de l'axe (le rayon  $R(t)$  est une fonction du temps et dans un premier temps, il diminue à un taux dicté par la chute libre du verre).



## ***Expérience : chute libre et rotation (problème du cabestan)***

---

1. Un objet (ici un verre à pied) positionné à la verticale à une certaine hauteur  $h$  par rapport au sol est relié par une corde inextensible à une masselotte qui forme un angle droit avec la verticale ( $\alpha = -\pi/2$ ). À l'instant  $t = 0$ , le verre se trouve non loin de l'axe de rotation de la masselotte.
2. On lâche la masselotte sans vitesse initiale ce qui entraîne la chute libre du verre positionné à la verticale. La masselotte effectue un mouvement de rotation en spirale autour de l'axe (le rayon  $R(t)$  est une fonction du temps et dans un premier temps, il diminue à un taux dicté par la chute libre du verre).
3. La masselotte s'enroule autour de l'axe de rotation en gagnant constamment en vitesse de rotation et la corde finit par bloquer abruptement la chute verticale du verre avant qu'il n'atteigne le sol en raison des forces de frottement. La masselotte poursuit son mouvement de rotation et s'enroule autour de l'axe jusqu'à son arrêt complet.



## *Expérience : toupie magnétique qui lévite*

---



## *Expérience : toupie magnétique qui lévite*

---

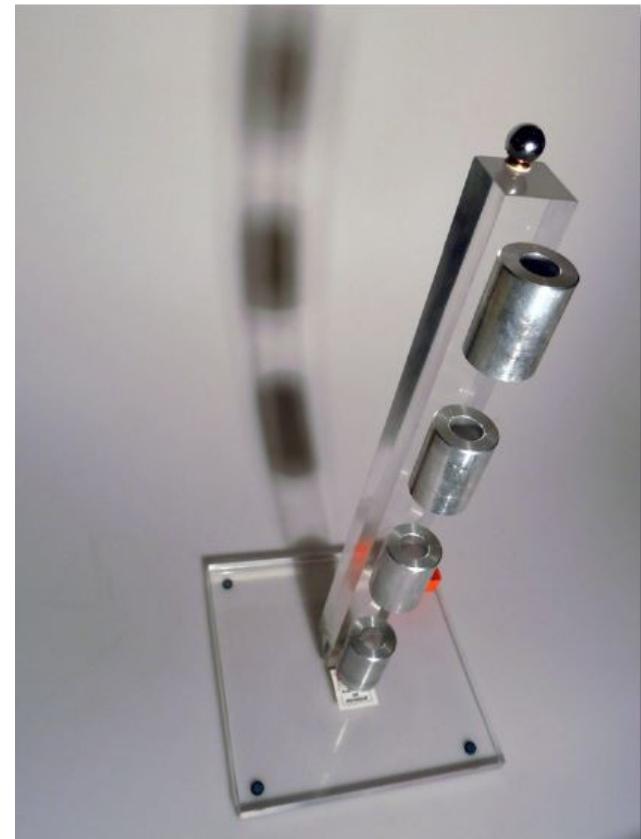


La toupie est un aimant qui, lorsqu'il est en rotation au-dessus d'un autre aimant de polarité opposée, est soumis à une force magnétique répulsive.

Cette force magnétique répulsive compense son poids et permet ainsi à la toupie de léviter!

## *Expérience : freinage d'une bille par un courant induit*

---

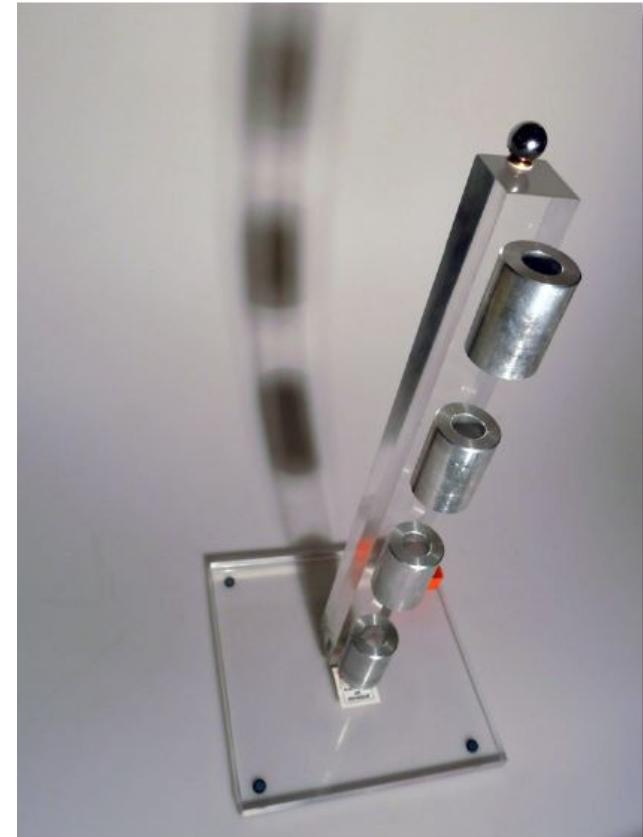


## *Expérience : freinage d'une bille par un courant induit*

---

On laisse tomber une bille magnétique dans une succession de tubes en aluminium (un conducteur non magnétique).

Les courants induits dans les tubes génèrent des forces magnétiques (induction électromagnétique) qui freinent la chute de la bille.



## *Loi physique, rôle des mathématiques*

---

## *Loi physique, rôle des mathématiques*

---

- Grandeur physique : propriété physique qui peut être observée et mesurée (observable).
- Observation : expérience de recueil d'informations sur un phénomène physique.
- Mesure : comparaison avec une référence (utilisation du système international d'unités (SI)).
- Loi : règle en accord avec l'observation permettant la prédiction d'autres observations. Elle peut être exprimée comme une relation mathématique entre des grandeurs physiques.
- Mathématiques : langage universel de la physique. Elles sont basées sur la non-contradiction (ensemble de truismes).

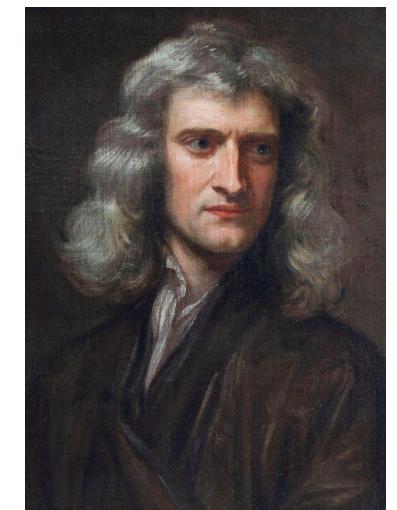
## *Illustration simple du lien entre physique et mathématiques*

---

Cas de la chute libre :



Deuxième loi de Newton :



## *Illustration simple du lien entre physique et mathématiques*

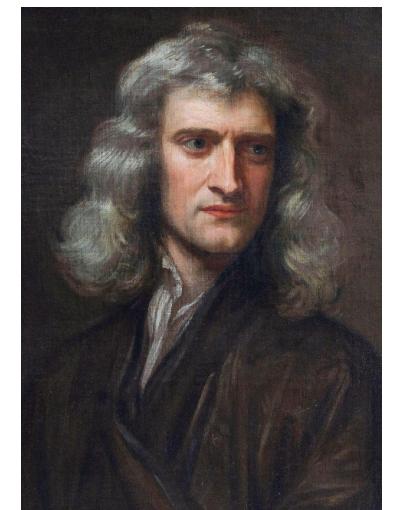
---

### **Cas de la chute libre :**

- Hauteur de chute : observable «  $h$  » exprimée en [m]
- Temps de chute : observable «  $t$  » exprimée en [s]
- Loi de la cinématique :



### **Deuxième loi de Newton :**



# Illustration simple du lien entre physique et mathématiques

## Cas de la chute libre :

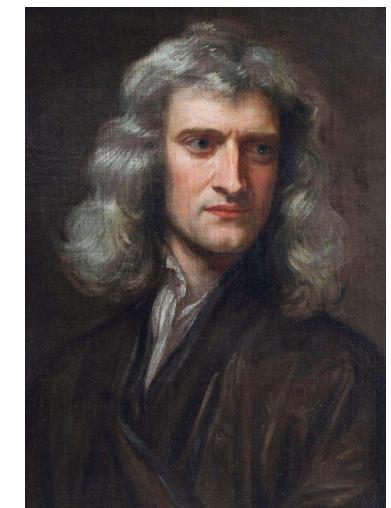
- Hauteur de chute : observable «  $h$  » exprimée en [m]
- Temps de chute : observable «  $t$  » exprimée en [s]
- Loi de la cinématique :

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ où } g = \text{constante (1.1)}$$

$$\Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.2) \text{ et } g = \frac{2h}{t^2} \quad (1.3)$$



## Deuxième loi de Newton :



# Illustration simple du lien entre physique et mathématiques

## Cas de la chute libre :

- Hauteur de chute : observable «  $h$  » exprimée en [m]
- Temps de chute : observable «  $t$  » exprimée en [s]
- Loi de la cinématique :

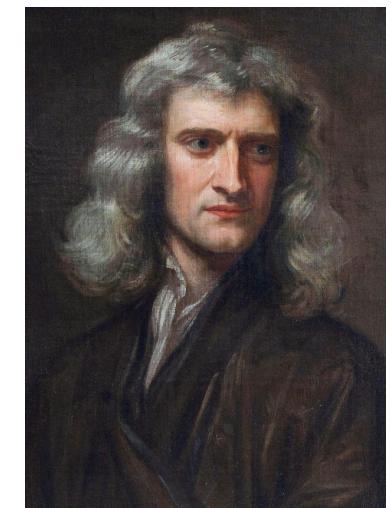
$$h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ où } g = \text{constante (1.1)}$$

$$\Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.2) \text{ et } g = \frac{2h}{t^2} \quad (1.3)$$



## Deuxième loi de Newton :

- Masse : observable «  $m$  » exprimée en [kg]
- Accélération : observable «  $a$  » exprimée en [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
- Force : observable «  $F$  » exprimée en [ $\text{kg.m.s}^{-2}$ ]



# Illustration simple du lien entre physique et mathématiques

## Cas de la chute libre :

- Hauteur de chute : observable «  $h$  » exprimée en [m]
- Temps de chute : observable «  $t$  » exprimée en [s]
- Loi de la cinématique :

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \text{ où } g = \text{constante (1.1)}$$

$$\Rightarrow t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1.2) \text{ et } g = \frac{2h}{t^2} \quad (1.3)$$

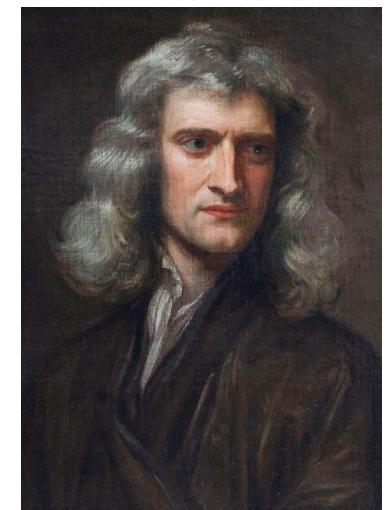


## Deuxième loi de Newton :

- Masse : observable «  $m$  » exprimée en [kg]
- Accélération : observable «  $\mathbf{a}$  » exprimée en [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
- Force : observable «  $\mathbf{F}$  » exprimée en [ $\text{kg.m.s}^{-2}$ ]

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.4)$$

$$\Rightarrow \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (1.5)$$



## *Recommandations*

---

## ***Recommandations***

---

- La physique cherche à décrire la réalité. Utilisez votre sens de l'observation, votre intuition et surtout votre bon sens.
- La physique est une modélisation mathématique de phénomènes naturels. Travaillez avec constance et rigueur. Veillez attentivement aux notations et à leurs significations (vecteurs avec flèche (ou **en gras**) et scalaires sans flèche). Veillez également à la cohérence des unités physiques (bon usage du système SI). Apprenez bien les définitions.
- Les séances d'exercices permettent d'illustrer le cours (mise en pratique des concepts). Résoudre les exercices par soi-même est essentiel pour bien comprendre le cours, se préparer à l'examen et donc se mettre à niveau!