



Introduction au cours de physique

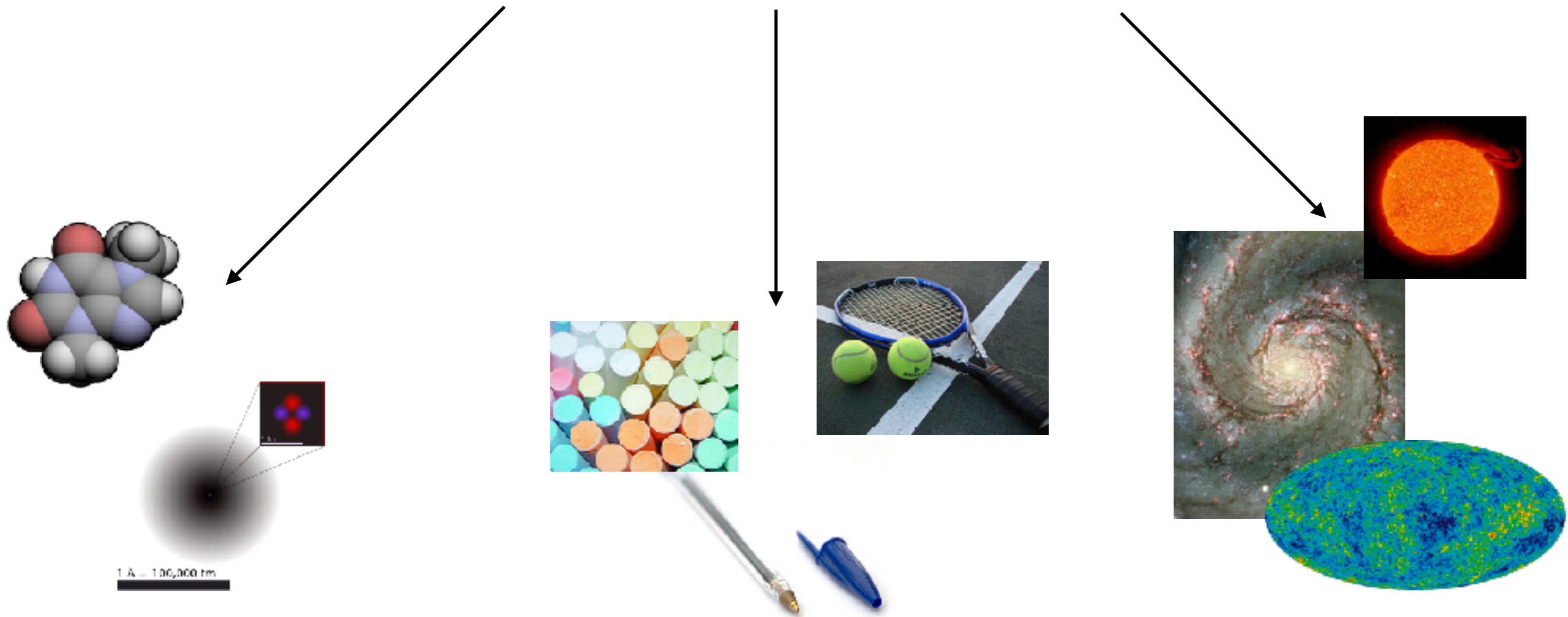
Physique PCSI1 — François Crépin

Qu'est-ce que la physique ?

Qu'est-ce que la physique ?

Physique

Science qui étudie les **phénomènes naturels** résultant des **interactions** entre **objets matériels**



**Interaction
électromagnétique**

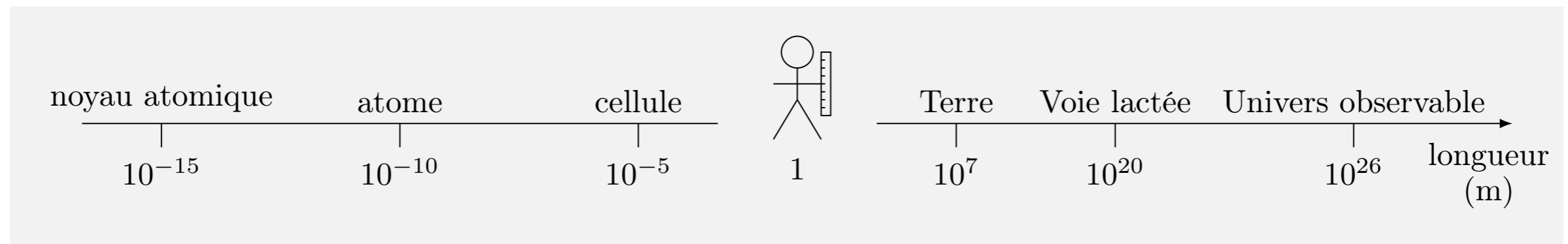
**Interaction
gravitationnelle**

Qu'est-ce que la physique ?

Physique

Science qui étudie les **phénomènes naturels** résultant des **interactions** entre **objets matériels**

40 ordres de grandeurs



Infiniment petit

Infiniment grand

Qu'est-ce que la physique ?

Lois, modèles, théories

Exemple du développement de la **théorie de la dynamique newtonienne**

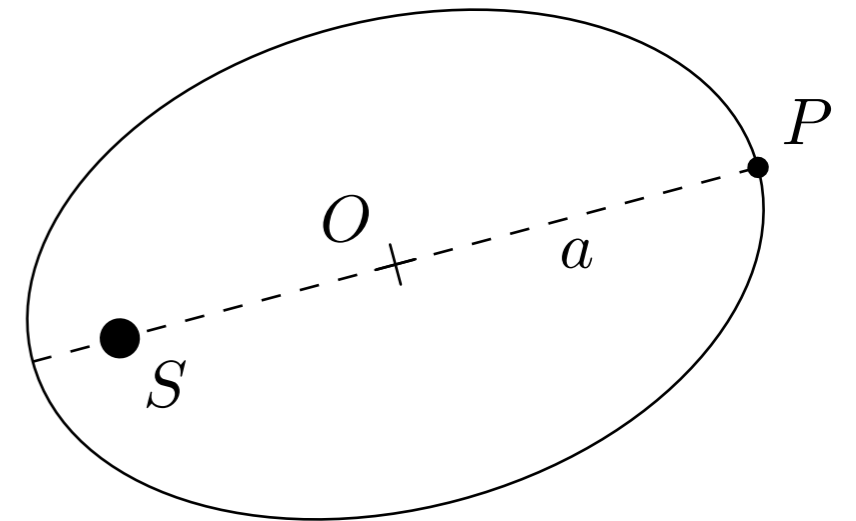
Première étape : observations expérimentales rigoureuses !



Galilée : chute des corps



GALILEO
GALILEI
(1564 – 1642) :



*Tycho Brahe : mouvement
des planètes*

Qu'est-ce que la physique ?

Lois, modèles, théories

Exemple du développement de la **théorie de la dynamique newtonienne**

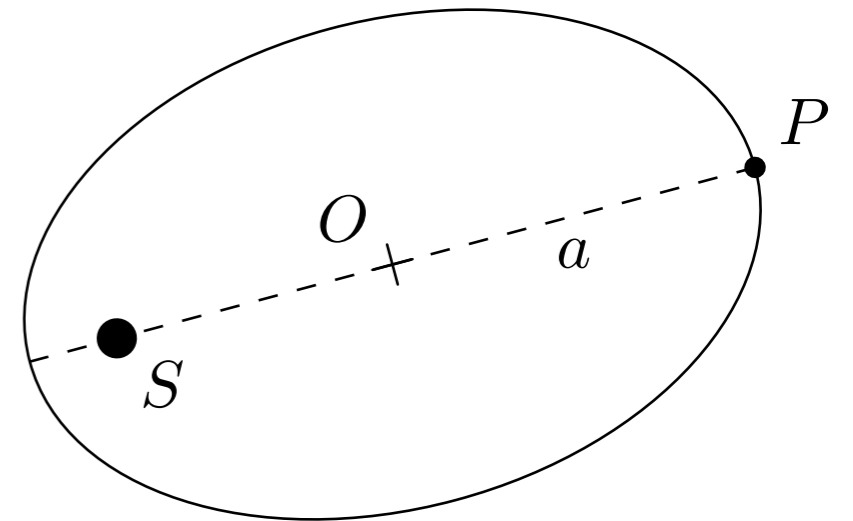
Deuxième étape : lois reliant des quantités physiques (équations)



Galilée : chute des corps



GALILEO
GALILEI
(1564 – 1642) :

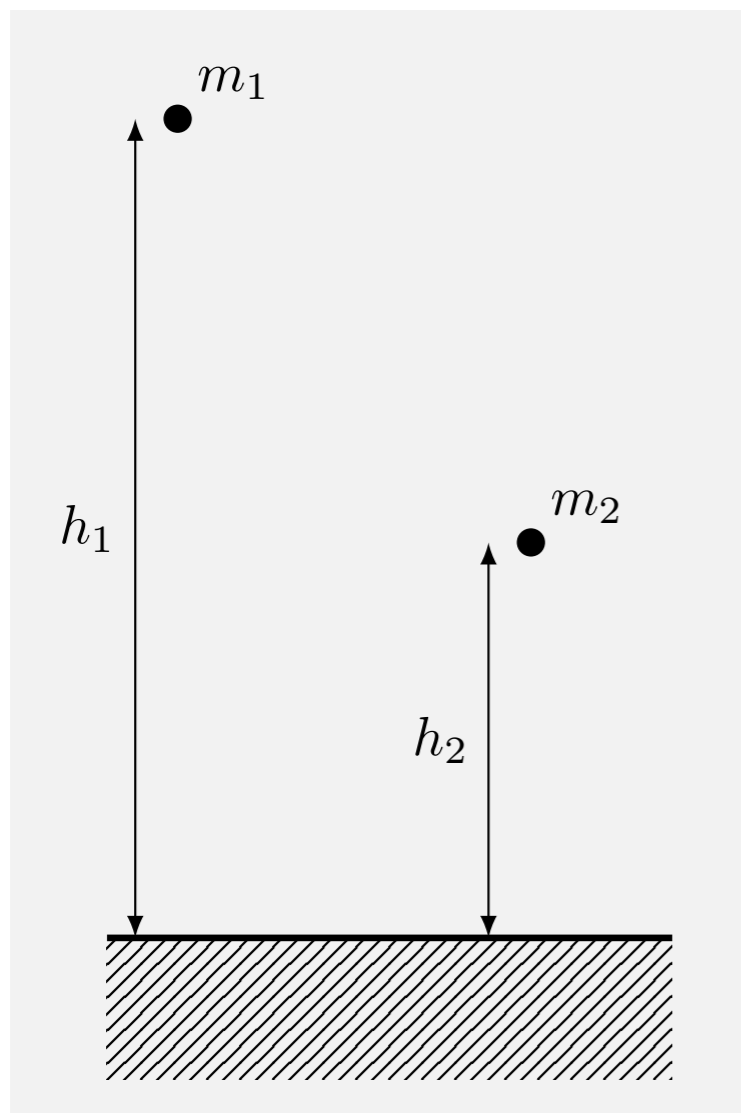


*Tycho Brahe : mouvement
des planètes*

Qu'est-ce que la physique ?

Deuxième étape : lois reliant des quantités physiques (équations)

Galilée : chute des corps



On mesure le temps de chute τ d'un objet de masse m lâché depuis une hauteur h de la surface de la Terre.

τ est indépendant de m .

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} .$$

Qu'est-ce que la physique ?

Deuxième étape : lois reliant des quantités physiques (équations)

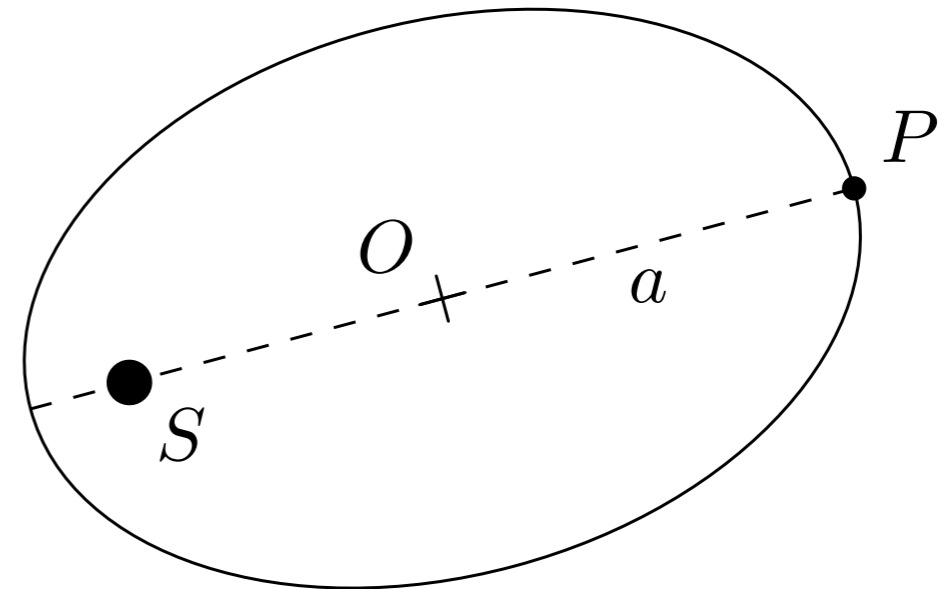
*Tycho Brahe : mouvement
des planètes*

Données brutes, très précises



Trois lois de Kepler (1609, 1618)

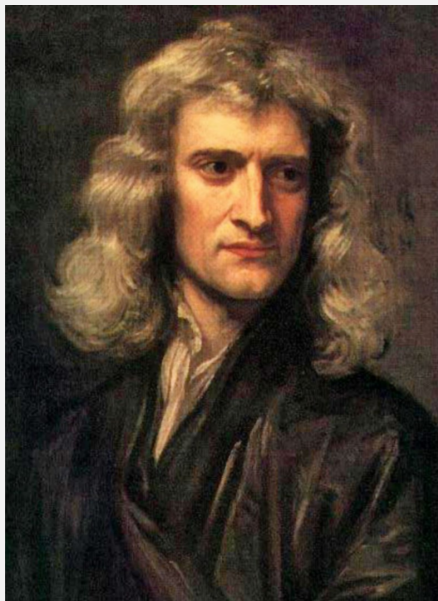
- Les planètes du système solaire décrivent des **trajectoires elliptiques** dont le Soleil occupe l'un des foyers
- Loi des aires
- Le carré de la période de révolution d'une planète est proportionnel au cube du demi-grand axe de l'ellipse parcourue



$$\frac{\mathcal{T}^2}{a^3} = k$$

Qu'est-ce que la physique ?

Troisième étape : découvrir les **principes** expliquant toutes les lois observées



ISAAC
NEWTON
(1643 – 1727) :

Principia (1687)

*Principes mathématiques de
la philosophie naturelle*

**Principe fondamental
de la dynamique (PFD)**

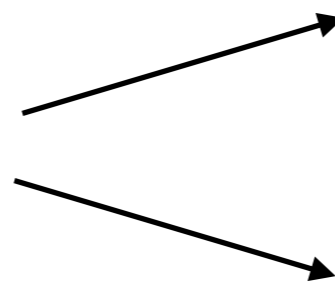
$$m \vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{ext}}$$

+

Gravitation universelle

$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}_{AB}$$

**Théorie de la dynamique
newtonienne**



Chute des corps

Mouvement des planètes

Qu'est-ce que la physique ?

Troisième étape : découvrir les **principes** expliquant toutes les lois observées

**Principe fondamental
de la dynamique (PFD)**

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{ext}}$$

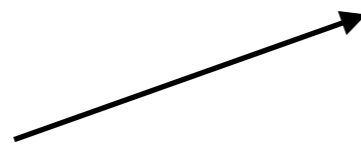
+

Gravitation universelle

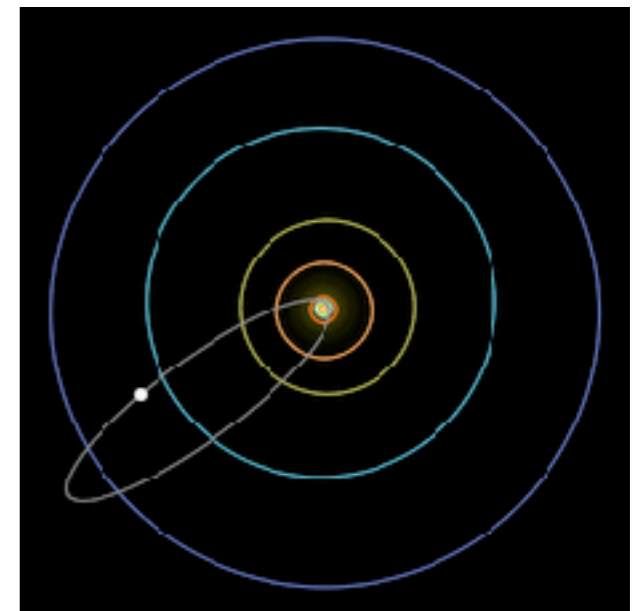
$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}_{AB}$$



Prédictions ?



Retour de la comète de
Halley (1682 —> 1759)



Qu'est-ce que la physique ?

Troisième étape : découvrir les **principes** expliquant toutes les lois observées

**Principe fondamental
de la dynamique (PFD)**

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{ext}}$$

+

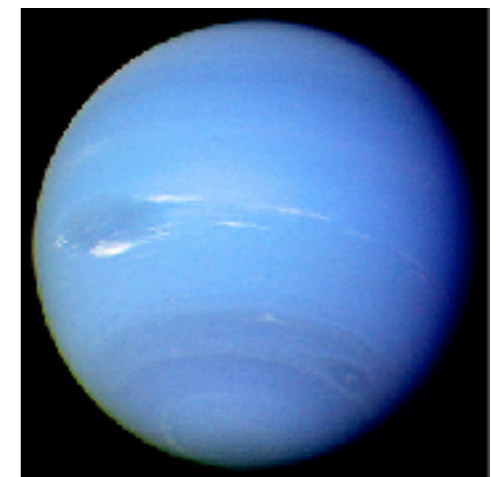
Gravitation universelle

$$\vec{F}_{A/B} = -G \frac{m_A m_B}{r^2} \vec{u}_{AB}$$

Prédictions ?

Retour de la comète de
Halley (1682 → 1759)

Existence de Neptune
(1846)



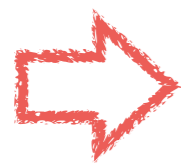
Qu'est-ce que la physique ?

Limites de la théorie

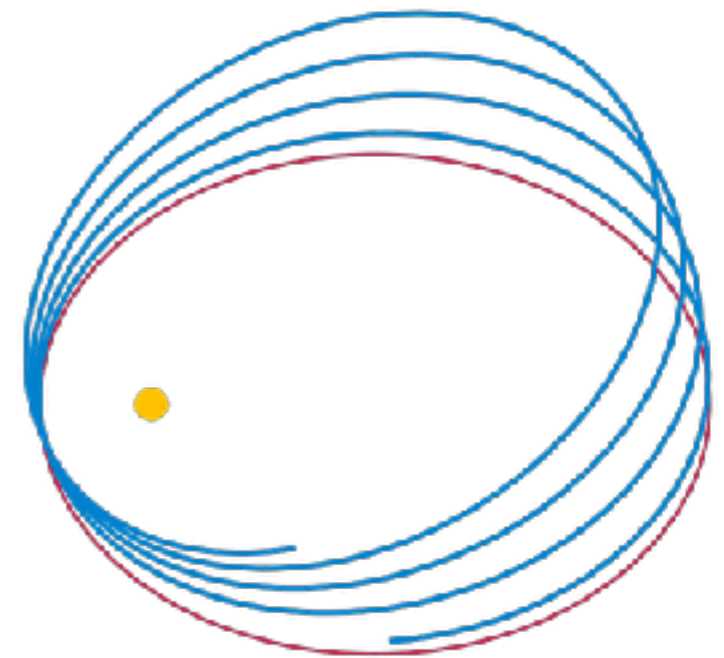
Il faut sans cesse **confronter** les **prédictions** de la théorie à l'**expérience**

La théorie de Newton **échoue** lorsque les vitesses deviennent comparables à celle de la lumière.

En particulier si le **champ gravitationnel devient trop intense** (par ex. au voisinage du soleil)



Théorie de la relativité générale (1915)



Précession du périhélie de Mercure (très exagérée)

Chaque théorie a un **domaine de validité.**

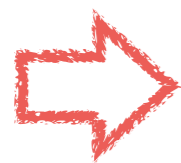
Qu'est-ce que la physique ?

Limites de la théorie

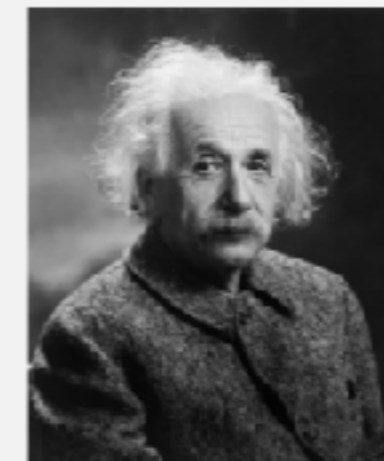
Il faut sans cesse **confronter** les **prédictions** de la théorie à l'**expérience**

La théorie de Newton **échoue** lorsque les vitesses deviennent comparables à celle de la lumière.

En particulier si le **champ gravitationnel devient trop intense** (par ex. au voisinage du soleil)



Théorie de la relativité générale (1915)



ALBERT
EINSTEIN
(1879 1955) :

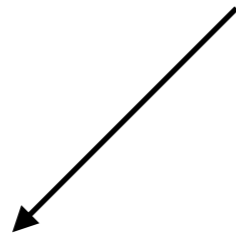
Chaque théorie a un **domaine de validité.**

Qu'est-ce que la physique ?

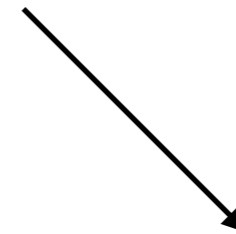
Théorie de la relativité générale

Basée sur des principes **complètement différents**.

Nouvelles prédictions **impossibles à imaginer** dans le cadre newtonien.



Déviation de la lumière
au voisinage des grandes
masses !



Trous noirs !

Qu'est-ce que la physique ?

Théorie de la relativité générale

→ Trous noirs (calcul en **1916**)

Trou noir au centre de la Voie Lactée
Sgr A* (1995)

Observations **indirectes**



Richard Genzel

Andrea Ghez

(Prix Nobel 2020)

Qu'est-ce que la physique ?

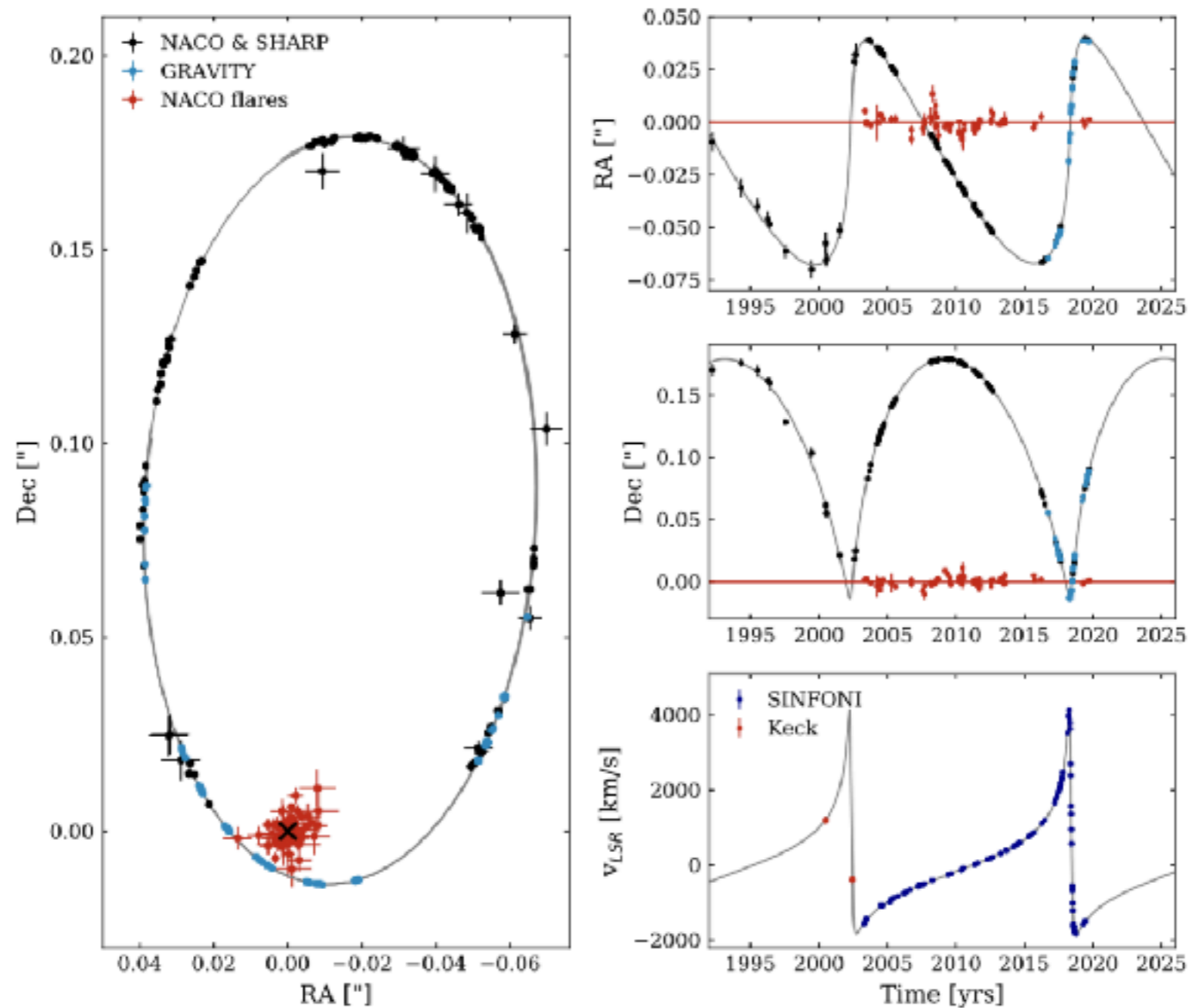


FIG. 1 – Relevés des positions de l'étoile S2. La croix \times représente la position de Sgr A*. Les coordonnées sont la déclinaison (Dec) et l'ascension droite (RA) exprimées en seconde d'arc ($''$), deux angles permettant de repérer la position de S2 dans le ciel, vue de la Terre. Une mesure indépendante de la distance entre la Terre et Sgr A* est nécessaire pour déterminer le demi-grand axe et la distance au périastre.

Qu'est-ce que la physique ?

Théorie de la relativité générale

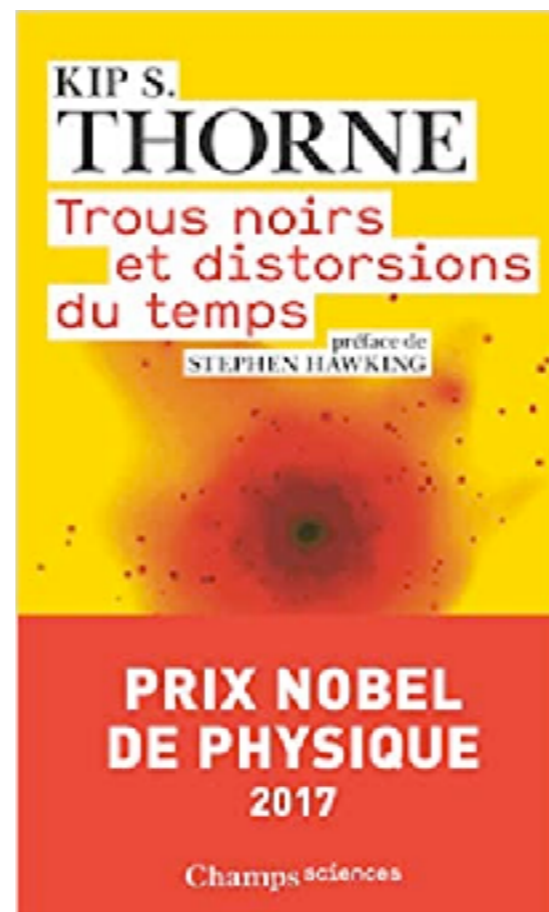
→ Trous noirs (calcul en **1916**)

Détections d'ondes gravitationnelles
(2015)

Observations **indirectes**



Interstellar (2014)



Kip Thorne

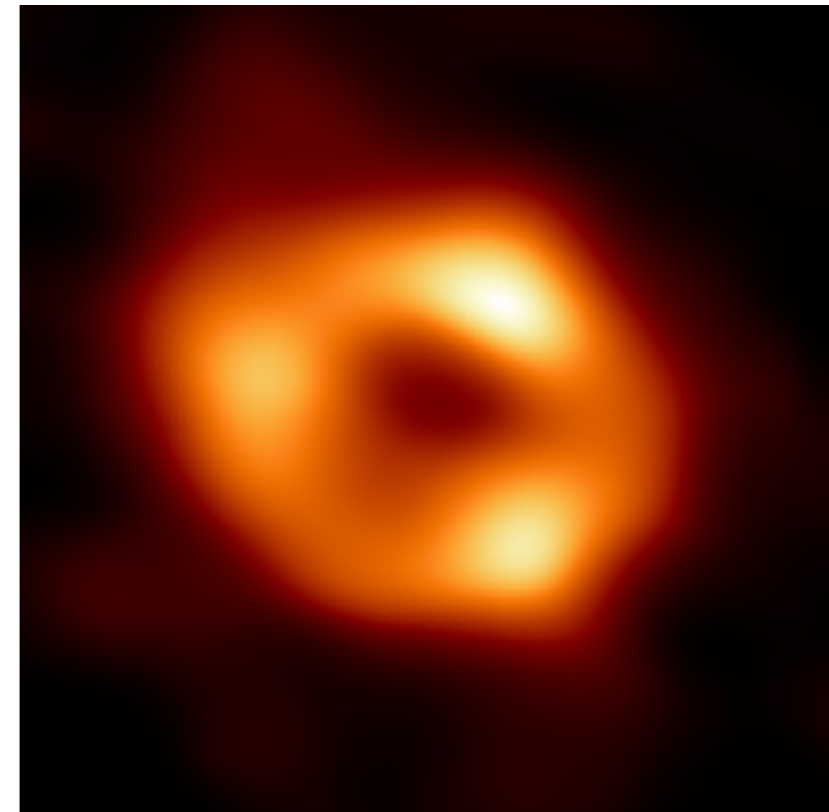
Qu'est-ce que la physique ?

Théorie de la relativité générale

→ Trous noirs (calcul en **1916**)

Observation **directe (2022)**

Event Horizon Telescope



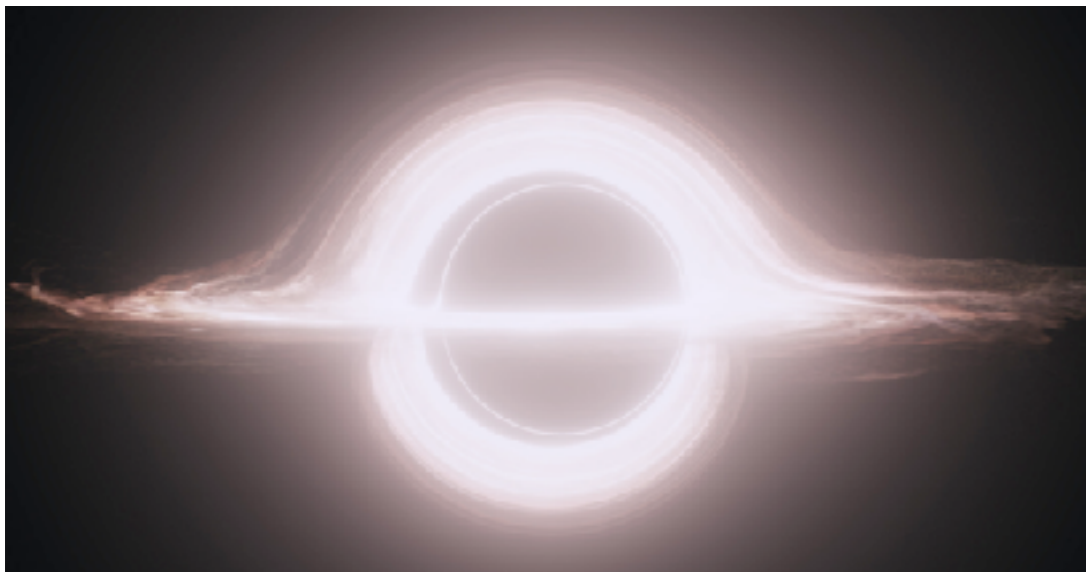
Sgr A* (55 millions années-lumières)

Qu'est-ce que la physique ?

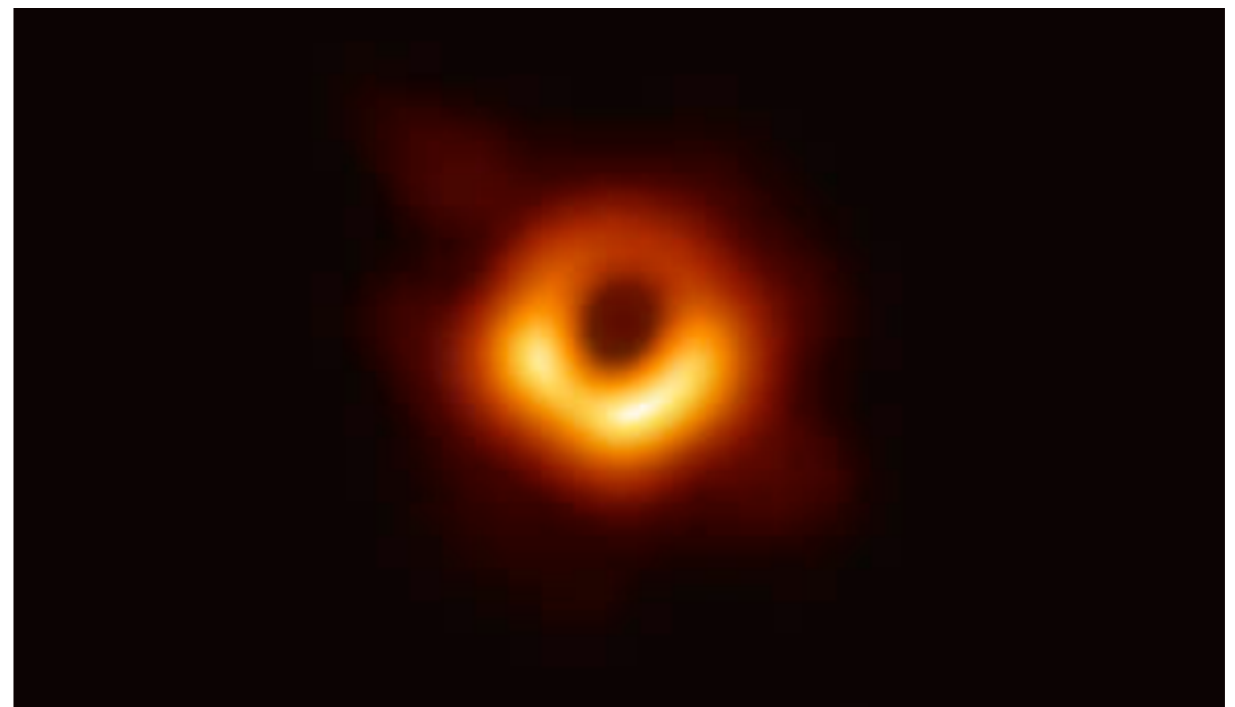
Théorie de la relativité générale

→ Trous noirs (calcul en **1916**)

Observation **directe** (2019)



Interstellar (2014)



M87 (55 millions années-lumières)

Dimensions et unités

Les 7 grandeurs de base du système international (SI)

Classe	Dimension (symbole)	Unité (symbole)
Grandeurs mécaniques	Longueur (L) Temps ou durée (T) Masse (M)	le mètre (m) la seconde (s) le kilogramme (kg)
Grandeurs thermodynamiques	Température (Θ , theta majuscule) Quantité de matière (N)	le kelvin (K) la mole (mol)
Grandeur électrique	Intensité du courant électrique (I)	l'ampère (A)
Grandeur lumineuse	Intensité lumineuse (J)	le candela (cd)

Les unités du SI et leurs définitions

Le système international d'unités est défini et maintenu par le **Bureau International des Poids et Mesures** (BIPM), organisme de recherche en **métrologie** basé à Sèvres et fondé en 1875 (Convention du mètre).



Pavillon Breteuil au parc de Saint-Cloud

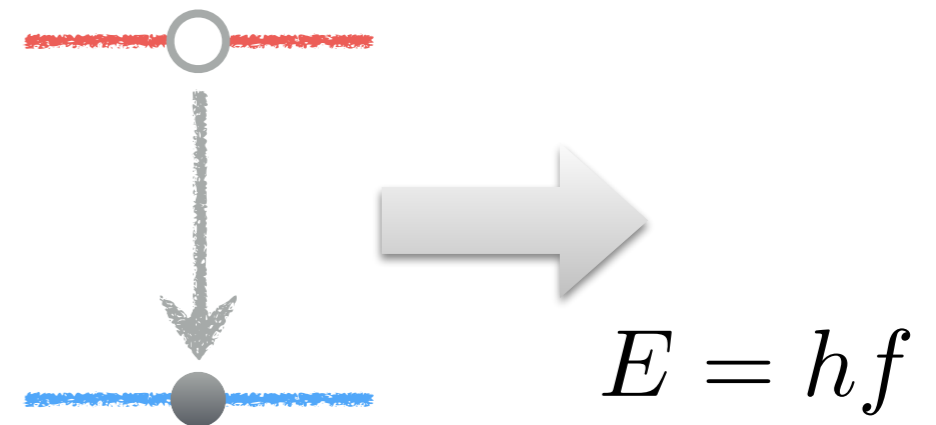


Tour d'horizon des définitions

Évolution de la définition de la seconde

1875 : La seconde est définie comme comme la fraction $1/86\,400$ du jour solaire moyen... mais la définition du jour solaire moyen n'est pas très précise !

1967-68 : La seconde est la durée de $9\,192\,631\,770$ périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.



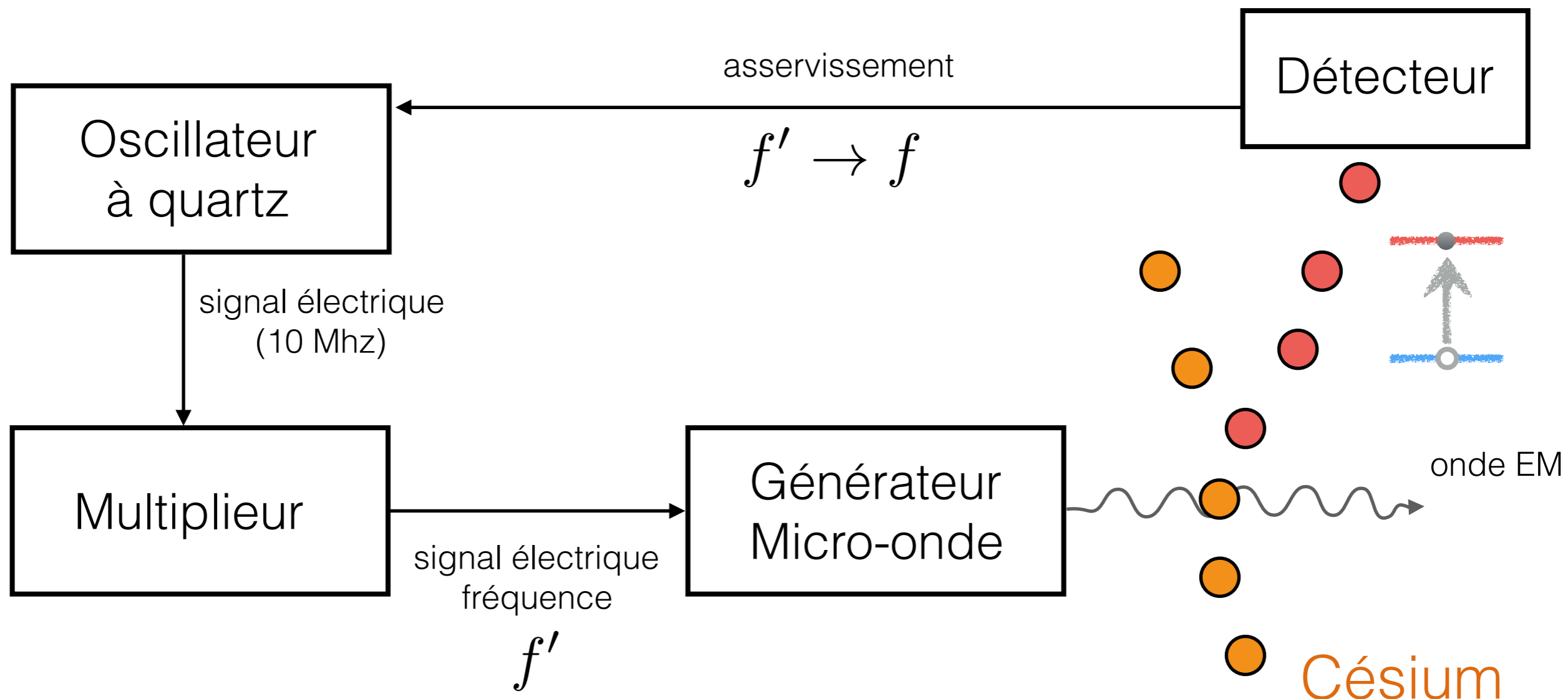
$$f = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$$

Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition de la seconde

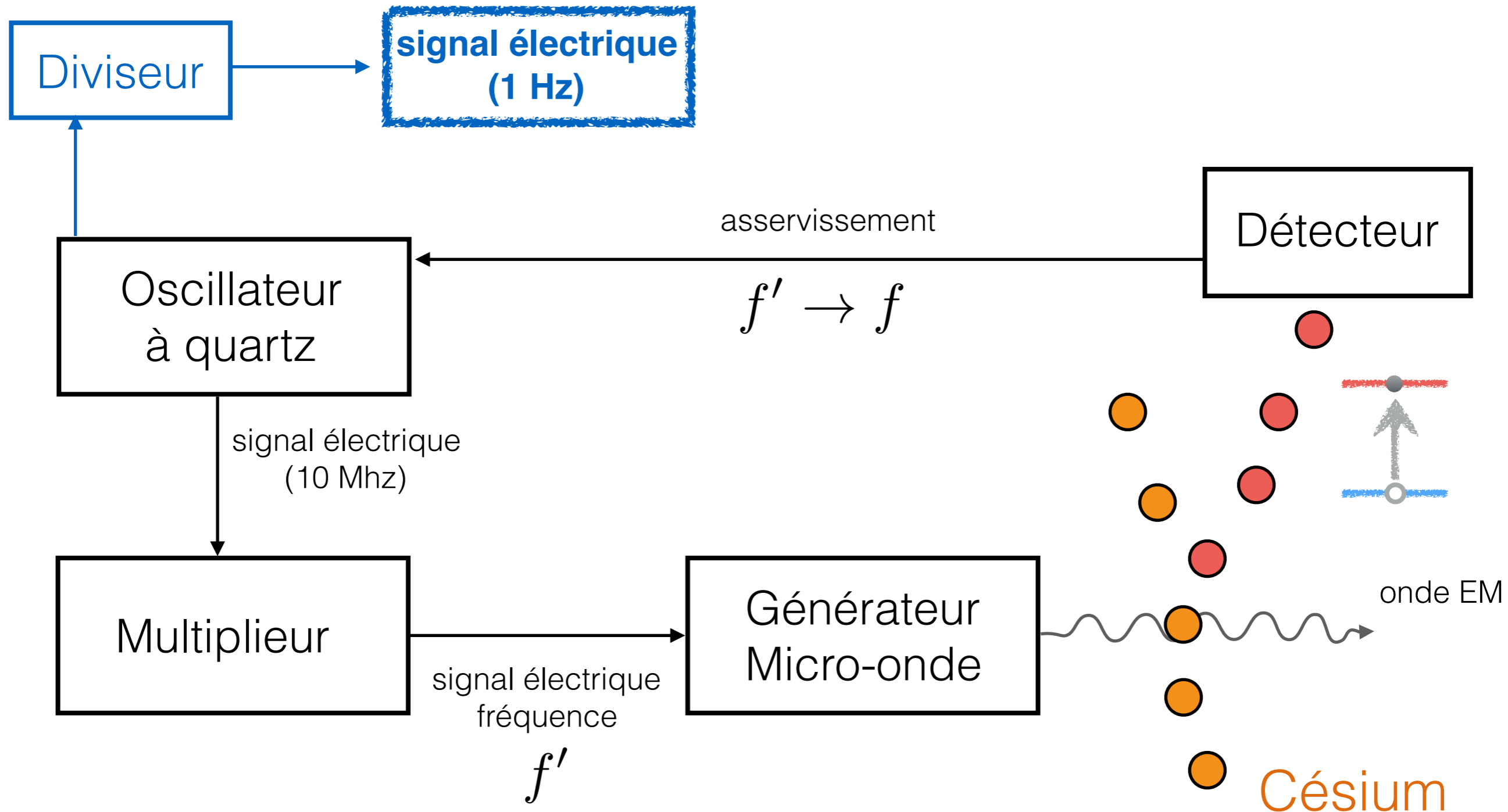
Étalon primaire : horloge atomique

max si $f = f'$



Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition de la seconde

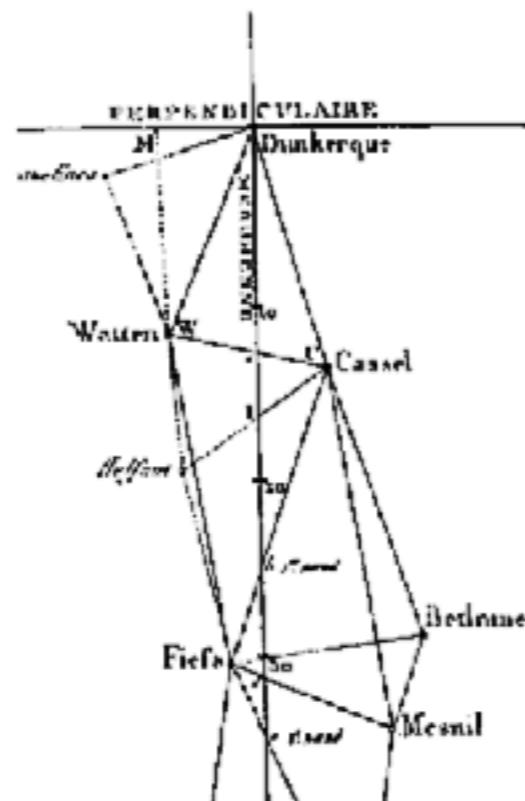


Tour d'horizon des définitions

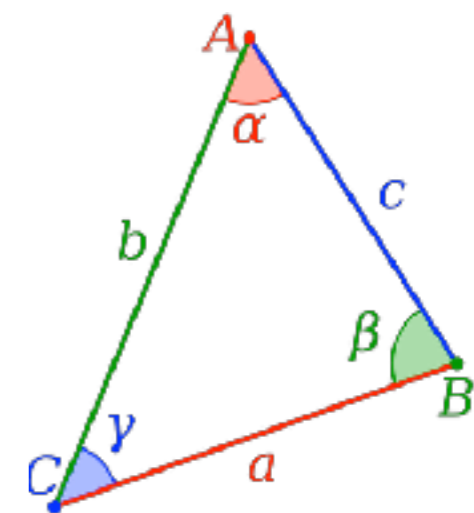
Évolution de la définition du mètre

1799 : Fabrication du « mètre des Archives », définit comme étant la longueur de 1/10 000 000 du quart du méridien terrestre.

CHAÎNE DES TRIANGLES
de Dunkerque à Barcelone
mesurée par MM. Delambre et Méchain



Prototype en platine iridié
(**mètre-étalon** de 1889 à 1960)



$$\frac{\sin \alpha}{a} = \frac{\sin \beta}{b} = \frac{\sin \gamma}{c}$$

Tour d'horizon des définitions

Évolution de la définition du mètre

1799 : Fabrication du « mètre des Archives », définit comme étant la longueur de 1/10 000 000 du quart du méridien terrestre.

1875-1889 : Fabrication et distribution des 30 prototypes du mètre-étalon.

1983 : Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde.

Cela revient à fixer exactement la *valeur numérique* de la vitesse de la lumière dans le vide...

... après avoir défini la seconde !



Prototype en platine iridié
(**mètre-étalon** de 1889 à 1960)

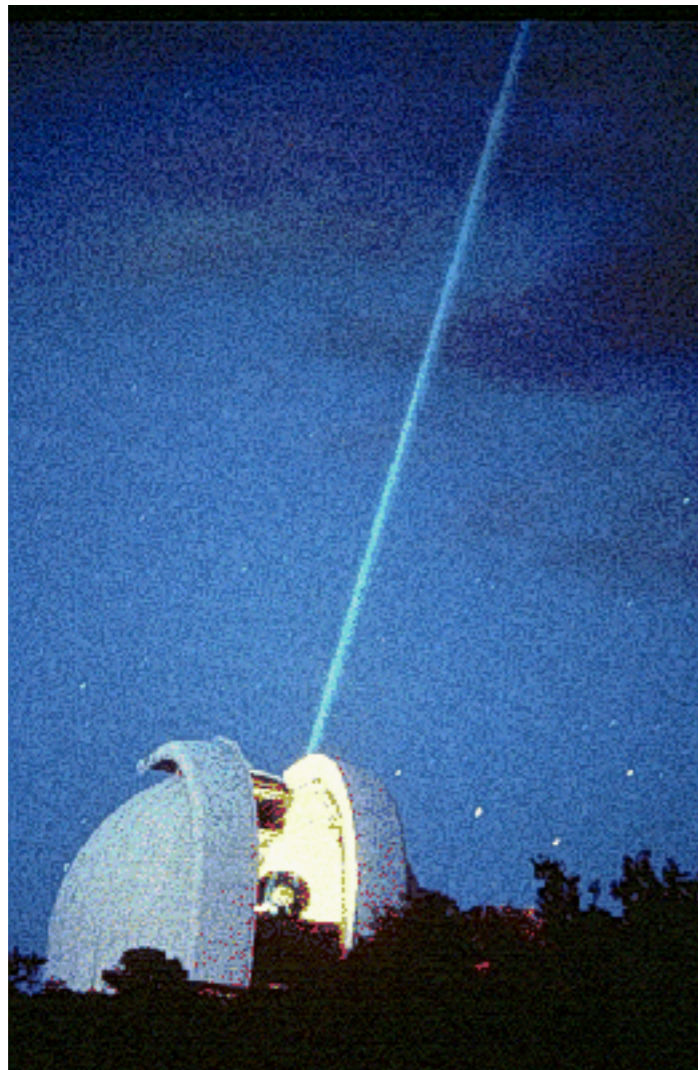
$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition du mètre

Téléométrie (en ayant fixé c)

... mesure de la distance Terre-Lune

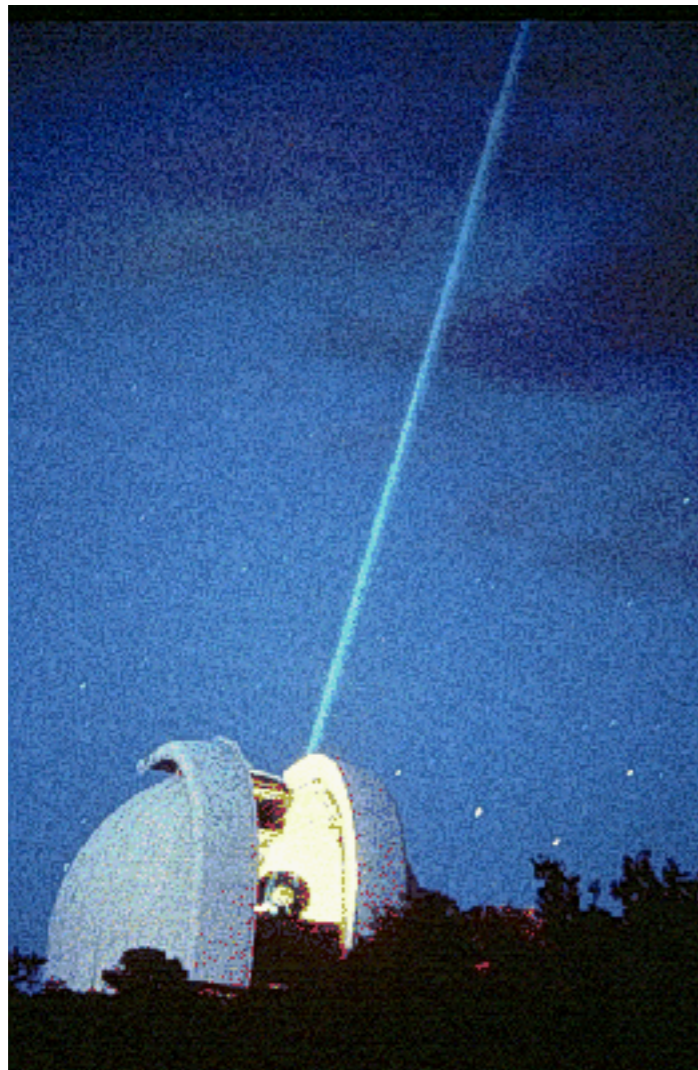


Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition du mètre

Téléométrie (en ayant fixé c)

environ 380 000 km ... précision de 3 mm !

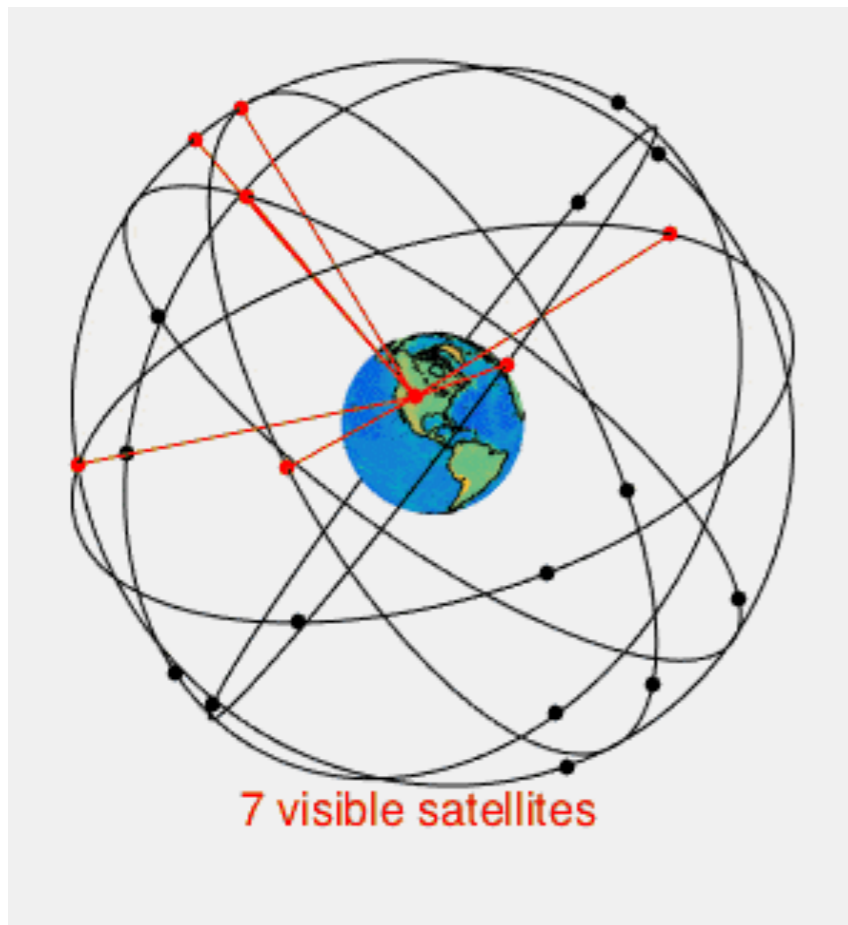


Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition du mètre

Téléométrie (en ayant fixé c)

mesure de position par GPS

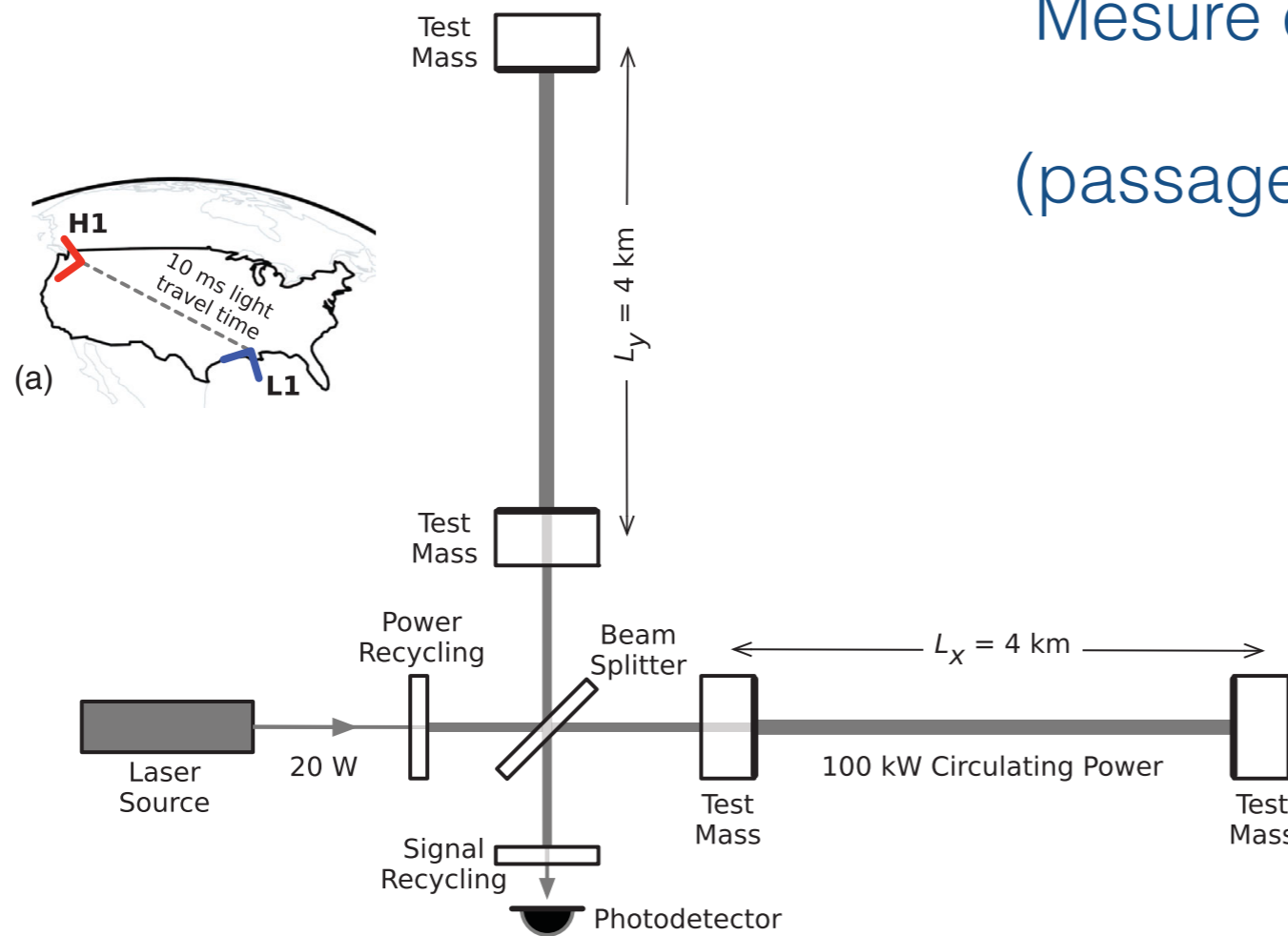


→ communication avec 4 satellites.

Tour d'horizon des définitions

Réalisation de la définition du mètre

Interférométrie



Mesure de la **position** relative des miroirs de LIGO (passage d'ondes gravitationnelles)

Tour d'horizon des définitions

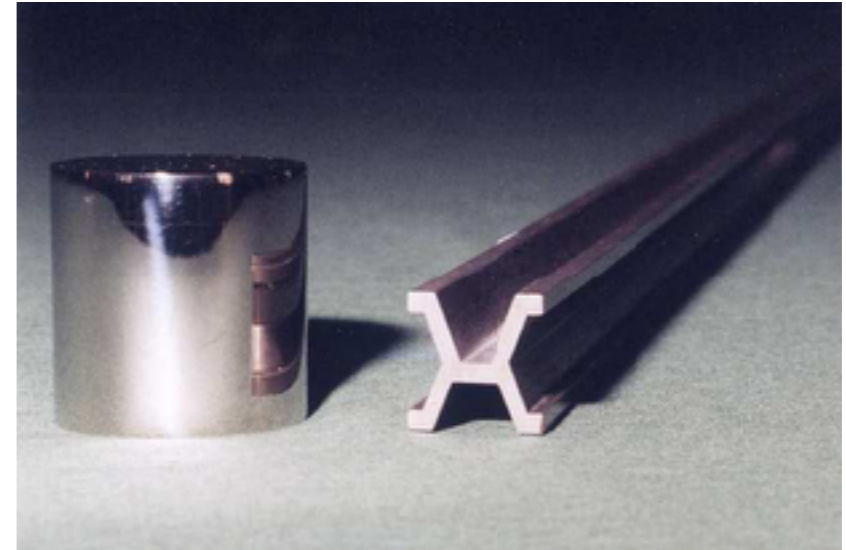
Définition du kilogramme

1889 : Fabrication d'un prototype en platine iridié.

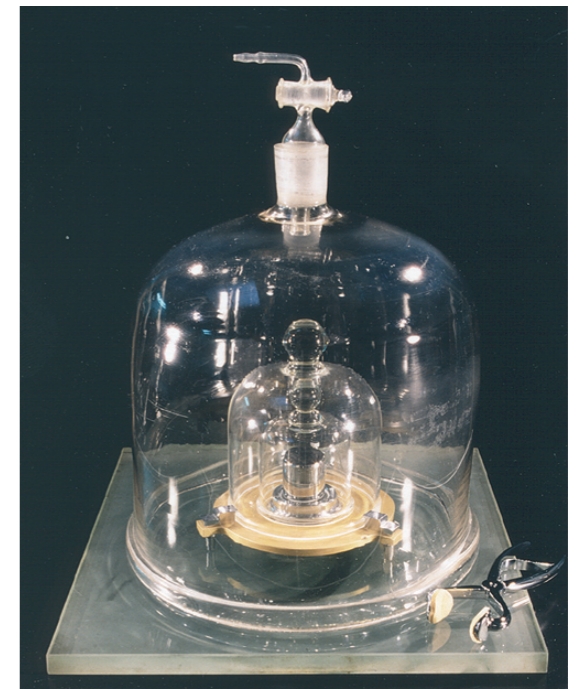
Variation réversible de $1 \mu\text{g}$ par an due à des dépôts ...

Le kilogramme est « redéfini » après chaque nettoyage !

1901 : Le kilogramme est égal à la masse du prototype international du kilogramme.



Le prototype du kg. Le mètre-étalon indique l'échelle.



Le nouveau SI

Extrait de la brochure 2019

Le SI est le système d'unités selon lequel :

- la constante de Planck, h , est égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J.s

Cela fixe l'unité **kilogramme**.

Réalisation de la définition du kilogramme —> **Balance du Watt**

Le nouveau SI

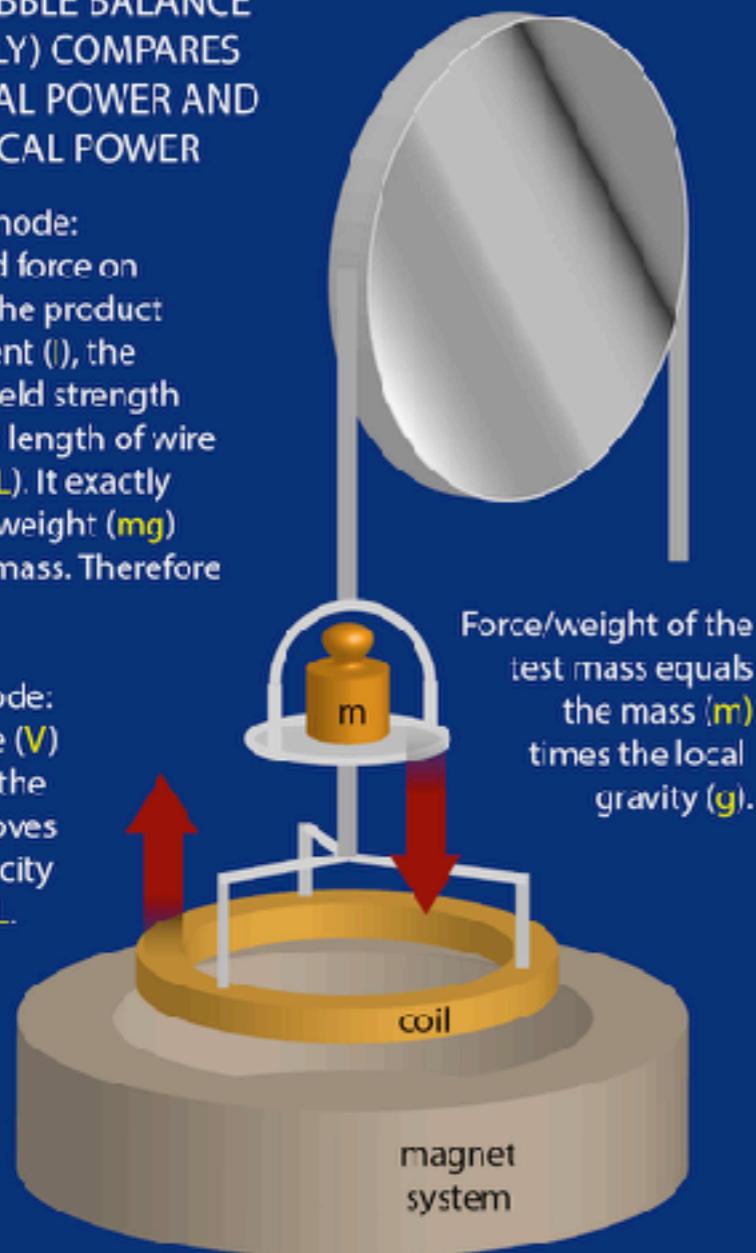
HOW A KIBBLE BALANCE (VIRTUALLY) COMPARES ELECTRICAL POWER AND MECHANICAL POWER

Weighing mode:

The upward force on the coil is the product of the current (I), the magnetic field strength (B), and the length of wire in the coil (L). It exactly equals the weight (mg) of the test mass. Therefore $mg = IBL$.

Velocity mode:

The voltage (V) induced in the coil as it moves equals velocity (v) times BL .



Weighing Mode: $mg = IBL$ Velocity Mode: $V = vBL$
so $mg/I = BL$ so $V/v = BL$

BL is the same in each case and cancels out. Thus IV (watts elec. power) = mgv (watts mech. power)

Balance du Watt
(ou balance de Kibble)

Induction
électromagnétique

+ utilisation d'étalons de tension et de courant faisant intervenir h

Le nouveau SI

Extrait de la brochure 2019

Le SI est le système d'unités selon lequel :

- la fréquence de la transition hyper fine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, $\Delta\nu_{Cs}$, est égale à 9 192 631 770 Hz

Cela fixe l'unité **seconde**.

- la vitesse de la lumière dans le vide, c , est égale à 299 792 458 m/s

Cela fixe l'unité **mètre**.

Le nouveau SI

Extrait de la brochure 2019

Le SI est le système d'unités selon lequel :

- la constante de Planck, h , est égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J.s

Cela fixe l'unité **kilogramme**.

- la charge élémentaire, e , est égale à $1,626\,176\,634 \times 10^{-19}$ C

Cela fixe l'unité **ampère**.

Le nouveau SI

Extrait de la brochure 2019

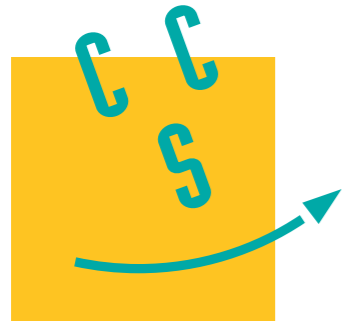
Le SI est le système d'unités selon lequel :

- la constante de Boltzmann, k_B , est égale à $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

Cela fixe l'unité **kelvin**.

- le nombre d'Avogadro, N_A , est égal à $6,022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Cela fixe l'unité **mol**.



CONCOURS CENTRALE•SUPÉLEC

Physique 2

4 heures

Calculatrices autorisées

PC

2016

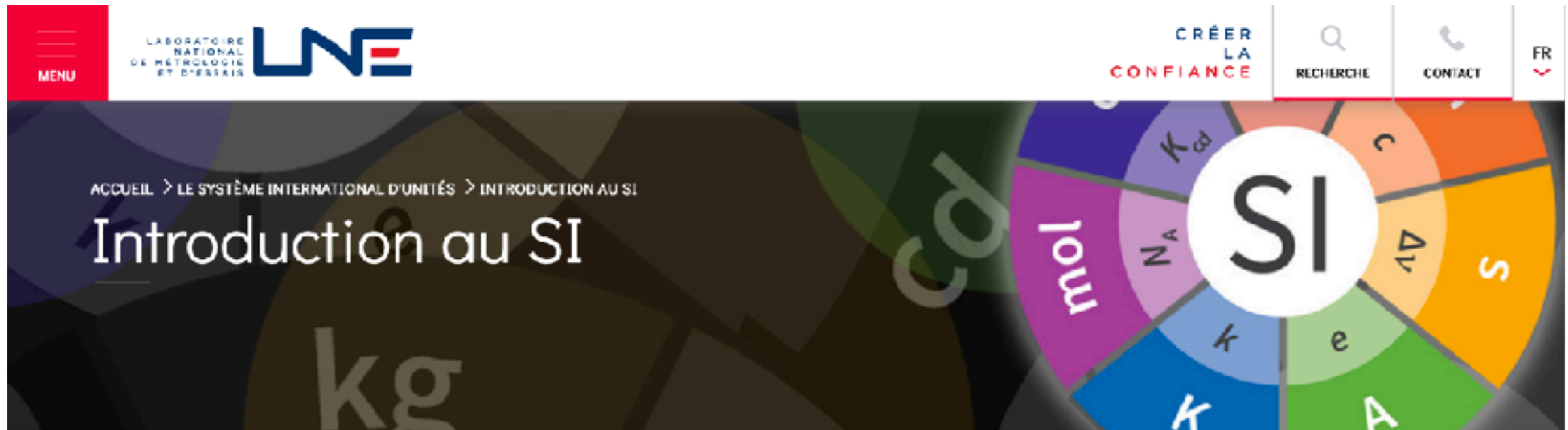
Vers une nouvelle définition du kelvin

L'actuelle définition de l'unité de température, le kelvin, est fondée sur la valeur du point triple de l'eau, fixé à la température $T_{PT} = 273,16$ K.



Figure 1 Appareil à point triple de l'eau

Le nouveau SI



Du système métrique
décimal au Système
international d'unités (SI)

2018, une année charnière
pour le Système
international d'unités



← RETOUR

Le **Système international d'unités (SI)** est composé de sept unités de base adoptées au niveau international par la **Conférence générale des poids et mesures (CGPM)**. Sept unités que l'on retrouve dans tous les aspects de notre quotidien et à plus forte raison dans l'industrie. Pouvoir s'appuyer sur des mesures toujours plus pointues est indispensable pour innover, déployer des processus industriels, établir des diagnostics médicaux, partir à la conquête de l'espace... Ainsi, depuis deux siècles, les métrologues contribuent à l'amélioration constante des unités de mesure.

<https://www.lne.fr/fr/comprendre/systeme-international-unites/introduction-si>

Le nouveau SI

Tableau 1 Les sept unités de base du SI

Grandeur	Unité SI
temps	La seconde , symbole s, est l'unité de temps du SI. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de la fréquence du césium, $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, la fréquence de la transition hyperfine de l'état fondamental de l'atome de césium 133 non perturbé, égale à 9 192 631 770 lorsqu'elle est exprimée en Hz, unité égale à s^{-1} .
longueur	Le mètre , symbole m, est l'unité de longueur du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la vitesse de la lumière dans le vide, c , égale à 299 792 458 lorsqu'elle est exprimée en m s^{-1} , la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
masse	Le kilogramme , symbole kg, est l'unité de masse du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Planck, h , égale à $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ lorsqu'elle est exprimée en J s, unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, le mètre et la seconde étant définis en fonction de c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
courant électrique	L'ampère , symbole A, est l'unité de courant électrique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la charge élémentaire, e , égale à $1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ lorsqu'elle est exprimée en C, unité égale à A s, la seconde étant définie en fonction de $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
température thermodynamique	Le kelvin , symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1} , unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
quantité de matière	La mole , symbole mol, est l'unité de quantité de matière du SI. Une mole contient exactement $6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ entités élémentaires. Ce nombre, appelé « nombre d'Avogadro », correspond à la valeur numérique fixée de la constante d'Avogadro, N_{A} , lorsqu'elle est exprimée en mol^{-1} . La quantité de matière, symbole n , d'un système est une représentation du nombre d'entités élémentaires spécifiées. Une entité élémentaire peut être un atome, une molécule, un ion, un électron, ou toute autre particule ou groupement spécifié de particules.
intensité lumineuse	La candela , symbole cd, est l'unité du SI d'intensité lumineuse dans une direction donnée. Elle est définie en prenant la valeur numérique fixée de l'efficacité lumineuse d'un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} Hz, K_{cd} , égale à 683 lorsqu'elle est exprimée en lm W^{-1} , unité égale à $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.