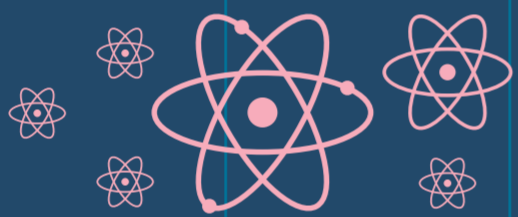


UNITÉS : MODE D'EMPLOI

SEPT MODES D'EMPLOI POUR COMPRENDRE LA NOUVELLE FAÇON DE DÉFINIR LES UNITÉS EN PHYSIQUE.



SECONDE

MÈTRE

KILOGRAMME

MOLE

KELVIN

AMPÈRE

CANDELA

Retrouvez posters,
cartes postales
et images
en libre accès sur
www.vulgarisation.fr

En 2018, les physiciens changent la façon de définir les unités. On pourra toutes les fabriquer à l'aide de méthodes scientifiques utilisant des constantes fondamentales et des théories bien établies. Plus besoin d'étalons ou de références humaines.

Voici sept modes d'emploi pour fabriquer les unités de façon universelle, en utilisant sept constantes fondamentales déterminées une fois pour toutes en 2018.

UN PROJET RÉALISÉ PAR L'ÉQUIPE « LA PHYSIQUE AUTREMENT »
(LPS, CNRS ET UNIVERSITÉ PARIS-SUD, PARIS-SACLAY)

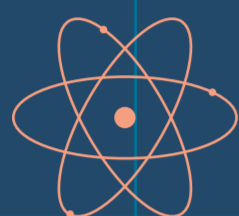
DESIGN GRAPHIQUE : MARIE JAMON / LA PHYSIQUE : JULIEN BOBROFF.



LA SECONDE (s) : MODE D'EMPLOI

PRÉREQUIS

Bohr 1922
Stern 1943 / Rabi 1944
Ramsey 1989
Prix Nobel x4



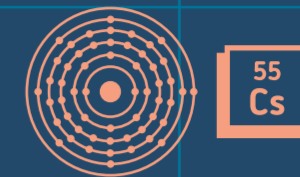
Théories de physique
quantique x1

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1

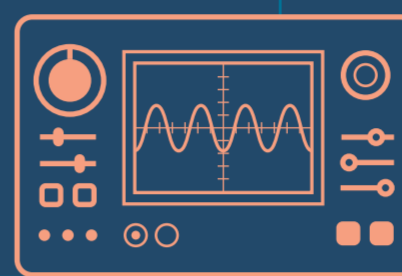
$\Delta\nu(^{133}\text{Cs}) = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$
Fréquence atomique du Césium 133
Constante fondamentale x1



Atome x10 000 000



De quoi fabriquer une fontaine atomique



Oscilloscope x1

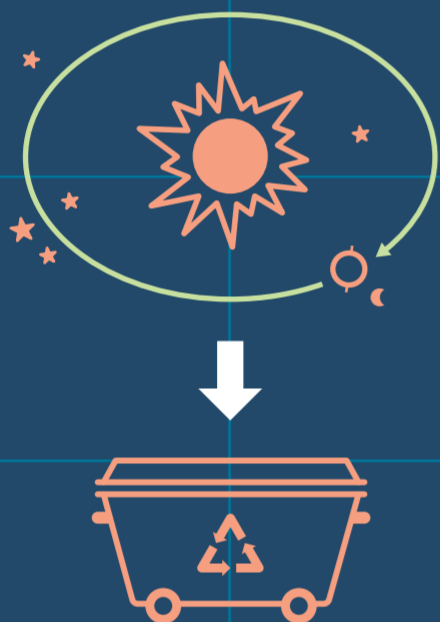


Chronomètre (très) précis x1

1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

Avant 1956 Mesurer 1/ 86 400
de la moyenne d'un jour solaire.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

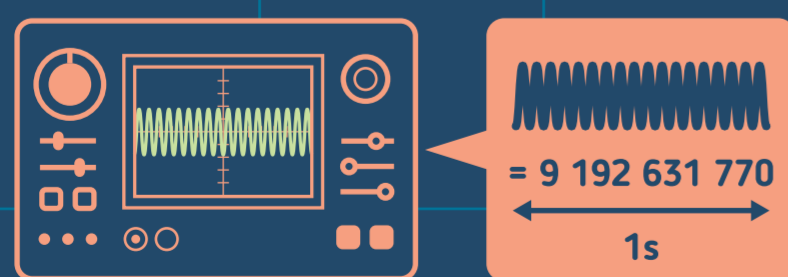


MÉTHODE À ÉVITER



Mesurer directement le temps entre 2
oscillations. Prévoir un bon chrono !

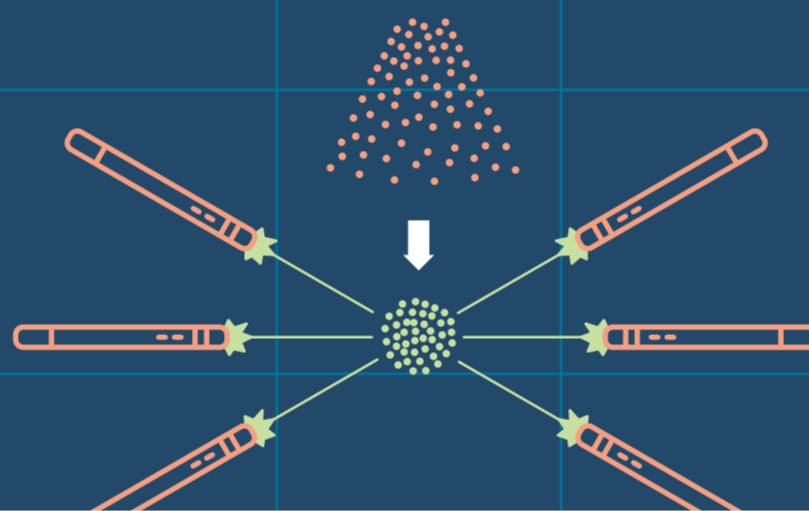
D Changer doucement la fréquence
des ondes. Dès que vous observez
la fluorescence, mesurez l'onde.
Fabriquer la seconde pour que l'onde
contienne 9 192 631 770 oscillations.



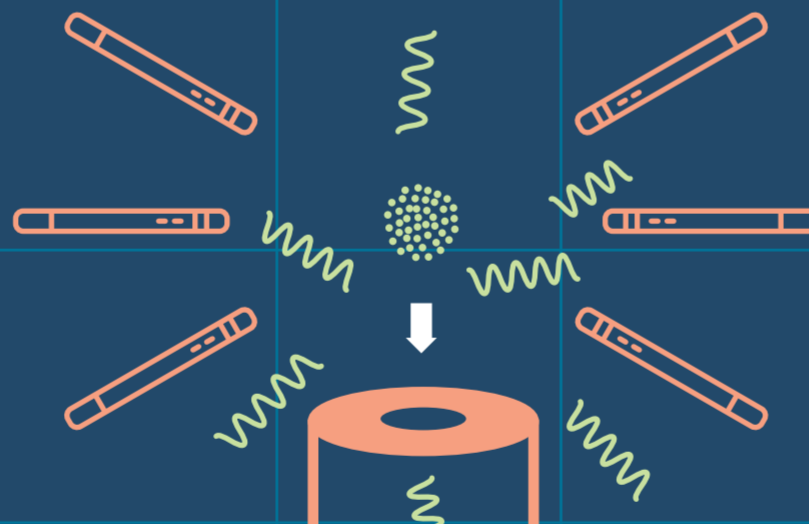
2 FABRIQUER

À PARTIR DE 1967

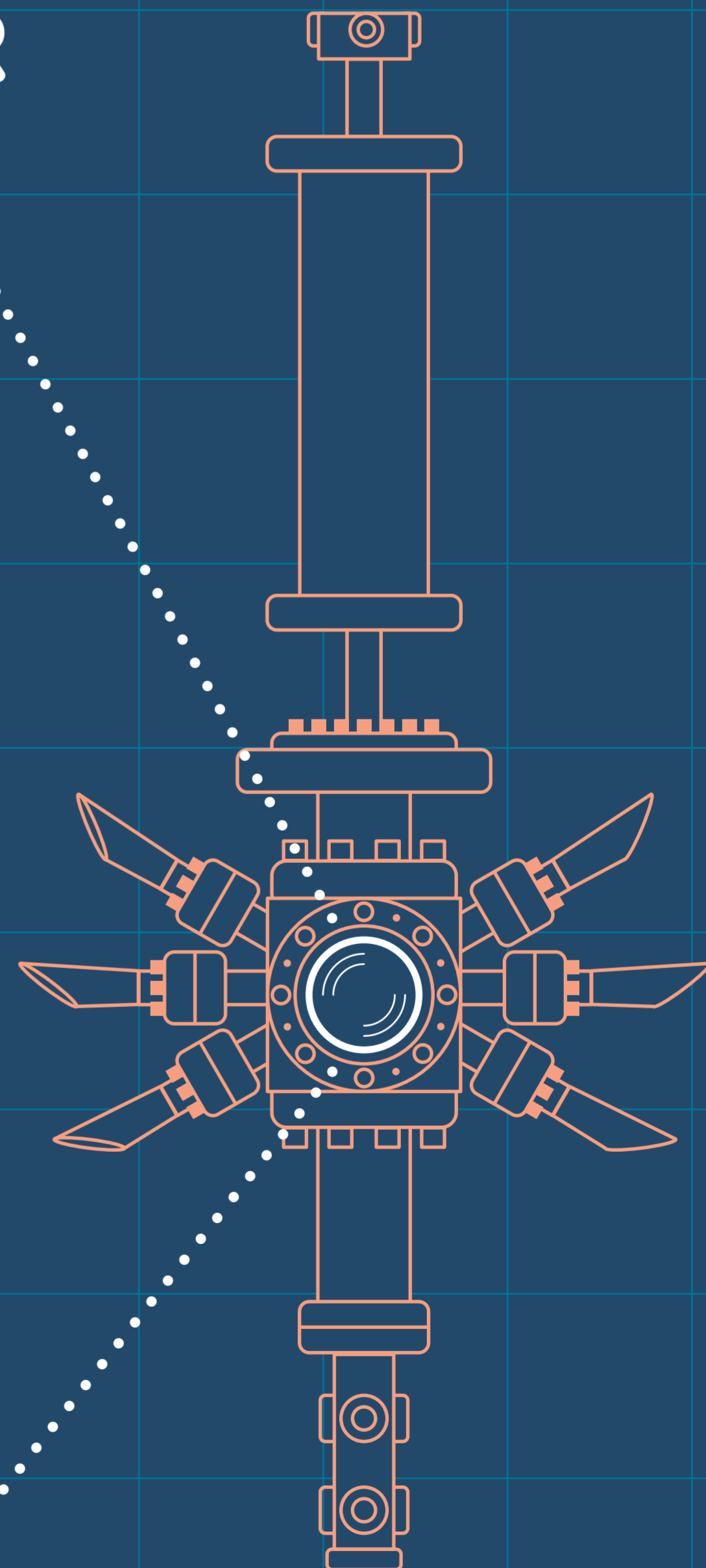
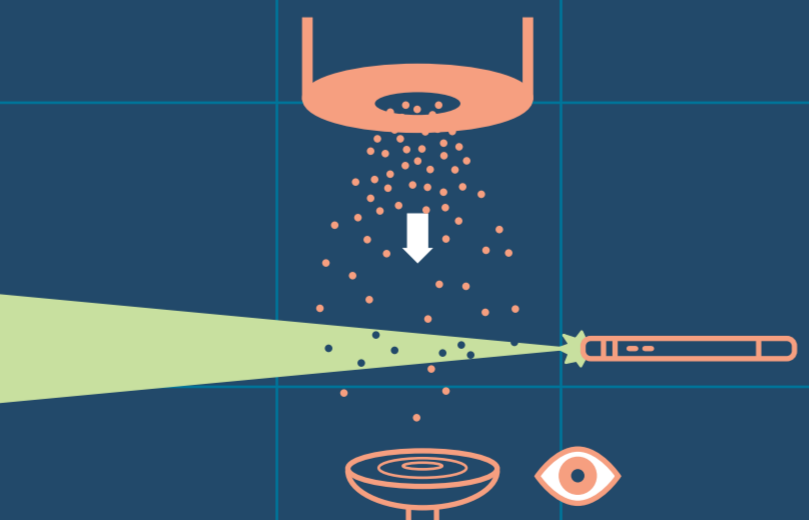
A Immobiliser et calmer le plus possible
les atomes de césium grâce à six
rayons laser puis former une boule.



B Laisser tomber la boule dans une
cavité pleine de micro-ondes (comme
dans un four à micro-ondes).

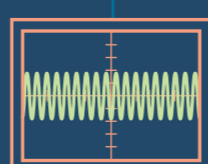


C Éclairer les atomes. S'ils sont
fluorescents, c'est qu'ils ont été
excités par les ondes.



3 PARTAGER

Dupliquer la seconde que vous avez
fabriquée pour le monde entier.





LE MÈTRE (m) : MODE D'EMPLOI

PRÉREQUIS

$$E = mc^2$$

Théorie de la relativité restreinte x1



Invention des lasers x1

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1

$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$
vitesse de la lumière

Constante fondamentale x1

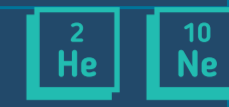


seconde

Unité x1

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Formule mathématique x1



Laser x1



De quoi fabriquer un interféromètre de Michelson



Oscilloscope x1



Calculatrice x1



Règle x1



Crayon à papier x1

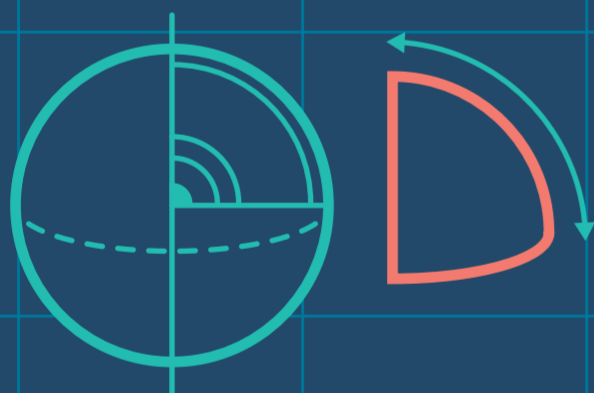
1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

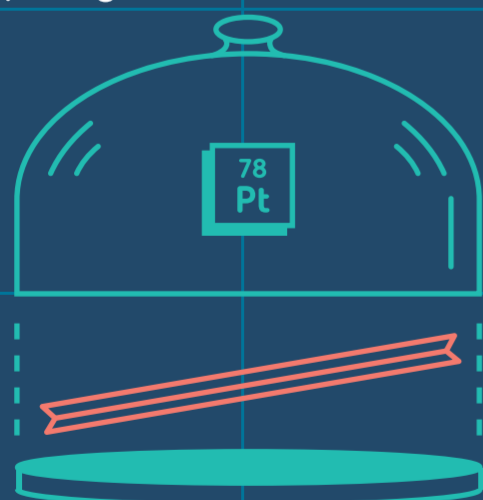
Avant 1791 Utiliser la longueur du bras du seigneur ou du pied du roi.



1791 Mesurer la distance entre Barcelone et Dunkerque, en déduire le quart du méridien terrestre, puis diviser par 10 000 000.



Avec cette valeur, fabriquer un mètre-étalon en platine et bien le protéger.



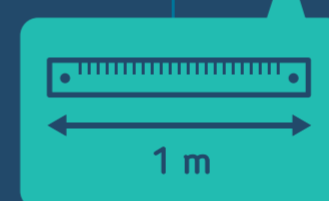
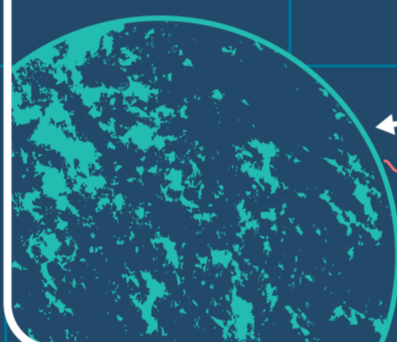
PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

2 FABRIQUER

À PARTIR DE 1983



MÉTHODE À ÉVITER



Allumer un rayon laser et mesurer pendant 1 seconde la distance qu'il parcourt. Ça doit valoir exactement $d = c \times t = 299\,792\,458$ mètres.

A

Méthode plus pratique : mesurer la période T d'un laser hélium-néon en utilisant la seconde.



$$T = 2,1108 \times 10^{-15} \text{ s} = 1 / f$$

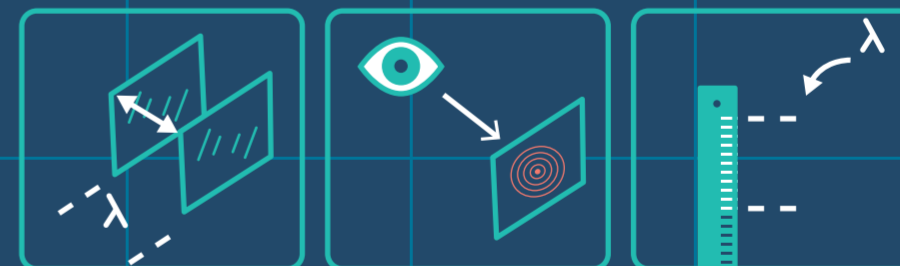
B

Calculer la longueur d'onde en mètre en imposant la vitesse de la lumière c .



C

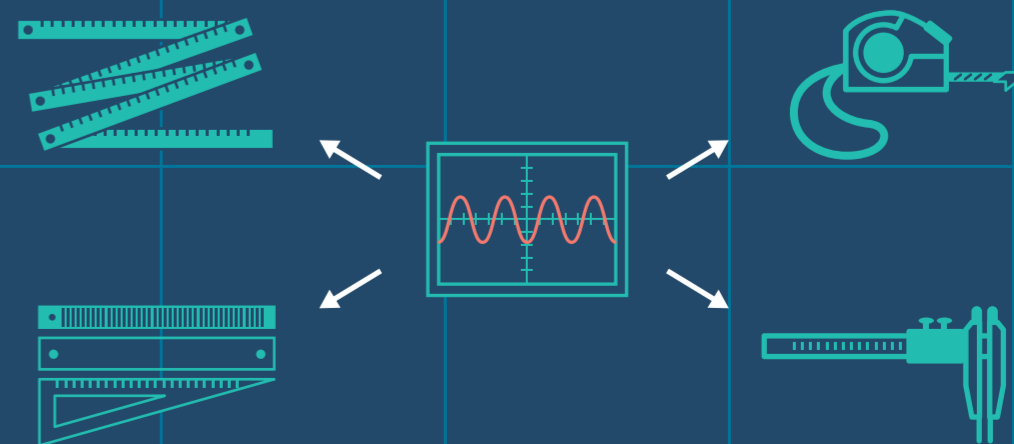
Envoyer ce laser dans un interféromètre de Michelson et observer des franges circulaires.



Déplacer un des miroirs, vous verrez les franges changer puis revenir à leur position : faites-le deux fois et vous aurez déplacé le miroir d'une distance de 632,8 nm. Bravo, vous avez construit un mètre ! (enfin un peu moins, mais à vous de multiplier...)

3 PARTAGER

Dupliquer le mètre que vous avez fabriqué pour le monde entier.



LE KILOGRAMME (kg) : MODE D'EMPLOI

PRÉREQUIS

Théorie de mécanique classique x1

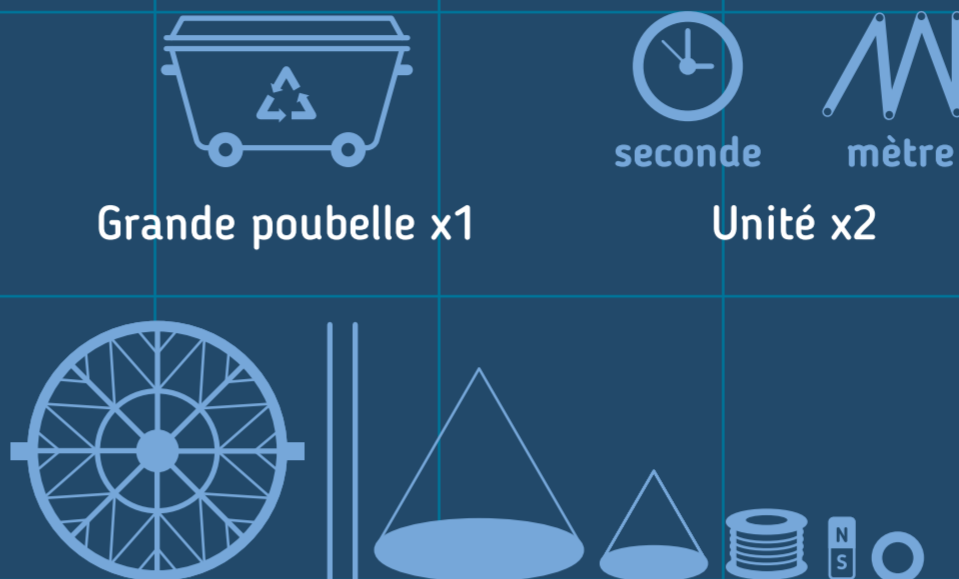


Théorie de physique quantique x1



Invention de l'électricité et de l'induction x1

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1

seconde
mètre
Unité x2



De quoi fabriquer une balance du Watt

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

Constante fondamentale x1

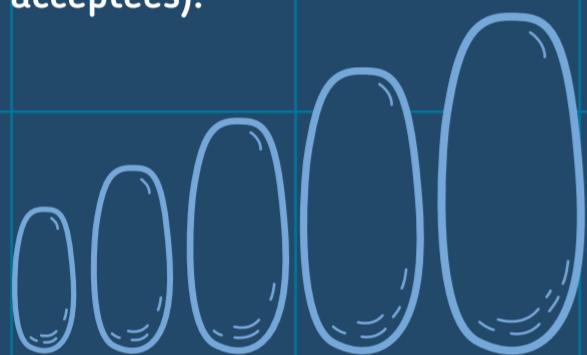


Effet quantique présentant des paliers x2

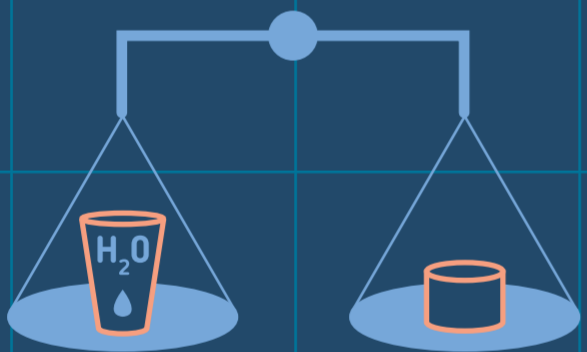
1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

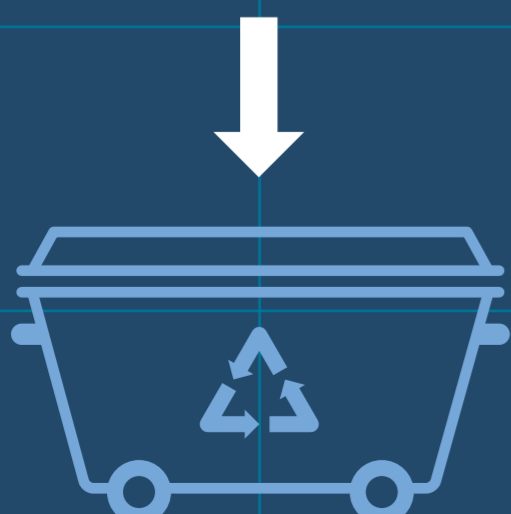
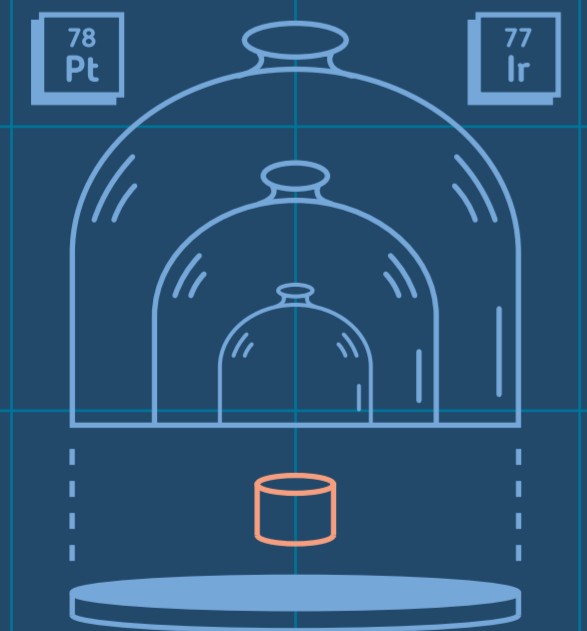
Entre 3^e et 4^e millénaire av. J.-C. Façonner des systèmes de poids en pierre (formes d'animaux acceptées).



1799 Mesurer la masse d'un kilogramme d'eau distillée à 4°C.



Avec cette valeur, fabriquer un kilo-étalon en platine et iridium et bien le protéger.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

2 FABRIQUER

À PARTIR DE 2018

A

Fabriquer une balance du Watt
D'un côté, placer un plateau avec le poids à mesurer, de l'autre placer une bobine électrique et un champ magnétique.

1 Faire circuler du courant dans la bobine, cela crée une force qui s'oppose au poids. Mesurer ce courant grâce à deux phénomènes quantiques, l'effet Hall quantique et l'effet Josephson (voir « L'Ampère, Mode d'emploi »).

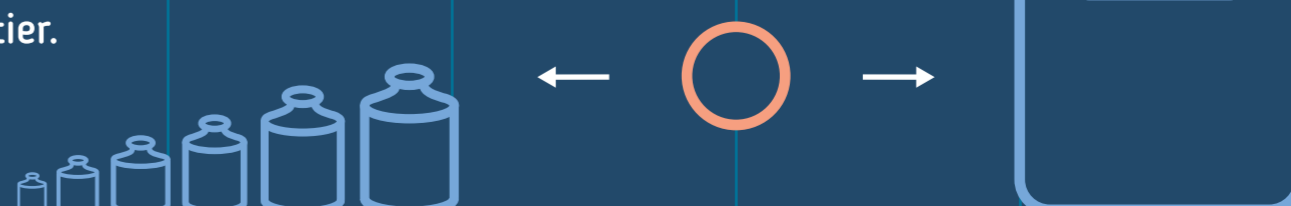
2 Déplacer à vitesse constante (v) la bobine verticalement. Mesurer la tension électrique créée par induction, toujours avec l'effet Josephson.

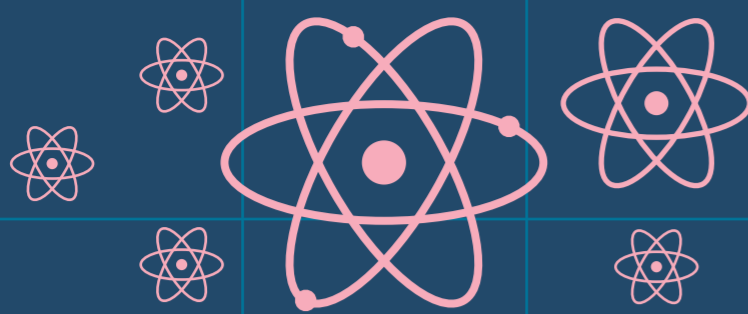
B La masse s'exprime juste en fonction de ces deux mesures et de la constante de Planck (h). Imposer la valeur (h). Déduire alors la masse : c'est votre nouvel étalon.

$h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ J.s

3 PARTAGER

Dupliquer le kilogramme que vous avez fabriqué pour le monde entier.





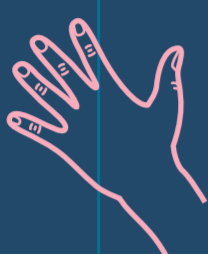
LA MOLE : MODE D'EMPLOI

(N_A)

PRÉREQUIS



Cristallographie x1



Main très propre x2 (ou porter des gants)

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1



Balance x1



Four x1



De quoi fabriquer un interféromètre optique

$N_A = 6,022\ 14\ 076 \times 10^{23}$
nombre d'Avogadro

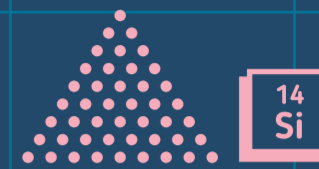
Constante fondamentale x1

$$M_{\text{mol}} = \frac{m_{\text{TOT}}}{\text{Nombre de mole}}$$

Formule de chimie x1



De quoi fabriquer un interféromètre à rayons X



Atomes de Silicium (sable)

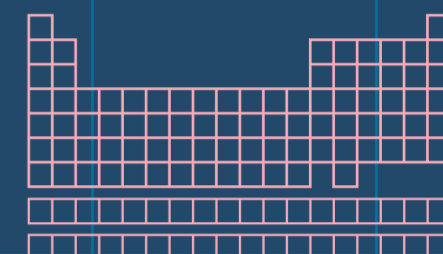
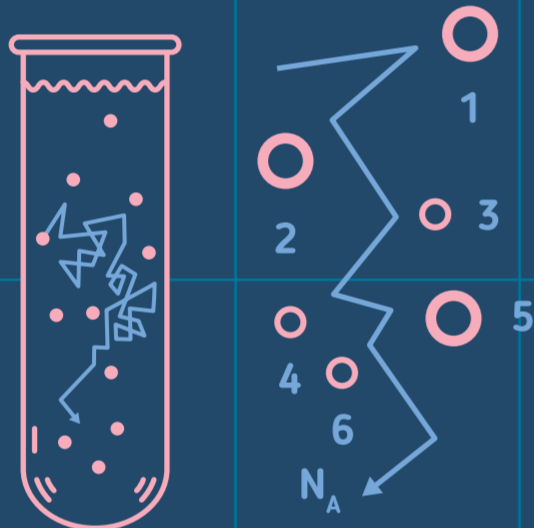


Tableau périodique des éléments x1

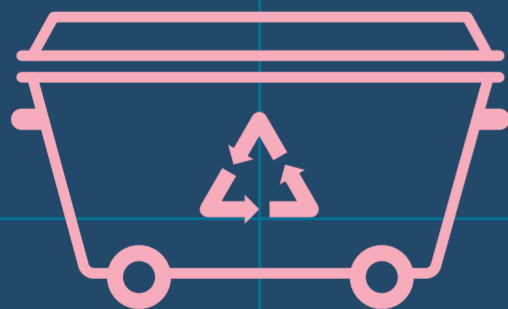
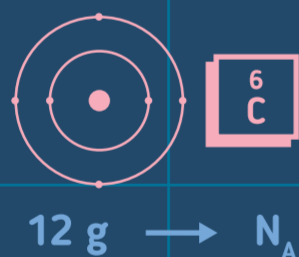
1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

Début XX^e siècle Observer le mouvement de petites billes de plastique dans un liquide. En déduire combien de molécules il y a et ainsi le nombre d'Avogadro.



1971 Une mole correspond à 0,012 kg de carbone.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

2 FABRIQUER

À PARTIR DE 2018

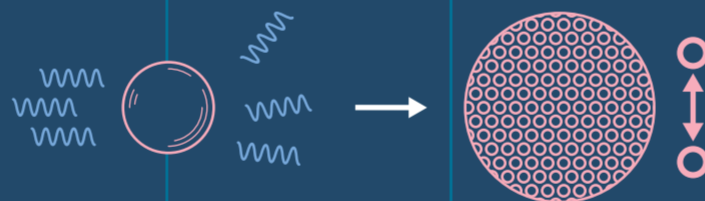
A Pour déterminer le nombre de mole dans un échantillon, par exemple de silicium :

- 1 Cristalliser une sphère de silicium la plus pure possible dans un four.
- 2 La peser précisément.
- 3 La polir pendant 1 mois pour obtenir une sphère la plus ronde possible.



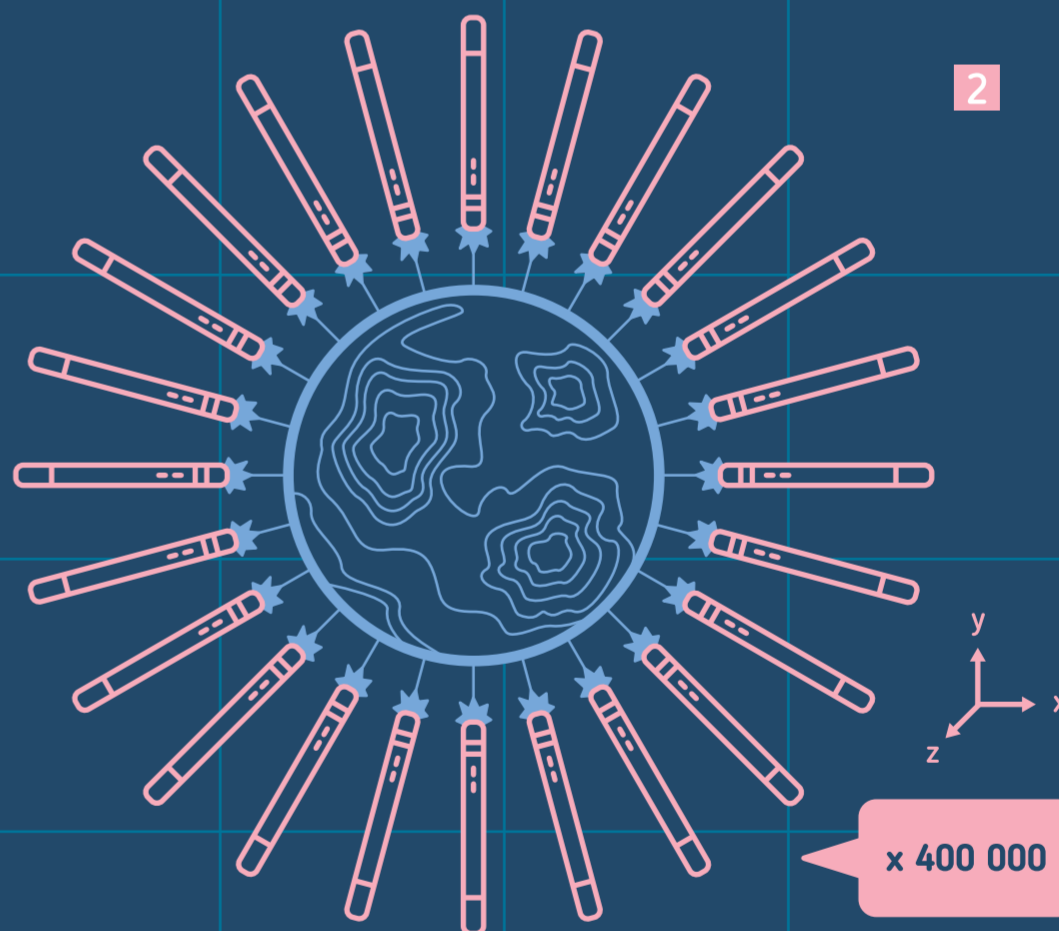
B Compter le nombre d'atomes qu'elle contient. Pour cela :

- 1 Mesurer la distance entre atomes avec un interféromètre par rayons X.



- 2 Mesurer le volume de la sphère. Pour cela, mesurer son diamètre avec un interféromètre optique 400 000 fois dans toutes les directions.

- 3 En déduire le nombre d'atomes dans la sphère.



C Imposer la constante d'Avogadro $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$. En déduire le nombre de mole dans la sphère :

$$\text{Nombre de mole} = \frac{\text{Nombre d'atomes}}{N_A}$$

D À partir de la masse de la sphère ($m_{\text{sphère}}$), déduire la masse d'une mole de silicium (M_{mol}) :

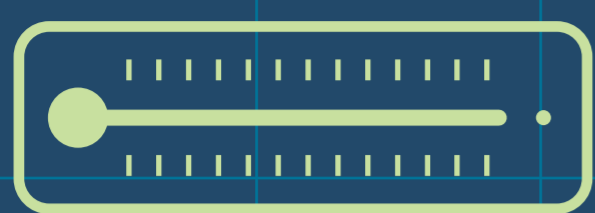
$$M_{\text{mol}} = \frac{m_{\text{sphère}}}{\text{Nombre de mole}}$$

3 PARTAGER

Utiliser définition de la mole et la masse molaire du silicium pour en déduire les masses molaires de tous les atomes. Utile pour la chimie !

N_A

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 H | 2 He | 3 Li | 4 Be | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O | 9 F | 10 Ne | 11 Na | 12 Mg | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S |
| 17 Cl | 18 Ar | 19 K | 20 Ca | 21 Sc | 22 Ti | 23 V | 24 Cr | 25 Mn | 26 Fe | 27 Co | 28 Ni | 29 Cu | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge |
| 33 As | 34 Se | 35 Br | 36 Kr | 37 Rb | 38 Sr | 39 Y | 40 Zr | 41 Nb | 42 Mo | 43 Tc | 44 Ru | 45 Rh | 46 Pd | 47 Ag | ... |



LE (K) KELVIN : MODE D'EMPLOI

PRÉREQUIS



Théorie de thermodynamique x1



Notions de guitare x1

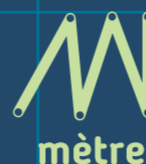
MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1



seconde



mètre



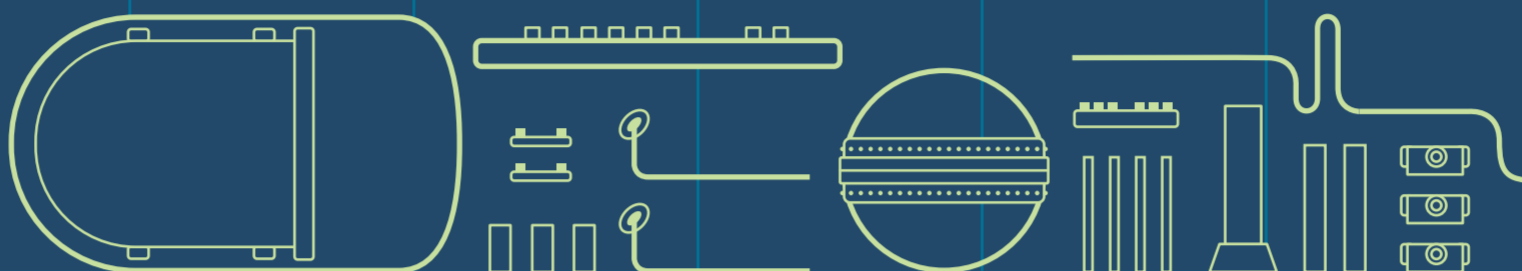
kilogramme

$k_B = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
constante de Boltzmann

Constante fondamentale x1



Atome $\times 10\ 000\ 000$
(gaz)



De quoi fabriquer un thermomètre acoustique

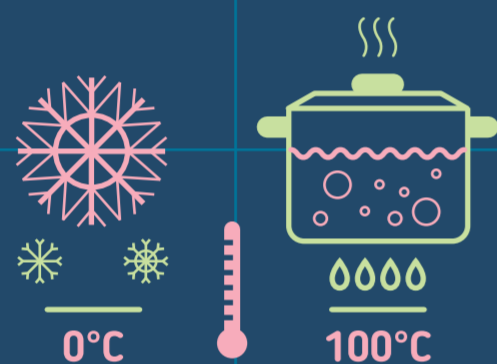
$$v^2 = \frac{\gamma k_B \times T}{m}$$

Formule mathématique x1

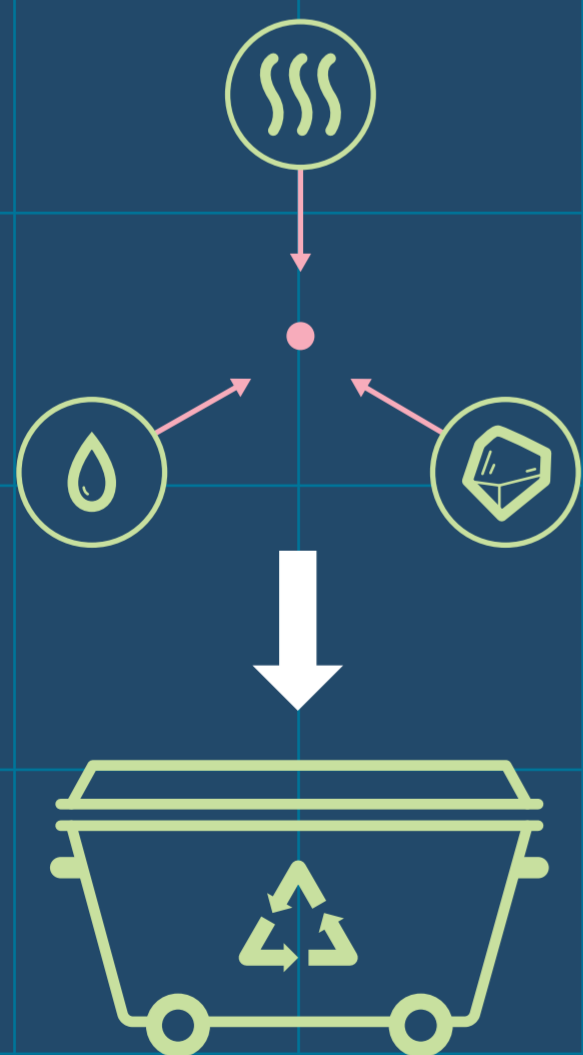
1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

1742 Faire geler de l'eau, cela définit 0°C. La faire bouillir, cela définit 100°C.



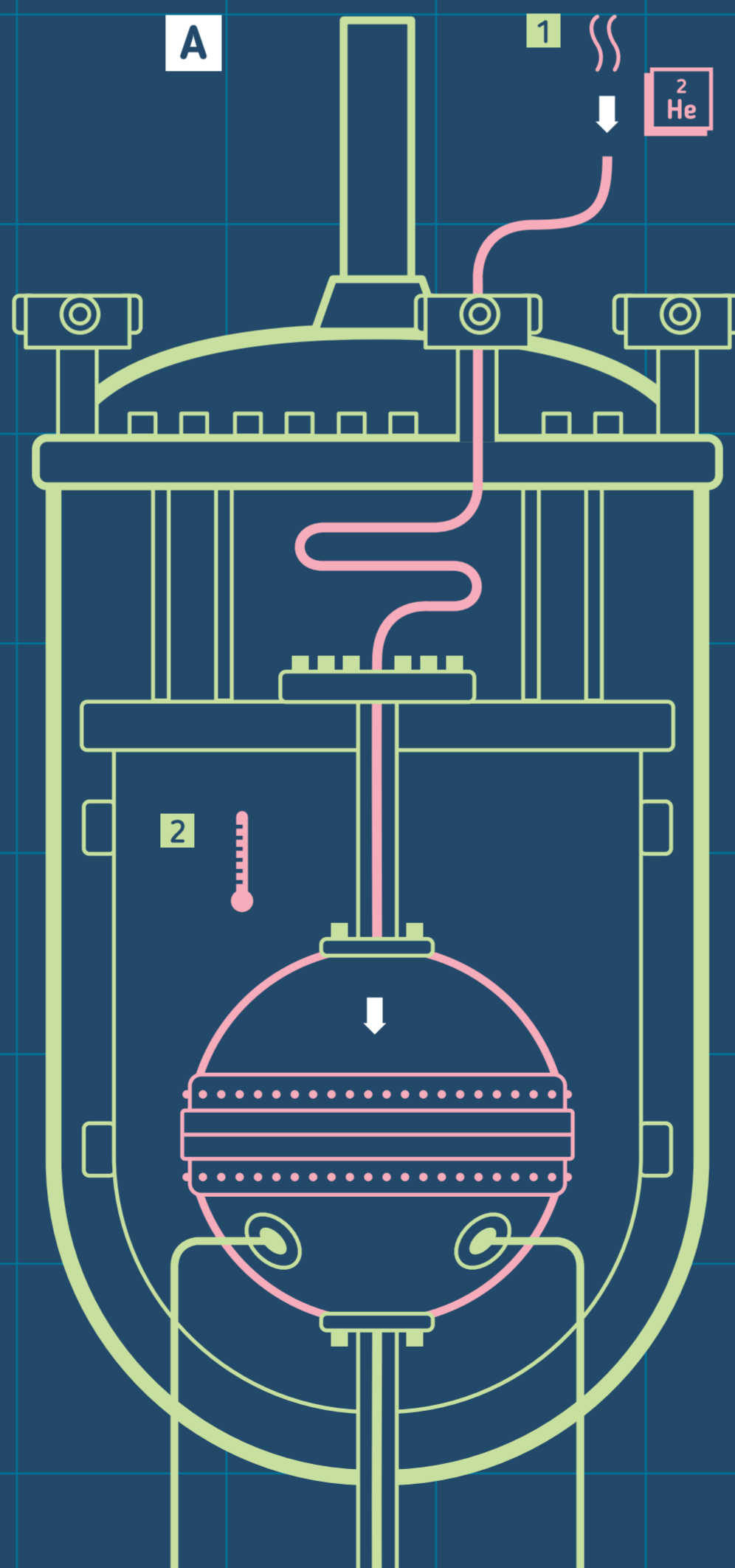
1967 Trouver la température où l'eau est à la fois gazeuse, solide et liquide : c'est le point triple de l'eau vers 0°C. Ajouter 273,16 puis diviser par 273,16 pour obtenir un Kelvin.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

2 FABRIQUER

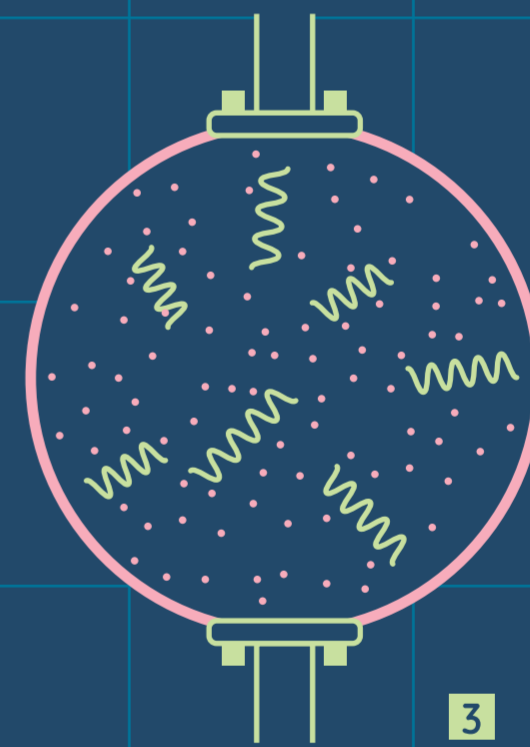
À PARTIR DE 2018



Propriété : la vitesse du son dans un gaz dépend de la température. Plus le gaz est chaud, plus vite circule le son.

Fabriquer un thermomètre acoustique

- 1 Remplir une sphère métallique d'un gaz rare comme l'hélium.
- 2 Placer la sphère à une température fixe.
- 3 Exciter la sphère et mesurer à quelle fréquence elle vibre spontanément, à l'image d'une guitare. En déduire la vitesse du son (v) circulant dans le gaz.



B Imposer la constante k_B , soit $1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$. Déduire la température du gaz (T) avec la formule mathématique :

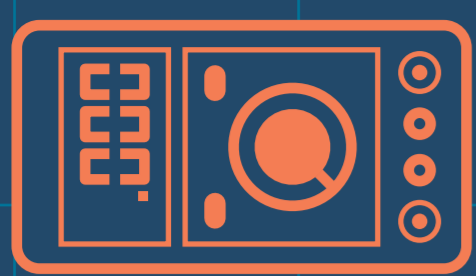
$$v^2 = \frac{\gamma k_B \times T}{m}$$

(m : la masse des atomes du gaz)

3 PARTAGER

Dupliquer le kelvin que vous avez fabriqué pour le monde entier.





L'AMPÈRE : MODE D'EMPLOI (A)

PRÉREQUIS

Effet Hall quantique, Von Klitzing 1985 / Effet Josephson, Josephson 1973

Prix Nobel x2

$$U = R \times i$$

Théorie de physique x1

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1



seconde
Unité x1

$e = 1,602\ 176\ 634\ 10^{-19}\ C$
charge électrique de l'électron

Constante fondamentale x1

$$R_H = \frac{h}{e^2} \quad V_J = \frac{h\nu}{2e}$$

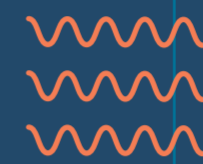
Formule de physique x2



Transistor pour faire un métal à deux dimensions x1



De quoi fabriquer une jonction Josephson supraconductrice



Ondes électromagnétiques x1

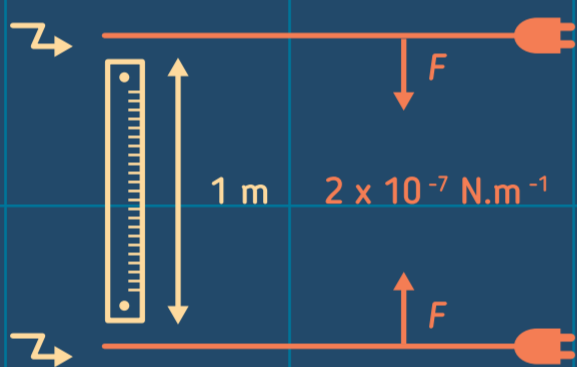


Champ magnétique x1

1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

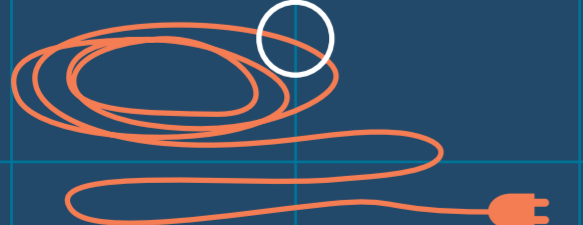
1954 Mesurer la force qui s'exerce entre deux fils séparés de 1 mètre dans lesquels circule un courant électrique constant. Quand cette force vaut 2×10^{-7} newton par mètre, le courant vaut 1 Ampère.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

MÉTHODE EN COURS DE DÉVELOPPEMENT DANS LES LABOS DE NANOPHYSIQUE

Un ampère correspond au passage de $6,241\ 509\ 074 \times 10^{18}$ électrons par seconde, soit : $1 / 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$.

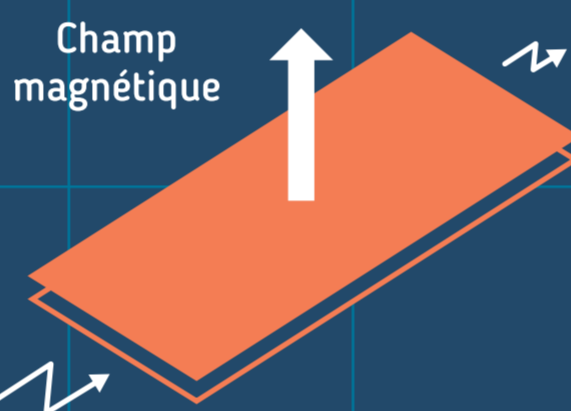


Construire un dispositif capable de compter un par un le nombre d'électrons qui passent dans un fil électrique. Le tour est joué !

2 FABRIQUER

À PARTIR DE 2018

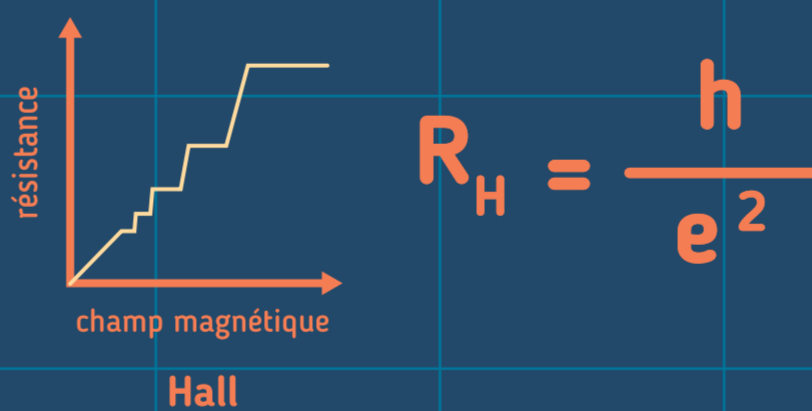
A



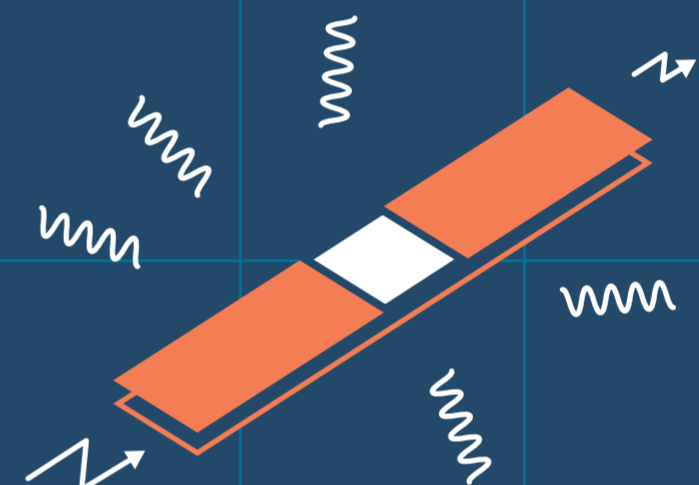
Mesurer l'effet Hall quantique

Faire circuler du courant dans une fine couche métallique. Placer le tout dans un champ magnétique.

Une résistance perpendiculaire (R_H) apparaît qui présente des marches d'escalier. Mesurer la plus haute qui vaut :



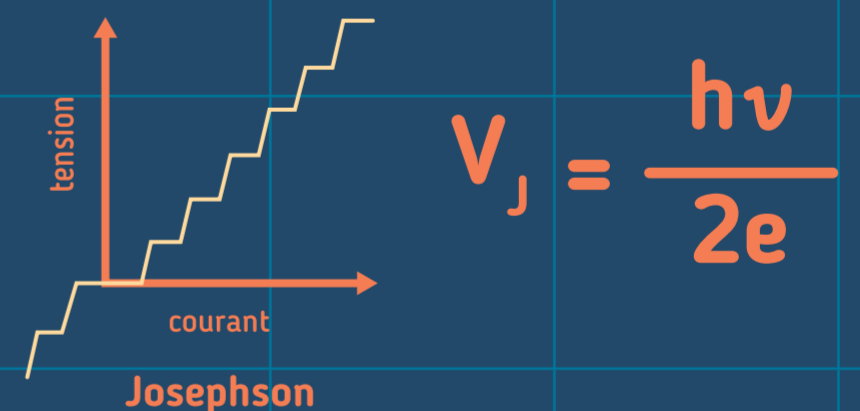
B



Mesurer l'effet Josephson

Prendre un sandwich supraconducteur -isolant-supraconducteur. Envoyer des ondes électromagnétiques de fréquence (ν), puis faire circuler un courant.

Une tension électrique (V_J) apparaît qui présente des marches d'escalier. Mesurer en une qui vaut :



C

En déduire l'ampère : À partir des mesures, trouver un courant (i) grâce à la loi d'Ohm.

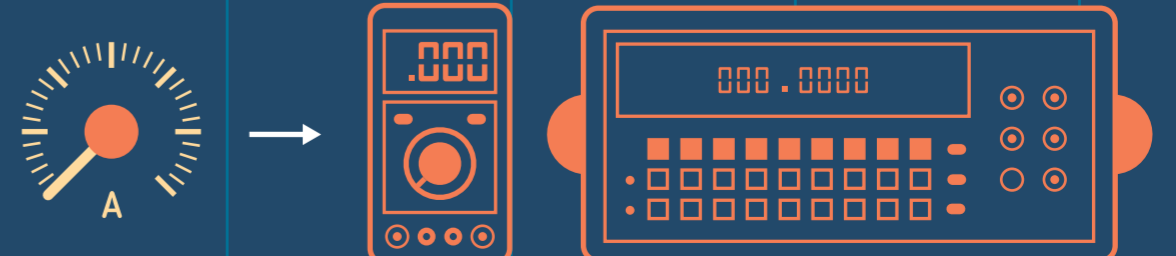
$$i = \frac{V_J}{R_H} = \frac{e\nu}{2}$$

Imposer la charge de l'électron $e = 1,602\ 176\ 634\ 10^{-19}\ C$ et mesurer la fréquence (ν) : vous obtenez ainsi une façon de mesurer le courant en ampère.



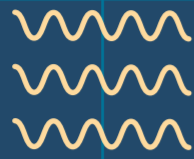
3 PARTAGER

Dupliquer l'ampère que vous avez fabriqué pour le monde entier.



LA CANDELA (cd) : MODE D'EMPLOI

PRÉREQUIS



Théorie de l'électromagnétisme x1



Avoir des yeux humains x1

MATÉRIEL NÉCESSAIRE



Grande poubelle x1



seconde

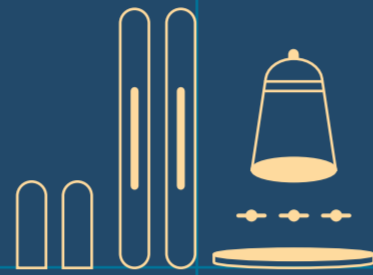


mètre



kilogramme

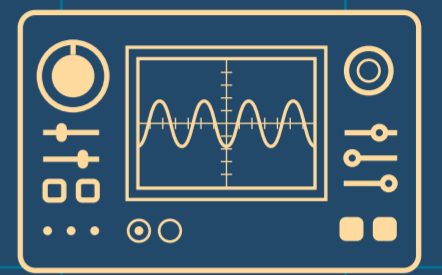
$K_{cd} = 683 \text{ lm.W}^{-1}$
efficacité lumineuse
Constante fondamentale x1



De quoi fabriquer une lampe de lumière verte (ou utiliser un laser)



De quoi fabriquer un détecteur d'intensité lumineuse

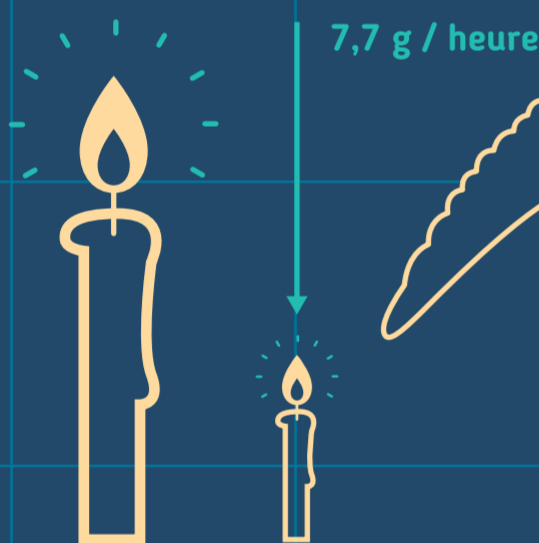


Oscilloscope x1

1 JETER

LES ANCIENNES MÉTHODES

1860 Allumer une bougie fabriquée à partir de blanc de baleine, pesant $1/6^e$ de pound et brûlant à une vitesse de 7,7 grammes par heure. Mesurer l'intensité lumineuse émise par la flamme.



1967 Chauffer un corps noir à la température de solidification du platine soit $1\,769^{\circ}\text{C}$. Mesurer ensuite l'intensité lumineuse émise dans la direction perpendiculaire d'une surface de $1/600\,000 \text{ m}^2$.



PENSEZ AU TRI SÉLECTIF !

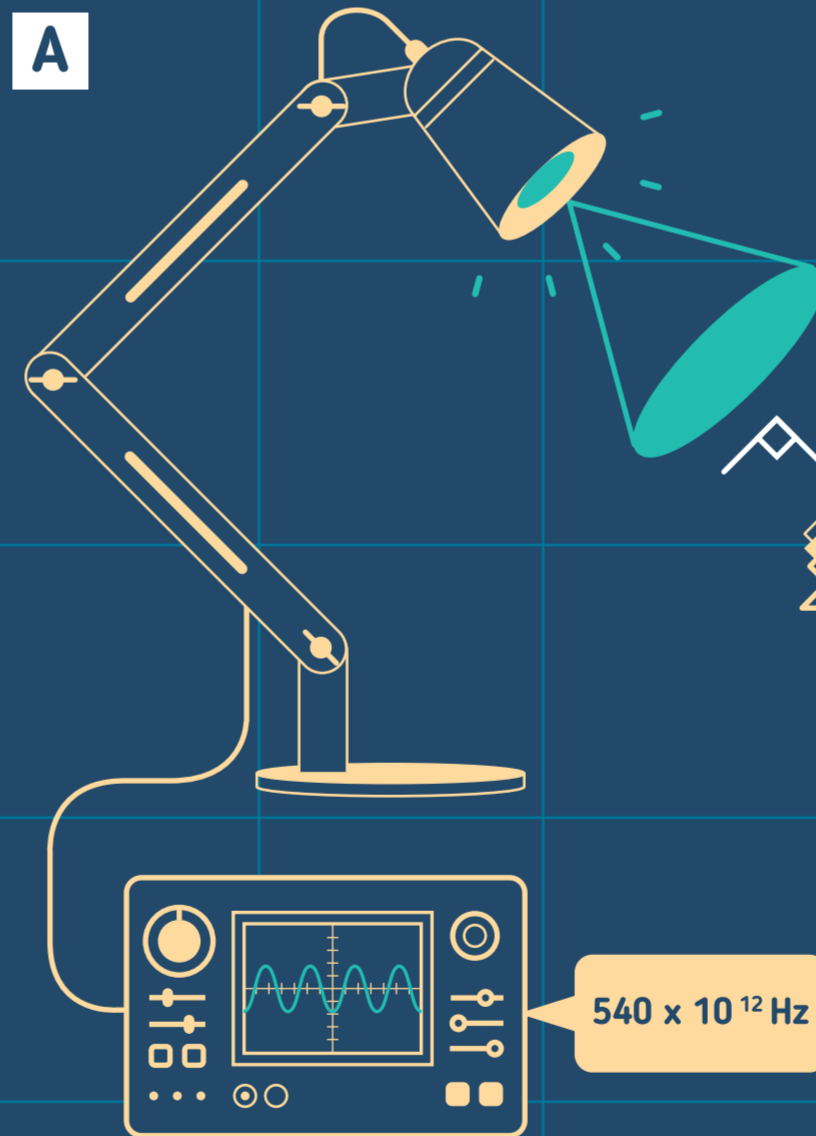
2 FABRIQUER

À PARTIR DE 1979

Définition La candela mesure l'intensité lumineuse émise par de la lumière dans une direction particulière multipliée par un facteur qui prend compte la sensibilité de l'œil humain aux différentes couleurs. À la différence des 6 autres unités fondamentales, cette unité n'est donc pas juste liée à un phénomène de physique mais choisie arbitrairement par rapport à notre propre vision.



A

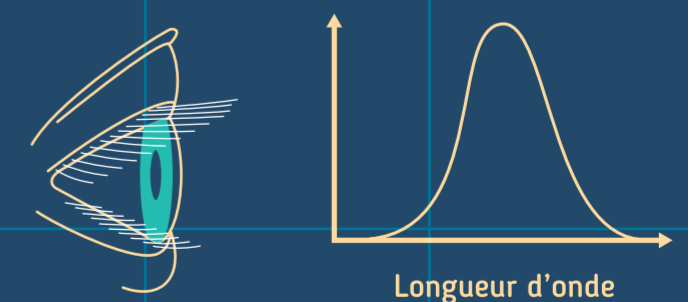


Fabriquer une lampe monochromatique à la fréquence précise de $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ce qui correspond à du vert.

Fabriquer un détecteur d'intensité lumineuse

C

Pour obtenir l'intensité pour d'autres couleurs, utiliser une « fonction de luminosité » qui donne la courbe de perception des couleurs par l'œil humain. Cette fonction n'est donc pas universelle mais liée à l'œil humain.



B

Régler la lampe pour que son efficacité lumineuse soit alors arbitrairement égale à la constante $K_{cd} = 683 \text{ lumens par Watt}$. L'intensité lumineuse de la lampe vaut alors 1 candela.

3 PARTAGER

Dupliquer la candela que vous avez fabriquée pour le monde entier.

