Chapitre d'introduction : Mesures, unités et analyse dimensionnelle

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre

Savoirs	Savoir-faire
Unités de base du système SI : nom, symbole, dimension associée. Notion de dimension d'une grandeur physique. Notion d'homogénéité d'une formule. Équations de base pour déterminer l'unité SI de certaines unités usuelles (Pa, J, N). Ordres de grandeur usuels.	Déterminer la dimension et l'unité SI d'une grandeur à partir d'une équation entre grandeurs. Retrouver la définition mathématique d'une grandeur simple à l'aide de son unité ainsi que le lien mathématique reliant des grandeurs simples. Vérifier l'homogénéité d'une formule. Prédire la forme d'une loi physique par analyse dimensionnelle. Définir un ordre de grandeur (durée, longueur) par analyse dimensionnelle d'une équation modélisant un phénomène. Effectuer des applications numériques correctes en faisant attention aux choix des unités. Savoir faire des conversions d'unité. Donner un résultat avec le bon nombre de chiffres significatifs. Être capable de faire des estimations rapides (de taille, masse, etc.).

Intérêts et limites de l'analyse dimensionnelle

L'analyse dimensionnelle permet :

- de **déterminer l'unité** d'une grandeur
- de **vérifier l'homogénéité** d'une formule mais ne permet pas de discriminer deux expressions littérales qui respectent l'analyse dimensionnelle
- permet de **prédire la forme d'une loi physique afin de trouver la solution à certains problèmes sans avoir à résoudre d'équation :** on peut pour de nombreux phénomènes physiques étudiés exprimer une grandeur caractéristique du phénomène et en déduire un ordre de grandeur

Conseils de rédaction

Pour une parfaite rédaction de vos résultats en devoir :

- Toujours donner un résultat sous forme d'expression littérale (sauf s'il est explicitement non demandé sous cette forme) : ainsi on peut vérifier l'homogénéité de la formule.
- Ne jamais remplacer une grandeur par sa valeur numérique avant d'avoir écrit l'expression littérale : sinon vous ne pourrez plus vérifier l'homogénéité de la formule.
- Vérifier l'homogénéité au fur et à mesure de vos calculs.
- Cependant si des constantes numériques interviennent dans une équation, il faut impérativement préciser les unités de toutes les autres grandeurs.
- Faire l'application numérique en vérifiant que les unités choisies sont compatibles.
- Donner le résultat numérique encadré avec le bon nombre de chiffres significatifs et l'unité.

Liens internet intéressants :

Site de la métrologie française : http://www.metrologie-francaise.fr/

Site du bureau international des poids et mesures : http://www.bipm.org/

Un article sur la réalisation du mètre de 1889 :
http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=14554

QCM de vérification des connaissances :

Cahier d'entraînement des prépas :

- tous les exercices de la fiche 1,
- fiche 26 : ex.26.1 à 26.4,
- 21.3,
- 21.14 question a,
- Fiche 22 : 22.9 question a, 22.11 question a,

I. Grandeurs physiques et systèmes d'unités

1. Définition

Grandeur physique :

Une **grandeur physique** est la propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence appelée unité.

La mesure d'une grandeur physique X peut donc toujours s'écrire sous la forme :

$$X = x \text{ unité}$$

avec :

x : un réel,
unité : l'unité choisie pour évaluer la grandeur X.

Remarques :

Ne pas confondre constante physique et constante mathématique :

Une constante mathématique est une valeur fixée quel que soit l'observateur. Par exemple, le rapport du périmètre d'un cercle à son diamètre est indépendant du choix qu'a fait l'observateur pour faire les mesures : $\pi \approx 3{,}14159$.

Une constante physique est une grandeur dimensionnée, c'est-à-dire qu'elle est suivie d'une unité. Elle est fixée mais dépend du choix de l'observateur. Exemple : la vitesse de la lumière dans le vide $c = 2{,}997.10^8\ \mathrm{m.s^{-1}}$, cependant un autre observateur pourra dire que cette vitesse n'a pas la même valeur numérique, sans se tromper : $c = 2{,}997.10^5\ \mathrm{km.s^{-1}}$.

2. Règles pour donner l'expression numérique d'une grandeur physique

L'expression numérique d'une grandeur physique doit toujours se faire selon les règles suivantes.

Règle 1 : il est impératif de préciser l'unité d'une grandeur physique.

Règle 2 : le résultat d'un calcul numérique doit être en accord avec la précision des données utilisées pour effectuer ce calcul, il faut respecter les règles sur les chiffres significatifs.

- Si **l'incertitude** sur la grandeur est connue : le résultat est donné **avec le même nombre de décimales** (chiffres **après la virgule**) que celle de l'incertitude (à condition d'avoir la même écriture scientifique de l'incertitude et de la grandeur).
- Sinon, on retiendra des **règles d'usage** :

Dans le cas de **multiplications** ou **divisions** : le résultat est donné avec **le même nombre de chiffres significatifs** que celui de la **donnée la moins précise**, en utilisant la notation scientifique.

Dans le cas d'**additions** ou **soustractions** : le résultat est donné **avec le même nombre de décimales** (chiffres **après la virgule**) que celui de la **donnée la moins précise** (à condition de garder la même puissance de 10).

Ne pas tenir compte du nb de chiffres des constantes mathématiques : ce sont des valeurs exactes.

$P = mg$ avec $m = 1028{,}0$ kg et $g = 9{,}81\ \mathrm{m.s^{-2}}$. Ne pas écrire $P = 10084{,}68$ N mais $P = 1{,}01.10^4$N

$M = m_1 + m_2$ avec $m_1 = 18{,}23$ g et $m_2 = 3{,}2$ g. Ne pas écrire $M = 21{,}43$ g, ni $M = 21$ g mais $M = 21{,}4$ g

On arrondit au plus proche chiffre (par convention le 5 est arrondi par excès), mais attention à effectuer les applications numériques avec les valeurs non arrondies : n'arrondissez que le résultat final.

3. Unités du système international

Mesurer une grandeur physique, c'est déterminer le rapport entre cette grandeur et une autre grandeur de même nature choisie comme unité. Pour construire un système « cohérent » il a fallu :

- **choisir un nombre minimal de grandeurs indépendantes** permettant de décrire l'ensemble des sciences physiques : à ces grandeurs sont associées les unités de base,
- **choisir la nature de ces grandeurs**, le but étant que les unités de base soient définies avec la meilleure précision possible : les unités de base sont définies à partir d'étalons fondamentaux (élément matériel, dont on utilise une certaine propriété),
- **choix des relations de définitions des grandeurs dérivées** : les unités sont coordonnées de façon telle que les coefficients numériques sont le plus souvent égaux à 1.

Jusqu'au XVIIIème siècle il n'existait aucun système de mesure unifié. En 1795, il existait en France plus de sept cents unités de mesure différentes. Ces unités n'étaient pas fixes : elles variaient d'une ville à l'autre, d'une corporation à l'autre, mais aussi selon la nature de l'objet mesuré. Les mesures de volume et celles de longueur n'avaient aucun lien entre elles. Pour chaque unité de mesure les multiples et sous multiples s'échelonnaient de façon aléatoire, ce qui rendait tout calcul extrêmement laborieux.

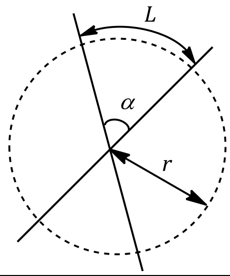
Nombre d'entre elles étaient empruntées à la morphologie humaine. Leur nom en conservait fréquemment le souvenir : le doigt, la palme, le pied, la coudée, le pas, la brasse, ou encore la toise, dont le nom latin tensa - de brachia - désigne l'étendue des bras.

Source d'erreurs et de fraudes lors des transactions commerciales, cette situation portait aussi préjudice au développement des sciences. À mesure que l'industrie et le commerce prenaient de l'ampleur, la nécessité d'une harmonisation se faisait de plus en plus pressante. Dans un premier temps la mesure des longueurs s'est unifiée grâce au système métrique : le mètre étant né en 1791. Et ce n'est qu'en 1960 qu'est né officiellement un système international définissant les 7 unités de base permettant de décrire l'ensemble des sciences physiques (*cf.* tableau 1). Depuis la plupart des constantes physiques universelles sont données dans les unités du système international.

Grandeur	Nom de l'unité	Symbole
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Intensité de courant électrique	ampère	A
Température	kelvin	K
Intensité lumineuse	candela	cd
Quantité de matière	mole	mol

Tableau 1 : Les unités du système international

A ces unités, on peut ajouter une unité dite complémentaire : bien que les angles soient des grandeurs sans unité, pour éviter des confusions (entre les degrés et les radians par exemple) on attribue à un angle plan l'unité complémentaire **radian**. La figure ci-contre rappelle la définition d'un angle plan en radian.



$$\alpha = \frac{L}{r}$$

Figure 1 : Définition d'un angle en radian

4. Unités composés

Les unités dérivées sont nombreuses et viennent compléter les unités de base. Elles peuvent avoir des noms spéciaux mais peuvent toujours être exprimées à partir des unités de base. La liste suivante n'est pas exhaustive et présente principalement les unités **(à connaître)** que nous seront amenées à utiliser dans l'année.

Grandeur : relation de définition		Expression en unités de base SI	Nom éventuel et symbole
Longueur	L	m	
Surface	$S = L^2$	$\mathrm{m^2}$	
Volume	$V = L^3$	$\mathrm{m^3}$	
Temps	T	s	
Vitesse	$v = L/T$	$\mathrm{m.s^{-1}}$	
Accélération	$a = v/T$	$\mathrm{m.s^{-2}}$	
Fréquence	$f = 1/T$	$\mathrm{s^{-1}}$	hertz (Hz)
Pulsation	$\omega = \text{angle}/T$	$\mathrm{rad.s^{-1}}$	
Masse	M	kg	
Masse volumique	$\rho = M/V$	$\mathrm{kg.m^{-3}}$	
Force	$F = Ma$	$\mathrm{kg.m.s^{-2}}$	newton (N)
Travail, énergie	E ou Q ou $W = FL$	$\mathrm{kg.m^2.s^{-2}}$	joule (J)
Puissance	$P = W/T$	$\mathrm{kg.m^2.s^{-3}}$	watt (W)
Pression	$p = F/S$	$\mathrm{kg.m^{-1}.s^{-2}}$	pascal (Pa)
Intensité de courant	I	A	
Charge	$q = IT$	A.s	coulomb (C)
Ddp, fem	e ou $U = P/I$	$\mathrm{kg.m^2.s^{-3}.A^{-1}}$	volt (V)
Résistance	$R = U/I$	$\mathrm{kg.m^2.s^{-3}.A^{-2}}$	ohm (Ω)
Conductance	$G = 1/R$	$\mathrm{kg^{-1}.m^{-2}.s^3.A^2}$	siemens (S)
Capacité	$C = q/U$	$\mathrm{kg^{-1}.m^{-2}.s^4.A^2}$	farad (F)

Tableau 2 : Quelques unités dérivées du système international

Enfin, chaque grandeur peut avoir à couvrir une vaste étendue de valeurs. Pour éviter d'avoir à utiliser des facteurs multiplicatifs ou des valeurs avec un grand nombre de zéros, on a recourt à des préfixes. Ces derniers vont permettre de couvrir une gamme allant de 10^{24} à 10^{-24} fois l'unité. Rappelons les multiples les plus utilisés.

Multiple	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{6}	10^{9}	10^{12}	10^{15}
Préfixe	femto	pico	nano	micro	milli	centi	déci	déca	hecto	kilo	méga	giga	téra	péta
Symbole	f	p	n	µ	m	c	d	da	h	k	M	G	T	P

Tableau 3 : Les multiples de 10

5. Quelques unités n'appartenant pas au système international

Cependant par habitude ou pour des raisons pratiques certaines unités n'appartenant pas au système international sont utilisées, en voici une liste non exhaustive (en **gras** les unités **à connaître** ou à savoir convertir rapidement, en *italique* celles que nous seront amené à utiliser mais dont la conversion vous sera toujours donnée).

Grandeur	Nom	Valeur en SI
Longueur Surface Volume	mille marin are **litre** unité astronomique année-lumière	1 852 m $1\ \mathrm{a} = 100\ \mathrm{m}^2$ $\mathbf{1\ L = 10^{-3}\ m^3}$ $1\ \mathrm{ua} \approx 1{,}50 \times 10^{11}\ \mathrm{m}$ $1\ \mathrm{al} = 9{,}461 \times 10^{15}\,\mathrm{m}$
Angle	**tour** **degré**	$\mathbf{1\ tr = 2\,\pi\ rad}$ $\mathbf{1\ ° = \pi / 180\ rad}$
Masse Énergie Pression	**gramme** **tonne** *unité de masse atomique* **wattheure** *électronvolt* *calorie* **bar** *torr (ou mm de mercure)* ***atmosphère***	$\mathbf{1\ g = 10^{-3}\ kg}$ $\mathbf{1\ t = 10^{3}\ kg}$ $1\ u = 1{,}66.10^{-27}\ kg$ $\mathbf{1\ Wh = 3\ 600\ J}$ $1\ eV = 1{,}6.10^{-19}\ J$ $1\ cal = 4{,}18\ J$ $\mathbf{1\ bar = 10^{5}\ Pa}$ $1\ \mathrm{mmHg} = 133{,}322\ \mathrm{Pa}$ $\mathbf{1\ atm} = 760\ mmHg$ $= \mathbf{1{,}013.10^{5}\ Pa}$
Temps vitesse vitesse angulaire	**minute** **heure** **jour** **kilomètre par heure** nœud **tour par seconde**	$\mathbf{1\ min = 60\ s}$ $\mathbf{1\ h = 3\ 600\ s}$ $\mathbf{1\ d = 86400\ s}$ $\mathbf{1/3{,}6\ m.s^{-1}}$ $1852 / 3600\ \mathrm{m.s^{-1}}$ $\mathbf{1\ tr.s^{-1} = 2\,\pi\ rad.s^{-1}}$
Température	**Degré Celsius**	$\boldsymbol{T/°C = T/K - 273{,}15}$

Tableau 4 : Quelques unités non SI

Exercice d'application 1

II. Dimensions des grandeurs physiques et homogénéité d'une équation

1. Dimension d'une grandeur

Il n'est pas aisé de donner une définition précise de la dimension d'une grandeur mais nous pouvons retenir ceci :

La dimension d'une grandeur correspond à ce que représente cette grandeur, elle renseigne sur sa nature. C'est une caractéristique plus générale que son unité dont le choix est adapté à l'échelle du phénomène étudié.

Bien que les deux soient liées, il importe de faire la distinction entre la **dimension** d'une grandeur physique et son **unité** :

Exemple : une distance a pour dimension une longueur mais peut s'exprimer dans différentes unités : m, cm, pouce, mille, parsec (échelle astronomique), angtröm (échelle atomique).

Deux grandeurs de même dimension peuvent être données dans des unités différentes. Cependant l'analyse de l'unité d'une grandeur permet de retrouver sa dimension (et inversement).

Par convention on donnera la dimension d'une grandeur en fonction de sept dimensions fondamentales (il y a autant de grandeurs fondamentales que d'unités de base). La dimension d'une grandeur G s'exprime sous la forme $\dim G = \mathbf{M}^{x}\,\mathbf{L}^{y}\,\mathbf{T}^{z}\,\boldsymbol{\theta}^{a}\,\mathbf{I}^{b}\,\mathbf{N}^{c}\,\mathbf{J}^{d}$ avec des nombres réels comme exposant (positifs ou négatifs).

Dimension fondamentale	masse	longueur	temps	intensité électrique	température	intensité lumineuse	quantité de matière
unité (SI)	kg	m	s	A	K	cd	Mol
symbole de la dimension	**M**	**L**	**T**	**I**	**θ**	**J**	**N**

Exercices d'application 2

Certaines grandeurs peuvent être sans dimension :

Une **grandeur purement numérique** est dite **sans dimension**. C'est le cas de toutes les grandeurs définies comme le rapport de deux grandeurs de même dimension.

Exemple : La densité d'un liquide (rapport entre sa masse volumique et la masse volumique de l'eau) est une grandeur sans dimension et sans unité.

2. Homogénéité d'une équation

Les relations mathématiques traduisant les lois physiques doivent être homogènes : ceci exige que **les deux membres possèdent la même dimension** (c'est-à-dire représenter la même grandeur).

La vérification de l'homogénéité d'une équation constitue une analyse dimensionnelle. Elle ne peut se faire que si l'expression est littérale, c'est-à-dire qu'aucune grandeur n'a été remplacée par sa valeur numérique (la vérification de l'homogénéité doit être indépendante du choix des unités). Pour qu'une équation soit homogène il faut vérifier les règles suivantes :

Exercice d'application 3, 4

- On ne peut additionner ou soustraire que des grandeurs de même dimension
- Les deux membres d'une égalité ou d'une inégalité doivent avoir la même dimension :

  Si $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B} + \boldsymbol{C}$, alors $\dim(\boldsymbol{A}) = \dim(\boldsymbol{B}) = \dim(\boldsymbol{C})$, mais $\dim(\boldsymbol{A}) \neq \dim(\boldsymbol{B}) + \dim(\boldsymbol{C})$, en effet une dimension ne s'additionne pas, il n'est donc pas correct d'écrire $\dim(\boldsymbol{B}) + \dim(\boldsymbol{C})$ (exemple : une masse de 2 kg additionnée à une masse de 3 kg est toujours une masse et non une « double masse ») add ou soust.

- Soient trois grandeurs A, B et C

  Si $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{C}$ alors $\dim(\boldsymbol{A}) = \dim(\boldsymbol{B}) \times \dim(\boldsymbol{C})$
  Si $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{C}^{-1}$ alors $\dim(\boldsymbol{A}) = \dim(\boldsymbol{B}) \times \dim(\boldsymbol{C})^{-1}$
  Si $\boldsymbol{A} = \boldsymbol{B}^{x} \times \boldsymbol{C}^{y}$ alors $\dim(\boldsymbol{A}) = \dim(\boldsymbol{B})^{x} \times \dim(\boldsymbol{C})^{y}$

- Un nombre réel est sans dimension.
- Les arguments des fonctions mathématiques (cosinus, exponentielle, logarithme…) sont sans dimension sin, tan
- Dimension d'une fonction dérivée :

$$\dim\left(\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}x}\right) = \frac{\dim(y)}{\dim(x)} \quad \text{et} \quad \dim\left(\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}x^2}\right) = \frac{\dim y}{(\dim x)^2}$$

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

$$\frac{dy}{dx}$$

D'autre part il faut que les deux membres de l'égalité (inégalité) appartiennent à la même catégorie d'objets mathématiques, ainsi :

Une grandeur vectorielle ne peut être égale à une grandeur scalaire.

Un élément différentiel (ou variation élémentaire c'est-à-dire infiniment petite) ne peut être égal à une variation macroscopique (finie) (notions que nous aborderons plus tard).

3. Détermination d'unités par analyse dimensionnelle

Exercices d'application 2, 4

L'analyse dimensionnelle peut aussi permettre de retrouver la dimension et l'unité d'une grandeur si l'on connait une équation liant cette grandeur à d'autres de dimension connue.

Pour certaines grandeurs il faut absolument connaître quelques **équations par cœur** afin de **retrouver rapidement leur dimension et leur unité**.

Pour retrouver la dimension et l'unité d'une force : $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ ou $\vec{P} = m\vec{g}$

Pour retrouver la dimension et l'unité d'une énergie : $E = mc^2$ ou $E_c = 1/2\, mv^2$

Pour retrouver la dimension et l'unité d'une pression : $p = F/S$

4. Prédiction d'une loi physique par analyse dimensionnelle – détermination d'un ordre de grandeur

L'analyse dimensionnelle peut permettre de **prédire la forme d'une loi physique afin de trouver la solution à certains problèmes sans avoir à résoudre d'équation** : on peut pour de nombreux phénomènes physiques étudiés exprimer une grandeur caractéristique du phénomène (notée G) en fonction des paramètres influençant le phénomène (notés p_i) sous la forme :

$$G = k \times p_1^a \times p_2^b \times \ldots$$

avec :

a, b, … des constantes sans dimension que l'on peut déterminer à l'aide de l'analyse dimensionnelle,
k une constante sans dimension qui ne peut pas être déterminée à l'aide de l'analyse dimensionnelle.

L'analyse dimensionnelle a ses limites car elle est loin de pouvoir résoudre tous les problèmes physiques et elle n'a pas valeur de démonstration car elle n'appuie pas son résultat sur les lois de la physique. Mais elle peut être une aide intéressante en amont de la résolution d'un problème ou d'une étude expérimentale car elle permet d'avoir une idée de ce que l'on va obtenir.

Méthode :

1. Faire la liste de tous les paramètres (indépendants les uns des autres) dont peut dépendre la grandeur caractéristique du phénomène : $p_1, p_2, \ldots$

2. Écrire la loi physique sous la forme : $G = k \times p_1^a \times p_2^b \times \ldots$

3. Écrire l'équation dimensionnelle correspondante : $\dim G = (\dim p_1)^a (\dim p_2)^b \ldots$

en définissant ensuite les dimensions de chaque grandeur à l'aide les dimensions fondamentales **M**, **L**, **T**, **N**,… (la constante k est sans dimension, elle n'apparaît donc pas dans l'équation dimensionnelle.)

4. Les deux membres doivent être de même dimension ainsi l'exposant de chaque dimension fondamentale doit être identique de part et d'autre de l'égalité. On en déduire ainsi autant d'équations qu'il y a de dimensions.

5. On résout le système d'équation dont les inconnues sont les exposants a, b, …

Exercice d'application 5

Cette méthode ne permet pas de déterminer la loi exacte car elle ne permet pas de déterminer la constante sans dimension k, mais l'expérience prouve que cette constante reste souvent de l'ordre de grandeur de l'unité (comprise généralement entre 0,1 et 10, elle fait souvent apparaître un multiple de π). Ainsi on peut déterminer **un ordre de grandeur** de la valeur de G, connaissant les valeurs numériques des paramètres influençant le phénomène.

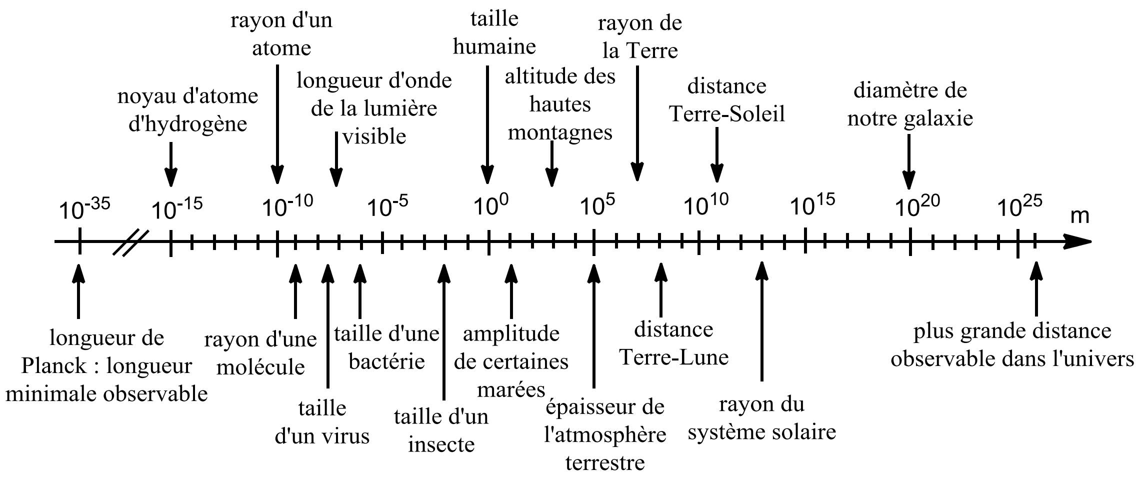
Un **ordre de grandeur** est une fourchette de valeurs. Celle-ci va, communément, d'un dixième à dix fois l'ordre de grandeur donné. Ainsi, si l'on dit que « l'ordre de grandeur est d'un mètre » cela signifie que la longueur de l'objet est entre 10 cm et 10 m.

Donner un ordre de grandeur signifie donc **donner une puissance de 10**.

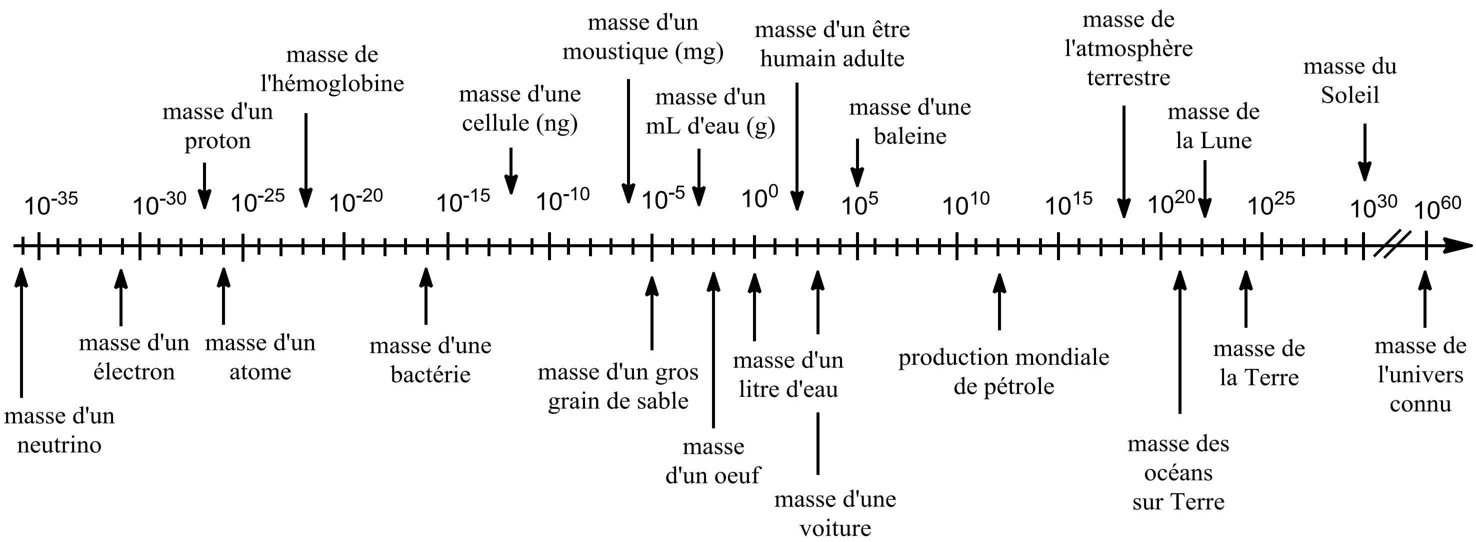
III. Quelques ordres de grandeur

Avant d'entamer un calcul ou la résolution d'un problème, il est important d'avoir en tête une idée, même approximative de la valeur du résultat. Ainsi on peut vérifier la cohérence du résultat numérique obtenu à la fin du raisonnement en comparant avec des ordres grandeurs connus. En voici quelques uns mais nous en introduirons d'autres pendant l'année.

Ordres de grandeur de longueur : en mètre



Ordres de grandeur de masse : en kg



Ordres de grandeur de masse volumique :

Masse volumique d'un solide : $10^3\ \mathrm{kg.m^{-3}}$
Masse volumique d'un gaz à pression atmosphérique et température ambiante : $1\ \mathrm{kg.m^{-3}}$

Ordres de grandeur de pression :

Pression atmosphérique : 10^5 Pa
Pression dans l'espace : $10^{-8} - 10^{-11}$ Pa
Pression au niveau des fosses océaniques : 10^8 Pa

Ordres de grandeur de temps :

Durée de vie de certaines particules : 10^{-24} s
Période d'une onde lumineuse dans le visible : 10^{-15} s
Période d'une onde sonore : 10^{-3} s
Temps de vol de la lumière Soleil-Terre : 10^3 s
Année solaire : 10^7 s
Vie humaine : 10^9 s
Age (supposé) de l'univers : 10^{18} s

IV. Un peu d'historique (pour information)

L'établissement d'un système de mesure universel s'est d'abord concentré sur l'unité de mesure des longueurs. L'idée des politiques et scientifiques du XVIII$^{\text{ème}}$ siècle a été d'assurer l'invariabilité des mesures en les rapportant à un étalon emprunté à un phénomène naturel, un étalon universel qui ne serait fondé sur aucune vanité nationale, permettant l'adhésion de toutes les nations étrangères. Plusieurs références étaient envisagées mais ce fut la longueur du quart du méridien terrestre qui fut choisi par une commission constituée par l'académie française des sciences de savants de renom (Borda, Condorcet, Lagrange, Lavoisier, Monge). Le 25 mars 1791 est donc né le mètre (du grec « metron » signifiant mesure), dont la longueur était établie comme égale à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre, méridien mesuré à l'époque en toise par deux astronomes : J.-B. Delambre et P. Méchain. Ainsi en 1799 est déposé aux Archives de la république un mètre-étalon en platine.

L'unité de mesure de base étant déterminée, il « suffisait » désormais d'établir toutes les autres unités de mesure qui en découlaient : le mètre carré et le mètre cube, le litre, le gramme.... Le système métrique décimal est alors institué le 7 avril 1795 par la loi « relative aux poids et mesures ». Il s'agit d'un bouleversement majeur des pratiques humaines. La décimalisation introduisait une véritable révolution dans le calcul des surfaces et des volumes. Tout passage d'une surface multiple à un sous-multiple, s'opère par simple glissement de la virgule décimale de deux rangs, de trois rangs s'il s'agit de volume.

De même une commission est chargée de déterminer un étalon pour l'unité de masse, qui sera défini comme la masse d'un décimètre cube d'eau à la température de la glace fondante. Un étalon en platine sera aussi déposé aux Archives de France (maintenant conservé au pavillon de Breteuil à Sèvres). Le système métrique se propage ensuite hors de France et le Bureau international des poids et mesures (BIPM installé au pavillon de Breteuil) est créé en 1875, lors d'une conférence internationale diplomatique aboutissant à la signature de la « convention du mètre » par 17 états. Depuis régulièrement une conférence rassemble des délégués des états membres (la Conférence générale des poids et mesures CGPM) afin de prendre les décisions en matière de métrologie. C'est par ailleurs la 11$^{\text{ème}}$ conférence générale des poids et mesures, en 1960, qui permettra de définir le système international d'unité (SI) actuel.

Les définitions des unités de base du SI ont évolué au cours de l'histoire dès que les besoins de précision n'étaient plus satisfaits. Les méthodes de mesure et les étalons eux-mêmes progressent et se renouvellent constamment. Les travaux concernant les étalons fondamentaux, effectués notamment par les laboratoires nationaux de métrologie et par le BIPM, ne connaîtront sans doute jamais de fin. Voici pour information les étalons actuels des sept unités de base du SI.

Étalons fondamentaux (SI révisé en novembre 2018) :

Figure 1 : prototype du kilogramme en platine iridié déposé au Pavillon de Breteuil à Sèvres

- Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière en 1/299 792 458 seconde.
- 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.
- Le kilogramme était la masse du prototype en platine iridié déposé au Pavillon de Breteuil à Sèvres, mais depuis le 16 novembre 2018 il est défini à partir de la constante de Planck h : $h = 6{,}62607015 \, . \, 10^{-34}\ \mathrm{kg.m^2s^{-1}}$
- L'ampère était défini comme l'intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 m l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de 2.10^{-7} Newton par mètre de longueur. Il est maintenant défini en fixant la valeur numérique de la charge élémentaire $e = 1{,}602176634.10^{-19}$ A.s
- Le kelvin était défini comme la fraction 1 / 273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. La nouvelle définition de 2018 a pour objectif de respecter cette valeur, mais en l'ancrant sur une valeur fixée de la constante de Boltzmann $k_{\mathrm{b}} = 1{,}380649.10^{-23}$ J.K
- La mole était défini comme la quantité de matière contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12g de carbone 12. Elle est maintenant définie comme la quantité de matière d'un système contenant exactement $6{,}02214076.10^{23}$ entités élémentaires (atomes, ions, molécules, etc.)
- La candela est l'intensité lumineuse du rayonnement monochromatique de fréquence 540.1012 hertz, correspondant à une intensité énergétique de 683 watts dans une direction définie par un angle solide de 1 stéradian.

La révision du système SI adoptée lors de la 26$^{\text{ème}}$ conférence générale des poids et mesures de novembre 2018 avait pour but de redéfinir certaines unités en s'appuyant sur des constantes de la nature.