

*Il est incroyable que nous puissions tant alors que nous ne savons que si peu. Einstein*

### **I- Concepts et lois physiques**

Le but de la physique est de comprendre les événements naturels. Il s'agit d'identifier ce qui dans les phénomènes naturels est reproductible, les règles, les rythmes.

Nous sommes ainsi amenés à définir des concepts physiques, de les comparer entre eux, d'analyser leurs évolutions. C'est pourquoi, nous associons à chacun de ces concepts, un ou des nombres mesurables qui permettent de caractériser chacune des propriétés du concept ainsi défini.

Exemples :

	Définition	Caractéristiques
Couleur		
Onde		
Mouvement		
Particule		
Courant électrique		

Enfin,

- Plusieurs caractéristiques d'un même objet peuvent être liées entre elles ;
- Des objets physiques différents sont susceptibles d'interagir et ainsi de se transformer. Ces transformations s'observent par les modifications d'une ou plusieurs de leurs caractéristiques mesurées.

Toutes ces relations définissent des lois physiques.

C'est pourquoi lorsqu'on se trouve face à un problème physique :

- Il faut d'abord **identifier les objets physiques** concernés ;
- Ensuite **poser les lois physiques associées** qui peuvent permettre de rendre compte des évolutions observées ;
- **Formuler des hypothèses**, adapter toutes les données qui interviennent dans les équations posées.
- Eventuellement résoudre les équations pour **répondre aux questions posées** ou **trouver les inconnues** recherchées. Les solutions ainsi formulées doivent être **confrontées aux hypothèses** formulées et aux données identifiées.

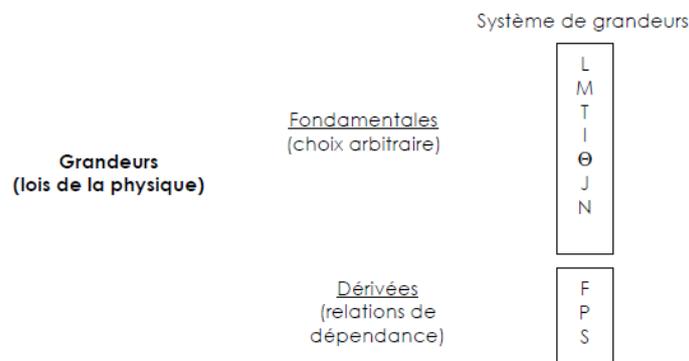
En conclusion, une grandeur physique désigne une propriété ou une qualité caractérisant un système physique, susceptible de varier (de manière continue ou discontinue) et à laquelle on s'efforce de faire correspondre :

- soit un nombre : grandeur **scalaire** : m, U, t, q, ℓ...
- soit un vecteur : grandeur **vectorielle** :  $\vec{v}$ ,  $\vec{F}$ ,  $\vec{r}$ .

Remarque 1 : un vecteur désigne 3 nombres ou encore trois propriétés (sens, direction et valeur).

Remarque 2 : à chacun des objets mathématiques (scalaire et vecteur) correspond des opérations particulières.

## II - Analyse dimensionnelle



**La dimension d'une grandeur  $G$**  est la relation permettant d'exprimer la grandeur  $G$  comme une combinaison de grandeurs fondamentales L, M, T ... :

$$G = k L^\alpha M^\beta T^\gamma \dots$$

L' équation aux dimensions ou dimension de  $G$  :

$$[G] = [L]^\alpha [M]^\beta [T]^\gamma \dots$$

Exemples : donner la dimension des grandeurs suivantes :

	Notation	Unité usuelle	Dimension	Unité du système international
Vitesse				
Accélération				
Energie				
Force				
Volume				
Pression				
Constante de gravitation				

Conseil (ou plutôt obligation !) : conserver les expressions littérales dans les calculs.

	Grandeurs G		Unités	
	nom	dimension	nom	symbole
F o n d a m e n t a l e s	Longueur	L	mètre	m
	Masse	M	kilogramme	kg
	Temps	T	seconde	s
	Intensité de courant électrique	I	ampère	A
	Température Thermodynamique	θ	kelvin	K
	Intensité lumineuse	J	candela	cd
	Quantité de matière	N	mole	mol
S u p p l é m e n t a i r e s	Angle plan		radian	rad
	Angle solide		stéradian	sr

UNITES FONDAMENTALES S.I.		
Mécanique	m	longueur : mètre
	kg	masse : kilogramme
	s	temps : seconde
Electricité	A	intensité du courant : ampère
Thermodynamique	K	température : Kelvin
Photométrie	Cd	intensité lumineuse : candela
Chimie	mol	quantité de matière : mole

Facteur multiplicatif	Préfixe	Symbole
10 <sup>18</sup>	exa	E
10 <sup>15</sup>	peta	P
10 <sup>12</sup>	téra	T
10 <sup>9</sup>	giga	G
10 <sup>6</sup>	méga	M
10 <sup>3</sup>	kilo	k
10 <sup>2</sup>	hecto	h
10 <sup>1</sup>	déca	da
—	—	—
10 <sup>-1</sup>	déci	d
10 <sup>-2</sup>	centi	c
10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>-6</sup>	micro	μ
10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>-12</sup>	pico	p
10 <sup>-15</sup>	femto	f
10 <sup>-18</sup>	atto	a

### EXERCICE :

a) Coefficient de viscosité.

Pour caractériser la nature de l'écoulement, visqueux ou turbulent, d'un fluide dans une canalisation on définit un nombre appelé nombre de Reynolds  $\hat{R}$ .

$$\mathcal{R} = D \cdot v \cdot \rho / \eta$$

ou D est le diamètre de la canalisation

v la vitesse du fluide

ρ la masse volumique du fluide

$\mathcal{R}$  nombre sans dimension

Déduire de l'équation aux dimensions celle du coefficient de viscosité du fluide η .

b) Analyse dimensionnelle.

L'expérience a montré que la force subie par une sphère immergée dans un fluide en mouvement dépend :

- du coefficient de viscosité  $\eta$  du fluide ;
- du rayon  $r$  de la sphère ;
- de leur vitesse relative  $v$  ;

Trouver l'expression de cette force en la supposant de la forme :  $F = k \cdot \eta^x \cdot r^y \cdot v^z$  ( $k$  est un coefficient numérique sans dimension).

### III- Erreurs et incertitudes sur la mesure d'une grandeur

#### 1 - Définitions

- Valeur vraie : toute grandeur physique  $G$ , dans des conditions expérimentales fixées, a une valeur parfaitement définie  $g_v$  qui est inconnue à l'expérimentateur.
- Le résultat de mesure  $g_m$  (appelé le **mesurage** en métrologie) d'une grandeur  $G$  est le résultat numérique obtenu en affectant le résultat brut donné par un instrument de mesure d'un certain nombre de corrections convenables. C'est une valeur approchée dont on voudrait bien connaître le degré d'approximation.

#### 2 - Erreurs

On suppose la grandeur  $G$  définie avec une approximation bien meilleure que celle que permet d'atteindre l'appareillage utilisé, ce cas permet de parler d'une valeur vraie  $g_v$  de la grandeur  $G$ . Soit  $g_m$  le résultat d'une mesure de la grandeur  $G$ .

On appelle :

- **Erreur absolue** du résultat de mesure (positif ou négatif ou encore par excès ou par défaut) défini par :  $g_m - g_v$ .
- **Erreur relative** du même résultat de mesure le réel :  $\frac{g_m - g_v}{g_v}$ .
- **Erreur systématique** est une erreur qui prend la même valeur lors de chaque mesure :

**l'erreur systématique doit être identifiée et caractérisée au mieux afin de s'en affranchir.**

Exemples : instrument mal étalonné, vieillissement de composants électroniques, effets des grandeurs d'influence ( $T$ ,  $p$ , ...), mauvaise méthode ou mauvais mode opératoire.

- **Erreur aléatoire** : erreur qui prend une valeur différente lors de chaque mesure.

Exemple : influence de l'opérateur (erreur de lecture, ajustage d'un niveau,...), mesurande mal définie (irrégularité de l'épaisseur d'une pièce, ..), instabilité d'un instrument de mesure (balance, pHmètre).

**L'erreur aléatoire peut être réduite en augmentant le nombre de mesures.**

#### 3 - Incertitude sur une grandeur très bien définie

On appelle : - **incertitude absolue du résultat de mesure** :

- valeur positive
- notée  $U(g)$  (uncertainty en anglais)
- qui caractérise une limite supérieure raisonnable de la dispersion des résultats d'une mesure ;

- **incertitude relative (ou précision) du même résultat** : une limite supérieure raisonnable de la valeur absolue de l'erreur relative  $\frac{U(g)}{g}$  entachant ce résultat.

**Le taux d'incertitude caractérise la qualité d'une mesure.** L'approximation est d'autant meilleure que l'incertitude relative est plus petite.

<b>Incertitude de type A :</b> série de mesures indépendantes pour une même grandeur, méthode statistique.	<b>Incertitude de type B :</b> une seule mesure effectuée pour une même grandeur.
Valeur retenue : moyenne arithmétique.	<b>Appareil numérique :</b> (Exemple : multimètre numérique, indication de la précision dans la notice) $U(g) = \frac{\text{précision (\% \times \text{lecture} + \text{digit})}}{\sqrt{3}}$
Ecart-type expérimental : $\sigma_e$	<b>Appareil analogique, règle ...</b> Avec une plus petite graduation : d $U(g) = \frac{d}{\sqrt{12}} \text{ (simple erreur de lecture)}$ $U(g) = \frac{d}{\sqrt{6}} \text{ (double erreur de lecture)}$

Incertitude élargie : $U(g) = k \cdot \frac{\sigma_e}{\sqrt{n}}$ k est le facteur de Student et rend compte : <ul style="list-style-type: none"> <li>de l'influence sur l'incertitude du nombre n de mesures effectuées ;</li> <li>de l'intervalle de confiance recherché.</li> </ul>	Autre instrument (avec précision/tolérance du constructeur) : $U(g) = \frac{\text{tolérance}}{\sqrt{3}}$ Exemple : fiole jaugée, pipette jaugée, ...
--	--

Student t Table						
Degrees of Freedom	Confidence Interval					
	80% t <sub>.90</sub>	90% t <sub>.95</sub>	95% t <sub>.975</sub>	98% t <sub>.99</sub>	99% t <sub>.995</sub>	99.73% t <sub>.9985</sub>
1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	235.800
2	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	19.207
3	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	9.219
4	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	6.620
5	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.507
6	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.904
7	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.530
8	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.277
9	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.094
10	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.975
11	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.850
12	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.764
13	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.694
14	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.636
15	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.586
16	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.544
17	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.507
18	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.475
19	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.447
20	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.422
25	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.330
30	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.270
40	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.199
60	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.110

**Composition des incertitudes :**  $U(g) = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$

<b>Mesures indirectes</b>	
$g = g_1 + g_2$ ou $g = g_1 - g_2$ .	$U(g) = \sqrt{U(g_1)^2 + U(g_2)^2}$
$g = g_1 \times g_2$ ou $g = g_1/g_2$	$\frac{U(g)}{g} = \sqrt{\left(\frac{U(g_1)}{g_1}\right)^2 + \left(\frac{U(g_2)}{g_2}\right)^2}$
$g = A \times g_1$ où A est un nombre exact.	$U(g) = A \times U(g_1)$

#### 4- Expression d'un résultat :

$$g = (g_m \pm U(g_m))$$

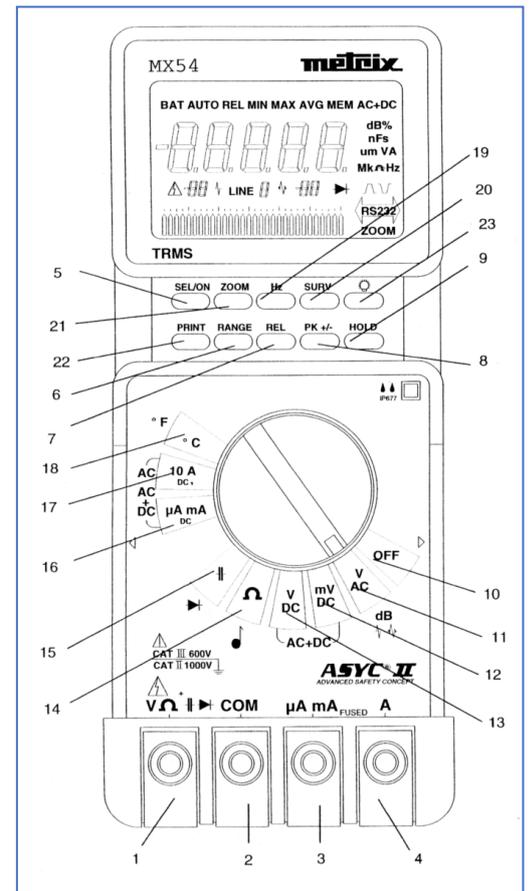
- L'incertitude absolue s'exprime avec au maximum 2 chiffres significatifs.
- La valeur de l'incertitude est arrondie systématiquement par excès.
- Le dernier chiffre significatif de la grandeur mesurée a la même position décimale que celui de l'incertitude.

#### IV- Exemples

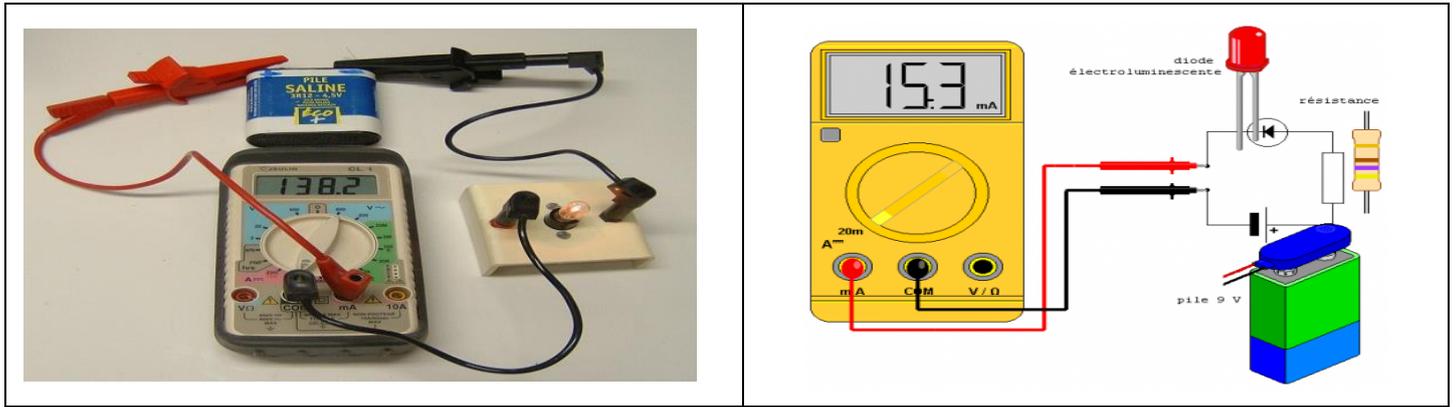
##### 1- Mesures et conventions dans un circuit électrique

###### • Courant électrique

- Le sens conventionnel du courant est celui des porteurs de charges positives.
- L'intensité  $i$  du courant à travers une section  $S$  du circuit, est la quantité de charge électrique qui traverse  $S$  par unité de temps. Unité : **Ampère**.
- Tout dipôle traversé par un même courant constitue un **montage en série**.
- A une branche d'un circuit, nous faisons correspondre un sens positif du courant :
  - si le courant parcourt la branche dans le sens positif,  $i > 0$  ;
  - si le courant parcourt la branche dans le sens négatif,  $i < 0$  ;
- L'intensité du courant est directement mesurée avec un ampèremètre branché en série : l'affichage de la valeur mesurée prend pour convention d'orientation le sens pénétrant dans la borne noté « A » ou « mA » et sortant de la borne « COM ».



Préciser ci-dessous le sens réel du courant, la valeur de l'intensité ainsi que l'imprécision sur cette mesure :



## MULTIMETRE METRIX MX54

### Tensions continues

Position du commutateur	Gammes	Précision	Impédance d'entrée	Protection	Résolution
mV	500 mV	0,05%L+2UR	10 MΩ/1GΩ*	±1100 V <sub>PK</sub> **	10 μV
	5 V	0,05%L+2UR	11 MΩ	±1100 V <sub>PK</sub>	100 μV
V <sub>DC</sub>	50 V	0,05%L+2UR	10 MΩ	±1100 V <sub>PK</sub>	1 mV
	500 V	0,05%L+2UR	10 MΩ	±1100 V <sub>PK</sub>	10 mV
	1000 V	0,05%L+2UR	10 MΩ	±1100 V <sub>PK</sub>	100 mV

### 5.2. Tensions alternatives (AC et AC + DC)

Position commutateur	Gammes	Précision					Impédance d'entrée	Protection	Résolution
		DC*	40 Hz à 1 kHz	1 kHz à 4 kHz	4 kHz à 10 kHz	10 kHz à 30 kHz			
			5% à 100% du calibre	10% à 100% du calibre					
mV + SEL/ON	500 mV *		1%L +30UR	5%L +30UR	//////////	//////////	10MΩ/1GΩ** //100pF	±1100 V <sub>PK</sub> ***	10 μV
V <sub>AC</sub>	5 V	0,3%L+30UR	0,5%L + 30UR	1%L+30UR	2,5%L+50UR	//////////	11MΩ/100pF	±1100 V <sub>PK</sub>	100 μV
ou V <sub>DC</sub>	50 V						10MΩ/100pF	±1100 V <sub>PK</sub>	1 mV
+SEL/ON	500 V						10MΩ/100pF	±1100 V <sub>PK</sub>	10 mV
	750 V		//////////	//////////	//////////	//////////	10MΩ/100pF	±1100 V <sub>PK</sub>	100 mV

### Courants alternatifs (AC et AC + DC)

Gammes	Précision	Protection	Fusibles*	Résolution
	DC**			
	40 Hz à 5 kHz			
	5% à 100% du calibre			
500 μA	0,75% L + 30 UR	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	10 nA
5 mA	0,6% L + 30 UR	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	100 nA
50 mA		600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	1 μA
500 mA	0,7% L + 30 UR	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	10 μA
10 A	1% de la pleine échelle	600 V <sub>RMS</sub>	F2	1 mA

### Courants continus

Position commutateur	Gammes	Précision	Chute de tension max	Protection	Fusibles*	Résolution
μA mA	500 μA	0,2%L+5UR	700 mV	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	10 nA
	5 mA	0,2%L+2UR	700 mV	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	100 nA
	50 mA	0,05%L+2UR	700 mV	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	1 μA
	500 mA	0,2%L+2UR	1,5 V	600 V <sub>RMS</sub>	F1 + F2	10 μA
10 A	10 A	0,5%L+5UR	500 mV	600 V <sub>RMS</sub>	F2	1 mA

Gammes	Précision	Courant de mesure	Protection *	Résolution
500 Ω/Ω	0,07%L+5UR	1 mA	600 V <sub>RMS</sub>	10 mΩ
5 kΩ	0,07%L+2UR	100 μA	600 V <sub>RMS</sub>	100 mΩ
50 kΩ	0,07%L+2UR	10 μA	600 V <sub>RMS</sub>	1 Ω
500 kΩ	0,07%L+2UR	1 μA	600 V <sub>RMS</sub>	10 Ω
5 MΩ	0,3%L+2UR	100 nA	600 V <sub>RMS</sub>	100 Ω
50 MΩ	1%L+2UR	10 nA	600 V <sub>RMS</sub>	1 kΩ

- **Tension électrique**

➤ En tout point d'un circuit, il existe une grandeur notée  $V$  qui mesure la capacité à faire circuler un courant électrique :  $V$  est appelé le **potentiel électrique** en ce point. Si entre deux points il existe une **différence de potentiel ou tension  $u$** , un courant est susceptible de circuler du potentiel le plus fort vers le potentiel le plus faible **si le circuit est fermé**.

$u$  s'exprime en **volt (V)**.

➤ Une tension se mesure avec un **voltmètre** : si la borne du voltmètre notée «  $V$  » est branchée en un point  $A$  du circuit et la borne «  $COM$  » branchée en un point  $B$ , on mesure alors la tension :

$$u_{AB} = V_A - V_B.$$

➤ La masse d'un circuit est le point servant de référence du circuit ( $V_M = 0 \text{ V}$ ).

Remarque : la masse « signal » est distincte de la masse « carcasse » reliée à la terre.

**Mesure de la résistance  $R$  d'un conducteur ohmique.**

Pour certains dipôles, la résistance d'un conducteur ohmique est le coefficient de proportionnalité entre la tension à ses bornes et l'intensité du courant qui le traverse :

$$R = \frac{U}{I}.$$

On mesure avec le même multimètre précédent :

$U = 4,00 \text{ V}$  ;

$I = 0,8321 \text{ mA}$

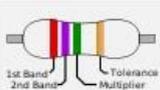
pour un conducteur ohmique dont le code couleur est de gauche à droite :

jaune/violet/ /rouge//argent.

La lecture à l'ohmmètre donne la valeur  $4688,9 \Omega$ .

Toutes ces valeurs sont-elles cohérentes ?

Quelle est la mesure de  $R$  la plus précise ?

	1 <sup>er</sup> anneau gauche	2 <sup>e</sup> anneau gauche	3 <sup>e</sup> anneau gauche*	Dernier anneau gauche	Anneau droite
Couleur	1 <sup>er</sup> chiffre	2 <sup>e</sup> chiffre	3 <sup>e</sup> chiffre	Multiplicateur	Tolérance
noir	0	0	0	$10^0=1$	
marron	1	1	1	$10^1$	$\pm 1 \%$
rouge	2	2	2	$10^2$	$\pm 2 \%$
orange	3	3	3	$10^3$	
jaune	4	4	4	$10^4$	
vert	5	5	5	$10^5$	$\pm 0,5 \%$
bleu	6	6	6	$10^6$	$\pm 0,25 \%$
violet	7	7	7	$10^7$	$\pm 0,10 \%$
gris	8	8	8	$10^8$	$\pm 0,05 \%$
blanc	9	9	9	$10^9$	
or				0,1	$\pm 5 \%$
argent				0,01	$\pm 10 \%$
(absent)					$\pm 20 \%$



2. Mesure d'une durée (Record local de durée d'un 100m :  $t_{ref} = 9,58s$ )

t(s)	9,34	9,35	9,34	9,72	9,38	9,41	9,69	9,37	9,35	9,40	9,43	9,59	9,38	9,40	9,43	9,44	9,37	9,34
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

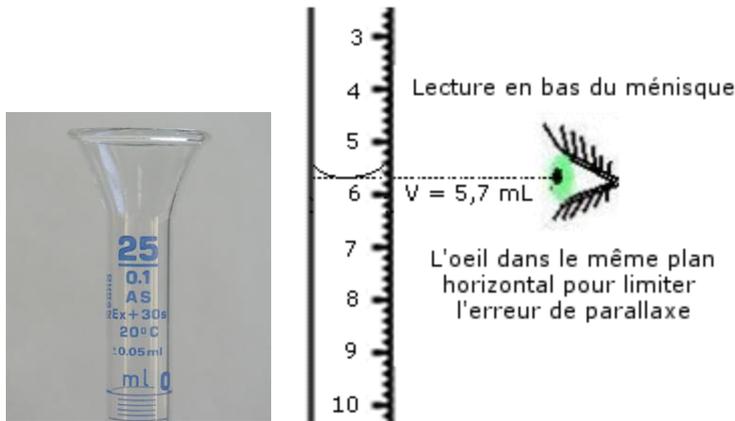
- Résultat retenu et incertitude sur cette valeur.
- Commentaires

3. Mesure d'une distance (largeur d'un terrain de tennis :  $L_{ref} = 10,97m$ )

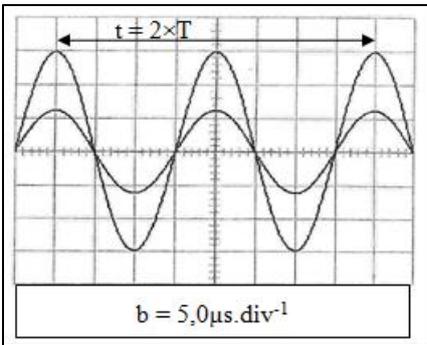
L (m)	10,94	11,01	10,99	11,00	10,95	10,98	10,95	10,95	10,97	10,96	10,98	10,94
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

- Résultat retenu et incertitude sur cette valeur.
- Commentaires

4. Recenser les sources d'erreurs liées à l'utilisation d'une burette graduée au dixième de millilitre

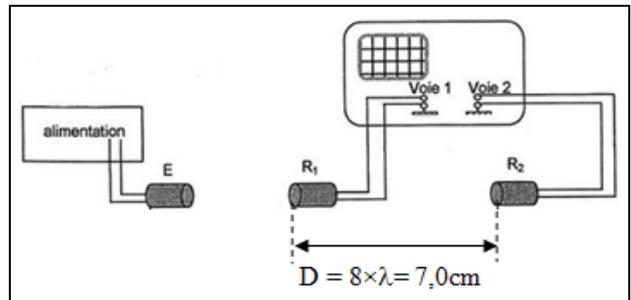


- Evaluer l'incertitude associée.



Exemple 6 - mesure indirecte de la célérité onde ultrasonore :  $v = \lambda$

- Valeur de la célérité
- Incertitudes :

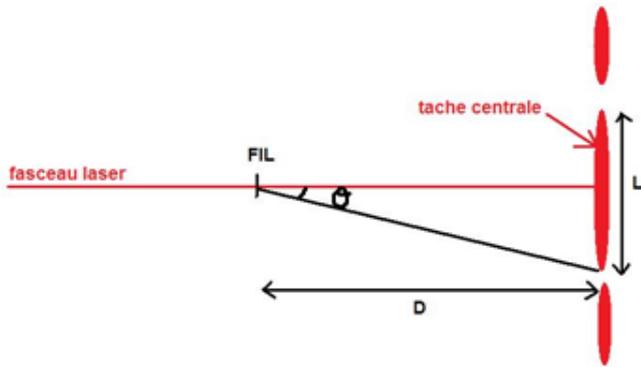


d'une / T

Incertitude	formule	calcul
Incertitude sur la mesure de t		
Incertitude sur la mesure de T		
Incertitude sur la mesure de D		
Incertitude sur la mesure de $\lambda$		
Incertitude sur la mesure de v		

- Résultat retenu

5. Mesure indirecte de l'épaisseur d'un fil :  $a = 2 \times \lambda \times D / L$



La mesure de la distance D se fait avec un décimètre gradué au centimètre.

La mesure de la largeur de la tache de diffraction se fait avec une règle graduée au demi-millimètre

La longueur d'onde du Laser ( $\lambda=632,9\text{nm}$ ) est connue avec une très grande précision.

➤ Mesures :

D(m)	2,01	2,02	2,01	2,00	2,01	2,00	2,03	2,01	2,02
L(mm)	25,0	26,5	27,0	23,5	24,0	25,5	24,5	26,0	24,5

➤ Valeur de l'épaisseur du fil retenu

➤ Incertitudes :

Incertitude	formule	calcul
Incertitude de répétabilité sur la mesure de D		
Incertitude liée à l'instrument sur la mesure de D		
Incertitude sur la mesure de D		
Incertitude de répétabilité sur la mesure de L		
Incertitude liée à l'instrument sur la mesure de L		
Incertitude sur la mesure de L		
Incertitude sur la mesure de a		