Chapitre 1

Mesures et incertitudes en physique

1.1 Introduction

1.1.1 Erreur

Lorsqu'on mesure une grandeur physique x on trouve une ***valeur mesurée*** x_m. Si on note X la ***varie*** valeur de x, l'***erreur*** de mesure est :

$$\boxed{\text{Erreur} = |X - x_m|}$$

En pratique, la vraie valeur d'une grandeur est toujours inconnue (sinon, il serait inutile de faire la mesure), on ne peut donc en déduire l'erreur.

1.1.2 Types d'erreurs

Il y a deux types d'erreurs : erreur aléatoire et erreur systématique.

1.1.2.1 Erreur aléatoire

✓ **Exemple** : Dans l'expérience précédente, on constate qu'en répétant les mesures on trouve des résultats légèrement différents, dus surtout aux retards de déclenchement qui vont réduire ou accroître la valeur mesurée. On parle d'*erreur aléatoire*.

✓ Les erreurs aléatoires peuvent provenir :
- du contrôle imparfait des conditions expérimentales dans lesquelles s'effectue la mesure ;
- de faibles perturbations provenant du dispositif de mesure (ex : vibrations mécaniques, ...) ;
- des variations des grandeurs extérieures (température, pression,....).
- ...etc.

✓ Les erreurs aléatoires sont détectées et caractérisées par une étude *statistique*.

✓ Elles peuvent être réduites en augmentant le nombre de mesures.

1.1.2.2 Erreur systématique

✓ L'erreur systématique peut être considérée comme une erreur *constante* qui affecte *chacune* des observations de la *même* manière.

Exemple : Si le chronomètre dans l'expérience précédente n'est pas calibré, il va ajouter (ou retrancher) la même durée à toutes les mesures.

✓ Il existe de nombreuses sources d'erreurs systématiques, comme par exemple :
- l'effet des grandeurs d'influence (température, pression,....) ;
- l'erreur de justesse des instruments (décalage du zéro par exemple, chronomètre mal calibré,...) ;
- la position de l'objet mesuré. Exemple : erreur de parallaxe
  c-à-d, l'angle qui peut exister entre la direction du regard d'un observateur et la perpendiculaire à une graduation amenant une lecture inexacte de la mesure faite.
- la perturbation due à la présence des instruments.
- ... etc

✓ L'erreur systématique ne peut être réduite que par l'application d'une *correction*.

✓ Pour détecter et évaluer ces erreurs, on peut par exemple :
- mesurer la même grandeur avec un instrument différent ;
- mesurer la même grandeur avec des méthodes différentes ;
- ...

On voit que les erreurs aléatoires se repèrent encore facilement mais impossible de savoir s'il y a des systématique systématiques (car on ne connaît pas la position de la cible).

1.1.3 Incertitude

✓ L'incertitude Δx d'une mesure définit *un intervalle autour de la valeur mesurée qui inclut la valeur vraie* avec une *probabilité* donnée (ou niveau de confiance).

✓ Puisque l'incertitude est définie positive ($\Delta x > 0$), les bornes de l'intervalle d'incertitude sont :
- $x_{\max} = x_m + \Delta x$: la valeur probable la plus élevée ;
- $x_{\min} = x_m - \Delta x$: la valeur probable la plus faible.

soit :

$$\boxed{x_m - \Delta x \leq x \leq x_m + \Delta x}$$

✓ Le résultat de la mesure de la grandeur x est présenté sous la *forme standard* suivante :

$$\boxed{x = x_m \pm \Delta x \quad \text{(unité)}}$$

Δx est l'incertitude sur la mesure, appelée aussi *incertitude absolue*.

Remarque : On doit écrire les unités après l'incertitude.

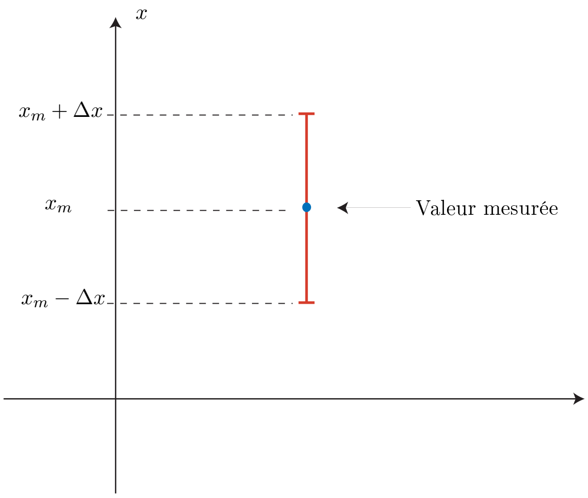
Exemple : Un étudiant mesure la longueur d'une table. Il trouve comme meilleur résultats $L_m = 110$ mm avec un intervalle probable allant de 108 mm à 112 mm. Exprimer ce résultat sous la forme standard.

Réponse : La longueur de la table est :

$$L = 110 \pm 2\,\text{mm}$$

✓ **Représentation graphique d'un résultat :**

Sur un graphe, on représente l'incertitude par une barre, appelée *barre-d'erreur*, dont la longueur est $2\Delta x$:



1.1.4 Incertitude relative

Considérons la mesure d'une grandeur x :

$$x = x_m \pm \Delta x$$

L'incertitude absolue Δx indique la précision de la mesure en relation avec la taille de x_m. Pour donner plus de sens à l'incertitude indépendamment de l'ordre de grandeur de x_m, on définit l'*incertitude relative* (ou la précision) :

$$\boxed{\text{Incertitude relative} = 100\frac{\Delta x}{x_m}}$$

exprimée en pourcentage (%) avec 1 ou 2 chiffres significatifs.

La mesure exprimée avec l'incertitude relative s'écrit avec les unités après la mesure, par exemple : $\underline{L = 17 \text{ cm à } 3\ \%}$.

Par exemple, lorsqu'on dit qu'une incertitude sur une mesure d'une longueur L vaut $\Delta L = 2$ cm, alors :
- si $L_m = 200$ km (distance entre deux villes par exemple), cette mesure est très précise : l'incertitude relative est $\frac{\Delta L}{L_m} = 10^{-7}$ ou 0,00001%
- par contre, si $L_m = 4$ cm, la mesure est mauvaise : l'incertitude relative est $\frac{\Delta L}{L_m} = 0,5$ ou 50 % !

En générale :
- Une incertitude relative de 10 % caractérisent une mesure assez grossière (précision moyenne).
- Une incertitude relative de 1 % ou 2 % traduit une bonne mesure (bonne précision).

1.2 Présentation du résultat d'une mesure

1.2.1 Chiffres significatifs

✓ Lorsqu'on écrit le résultat d'une mesure, on doit porter une grande attention au nombre de chiffres qui apparaissent dans le résultat numérique. Ces chiffres sont dites chiffres significatifs (**c.s**).

Les chiffres significatifs d'une mesure sont les *chiffres certains* et le *premier chiffre incertain*.

✓ Les chiffres significatifs nous renseignent sur la ***précision de la mesure***.

Par exemple, lorsqu'on écrit un résultat de mesure comme : $x = 1258$, il y a quatre chiffres significatif. Le premier chiffre incertain est le 8.

Lorsqu'on présente le résultat final d'une mesure sous la forme $x_m \pm \Delta x$, on doit respecter le nombre de chiffres significatifs.

1.2.2 Règles des chiffres significatifs

Dans un nombre décimal, tous les chiffres écrits sont significatifs sauf les zéros à gauche

Exemples :
- 17,3 a 3 chiffres significatifs (la virgule n'intervient pas).
- 0,0020 a 2 chiffres significatifs.
- 7,100 a 4 chiffres significatifs.

En notation scientifique, les chiffres de la puissance de 10 ne sont pas significatifs.

Exemples : $1{,}33 \times 10^6$ a 3 chiffres significatifs.

Les zéro à droite dans un nombre **entier** ne sont pas significatifs (sauf s'il y a une indication qu'ils ont été mesurés) .

Exemple :

$x = 300$ (sans indication) contient un seul chiffre significatif. Pour préciser que x contient plus qu'un chiffre significatif, on utilise à la notation scientifique :
- si on veut écrire x avec trois chiffres significatifs : $x = 3,00 \times 10^2$ (les deux zéros sont issus de la mesure)
- si on veut écrire x avec deux chiffres significatifs : $x = 3,0 \times 10^2$

Les nombres exacts sont considérés comme ayant un nombre infini de chiffres significatifs (incertitude = 0).

Ces nombres sont obtenus par exemple par comptage ou sont des constantes mathématiques,...

Exemple : Par comptage : $n = 33$ étudiants ($\Delta n = 0$)

1.2.3 Arrondir un nombre

Pour changer le nombre de chiffres significatifs dans un résultats, on procède à un arrondissage à fin de garder le *bon nombre de chiffres significatifs.*
L'arrondissage d'un nombre consiste à diminuer le nombre de chiffres qui y figurent.

Exemple :

On veut arrondir le chiffre 25,46X... par exemple, ou X représente un chiffre quelconque.
- si $X < 5$ (par exemple 25,462) : le nombre est arrondi à 25,46
- si $X > 5$ (par exemple 25,468) : le nombre est arrondi à 25,47.

Pour un chiffre qui se termine par 5 comme 15,Y5 par exemple :
- si Y est pair : le nombre est arrondi à 15,Y. Exemple : 12,45 $\rightarrow$ 12,4
- si Y est impaire : le nombre est arrondi en augmentant d'une unité le chiffre Y. Exemple : 4,75 $\rightarrow$ 4,8.
- si le chiffre cinq lui-même suivi par des chiffres différents de zéro (15,Y5...), alors Y sera augmenté d'une unité. Exemple : 4,752 $\rightarrow$ 4,8.

Cette méthode est parfois appelée "arrondi au chiffre pair" et est employée afin d'éliminer le biais qui surviendrait en arrondissant à chaque fois par excès les nombres dont le dernier chiffre est cinq.

Exemples :
- 158,45 peut être arrondi à 4 chiffres 158,4 ou à 3 chiffres 158 ...

1.2.4 Résultat d'un calcul

1.2.4.1 Multiplication et division

Le résultat d'une multiplication ou d'une division a autant de chiffres significatifs que le nombre qui en a le moins dans l'opération.

Exemple :
- $2,6 \times \underline{\underline{3}} = 7,8 \quad \rightarrow \quad$ Arrondir le résultat à $\;: \underline{\underline{8}} \quad \rightarrow$ un seul chiffre significatif.

1.2.4.2 Addition et soustraction

Pour l'addition et la soustraction, il faut arrondir le résultat pour qu'elle ait le même nombre de **décimales** que le nombre ayant le moins de décimales dans l'opération.

Exemple :
- $17,26 + \underline{\underline{4,6}} = 21,86 \quad \rightarrow \quad$ Arrondir le résultat à $\;: 21,\underline{\underline{9}} \quad \rightarrow$ un seul chiffre après la virgule.

Remarque : Dans le cas d'un calcul compliqué on applique la règle 1.

1.2.5 Présentation des résultats

Lorsqu'on présente le résultat d'une mesure on doit respecter les deux règles suivantes :

Les incertitudes expérimentales doivent être arrondies avec *un seul chiffre significatif.*

Le dernier chiffre significatif de tout résultat doit être du même ordre de grandeur (à la même position décimale) que l'incertitude.

Exemple :

La mesure d'une tension donne v_m = 5,461 V et l'incertitude sur la mesure est Δv = 0,03468 V. Cette incertitude doit être arrondie à Δv = 0,03 V alors :

$$v = 5,46 \pm 0,03 \quad V$$

Remarque 1 : Si le premier chiffre significatif de l'incertitude est 1 il s'avère préférable de conserver deux chiffres significatifs dans l'incertitude. Exemple Δx = 0,14, si on arrondi à Δx = 0,1 on réduit fortement l'intervalle d'incertitude !

Remarque 2 : Ces deux règles sont applicables pour le résultat **final** et *non pas pour les calculs intermédiaires* ou on doit garder au moins un chiffre significatif supplémentaire.

1.2.6 Comparaison entre les mesures physiques

La mesure d'une grandeur sans tirer une conclusion a peu d'intérêt. Souvent on compare la valeur mesurée à une autre valeur (mesurée ou acceptée) afin de conclure sur la qualité de la mesure.
Lorsque deux mesures d'une même grandeur diffèrent, on dit qu'il y a désaccord :
Le désaccord = Différence entre deux mesures d'une même grandeur.
Si le désaccord est inférieur ou de l'ordre de l'incertitude, on admet que les deux valeurs sont proches, sinon, elle ne le sont pas.
Exemple :
On a mesuré la même intensité de courant par deux méthodes :

- $I_1 = 10 \pm 1$ A $\quad \rightarrow \quad 9A < I_1 < 11A$
- $I_2 = 15 \pm 2$ A $\quad \rightarrow \quad 13A < I_2 < 17A$

Le désaccord est de 5 A. Il est significatif car aucune valeur n'est simultanément dans les deux intervalles. Donc, une des deux mesure s'avère incorrecte imposant une *vérification expérimentale.*

1.3 Calcul des incertitudes

1.3.1 Incertitudes type A

1.3.1.1 Présentation

Cette méthode est basée sur l'étude statistique des mesures.
Elle s'applique au cas des **erreurs aléatoires** et donne de très bonnes estimations des grandeurs physiques ainsi que leurs incertitudes.

Le principe de cette méthode est basé sur la **mesure répétée** d'une grandeur physique dans les mêmes conditions.
Soit, x_1, x_2,...x_n les valeurs d'une même grandeur x, obtenues dans des conditions semblables.
✓ La meilleure estimation de la valeur de x est la ***moyenne*** de ces mesures :

$$\boxed{\text{Meilleur estimation de } x = \overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_n}{n}}$$

✓ L'incertitude moyenne sur ***une** mesure x_i* est l'*écart-type* obtenue à partir des n mesures x_1, x_2,...x_n :

$$\boxed{\Delta x_i = \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}}$$

Si on réalise, dans des mêmes conditions, une autre **mesure unique** x_{n+1}, l'incertitude serait $\Delta x_{n+1} = \sigma_x$ avec une probabilité (ou niveau de confiance) de 68 %[1].

✓ La meilleure estimation de ***l'incertitude sur la moyenne*** $\overline{x}$ est :

$$\boxed{\Delta\overline{x} = \sigma_{\overline{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}}$$

d'où la meilleur estimation de x :

$$\boxed{x = \overline{x} \pm \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}}$$

La probabilité (niveau de confiance) correspondante à cette incertitude est 68 (distribution gaussienne lorsque n est assez grand).
Remarque : Cette détermination est donc $\sqrt{n}$ fois plus précise que celle obtenue à partir d'une mesure unique.

✓ L'incertitude élargie correspond à une probabilité plus grande que 68%. Elle est donnée par :

$$\boxed{\Delta\overline{x} = k\frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}}$$

avec (voir annexe pour la justification) :
- $k = 2$ pour un niveau de confiance de 95 %. C'est le plus utilisé en pratique.
- $k = 3$ pour un niveau de confiance de 99,7%.

1.3.1.2 Exemple : Analyse statistique d'une série de mesures

Huit étudiants mesurent la longueur d'onde λ de la raie verte du mercure en utilisant un spectromètre à réseau. Ils obtiennent les résultats suivants :

Numéro de l'étudiant	1	2	3	4	5	6	7	8
λ(nm)	538,2	554,3	545,7	552,3	566,4	537,9	549,2	540,3

En utilisant un logiciel de traitement des données (Excel,...) on trouve :

$$\overline{\lambda} = 548,04\,\text{nm} \qquad \text{et} \qquad \sigma_\lambda = 9,72\,\text{nm}$$

On en déduit que l'incertitude sur la moyenne des 8 mesures est :

$$\sigma_{\overline{\lambda}} = \frac{\sigma_\lambda}{\sqrt{8}} = 3,44\,\text{nm}$$

La meilleure estimation de λ est :

$$\lambda = 548 \pm 3 \quad \text{nm, avec un niveau de confiance de } 68\%$$

et avec une incertitude élargie (cas pratique)

$$\lambda = 548 \pm 7 \quad \text{nm avec un niveau de confiance de } 95\%$$

La valeur tabulée (mesurée avec précision) est $\lambda = 545,07$ nm est inclue dans l'intervalle d'incertitude de cette mesure. On conclue qu'il y a une bonne concordance.

1. Cette probabilité est déterminée par un calcul statistique dans le cas d'un distribution gaussiène.

1.3.2 Incertitude type B

1.3.2.1 Présentation

En plus de l'incertitude type A, l'incertitude peut aussi être déterminée à partir d'informations obtenues à partir de :

- information sur l'expérience ;
- certificat d'étalonnage ;
- notice du constructeur ;
- classe des instruments ;
- ...

Donc, dans le cas ou l'on dispose d'une seule mesure, on évalue un écart-type à partir des données du constructeur de l'appareil de mesure et d'hypothèses sur la qualité de la lecture réalisée sur l'appareil.

✓ L'incertitude u (uncertainty), sur une mesure d'une grandeur x, résulte de la composition des incertitudes suivantes :

- u_l : incertitude due à la lecture sur l'instrument ;
- u_c : incertitude liée au caractéristiques l'appareil, donnée par le constructeur (précision, classe).
- u_a : autres incertitudes éventuellement disponibles (mises au point, parallaxe,...).

D'où :

$$\boxed{u = \sqrt{u_l^2 + u_c^2 + u_a^2}}$$

✓ L'incertitude **élargie** (avec un niveau de confiance 95%) :

$$\Delta x = 2u$$

✓ L'**incertitude-type** dépend de la **loi de distribution** des mesures données par l'instrument. En générale on utilise la loi rectangulaire (uniforme) ou la loi normale (gaussienne).

1.3.2.2 Incertitude-type liée à la résolution

Cette incertitude est liée à la **résolution** q de l'instrument (erreur de lecture) :

- si q est donnée par le constructeur (voir notice) alors ;

$$\boxed{u_r = \frac{q}{\sqrt{3}}}$$

- sinon, on prend "$q =$ **La moitié d'une unité** sur le *dernier chiffre significatif*" dans le cas d'un **instrument numérique**.

$$\boxed{u_r = \frac{q}{\sqrt{3}}} \quad \text{(loi uniforme)}$$

- soit on prend "$q =$ la *la moitié du plus petite division*" dans le cas d'un **instrument gradué** (oscilloscope, règle, thermomètre,...).

$$\boxed{u_r = \frac{q}{3}} \quad \text{(loi normale)}$$

1.3.2.3 Incertitude-type liée à la précision

Cette incertitude est liée à la **précision** de l'instrument. Elle donnée par le constructeur (voit notice).
Pour un instrument numérique, elle est donnée :
— soit sous forme d'une **valeur** p.
— soit sous la forme d'une **formule**, par exemple :

$$p = 0,08\%\ x_{\text{lue}} + 3\ \textbf{UR}$$

où :
— x_{lue} la valeur lue sur l'affichage de l'appareil
— **UR** : Unité Représentative $= \frac{\text{Gamme}}{\text{Nombre de points}}$
— La "Gamme" et "Nombre de points" sont donnés par le constructeur.

La loi de probabilité considérée dans ce cas est la loi uniforme, donc l'**incertitude-type** liée à la précision est :

$$\boxed{u_p = \frac{p}{\sqrt{3}}}$$

1.3.2.4 Incertitude liée à la tolérance

Cette incertitude est liée l'erreur maximale tolérée de l'instrument (pipette, burette, ...).
Elle est donnée par le constructeur (selon la classe) sous forme : $\pm a$.

L'**incertitude-type** (précision) est :

$$\boxed{u_t = \frac{a}{\sqrt{3}}}$$

1.3.2.5 Incertitude liée à une plage de mesure

Exemples : Erreur de mesure de la position par mise au point sur un banc d'optique. Dans ce cas on a

$$x_{\min} < x < x_{\max}$$

La loi de probabilité considérée dans ce cas est la loi uniforme. Donc l'**incertitude-type** est :

$$u = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2\sqrt{3}}$$

1.3.2.6 Cas d'un résultat indiqué "sans" incertitude

Lorsqu'un résultat est présenté sans indiquer l'incertitude, on considère que cette dernière est égale à la moitié du plus petit poids (c-à-d le poids du chiffre incertain qui est le dernier chiffre significatif).

$$\boxed{u = \text{moitié du plus petit poids dans le résultat}}$$

L'**incertitude-type** est :

$$\boxed{u_t = \frac{u}{\sqrt{3}}}$$

Exemples :

- $L = 1\underline{\underline{2}}$ m : le poids le plus petit est celui des unités 1 (qui correspond au chiffre 2) alors $u = \Delta L$ =0,5 m.
- $m = 5,2\underline{\underline{4}}$ kg : le poids le plus petit est celui des centièmes 0,01 (qui correspond au chiffre 4) alors $u = \Delta m$ =0,005 kg.

1.3.3 Mesure indirecte–Propagation des incertitudes

La plus part des grandeurs physiques ne sont pas accessibles par une mesure directe mais de manière indirecte en mesurant d'autres grandeurs. Par exemple, pour mesurer la surface S d'un rectangle, on mesure sa longueur L et sa largeur l puis on déduit : $S = Ll$.

On s'intéresse ici au problème suivant : on mesure les grandeurs expérimentales x, y, ... avec les incertitudes Δx, Δy,....(mesure unique), quelle est l'incertitude Δf sur la grandeur $f = f(x, y, ...)$?

1.3.3.1 Formule générale de propagation des incertitudes

✓ Lorsque les incertitudes sur les grandeurs x et y, ... sont ***indépendantes*** et **aléatoires** (cas général), la meilleure estimation de l'incertitude sur la grandeur $f(x, y, ...)$ est donnée par la somme quadratique :

$$\boxed{\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y\right)^2 + ...}}$$

Remarque :

Δf est toujours majorée par :

$$\Delta f \leq \Delta f_{\max} = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\Delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\Delta y + ...$$

Si on soupçonne que les incertitudes sont liées on prend $\Delta f = \Delta f_{\max}$.

1.3.3.2 Cas particuliers

Si $\underline{f = x/y}$ ou $\underline{f = xy}$ alors :

$$\boxed{\frac{\Delta f}{f} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2}}$$

Si $\underline{f = x + y}$ ou $\underline{f = x - y}$ alors :

$$\boxed{\Delta f = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}$$

1.4 Applications

1.4.1 Exemple 1 : Mesure d'une tension par un voltmètre

On mesure une tension par un voltmètre numérique.

- Affichage numérique : $V = ...$
  - Incertitude de résolution (de lecture) : $q = ...$
  - Incertitude de précision (formule du constructeur) : $p = ...$
- Incertitudes-type
  - $u_r = \frac{q}{\sqrt{3}} = ...$ (loi uniforme)
  - $u_c = \frac{p}{\sqrt{3}} = ...$ (loi uniforme)
- Incertitude-type :

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_c^2} = ...$$

- Incertitude élargie (avec un niveau de confiance de 95 %) :

$$U = 2u = ...$$

- Résultat final :

$$V = ... \pm ......(\mathrm{V})$$

1.4.2 Exemple 2 : Mesures avec la carte d'acquisition SP5-LatisPro

1.4.2.1 Mesure d'une tension

On va utiliser la méthode statistique.

- Régler le GBF pour sur une tension v continue de à 1 V.
- On utilisera Latis Pro avec un calibre +1/-1.
- Obtient-on une valeur unique de tension ? Comment l'expliquer ?
- Enregistrer la liste des valeurs de tension mesurées.
- Donner la valeur moyenne v et l'écart-type σ_v de la distribution de valeurs de v.
- Déterminer l'intervalle de confiance à 95%.
- Comparer avec la plage de mesure $a = \frac{v_{max} - v_{min}}{2}$.
- Résultat :

$$V = ... \pm ......\mathrm{V}$$

Cette incertitude pourra être utilisée pour toute mesure ultérieure de la tension.

1.4.2.2 Incertitude sur une mesure mécanique

On va traiter un exemple simple de chute parabolique (la vidéo est disponible dans la bibliothèque de LatisPro)

1.4.2.2.1 Détermination des incertitudes

On va utiliser la méthode statistique.

- Ouvrir la vidéo est faire le paramétrage habituel (axes et étalon).
- Lancer l'acquisition et pointer le <u>même point</u> sur les images successives.
- Donner la valeur de l'écart-type σ_x de la distribution de valeurs de la position x (ou y).
- Donner alors l'incertitude élargie Δx sur une mesure la position.
- Donner une estimation de l'incertitude Δt sur le temps.

1.4.2.2.2 Détermination du champ de pesanteur

On va maintenant traiter la vidéo de chute parabolique pour déterminer la valeur du champ de pesanteur g.

— Ouvrire la vidèo est faire le paramétrage habituel (axes et étalon).
— Lancer l'acquisition et pointer <u>la balle</u> sur les images successives.
— Tracer les courbes de $x(t)$ et y(t).
— Faire une modélisation. Introduire les incertitudes mesurées dans le paragraphe précédent.
— Déduire la valeur de g :

$$g = \ldots\ldots\ldots \pm \ldots\ldots\ldots\ldots \mathrm{m.s}^{-2}$$

1.4.3 Exemple 3 : Mesure d'un temps avec un chronomètre

Exemple : Mesure de la période d'un pendule simple. Données du constructeur :
— Résolution : 1/100 s
— Précision : 0,0006%

- Affichage numérique : $T = \ldots.$
- Incertitude de résolution : $q = \ldots.$
- Incertitude de précision : $p = T * 0,0006/100 = \ldots.$
- Incertitude aléatoire de l'opérateur lors du déclenchement et l'arrêt.
  On considère que $u_{op} \approx 0,1$ s (temps de réaction).

— Incertitudes-type
  — $u_r = \frac{q}{\sqrt{3}} = \ldots\ldots$
  — $u_c = \frac{p}{\sqrt{3}} = \ldots\ldots$
— L'incertitude-type sur T :

$$u = \sqrt{u_r^2 + u_c^2 + u_{op}^2} = \ldots.$$

— Incertitude élargie (avec un niveau de confiance de 95 %) :

$$U = 2u = \ldots\ldots.$$

— Résultat final :

$$T = \ldots.. \pm \ldots\ldots \mathrm{s}$$