

# TP Ondes 2

## Démarche expérimentale

**U. Kuhl, M. Iapichino, C. Raufaste**

*Université de Nice - Sophia Antipolis*

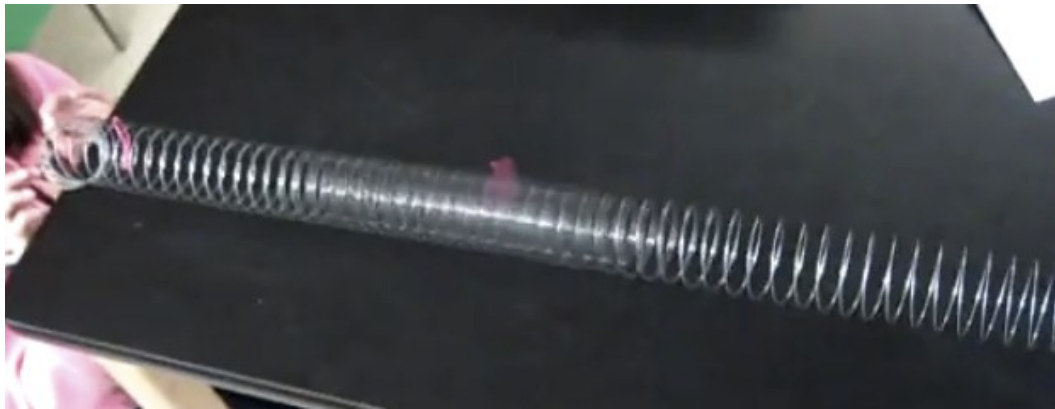
# Introduction

- ☐ Méthode scientifique et rigoureuse
- ☐ Outils pour l'approche expérimentale
- ☐ Notions fondamentales : erreur, incertitude, dispersion, tendance, ajustement, ...
- ☐ protocole adapté / cahier des charges

# I. Erreurs, incertitudes, dispersion

# Expérience modèle

- Propagation d'une onde le long d'un ressort



Mesure de la vitesse de propagation

$L = \dots$  (longueur du ressort)

$n = \dots$  (nombre d'allers)

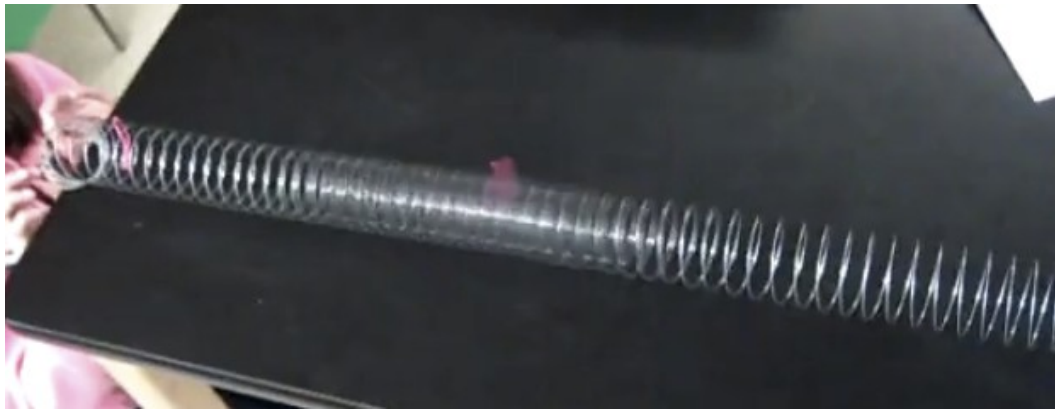
$t = \dots$  (temps de parcours)



$$v = nL/t$$

# Expérience modèle

- Propagation d'une onde le long d'un ressort



Mesure de la vitesse de propagation

$$L = 6 \text{ m}$$

$$n = 6$$

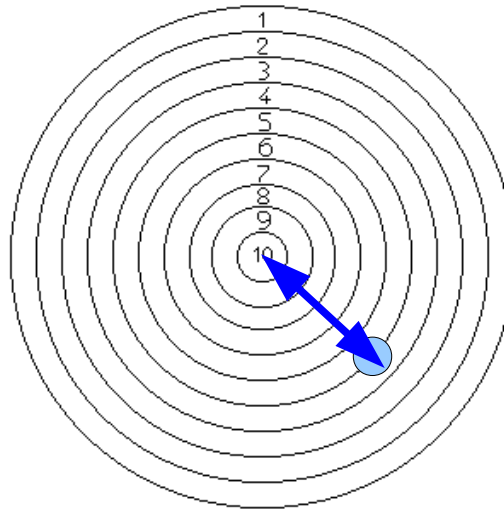
$$t = 2.2665 \text{ s}$$



$$\begin{aligned} v &= nL/t \\ &= 20 \text{ m/s} \quad ? \\ &= 15.8 \text{ m/s} \quad ? \\ &= 15.884 \text{ m/s} \quad ? \end{aligned}$$

# Erreurs vs Incertitudes

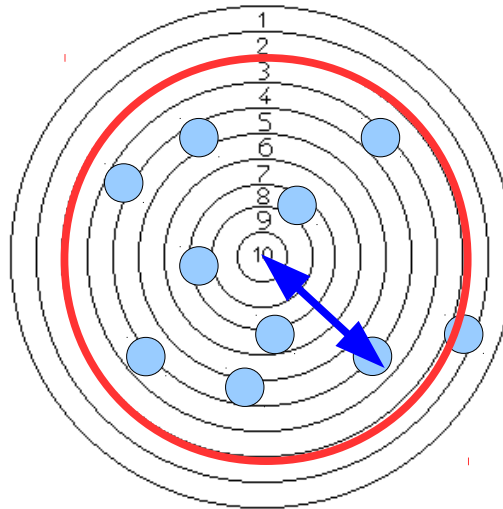
- ❑ Erreur : différence entre une mesure et sa valeur **vraie**
- ❑ Incertitude : **quantification** de l'erreur possible lorsque l'on effectue une mesure



chaque mesure a son erreur

# Erreurs vs Incertitudes

- ❑ Erreur : différence entre une mesure et sa valeur **vraie**
- ❑ Incertitude : **quantification** de l'erreur possible lorsque l'on effectue une mesure

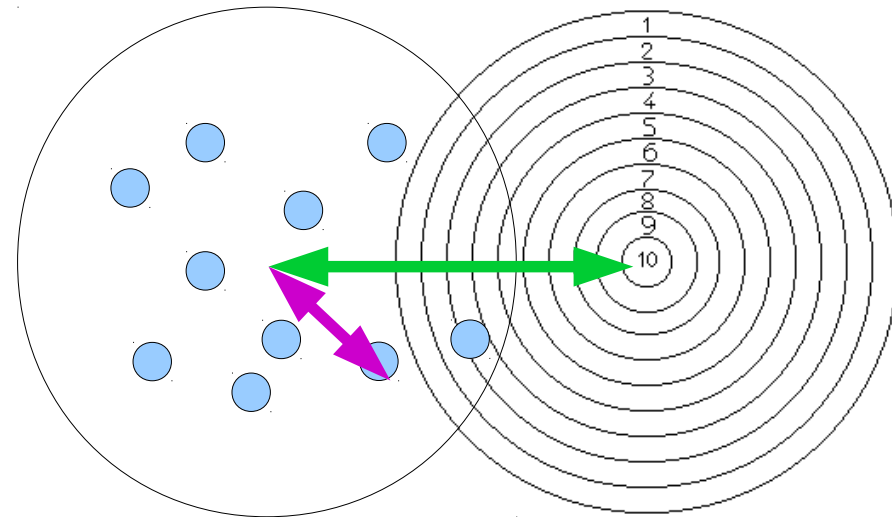


chaque mesure a son erreur

90% des mesures se situent entre 3 et 10

# Erreurs : 2 catégories

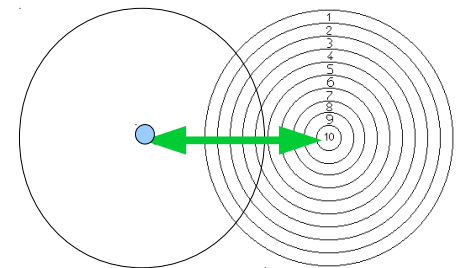
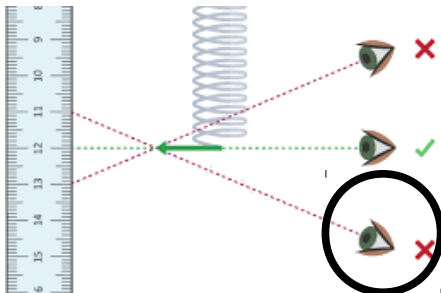
- ❑ **Erreur systématique** : biais, erreur toujours dans le même sens
- ❑ **Erreur aléatoire** : erreur retranscrite de l'erreur systématique
- ❑ Causes
  - outils de mesure
  - expérimentateur
  - facteurs extérieurs





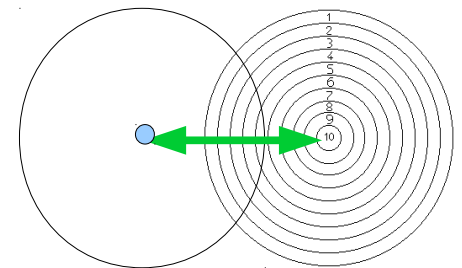
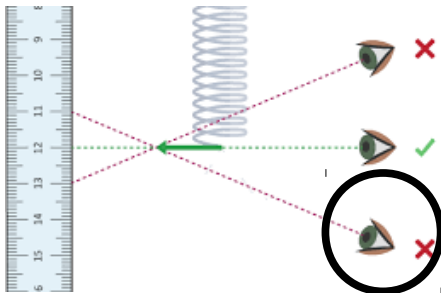
# Erreurs : correction

- ☐ **Erreur systématique** : biais, erreur toujours dans le même sens
- ☐ Difficile à évaluer sauf à prendre des précautions  
(en pratique on ne connaît pas la valeur vraie !)  
contrôler les appareils de mesure avec des appareils précis  
expérimentateur chevronné  
connaissance des facteurs extérieurs
- ☐ Ressort :  $L = 6 \text{ m}$  ???



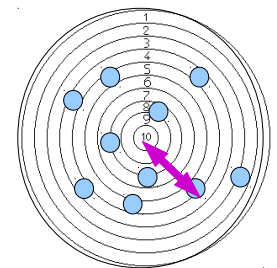
# Erreurs : correction

- ☐ **Erreur systématique** : biais, erreur toujours dans le même sens
- ☐ Difficile à évaluer sauf à prendre des précautions  
(en pratique on ne connaît pas la valeur vraie !)
  - contrôler les appareils de mesure avec des appareils précis
  - expérimentateur chevronné
  - connaissance des facteurs extérieurs
- ☐ Ressort :  $L = 6.2 \pm 0.2$  m



# Erreurs : correction

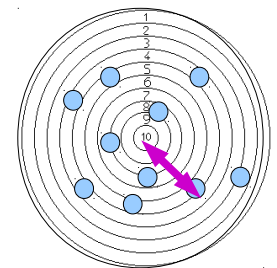
- ☐ **Erreur aléatoire** : erreur retranchée de l'erreur systématique
- ☐ Facile à évaluer en effectuant un grand nombre de mesures ( $>10$ )
- ☐ Incertitude quantifiée à partir de la dispersion des mesures
- ☐ Prend en compte toutes les causes d'erreur aléatoire
- ☐ Ressort :  $t = ???$



numero mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mesure $t$ (s)	2.374	1.987	2.298	2.144	2.545	2.368	1.930	2.143	2.005	2.394

# Erreurs : correction

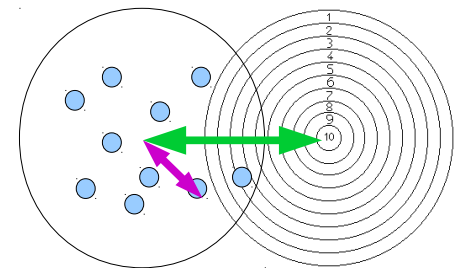
- ☐ **Erreur aléatoire** : erreur retranchée de l'erreur systématique
- ☐ Facile à évaluer en effectuant un grand nombre de mesures ( $>10$ )
- ☐ Incertitude quantifiée à partir de la dispersion des mesures
- ☐ Prend en compte toutes les causes d'erreur aléatoire
- ☐ Ressort :  $t = 2.2 \pm 0.2$  s (1 ou 2 CS max pour l'incertitude !!!)



numero mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mesure $t$ (s)	2.374	1.987	2.298	2.144	2.545	2.368	1.930	2.143	2.005	2.394

# Erreurs : stratégie

- ☐ **A retenir** : 2 stratégies pour mesurer une incertitude
- ☐ S'assurer que l'**erreur systématique** est connue ou inférieure à l'**erreur aléatoire**, et estimer l'incertitude de l'erreur aléatoire en effectuant plusieurs mesures ( $\sim 10$ )
- ☐ Faire une estimation de l'incertitude en évaluant les différentes sources d'erreur
- ☐ Exemple : mesure de temps



# Propagation des incertitudes

☐ Mesures avec incertitude de  $n$ ,  $L$ ,  $t$

☐ Incertitude + Mesure de  $v$  ?

$$v = v(n, L, t)$$

incertitudes sur  $v$

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial n} \right|_{L,t} \Delta n + \left| \frac{\partial v}{\partial L} \right|_{n,t} \Delta L + \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{n,L} \Delta t$$

incertitudes sur  $L$

☐ Pas de passage au logarithme !!!

# Propagation des incertitudes

- ☐ Mesures avec incertitude de  $n$ ,  $L$ ,  $t$
- ☐ Incertitude + Mesure de  $v$  ?

$$v = nL / t$$

$$\Delta v =$$

# Propagation des incertitudes

□ Ressort

initialement

$n=6$ ,  $L=6$  m,  $t=2.2665$  s  $\rightarrow v = 20, 15.8, 15.884$  m/s ???

après analyse

$n=6$ ,  $L=(6.2 \pm 0.2)$  m,  $t=(2.2 \pm 0.2)$  s

$v=16.9090\dots$  m/s et  $\Delta v = 2$  m/s

$v=(17 \pm 2)$  m/s

privilégier écriture relative  $\Delta v/v = 0.12$  ( $\Delta L/L=0.03$ ,  $\Delta t/t=0.09$ )



# Propagation des incertitudes

## ☐ Cas particuliers

Produit

$$v = nL/t$$

$$\Delta v = \left| v \frac{\Delta n}{n} \right| + \left| v \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| v \frac{\Delta t}{t} \right| \text{ ou } \left| \frac{\Delta v}{v} \right| = \left| \frac{\Delta n}{n} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right|$$

Somme

$$v = v_1 + v_2$$

$$\Delta v = \Delta v_1 + \Delta v_2$$

Puissance

$$v = 3K^{1/2}L^2m^{-1/2}$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{2} \frac{\Delta K}{K} + 2 \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{m}$$

Exercice

$$E = \frac{1}{2}K(L - L_0)^2$$

# Propagation des incertitudes

□ Exercice

$$E = \frac{1}{2} K (L - L_0)^2$$

meth1

$$dE = \left( \frac{\partial E}{\partial K} \right) dK + \left( \frac{\partial E}{\partial L} \right) dL + \left( \frac{\partial E}{\partial L_0} \right) dL_0$$

$$dE = \frac{1}{2} (L - L_0)^2 dK + K (L - L_0) dL - K (L - L_0) dL_0$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} (L - L_0)^2 \Delta K + K |L - L_0| \Delta L + K |L - L_0| \Delta L_0$$

meth2

$$\frac{dE}{E} = \frac{dK}{K} + 2 \frac{d(L - L_0)}{L - L_0}$$

$$\frac{dE}{E} = \frac{dK}{K} + 2 \frac{dL - dL_0}{L - L_0}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta K}{K} + 2 \frac{\Delta L + \Delta L_0}{|L - L_0|}$$

## II. Etude systématique

## II. Etude systématique

### ☐ Trouver les paramètres pertinents (modélisation ...)

- > géométrique = Longueur  $L$ , rayon , angle  $\alpha$  (ressort horizontal ou vertical), nombre de spires
- > matériau = masse totale, constante de raideur
- > extérieurs = gravité

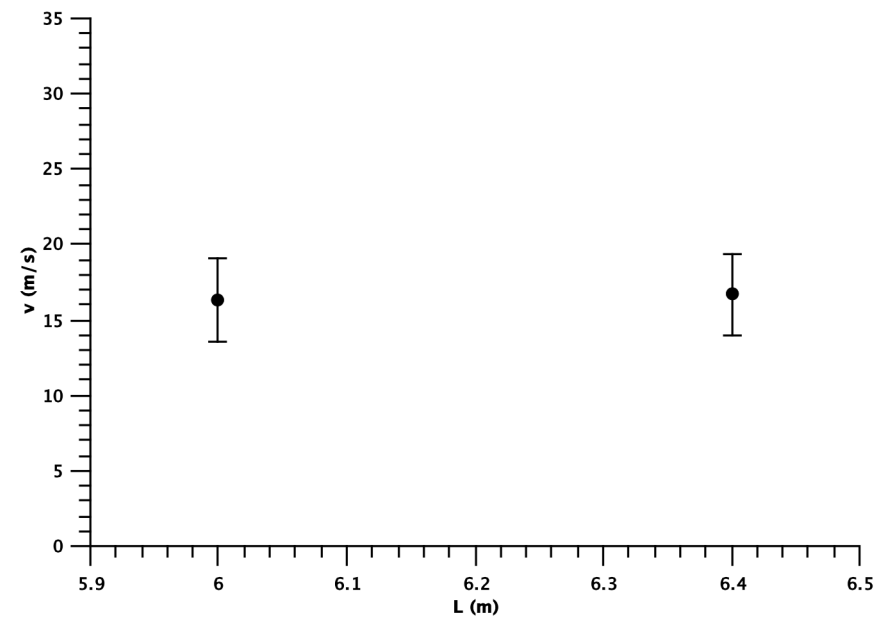
### ☐ Méthode :

faire varier les paramètres indépendamment les uns des autres  
effectuer une série de mesures pour trouver une corrélation  
utiliser l'outil graphique pour quantifier la corrélation

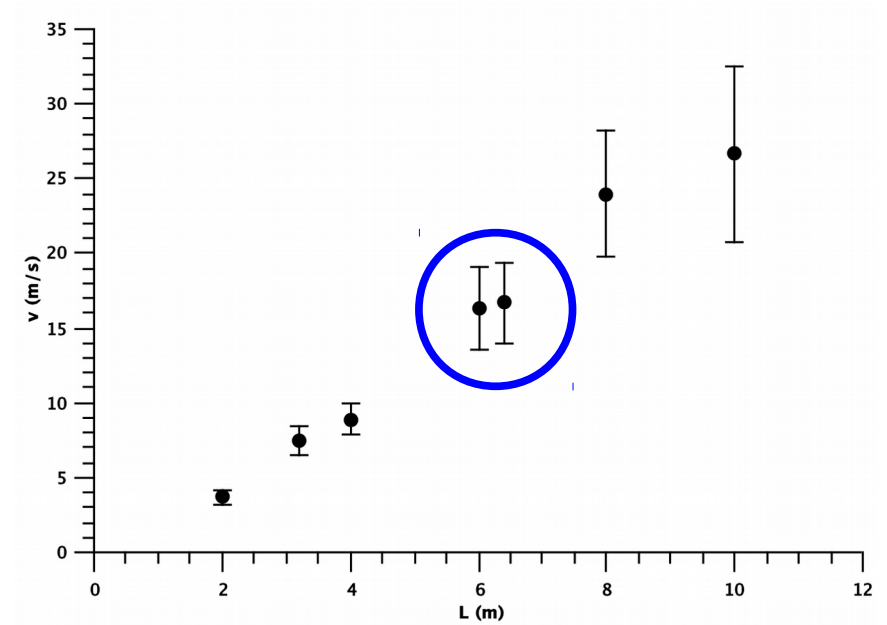
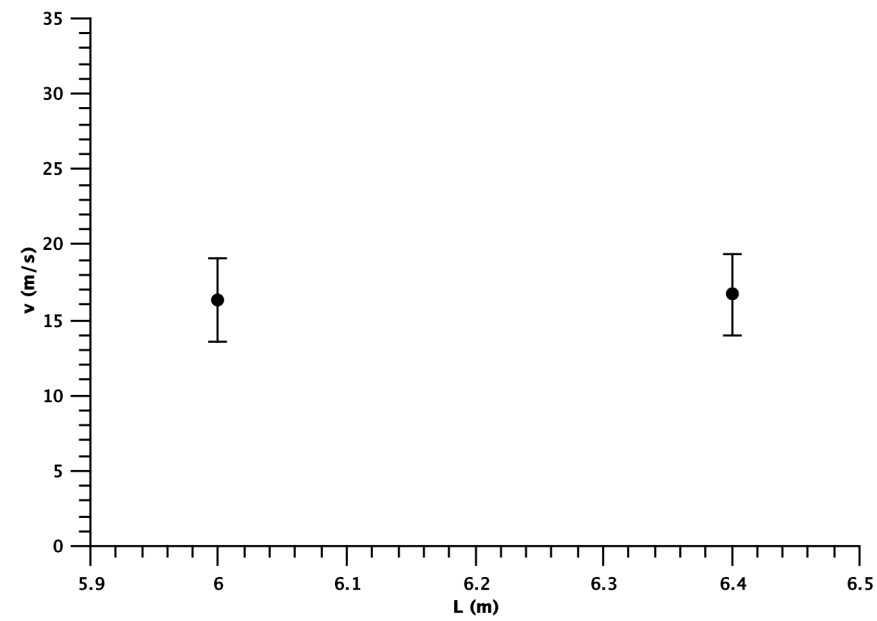
logiciel d'analyse de données: SciDAVis

<http://scidavis.sourceforge.net/>

# Effet de L



# Effet de L



# Effet de L

- ☐ Choix de la gamme : valeur min - valeur max

facteur 2 : minimum

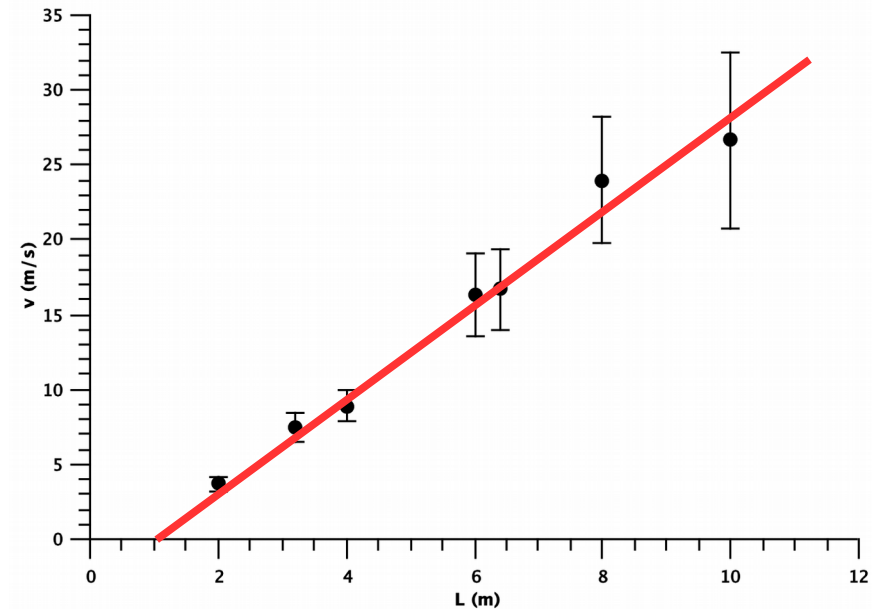
facteur 10 : bien

- ☐ Nombre de mesures : environ 10

- ☐ L paramètre pertinent

corrélation entre  $v$  et  $L$

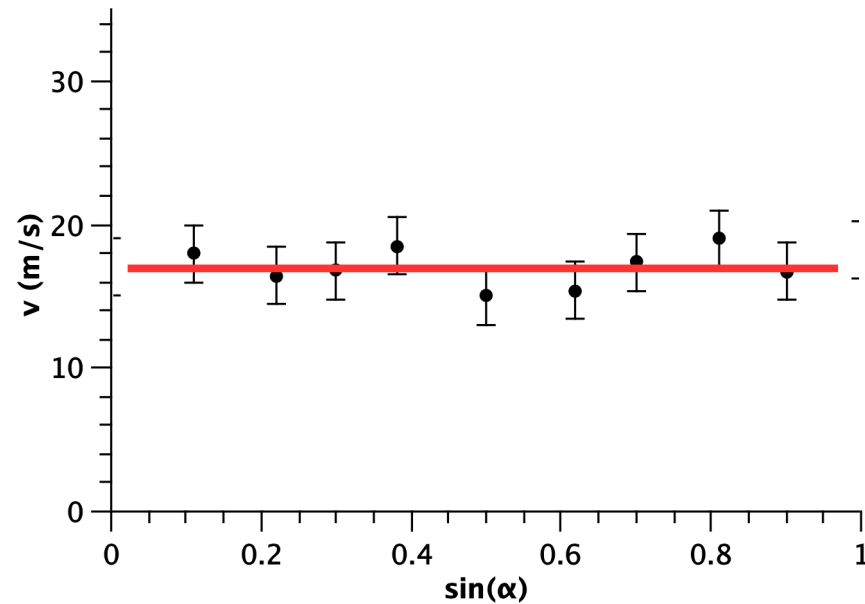
tendance significative en accord avec les incertitudes



- ☐ Éléments d'un tracé

# Effet de $\alpha$

☐ Résultat

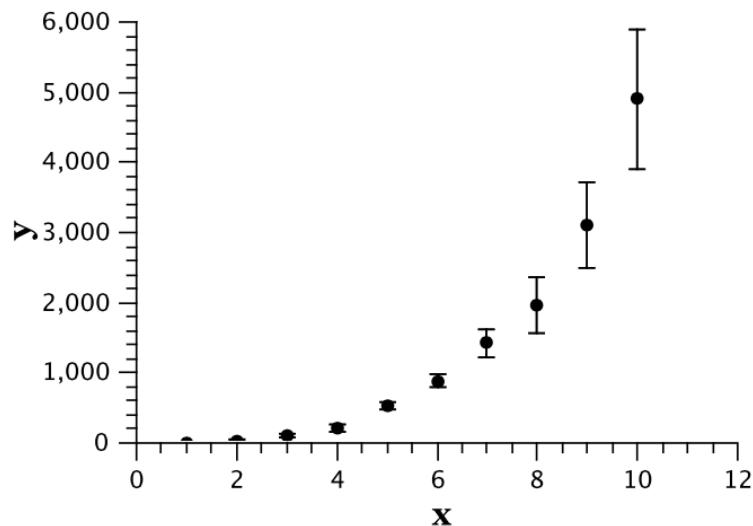


☐  $\alpha$  paramètre non pertinent



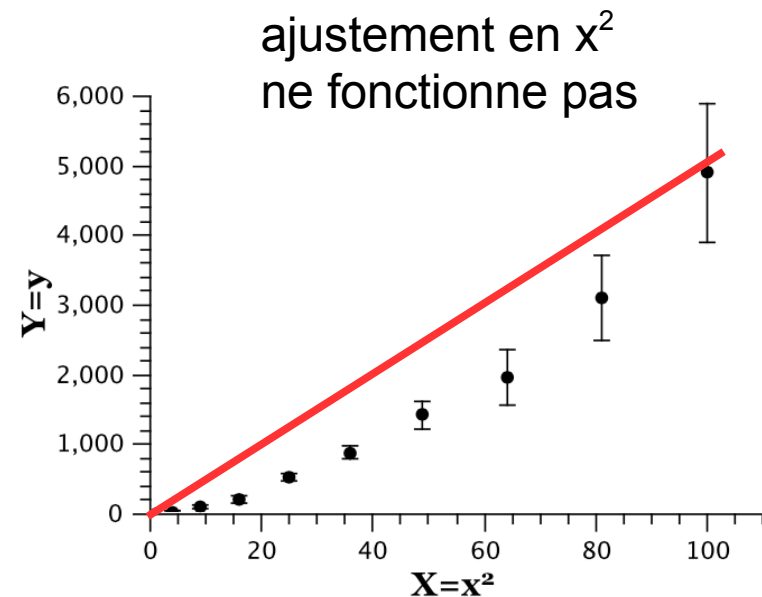
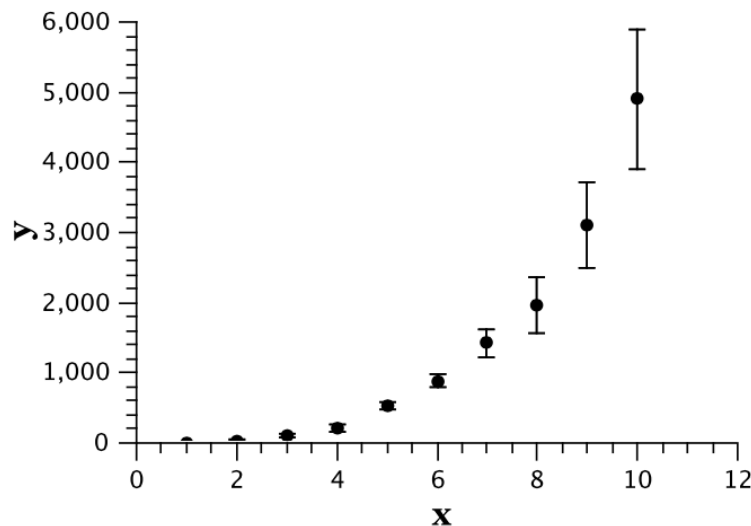
# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y = ax + b$
- ☐ Exemple



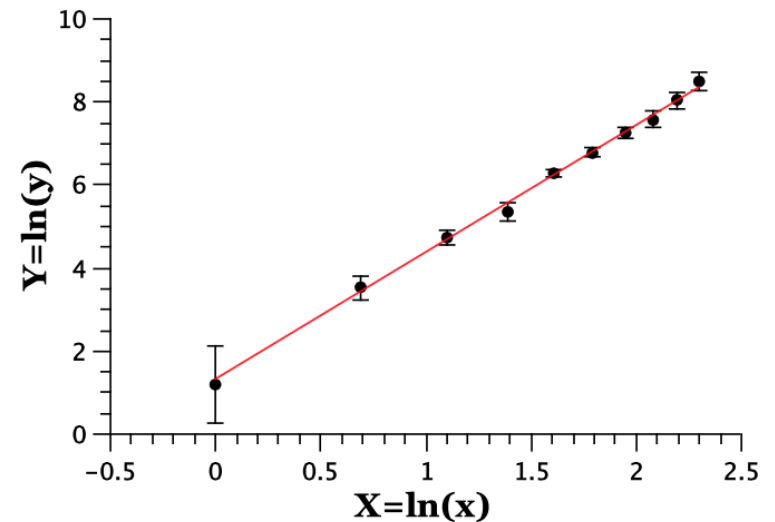
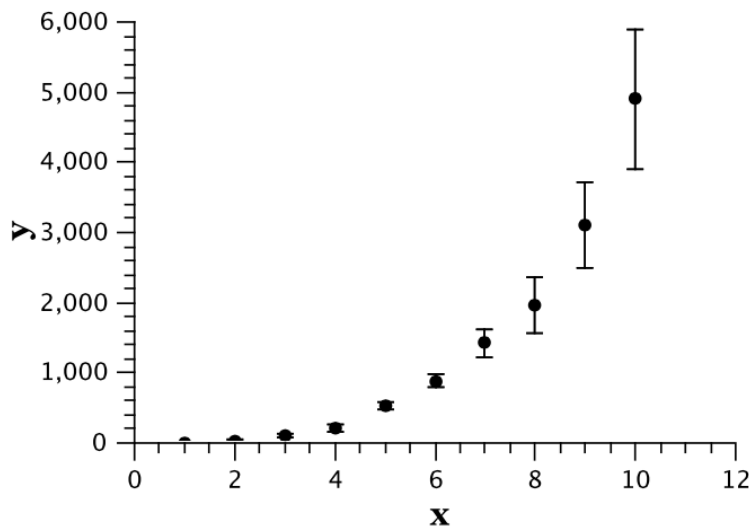
# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y=ax + b$
- ☐ Exemple



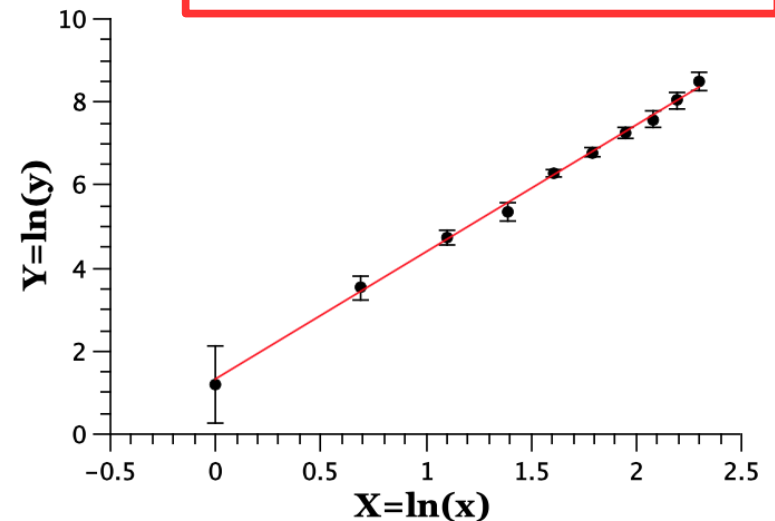
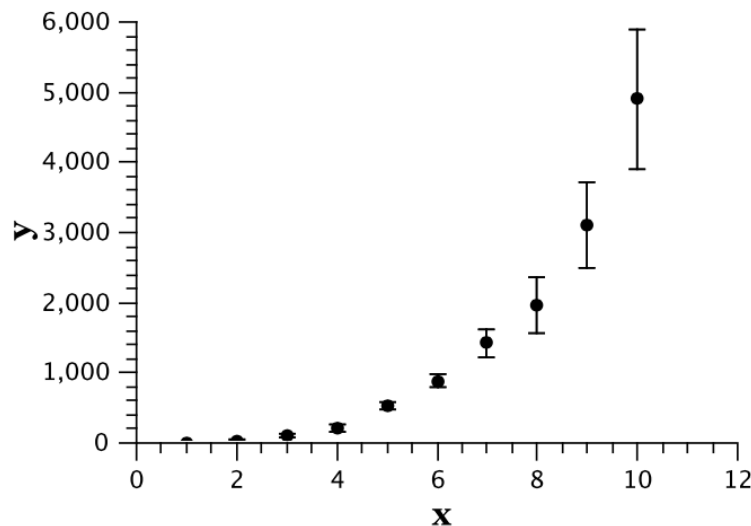
# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y=ax + b$
- ☐ Exemple



# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y = ax + b$
- ☐ Exemple



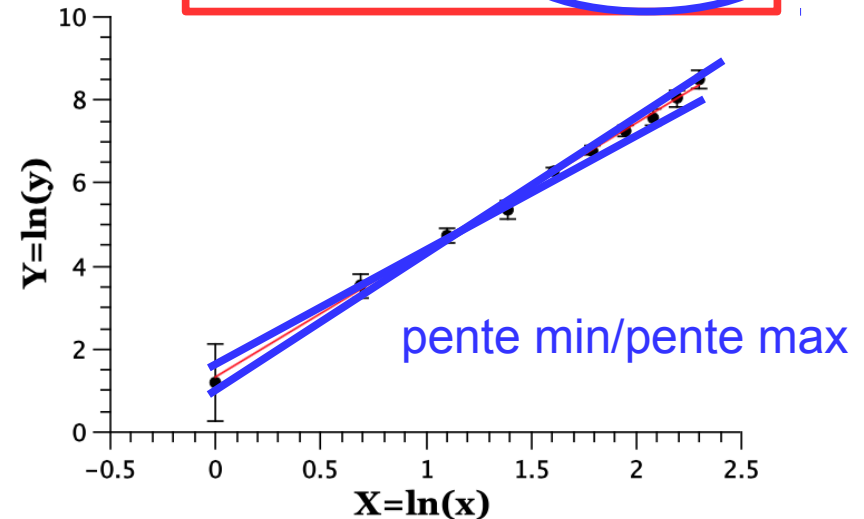
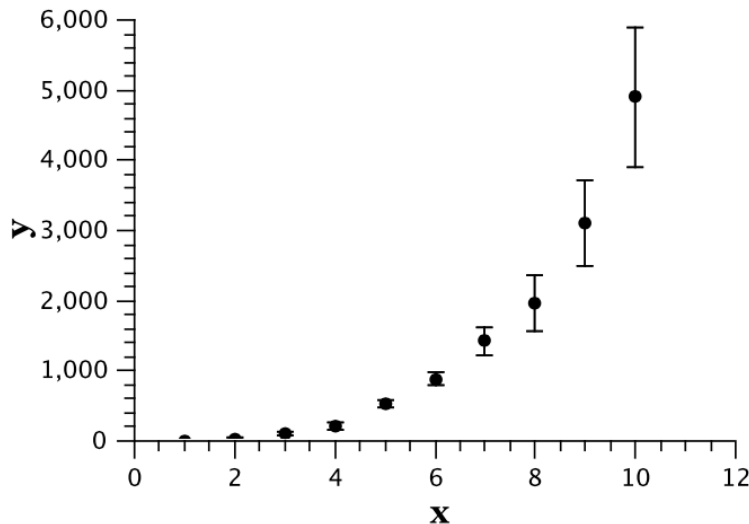
ajustement  $Y = aX + b$   
 $a = 3.0630669 \pm 0.1391571$   
 $b = 1.3150979 \pm 0.2450699$

# Ajustement

☐ Quantifier la corrélation

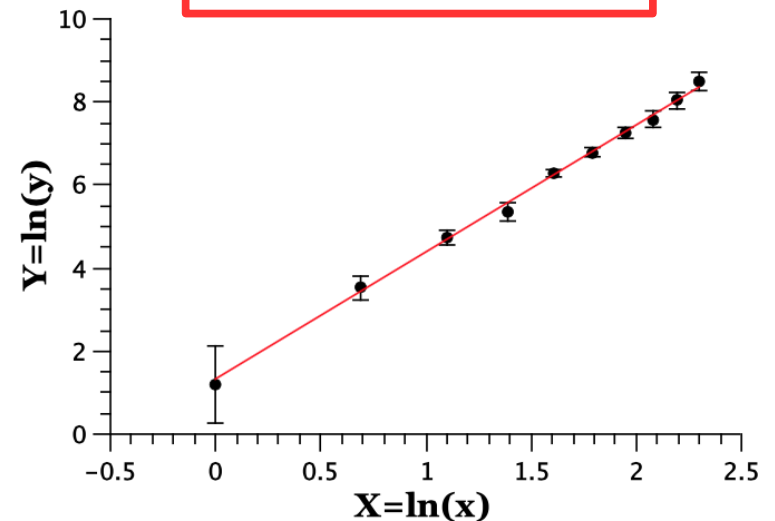
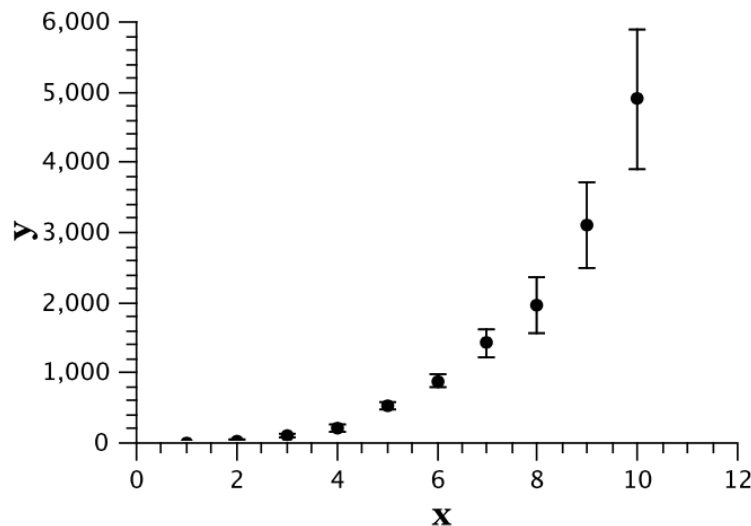
☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y = ax + b$

☐ Exemple



# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y = ax + b$
- ☐ Exemple



ajustement  $Y = aX + b$   
 $a = 3.06 \pm 0.14$   
 $b = 1.32 \pm 0.25$

# Ajustement

- ☐ Quantifier la corrélation
- ☐ Privilégier l'ajustement affine :  $Y = ax + b$
- ☐ Exemple

Type de relation	axe des abscisses X	axe des ordonnées Y	résultat de l'ajustement $Y = aX + b$ ou $Y = aX$
$y = mx + p$	$x$	$y$	$a = m$ et $b = p$
$y = kx^2$	$x$	$y$	$a = k$
$y = k/x$	$1/x$	$y$	$a = k$
$y = k/x^2$	$1/x^2$	$y$	$a = k$
$y = k\sqrt{x}$	$x$	$y^2$	$a = k^2$
$y = e^{kx}$	$x$	$\ln(y)$	$a = k$
$y = kx^n$	$\ln(x)$	$\ln(y)$	$n$ inconnue, $a = n$ et $b = \ln(k)$

## Conclusion

- ☐ outils pour la démarche expérimentale
- ☐ erreur/incertitude/dispersion liés à une mesure
- ☐ corrélation/ajustement/dispersion liés à une série de mesures en faisant varier un paramètre