

Incertitudes et propagation d'erreur — savoir combien de chiffres méritent confiance

Comment annoncer un résultat honnête lorsque les mesures d'entrée ne sont jamais parfaitement exactes ?

Boussole du cours

Objectif : comprendre chaque mot, symbole, unité et opération avant d'utiliser la formule.

Méthode : concret → vocabulaire → calcul pas à pas → trois exemples → contrôle.

Ressource pédagogique en libre accès : ce contenu n'est ni une formation professionnelle, ni un diplôme, ni une certification, ni une habilitation. Les exemples sont pédagogiques et ne remplacent pas l'ingénierie, les essais et la qualification d'un matériel spatial réel.

1 — Commencer par une mesure réelle : une balance ne donne jamais la vérité au gramme près

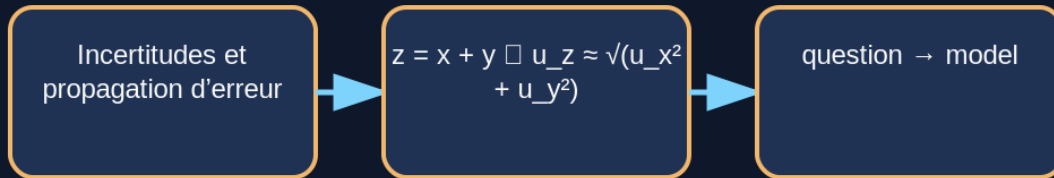
Imaginez une caisse d'oxygène posée sur une balance dans un habitat martien. L'écran affiche **20,0 kg**. Cela ne veut pas dire que la masse réelle est connue avec une précision infinie. La balance possède une résolution, une calibration et de petites imperfections.

Une façon honnête d'écrire la mesure est par exemple **20,0 ± 0,2 kg**. Le signe $\pm$ se prononce « plus ou moins ». Ici, il signifie : « la meilleure estimation est 20,0 kg, avec une incertitude de 0,2 kg autour de cette valeur ».

Mot important — incertitude : marge associée à une mesure. Ce n'est pas forcément une faute. Même un bon instrument possède une incertitude.

Incertitudes et propagation d'erreur

Schéma pédagogique 1



Comprendre le raisonnement, puis seulement calculer.

Une mesure doit être accompagnée de sa précision, pas seulement d'un nombre.

2 — Que signifie exactement « ± 0,2 kg » ?

Dans cet exemple pédagogique, on peut lire l'intervalle ainsi :

valeur basse = $20,0 - 0,2 = 19,8$ kg
 valeur haute = $20,0 + 0,2 = 20,2$ kg

On ne prétend pas que la vraie valeur est forcément à une extrémité. On indique simplement la zone d'incertitude retenue pour le calcul.

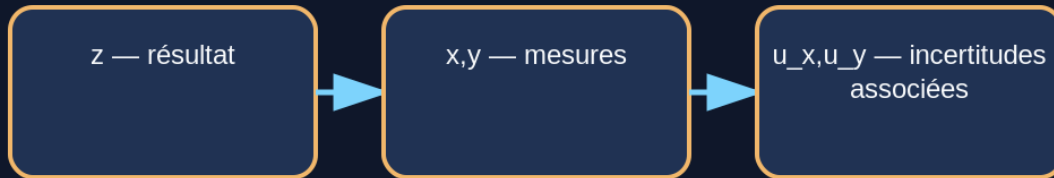
Incertitude absolue : elle utilise la même unité que la grandeur, ici 0,2 kg. **Incertitude relative** : elle compare cette marge à la valeur mesurée.

incertitude relative = $0,2 \div 20,0 = 0,01 = 1 \%$

Pourquoi diviser ? Parce que nous voulons savoir quelle fraction de la mesure représente l'incertitude. 0,2 kg ne signifie pas la même chose sur 2 kg ou sur 2 000 kg.

Incertitudes et propagation d'erreur

Schéma pédagogique 2



Comprendre le raisonnement, puis seulement calculer.

Incertitude absolue et relative : deux façons complémentaires de décrire la précision.

3 — Lire les symboles sans paniquer

- $\pm$ se lit « plus ou moins » ;
- Δ se lit « delta » et signifie souvent « variation » ou « écart » ;
- Δm se lit « delta m » : ici l'incertitude ou la variation associée à la masse selon le contexte ;
- % se lit « pour cent » : 1 % signifie 1 part sur 100.

Une lettre n'a pas de pouvoir magique. Elle sert seulement d'étiquette courte. Avant tout calcul, le cours doit préciser **ce que la lettre représente, dans quelle unité et d'où vient le nombre**.

4 — Addition et soustraction : une règle prudente pour débiter

Pour un premier niveau pédagogique, on peut utiliser une règle volontairement prudente : lorsqu'on additionne ou soustrait deux mesures indépendantes, on additionne leurs **incertitudes absolues**. Les méthodes statistiques plus avancées peuvent être moins conservatrices, mais elles viennent plus tard.

$$A = 12,0 \pm 0,1 \text{ kg}$$

$$B = 8,0 \pm 0,2 \text{ kg}$$

$$A + B = 20,0 \text{ kg}$$

incertitude prudente = $0,1 + 0,2 = 0,3$ kg

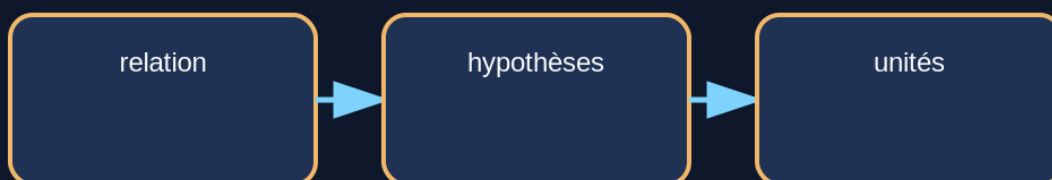
résultat : $20,0 \pm 0,3$ kg

Pourquoi additionner les marges ? Parce que, dans le scénario défavorable retenu ici, les deux écarts peuvent aller dans le même sens.

AM-01.14 · SPACE ACADEMY

Incertitudes et propagation d'erreur

Schéma pédagogique 3



Comprendre le raisonnement, puis seulement calculer.

La chaîne de raisonnement : mesurer, identifier les marges, calculer, puis annoncer le résultat avec sa précision.

5 — Multiplication et division : regarder les pourcentages d'incertitude

Dans une règle prudente de débutant, pour une multiplication ou une division on additionne les **incertitudes relatives**.

Exemple : une pompe transfère 120 ± 2 kg d'eau en 60 ± 1 s. On calcule le débit moyen.

débit = masse ÷ temps = $120 \div 60 = 2,00$ kg/s
incertitude relative masse = $2 \div 120 \approx 1,67$ %
incertitude relative temps = $1 \div 60 \approx 1,67$ %
incertitude relative prudente débit $\approx 3,34$ %

incertitude absolue débit $\approx 2,00 \times 0,0334 \approx 0,07 \text{ kg/s}$
résultat $\approx 2,00 \pm 0,07 \text{ kg/s}$

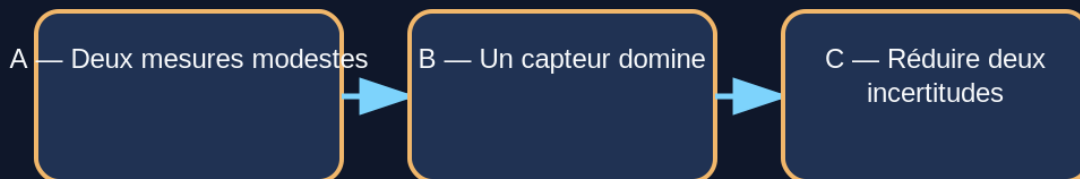
À retenir : l'exemple enseigne la logique. Dans un vrai projet, la méthode de propagation dépend du modèle d'erreur, des corrélations et du niveau de confiance demandé.

6 — Trois exemples concrets pour que l'idée devienne intuitive

AM-01.14 · SPACE ACADEMY

Incertitudes et propagation d'erreur

Schéma pédagogique 4



Comprendre le raisonnement, puis seulement calculer.

Trois situations martiennes : masse, débit et puissance solaire.

Exemple A — Masse d'une cargaison

Une caisse A vaut $15,0 \pm 0,2 \text{ kg}$ et une caisse B $10,0 \pm 0,1 \text{ kg}$.

masse totale = $15,0 + 10,0 = 25,0 \text{ kg}$
incertitude prudente = $0,2 + 0,1 = 0,3 \text{ kg}$
 $25,0 \pm 0,3 \text{ kg}$

En français courant : « nous estimons la cargaison à $25,0 \text{ kg}$, avec une marge de $0,3 \text{ kg}$ selon cette règle prudente ».

Exemple B — Débit d'un réservoir

50,0 ± 0,5 kg d'eau sont transférés en 25,0 ± 0,5 s.

```
débit = 50,0 ÷ 25,0 = 2,00 kg/s  
marge relative masse = 1 %  
marge relative temps = 2 %  
marge relative débit ≈ 3 %  
marge absolue ≈ 2,00 × 0,03 = 0,06 kg/s  
2,00 ± 0,06 kg/s
```

Exemple C — Puissance solaire reçue

Un panneau de 2,00 ± 0,02 m² reçoit 500 ± 10 W/m².

```
puissance reçue = 500 × 2,00 = 1 000 W  
marge relative surface = 0,02 ÷ 2,00 = 1 %  
marge relative flux = 10 ÷ 500 = 2 %  
marge relative prudente ≈ 3 %  
marge absolue ≈ 30 W  
1 000 ± 30 W
```

7 — Erreur, incertitude et faute : trois idées différentes

Dans le langage courant, « erreur » veut souvent dire « faute ». En métrologie, on distingue mieux : une **faute** est par exemple une mauvaise saisie ; une **incertitude** décrit ce qu'on ne connaît pas parfaitement ; l'**erreur de mesure**, au sens technique, est l'écart entre une valeur mesurée et une valeur de référence quand cette comparaison est possible.

Piège fréquent : écrire trop de décimales. Si l'incertitude vaut ± 0,2 kg, annoncer 20,000000 kg donne une illusion de précision.

8 — Pourquoi cette notion est vitale sur Mars

Une colonie martienne doit gérer des marges sur les stocks d'oxygène, l'eau, la puissance électrique, les débits, les températures, les pressions et la navigation. Une valeur sans précision peut conduire à croire qu'une réserve ou une marge de sécurité est plus certaine qu'elle ne l'est réellement.

La bonne habitude est simple : **mesurer, annoncer la marge, propager cette marge, puis décider avec une réserve de sécurité distincte.**

AM-01.14 · SPACE ACADEMY

Incertitudes et propagation d'erreur

Schéma pédagogique 5

Exactitude, précision et résolution ne sont pas synonymes



Pourquoi les chiffres significatifs sont une discipline



La corrélation change le calcul

Comprendre le raisonnement, puis seulement calculer.

Contrôle final : unité, ordre de grandeur, incertitude et nombre de chiffres cohérents.

9 — Exercices corrigés

Exercice 1

Une température est annoncée à $-20,0 \pm 0,5$ °C. Donnez l'intervalle pédagogique associé.

De $-20,5$ °C à $-19,5$ °C.

Exercice 2

Une masse vaut $40,0 \pm 0,4$ kg. Quelle est l'incertitude relative ?

$0,4 \div 40,0 = 0,01 = 1$ %.

Exercice 3

Pourquoi faut-il éviter d'annoncer 2,003847 kg/s si l'incertitude est $\pm 0,07$ kg/s ?

Parce que les décimales supplémentaires ne sont pas justifiées par la précision de la mesure.

9 — Sources primaires et techniques

- [NASA Measurement Quality Assurance Handbook — Annex 3](#)
- [NASA Measurement Quality Assurance Handbook — Annex 2](#)
- [NASA Glenn — Beginner's Guide to Aeronautics](#)