



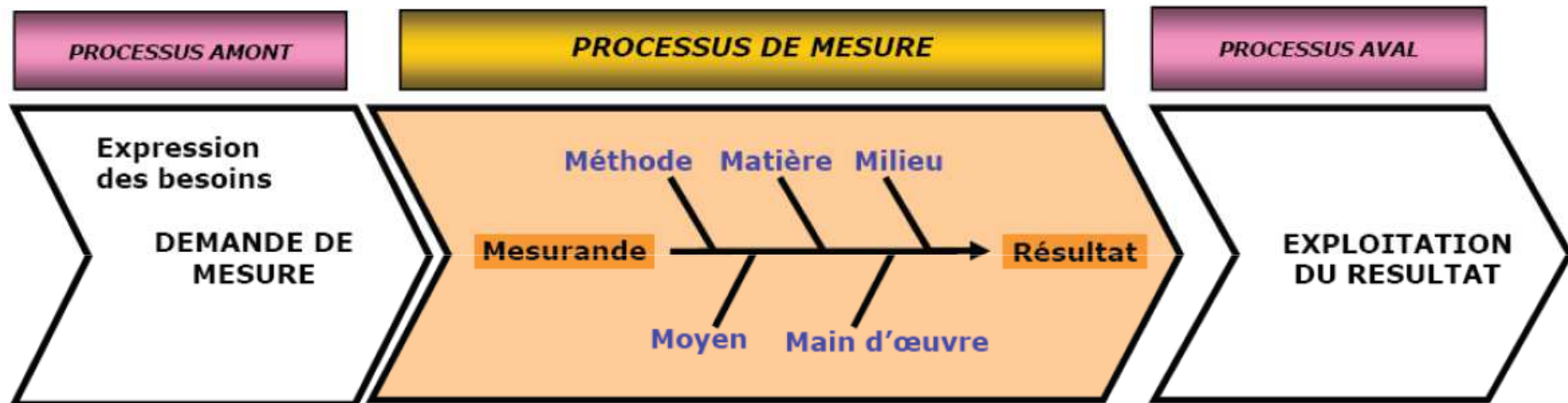
PROCESSUS DE MESURE

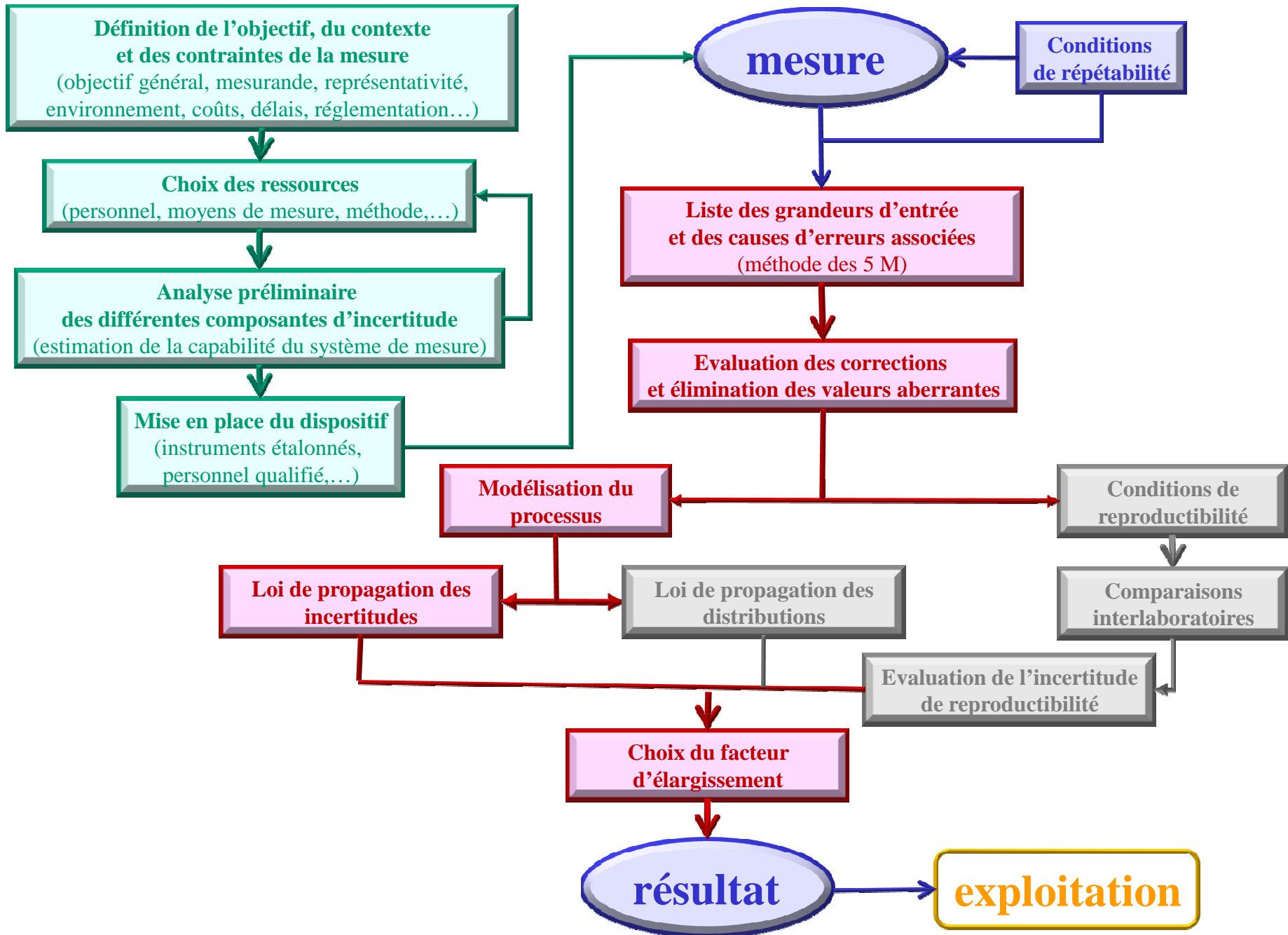
Par Bernard Bousaada, membre du Bureau Exécutif de France Qualité



méthodologie

Approche méthodologique du processus de mesure

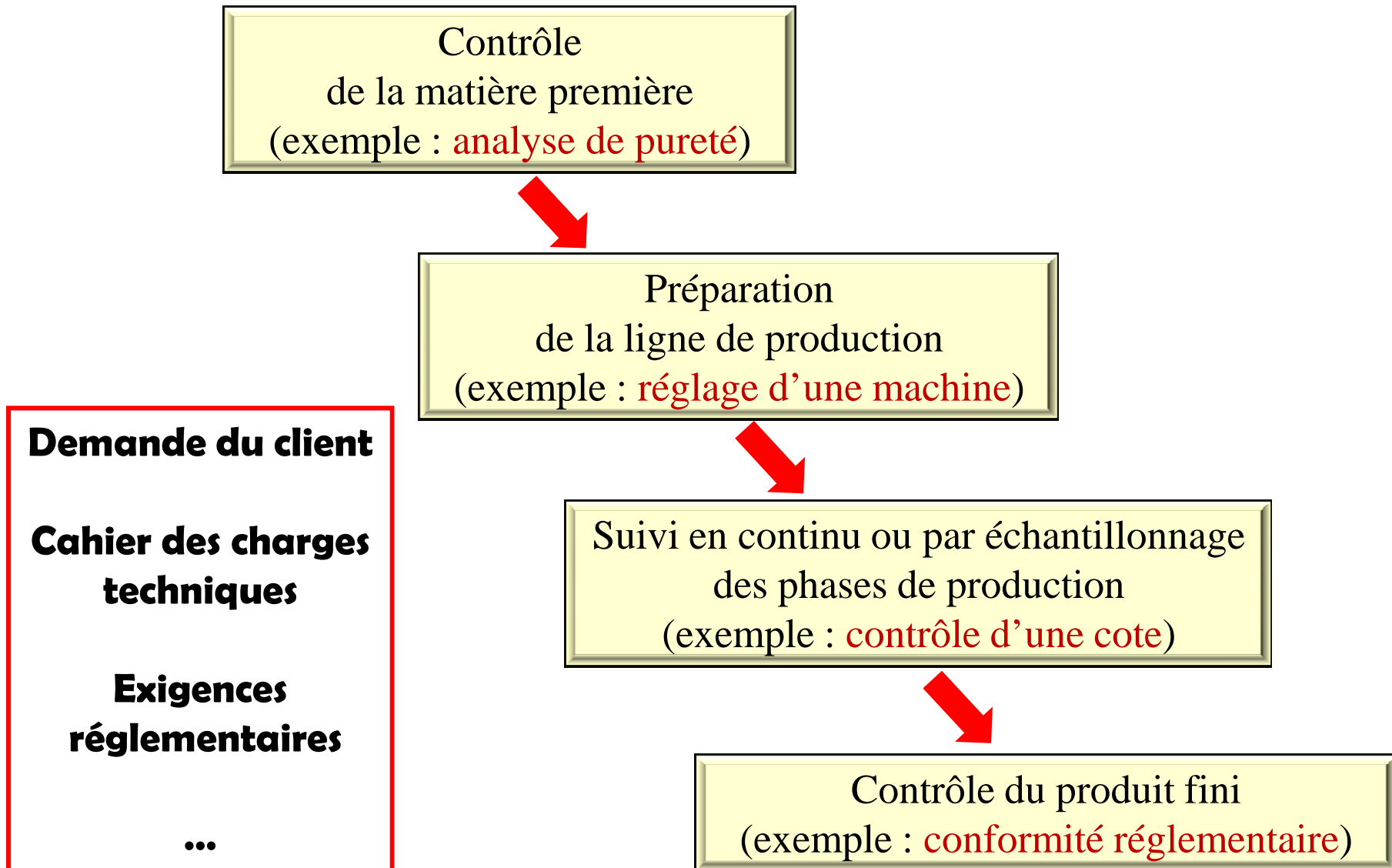




processus amont

Définir le besoin : pourquoi ?

Exemple d'un processus de fabrication d'un produit



Expression du besoin de mesure ou d'essai

Définir l'objectif de la mesure (besoin général)

Par exemple :

- *comparer les caractéristiques et les performances d'un produit à ses spécifications techniques (conformité);*
- *maîtriser le processus de production (contrôle).*

Définir le contexte de la mesure

Par exemple :

- *le mesurande en termes de grandeur physique mesurable et sa spécification technique associée ;*
- *les conditions opératoires de référence relatives à l'environnement du produit (conditions climatiques, mécaniques, électromagnétiques, écologiques et le facteur humain).*

Définir les contraintes (coûts, délais,...)

Bugétaires

Exemples :

- *disponibilité des équipements de mesure et d'essai (achat, amortissement, location, etc.) ;*
- *raccordement des équipements et maintien de leurs caractéristiques métrologiques (traçabilité).*

Organisationnelles

Exemple :

- *planification des tâches.*

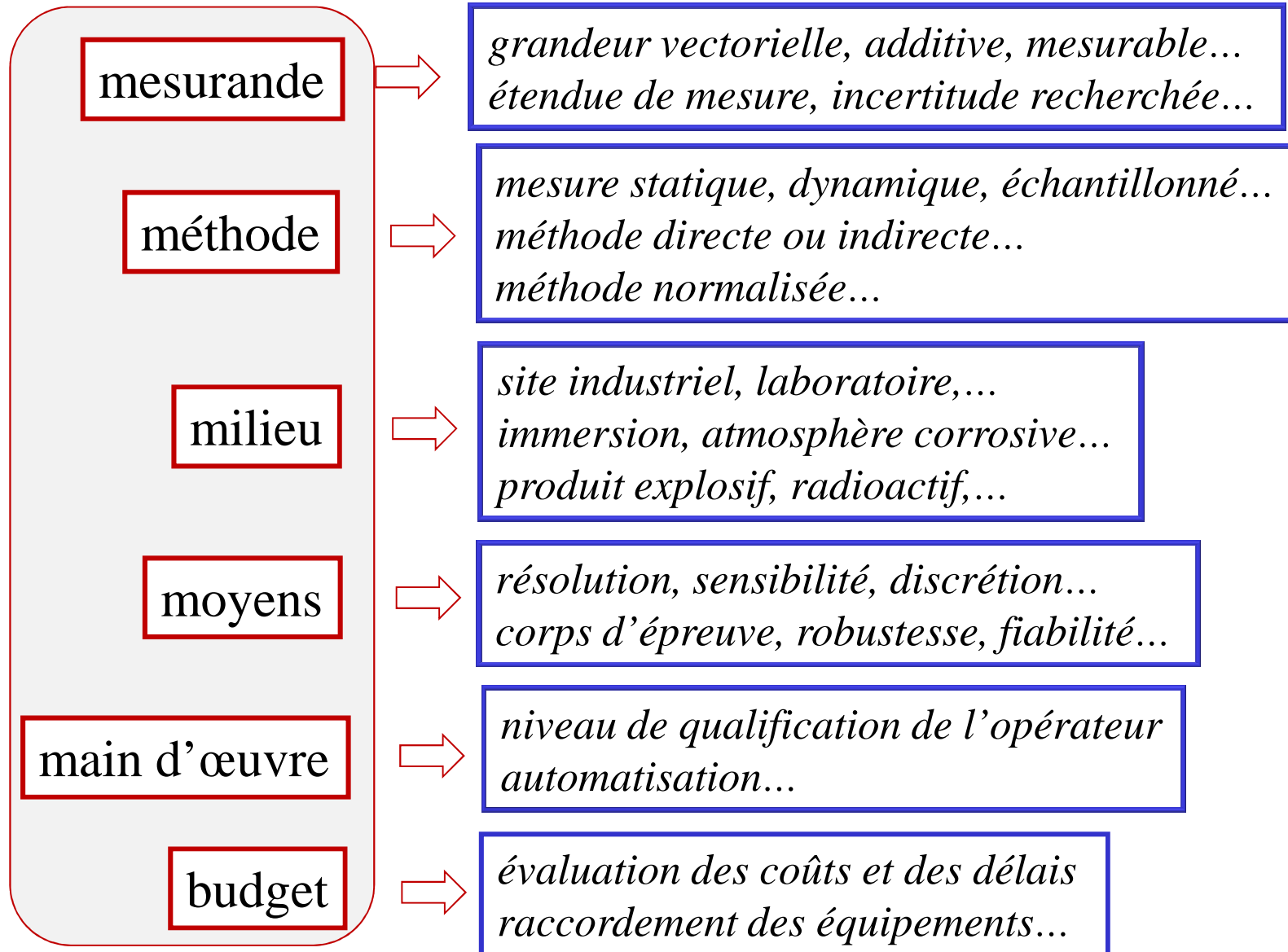
Contractuelles, réglementaires,...

Exemples :

- *méthode de mesure ou d'essai imposée ;*
- *respect des erreurs maximales tolérées ;*
- *démonstration d'assurance de la qualité ;*
- *altération permise ou non du produit.*

Définir le processus de mesure : quoi, comment, où, qui ?

Le processus de mesure dépend :



Choix des instruments de mesure

Sensibilité

Résolution

Répétabilité

Temps de réponse

Fonction de transfert

Etendue de mesure

Classe d'exactitude

Incertitude d'étalonnage

Conditions d'utilisation

Discrétion

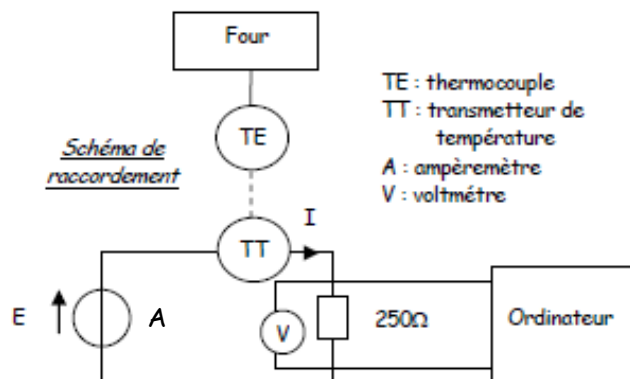
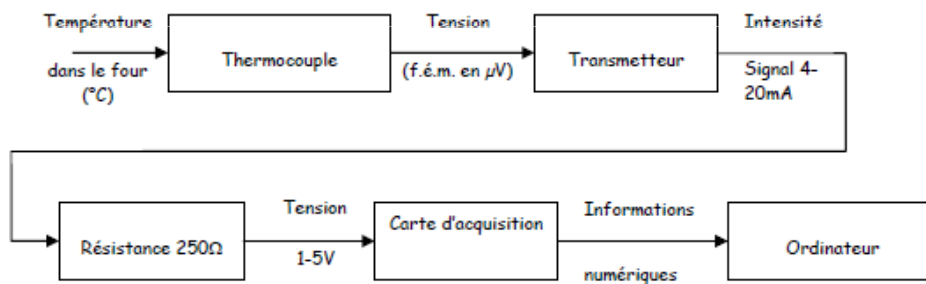
...

Exemple d'éléments d'analyse fonctionnelle du processus de mesure de température d'un four

- grandeurs à mesurer ? → température
- étendue de mesure nécessaire ? → 800 à 1000°C
- exactitude recherchée (incertitude ou EMT)? → 5°C
- conditions d'environnement et risques pour le capteur ? → milieu oxydant
- point physique de mesure le plus approprié ? → centre du four
- risque pour le processus en cas de défaillance du capteur ? → rupture du four

...

Schéma fonctionnel



Avantages et inconvénients des thermocouples

THERMOCOUPLE	Plage T°C en continu	Plage T°C en pointe	Points faibles	Point forts
J	20 à 700	-180 à 750	Fragile à basse température Dégradé en milieu oxydant > 400°C Sensible à l'humidité (Oxydation Fer)	Très bonne tenue en milieu réducteur
K	0 à 1100	-180 à 1300	f.e.m. instable dans le temps Derive très rapide au delà de 800°C	Bon en milieu oxydant Bonne plage de mesure Bon marché
T	-185 à 300	-250 à 400	Limité en haute températures Fuite thermique due au cuivre	Bien adapté aux basse températures Très bonne précision (voir tolérances)
E	0 à 800	-40 à 900	Son point fort qui était un atout au début est réduit par les progrès fait sur les électroniques	f.e.m. élevée
N	0 à 1150	-270 à 1300	Peu connu Voir remarque sous le tableau	Bonne stabilité à haute T°C Bon en milieu oxydant Bonne tenue aux cycles thermiques
S	0 à 1550	0 à 1700	Facilement contaminé, nécessite souvent une protection.	Résiste bien à l'oxydation Bonne précision (voir tolérances) Tenue à haute températures
R	0 à 1600	0 à 1700	Identique au S	Identique au S avec une f.e.m plus élevée et une stabilité plus forte
B	100 à 1600	0 à 1800	Identique au S et au R mais f.e.m. plus basse	Identique au S et au R avec une possibilité de pointe à 1800°C

Protection contre les grandeurs d'influence

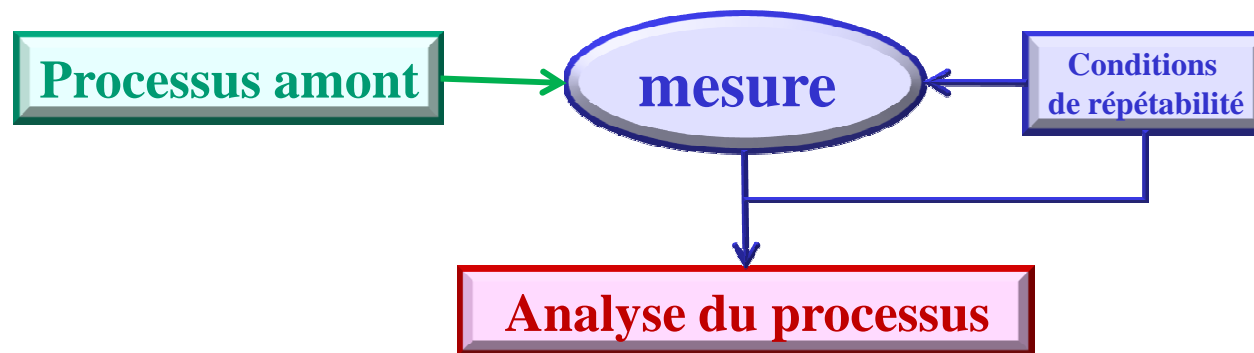
Élimination lors de l'utilisation de l'instrument de mesure
(par exemple : enceinte thermostatique, socle antivibratoire,...)

Insensibilisation lors de la construction de l'instrument
(par exemple : invar, équilibrage des pièces tournantes,...)

Compensation lors de la conception de l'instrument
(par exemple : l'un des capteurs sous vide, montage en pont...)

Correction sur les résultats de mesure

- mesure des grandeurs d'influence;
- détermination des coefficients de sensibilité;
- ...



*analyse
du
processus de mesure*

Analyse du processus : pourquoi ?

L'analyse du processus de mesure est :

- **recommandé** avant la réalisation des mesures afin d'obtenir un ordre de grandeur des composantes d'incertitude permettant d'**estimer la capacité du processus de mesure** par rapport aux exigences fixées;
- **nécessaire** une fois les mesures effectuées afin d'**évaluer l'incertitude et le niveau de confiance attribués au résultat de mesure** en vue de son exploitation

Évaluation de l'incertitude de mesure

Méthodes classiques de propagation des incertitudes (GUM)

position, dispersion

$$x_1 ; u(x_1)$$

$$x_2 ; u(x_2)$$

$$x_3 ; u(x_3)$$

$$Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

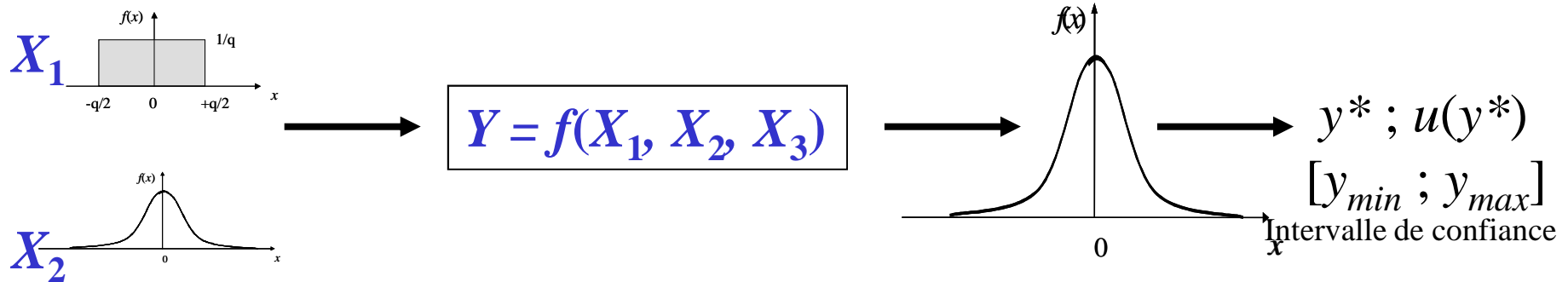
$$y ; u(y)$$

$$y \pm U$$

avec $1 < k \leq 3$

en général $k = 2$

Méthodes numériques de propagation des distributions (GUM-S1)



Méthodes particulières basées sur une approche bayésienne

Processus de mesure

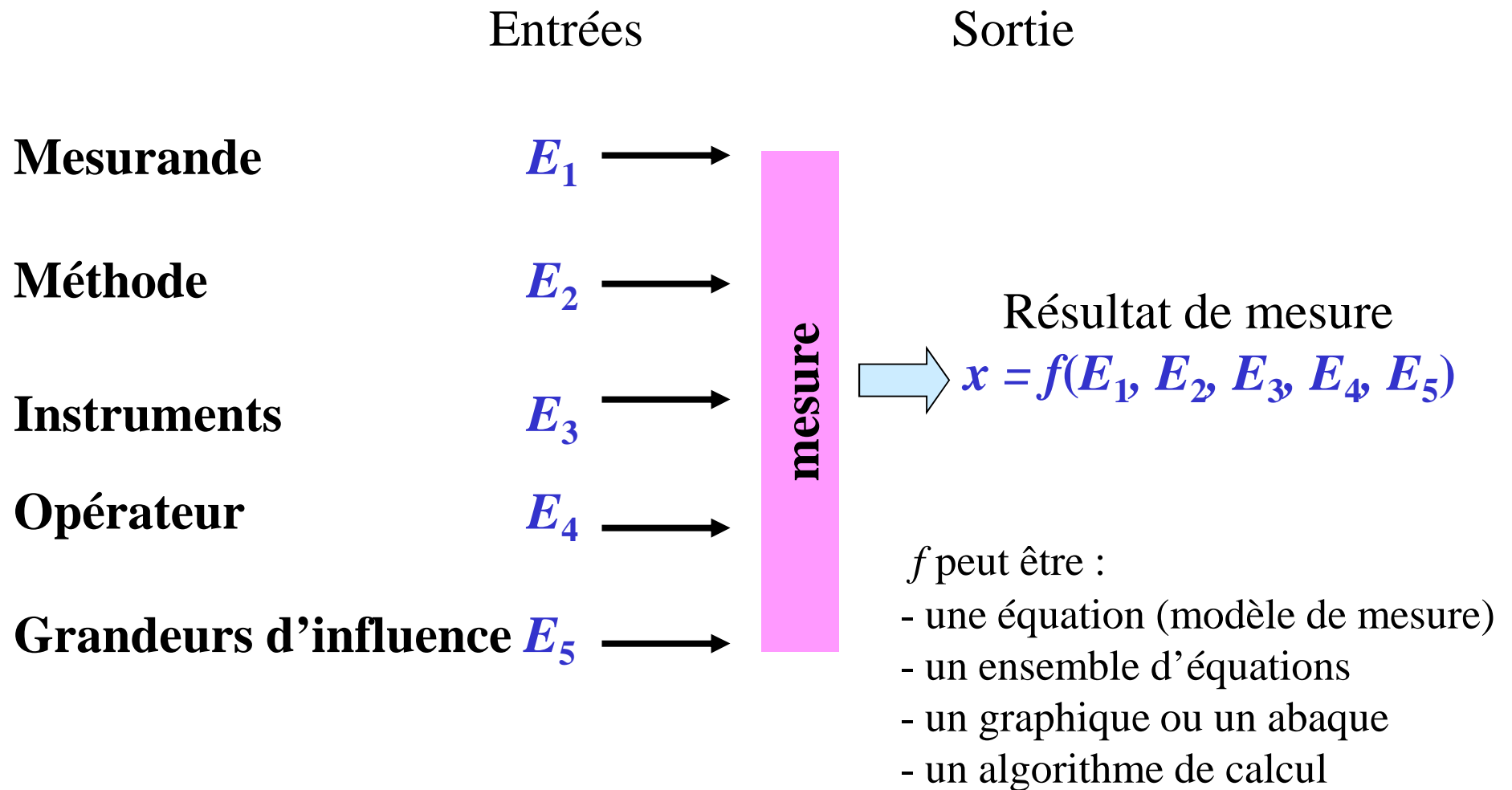
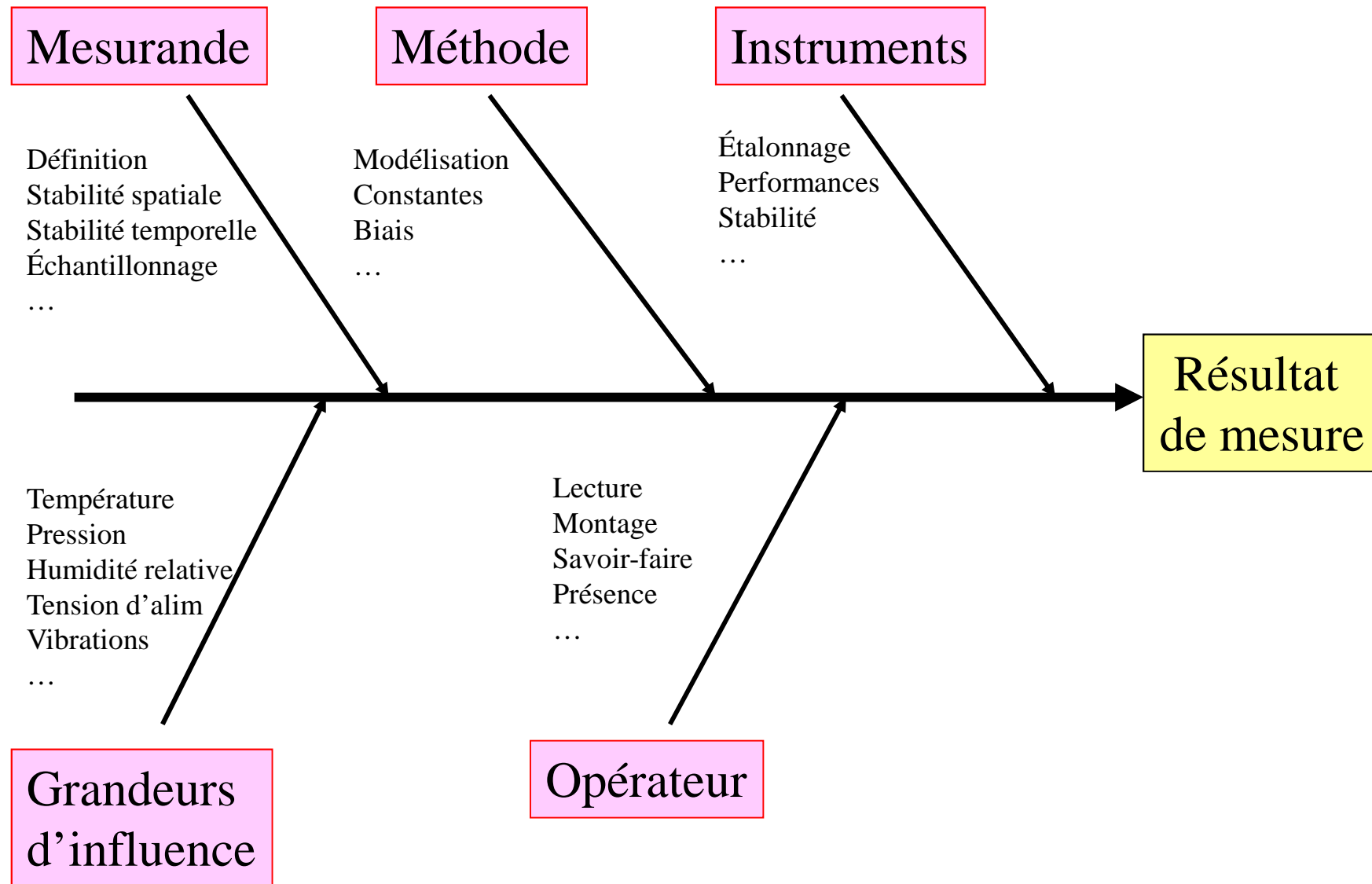


Diagramme des causes d'erreur



Causes perturbatrices

1. Causes liées à l'instrument de mesure

- caractéristique de l'instrument (sensibilité)
- résolution (quantification)
- non-linéarité
- hystérésis

2. Causes liées à la méthode

- méthode directe ou indirecte
- méthode par substitution, de zéro,...
- mode opératoire
- modélisation (formule empirique)

3. Causes liées au mesurande

- stabilité temporelle (exemple : dérive)
- homogénéité spatiale (exemple : étendue géométrique)
- représentativité (exemple : prélèvement)

4. Causes liées aux grandeurs d'influence

- température
- pression
- humidité
- champs extérieurs (électriques, magnétiques....)
- alimentation secteur de l'instrument....

5. Causes liées au bruit

- Phénomènes aléatoires, c'est à dire non maîtrisés
exemple : bruit électronique, bruit thermique

6. Causes liées aux constantes

- mathématiques (exemple π)
- physiques (3 constantes seulement sont parfaitement connues : ϵ_0 , μ_0 , et c).

7. Causes liées aux calculs

- les arrondis
- une intégration (transforme une intégrale en une somme)
- une dérivation (transforme des différentielles en accroissement)

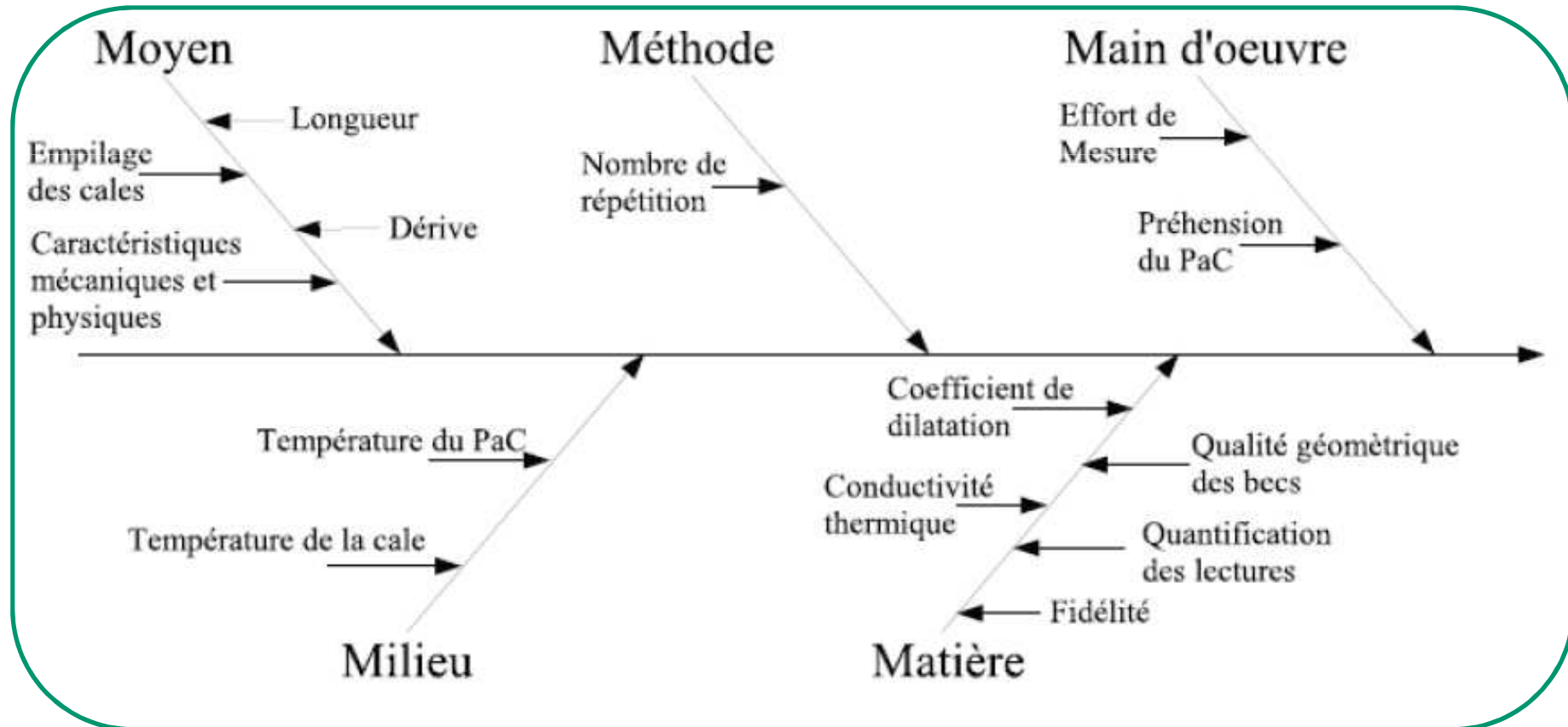
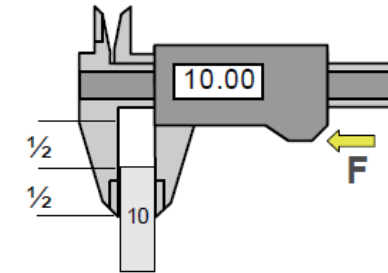
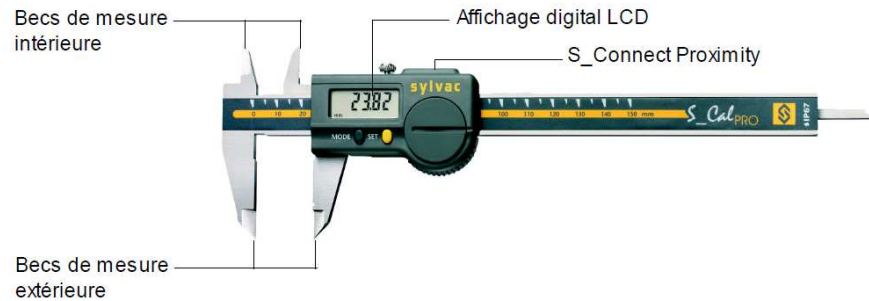
8. Causes liées à l'opérateur

- intervention dans la méthode de mesure (savoir-faire)
- saisie des valeurs brutes de mesure
- influence sur la mesure (vibration, rayonnement, poussières,...)

⇒ Éliminer les causes d'erreur

⇒ Évaluation des corrections

Exemple d'analyse du processus d'étalonnage d'un pied à coulisse



Incertitude de mesure

Incertitude de mesure (VIM) :

Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées.

NOTE : Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type appelé **incertitude-type** (ou un de ses multiples) ou la demi-étendue d'un intervalle ayant une **probabilité de couverture déterminée**.

Evaluation de type A (VIM) :

Evaluation d'une composante de l'incertitude de mesure par une **analyse statistique** des valeurs mesurées obtenues dans des conditions définies de mesurage.

Evaluation de type B (VIM) :

Evaluation d'une composante de l'incertitude de mesure **par d'autres moyens qu'une évaluation de type A** de l'incertitude

Conditions de répétabilité

Répétabilité : étroitesse de l'accord entre les résultats des mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.

Notes :

1 - Ces conditions sont appelées conditions de répétabilité.

2 - Les conditions de répétabilité comprennent :

- même mode opératoire
- même observateur
- même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions
- même lieu
- répétition durant une courte période de temps.

3 - La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

Méthode de type A dans des conditions de répétabilité

Résultat du mesurage
(moyenne arithmétique)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Incertitude-type de répétabilité
(écart-type expérimental)

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Incertitude-type de répétabilité de la moyenne

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{n}}$$

Méthode d'évaluation de type B des incertitudes

En l'absence d'évaluation par analyse statistique, on associe à la variable aléatoire considérée une **loi de distribution de probabilité**.

On applique le principe du maximum d'entropie.

Principe de l'entropie : *il faut utiliser toute l'information disponible, sans pour autant formuler d'hypothèses sur les informations que l'on ne possède pas.*

Le maximum d'entropie consiste à utiliser ce principe pour déterminer les lois de distribution *a priori*.

Ce principe est fondamental dans les méthodes numériques de propagation de distributions.

*Méthode de type B :
attribution d'une loi de distribution de probabilité*

Information disponible sur la variable X	Loi à assigner à X par maximum d'entropie
Limite basse : a Limite haute : b	Loi rectangulaire : $\mathcal{R}(a, b)$
Meilleure estimation μ Incertitude associée $u(\mu)$	Loi gaussienne : $\mathcal{N}(\mu, u^2(\mu))$
X varie sinusoidalement entre les limites a et b ($a < b$)	Loi « dérivée » arcsinus : $\mathcal{U}(a, b)$
Meilleure estimation μ	Loi exponentielle : $e(1/\mu)$

La distribution gaussienne est celle d'entropie maximale parmi toutes les lois possibles ayant même moyenne μ et même écart-type $u(\mu)$

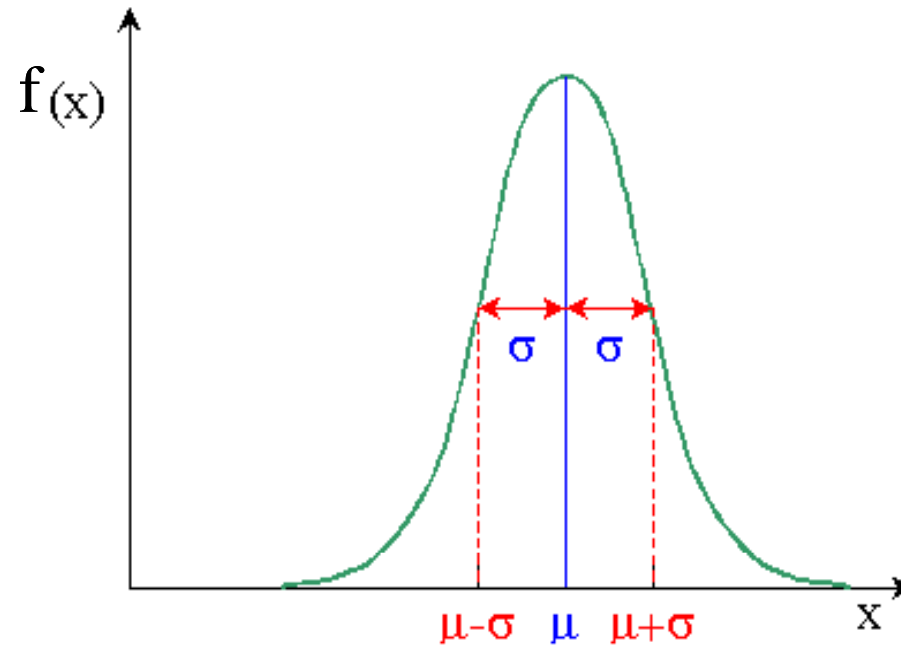
Loi de distribution de Gauss (ou Laplace-Gauss ou normale)

X continue définie sur \mathbf{R}

$$E(X) = \mu \quad V(X) = \sigma^2$$

Loi normale $\mathbf{N}(\mu, \sigma^2)$

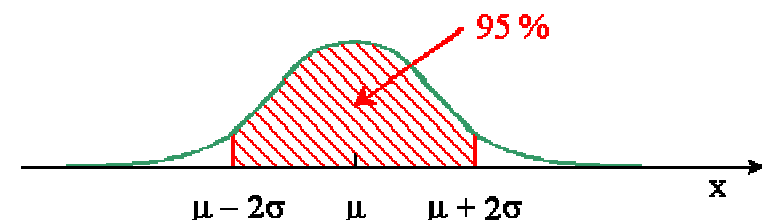
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



Points d'inflexion pour $X = \mu \pm \sigma$

<i>Niveau de confiance (%)</i>	<i>Facteur d'élargissement</i>
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

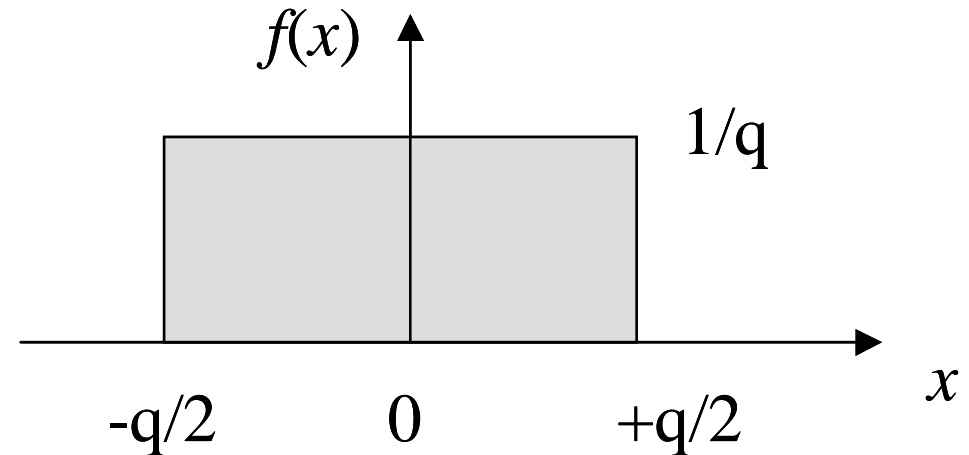
Pour un niveau de confiance de 95%,
on prend généralement un facteur
d'élargissement $k = 2$



Loi de distribution uniforme (ou rectangulaire)

X continue définie sur $[-q/2, +q/2]$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin [-q/2, +q/2] \\ 1/q & \text{si } x \in [-q/2, +q/2] \end{cases}$$



$$E(X) = 0 \quad V(X) = q^2/12$$

Cette loi est utilisée pour l'évaluation de l'incertitude due à :

- la résolution de l'indication numérique d'un instrument ;
- l'hystérésis d'un instrument de mesure ;
- l'arrondissement ou la troncature des nombres (ordinateur) ;
- ...

Détermination de l'incertitude-type composée

Pour des grandeurs d'entrée non corrélées, on obtient :

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}$$

Cas particulier, pour des grandeurs d'entrée corrélées avec des coefficients de corrélation égaux à +1, on obtient :

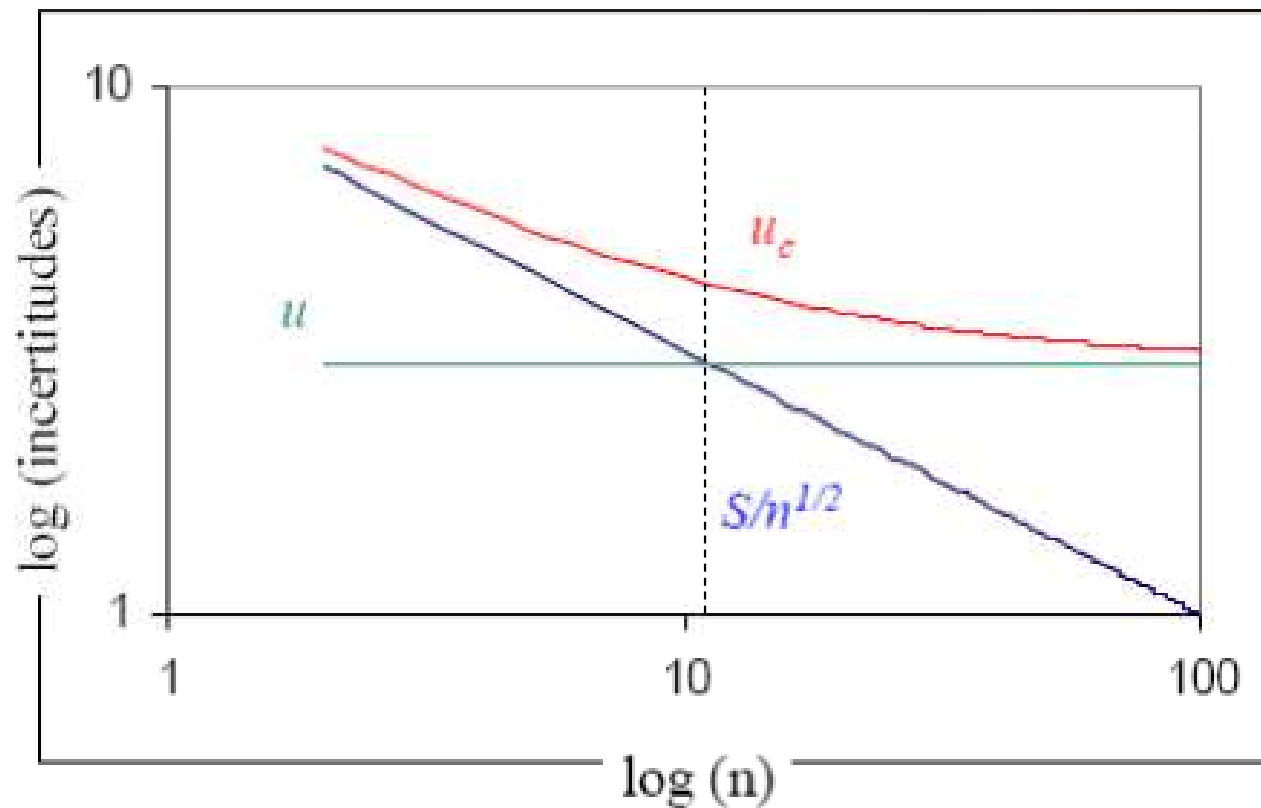
$$u_c(y) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| u(x_i)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}$$

Coefficient de sensibilité pour la variable x_i

Nombre optimum de mesures

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{S^2}{n} + u^2\right)}$$



Enoncé du résultat de mesure

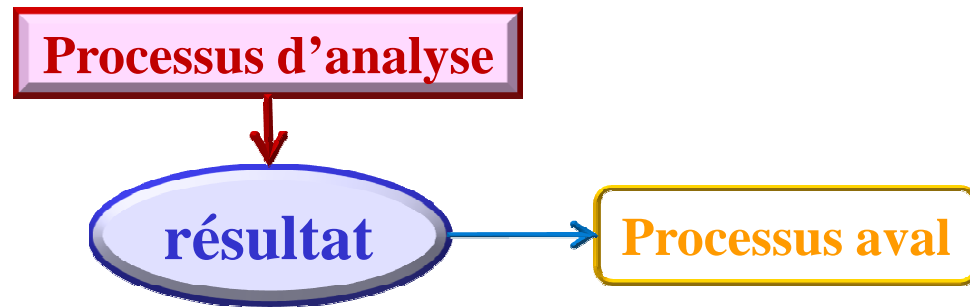
- Généralement, on associe au résultat de mesure l'incertitude-type composée u_c ou l'incertitude composée élargie U . Il convient de le dire explicitement et de mentionner le facteur d'élargissement k utilisé.

$$U = k u_c(y)$$

$$Y = y \pm U$$

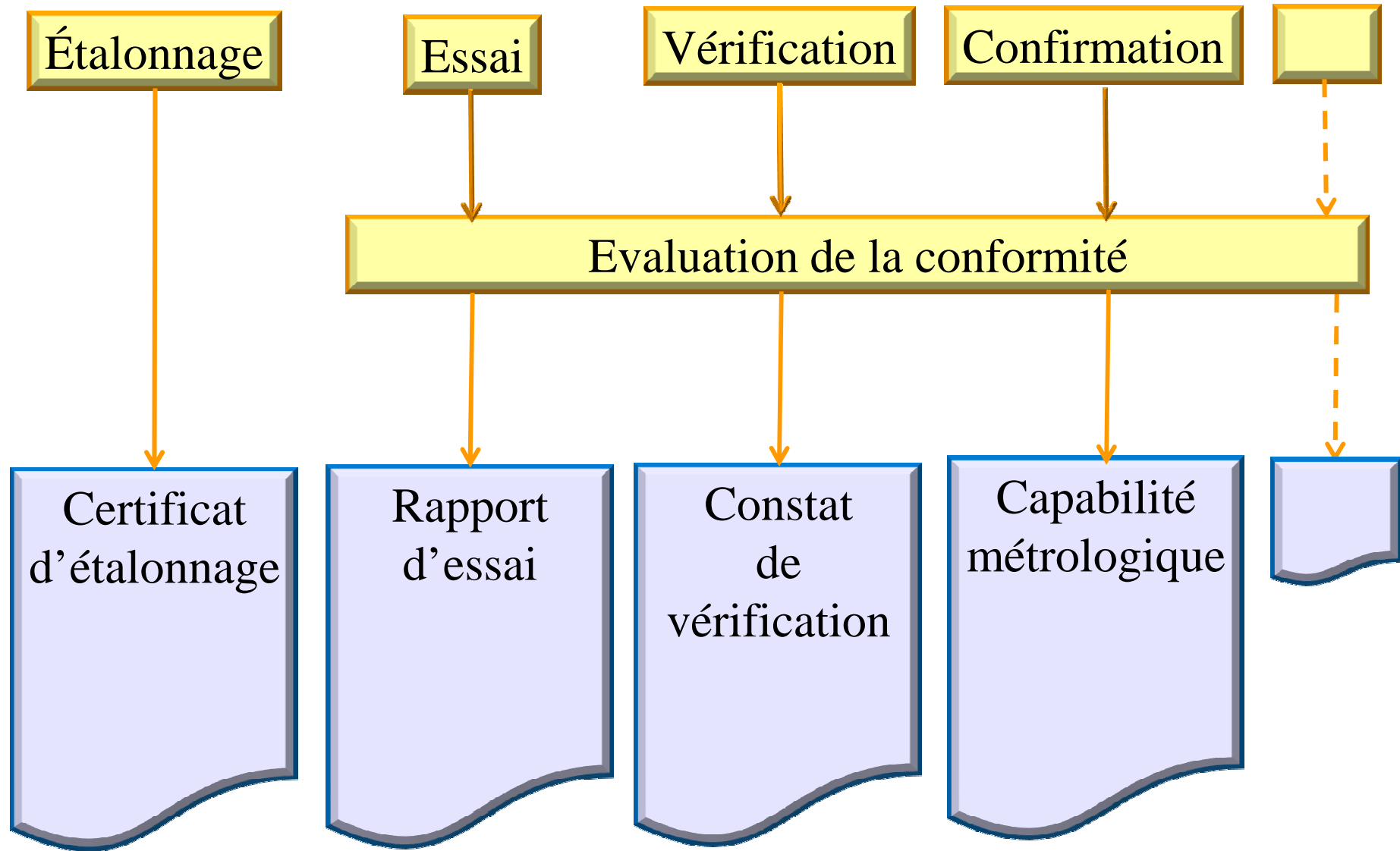
$$y; u_c(y)$$

- On peut également associer au résultat de mesure l'incertitude-type composée relative ou l'incertitude composée élargie relative (préciser k).

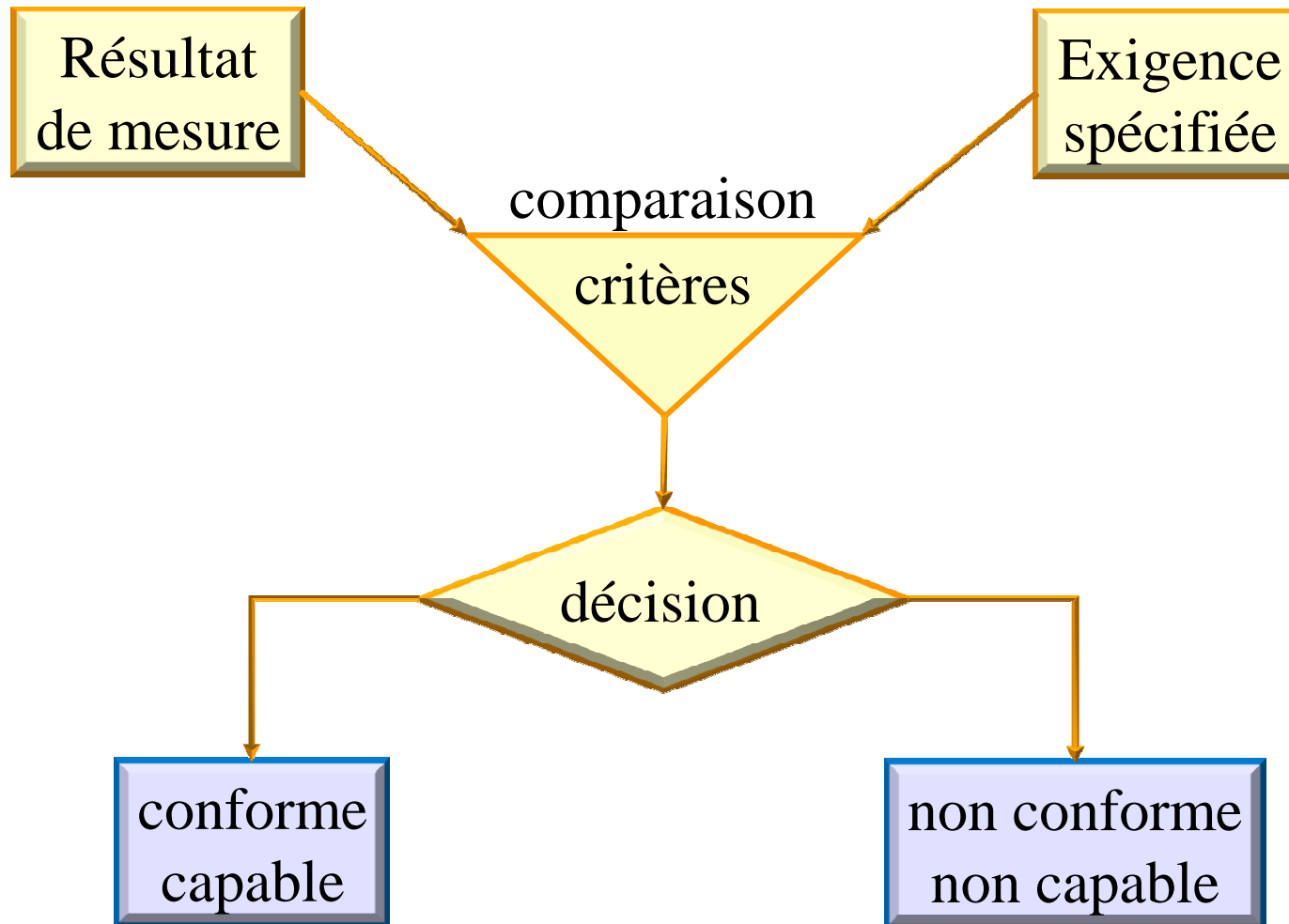


exploitation du résultat

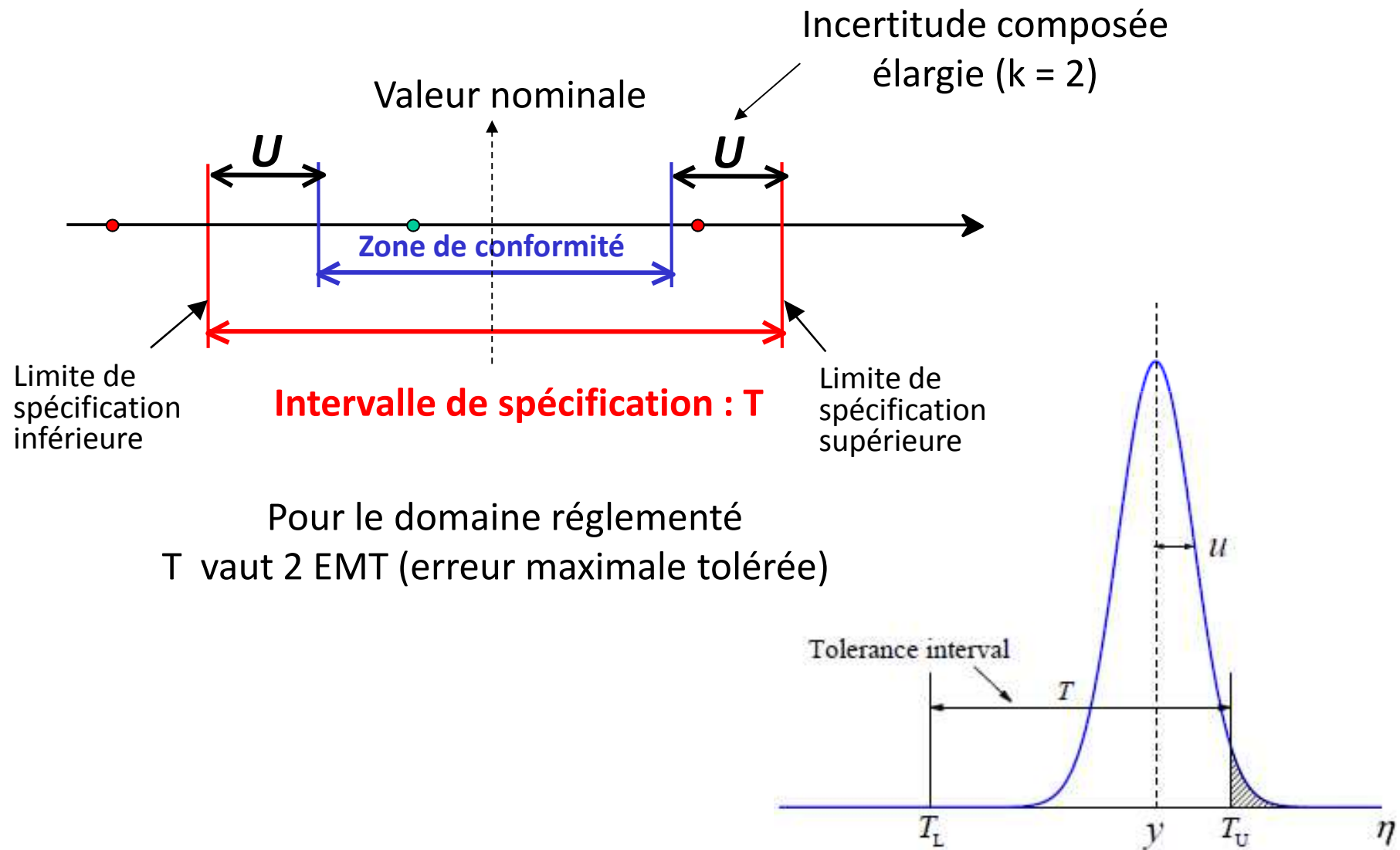
Exploitation du résultat de mesure



Principe de l'évaluation de la conformité

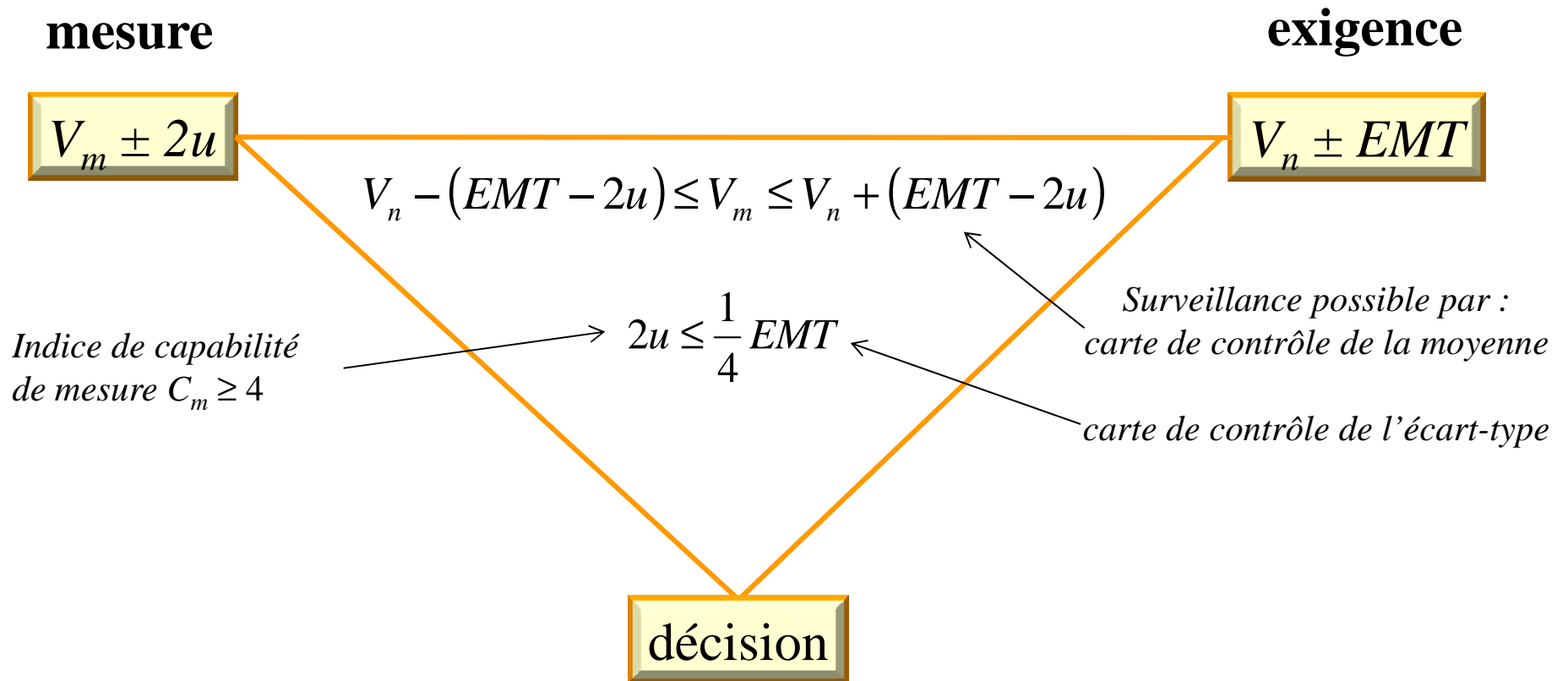


Intervalle de spécification (tolérance), EMT



Attention : il existe des intervalles de tolérance unilatéraux

Exemple d'évaluation de la conformité



Exemple : vérification de la classe d'exactitude d'un poids

Indice de capabilité de mesure

Paramètre qui caractérise la qualité de la mesure par rapport à l'exigence spécifiée par une tolérance :

$$C_m = \frac{T}{2U} = \frac{T}{4u_m}$$

avec U incertitude composée élargie ($U = 2 u_m$)
(niveau de confiance de 95% pour une loi normale)

ou

$$C_m = \frac{EMT}{U}$$

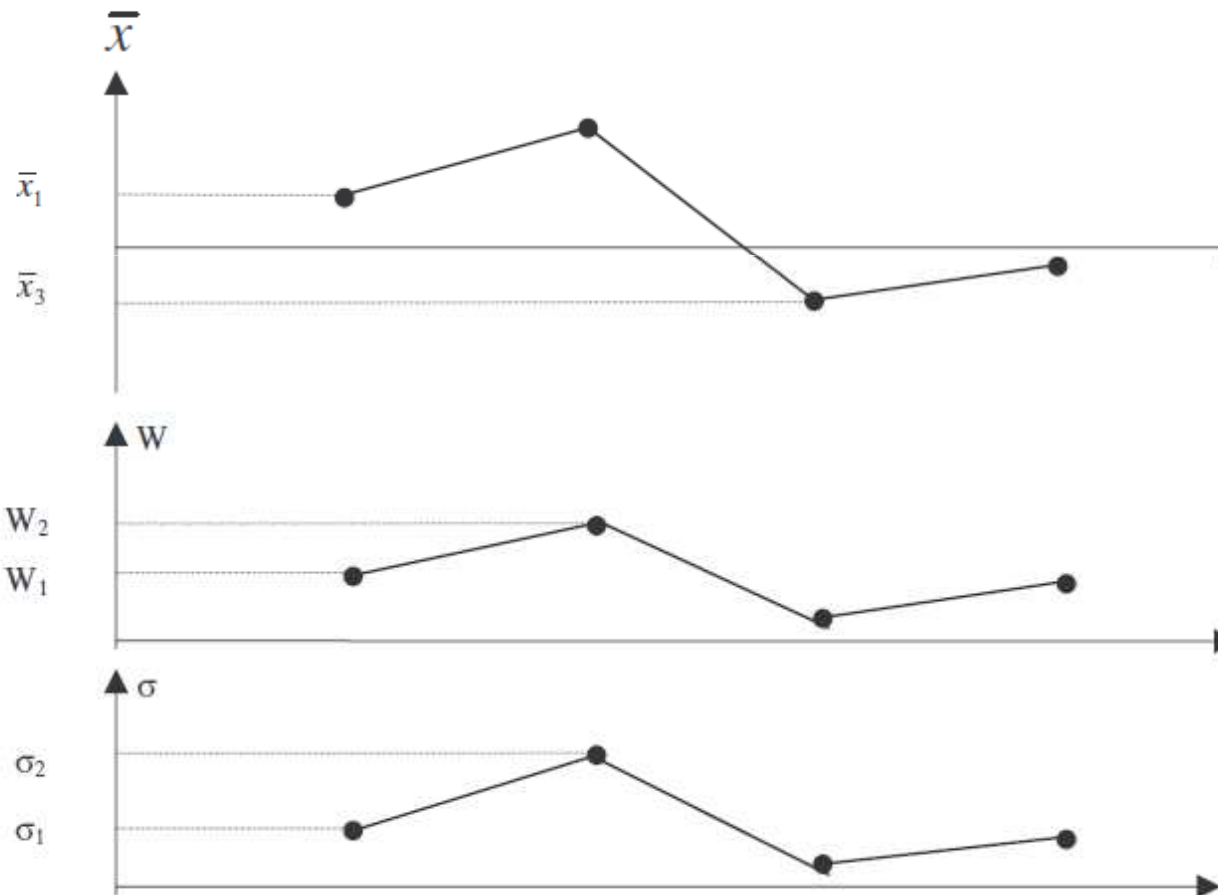
avec EMT erreur maximale tolérée

Exemples de cartes de contrôle

Soit n la taille du prélèvement avec $x_i =$ valeur de chaque individu

Numéro d'échantillon	1	2	3	4	etc
Moyenne	\bar{x}_1	\bar{x}_2	\bar{x}_3	\bar{x}_4	
Etendue	W_1	W_2	W_3	W_4	
Ecart-type	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	

Ordre chronologique



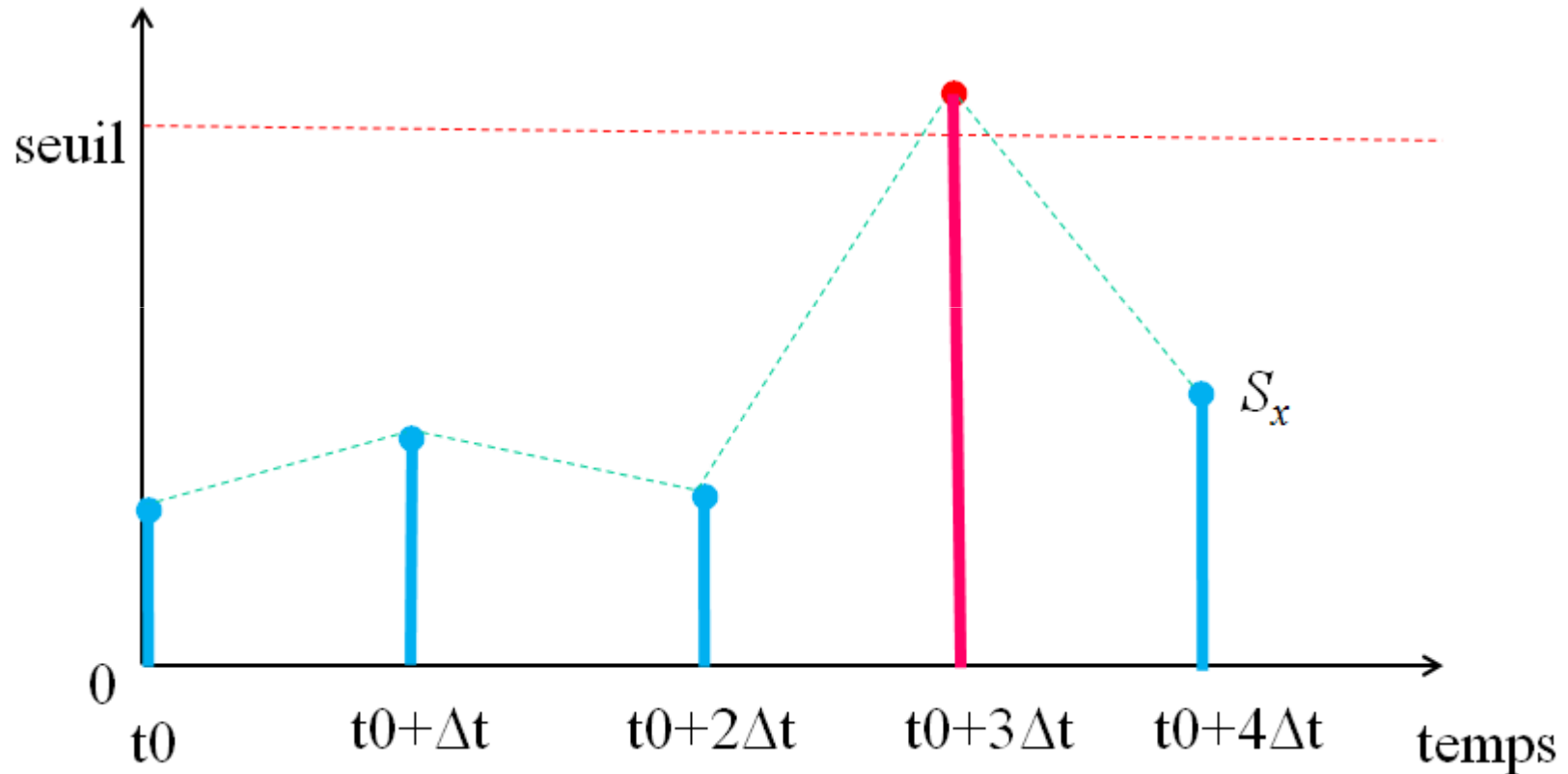
$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$W = x_{\max} - x_{\min}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

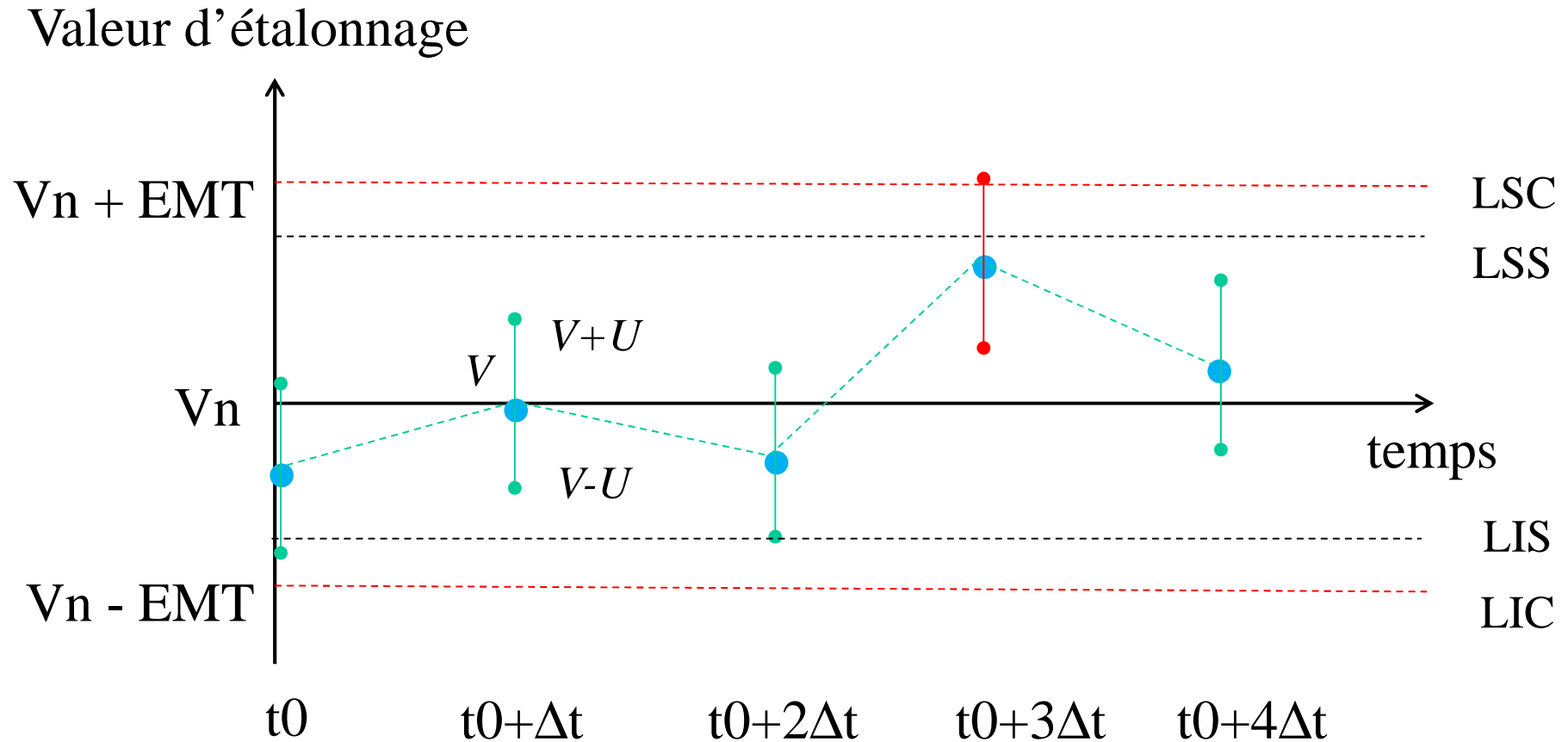
Exemple de surveillance de la fidélité d'un instrument de mesure

Répétabilité de mesure
d'un objet de référence



Exemple : répétabilité d'une balance pour une charge donnée

Exemple de surveillance de la pérennité d'un étalon de mesure



Exemple : suivi d'une résistance-étalon électrique

Exemple

Mesure de température de la température de rosée

Expression du besoin

Mesure de température de rosée dans une salle blanche régulée en température à $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ et en humidité relative à environ 0,5 de manière à avoir une température de rosée de $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$.

La capabilité de la chaîne de mesure sera vérifiée si le rapport du demi-intervalle de tolérance/incertitude élargie ($k = 2$) est ≥ 4 .

$$\text{soit : } C_m \geq 4$$

Spécifications Techniques

Performance	
Gamme de Mesure	
phase 1	-30 to +90°C point de rosée
phase 2	-40 to +90°C point de rosée
Température Élevée	-20 to +130°C point de rosée
Précision Mesure	±0,2°C point de rosée ±0,1°C température Précision ±0,15°C point de rosée en option
Unités de Mesure	Point de rosée : °C, °F; %HR; Température : °C, °F; g/m ³ ; g/kg; aw; Δ (t – t point de rosée)
Temps de Réponse	1°C/sec plus temps de stabilisation (selon point de rosée) (1,8°F/sec)
Alimentation Électrique	85 à 264 V AC, 47/440 Hz
Capteur Point de Rosée	
Miroir	Cuivre en or plaqué Or massif Acier inoxydable 316
Mesure de la Température	Thermomètre à résistance de platine 4 fils 100 Ω 1/3 DIN Classe B
Débit de l'Échantillonnage	0,1 à 2 l/min dans bloc d'échantillonnage
Rapidité Maximum	10 m/sec en insertion directe 30 m/sec avec écran de sécurité fritté
Pression	2 MPa (20 barg) 25 MPa (250 barg) optionnelle
Indice de Protection	Capteur IP66 300psi (NEMA 4) Capteur IP65 3500psi (NEMA 12)
Longueur Câble	2m (Maximum 30m)
TRP à Distance	
Mesure de la Température	TRP 4 fils 100 Ω 1/10 DIN Classe B
Longueur Câble	2m (Maximum 30m)
Appareillage Électronique du Transmetteur	
Résolution	0,1 pour °C, °F et %HR 0,01 for g/m ³ and g/kg
Sorties	
Analogique	Deux canaux 0/4-20 mA
Numérique	RS232 (RS485 en option)
Alarme	Contact sec, 2A à 30 V DC
État LED	Sous tension, CDC et état alarme
Température de Fonctionnement	-20 à +50°C température ambiante

Moyens de mesure

Mesure de température de rosée avec un IT de $(8 \pm 1)^\circ\text{C}$

- hygromètre à point de rosée avec une résolution du 10^{ième} de l'EMT

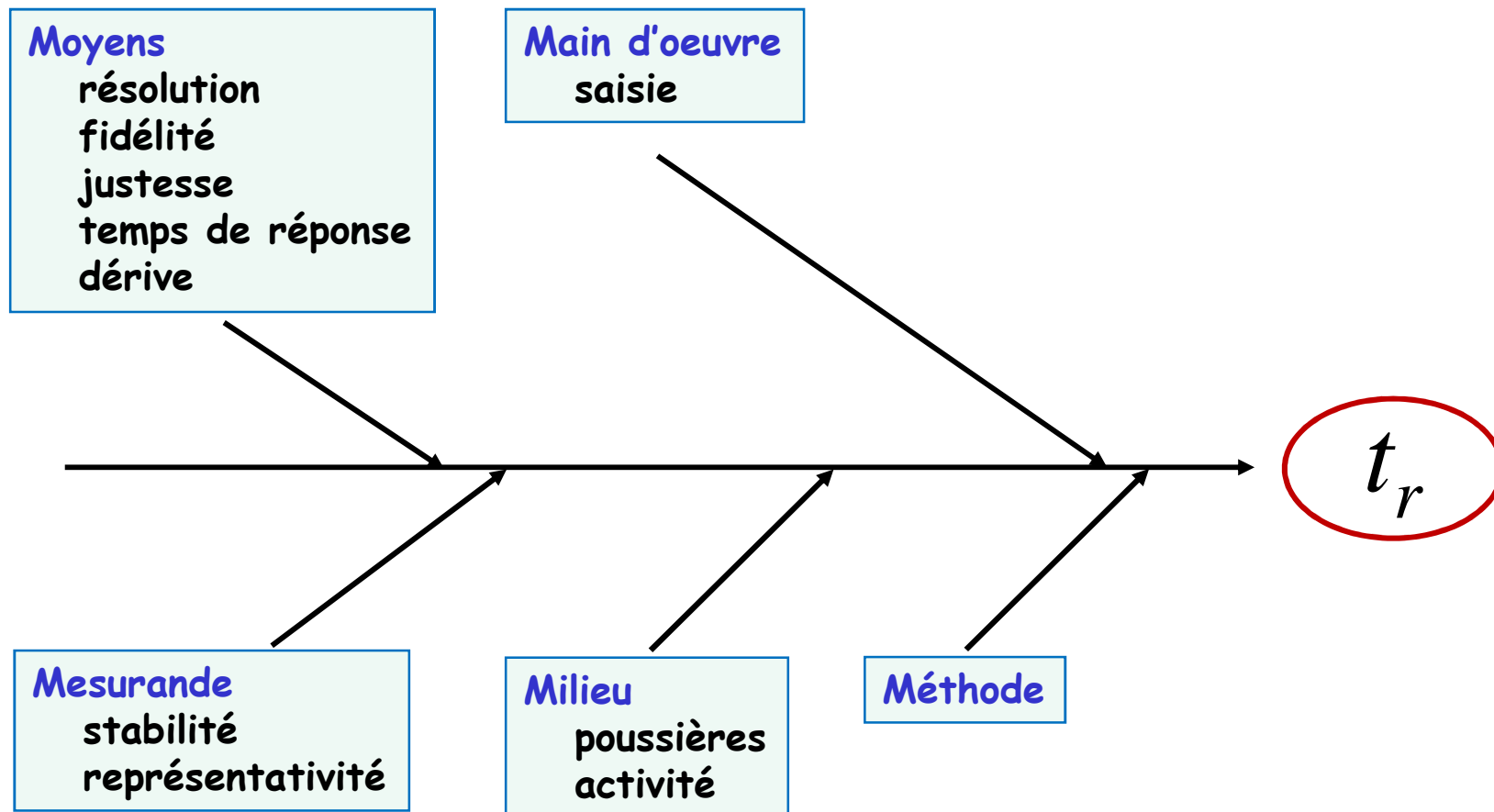


Attention aux termes impropres :

- « *gamme de mesure* » au lieu de « *intervalle nominal des indications* »
- « *précision* » au lieu de « *exactitude* » ou « *erreur de justesse* » ?
- « *temps de réponse* » au lieu de « *coefficient de sensibilité de réponse* »
- « *sec* » au lieu de « *s* »

Analyse du processus de mesure

Diagramme des causes d'erreur



Analyse du processus de mesure

Modélisation du mesurage

Méthode directe \Rightarrow **pas de modélisation**

Pas de certificat d'étalonnage \Rightarrow erreur de justesse inconnue
Temps de prise de mesure supérieur au temps de stabilisation
Aucune autre information

\Rightarrow ***Pas de correction***

Spécifications Techniques

Performance	
Gamme de Mesure	
phase 1	-30 to +90°C point de rosée
phase 2	-40 to +90°C point de rosée
Température Élevée	-20 to +130°C point de rosée
Précision Mesure	
	±0,2°C point de rosée
	±0,1°C température
	Précision ±0,15°C point de rosée en option
Unités de Mesure	
	Point de rosée : °C, °F; %HR; Température : °C, °F; g/m ³ ; g/kg; aw; Δ (t – t point de rosée)
Temps de Réponse	
	1°C/sec plus temps de stabilisation (selon point de rosée) (1,8°F/sec)
Alimentation Électrique	
	85 à 264 V AC, 47/440 Hz
Capteur Point de Rosée	
Miroir	
	Cuivre en or plaqué Or massif Acier inoxydable 316
Mesure de la Température	
	Thermomètre à résistance de platine 4 fils 100 Ω 1/3 DIN Classe B
Débit de l'Échantillonnage	
	0,1 à 2 l/min dans bloc d'échantillonnage
Rapidité Maximum	
	10 m/sec en insertion directe 30 m/sec avec écran de sécurité fritté
Pression	
	2 MPa (20 barg) 25 MPa (250 barg) optionnelle
Indice de Protection	
	Capteur IP66 300psi (NEMA 4) Capteur IP65 3500psi (NEMA 12)
Longueur Câble	
	2m (Maximum 30m)
TRP à Distance	
Mesure de la Température	
	TRP 4 fils 100 Ω 1/10 DIN Classe B
Longueur Câble	
	2m (Maximum 30m)
Appareillage Électronique du Transmetteur	
Résolution	
	0,1 pour °C, °F et %HR 0,01 for g/m ³ and g/kg
Sorties	
Analogique	Deux canaux 0/4-20 mA
Numérique	RS232 (RS485 en option)
Alarme	Contact sec, 2A à 30 V DC
État LED	
	Sous tension, CDC et état alarme
Température de Fonctionnement	
	-20 à +50°C température ambiante

Analyse du processus de mesure

Évaluation de l'incertitude de mesure

Prise de mesure toutes les 30 secondes

donc $\Delta t_r / \Delta \tau = 0,5/30 \ll 1^\circ\text{C/s}$

Méthode de type A

moyenne : 8,59 °C
écart-type s: 0,24 °C
écart-type/racine(n) : $S = 0,09$ °C

Méthode de type B

En l'absence de certificat d'étalonnage
Incertitude-type d'étalonnage :

$$u_e = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tolérance Classe B :
 $\pm(0,30 + 0,005 | t |)^\circ\text{C} \approx \pm 0,34^\circ\text{C}$

$$u_T = \frac{0,34}{\sqrt{3}} = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Résolution :

$$u_r = \frac{0,1}{2\sqrt{3}} = 0,03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tous les coefficients de sensibilité = 1

$$u = \sqrt{S^2 + u_e^2 + u_T^2 + u_r^2} = 0,25 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow U = 0,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_r = (8,59 \pm 0,50)^\circ\text{C} \quad (k = 2)$$

température de rosée (°C)

8,6

8,4

8,5

9,0

8,8

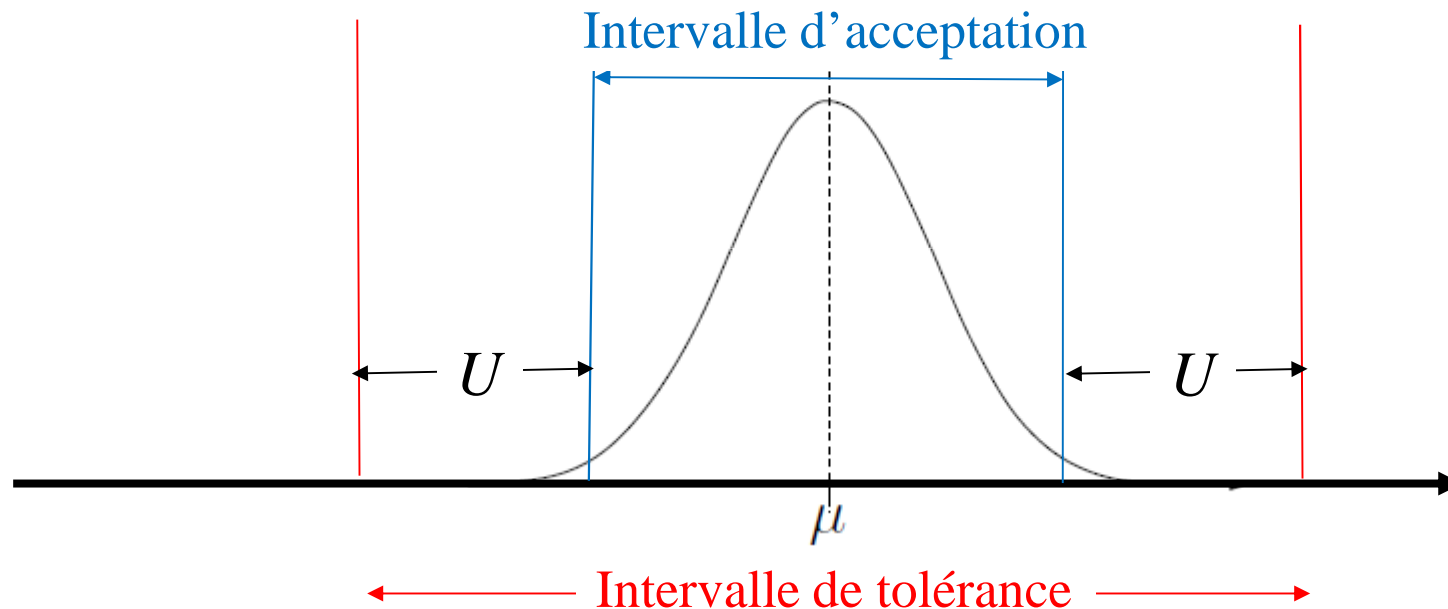
8,3

8,5

Exploitation du résultat de mesure

Capabilité du moyen de mesure

$$C_m = \frac{EMT}{U} = \frac{1}{0,5} = 2$$



L'indice de capabilité est inférieur à 4, l'hygromètre à point de rosée n'est pas capable de répondre à l'exigence définie en termes d'EMT. Si l'on utilise cet appareil, la valeur mesurée sera considérée comme conforme aux exigences si elle est comprise entre 7,5°C et 8,5°C.