

# ETUDE COMPARATIVE POUR LA DETERMINATION D'INCERTITUDES DE MESURES

G. Dupuis, N. Jacoutot, P. Leblois et J. Pierre Eugène  
Bourbon Automobile  
19, rue du jura 39170 Saint Lupicin

## Résumé

Suivant la norme ISO/CEI 17025 [1], les incertitudes de mesures doivent être quantifiées afin de s'assurer de la qualité des résultats émis par l'organisme de mesurages. Or, dans le contexte industriel actuel, la recherche systématique des incertitudes sur les différents types de mesures réalisées peut être très lourde de mise en place. Ainsi, une estimation systématique, au moment de la validation du processus de mesure, permettrait de gagner un temps précieux tout en approchant au mieux l'incertitude de mesure liée à ce processus.

Cette étude réalise un comparatif sur la détermination des incertitudes de mesure entre une méthode développée dans le GUM (Guide de détermination des incertitudes de mesures) [2] et une autre à partir de résultats de Répétabilité et de Reproductibilité.

## Abstract

In accordance with standard ISO/CEI 17025 [1], uncertainties of measurements must be quantified in order to ensure the quality of the results emitted by the organization of measurings. However, in the current industrial context, the systematic research of uncertainties of various types of measurements carried out can be very heavy to install. Thus, a systematic estimate, at the moment of the validation process measurement, would make it possible to save an invaluable time while approaching uncertainty as well as possible relating to this process.

This study carries out a comparative on the determination of uncertainties of measurement between a method developed in the GUM [2] and another starting from results of Repeatability and Reproducibility.

## Quelques définitions

Définitions obtenues de la norme intitulée : « Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie » [3] :

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

**Reproductibilité** (des résultats de mesurages) : étroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesures.

## Introduction

Entre la norme ISO/CEI 17025 et la norme ISO/TS 16949 [4], l'une souhaite que les incertitudes de mesures soient évaluées de quelque façon que ce soit, tandis que l'autre exige que des études statistiques soient réalisées sur les systèmes de mesurages (par exemple avec la validation au niveau de la répétabilité et de la reproductibilité du processus de mesure). Nous constatons ainsi que le contexte d'un laboratoire travaillant dans le monde automobile est exigeant au niveau de la qualité des mesures effectuées.

Plusieurs méthodes sont à disposition de l'entreprise pour lui permettre de répondre à ces exigences. Une étude comparative va être réalisée entre deux de ces méthodes.

## Quels sont les enjeux d'un tel comparatif ?

Cette comparaison entre une méthode jugée exhaustive telle que celle développée par le GUM et une méthode plus synthétique basée sur des résultats de Répétabilité et de Reproductibilité doit permettre de savoir si oui ou non, une estimation rapide à partir de données expérimentales suffisent à une bonne appréhension de l'incertitude de mesure du processus étudié.

Les enjeux sont multiples :

- Déterminer lors de la validation R&R d'une méthode de mesure (normalisée ou non normalisée) l'incertitude de mesure associée de manière rapide et simple.
- Désacraliser l'approche de l'estimation de l'incertitude de mesure.

## Cadre d'utilisation

La validation de ces résultats n'a eu lieu que sur des mesures dimensionnelles et des mesures dynamiques du type : effort d'arrachement, couple... comme présentés dans les exemples plus loin. Ainsi, les résultats obtenus dans cette étude ne sont employés que dans un cadre industriel définis. Celui-ci n'a pas besoin d'une estimation précise de cette incertitude mais plutôt d'un ordre de grandeur de celle-ci (une incertitude de l'ordre du centième de micron pour une mesure au pied à coulisse n'est pas nécessaire dans le cadre d'une application industrielle).

## Quel est le cheminement des 2 méthodes ?

### Méthode du GUM

#### Principe de fonctionnement

L'évaluation de l'incertitude par le GUM est basée sur une fonction de densité de probabilité où son espérance mathématique donne une estimation de la valeur de la grandeur mesurée tandis que son écart type donne l'incertitude associée. Cette fonction de densité de probabilité est basée sur la connaissance relative à une grandeur qui est déduite de :

- Mesures répétées (Evaluation de type A).
- Evaluation scientifique basée sur toutes les informations disponibles sur la variation possible de la grandeur (Evaluation de type B).

Pour atteindre le résultat final, le principe d'évaluation comporte 4 grandes étapes :

- Le calcul de résultat de la mesure composé de la définition du mesurande, de l'analyse du processus de mesure et de la définition du modèle mathématique du processus de mesure.
- Le calcul de l'incertitude type composé des méthodes d'évaluation des types A et B.
- La détermination de l'incertitude type composée suivant la loi de propagation des incertitudes.
- La détermination de l'incertitude élargie est exprimée par le résultat et son incertitude.

Cette approche analytique étudie de manière très détaillée le processus de mesure. Celle-ci est de type « ascendante », selon la norme ISO/TS 21748 [5], et se base principalement sur des données et connaissances scientifiques. Des personnes expertes du processus de mesures sont indispensables afin de caractériser correctement l'estimation.

#### Risques associés à la méthode

- Omettre un paramètre d'incertitude et ainsi sous estimer l'incertitude de mesure.
- Passer beaucoup de temps pour essayer d'identifier et de quantifier tous les paramètres influençant la mesure sans à aucun moment être sûr de la qualité du résultat obtenu.

#### ZOOM sur le MSA [6]

Le MSA contraction de : « Measurement System Analysis » est un document rédigé par l'organisation AIAG (organisation américaine regroupant entre autres les constructeurs automobile Chrysler, General Motors et Ford).

C'est un manuel de référence pour les analyses de système de mesure. Ce document n'est pas une norme internationale mais une directive. Il rassemble des méthodes statistiques permettant des analyses des moyens de mesure dans plusieurs cas de figures (mesures par attributs, mesures destructives...). Tout cela étant développé dans un esprit de compréhension du fonctionnement du processus de mesure étudié et d'amélioration continue.

## Méthode basée sur une étude de Répétabilité et Reproductibilité

#### Principe de fonctionnement

Selon le GUM, une estimation de l'incertitude peut être effectuée uniquement à partir de résultat de mesure provenant de l'utilisation de toutes les possibilités de mesures (instruments, méthodes, conditions de mesure). Cette recherche statistique exhaustive permettrait de connaître exactement l'incertitude liée à un type de mesure. Cette configuration est irréalisable dans le contexte industriel actuel, étant donné le coût de mise en œuvre.

En s'inspirant de ce concept, on peut quantifier la fidélité d'un processus de mesure en estimant la Répétabilité et la Reproductibilité suite aux manipulations de deux opérateurs au minimum. Cette estimation de la fidélité complétée par une estimation de la justesse donnerait une estimation assez réaliste de l'incertitude du processus de mesure étudié.

Le traitement de ces données sont effectuées selon la méthode intitulée « Range and Average Method » (Méthode des écarts et des moyennes) extraite du MSA (voir encadré ci-dessous). D'après cette référence, la reproductibilité peut être évaluée en la réduisant uniquement au changement d'opérateur, les paramètres extérieurs restant inchangés (température et pression du local de mesure, instrument de mesure...)

Cette méthode est utilisée en substitution de la méthode de comparaison interlaboratoire développée par la norme NF ISO 5725 [7] intitulée : « Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesures » qui obtient des résultats certainement plus fiables mais dont la lourdeur et la difficulté de mise en place, rendent difficile à appliquer au sein d'un laboratoire d'essais mécanique industriel.

Bien entendu, il apparaît à la première approche que cette estimation ne prend pas en compte un grand nombre de paramètres influençant la mesure telles que : la stabilité, la linéarité, le biais de la méthode et du laboratoire ; mais elle permet tout de même en prenant en compte les facteurs les plus influents, dans un cadre d'utilisation parfaitement défini, de donner des résultats intéressants et exploitables.

Cette approche définie de type « descendante » selon la norme ISO/TS 21748 se base principalement sur des données expérimentales. Aucune connaissance spécifique du processus de mesure, à part les certificats d'étalonnage des instruments de mesure utilisés, n'est requise pour ce genre d'estimation.

#### Risques associés à la méthode

- Risque de déterminer une incertitude trop faible à cause d'une bienveillance trop importante des opérateurs par rapport à leurs activités habituelles ou due à des conditions extérieures exceptionnelles.
- Risque d'oublier un paramètre influent sur la qualité de la mesure.

Nous allons voir à travers deux exemples réels, traités ci-après, l'efficacité des deux méthodes développées.

## Exemple n°1 :

Sur l'ailette central de l'aérateur, un curseur permet de diriger le flux d'air de gauche à droite et de bas en haut. Pour mesurer l'effort maximal de déplacement du curseur le long de l'ailette, un dispositif a été mis en place sur la machine de traction. Ces mesures sont réalisées dans un local régulé en température  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Les pièces étudiées et l'équipement ont leurs propriétés physiques stabilisées et à température du local. L'exigence au niveau de cette propriété est de  $2,5 \text{ N} \pm 1,5 \text{ N}$ .



### Estimation de l'incertitude par le biais de méthode R&R

Cette méthode propose d'estimer la fidélité à partir seulement des résultats de répétabilité et de reproductibilité et à partir d'une estimation de la justesse donnée par le certificat d'étalonnage de l'instrument de mesure employé (comme présenté dans cet exemple).

#### Estimation de la Répétabilité et de la Reproductibilité

Pour estimer ces paramètres, il faut remplir un grand nombre de conditions dont voici les principales ci dessous :

- Choisir 2 opérateurs réalisant dans leurs activités habituelles ce type de mesure.
- Prélever 5 pièces différentes (couverture maximale de l'intervalle de tolérance de la caractéristique étudiée, si possible).
- Référencer chaque pièce étudiée, et définir pour chaque opérateur un ordre de mesure des pièces (ordre aléatoire différent pour chaque opérateur).
- L'instrument de mesure ainsi que les conditions de mesures doivent être identiques pour les opérateurs.
- Le type de mesures effectué doit être des mesures non destructives possédant des variations intra pièce faible.
- Un pilote d'étude doit être présent lors de la réalisation de celle ci afin d'être garant de la bonne application des règles.
- ...

**Tableau de données (en N)**

| Opérateur | Mesures      | Pièces      |             |             |             |             | Moy.        |
|-----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|           |              | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |             |
| A         | 1            | 2,49        | 2,39        | 2,68        | 2,28        | 1,96        |             |
|           | 2            | 2,71        | 2,20        | 2,52        | 2,43        | 2,14        |             |
|           | 3            | 2,74        | 2,25        | 2,72        | 2,37        | 2,23        |             |
|           | <b>Moy.</b>  | <b>2,65</b> | <b>2,28</b> | <b>2,64</b> | <b>2,36</b> | <b>2,11</b> | <b>2,41</b> |
|           | <b>Ecart</b> | <b>0,25</b> | <b>0,19</b> | <b>0,20</b> | <b>0,15</b> | <b>0,27</b> | <b>0,21</b> |
| B         | 1            | 2,05        | 2,03        | 2,49        | 2,97        | 2,33        |             |
|           | 2            | 2,78        | 2,31        | 2,50        | 2,31        | 2,28        |             |
|           | 3            | 2,68        | 2,27        | 2,55        | 2,24        | 2,26        |             |
|           | <b>Moy.</b>  | <b>2,50</b> | <b>2,20</b> | <b>2,51</b> | <b>2,51</b> | <b>2,29</b> | <b>2,40</b> |
|           | <b>Ecart</b> | <b>0,73</b> | <b>0,28</b> | <b>0,06</b> | <b>0,73</b> | <b>0,07</b> | <b>0,37</b> |

La moyenne des écarts est :  $\bar{\bar{E}} = 0,293 \text{ N}$

L'écart entre les moyennes des opérateurs :  
 $x_{\text{diff}} = 0,004 \text{ N}$

Pour information, à partir de ces données et de cet intervalle de tolérance de 3N, nous avons un indice R&R de 22,62% en travaillant avec un niveau de confiance de 95%. Ce taux de 22,62% correspond à un jugement « acceptable » du processus de mesure.

*NB sur les règles de décisions selon le MSA :*

*Indice R&R < 10% signifie que le processus de mesure est jugé « Conforme » au niveau de sa fidélité et peut ainsi être utilisé en l'état pour le suivi en production.*

*Indice R&R < 30% signifie que le processus de mesure est jugé « Acceptable », il peut être utilisé en l'état mais des améliorations sont recommandées pour le rendre « conforme ».*

*Indice R&R ≥ 30% signifie que le processus de mesure est jugé « Non conforme », il ne peut pas être utilisé en l'état, des améliorations sont obligatoires.*

A partir de ces données, l'analyse peut être réalisée.

#### **Analyse des données**

##### Analyse de la variation équipement (VE) :

$$VE = \bar{\bar{E}} * K1$$

Avec le facteur K1 variant avec le nombre d'essais par pièce et par opérateur (ici il y a 3 essais donc  $K1=0,5908$ ) :  
 Dans ce cas,  $VE= 0,173 \text{ N}$

##### Analyse de la variation opérateur (VO) :

$$VO = \sqrt{\left(x_{\text{diff}} * K2\right)^2 - \left(\frac{VE^2}{n * r}\right)}$$

Avec : n : nombre de pièces mesurées (ici 5) ;

r : nombre d'essais réalisés par pièce et par opérateur (ici 3) ;

K2 : facteur variant avec le nombre d'opérateurs.

Ici pour 2 opérateurs,  $K2=0,7071$

Dans ce cas,  $VO= 0 \text{ N}$

Car la composante comprenant la variation équipement est plus importante que celle comprenant la variation entre les moyennes des opérateurs.

NB :

*Les coefficients K1 et K2 vus dans les formules de la variation équipement et opérateur sont des facteurs correctifs calculés par M. Pearson et M. Hartley (1951).*

*Ces facteurs correctifs existent car les calculs ci contre sont basés sur des calculs d'étendues (appelé écart sur cette feuille). Or, il existe une différence importante entre les étendues calculées et les écarts types de ce même processus de mesure. Pour approcher les valeurs des écarts types par cette méthode, il faut corriger nos différentes étendues par les coefficients indiqués [8].*

#### Estimation de la justesse

Le certificat d'étalonnage de l'ensemble machine de traction et capteur de force donne une incertitude de 0,07% pour une force en compression de 2N avec un niveau de confiance de 95% ( $k=2$ ).

### Chiffage de l'incertitude

| grandeur              | type | Demi étendue | Incertitude type    | variance            |
|-----------------------|------|--------------|---------------------|---------------------|
| VE                    | A    |              | 0,173               | 0,030               |
| VO                    | A    |              | 0                   | 0                   |
| Incertitude de mesure | B    | 0,07%*2,41   | $8,4 \cdot 10^{-5}$ | $7,1 \cdot 10^{-7}$ |

$$uc^2 = 0,030 \text{ N}^2$$

$$uc = 0,173 \text{ N}$$

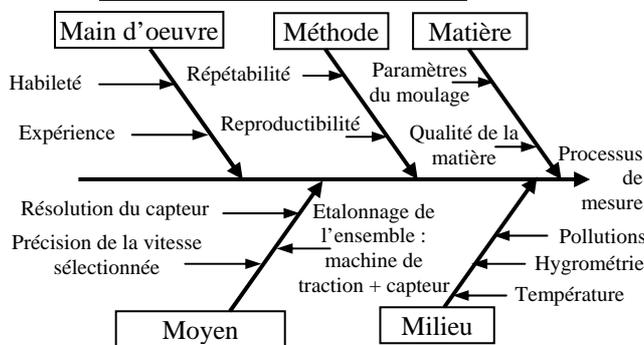
Incertitude :  $I = \pm (k \cdot uc)$  avec  $k=2$   
 $k$  étant un facteur d'élargissement permettant de travailler avec un niveau de confiance de 95%.

$$I = \pm 0,346 \text{ N}$$

Cette incertitude ramenée à la valeur moyenne des 5 pièces (2,41N) donne une incertitude relative de  $\pm 15\%$ .

### Estimation de l'incertitude par le biais du GUM

#### Analyse du processus de mesure



Une première analyse des facteurs d'influence permet de négliger certaines sources d'incertitudes telles que :

- Etant donné la faible influence de l'opérateur dans ce processus de mesure, et vu que la totalité de la mesure est réalisée de manière automatique par la machine, on suppose que l'habileté et l'expérience de l'opérateur est négligeable dans l'évaluation de l'incertitude.
- On néglige l'influence du milieu (c'est-à-dire ; pollutions, température et hygrométrie) sur la qualité de la mesure obtenue.
- La qualité de la matière plastique évolue certainement entre les différentes pièces produites, mais on la suppose équivalente sur l'ensemble d'une même pièce. Ainsi, ce paramètre aura certainement une influence sur la mesure de plusieurs pièces mais on peut la supposer négligeable pour des mesures répétées d'une même pièce.

Il reste donc les sources d'incertitudes suivantes :

- La Répétabilité (§A1) et la Reproductibilité (§A2).
- La résolution du capteur de force (§B1).
- La précision de la vitesse sélectionnée (§B2).
- L'étalonnage de l'ensemble machine de traction et capteur de force (§B3).

**Remarque :** Lors de la constitution de cette estimation d'incertitude, nous pensons que les différentes sources ne sont pas corrélées entre elles. Donc dans la suite des résultats, aucun facteur de corrélation n'apparaîtra.

### Méthode du type A :

#### A1 : Estimation de l'erreur de Répétabilité

10 mesurages ont été réalisés par le même opérateur et dans les mêmes conditions de mesure.

| n°    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $X_i$ | 2,39 | 2,20 | 2,25 | 2,03 | 2,31 | 2,27 | 2,28 | 2,43 | 2,37 | 2,24 |

$$\text{Moyenne } X_i = 2,277 \text{ N}$$

$$\text{Ecart type} = 0,113 \text{ N}$$

$$u_1 = 0,113 \text{ N}$$

#### A2 : Estimation de l'erreur de Reproductibilité

D'après l'étude R&R, nous pouvons estimer la reproductibilité de ce processus de mesure à un écart type évalué à :

$$u_2 = 0 \text{ N}$$

### Méthode du type B :

#### B1 : Résolution du capteur de force

Le capteur de force utilisé a une capacité maximale de 100N.

$$u_3 = \frac{0,4\% * 2,277}{\sqrt{3}} = 0,005 \text{ N}$$

#### B2 : Précision de la vitesse sélectionnée

Nous avons sélectionné une vitesse de 300 mm/min (équivalent à  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s) pour la descente du curseur le long de l'ailette. Cette vitesse a été choisie car elle a été jugée proche de la vitesse de manipulation d'un utilisateur quelconque.

La précision de la vitesse sélectionnée est de 0,03% de la valeur choisie. Etant donné, les relations entre la force et l'application d'une vitesse constante, on peut supposer que la force varie de 0,03% à cause de la vitesse sélectionnée.

$$u_4 = \frac{0,03\% * 2,277}{\sqrt{3}} = 0,004 \text{ N}$$

#### B3 : Etalonnage de l'ensemble machine de traction et capteur de force

D'après le certificat d'étalonnage, dans cette configuration, l'ensemble machine de traction et capteur possède une incertitude de 0,07% pour une force en compression de 2N.

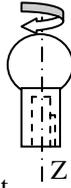
$$u_5 = \frac{0,07\% * 2,277}{2} = 0,001 \text{ N}$$

### Détermination de l'incertitude élargie

Dans un premier temps, on additionne les  $u_i$  élevés aux carrés ( $\sum_1^5 u_i^2 = 0,018 \text{ N}^2$ ). La racine de la somme est ensuite multipliée par 2 (estimation à 95%), on obtient :  
 $I = \pm 0,3 \text{ N}$  soit une incertitude relative de  $\pm 13\%$ .

## Exemple n°2 :

Les pommeaux de levier de vitesse de voiture, doivent résister à un effort maximal de rotation suivant l'axe Z. Cet effort traduit la résistance des clavettes à l'intérieur du corps de pommeau. Ainsi, ce type de mesure est considérée comme « destructrice » car à chaque effort maximal subi par la pièce, celle-ci va se déformer plastiquement et donc ne pas revenir à son état initial. Pour mesurer ce couple maximal, un moyen a été développé. Ce moyen comprime la tête du pommeau à l'aide d'une résine ce qui permet la rotation au couplemètre de cette tête tandis que le corps du pommeau est fixé au moyen et donc ne peut pas tourner. Ces mesures sont réalisées dans un local régulé en température  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Les pièces étudiées et l'équipement ont leurs propriétés physiques stabilisées et à température du local. L'exigence du client est une tolérance unilatérale minimale à 14Nm. C'est-à-dire qu'il faut garantir un effort supérieur à cette limite.



### Estimation de l'incertitude par le biais de méthode R&R

Remarques pour le prélèvement de pièces dans le cas d'essais destructifs :

Les mesures destructives ont été évaluées au niveau de leurs R&R en se basant sur l'hypothèse suivante (basée sur les travaux du groupe MSA [9]) :

« des pièces produites consécutivement issues de conditions de production identiques possèdent des caractéristiques identiques ».

En partant de ce principe et en admettant qu'il puisse s'appliquer au système de production des pièces étudiées, on prélève 6 pièces consécutives représentant ainsi les 6 mesures des 2 opérateurs pour la pièce n°1 et ainsi de suite pour les pièces n°2, n°3, n°4 et n°5. Entre le prélèvement de deux séries de pièces, un temps doit être observé afin de permettre au système de production de sortir des pièces aux caractéristiques légèrement différentes. Au total, pour réaliser l'étude, il faut  $5 \times 6 = 30$  pièces.

Tableau de données (en Nm)

| Opérateur | Mesures      | Pièces       |              |              |              |              | Moy.         |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|           |              | 1            | 2            | 3            | 4            | 5            |              |
| A         | 1            | 22,12        | 21,65        | 23,07        | 23,66        | 21,95        |              |
|           | 2            | 21,90        | 18,51        | 22,38        | 23,11        | 21,96        |              |
|           | 3            | 22,82        | 22,30        | 24,04        | 22,88        | 22,52        |              |
|           | <b>Moy.</b>  | <b>22,82</b> | <b>20,82</b> | <b>23,16</b> | <b>23,22</b> | <b>22,14</b> | <b>22,40</b> |
|           | <b>Ecart</b> | <b>0,92</b>  | <b>3,79</b>  | <b>1,66</b>  | <b>0,78</b>  | <b>0,57</b>  | <b>1,54</b>  |
| B         | 1            | 18,20        | 20,53        | 19,99        | 21,94        | 21,66        |              |
|           | 2            | 21,40        | 22,20        | 18,75        | 21,09        | 21,50        |              |
|           | 3            | 20,95        | 20,47        | 23,10        | 21,67        | 22,55        |              |
|           | <b>Moy.</b>  | <b>20,18</b> | <b>21,01</b> | <b>20,61</b> | <b>21,57</b> | <b>21,90</b> | <b>21,10</b> |
|           | <b>Ecart</b> | <b>3,20</b>  | <b>1,73</b>  | <b>4,35</b>  | <b>0,85</b>  | <b>1,05</b>  | <b>2,24</b>  |

La moyenne des écarts totale est :  $\bar{E} = 1,890 \text{ Nm}$

L'écart entre les moyennes des opérateurs :

$$x_{\text{diff}} = 1,258 \text{ Nm}$$

Moyenne des mesures : 21,70Nm

### Analyse des données

Analyse de la variation équipement (VE) :

Dans ce cas,  $VE = 1,117 \text{ Nm}$

Analyse de la variation opérateur (VO) :

Dans ce cas,  $VO = 0,842 \text{ Nm}$

Pour information, à partir de ces données et en conservant le même outil d'analyse, il faut un intervalle de tolérance de 20Nm pour que ce processus de mesure soit à peine acceptable (29,3%).

### Estimation de la justesse de la méthode

On approxime la justesse de la méthode à celle du certificat d'étalonnage du couplemètre qui donne une incertitude de  $\pm 1\%$ . (résultat à 95%)

$$u_3 = \frac{1\% * 21,70}{2} = 0,108 \text{ Nm}$$

### Chiffrage de l'incertitude

| grandeur             | type | Demi étendue | Incetitude type | variance |
|----------------------|------|--------------|-----------------|----------|
| VE                   | A    |              | 1,117           | 1,247    |
| VO                   | A    |              | 0,842           | 0,70814  |
| Incetitude de mesure | B    | 0,21696      | 0,108           | 0,01177  |

$$uc^2 = 1,97 \text{ Nm}^2$$

$$uc = 1,40 \text{ Nm}$$

Incetitude :  $I = \pm (k * uc)$  avec  $k=2$

$$I = \pm 2,8 \text{ Nm}$$

Cette incetitude ramenée à la valeur moyenne des 5 pièces (21,7Nm) donne une incetitude relative de :  $\pm 13\%$ .

### Estimation de l'incertitude par le biais du GUM

De la même manière que pour l'étude précédente, une analyse du processus de mesure a eu lieu.

#### Méthode du type A :

##### A1 : Estimation de l'erreur de Répétabilité

10 mesurages ont été réalisés par le même opérateur et dans les mêmes conditions de mesure.

| n°    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $X_i$ | 23,66 | 23,11 | 22,88 | 23,07 | 22,38 | 24,04 | 22,12 | 21,90 | 22,82 | 22,52 |

Moyenne  $X_i = 22,850 \text{ Nm}$

Ecart type = 0,663 Nm

$$u_1 = 0,663 \text{ Nm}$$

##### A2 : Estimation de l'erreur de Reproductibilité

D'après l'étude R&R, nous pouvons estimer la reproductibilité de ce processus de mesure à un écart type évalué à :

$$u_2 = 0,842 \text{ Nm}$$

#### Méthode du type B :

##### B1 : Etalonnage du couplemètre

Le certificat d'étalonnage du couplemètre donne une incetitude de  $\pm 1\%$ . (résultat à 95%)

$$u_3 = \frac{1\% * 22,85}{2} = 0,114 \text{ Nm}$$

## B2 : Erreur d'affichage du couplemètre

Le couplemètre affiche deux digits après la virgule donc  $q=0,01\text{Nm}$  (utilisation de la loi uniforme).

$$u_4 = \frac{0,01}{2 * \sqrt{3}} = 0,003 \text{ Nm}$$

## B3 : Incertitude du banc de mesure

Par expérience, on considère que le moyen composé de la résine et du bâti (en excluant le couplemètre) donne une incertitude  $\pm 1 \text{ Nm}$  (application de la loi uniforme).

$$u_5 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \text{ Nm}$$

## Détermination de l'incertitude élargie

De la même manière que précédemment, nous obtenons :  $I = \pm 2,5\text{Nm}$  soit une incertitude relative de  $\pm 11\%$ .

## Comparatif des différentes estimations

Ce tableau récapitulatif des principaux résultats d'estimation de l'incertitude pour différents types de processus de mesures :

| Appareillage                      | Valeur moyenne                      | $\pm U\%$<br>(GUM) | $\pm U\%$<br>(R&R) |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| Pied à coulisse                   | 27,59mm                             | 0,11%              | 0,08%              |
|                                   | 52,37mm                             | 0,25%              | 0,25%              |
| 3D contact                        | 111,580mm                           | 0,01%              | 0,01%              |
|                                   | 111,558mm                           | 0,01%              | 0,01%              |
| 3D optique                        | 111,504mm                           | 0,03%              | 0,02%              |
|                                   | 111,439mm                           | 0,04%              | 0,03%              |
| Moyen de contrôle A + comparateur | 103,40mm                            | 0,03%              | 0,02%              |
|                                   | 46,01mm                             | 0,05%              | 0,05%              |
| Moyen de contrôle B + piges       | 3,21mm                              | 5%                 | 5%                 |
|                                   | 2,98mm                              | 4%                 | 4%                 |
| Couplemètre                       | Couple max<br>22,536 Nm             | 11%                | 13%                |
| Machine de traction               | Arrachement<br>pommeaux<br>395,6 N  | 6%                 | 4%                 |
|                                   | Emmanchement<br>pommeaux<br>224,4 N | 5%                 | 5%                 |
|                                   | Déplacement<br>curseur<br>2,41N     | 13%                | 15%                |
|                                   | Descente barillet<br>2,4 N          | 14%                | 12%                |
| dynamomètre                       | Descente barillet<br>3,0 N          | 14%                | 12%                |

## Conclusions

Chacune des méthodes étudiées possède ses atouts :

- La méthode extraite du GUM est une méthode analytique donc permettant de prendre en compte le maximum de facteurs influençant la qualité de la mesure. Cette méthode peut nécessiter beaucoup de temps pour obtenir un résultat. Elle a besoin de spécialistes de la méthode de

détermination de l'incertitude et du processus de mesure étudié.

- La seconde méthode est une méthode plus synthétique donc moins complète au niveau de la quantité des éléments traités. Ainsi, il existe un risque de ne pas prendre en compte des paramètres importants. Par contre, cette méthode est rapide de mise en place et ne nécessite pas particulièrement de spécialiste à part des opérateurs expérimentés pour réaliser les mesures. De plus, elle permet de valider la fidélité du processus de mesure, avec la décision prise par rapport à l'indice R&R.

Au final, ces deux méthodes donnent des résultats de même ordre de grandeur pour le type de mesure étudié.

Dans le but de simplifier la démarche au sein de notre laboratoire, la méthode issue des R&R a été retenue ce qui permet de posséder de manière quasi-systématique l'incertitude de mesure du système en même temps que sa validation R&R.

Compte tenu des critères pris en compte dans la méthode R&R, dès lors que les facteurs prépondérants dans l'incertitude de mesure sont la répétabilité du processus de mesure, la reproductibilité due à l'opérateur ou aux défauts des pièces, alors cette méthode permet d'estimer raisonnablement l'incertitude de mesure, plus particulièrement pour surveiller des productions de grande série.

## Références

- [1] NF EN ISO/CEI 17025, Prescriptions générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essais, 2000.
- [2] NF ENV 13005, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, 1999.
- [3] NF X 07-001, Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie, 1994.
- [4] ISO/TS 16949, Exigences particulières pour l'application de l'ISO 9001 : 2000 pour la production de série et de pièces de rechange dans l'industrie automobile, 2002.
- [5] FD ISO/TS 21748, Lignes directrices relatives à l'utilisation d'estimations de la répétabilité, de la reproductibilité et de la justesse dans l'évaluation de l'incertitude de mesure, 2004.
- [6] Groupe de travail MSA (D.Benham, P.Cvetkovski, M.Down), Measurement System Analysis, 3<sup>ème</sup> édition, 2002.
- [7] NF ISO 5725 – 1 à 6, Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure, 1994.
- [8] Groupe de travail MSA et Gregory F. Gruska, the d-two-star tables uncovered, 2002.
- [9] Groupe de travail MSA (D.Benham, P.Cvetkovski, M.Down, G.Gruska), non-replicable GRR case study, 2002.