

# Evaluation de la variabilité d'un système de mesure

## Exemple 1 Diamètres des injecteurs de carburant

### Problème

Un fabricant d'injecteurs de carburant installe un nouveau système de mesure numérique. Les chercheurs souhaitent évaluer la qualité des mesures des injecteurs effectuées par le nouveau système.

### Collecte des données

Les techniciens prélèvent aléatoirement un échantillon de 9 injecteurs couvrant les principales sources de variation du procédé (machine, temps, équipe, changement de poste) et représentatifs de ceux généralement produits. Ils codent les injecteurs de manière à identifier les mesures prises sur chacun d'eux.

Le premier opérateur mesure les 9 injecteurs dans un ordre aléatoire. Ensuite, le second opérateur mesure les 9 injecteurs dans un ordre aléatoire différent. Chaque opérateur répète la procédure deux fois, ce qui représente un total de 36 mesures.

**Remarque** | Pour que les analyses du système de mesure soient correctes, vous devez prélever des échantillons et mesurer les pièces de façon aléatoire.

Les limites de spécification des diamètres d'injecteurs sont  $9\ 012 \pm 4$  microns. La tolérance est de 8 microns.

### Outils

- **Etude de R&R de l'instrumentation (croisée)**

### Fichier de données

Injecteur.MPJ

Variable	Description
Injecteur	Injecteur de carburant mesuré
Opérateur	Opérateur ayant pris la mesure
Ordre essais	Ordre initial des essais de l'expérience
Diam.	Diamètre d'injecteur mesuré (microns)

## Analyse des systèmes de mesure

### Qu'est-ce qu'une analyse des systèmes de mesure ?

Une analyse des systèmes de mesure évalue l'adéquation d'un système de mesure pour une application donnée. Lorsque vous mesurez les résultats d'un procédé, envisagez deux sources de variation :

- Variations de pièce à pièce
- Variation du système de mesure

Si la variation du système de mesure est importante par rapport à la variation de pièce à pièce, il est possible que les mesures ne fournissent pas d'informations pertinentes.

### Quand utiliser une analyse des systèmes de mesure ?

Avant de collecter des données à partir du procédé (par exemple pour analyser la maîtrise ou la capacité du procédé), utilisez l'analyse des systèmes de mesure pour vérifier que le système obtient des mesures régulières et exactes et qu'il effectue correctement une distinction entre les pièces.

### Pourquoi utiliser une analyse des systèmes de mesure ?

L'analyse des systèmes de mesure permet de répondre à des questions telles que :

- Le système de mesure peut-il correctement effectuer une distinction entre les pièces ?
- Le système de mesure est-il stable dans le temps ?
- Le système de mesure est-il exact sur toute l'étendue des pièces ?

Par exemple :

- Un viscosimètre peut-il correctement effectuer une distinction entre les viscosités de différents échantillons de peinture ?
- Une balance doit-elle être régulièrement réétalonnée pour qu'elle pèse avec exactitude les paquets remplis de pommes chips ?
- Un thermomètre mesure-t-il avec exactitude la température de tous les réglages de chaleur utilisés dans le procédé ?

## Etude de R&R de l'instrumentation (croisée)

### Qu'est-ce que l'étude de R&R de l'instrumentation (croisée) ?

L'étude de R&R de l'instrumentation croisée estime la variation totale du procédé due au système de mesure. La variation totale du procédé se compose de la variation de pièce à pièce et de la variation du système de mesure. La variation du système de mesure se compose des éléments suivants :

- Répétabilité : Variation due à l'instrument de mesure, ou variation observée lorsque le même opérateur mesure la même pièce plusieurs fois avec le même instrument
- Reproductibilité : Variation due au système de mesure, ou variation observée lorsque différents opérateurs mesurent la même pièce à l'aide du même instrument

Pour estimer la répétabilité, il est nécessaire que chaque opérateur mesure chaque pièce au moins deux fois. Pour estimer la reproductibilité, il est nécessaire qu'au moins deux opérateurs mesurent les pièces. Les opérateurs doivent mesurer les pièces dans un ordre aléatoire et les pièces sélectionnées doivent représenter l'étendue possible des mesures.

### Quand utiliser l'étude de R&R de l'instrumentation (croisée) ?

- Utilisez une étude de R&R de l'instrumentation pour évaluer un système de mesure avant de l'utiliser pour contrôler ou améliorer un procédé.
- Utilisez l'analyse croisée lorsque chaque opérateur mesure plusieurs fois chaque pièce (ou lot dans le cas d'un test destructif).

### Pourquoi utiliser l'étude de R&R de l'instrumentation (croisée) ?

Cette étude compare la variation du système de mesure à la variation totale du procédé ou à sa tolérance. Si la variation du système de mesure est importante par rapport à la variation totale, il est possible que le système n'effectue pas correctement une distinction entre les pièces.

L'étude de R&R de l'instrumentation croisée permet de répondre à des questions telles que :

- La variabilité d'un système de mesure est-elle faible par rapport à la variabilité du procédé de fabrication ?
- La variabilité d'un système de mesure est-elle faible par rapport aux limites de spécification du procédé ?
- Dans un système de mesure, quelle est la part de variabilité due aux différences entre les opérateurs ?
- Un système de mesure est-il à même d'effectuer une distinction entre les pièces ?

Par exemple :

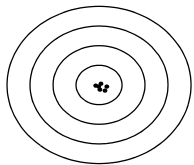
- Dans le diamètre mesuré d'un coussinet, quelle est la proportion de variabilité due au micromètre ?
- Dans le diamètre mesuré d'un coussinet, quelle est la proportion de variabilité due à l'opérateur ?
- Le système de mesure peut-il effectuer une distinction entre des coussinets de taille différente ?

## Erreurs du système de mesure

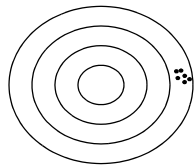
Les erreurs du système de mesure sont classées en deux catégories :

- L'exactitude est la différence entre la valeur réelle et la valeur mesurée d'une pièce.
- La précision est la variation qui se produit lorsque la même pièce est mesurée plusieurs fois avec le même instrument.

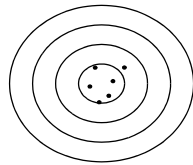
Tout système de mesure peut être affecté par l'une et/ou l'autre de ces erreurs. Par exemple, il est possible d'utiliser un instrument qui mesure les pièces avec une grande précision (peu de variation dans les mesures) mais sans exactitude. Par ailleurs, un instrument peut être exact (la moyenne des mesures est alors très proche de la valeur réelle) mais imprécis (les mesures présentent une variance importante). Enfin, un instrument peut n'être ni exact ni précis.



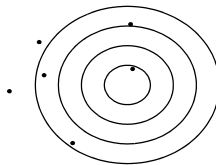
exact et précis



inexact mais précis



exact mais imprécis



inexact et imprécis

### Exactitude

L'exactitude d'un système de mesure possède trois composantes :

- **Biais** : Mesure l'inexactitude dans le système de mesure ; il s'agit de la différence entre la mesure moyenne observée et une valeur maître.
- **Linéarité** : Mesure l'effet de la taille de la pièce sur le biais du système de mesure ; il s'agit de la différence entre les valeurs observées pour le biais sur l'étendue attendue des mesures.
- **Stabilité** : Mesure les performances du système dans le temps ; il s'agit de la variation totale obtenue en répétant pour la même pièce, avec un instrument donné, la mesure d'une unique caractéristique sur une longue période.

### Précision

La précision, ou variation des mesures, possède deux composants :

- **Répétabilité** : variation due à l'instrument de mesure, ou variation observée lorsque le même opérateur mesure la même pièce plusieurs fois avec le même instrument.
- **Reproductibilité** : variation due au système de mesure ou variation observée lorsque différents opérateurs mesurent la même pièce à l'aide du même instrument.

## Evaluation du système de mesure

Utilisez une étude de R&R de l'instrumentation (croisée) pour déterminer les éléments suivants :

- Si le système de mesure peut effectivement effectuer une distinction entre les pièces
- Si les opérateurs obtiennent des mesures régulières

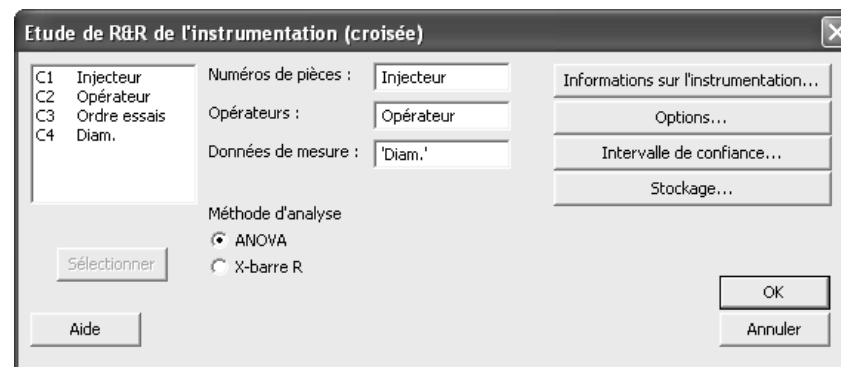
### Tolérance

Les limites de spécification des diamètres d'injecteurs sont  $9\,012 \pm 4$  microns. En d'autres termes, le diamètre d'injecteur peut varier de 4 microns maximum dans l'un ou l'autre sens. La tolérance est la différence entre les limites de spécification :  $9\,016 - 9\,008 = 8$  microns.

Vous pouvez entrer une valeur dans la zone Tolérance du procédé afin d'estimer la proportion de la tolérance absorbée par la variation du système de mesure.

### Etude de R&R de l'instrumentation (croisée)

- 1 Ouvrez le fichier Injecteur.MPJ.
- 2 Sélectionnez **Stat** ► **Outils de la qualité** ► **Etude de l'instrumentation** ► **Etude de R&R de l'instrumentation (croisée)**.
- 3 Configurez la boîte de dialogue comme suit.



- 4 Cliquez sur **Options**.
- 5 Sous **Tolérance du procédé**, choisissez **Spécification supérieure - Spécification inférieure**, puis entrez **8**.
- 6 Cochez la case **Dessiner les graphiques dans des graphiques distincts, un graphique par page**.
- 7 Cliquez sur **OK** dans chaque boîte de dialogue.

## Interprétation des résultats

### Tableaux d'analyse de la variance

Minitab utilise la procédure d'analyse de variance (ANOVA) pour calculer les composantes de la variance, à partir desquelles il estime ensuite la variation en pourcentage due au système de mesure.

La variation en pourcentage apparaît dans le tableau R&R de l'instrumentation.

Le tableau ANOVA à deux entrées comprend les termes de la pièce (Injecteur), de l'opérateur (Opérateur) et de l'interaction opérateur/pièce (Injecteur\*Opérateur).

Si la valeur de p de l'interaction opérateur/pièce est  $\geq 0,25$ , Minitab génère un second tableau ANOVA qui omet le terme de l'interaction dans le modèle. Pour modifier le taux d'erreur de 1ère espèce par défaut de 0,25, cliquez sur Options dans la boîte de dialogue principale. Dans la zone Alpha pour exclure le terme d'interaction, tapez une nouvelle valeur (par exemple, 0,3).

Dans cet exemple, la valeur de p de l'interaction Injecteur\*Opérateur est de 0,707. Par conséquent, Minitab supprime le terme de l'interaction du modèle et génère un second tableau ANOVA.

### Etude R&R d'instrumentation - Méthode ANOVA

#### Tableau ANOVA à double entrée avec interaction

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Injecteur	8	46,1489	5,76861	769,148	0,000
Opérateur	1	0,0400	0,04000	5,333	0,050
Injecteur * Opérateur	8	0,0600	0,00750	0,675	0,707
Répétabilité	18	0,2000	0,01111		
Total	35	46,4489			

Alpha pour supprimer le terme d'interaction = 0,25

#### Tableau ANOVA à double entrée sans interaction

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Injecteur	8	46,1489	5,76861	576,861	0,000
Opérateur	1	0,0400	0,04000	4,000	0,056
Répétabilité	26	0,2600	0,01000		
Total	35	46,4489			

## Interprétation des résultats

### Composantes de la variance

Minitab calcule également une colonne des composantes de la variance (CompVar) et utilise les valeurs pour calculer le pourcentage de R&R de l'instrumentation avec la méthode ANOVA.

Le tableau R&R de l'instrumentation détaille les sources de la variabilité totale :

- La R&R totale de l'instrumentation se compose des éléments suivants :
  - Répétabilité : Variabilité issue des mesures répétées effectuées par le même opérateur.
  - Reproductibilité : Variabilité obtenue lorsque la même pièce est mesurée par différents opérateurs. (Ce résultat peut être affiné en composantes opérateur et opérateur/pièce.)
- De pièce à pièce : Variabilité des mesures entre les différentes pièces.

### Pourquoi utiliser les composants de variance ?

Les composantes de variance totale permettent d'évaluer dans quelle proportion chaque source de variation-erreur de mesure et différences de pièce à pièce contribue à la variation totale.

Dans une configuration optimale, les différences entre les pièces doivent représenter la majeure partie de la variabilité, tandis que la variabilité issue de la répétabilité et de la reproductibilité doit être très petite.

### R&R de l'instrumentation

Source	CompVar	% contribution (de CompVar)
R&R de l'instrumentation totale	0,01167	0,80
Répétabilité	0,01000	0,69
Reproductibilité	0,00167	0,11
Opérateur	0,00167	0,11
De pièce à pièce	1,43965	99,20
Variation totale	1,45132	100,00

## Interprétation des résultats

### Contribution en pourcentage

La valeur % Contribution est basée sur les estimations des composantes de la variance. Chaque valeur de la colonne CompVar est divisée par la variation totale, puis multipliée par 100.

Par exemple, pour calculer la valeur % Contribution de De pièce à pièce, divisez la valeur CompVar de De pièce à pièce par la valeur Variation totale, puis multipliez le résultat par 100 :

$$(1,43965/1,45132) * 100 \approx 99,20$$

Par conséquent, 99,2 % de la variation totale dans les mesures est due aux différences entre pièces. Cette valeur est considérée comme très bonne. Lorsque la contribution en pourcentage de De pièce à pièce est élevée, le système peut effectuer une distinction entre les pièces.

### Mesure de la variance en fonction de l'écart type

Etant donné que les valeurs de la colonne % Contribution sont basées sur la variance totale, leur somme atteint 100 %.

Minitab affiche également des colonnes de pourcentages basés sur l'écart type (ou sur la racine carrée de la variance) de chaque terme. En général, ces colonnes, étiquetées % Var étude et % Tolérance, n'atteignent pas 100 %. Etant donné que l'écart type utilise les mêmes unités que les mesures de pièces et la tolérance, cela permet de faire des comparaisons significatives.

**Remarque** | Minitab affiche la colonne % Procédé si vous entrez un écart type historique dans la zone Options.

### R&R de l'instrumentation

Source	CompVar	% contribution (de CompVar)
R&R de l'instrumentation totale	0,01167	0,80
Répétabilité	0,01000	0,69
Reproductibilité	0,00167	0,11
Opérateur	0,00167	0,11
De pièce à pièce	1,43965	99,20
Variation totale	1,45132	100,00

Tolérance d'un procédé = 8

Source	Ecart type	Variations_d'étude (6*_écart_type)	%_var_étude (%VE)
R&R de l'instrumentation totale	0,10801	0,64807	8,97
Répétabilité	0,10000	0,60000	8,30
Reproductibilité	0,04082	0,24495	3,39
Opérateur	0,04082	0,24495	3,39
De pièce à pièce	1,19986	7,19913	99,60
Variation totale	1,20471	7,22824	100,00

Source	% tolérance (VE/Tolér.)
R&R de l'instrumentation totale	8,10
Répétabilité	7,50
Reproductibilité	3,06
Opérateur	3,06
De pièce à pièce	89,99
Variation totale	90,35

Nombre de catégories distinctes = 15

## Interprétation des résultats

### Variation de l'étude en pourcentage

Utilisez la fonctionnalité % Var étude pour comparer la variation du système de mesure à la variation totale.

La valeur % Var étude est le résultat de la division de chaque valeur de Var étude par Variation totale, multiplié par 100.

La valeur % Var étude de R&R de l'instrumentation est la suivante :  
 $(0,64807/7,22824) * 100 \approx 8,97 \%$ .

La valeur Var étude est le sextuple de l'écart type de chaque source.

### Variation du procédé 6s

En règle générale, la variation du procédé est définie sous la forme 6s, où s représente l'écart type en tant qu'estimation de  $\sigma$ . Lorsque les données sont distribuées normalement, approximativement 99,73 % d'entre elles se situent à une distance maximale de 6 écarts types ( $\pm 3$  écarts types par rapport à la moyenne) et approximativement 99 % d'entre elles se situent à une distance maximale de 5,15 écarts types ( $\pm 2,575$  écarts types par rapport à la moyenne).

**Remarque** | L'AIAG (Automotive Industry Action Group) recommande l'utilisation de 6s dans les études de R&R de l'instrumentation.

### R&R de l'instrumentation

Source	Ecart type	Variations_d'étude (6*_écart_type)	%_var_étude (%VE)
R&R de l'instrumentation totale	0,10801	0,64807	8,97
Répétabilité	0,10000	0,60000	8,30
Reproductibilité	0,04082	0,24495	3,39
Opérateur	0,04082	0,24495	3,39
De pièce à pièce	1,19986	7,19913	99,60
Variation totale	1,20471	7,22824	100,00

Source	% tolérance (VE/Tolér.)
R&R de l'instrumentation totale	8,10
Répétabilité	7,50
Reproductibilité	3,06
Opérateur	3,06
De pièce à pièce	89,99
Variation totale	90,35

Nombre de catégories distinctes = 15

## Interprétation des résultats

### Pourcentage de tolérance

La comparaison de la variation du système de mesure à la tolérance est souvent révélatrice d'informations.

Si vous entrez la tolérance, Minitab calcule % Tolérance, qui compare la variation du système de mesure aux spécifications. % Tolérance représente le pourcentage de la tolérance absorbée par la variabilité du système de mesure.

**Remarque** | Si vous n'entrez pas de tolérance, la colonne % Tolérance n'apparaît pas dans les résultats. Si la spécification des mesures est unilatérale, vous ne disposez pas d'une étendue de tolérance pour l'analyse.

La variation du système de mesure (6\*SD pour R&R totale d'instrumentation) est divisée par la tolérance. Minitab multiplie la proportion obtenue par 100 et l'indique en tant que % Tolérance.

La valeur % Tolérance de R&R de l'instrumentation est :

$$(0,64807/8) * 100 \approx 8,10 \%$$

### Quelle mesure utiliser ?

Pour évaluer le système de mesure, utilisez % Tolérance ou % Var étude en fonction de son application.

- Si le système de mesure est utilisé en vue d'améliorer le procédé (réduction de la variation de pièce à pièce), % Var étude est une meilleure estimation de la précision des mesures.
- Si le système de mesure évalue les pièces par rapport aux spécifications, % Tolérance est une mesure plus adaptée.

### R&R de l'instrumentation

Source	Ecart type	Variations_d'étude (6*_écart_type)	%_var_étude (%VE)
R&R de l'instrumentation totale	0,10801	0,64807	8,97
Répétabilité	0,10000	0,60000	8,30
Reproductibilité	0,04082	0,24495	3,39
Opérateur	0,04082	0,24495	3,39
De pièce à pièce	1,19986	7,19913	99,60
Variation totale	1,20471	7,22824	100,00

Source	% tolérance (VE/Tolér.)
R&R de l'instrumentation totale	8,10
Répétabilité	7,50
Reproductibilité	3,06
Opérateur	3,06
De pièce à pièce	89,99
Variation totale	90,35

Nombre de catégories distinctes = 15

## Interprétation des résultats

### R&R totale de l'instrumentation

Les résultats de % Var étude indiquent que le système de mesure représente moins de 10 % de la variation globale dans cette étude. Les résultats de % Tolérance indiquent que la variation du système de mesure représente moins de 10 % de l'intervalle de tolérance.

R&R totale de l'instrumentation :

- % Var étude—8,97
- % Tolérance—8,10

Souvenez-vous que Minitab utilise différents diviseurs pour calculer les valeurs % Tolérance et % Var étude. Etant donné que, dans cet exemple, l'intervalle de la tolérance (8) est supérieur à la variation totale de l'étude (7,22824), la valeur de % Tolérance est inférieure.

### R&R de l'instrumentation

Source	Ecart type	Variations_d'étude (6*_écart_type)	%_var_étude (%VE)
R&R de l'instrumentation totale	0,10801	0,64807	8,97
Répétabilité	0,10000	0,60000	8,30
Reproductibilité	0,04082	0,24495	3,39
Opérateur	0,04082	0,24495	3,39
De pièce à pièce	1,19986	7,19913	99,60
Variation totale	1,20471	7,22824	100,00

Source	% tolérance (VE/Tolér.)
R&R de l'instrumentation totale	8,10
Répétabilité	7,50
Reproductibilité	3,06
Opérateur	3,06
De pièce à pièce	89,99
Variation totale	90,35

Nombre de catégories distinctes = 15

## Interprétation des résultats

### Nombre de catégories distinctes

La valeur Nombre de catégories distinctes estime le nombre de groupes de pièces différents que le système peut distinguer.

Minitab calcule le nombre de catégories distinctes pouvant être observées de manière fiable comme suit :

$$\frac{S_{\text{pièce}}}{S_{\text{système de mesure}}} \times \sqrt{2}$$

Ensuite, Minitab tronque cette valeur, excepté lorsqu'elle est inférieure à 1. Dans ce cas, Minitab définit le nombre de catégories distinctes sur la valeur 1.

Nombre de catégories	Signification
< 2	Le système ne peut pas effectuer une distinction entre les pièces.
= 2	Les pièces peuvent être réparties en groupes petits ou grands, comme dans les données d'attribut.
≥ 5	Le système est acceptable (selon l'AIAG) et peut effectuer une distinction entre les pièces.

Dans cet exemple, le nombre de catégories distinctes est de 15, ce qui signifie que le système peut parfaitement effectuer une distinction entre les pièces.

**Remarque** | L'AIAG recommande que le nombre de catégories distinctes soit supérieur ou égal à 5. Reportez-vous à [1] dans la liste des références.

### R&R de l'instrumentation

Source	CompVar	% contribution (de CompVar)
R&R de l'instrumentation totale	0,01167	0,80
Répétabilité	0,01000	0,69
Reproductibilité	0,00167	0,11
Opérateur	0,00167	0,11
De pièce à pièce	1,43965	99,20
Variation totale	1,45132	100,00

Tolérance d'un procédé = 8

Source	Ecart type	Variations_d'étude (6*_écart_type)	%_var_étude (%VE)
R&R de l'instrumentation totale	0,10801	0,64807	8,97
Répétabilité	0,10000	0,60000	8,30
Reproductibilité	0,04082	0,24495	3,39
Opérateur	0,04082	0,24495	3,39
De pièce à pièce	1,19986	7,19913	99,60
Variation totale	1,20471	7,22824	100,00

Source	% tolérance (VE/Tolér.)
R&R de l'instrumentation totale	8,10
Répétabilité	7,50
Reproductibilité	3,06
Opérateur	3,06
De pièce à pièce	89,99
Variation totale	90,35

Nombre de catégories distinctes = 15









# Interprétation des résultats

## Mesures par opérateur

Le diagramme Par Opérateur permet de déterminer si les mesures et la variabilité sont homogènes pour les opérateurs.

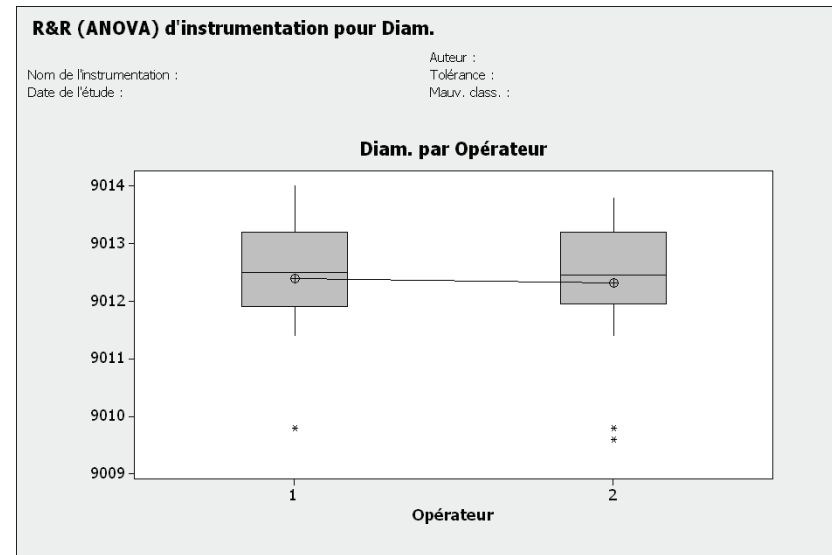
Le graphique Par Opérateur organise toutes les mesures de l'étude par opérateur. Lorsqu'il y a neuf mesures ou moins par opérateur, les points représentent les mesures. Lorsqu'il y a plus de neuf mesures par opérateur, Minitab affiche une boîte à moustaches. Pour les deux types de graphiques, les cercles noirs représentent les moyennes et une ligne les relie. Les astérisques indiquent les valeurs aberrantes potentielles.

Si la ligne est...	Alors...
Parallèle à l'axe des X	En moyenne, les opérateurs obtiennent des mesures similaires pour les pièces.
Non parallèle à l'axe des X	En moyenne, les opérateurs obtiennent des mesures différentes pour les pièces.

Ce graphique permet également de déterminer si la variabilité globale dans les mesures des pièces pour chaque opérateur est la même :

- La dispersion dans les mesures est-elle similaire ?
- Les mesures d'un opérateur varient-elles plus que celles des autres opérateurs ?

Dans cet exemple, les opérateurs semblent obtenir des mesures régulières des pièces, avec à peu près la même variation.





## Observations finales

### Résumé et conclusions

Le système de mesure des injecteurs contribue très peu à la variation globale, comme l'ont confirmé le tableau R&R de l'instrumentation et les graphiques.

La variation due au système de mesure, que ce soit en pourcentage de la variation de l'étude ou en pourcentage de la tolérance, est inférieure à 10 %. Au regard des indications de l'AIAG, ce système est acceptable.

### Remarques complémentaires

Schémas de graphiques montrant une faible variation du système de mesure :

Graphique	Schéma
R-barre	Etendue moyenne faible
$\bar{X}$ carte X barre	Limites de contrôle étroites et de nombreux points hors contrôle
Par pièce	Mesures très similaires pour chaque pièce pour l'ensemble des opérateurs et nettes différences entre les pièces
Par opérateur	Ligne droite horizontale
Opérateur par pièce	Lignes superposées

Les indications de l'AIAG pour le tableau R&R de l'instrumentation sont les suivantes :

% Tolérance, % Var étude % Procédé	Nature du système
Moins de 10 %	Acceptable
10 % à 30 %	Potentiellement acceptable (en fonction du caractère critique de la mesure, des coûts, des risques, etc.)
Plus de 30 %	Non acceptable

Source [1] dans la liste des références.

Les études de R&R de l'instrumentation (croisée), comme les autres procédures d'analyse des systèmes de mesure (ASM), sont des plans d'expériences. Pour obtenir des résultats valides, il est nécessaire de recourir à la randomisation et à l'échantillonnage représentatif.