

La comparaison inter-instruments

Pascal COQUET¹, Jean-Michel POU²

¹ LA Métrologie, 271 bd de la Paix, 64000 Pau, France

² Delta Mu, 48 rue de Sarliève, 63800 Cournon d'Auvergne, France

Inspirée des comparaisons inter-laboratoires, la comparaison inter-instruments (C2I) permet, en faisant mesurer le même objet à un ensemble d'instruments de même type, de déterminer si l'un d'eux (ou plusieurs) est statistiquement différent. La méthode repose sur des tests d'égalité de populations et de détection de valeurs aberrantes. Idéalement, les instruments comparés constituent le seul facteur variable, la méthode, les conditions ambiantes et l'opérateur demeurant, si possible, identiques.

Note : le terme « instrument » utilisé en C2I est à prendre au sens large, la méthode s'appliquant aussi bien à des chaînes de mesure complètes qu'à des instruments isolés ou à des étalons matérialisés.

1. Présentation

Son application la plus évidente est la surveillance de dérive d'instruments entre deux confirmations métrologiques ; mais son potentiel est nettement plus élevé : selon la manière dont elle est mise en œuvre, elle peut répondre à certains cas de raccordements difficiles, lever un doute sur un instrument ou encore optimiser les périodicités d'étalonnage.

1.1. Détection de dérive

Comparer un lot d'instruments permet de détecter celui ou ceux qui sont statistiquement différents. Si ces instruments n'ont pas été détectés lors de la précédente confirmation (étalonnage, C2I...), c'est qu'ils ont probablement dérivé.

1.2. Levée de doute

Si un instrument est mis en doute lors d'un mesurage, la C2I peut, en l'absence d'étalon, confirmer ou infirmer ce doute.

Note : Dans ce cadre, la C2I est déjà souvent pratiquée, au moins en « bilatéral » (Un instrument « contre » un autre) sans porter ce nom ...

1.3. Optimisation de la périodicité

Le fait de réaliser des C2I sur une famille d'instruments permet d'optimiser leur périodicité

d'étalonnage d'une manière inédite : tant que les instruments, puisqu'ils ont tous été étalonnés au moins une fois (au minimum à la mise en service), ne sont pas statistiquement différents entre eux, on peut légitimement penser que leur raccordement n'est pas remis en question. La C2I peut alors devenir un outil d'optimisation d'une périodicité devenue **conditionnelle** : on peut ne recourir à l'étalonnage qu'en cas de détection lors d'une C2I, c'est-à-dire seulement lorsqu'il y a un doute, plutôt que de le faire comme aujourd'hui, arbitrairement.

Note : Il faut évidemment, dans ce cas, être en mesure de prouver que tous les instruments ne risquent pas de dériver de la même quantité, dans le même sens. Ce cas est peu probable mais doit être considéré.

1.4. Etalonnage dans les cas difficiles

Lorsque l'étalonnage « sur site » classique présente des difficultés de mise en œuvre, la C2I peut apporter une réponse adaptée au raccordement de chaînes de mesure difficilement démontables ou intégrées au process.

Il est par exemple possible de comparer des thermomètres montés sur des lignes différentes à des températures proches. Dans ce cas précis, l'objet à mesurer (milieu de comparaison) n'étant pas commun, un thermomètre supplémentaire est nécessaire ; la comparaison porte alors sur les écarts mesurés entre celui-ci et chacun des thermomètres en ligne.

2. La sélection des participants

Il est évident que cette méthode ne s'appliquera pas à tous les types d'instruments. Il conviendra en cas de doute, d'intégrer un étalon dans la première comparaison. De plus, la méthode repose sur une hypothèse forte : un lot d'instruments n'a statistiquement aucune raison de

dérivée dans le même sens et dans la même proportion durant le même intervalle de temps.

La sélection des instruments participant à la comparaison doit être réalisée avec le plus grand soin de manière à respecter cette hypothèse : on évitera par exemple de ne choisir que des instruments issus du même lot de fabrication car ils auraient précisément des chances de porter en eux les mêmes défauts, voire de dériver de manière quelque peu synchronisée. Cette étape est primordiale ; le non respect de l'hypothèse de départ peut mener à des décisions préjudiciables sur le plan du management de qualité.

3. Les mesures

Une fois la sélection réalisée, les mesures doivent être faites. Dans le cadre d'une C2I, on teste la fidélité de chaque instrument (sa capacité intrinsèque à reproduire la même mesure) et sa « justesse » (sa capacité à donner des valeurs proches de la réalité). De ce fait, il convient de réaliser **plusieurs mesures de la même entité** (la répétabilité du processus de mesure se mélange alors à la fidélité intrinsèque de l'instrument), **avec tous les instruments**.

A titre d'exemple, les tableaux et figures ci-dessous présentent les résultats d'une C2I menée sur un lot de balances de laboratoire d'échelon 0,1mg et de portée inférieure ou égale à 220g. Les objets de comparaison sont deux masses 50 et 100g (non raccordées).

Tableau 1 Mesure d'une masse de 50g

BAL001	BAL002	BAL003	BAL004	BAL005
49,9999	49,9994	50,0000	50,0000	50,0000
49,9999	49,9995	50,0001	50,0001	50,0001
49,9999	49,9995	50,0003	50,0001	50,0001
50,0000	49,9994	50,0002	50,0000	50,0001
49,9999	49,9995	50,0002	50,0000	50,0002

BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
50,0004	49,9999	50,0002	50,0004
50,0003	50,0000	50,0002	50,0003
49,9999	50,0000	50,0000	50,0003
49,9997	49,9999	50,0002	50,0002
50,0004	49,9999	50,0002	50,0003

Tableau 2 Mesure d'une masse de 100g

BAL001	BAL002	BAL003	BAL004	BAL005
99,9999	99,9991	100,0002	100,0001	99,9999
99,9999	99,9990	100,0001	100,0000	99,9998
99,9999	99,9993	100,0002	100,0001	99,9999
99,9999	99,9992	100,0002	100,0001	99,9999
99,9998	99,9990	100,0002	100,0001	100,0000

BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
100,0012	100,0000	100,0004	100,0003
100,0009	100,0000	100,0003	100,0002
100,0008	100,0001	100,0004	100,0002
100,0011	100,0000	100,0003	100,0003
100,0008	100,0000	100,0004	100,0001

4. Les tests

Si le nombre d'instruments est suffisant, il convient de commencer par un test de normalité. Qu'il soit graphique ou numérique, le test du caractère aléatoire gaussien de la distribution constitue un indicateur de la pertinence de la sélection.

Dans notre exemple, l'hypothèse de distribution gaussienne n'est pas évidente :

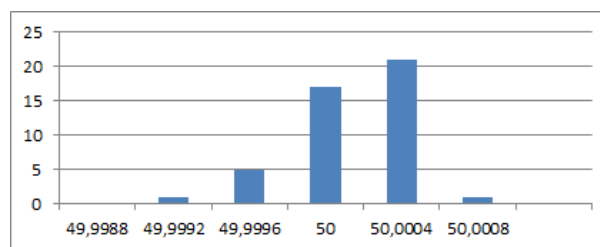


Figure 1 Histogramme 50g

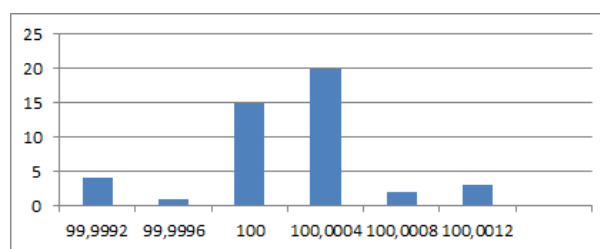


Figure 2 Histogramme 100g

Il est aussi possible de considérer la répartition des écarts moyens de chaque instrument par rapport à la moyenne générale pour évaluer la distribution aléatoire du lot :

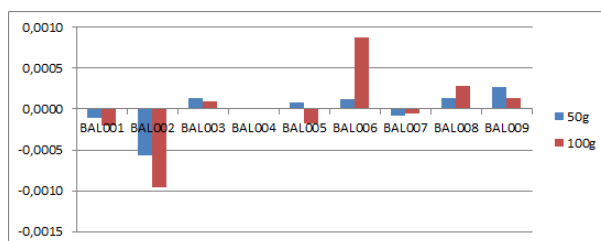


Figure 3 Répartition des écarts

La figure 3 met en évidence un déséquilibre parmi les barres négatives : la balance 002 représente à elle seule la

quasi-totalité de l'écart négatif, tirant la moyenne générale vers le bas.

Au plus simple, un test aux écarts normalisés permet de détecter une valeur aberrante, c'est-à-dire ici un instrument statistiquement différent.

Note : le caractère gaussien de la population permet de donner un niveau de performance à ce test.

Tableau 3 Test aux écarts normalisés (50g)

	BAL001	BAL002	BAL003	BAL004
Moyenne	49,9999	49,9995	50,0002	50,0000
SCE	8,00E-09	1,20E-08	5,20E-08	1,20E-08
Ecart N	-0,43	-2,33	0,56	0,06

BAL005	BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
50,0001	50,0001	49,9999	50,0002	50,0003
2,00E-08	4,12E-07	1,20E-08	3,20E-08	2,00E-08
0,31	0,48	-0,35	0,56	1,14

Tableau 4 Test aux écarts normalisés (100g)

	BAL001	BAL002	BAL003	BAL004
Moyenne	99,9999	99,9991	100,0002	100,0001
SCE	8,00E-09	6,80E-08	8,00E-09	8,00E-09
Ecart norm	-0,41	-1,98	0,21	0,00

BAL005	BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
99,9999	100,0010	100,0000	100,0004	100,0002
2,00E-08	1,32E-07	8,00E-09	1,20E-08	2,80E-08
-0,37	1,82	-0,12	0,58	0,29

Note : La ligne « SCE » (Somme des Carrés des Ecart) des tableaux 3 et 4 sera utilisée lors du test de Cochran afin de déterminer la variance la plus élevée.

La normalité de la distribution n'ayant pas été démontrée précédemment, il convient de considérer le résultat de ce test avec précaution. Cependant, il confirme l'interprétation de la figure 3 en détectant la balance 002. Il semble donc raisonnable d'écarter cet instrument.

Lorsqu'un instrument est écarté, il convient de refaire les calculs des tests avec les instruments restants :

Tableau 5 Second test aux écarts normalisés (50g)

	BAL001	BAL003	BAL004	BAL005
Moyenne	49,9999	50,0002	50,0000	50,0001
SCE	8,00E-09	5,20E-08	1,20E-08	2,00E-08
Ecart N	-1,39	0,52	-0,44	0,04

	BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
Moyenne	50,0001	49,9999	50,0002	50,0003
SCE	4,12E-07	1,20E-08	3,20E-08	2,00E-08
Ecart N	0,36	-1,24	0,52	1,63

Tableau 6 Second test aux écarts normalisés (100g)

	BAL001	BAL003	BAL004	BAL005
Moyenne	99,9999	100,0002	100,0001	99,9999
SCE	8,00E-09	8,00E-09	8,00E-09	2,00E-08
Ecart N	-0,92	-0,06	-0,35	-0,86

	BAL006	BAL007	BAL008	BAL009
Moyenne	100,0010	100,0000	100,0004	100,0002
SCE	1,32E-07	8,00E-09	1,20E-08	2,80E-08
Ecart N	2,19	-0,52	0,46	0,06

Le second test aux écarts normalisés de notre exemple détecte la balance 006 sur un point seulement ; l'instrument est conservé pour les tests suivants.

Afin d'évaluer l'égalité des variances, il est possible d'utiliser un test de Cochran dont le principe est de tester la variance la plus élevée du lot. Le fait de ne pas tester la plus faible (même si elle est la plus éloignée de la moyenne) est logique : il serait injuste d'incriminer un instrument pour cause d'excellente répétabilité. En revanche, il faut souligner qu'un instrument présentant une variance trop élevée relativement au groupe ne constitue pas forcément une anomalie. En effet, un tel instrument est à écarter mais il peut y avoir deux raisons à cela : soit il s'est effectivement dégradé en terme de fidélité, soit il est différent de par sa technologie, sa gamme (au sens de la qualité) et n'a pas sa place dans cette comparaison. Ce test est donc l'occasion de réévaluer la pertinence de la sélection.

Dans notre exemple, c'est la variance de la balance 006 qui est testée :

Tableau 7 Premier test de Cochran

50g	100g	Ccrit5%
0,725	0,589	0,391

La valeur critique à 5% est dépassée sur les deux points, confirmant la détection du test précédent. La balance est écartée et le test renouvelé :

Tableau 8 Second test de Cochran

50g	100g	Ccrit5%
0,333	0,304	0,431

Le test est concluant avec les 7 balances restantes.

Note : le test de Cochran suppose que toutes les variances ont le même nombre de degrés de liberté ce qui signifie qu'il y a le même nombre de répétitions de mesure par instrument.

Le test de Fisher constitue une alternative possible au test de Cochran ; n'imposant pas de conditions quant au nombre de degrés de liberté, il nécessite en revanche de comparer les variances deux à deux.

Un test de Grubbs peut être utilisé pour comparer les moyennes. Cette comparaison de moyenne permet de vérifier qu'un instrument ne s'éloigne pas des autres

instruments participant. Dans ce cas en effet, cela signifierait que ledit instrument a dérivé. Le principe étant de tester la valeur la plus éloignée de la moyenne générale en tenant compte de toutes les variances, il convient de réaliser ce test après celui de Cochran pour identifier préalablement les instruments ayant une dispersion trop importante.

Appliqué à notre exemple, le test de Grubbs donne les résultats suivants :

Tableau 9 Test de Grubbs

50g	100g	Gcrit
1,577	1,537	2,020

Les 7 balances passent ce dernier test, nous permettant de conclure que ces instruments ne sont pas statistiquement différents.

Evidemment, la C2I peut porter sur des entités de valeurs nominales différentes, de façon à explorer une étendue de mesure, et pas uniquement un point de ladite étendue.

5. L'interprétation

A ce stade, il est convenu que si la sélection a été correctement réalisée, les instruments écartés devraient en principe faire l'objet d'un étalonnage, voire d'une maintenance.

Les instruments restant à l'issue des tests n'ayant eu, d'une part, aucune raison de dériver de la même manière (hypothèse de départ) et ayant été, d'autre part, étalonnés dans le passé, ne se sont pas « éparpillés » dans le temps du fait qu'ils ne sont pas statistiquement différents (résultat des tests). Leur raccordement est donc encore assuré au moment de la C2I.

En outre, si nous pouvons admettre que les instruments ayant passé les tests sont toujours raccordés, il devient possible de déterminer la variance liée à ce type d'instruments, variance qui peut alors être utilisée dans un calcul d'incertitude d'un processus qui met en œuvre un tel type de moyen. Cette variance, déterminée expérimentalement, semble plus pertinente qu'une évaluation de type B souvent calculée à partir des résultats d'étalonnage (Erreur maximale constatée) ou de vérification (Erreur Maximale Tolérée). Par ailleurs, il semblerait qu'on puisse régler en partie la question récurrente des « limites d'acceptation (E.M.T) ». En effet, une C2I permet de finalement de conclure quant à l'homogénéité d'une famille d'instruments, ce qui revient à dire que tous les instruments sont statistiquement identiques entre eux, donc « conformes ». Il serait évidemment curieux que l'entreprise ne se soit pas rendu compte que les moyens de mesure qu'elle utilise au quotidien ne sont pas adaptés à son besoin