

Qualité.  
 Evaluation de la qualité.  
 Master 1 Génie Civil, Génie Mécanique et Structures  
 décembre 2006

Daniel SIDOBRE  
 Université Paul Sabatier

Ce résumé de cours s'appuie sur les normes ISO9000 (disponibles à la bibliothèque de l'UPS) et sur de nombreux ouvrages. Il vise à résumer les différents types de contrôles qu'une entreprise est amenée à effectuer pour assurer la qualité de sa production. Il apporte aussi des précisions sur les notions d'unités, d'étalons et de mesure (estimation, incertitudes, grandeurs d'influence, ...).

Les aspects plus métrologiques n'entrent pas dans le cadre de ce résumé, ils sont traités dans d'autres modules d'enseignement.

## Table des matières

		4.14.1 Chaîne d'étalonnage de l'entreprise . . . . . 8
		4.14.2 Grandeurs d'influence . . . . . 8
<b>1</b>	<b>Revue de contrat.</b>	<b>1</b>
1.1	Objectifs . . . . .	1
1.2	Méthodologie . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Revue, vérification et validation de la conception</b>	<b>1</b>
2.1	Manuel qualité . . . . .	1
2.2	Le produit à concevoir . . . . .	1
2.3	Le produit conçu . . . . .	1
2.4	Vérification . . . . .	2
2.5	Validation . . . . .	2
2.6	Les modifications . . . . .	2
2.7	Exemple de gestion des modifications . . . . .	2
2.8	Exemple de gestion des versions . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Évaluation et choix des sous-contractants</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Contrôles et essais</b>	<b>3</b>
4.1	Généralité . . . . .	3
4.2	Réception, en cours, final et état des contrôles	3
4.3	Contrôle réception . . . . .	3
4.3.1	Contrôle par échantillonnage . . . . .	3
4.4	Contrôle en cours de production . . . . .	4
4.5	Contrôle final . . . . .	4
4.6	Grandeurs et unités (NF X 02-001 <sup>1</sup> ). . . . .	4
4.6.1	Grandeurs. . . . .	4
4.6.2	Unités. . . . .	4
4.6.3	Changement d'unités. . . . .	4
4.6.4	Équations. . . . .	4
4.7	Grandeurs de base. . . . .	4
4.8	Le système international (SI). . . . .	4
4.9	Ce qui ne peut se mesurer . . . . .	5
4.10	Métrologie et contrôle. . . . .	6
4.11	Erreurs de mesures. . . . .	6
4.12	Grandeurs d'influence. . . . .	6
4.12.1	Exercice . . . . .	7
4.13	Maîtrise des équipements de contrôle, de mesure et d'essais . . . . .	7
4.13.1	définitions . . . . .	7
4.14	Chaîne d'étalonnage . . . . .	7
		5
	<b>Maîtrise des produits non conformes</b>	<b>8</b>
	5.1 Actions correctives . . . . .	8
<b>6</b>	<b>Revue de direction</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Audits qualité internes</b>	<b>9</b>
<b>8</b>	<b>Incertitude de mesure</b>	<b>9</b>
8.1	Exemple du pied à coulisse . . . . .	9
8.1.1	Inventaire des causes d'erreurs . . . . .	9
8.1.2	Que mesure-t-on? . . . . .	9
8.2	Conditions d'acceptation lors d'un contrôle . . . . .	9
8.2.1	Choix d'un instrument de mesure . . . . .	9
8.2.2	Critère d'acceptation . . . . .	9
8.3	Estimation de l'erreur de mesure . . . . .	10
8.3.1	Calcul de la variance . . . . .	10
8.3.2	Estimation de la variance d'une mesure obtenue par calcul . . . . .	10
8.3.3	Estimation de la variance . . . . .	10
8.3.4	Incertitudes et variance . . . . .	11
8.3.5	Calcul à partir de plusieurs mesurandes	11
8.3.6	Estimation de la variance d'une série de mesure . . . . .	11
8.3.7	Variables corrélées ou indépendantes . . . . .	11
8.4	Résumé . . . . .	12
8.4.1	Choix d'un instrument de mesure . . . . .	12
8.4.2	Critère d'acceptation . . . . .	12
8.4.3	Variance . . . . .	12
8.4.4	Mesures corrélées ou indépendantes . . . . .	12
<b>9</b>	<b>Choix des appareils de mesures</b>	<b>12</b>
9.1	Les critères techniques . . . . .	12
9.2	Le parc d'appareil de mesures . . . . .	13
<b>A</b>	<b>Pied à coulisse</b>	<b>14</b>
<b>B</b>	<b>Etalonnage</b>	<b>14</b>
B.1	Déterminer l'erreur de justesse de ce capteur	14
B.2	Déterminer l'erreur de fidélité de ce capteur . . . . .	14

<b>C Critères d'acceptation</b>	<b>14</b>
C.1 Peut-on contrôler cette spécification avec cet appareil? . . . . .	14
C.2 Risque . . . . .	14
<b>D Mesure</b>	<b>14</b>
D.1 Que pensez vous de ces résultats . . . . .	14
D.2 Contrôle . . . . .	14
<b>E Mesure de la distance entre deux alésages</b>	<b>15</b>
E.1 Etalonnage . . . . .	15
E.2 Etalonnage de la colonne de mesure . . . . .	15
E.3 Critères d'acceptation . . . . .	15
<b>F Définitions :</b>	<b>15</b>
<b>G Généralités</b>	<b>15</b>
<b>H Certification</b>	<b>15</b>
<b>I Critères de choix d'un instrument de mesure</b>	<b>16</b>
<b>J Etalonnage</b>	<b>16</b>
J.1 Indications . . . . .	16
J.2 étalonnage . . . . .	16
J.3 Déterminer l'erreur de justesse de cette règle	16
J.4 Déterminer l'erreur de fidélité de cette règle .	16
<b>K Critères d'acceptation</b>	<b>16</b>
K.1 Peut-on contrôler cette spécification avec cet appareil? . . . . .	16
K.2 Risque . . . . .	16
<b>L Mesure</b>	<b>16</b>
L.1 Ces résultats sont-ils cohérents? . . . . .	16
L.2 Quelle doivent être alors les actions de l'opérateur pour cette pièce? . . . . .	16
<b>M Définitions :</b>	<b>17</b>
<b>N Généralités</b>	<b>17</b>
<b>O Critères de choix d'un instrument de mesure</b>	<b>17</b>
<b>P Indications</b>	<b>17</b>
P.1 Donner la signification de chacun des éléments de cette description. . . . .	17
P.2 Donner l'incertitude associée à la mesure d'une force de 10 N . . . . .	17
<b>Q Etalonnage</b>	<b>17</b>
Q.1 Donner l'erreur de fidélité de ce codeur à effet Hall . . . . .	18
Q.2 Que peut on dire pour l'erreur de justesse? .	18
<b>R Critères d'acceptation</b>	<b>18</b>
R.1 Quels appareils sont utilisables pour ce contrôle? . . . . .	18
R.2 Quels est le meilleur choix? . . . . .	18
R.3 Risques . . . . .	18
<b>S Mesure</b>	<b>18</b>
S.1 Ces résultats sont-ils cohérents? . . . . .	18
S.2 Quelle est la meilleure estimation que vous pouvez donner de cette mesure . . . . .	18
S.3 Contrôle . . . . .	18

## 1 Revue de contrat.

La revue de contrat consiste à vérifier que l'offre est compatible avec les exigences spécifiées.

Pour chacun des critères de performance du produit (prix, délai, . . .) il faut vérifier que l'offre est compatible avec les exigences spécifiées (cahier des charges).

La revue de contrat assure l'interface entre le fournisseur et le client qui ont donc intérêts à se coordonner.

### 1.1 Objectifs

- S'assurer que les exigences du client sont clairement définies.
- Réduire les écarts entre l'offre et les exigences spécifiées.
- Montrer au client que l'entreprise est capable de satisfaire aux exigences contractuelles.

### 1.2 Méthodologie

La première chose est de définir, puis tenir à jour, des procédures de revue de contrat.

Une revue de contrat doit :

- vérifier que les exigences du client sont bien définies. Documents corrects et complets (cotation). Ceci peut être fait par une lecture commune avec le client.
- résoudre avec le client les différences entre l'offre et les exigences spécifiées. Rechercher une solution pour chaque différence.
- vérifier que l'entreprise est apte à fournir le produit conforme (services commerciaux, bureau d'étude, fabrications, ordonnancement, . . .). Établir le dossier de réalisation du produit afin de définir très finement l'offre et de pouvoir la comparer aux exigences spécifiées.

## 2 Revue, vérification et validation de la conception

Ce paragraphe traite des dispositions à prendre avant et pendant la conception d'un produit pour garantir qu'il sera conforme aux exigences spécifiées.

### 2.1 Manuel qualité

Établir et tenir à jour des procédures écrites pour maîtriser et vérifier la conception du produit.

Définir la planification des différentes activités de conception et de développement.

Définir les compétences et les responsabilités des concepteurs et des vérificateurs.

Définir les compétences et responsabilités des personnes assurant les liaisons avec les services amont et aval de la conception.

## 2.2 Le produit à concevoir

Établir un descriptif du produit en précisant les spécifications du client.

Identifier et consigner par écrit les exigences légales et réglementaires applicables.

## 2.3 Le produit conçu

Fournir les documents (plans, notes de calculs, rapports d'analyse, comptes-rendus d'essais, ...) établissant que :

- les solutions adoptées satisfont aux exigences spécifiées.
- des critères d'acceptation ont été définis pour choisir les solutions.
- le produit est conforme aux réglementations en vigueur.
- les caractéristiques critiques du produit par rapport à la sécurité et au fonctionnement correct sont identifiées.
- les documents doivent être revus avant leur mise en circulation.

## 2.4 Vérification

Les vérifications de la conception doivent être systématiques.

L'activité de vérification doit être exercée par des personnes compétentes n'ayant, si possible, pas parti-

cipé à la conception. On pourra faire appel à des vérificateurs externes ou créer deux équipes qui, selon le produit, joueront le rôle de concepteur ou de vérificateur.

Les outils de vérification sont :

- réalisation de revue de conception planifiées conduisant à l'établissement de comptes-rendus.
- réalisation d'essais et de démonstration.
- exécution de calculs en parallèle, par d'autres méthodes...
- comparaison de la nouvelle conception avec des conceptions similaires ayant fait leurs preuves.

## 2.5 Validation

La validation fait suite à une vérification satisfaisante de la conception. Elle atteste que le produit est conforme aux spécifications.

## 2.6 Les modifications

Les modifications doivent être approuvées par des personnes habilitées et donner lieu à des procédures écrites dont le traitement est spécifié :

- établir un cahier des charges de la modification
- documenter la modification
- vérifier la nouvelle conception
- mise à jour des documents et enregistrement de la modification.

## 2.7 Exemple de gestion des modifications

### Tcl

Les développeurs du langage Tcl/Tk utilisent des TIP Tcl Improvement Proposal (proposition d'amélioration de Tcl) pour faire évoluer le code. La description du fonctionnement et l'historique des propositions se trouvent sur <http://www.tcl.tk/cgi-bin/tct/tip/>

## 2.8 Exemple de gestion des versions

Assez ancien, mais un des plus anciens système de gestion de version est cvs, on en trouve une présentation sur

[http://en.wikipedia.org/wiki/Concurrent\\_Versions\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Concurrent_Versions_System) ou en français

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Concurrent\\_Versions\\_System](http://fr.wikipedia.org/wiki/Concurrent_Versions_System)

Par exemple le langage de programmation ruby utilise cvs :

<http://www2.ruby-lang.org/en/20020106.html>

ainsi que x.org qui développe une version libre du système X Window (X Window System) :

<http://wiki.x.org/wiki/CvsPage>.

## 3 Évaluation et choix des sous-contractants

Sélection et évaluation des sous-traitants.

L'entreprise est responsable de l'ensemble du produit et donc des composants achetés : elle doit s'assurer de la qualité de ces composants.

Dans un premier temps il lui faut choisir ses sous-traitant et ensuite en assurer le suivi.

Le choix des sous-contractant ou sous-traitant passe par une évaluation. Les outils d'évaluation sont les audits, les contrôles, les visites, la reconnaissance de certification, le suivi des fournisseurs pour ceux qui sont déjà connus, ...

Le suivi nécessite de tenir à jour un dossier de sous-traitant regroupant : les informations recueillies lors des évaluations, les résultats de contrôle, les données relatives aux problèmes qualités, ...

Nous retrouvons ici le problème rencontré lors de la revue de contrat. Le sous-produit doit être clairement spécifié et les documents d'achats vérifiés et approuvés. Chaque sous-traitant doit faire l'objet d'un suivi.

Le produit sous-traité doit être contrôlé par le sous-traitant et/ou l'entreprise chez le sous-traitant et à la réception.

## 4 Contrôles et essais

Dans ce paragraphe nous allons voir les différents types de contrôles et les moyens à mettre en oeuvre.

Les contrôles et essais visent à :

- assurer la conformité aux exigences spécifiées pour les produits sous-traités.
- assurer le suivi de l'obtention de la qualité et identifier les produits non conformes.
- assurer que les contrôles ont été effectués et que les résultats satisfont aux spécifications.
- assurer la conformité des produits aux exigences spécifiées (contrôles finaux).

### 4.1 Généralité

Les méthodes de contrôles et d'essais doivent être définies ainsi que les critères d'acceptation. Les contrôles peuvent être systématiques où effectués suivant un plan de contrôle. Les contrôles se situent partout dans le cycle de production : réception, en cours de fabrication, en fin de fabrication, en fin de stockage

...

Les appareils de contrôle doivent être définis et compatibles avec les critères d'acceptation.

Les opérations de contrôle doivent être effectuées par des opérateurs formés conformément aux instructions.

Les résultats de contrôle et d'essais doivent être enregistrés parallèlement à leurs exécutions.

Les procès verbaux des contrôles, précisant clairement les résultats et identifiant la personne ayant effectué le contrôle ainsi que son habilitation doivent être conservés par le fournisseur.

### 4.2 Réception, en cours, final et état des contrôles

On distingue trois types de contrôles :

1. les contrôles réception que l'on fait au niveau des approvisionnements (matières premières, composants élémentaires, pièces sous-traitées).
2. les contrôles en cours de production que l'on fait chaque fois que nécessaire au cours du cycle de production.
3. le contrôle final que l'on fait sur un produit ou sous-produit fini.

Les contrôles sont en général effectués en vérifiant qu'une grandeur physique vérifie un critère : diamètre d'un alésage, poids d'une pièce, ... Ces critères peuvent être unilatéraux ou bilatéraux. Ils peuvent aussi porter sur des caractères non "physiques" comme les défauts d'aspects.

### 4.3 Contrôle réception

Le premier moyen à mettre en oeuvre est la sélection et l'évaluation des sous-contractants.

La spécification et l'identification des documents d'achats permet à l'entreprise d'assumer sa responsabilité par rapport à l'ensemble du produit.

En outre, une fois contrôlés, vérifiés et identifiés les produits achetés doivent être stockés et donc maintenus.

Le contrôle réception consiste à apporter la preuve que le produit est conforme ou à identifier et enregistrer le produit. Dans le cas d'un sous-contractant certifié le contrôle est fortement réduit. Les produits non contrôlés ne peuvent pas être utilisés.

Toutefois, il est possible d'utiliser, en cas d'urgence, un produit non vérifié à condition de l'identifier formellement pour permettre son remplacement en cas de non conformité suivant un plan prédéfini.

#### 4.3.1 Contrôle par échantillonnage

Le contrôle à 100% peut être impossible (frais de contrôle trop élevés, contrôle destructif, ...) ou avantageusement remplacé par un contrôle par échantillonnage. Voir les nombreux ouvrages (par exemple Plans d'échantillonnage en contrôle de la qualité par Gérard BAILLARGEON aux éditions SMG (bibliothèque UPS)).

On considère des lots de produit, sur chaque lot on prélève un ou plusieurs échantillons que l'on contrôle afin d'estimer la qualité du lot. Le lot est ensuite accepté ou refusé.

Les différents paramètres de la méthode sont :

- l'échantillon : taille des échantillons et nombre, méthode de prélèvement de l'échantillon. On parle de plan d'échantillonnage simple (1 échantillon de  $n$  éléments), double (2 échantillons), multiple ( $m$  échantillons) ou progressif ( $m$  échantillons de 1 élément).
- le modèle statistique utilisé : en général loi binomiale (adapté si taille  $n$  de l'échantillon petit par rapport à la taille  $N$  du lot à contrôler  $\frac{n}{N} \leq 0.1$ ) ou loi de Poisson (adapté si taille de l'échantillon est supérieur à 20).
- le critère ou les critères d'acceptation si contrôle par attributs (normal, réduit et renforcé).
- ce que l'on fait des éléments non conformes. Leur enlèvement du lot améliore la qualité du lot.

Les lois statistiques utilisées font des hypothèses sur la répartition aléatoire des défauts, du fait des dérives systématiques (usures par exemples) les lots peuvent ne pas les satisfaire. On prendra soin, dans tous les cas, de prélever les échantillons au hasard en utilisant par exemple des tables de nombres aléatoires.

On appelle qualité effective d'un lot  $p$  la proportion de pièces non conformes qu'il contient.

La courbe d'efficacité d'un plan d'échantillonnage représente les probabilités d'acceptation d'un lot en fonction de la proportion  $p$  de pièces non conformes qu'il contient.

La courbe d'efficacité idéale est celle qui accepte tous les lots ayant une qualité effective  $p$  meilleure qu'un critère d'acceptation  $c$  et qui refuse tous les autres.

Le niveau de qualité acceptable  $NQA$  caractérise le pourcentage d'éléments non conformes que l'on peut tolérer dans un lot.

Le niveau limite de qualité toléré  $LTPD$  caractérise le pourcentage d'éléments non conformes que l'on ne veut pas dépasser dans un lot.

Le risque fournisseur, noté  $\alpha$ , représente la probabilité de rejeter un lot de qualité acceptable (mieux que  $NQA$ ).

Le risque client, noté  $\beta$  représente la probabilité d'accepter un lot de qualité inacceptable (moins bon que  $LTPD$ ).

Il existe des tables qui permettent de déterminer la taille des échantillons et le critère d'acceptation en fonction de la taille des lots, des niveaux de qualité acceptable  $NQA$  et toléré  $LTPD$  et des risques clients et fournisseurs.

Un critère intéressant pour comparer des plans d'échantillonnage est la quantité moyenne d'éléments contrôlés par lots. Il existe plusieurs cas suivant que l'on contrôle à 100% ou non les lots refusés. Pour les plans doubles, multiples ou progressifs le nombre de pièces contrôlées par lots est variable.

## 4.4 Contrôle en cours de production

Il faut effectuer les contrôles suivant la gamme prévue sans oublier l'enregistrement (fiche de contrôle).

Il faut s'assurer de la conformité du produit : nécessité de définir des critères d'acceptation et de mettre en oeuvre des moyens adaptés en quantité et précision.

Les produits non conformes doivent être identifiés et traités.

## 4.5 Contrôle final

Le contrôle final consiste à vérifier l'exécution des contrôles amonts. Il est facilité par l'utilisation de fiche suiveuse du produit décrivant l'état des contrôles. Pour des produits complexes il peut comporter des essais complémentaires à effectuer en fin de production.

## 4.8 Le système international (SI).

Il a été mis en place lors de la 11<sup>ème</sup> conférence générale des poids et mesure en 1960.

Voir <http://www.bipm.fr/>

## 4.6 Grandeurs et unités (NF X 02-001<sup>1</sup>).

### 4.6.1 Grandeurs.

Les grandeurs qui peuvent se comparer forment un ensemble. Par exemple : longueur, hauteur, diamètre, longueur d'onde ...

### 4.6.2 Unités.

L'unité est une grandeur de référence pour un tel ensemble. Toutes les autres grandeurs de cet ensemble peuvent s'exprimer par le produit de cette unité par un nombre.

Ce nombre est la valeur numérique de la grandeur exprimée avec cette unité. Par exemple la longueur d'onde d'une raie du sodium est  $\lambda = 5,896 \times 10^{-7} m$ .

### 4.6.3 Changement d'unités.

Si  $1m = 10^6 \mu m$  alors  $\lambda = 5,896 \times 10^{-7} \times 10^6 \mu m$

### 4.6.4 Équations.

**Produit** : si  $T = t.s$  et  $V = v.ms^{-1}$  alors  $X = VT = vt.m$

**Somme** : on ne peut additionner que des grandeurs de même dimension.

**Constantes empiriques** : Dans les équations peuvent intervenir des constantes physiques qui ont une unité :

$$E = mc^2$$

avec  $c = 299792548ms^{-1}$

**Constantes numériques** : par exemple la surface du cercle  $S = \pi r^2$ , l'énergie cinétique  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$   
Ces facteurs numériques dépendent de la définition des grandeurs. Ils sont sans unité.

## 4.7 Grandeurs de base.

Les grandeurs physiques sont liées entre elles par des équations exprimant des lois de la nature ou donnant des définitions pour des grandeurs nouvelles.

On définit des grandeurs de base indépendantes. On exprime toutes les autres grandeurs à partir de ces grandeurs de base.

On appelle dimension de la grandeur  $Q$  l'expression  $A^\alpha B^\beta C^\gamma \dots$  où A, B et C représentent des grandeurs de base.

Dimension de la vitesse :  $LT^{-1}$

Dimension de la vitesse angulaire :  $T^{-1}$

Dimension de la force :  $LMT^{-2}$

<sup>1</sup>Bibliothèque UPS : Grandeurs et Unités US 083/9.

Grandeur	nom de l'unité de base	Symbole de l'unité
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	s
intensité de courant électrique	ampère	A
température thermodynamique	kelvin	K
quantité de matière	mole	mol
intensité lumineuse	candela	cd

Les unités de base sont :

**Le mètre** est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de  $\frac{1}{299792458}$  de seconde.

**Le kilogramme** est l'unité de masse; il est égal à la masse du prototype international du kilogramme.

**La seconde** est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.

**L'ampère** est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à  $2 \times 10^{-7}$  newton par mètre de longueur.

**Le kelvin**, unité de température thermodynamique, est la fraction  $\frac{1}{273,16}$  de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

**La mole** est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

**La candela** est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence  $540 \times 10^{12}$  hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est  $\frac{1}{683}$  watt par stéradian.

Il existe aussi deux unités supplémentaires :

Grandeur	nom de l'unité de base	Symbole de l'unité
angle plan	radian	rad
angle solide	stéradian	sr

### Exemple d'unités dérivées

Grandeur	unité	symbole de l'unité	nom de l'unité
vitesse	$ms^{-1}$		
vitesse angulaire	$s^{-1}$ ou $rad.s^{-1}$		
force	$kg.m.s^{-2}$	N	newton
energie	$kg.m^2.s^{-2}$	J	joule

### Préfixes

10 <sup>24</sup>	yotta	Y	10 <sup>-1</sup>	déci	d
10 <sup>21</sup>	zetta	Z	10 <sup>-2</sup>	centi	c
10 <sup>18</sup>	exa	E	10 <sup>-3</sup>	milli	m
10 <sup>15</sup>	péta	P	10 <sup>-6</sup>	micro	$\mu$
10 <sup>12</sup>	téra	T	10 <sup>-9</sup>	nano	n
10 <sup>9</sup>	giga	G	10 <sup>-12</sup>	pico	p
10 <sup>6</sup>	mega	M	10 <sup>-15</sup>	femto	f
10 <sup>3</sup>	kilo	k	10 <sup>-18</sup>	atto	a
10 <sup>2</sup>	hecto	h	10 <sup>-21</sup>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	déca	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	y

### Autres unités autorisées

Grandeur	unité	symbole	valeur
volume	litre	l ou L	$10^{-3}m^3$
masse	tonne	t	$10^3kg$
pression	bar	bar	$10^5Pa$
angle plan	tour	tr	$2\pi rad$
	degré	°	$\pi/180$
	minute d'angle	'	
	seconde d'angle	"	
temps	minute		
	heure		
	jour		
température Celsius	degré Celsius	°C	

## 4.9 Ce qui ne peut se mesurer

Les grandeurs telles que nous les avons définis permettent de définir une relation d'équivalence et une relation d'ordre total. D'autre part nous avons défini une opération interne d'addition et l'opération externe de multiplication par un scalaire. Cette dernière n'est pas commutative car "5 heures" est correct alors que "heures 5" ne l'est pas.

On appelle grandeurs mesurables les grandeurs pour lesquelles les quatre lois peuvent être définies.

On appelle grandeurs repérables les grandeurs pour lesquelles l'addition et la multiplication par un scalaire ne sont pas définies. Par exemple la dureté. On définit alors des échelles de repérages conventionnelles.

Pour certaines grandeurs mal connus en l'état actuel de nos connaissances on ne sait pas définir de relation d'ordre et d'équivalence. Par exemple la douleur ou la fatigue, le risque de famine, ...

#### 4.10 Métrologie et contrôle.

La *mesure* (ou mesurage) est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la ou les valeurs des grandeurs à mesurer.

La *métrologie* est le domaine des connaissances relatives aux mesurages.

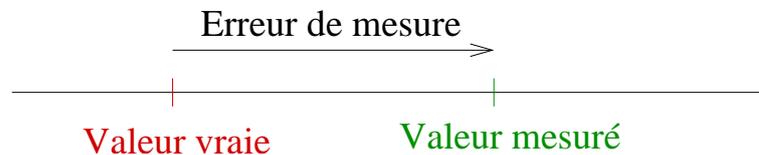
Le *contrôle* est l'ensemble des opérations permettant de déterminer si les grandeurs de l'élément à vérifier sont conformes aux valeurs exigées.

#### 4.11 Erreurs de mesures.

**Précision** : écart minimal entre la valeur mesurée et la valeur vraie de la grandeur mesurée.

**Exactitude** : terme synonyme de précision, à préférer.

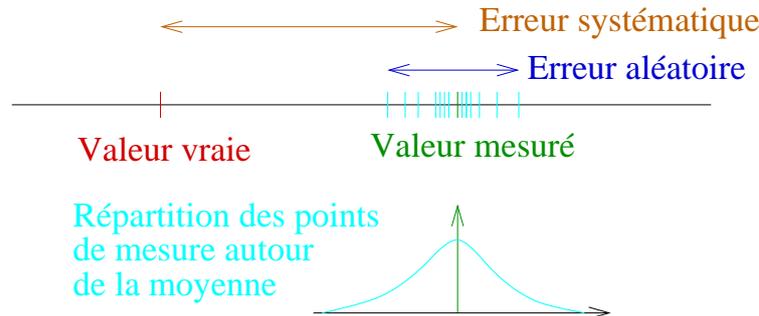
**Incertitude de mesure** : estimation caractérisant l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie de la grandeur mesurée.



Cette notion reste très abstraite car la valeur vraie n'est quasiment jamais connue.

**Erreur systématique** : erreur constante et identifiable au terme d'une série de mesures.

**Erreur aléatoire** : erreur due à l'influence de facteurs imprévisibles et non maîtrisables.



**Justesse** : capacité d'un instrument de mesure à fournir une indication proche de la valeur vraie.

**Erreur de justesse** : composante systématique de l'erreur d'un instrument de mesure.

**Fidélité** : capacité d'un instrument à fournir, dans des conditions identiques, des indications très voisines.

**Erreur de fidélité** : composante aléatoire de l'erreur d'un instrument de mesure.

**Résolution** : plus petite variation d'une grandeur pouvant être décelée par l'appareil.

#### 4.12 Grandeurs d'influence.

Une grandeur d'influence est une grandeur qui ne fait pas l'objet d'une mesure mais qui influe sur le résultat.

Exemple

- température.
- pression.
- gradient de température.
- déformations.
- vibrations.
- hygrométrie.
- ...

Le système ISO fixe la température de référence à  $20^{\circ}C$

Pour un matériaux dont le coefficient de dilatation linéaire est  $\lambda$  la variation de longueur est :

$$\delta L = L_{20} \cdot \lambda \cdot \delta \theta$$

Par exemple, pour un alliage d'aluminium de coefficient de dilatation

$\lambda = 23 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , l'allongement d'un objet de  $100 \text{ mm}$  est de  $2.3 \mu\text{m}$  pour une variation de un degré Celsius.

On prendra soin, avant d'effectuer une mesure, d'atteindre l'équilibre thermique. La courbe de variation

pour atteindre l'équilibre est une exponentielle. Pour des pièces courantes et pour une variation de quelques degrés le temps nécessaire pour obtenir l'équilibre thermique se mesure en heures. De plus il est très difficile de mesurer la température au coeur des pièces.

Attention au gradient de température dans les salles de métrologie (courants d'air, ouvertures, rayonnement solaires, lampes, bouches d'aération, . . .

bibliographie : Introduction à la métrologie dimensionnelle, cahiers de formation du CETIM.

#### 4.12.1 Exercice

Quelles sont les principales causes d'erreurs de mesures lorsque l'on mesure une pièce avec un pied à coulisse? Proposez une classification de ces erreurs.

### 4.13 Maîtrise des équipements de contrôle, de mesure et d'essais

Ce paragraphe traite du raccordement des instruments de mesures au système international. Voir normes NF E10-020 et NF E10-021.

#### 4.13.1 définitions

**Étalon** : Instrument de mesure destiné à définir ou matérialiser, conserver ou reproduire l'unité (ou un multiple ou un sous-multiple) de mesure d'une grandeur pour la transmettre par comparaison à d'autres instruments de mesure.

**Étalonnage** : Ensembles des opérations permettant de déterminer les valeurs des erreurs d'un instrument de mesure (et éventuellement d'autres caractéristiques métrologiques).

L'étalonnage peut être effectué en vue de permettre l'emploi de l'instrument comme étalon.

**Chaîne d'étalonnage** : Succession des étapes qui permettent de relier les caractéristiques métrologiques d'un instrument de mesure donnée, à la référence nationale ou internationale pour une grandeur physique déterminée.

**Étalon de référence de l'entreprise** : Étalon de la plus haute précision que possède un service de métrologie et qui est destiné à étalonner les étalons de travail ou de transfert. Il est raccordé directement ou indirectement à un étalon de la chaîne du Bureau National de Métrologie.

**Étalon de travail** : Étalon qui, étalonné par comparaison à un étalon de référence, est destiné à étalonner ou à vérifier les instruments de mesure usuels.

**Étalon de transfert** : Étalon utilisé comme intermédiaire entre un étalon de référence et un ou des étalons de travail.

**Vérification de réception** : Ensemble d'opérations ayant pour but de vérifier que les caractéristiques d'un instrument neuf satisfont aux spécifications de la commande.

**Vérifications périodiques** : Ensemble d'opérations ayant pour but de vérifier suivant une périodicité définie, que les caractéristiques métrologiques d'un instrument en service satisfont aux spécifications qui définissent son aptitude à l'emploi.

**Certificat d'étalonnage BNM** : Document officiel délivré par un centre d'étalonnage agréé par le Bureau National de Métrologie garantissant le raccordement aux étalons nationaux et fournissant les résultats de l'étalonnage.

**Procès-verbal d'étalonnage** : Document établi par un service de métrologie, sous sa responsabilité. Le procès-verbal d'étalonnage garantit le raccordement à des étalons d'un niveau supérieur et fournit les résultats d'étalonnage.

**Procès-verbal de vérification** : Document établi par le service compétent d'un industriel et donnant les résultats de la vérification.

**Marque de vérification** : Signe apposé sur un instrument de mesure indiquant qu'il a satisfait aux épreuves de vérification.

**Marque d'identification** : Signe apposé sur un instrument de mesure permettant de l'identifier sans ambiguïté.

**Marque d'étalonnage** : Signe apposé sur un instrument de mesure indiquant qu'il a subi un étalonnage.

### 4.14 Chaîne d'étalonnage

Au plus haut niveau international se trouve la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) qui regroupe les délégués de tous les états signataires du traité de la convention du mètre (50 états en 1992). Elle "gère" le système international (SI) et élit les 18 membres du Comité international des Poids et Mesures (CIPM). Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM <http://www.bipm.fr>) qui dépend directement du CIPM et les laboratoires nationaux de métrologie ont la charge du Système International d'unités.

Afin de remplir cette mission le BIPM est chargé d'établir et conserver les étalons. A ce jour il ne reste que le kilogramme qui soit défini par un étalon matériel. Les autres unités sont définies à partir de constantes physiques.

En France c'est le Bureau National des Mesures qui assure le raccordement des étalons nationaux au système international. Il a pour mission de réunir, exploiter et diffuser les informations et la documentation concernant les développements de la métrologie.

Un laboratoire primaire ou laboratoire du BNM est chargé de la conservation et de l'amélioration des étalons nationaux dans un domaine.

Le COFRAC (COmité FRançais d'ACcréditation) est chargé de l'accréditation des laboratoires d'étalonnage. L'accréditation d'un laboratoire d'étalonnage est la reconnaissance, par le COFRAC, de l'aptitude de ce laboratoire à effectuer des étalonnages. Cette accréditation porte sur :

- un domaine spécifié
- des méthodes et appareils clairement définies
- une étendue de mesure identifiée
- des incertitudes associées.

Un service métrologie habilité appartient à une entreprise ou organisme et effectue des étalonnages dans le cadre de son accréditation (instruments de mesure de l'entreprise, instruments fabriqués, instruments des ressortissants de l'organisme, ...).

La métrologie légale concerne la métrologie réglementée par des lois ou des décrets. A ce propos le site <http://www.industrie.gouv.fr/metro> du ministère de l'industrie regroupe les textes réglementaires (directives, lois, décrets, circulaires ...) et quelques textes de synthèse.

#### 4.14.1 Chaîne d'étalonnage de l'entreprise

Au niveau de l'entreprise le service métrologie conserve et assure le raccordement des étalons de références. Il faut limiter l'utilisation de ces étalons afin de préserver leur précision.

Il faut définir les étalons de transferts et de travail ainsi que les procédures de raccordements de ces étalons.

Il faut élaborer les procédures de vérification, d'étalonnage et de réception de tous les appareils de mesure et de contrôles ainsi que leurs périodicité.

Il faut assurer la formation des personnels utilisant ces appareils.

Il faut assurer l'identification de chaque appareil et la conservation d'une fiche de vie regroupant les procès verbaux de vérification, d'étalonnage et de toutes les interventions (réparations, ...).

Il faut vérifier que les procédures d'étalonnage sont respectées et que tous les appareils utilisés sont conformes (vérifiés et étalonnés). Les appareils défectueux doivent être remis en état, déclassés ou réformés.

Le potentiel des moyens doit être adapté au volume de la production tant en précision qu'en quantité et utilisé à bon escient. Voir "choix des appareils de mesures" (paragraphe 9).

Il est nécessaire de prévoir une expertise pour régler les conflits entre services.

De plus, chaque incident sur un appareil doit donner lieu à un contrôle systématique. L'attention des utilisateurs doit être attirée sur cette nécessité.

#### 4.14.2 Grandeurs d'influence

Il faut contrôler que la valeur de chaque grandeur d'influence est compatible avec les mesures ou contrôles effectués et noter le résultat de ces contrôles.

De même, le transport et le stockage des moyens de mesure et de contrôle doivent être effectués de telle sorte que l'aptitude à l'emploi soit conservée.

Les appareils de mesure et de contrôle doivent être protégés contre toute manipulation risquant de modifier les réglages d'étalonnage.

## 5 Maîtrise des produits non conformes

Inévitablement des produits non-conformes sont produits, ce paragraphe présente les mesures à prendre pour garantir que seuls les produits conformes sont livrés tout en diminuant les coûts.

La première règle est d'identifier et d'isoler les produits non conformes pour éviter leur utilisation par inadvertance. Cette première étape doit être assurée par les contrôleurs.

Comme toujours, il faut désigner les responsables chargés de l'examen et du traitement des produits non conformes.

Les non-conformités seront ensuite évaluées et documentées puis un traitement sera effectué. Suivant les cas le traitement peut être :

- exécution de retouches ou changement d'un élément pour que le produit satisfasse aux exigences spécifiées.
- acceptation par dérogation avec accord du client.
- déclassement pour d'autres applications.
- rebut ou destruction.

Dans tous les cas les produits devront être contrôlés, les résultats de contrôles enregistrés et les dérogations insérées dans le dossier produit.

### 5.1 Actions correctives

L'aspect coût étant très important, une fois les produits non-conformes traités, il est nécessaire de mener des actions correctives pour diminuer les non-conformités.

La recherche des causes de non conformités n'est pas toujours évidente et peut nécessiter des études très délicates. L'identification des causes réelles est très importante et doit s'appuyer sur des données fiables. D'où la mise en place de la collecte des données :

- enregistrement qualité, résultats de contrôles.
- retour d'informations clients.
- audits.

L'identification des défaillances à traiter en priorité peut se faire par analyse statistique de ces données (classement, diagrammes temporels, logigrammes, ...).

La recherche proprement dite des causes peut se faire de diverses manières suivant le type des problèmes identifiés. L'arbre de défaillance est très souvent un outil utile, mais les problèmes peuvent aussi provenir de phases critiques de production (démarrage, modes dégradés, ...). D'un point de vue conception, il faut anticiper les défaillances et se poser les questions :

- Quel sera l'effet de cette défaillance? Avec quelle probabilité?
- Quelle sera la fréquence d'apparition?
- Y a-t-il possibilité de la détecter?

Ces études conduisent à définir des actions correctives. Celles-ci sont ensuite mises en oeuvre et leur efficacité vérifiée. Les procédures, consignes et instructions doivent être mises à jour.

## 6 Revue de direction

Elle a pour but d'analyser et d'évaluer l'efficacité du système qualité. Elle a lieu périodiquement. Elle doit donner lieu à un compte rendu écrit.

Elle analyse les résultats d'audits, l'évolution des indicateurs de qualité, les changements intervenus dans la politique qualité, ...

## 7 Audits qualité internes

Ces audits doivent être planifiés.

Il faut définir une procédure d'audit (rendez-vous, préparation, audit, discussion et compte-rendu) et assurer le suivi (actions correctives).

L'objectif est de contrôler que les activités relatives à la qualité satisfont aux dispositions préétablies, et de déterminer l'efficacité de ces activités ainsi que leur aptitude à atteindre les objectifs. C'est un contrôle au niveau de l'entreprise sur la gestion de la qualité.

Les audits doivent être conduit par des personnes n'ayant pas de responsabilité dans le secteur audité ou extérieure.

Le compte-rendu rédigé par l'auditeur doit refléter fidèlement l'esprit et le contenu de l'audit, indiquer les non conformités observées et le degré de conformité du système par rapport au référentiel utilisé, et contenir les conclusions de l'auditeur.

La diffusion du compte-rendu doit provoquer des actions correctives de la part des responsables des activités auditées. Un audit s'achève lorsque la vérification de l'application des actions correctives conclut de leur efficacité.

Les comptes-rendus doivent être collectés, indexés, classés et archivés.

## 8 Incertitude de mesure

La mesure d'une grandeur s'exprime à l'aide de deux nombres. Le premier  $G$  est une estimation de la valeur vraie, le second  $\Delta G$  caractérise l'incertitude avec laquelle la valeur est connue.

Par exemple, un entraxe peut s'exprimer  $43.721\text{mm} \pm 7\mu\text{m}$ .

Il faut aussi préciser la probabilité associée à  $\Delta G$  (95% par exemple) et les conditions de mesures (moyenne de 4 résultats avec correction de température).

En pratique, deux types de problèmes se posent : déterminer l'incertitude associée à un mesurage et choisir un instrument de mesure pour faire un mesurage avec une précision donnée.

### 8.1 Exemple du pied à coulisse

Considérons la mesure de la longueur d'un cylindre avec un pied à coulisse.

La lecture du vernier fournit l'indication suivante :  $L = 50.02\text{mm}$ .

En refaisant plusieurs fois cette mesure on obtient des valeurs différentes. Ceci est due à la variation des grandeurs d'influence.

D'autre part nous faisons l'hypothèse que le pied à coulisse est étalonné.

#### 8.1.1 Inventaire des causes d'erreurs

Voir travaux dirigés.

#### 8.1.2 Que mesure-t-on ?

La grandeur que l'on cherche à mesurer est en général assez mal définie. Les défauts d'états de surfaces, par exemples, font qu'un dispositif de mesure de longueur par palpement mécanique, capacitif ou optique ne mesurent pas la même surface. Le dispositif mécanique vient en contact avec la plus haute crête, les dispositifs capacitifs et optiques vont faire une moyenne mais différente. La différence vient du fait que la loi physique n'est pas la même.

Une solution est de lier l'état de surface à la précision de mesure. Par exemple les cales étalons qui doivent pouvoir être mesurées par tous les types d'instrument ont un excellent état de surface.

Mais dans certaines applications il n'est pas possible d'avoir un bon état de surfaces : surfaces devant être collées, mousses, ... Dans ces conditions il faudra être très prudent lors du choix de l'instrument de mesure.

## 8.2 Conditions d'acceptation lors d'un contrôle

### 8.2.1 Choix d'un instrument de mesure

Soit  $IT$  l'intervalle de tolérance spécifié où doit se situer la grandeur à mesurer. Par exemple une tolérance dimensionnelle ou géométrique spécifiée, ou l'erreur maximale tolérée lors de l'étalonnage d'un instrument de mesure.

Soit  $I$  l'incertitude de mesure.

On choisira un appareil tel que :  $I \leq \frac{IT}{4}$

Pour réduire les risques d'erreurs on peut choisir  $I \leq \frac{IT}{8}$  ou  $I \leq \frac{IT}{10}$

Exceptionnellement, pour des mesures très précises ou pour éviter d'acquérir un instrument de mesure coûteux on peut choisir  $I \leq \frac{IT}{2}$

Historiquement on avait tendance à prendre des précautions maximales et à utiliser un appareil très précis ( $I \leq \frac{IT}{10}$ ). Il apparaît maintenant qu'un facteur de 4 est largement suffisant.

### 8.2.2 Critère d'acceptation

On accepte les pièces dont la dimension mesurée est comprise dans l'intervalle de tolérance. Soit  $m$  la dimension mesurée,  $b_i$  la limite inférieure d'acceptation et  $b_s$  la limite supérieure, on accepte les pièces pour lesquelles  $b_i \leq m \leq b_s$ .

Comme la mesure est effectuée avec une incertitude  $I$ , il est possible d'accepter des pièces potentiellement

hors tolérance (risque client) et de refuser des pièces potentiellement conformes (risque fournisseur).

**Exemple :** contrôle de la longueur d'une pièce cylindrique cotée  $25h8$  ( $25 \begin{smallmatrix} +0 \\ -0.033 \end{smallmatrix}$ ).

Utilisons une colonne de mesure fournissant une incertitude de mesure inférieure à  $4\mu m$ . On a bien  $\frac{33}{4} \geq 4\mu m$

La limite inférieure d'acceptation est 24.967. La limite supérieure d'acceptation est 25.

	mesure	choix
1	24.991	Pièces bonnes
2	24.969	
3	24.988	
4	24.998	Pièces déclarées bonnes avec risque d'accepter une pièce mauvaise (risque client)
5	25	
6	24.968	
7	24.965	Pièces déclarées mauvaises avec risque de refuser une pièce bonne (risque fournisseur)
8	24.966	
9	25.002	
10	25.003	Pièces mauvaises
11	25.004	
12	24.964	

Dans certaines applications, notamment pour des pièces de sécurité on est amené à refuser le risque client. On doit alors restreindre le domaine d'acceptation en fonction de l'incertitude de mesure.

	mesure	choix
1	24.991	Pièces bonnes
2	24.969	
3	24.988	
4	24.989	Pièces déclarées mauvaises avec risque de refuser une pièce bonne (risque fournisseur)
5	25	
6	24.968	
7	24.965	
8	24.966	
9	25.002	
10	25.003	Pièces mauvaises
11	25.004	
12	24.964	

### 8.3 Estimation de l'erreur de mesure

Considérons le résultat de mesure de la grandeur  $g$  suivant :

$$g = \hat{g} \pm k.dg \text{ et } dg = \sqrt{V(\hat{g})}$$

Dans ce résultat  $\hat{g} = \hat{x} + Ce + Ca$ .

$\hat{x}$  estime l'espérance mathématique par la moyenne des mesures effectuées.

$Ce$  représente la correction d'étalonnage. Cette valeur est nulle si l'étalonnage est effectué avec réglage du zéro.

$Ca$  représente la correction d'environnement. Cette valeur est nulle si on effectue la mesure dans les conditions standard.

$k$  est un paramètre permettant de lier l'erreur de mesure  $dg$  et la variance de  $g$  ( $V(\hat{g})$ ). Anciennement on utilisait une valeur de 3 pour  $k$  qui donnait une probabilité de 99,7% qu'une mesure soit dans l'intervalle. Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1993 on prend  $k = 2$  ce qui donne une probabilité de 95%. On admet que la moitié de l'étendue est égale à trois écarts-types.

$k.dg$  estimation de la demi incertitude de mesure.

$V(\hat{g})$  estimation de la variance de la mesure.

#### 8.3.1 Calcul de la variance

Considérons une série de  $n$  mesures  $x_i$ .

Notons  $\bar{x}$  la moyenne des  $x_i$  qui est une estimation de l'espérance mathématique de  $x$ .

Une estimation de la variance est :

$$\begin{aligned} V(x) &= \sigma^2(x) \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \end{aligned}$$

La dernière expression est plus intéressante d'un point de vue erreur de calcul.

Le coefficient  $\frac{1}{n-1}$  provient de ce que l'on calcule une estimation de la variance. La formule pour calculer la variance d'une population est :  $V(x) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2$ .

#### 8.3.2 Estimation de la variance d'une mesure obtenue par calcul

Considérons le résultat de mesure  $g$  obtenu par l'application de la formule  $g = H(g_1, g_2, \dots, g_n)$ . On en déduit immédiatement que

$$\hat{g} = H(\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_n)$$

On peut exprimer la différentielle de  $g$  par  $dg = \sum_i \frac{\partial H}{\partial g_i} dg_i$

À partir de la définition de la variance on peut déduire la variance de  $\hat{g}$  :

$$V(\hat{g}) = \sum_i \left( \frac{\partial H}{\partial g_i} \right)^2 V(\hat{g}_i)$$

#### 8.3.3 Estimation de la variance

Les variances s'ajoutent :  $V(\hat{g}) = V(\hat{x}) + V(Ce) + V(Ca)$

$V(\hat{x})$  est estimé à partir d'une série de mesure.

$V(Ce)$  peut être connue à moindre frais à partir de l'erreur maximale de justesse, ou de la variance de l'erreur de justesse fournie par le constructeur ou une

norme. De même elle peut être donnée par une fiche d'étalonnage.

On calcule la variance de la correction d'environnement à partir des variances des grandeurs d'influence  $q_i$  avec la formule :  $V(Ca) = \sum_i \left( \frac{\partial F}{\partial q_i} \right)^2 V(q_i)$ .

$F$  désigne la fonction liant l'indication de l'instrument de mesure aux grandeurs d'influence  $q_i$ .

On réduit  $V(ce)$  par un étalonnage et  $V(ca)$  en améliorant la mesure des grandeurs d'influence.

### 8.3.5 Calcul à partir de plusieurs mesurandes

On peut aussi estimer la variance à partir de plusieurs mesurandes.

Considérons la mesure de six dimensions avec un appareil de mesures en faisant l'hypothèse que la variance est la même pour toutes les séries de mesures. Les mesures sont effectuées dans les mêmes conditions par le même opérateur.

dimension	1	2	3	4	5	6 k
mesure 1	1.01	5	10	20.01	50.01	100
mesure 2	1.02	5.02	10.02	20.02	50.02	100.01
mesure 3	1.03	5.03	10.03	20.02	50.02	100.01
mesure 4	1.03	5.03	10.04	20.04	50.03	100.02
mesure 5 n	1.05	5.04	10.04	20.05	50.04	100.03
moyenne	1.028	5.024	10.026	20.028	50.024	100.014
variance $v_i$	0.00022	0.00023	0.00028	0.00027	0.00013	0.00013
écart type	0.01483	0.01517	0.01673	0.01643	0.0114	0.0114
variance $\times 4$	0.00088	0.00092	0.00112	0.00108	0.00052	0.00052

$$V(x) = \frac{\sum v_i \times (n-1)}{(n-1) \times k} = \frac{\sum v_i \times 4}{4 \times 6} = 0.00021$$

### 8.3.6 Estimation de la variance d'une série de mesure

Supposons connue une estimation de la variance  $V(x)$ , et effectuons  $n$  mesurages pour déterminer  $x$ .

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

$$V(\bar{x}) = \frac{1}{n} V(x)$$

Par exemple, en fabrication on effectue 30 fois le mesurage d'un diamètre pour déterminer la variance. Puis on mesure le diamètre des pièces fabriquées en effectuant deux mesurages :  $V(\bar{x}) = \frac{1}{2} V(x)$

### 8.3.7 Variables corrélées ou indépendantes

Nous venons de voir qu'en répétant les mesures on diminue l'erreur aléatoire. En est-il toujours ainsi ?

En supposant connue la variance de chaque mesure  $x_i$  ainsi que les covariances  $Cov(x_i, x_j)$  on peut déterminer la variance de  $\hat{g}$  :

$$\begin{aligned} V(\hat{g}) &= \frac{V(x_1)}{n^2} + \frac{V(x_2)}{n^2} + \dots + \frac{V(x_n)}{n^2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i}^n \frac{Cov(x_i, x_j)}{n^2} \\ &= \frac{V(x_1)}{n^2} + \frac{V(x_2)}{n^2} + \dots + \frac{V(x_n)}{n^2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i}^n \frac{r}{n^2} \sqrt{V(x_i)} \sqrt{V(x_j)} \end{aligned}$$

### 8.3.4 Incertitudes et variance

Internationalement on classe les incertitudes en deux catégories :

- les incertitudes évaluées par des méthodes statistiques. On les caractérise par des variances estimées  $V_i = \sigma_i^2$ .
- les incertitudes évaluées par d'autres moyens. On les caractérise par des valeurs  $U_i = u_i^2$  que l'on assimile à des variances.

Pour une mesure, la variance est  $V = \sum \sigma_i^2 + \sum u_i^2$  si les facteurs sont indépendants.

Considérons la mesure d'une longueur réalisée avec  $n$  mesures élémentaires. nous écrivons le résultat :

$$\hat{g} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Faisons l'hypothèse que chaque  $x_i$  est une variable aléatoire :

$$\hat{g} = \frac{x_1}{n} + \frac{x_2}{n} + \dots + \frac{x_n}{n}$$

A partir de la variance de la somme de deux variables aléatoires :

$$V(x_1 + x_2) = V(x_1) + V(x_2) + 2Cov(x_1, x_2)$$

En général on caractérise la covariance par le coefficient de corrélation  $r$  :  $Cov(x_1, x_2) = r \times \sqrt{V(x_1)} \sqrt{V(x_2)}$

La variance de chaque  $x_i$  est égale à la variance de la population  $v$ .

$$\begin{aligned} V(\hat{g}) &= \frac{1}{n^2}(n \times v + n(n-1) \times r \times v) \\ &= \frac{v}{n} \times (1 + r \times (n-1)) \end{aligned}$$

Dans le cas où le coefficient de corrélation  $r$  est nul, c'est à dire que les variables sont indépendantes,  $V(\hat{g}) = \frac{v}{n}$ .

Par contre si le coefficient de corrélation  $r$  est égal à 1, c'est à dire que les variables sont entièrement corrélées,  $V(\hat{g}) = v$ .

Pratiquement on se trouve dans un cas intermédiaire. Il faut toutefois remarquer que si l'on a estimé la variance de la population à partir d'une série de mesures dans les mêmes conditions on peut supposer les variables indépendantes.

## 8.4 Résumé

### 8.4.1 Choix d'un instrument de mesure

On choisit un appareil tel que  $I \leq \frac{IT}{4}$  où  $I$  est l'incertitude de mesure et  $IT$  l'intervalle de tolérance.

### 8.4.2 Critère d'acceptation

On accepte les pièces dont la dimension mesurée est comprise dans l'intervalle de tolérance.

L'incertitude de mesure introduit les risques client et fournisseur.

### 8.4.3 Variance

L'estimation de la variance est :  $V(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$

Si  $g = H(g_1, g_2, \dots, g_n)$  alors la variance de  $g$  s'exprime :  $V(\hat{g}) = \sum_i \left( \frac{\partial H}{\partial g_i} \right)^2 V(\hat{g}_i)$

On peut effectuer des calculs sur les incertitudes à l'aide des variances.

Les incertitudes ne correspondant pas à des variances sont assimilées à des variances pour effectuer des calculs.

On définit l'incertitude de mesure  $I$  à partir de la variance et d'un coefficient  $k = 2$  :  $I = 2k\sqrt{V}$

### 8.4.4 Mesures corrélées ou indépendantes

Si les mesures élémentaires étaient totalement indépendantes, un grand nombre de mesure conduirait à une incertitude très faible. De même, si les mesures étaient totalement corrélées faire plusieurs mesures n'améliorerait en rien l'incertitude de mesure.

En pratique faire toujours plusieurs mesures élémentaires sans les multiplier inutilement (de 3 à 10 mesures suivant les applications).

## 9 Choix des appareils de mesures

Le choix des appareils de mesures s'effectue à plusieurs niveaux : achat d'instrument et affectation d'un instrument à un service ou à un moyen de production.

On peut définir un certain nombre de questions pour aider au choix d'un instrument ( Voir l'article de Jean-Yves ARIAT dans Métrologie dans l'entreprise, outil de la qualité AFNOR) :

1. Quels sont mes besoins industriels ?
  - Que dois-je mesurer et quelle précision dois-je atteindre ?
2. Comment satisfaire mes besoins ?
  - Quelles sont les méthodes de mesures possibles ?
3. Quelle méthode retenir ?
  - Quels seront la méthode et le principe utilisés ?
4. Quels sont les appareils de mesure utilisables ?
  - Quel instrument vais-je utiliser ?
5. Comment utiliser l'instrument choisi ?
  - Quel montage réaliser et selon quelle procédure ?
6. Comment vais-je garantir la qualité de mes mesures ?

Avant de faire le choix des appareils il faut définir ce que l'on veut mesurer, c'est à dire établir un cahier des charges.

Le choix sera un compromis entre les besoins techniques et les contraintes économiques à travers les évaluations que l'on aura pu faire.

On peut distinguer plusieurs type de matériel suivant le domaine d'emploi : étude (possibilité d'évolution), chantier ou atelier (robustesse), fabrication (facteurs économiques) ou laboratoire (précision).

Il existe des critères de choix subjectifs mais qui peuvent avoir une grande importance : qualité du fournisseur, avis des utilisateurs, ...

### 9.1 Les critères techniques

On peut identifier des critères techniques en fonction des besoins.

1. Caractéristiques de base : étendu du domaine de mesure, précision, ...
2. Tenue aux grandeurs d'influence
3. Durabilité des appareils
4. Homogénéité du parc
5. Qualité du service du fournisseur
6. coût des mesurages
  - prix d'achat
  - coût d'exploitation : énergie, personnel, consommables
  - coût d'entretien : étalonnage, maintenance
7. Raccordement aux étalons.
8. Possibilité d'informatisation et d'automatisation des mesures, temps de mesure

## 9. capabilité d'un instrument de mesure

Il est possible d'établir une grille de choix en affectant des coefficients à chacun de ces critères.

### 9.2 Le parc d'appareil de mesures

Chaque appareil doit être identifié afin de garantir son étalonnage. Le suivi des appareils peut se faire de plusieurs manières dossier, étiquette, système informatique... Il faut choisir le dispositif le mieux adapté à l'entreprise. Le dispositif doit garantir que l'on utilise que des appareils validés par les procédures d'éta-

lonnage et de vérification, que l'on est en mesure de retrouver toutes les pièces qui ont été contrôlées avec un appareil ou l'appareil qui a servi au contrôle d'une pièce.

Pour chaque appareil doivent être définis les périodicités des étalonnages et des vérifications. Et donc, les procédures d'acquisition des nouveaux appareils doivent prévoir la détermination de ces périodes en plus des procédures d'utilisation, de transport et de stockage.

Afin de suivre plus finement les appareils de mesures on peut utiliser les cartes de contrôles.

# TD qualité.

## A Pied à coulisse

Faire l'inventaire des causes d'erreurs lors d'une mesure avec un pied à coulisse.

## B Etalonnage

Pour un contrôle de grande série, un appareil de contrôle est constitué d'un plan de référence supportant la pièce à mesurer et de capteur numériques de déplacements mesurant la position de points de la pièce. Pendant la mise en place de la pièce un dispositif escamote les palpeurs.

L'appareil est périodiquement réglé en positionnant des cales étalons de la longueur nominale sous les palpeurs.

On désire ici vérifier l'étalonnage d'un de ces palpeurs.

Pour cela nous utilisons une boites de cales étalons.

La course des palpeurs est de plus ou moins un millimètre.

Valeurs relevées avec une cale de 45 mm : 45.000 ; 44.999 ; 45.001 ; 45.000 ; 45.000 ; 44.999 ; 44.999 ; 45.001 ; 44.999, 44.998

### B.1 Déterminer l'erreur de justesse de ce capteur

### B.2 Déterminer l'erreur de fidélité de ce capteur

## C Critères d'acceptation

Pour contrôler une spécification d'entraxe  $50 \pm 0.02$  nous utilisons un appareil de mesure dont l'erreur est caractérisée par une variance  $V = 8\mu m^2$ .

### C.1 Peut-on contrôler cette spécification avec cet appareil ?

### C.2 Risque

Donner les plages de mesures relatives aux risques client et fournisseur.

## D Mesure

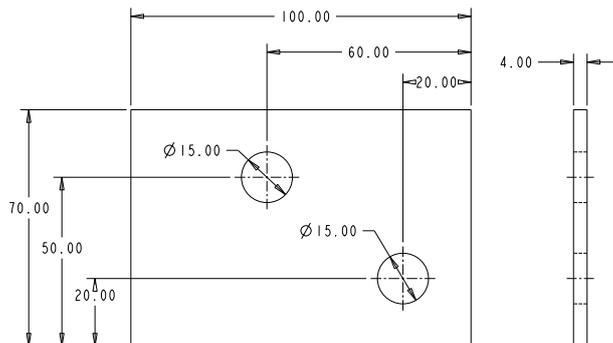
Trois opérateurs utilisant des méthodes différentes ont obtenus les 3 résultats suivants pour la mesure d'une longueur :

- $l=100.123$  avec  $V = 1e^{-6}mm^2$
- $l=100.126$  avec  $V = 25e^{-6}mm^2$
- $l=100.120$  avec  $V = 9e^{-6}mm^2$

### D.1 Que pensez vous de ces résultats

### D.2 Contrôle

En fait ces 3 mesures correspondent au résultat du contrôle de la spécification  $100.122 \leq l \leq 100.150$ . La pièce est-elle conforme ?



## E Mesure de la distance entre deux alésages

La question porte sur la mesure de l'entraxe entre les deux alésages à l'aide d'une colonne de mesure.

### E.1 Etalonnage

Le certificat d'étalonnage de la colonne fournit l'indication suivante :

*l'erreur de mesure est inférieure à  $\pm(\frac{l}{5000} + 0,003)mm$*

$l$  représente la longueur mesurée en mm.

Donner la variance associée ( $K = 2$ ) à la mesure d'une longueur  $l$  avec cette colonne.

Application numérique pour une longueur  $l=50$ .

### E.2 Etalonnage de la colonne de mesure

Pour étalonner la colonne de mesure nous effectuons la série de mesures suivantes :

– mesure d'une cale de 50 mm posé sur le marbre. Nous obtenons les résultats suivants : 49.999 50.000 49.999  
50.001 49.998 50.000

– mesure d'une hauteur de 55 mm réalisé avec une cale de 55 mm et une cale plus grande afin de mesurer une hauteur par en dessous. La bille de palpation utilisée fait un diamètre de  $5\text{ mm} \pm 0.0001\text{ mm}$ . Nous obtenons les résultats suivants : 50.001 49.999 49.999 49.998 50.000 49.999 50.001 49.999

Calculer l'erreur de justesse et de fidélité dans ces conditions de mesures pour cette colonne.

### E.3 Critères d'acceptation

Supposons que l'incertitude de mesure de l'entraxe soit représentée par une variance de  $1 \times 10^{-6}$ .

En contrôlant l'entraxe ( $50 \pm 0.01$ ) on obtiens les mesures suivantes : 50.008, 49.990 50.015 49.995 49.999  
50.002 49.985

Lesquelles de ces pièces sont conformes à la spécification ?

Lesquelles de ces pièces correspondent à un risque client ou à un risque fournisseur ?

Université Paul Sabatier  
Daniel SIDOBRE

Maitrise de technologie mécanique  
IUP Génie mécanique Productique 3<sup>me</sup> année

## Examen de qualité. Contrôle de la qualité février 2004

Aucun document autorisé.

## F Définitions :

Voir examen de janvier 2005.

## G Généralités

1. Quels sont les moyens de vérification d'une conception ?
2. Définir les termes vérificateur et concepteur.

## H Certification

Si l'on admet qu'un modèle théorique de production propose pour améliorer la production en minimisant le coût de n'effectuer qu'une seule fois un contrôle et le plus tôt possible après la réalisation de l'élément à contrôler, diriez-vous que les procédures de certification visent à atteindre cet objectif et pourquoi ?

## I Critères de choix d'un instrument de mesure

Donner quelques critères de choix d'un instrument de mesure autres que ceux relatifs à la précision et à l'étendue de mesure.

## J Etalonnage

Un dispositif de contrôle de grande série utilise un codeur optique linéaire.

### J.1 Indications

Donner la signification de chacun des termes de la notice :

1. capacité 600 mm ;
2. graduation de l'échelle :  $20 \mu$  ;
3. précision  $5 + 5 \times L_0/1000 \mu$  où  $L_0$  désigne la longueur effective en *mm* (course de l'appareil) ;
4. vitesse de réponse 50 m/min.

### J.2 étalonnage

Pour vérifier les indications de l'appareil on effectue deux séries de mesures :

- 0. ; 0. ; 0.001 ; 0. ; -0.001 ; 0.001 ; 0. ; 0. ; -0.001 ; 0.
- 100.005 ; 100.006 ; 100.006 ; 100.005 ; 100.006 100.005 ; 100.006 ; 100.007 ; 100.005 ; 100.006

### J.3 Déterminer l'erreur de justesse de cette règle

### J.4 Déterminer l'erreur de fidélité de cette règle

## K Critères d'acceptation

Pour contrôler la spécification  $100 \pm 0.04$  relative à la distance entre un alésage et un plan on utilise un appareil de mesure dont l'erreur est caractérisée par une variance  $V = 4\mu m^2$ .

### K.1 Peut-on contrôler cette spécification avec cet appareil ?

### K.2 Risque

Donner les plages de mesures relatives aux risques client et fournisseur.

## L Mesure

Avant d'aller manger, un opérateur effectue le contrôle d'une spécification de longueur  $50 \pm 0.1$  et obtient :

-  $l=50.103$  avec  $V = 10\mu m^2$

A son retour, l'opérateur est pris d'un doute et refait la mesure. Il obtient alors :

-  $l=50.095$  avec  $V = 10\mu m^2$

### L.1 Ces résultats sont-ils cohérents ?

### L.2 Quelle doivent être alors les actions de l'opérateur pour cette pièce ?

Examen de qualité.  
Contrôle de la qualité  
Janvier 2005

## M Définitions :

Compléter les phrases en utilisant éventuellement les termes suivants :

unités, étalon de travail, mesurage, exactitude, incertitude de mesure, chaîne d'étalonnage, résolution, erreur aléatoire, vérification de réception, justesse, erreur de justesse, fidélité, marque de vérification, contrôle, mesure, erreur de fidélité, métrologie, étalon, étalonnage, étalon de référence de l'entreprise, précision, vérifications périodiques, certificat d'étalonnage BNM, procès-verbal d'étalonnage, procès-verbal de vérification, marque d'identification, marque d'étalonnage, laboratoire primaire, erreur systématique

1. .... ensemble des opérations permettant de déterminer la ou les valeurs des grandeurs à mesurer.
2. .... est l'ensemble des opérations permettant de déterminer si les grandeurs de l'élément à vérifier sont conformes aux valeurs exigées.
3. .... erreur due à l'influence de facteurs imprévisibles et non maîtrisables.
4. .... composante systématique de l'erreur d'un instrument de mesure.
5. .... plus petite variation d'une grandeur pouvant être décelée par l'appareil.
6. .... ensembles des opérations permettant de déterminer les valeurs des erreurs d'un instrument de mesurage (et éventuellement d'autres caractéristiques métrologiques).
7. .... étalon destiné à étalonner ou à vérifier les instruments de mesurage usuels.
8. .... est un signe apposé sur un instrument de mesurage permettant de l'identifier sans ambiguïté.

## N Généralités

1. Quels sont les moyens de vérification d'une conception ?
2. Définir les termes vérificateur et concepteur.

## O Critères de choix d'un instrument de mesure

Donner quelques critères de choix d'un instrument de mesure autres que ceux relatifs à la précision et à l'étendue de mesure.

## P Indications

Dans la description publicitaire d'un dynamomètre de capacité maximale 100 N, on peut lire :

1. Précision 0.1% PE
2. Résolution  $10^{-4}$  PE
3. Affichage de la courbe Force/Temps
4. Calcul des points spécifiques de la courbe :
  - Maxima
  - Rupture
  - Dérivée
  - Premier pic
  - Force sur ouverture/fermeture de contact
  - force moyenne

**P.1 Donner la signification de chacun des éléments de cette description.**

**P.2 Donner l'incertitude associée à la mesure d'une force de 10 N**

## Q Etalonnage

Un axe rotatif de machine outil utilise un codeur angulaire à effet Hall. On souhaite vérifier les caractéristiques de cet axe. Pour cela on utilise un codeur optique angulaire de très grande précision dont on négligera les erreurs.

A partir de différentes positions on demande au dispositif d'aller en zéro et on note les mesures fournies par le capteur et le codeur de référence. Puis on effectue les mêmes mesures en demandant au système d'atteindre la position  $\pi$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
référence	-0.0025	-0.01838	-0.03248	-0.00492	-0.02608	0.00514	-0.0143	-0.00596	-0.027	-0.0273
capteur	0.01	0.0	-0.02	0.01	-0.01	0.02	0.0	0.01	-0.01	-0.01

On effectue les calculs suivants :

- calcul des écarts  $m_i$  entre les mesures des deux appareils de mesures pour la première série de mesures.
- calcul de la moyenne des  $m_i$  : 0.01538
- la variance des  $m_i$  : 3.83e-06
- l'écart type des  $m_i$  : 0.00196

**Q.1 Donner l'erreur de fidélité de ce codeur à effet Hall**

**Q.2 Que peut on dire pour l'erreur de justesse ?**

**R Critères d'acceptation**

Pour contrôler la spécification  $50 \pm 0.05$  relative à la distance entre deux éléments, on dispose de 4 appareils de mesure caractérisés par leur variance respectives de 16, 36, 64 et  $144 \mu m^2$ .

**R.1 Quels appareils sont utilisables pour ce contrôle ?**

**R.2 Quels est le meilleur choix ?**

On considère que plus un appareil est précis, plus son coût de mesure est élevé.

**R.3 Risques**

Donner les plages de mesures relatives aux risques client et fournisseur pour l'appareil choisi.

**S Mesure**

Soit les 3 mesures :

- 87.352 (variance  $16 \mu m^2$ )
- 87.354 (variance  $16 \mu m^2$ )
- 87.343 (variance  $16 \mu m^2$ )

**S.1 Ces résultats sont-ils cohérents ?**

**S.2 Quelle est la meilleure estimation que vous pouvez donner de cette mesure**

**S.3 Contrôle**

Cette mesure correspond à la mesure d'un élément devant vérifier la spécification  $87.3_{-0.05}^{+0.05}$ . L'élément est-il conforme ?