Contrôle de qualité appliquée

études de cas et nouvelle organisation du travail

Ammar Grous

Hermes Lavoisier

Contrôle de qualité appliquée

© 2013, Lavoisier, Paris

www.hermes-science.com
www.editions.lavoisier.fr

ISBN 978-2-7462-3930-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, d'une part, que les "copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective" et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, "toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite" (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans cet ouvrage sont utilisés à des fins d'identification et sont des marques de leurs détenteurs respectifs.

Contrôle de qualité appliquée

études de cas
et nouvelle organisation du travail

Ammar Grous

hermes Science publications

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos 9

Chapitre 1. Contrôle de qualité 15

1.1. Introduction à la maîtrise statistique des processus 15
1.2. Tolérancement classique et contrôle de qualité 18
1.2.1. Les normes ISO en contrôle de qualité 19
1.2.2. Approche QS9000 20
1.2.3. Capabilité des moyens de contrôle CNOMO E41.36.110.N 23
1.2.4. Quelques indicateurs de capabilité selon ISO/TS 16949, ISO 8258 et FORD 24
1.2.5. Audit métrologique 25
1.3. La loi de Pareto : méthode ABC 28
1.4. Le contrôle de réception par attributs. 32
1.4.1. Carte (n.p) pour le contrôle du nombre de défectueux 34
1.4.2. Carte (c) pour le contrôle du nombre de défauts (Defects et non Default) 34
1.4.3. Qualité moyenne des lots après un contrôle 38
1.4.4. Règles de prélèvement 46
1.4.5. Choix d'un plan d'échantillonnage. 48
1.4.6. Etude de cas d'un plan de Wald 50
1.4.7. Quantité moyenne contrôlée à long terme (l). 51
1.4.8. Cas d'étude d'un plan d'échantillonnage simple. 58
1.5. Distribution de Poisson des probabilités cumulées. 59
1.6. Bases théoriques du contrôle par mesurage 61
1.6.1. Choix d'un plan d'échantillonnage simple 63
1.6.2. Choix d'un plan d'échantillonnage double ou multiple. 63

1.7. Analyse de la capabilité de procédés 64
1.7.1. Indices de capabilité : cas d'une variable de la loi normale : X (μ, σ) 67
1.7.2. La capabilité machine C_m et C_{mk} 71
1.8. Capabilité pour une variable non normale 72
1.9. Les cartes de contrôle par mesure 72
1.9.1. Taille des échantillons à prélever et de la fréquence de contrôle 76
1.9.2. Facteurs de calculs des limites de contrôle pour les cartes $\bar{X}$ et R 79
1.10. Les contrôles de fabrication et de réception 80
1.10.1. Adaptation de la machine en lien avec les tolérances de fabrication 81
1.10.2. Proportion des unités défectueuses 82
1.11. Cartes de contrôle 85
1.11.1. Cartes de contrôle par mesure de la moyenne $\bar{X}$ et de l'étendue R 86
1.11.2. Méthode de calcul des limites de contrôle et étude de cas 86
1.11.3. Etudes des cartes de contrôle $\bar{X}$/R – Laboratoire de contrôle de qualité 90
1.11.4. Illustration graphique des rebuts pour non-conformité aux IT . . 97
1.11.5. Etudes de cas sur les performances : capabilité 99
1.11.6. Calcul des indices de capabilité machine : C_m et C_{mk} 102
1.12. Discussion 103
1.13. Conclusion 105
1.14. Bibliographie 106

Chapitre 2. Etudes de cas en contrôle de qualité 109

2.1. Les outils de la qualité au sens de W. Deming 109
2.2. Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et leur criticité 110
2.3. Méthode « TRS » ou « TMP » pour *total productive maintenance* . . . 110
2.4. La méthode des 5M du processus 116
2.5. Estimation des temps en fabrication mécanique (usinage) 116
2.5.1. Optimisation des temps et des coûts en fabrication mécanique 121
2.5.1.1. Optimisation des paramètres de coupe, en usinage, selon ISO 3685 123
2.5.1.2. Temps d'usinage, τ_m 124
2.5.1.3. Vitesse et temps économiques de coupe en tournage (chariotage de CM_1) 129

2.5.1.4. Temps d'usinage minimal et cadence de production maximale 129
2.5.1.5. Optimisation des coûts en fabrication mécanique 131
2.6. Méthode d'approvisionnement et gestion des stocks 134
2.6.1. Hypothèse d'une méthode générale pour mieux gérer les stocks 136
2.7. Récapitulatif succinct des cartes de contrôle 140
2.7.1. Les différentes cartes de contrôle 141
2.7.2. Cartes de contrôle par mesure – Cartes de contrôle de la stabilité (Shewhart) 142
2.7.3. Estimation de μ_0 et σ_0 143
2.7.4. Efficacité – Carte de la moyenne 144
2.7.4.1. Carte de l'écart-type et de l'étendue 144
2.7.4.2. Carte de contrôle de la stabilité en présence d'une cible . . . 144
2.7.5. Cartes de contrôle par attribut – Détermination des limites 145
2.8. Cartes CUSUM 147
2.8.1. Cartes EWMA 148
2.8.2. Les cartes de Shewhart par la moyenne $\overline{X}$, l'étendue R et l'écart-type (s) 150
2.8.2.1. Limites de contrôle pour $\overline{X}$ des cartes de contrôle s 150
2.8.3. Cartes de contrôle de la moyenne $\overline{\overline{X}}$ et de l'étendue R 151
2.8.3.1. Cartes de contrôle de la moyenne d'ordre 2 → $\overline{\overline{X}}$ 151
2.8.3.2. Cartes de contrôle des étendues → R 152
2.9. Les cartes de contrôles individuels 154
2.9.1. Les longueurs moyennes ou CUSUM-Run 155
2.9.1.1. Détermination de l'ARL, h et k connues 156
2.10. La statistique EWMA et les techniques de carte de contrôle EWMA 157
2.10.1. Approximation normale de Poisson 162
2.10.1.1. Cartes de contrôle pour la proportion (p) lot défectueux 164
2.10.2. Limites de décision de la carte de contrôle $\overline{X}/R$ / par la méthode MSP 165
2.11. Tests statistiques essentiellement employés en contrôle de qualité 168
2.11.1. Test dit de la « droite de Henry » ou le diagramme de probabilité 169
2.12. Conclusion 173
2.13. Bibliographie 174

Chapitre 3. Etudes de cas 177

3.1. Etude de cas de contrôle de qualité – Calcul et tracé des courbes d'efficacité en contrôle simple et double. 177
3.1.1. Loi binomiale simple 177
3.2. Calcul des courbes d'efficacité en contrôle simple/double 180
3.3. Calcul des courbes d'efficacité en contrôle double (loi binomiale) plan d'efficacité double (version Excel) 183
3.4. Contrôle progressif (version Excel). 184
3.4.1. Calcul des droites d'acceptation et de refus en contrôle progressif 185
3.4.2. Résultats des calculs 186
3.4.3. Tracé graphique 187
3.4.4. Contrôle de réception aux mesures quand sigma (σ*) est connu 188
3.4.5. Détermination de la courbe d'efficacité et des limites d'acceptation 188
3.4.6. Acceptation. Ecart-type connu = 0.01 189
3.4.7. Contrôle de réception aux mesures quand sigma (σ) est connu 190
3.4.8. Détermination d'un plan 191
3.5. Etude R & R en contrôle de qualité et en métrologie dimensionnelle 193
3.6. Etude d'une carte de contrôle X/S (moyenne écart-type) 198
3.7. Etude de cas : capabilité d'un moyen de contrôle spécifique. 199
3.8. Etude de cas sur les incertitudes de type A et B 203
3.8.1. Estimation de l'incertitude type composée U_c 208
3.9. Etude de cas : incertitudes 208
3.10. Conclusion 225
3.11. Bibliographie 225

Annexes 227

Glossaire 285

Liste des abréviations utilisées 293

Index 295

Avant-propos

Cet ouvrage constitue la troisième partie d'un triptyque qui s'adresse aux techniciens, ingénieurs, concepteurs, étudiants et enseignants des disciplines des sciences de l'ingénieur et des métiers. Le principal objectif visé est l'évaluation succincte des indicateurs de la qualité et de la fiabilité comme outils d'aide à la décision. Nous préconisons, pour cela, une approche *intuitive* et pratique fondée sur la rigueur mathématique. Nous avons également mis l'accent sur l'acceptation des résultats expérimentaux en faisant référence aux calculs des incertitudes en lien avec le guide pour l'expression de l'incertitude, GUM (*Guide to Uncertainty in Measurement*).

La première partie de ce volume 3[1] présente les éléments fondamentaux des traitements de données tant en contrôle de qualité qu'en fiabilité mécanique des matériaux et des structures. Les résultats de laboratoires et de travaux dirigés sont discutés en conformité avec le processus technologique inhérent à la matière traitée. Nous discutons et interprétons aussi la conformité des processus de fabrication en lien causal avec les spécifications dimensionnelles et géométriques (GPS, *Geometrical Product Specification*).

Nous abordons divers exemples en provenance de laboratoires encadrant ainsi la nouvelle organisation industrielle du travail. Aussi, nous utilisons les composants mécaniques issus de nos mécanismes réels, conçus et fabriqués par nos soins au

1. Cet ouvrage fait partie d'un ensemble de trois volumes publiés aux éditions Hermès (2013) :

– le volume 1 correspond à : *Eléments d'analyse de la fiabilité et du contrôle de qualité : statistiques appliquées par l'exemple* ;

– le volume 2 correspond à : *Fiabilité mécanique appliquée : études de cas concrets* ;

– le volume 3 correspond à : *Contrôle de qualité appliquée : études de cas et nouvelle organisation du travail*.

laboratoire de productique. La modélisation par éléments finis est tout simplement le fait de cas réels de pièces usinées, contrôlées et assemblées (parfois par soudage) au laboratoire de métrologie.

Nous traitons également des incertitudes des composants mécaniques. Comme cette discipline a en commun, les statistiques, avec le contrôle de qualité, nous ajouterons tout simplement les indices de fiabilité et les discuterons en conformité avec l'emploi de la structure sujet de nos calculs.

Les scientifiques des écoles spécialisées et les entreprises se sont souvent intéressés à la qualité des mesures donc aux incertitudes de mesures. Ce sont, surtout, les entreprises dites avant-gardistes, à savoir l'aéronautique, l'automobile et le nucléaire, la biomécanique, pour ne citer que celles-ci, qui accordèrent une importance allant crescendo à la *mesure juste*. Le contenu pédagogique de ce volume se distingue essentiellement par les éléments suivants :

1. la rigueur des méthodes probabilistes qui supportent les traitements statistiques-mathématiques des données expérimentales ou simulées ;

2. l'utilisation des tables de référence (annexes) pour le choix des facteurs de qualité ;

3. la présentation de différents modèles de laboratoires à suivre à la fin de chaque chapitre. Cette partie est nécessaire au support pédagogique pour :

- définir et justifier un objectif du contrôle de qualité ;
- identifier les outils adaptés au contrôle de qualité ;
- interpréter les indicateurs de qualité (indices de capabilité de l'industrie automobile) ;
- choisir le type de test d'adéquation des lois appliquées (justifiées ou *a priori*) ;
- identifier les moyens pour accélérer les essais et leurs limites ;
- analyser la qualité et la fiabilité des matériaux et des structures ;
- dimensionner et *tolérancer* (GPS) les matériaux et les structures de conception.

Et le calcul des incertitudes dans tout ça ?

Le comportement à la rupture des structures est souvent caractérisé, sur le plan de la mécanique linéaire, par une variation locale des propriétés élastiques du

matériau. Ce fait impose inéluctablement des calculs de dimensionnement visant à sécuriser les structures dont sont issus les matériaux. De très nombreux travaux ont été et continuent à être menés dans un très large éventail de disciplines allant du génie civil aux différentes variantes de la mécanique. Nous ne traitons pas de la mécanique des milieux continus mais plutôt des lois probabilistes de la fissuration. Nous sommes conscients que certaines lois sont systématiquement reprises ici et là pour renseigner sur la fiabilité.

Des tests d'adéquation moins sévères confirmeraient l'hypothèse du modèle de propagation des fissures. Dans des domaines à haute valeur de sécurité comme les appareils de médecine (chirurgie et biomécanique), l'aviation, les centrales nucléaires, pour ne citer que ces trois cas, il serait inacceptable de théoriser des concepts sans vérification rigoureuse. Les calculs fiabilistes y afférents doivent faire l'objet d'une rigueur extrêmement soutenue.

La définition des coefficients de sécurité constituait un élément important, voire majeur, pour le dimensionnement des structures. Cette définition coûte sans offrir une réelle assurance sur les prévisions de la sûreté (non la sécurité). De nos jours, l'interprétation et la philosophie même de ces coefficients sont renforcées par des calculs probabilistes de plus en plus précis. Les outils informatiques bien développés contribuent pour une grande part aux temps et aux efforts de calculs. Dans ce sens, nous utilisons des logiciels répandus dans les écoles d'ingénieurs (Inventor Pro, ANSYS, MathCAD, GUMic et COSMOS, MeasureLink), en contrôle de qualité, en fiabilité et en métrologie dimensionnelle.

Pour rationaliser le concept de la marche de fiabilité, de très nombreux travaux ont été faits, toutefois, on ne voit pas encore se dégager une « démarche unitaire » sur l'aspect de la mécanique de la rupture et sur celui probabiliste. Parmi les divers facteurs qui affectent ce non-consensus, on trouve les facteurs imprévisibles qui provoquent aléatoirement l'amorçage de la fissure, sa propagation et le dommage qui en résulte. De nombreux chercheurs se sont penchés sur diverses méthodes déterministes et aléatoires. Il s'en est suivi des méthodes de simulation dont la plus répandue est celle de Monte-Carlo (MC).

Dans ce volume, nous présentons quelques applications numériques documentées afin d'aider les pédagogues à présenter succinctement les problèmes probabilistes (fiabilité et/ou ruine). L'approche intuitive prend une part importante dans nos démarches de résolution de problèmes. C'est d'ailleurs l'un des motifs importants de présenter une humble contribution à travers ce volume. De nombreux ouvrages et travaux louables ont été présentés dans différentes langues. Cependant, ces ouvrages traitent séparément de la fiabilité, du contrôle de la qualité et des incertitudes. Or l'important est de vérifier les mesurages et de bien encadrer le

mesurande. Lord Kelvin notait ceci : « Il n'y a de science que du mesurable… ». Certes, mesurer des grandeurs identifiées est une fonction incontournable dans les laboratoires. La validation théorique d'un phénomène physique passe, entre autres, par la *fiabilité de la mesure* et de ses effets sur la fonction allouée au matériau et/ou à la structure.

Les modèles (critères de rupture) de la mécanique des milieux continus proposés au chapitre 1 du volume 2 constituent un travail de référence que l'on a exploité ici et là dans nos cas d'étude comme la loi de Paris-Erdogan, celle de Manson-Coffin, les courbes S-N (ou courbes de Wöhler), la loi de Weibull (mécanique des solides), etc. On serait vraisemblablement tenté de s'interroger (à juste titre) sur l'opportunité de ce chapitre dans des ouvrages dédiés à la fiabilité. La raison est que ces critères sont délibérément ciblés. Nous les avons ici exploités pour éviter au lecteur de « s'éparpiller » dans les ouvrages spécialisés.

Il est absolument nécessaire d'établir une certaine *confiance* dans les résultats. En exergue, mesurer une grandeur ne se résume pas seulement à rechercher la valeur de cette grandeur. Il convient de lui associer une *incertitude* en vue de qualifier la *qualité* de la mesure. Nous présentons, dans ce volume, des exemples pédagogiques de laboratoires traitant des incertitudes (GUM).

Pourquoi publier un autre ouvrage dédié au contrôle de la qualité, des incertitudes et de la fiabilité ?

Tout d'abord pourquoi un ouvrage qui traite des deux domaines (contrôle de qualité et fiabilité incluant les incertitudes) qui, *a priori*, semblent distincts ? La raison est que ces deux disciplines ont en commun les probabilités, les statistiques et une démarche proche et familière dans la description de l'hypothèse.

En contrôle de qualité, souvent le procédé est déjà connu ou semble être maîtrisé au préalable d'où l'intervention des indices de capabilité (MSP ou SPC). Aussi, l'objectif vise parfois un phénomène de concurrence des produits manufacturés. La question de sécurité est présentée en termes secondaires. C'est plutôt en termes de maintenabilité et de durabilité que le contrôle de la qualité rejoint la fiabilité comme moyen d'assurer la fonction attribuée à un mécanisme, un composant ou un système en entier.

En fiabilité mécanique des matériaux et des structures, l'indice de fiabilité est en lui-même un indicateur renseignant sur la *sécurité*. Il est souvent très coûteux en temps de calcul et grave en matière de conséquences. L'élément commun aux deux disciplines demeure l'approche probabiliste. Des outils de probabilité et de

statistique-mathématique sont nécessaires pour fournir les justifications théoriques des méthodes de calculs. Encore une fois, cet ouvrage se veut pragmatique et laisse une part appréciable à l'approche intuitive dans le domaine des hypothèses émises ici et là.

Nous avons tenu à présenter en annexes pas moins d'une cinquantaine de tables de référence pour apprécier le niveau d'acceptation de la qualité (NAQ ou AQL en anglais, *Accepted Quality Level*) lors de l'inspection des composants issus de la fabrication. Il en va de même pour les tables AOQL et typiques Dodge-Romig pour un échantillonnage d'un plan simple AOQL et LQL (AOQL, *Average Outgoing Quality Limit* et LQL, *Limiting Quality Level corresponding to a consumer's risk* β).

En dernier lieu, nous présentons un glossaire succinct afin d'uniformiser la compréhension des termes utilisés en métrologie dimensionnelle (VIM : vocabulaire international de métrologie) et en fiabilité mécanique des structures. Cette façon pédagogique de faire sert à « s'entendre » sur la terminologie internationale des vocables utilisés pour désigner un mesurande, un indice de fiabilité ou une définition succincte des coefficients de capabilité largement utilisés en contrôle de qualité.

Ammar GROUS

L'action qualité est fondamentalement tributaire de la rigueur accordée au processus expérimental ainsi qu'à la maîtrise des outils adaptés aux paramètres d'analyse. Faire de l'étude qualité une simple application statistique théorique serait le signe d'une vision tronquée des causes symptomatiques de la qualification des produits.

Les thèmes traités dans cet ouvrage sont structurés selon le cheminement de l'action qualité et de la nouvelle organisation du travail. Contrôler des produits, c'est avant tout les surveiller et les conserver jusqu'à la fin de la mission donnée. La surveillance est l'observation du dépassement d'un pourcentage de rebuts fixé au préalable. Analyser les causes d'un éventuel déréglage du procédé tend à minimiser le pourcentage de rebuts. L'action d'accepter ou de refuser la cote issue du procédé de fabrication doit toujours s'accompagner d'un rapport en vue d'améliorer la fabrication.

De nombreux cas sont traités dans ce volume didactique qui s'adresse aux techniciens qualité, aux universitaires et aux professionnels.

L'auteur

Ammar Grous est docteur en sciences de l'ingénieur de l'université de Haute-Alsace. Il est ingénieur en mécanique et titulaire d'un DEA en génie des matériaux. Il enseigne les techniques de génie mécanique au Québec (Canada).

www.editions.lavoisier.fr

hermes science publications

9 782746 239302