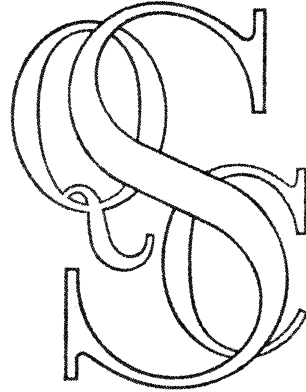


WESTERN ELECTRIC



**Manuel
du contrôle statistique
de la qualité**

Préface du traducteur

Le manuel de Western Electric, *Statistical Quality Control Handbook*, est l'un des trois ouvrages recommandés par Deming à tous ceux qui veulent améliorer leur connaissance du concept de variation¹. Les deux autres sont de Shewhart.

Le contrôle statistique de la qualité est apparu aux Etats-Unis en 1924 dans l'usine *Hawthorne* de Western Electric, près de Chicago. Le site employait 46 000 personnes et produisait dix millions de postes téléphoniques par an, ce qui était certainement l'une des plus grandes fabrications de série au monde. De nouveaux produits étaient mis au point, la production augmentait régulièrement et l'usine devait fournir un matériel de bonne qualité pour un prix acceptable. Or les défauts se multipliaient. Pour faire face à la situation, la direction technique des *Bell Telephone Laboratories*, centre de recherches du groupe AT&T, dont Western Electric était une filiale, créa un département d'assurance qualité dont le but était d'optimiser la production en veillant à satisfaire les besoins des consommateurs. Ce département rassemblait de jeunes chercheurs issus des meilleures universités américaines, parmi lesquels le Dr. Walter Shewhart qui fut chargé du problème de l'interprétation des mesures des caractéristiques de la qualité en production. En 1931, après des essais concluants, il a fait connaître les résultats de ses travaux dans un premier ouvrage² qui sert encore de référence à de nombreux articles sur la qualité.

Les opérations de contrôle qui étaient pratiquées jusqu'alors dans l'usine donnaient des résultats médiocres parce qu'elles empêchaient tout travail d'équipe. Shewhart a très vite compris que le contrôle d'un produit nécessite la collaboration de plusieurs personnes à différents postes de responsabilités. Mais il fallait d'abord trouver une nouvelle définition au concept de contrôle. « On dit qu'un phénomène est sous contrôle, écrit-il, lorsque, en utilisant l'expérience du passé, on peut prévoir, entre certaines limites, de quelle façon il variera dans l'avenir. » Le problème n'était donc plus de trouver et de corriger les défauts sur un produit fini, ce qui était le travail d'un « contrôleur », mais de faire en sorte que les caractéristiques de la qualité soient stables avec des variations aussi faibles que possible. Pour obtenir ce résultat, il a mis au point un nouvel outil : le graphique de contrôle.

Le second ouvrage de Shewhart³ est paru en 1939 sous la forme de quatre conférences données à l'Ecole supérieure du ministère de l'Agriculture. Il y expose longuement le rôle de chaque membre de l'entreprise dans le processus d'amélioration de la qualité.

Quand les Etats-Unis sont entrés en guerre contre le Japon en décembre 1941, Deming a proposé au ministère de la Défense d'organiser des stages à l'université de Stanford pour enseigner les méthodes de Shewhart aux ingénieurs et cadres des usines d'armement. Les cours ont commencé en 1942 et plusieurs milliers de personnes ont été formées au contrôle statistique de la qualité. En 1947, Shewhart et quelques-uns de ses collègues ont fondé l'*American Society for Quality Control* (ASQC), une association destinée à rassembler ces nouveaux spécialistes. En 2012, maintenant nommée *American Society for Quality* (ASQ), elle est toujours active ; son siège est à Milwaukee, Wisconsin.

¹ W. Edwards Deming *Out of the Crisis*, MIT Press Cambridge 1986, page 369.

² Walter A. Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, Van Nostrand 1931.

³ Walter A. Shewhart, *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control*, U.S. Department of Agriculture. Washington DC. 1939. Traduction française : *Les fondements de la maîtrise de la qualité*, Economica Paris 1989.

Les méthodes de Shewhart sont arrivées en France plus tardivement. En 1952, le Commissariat Général à la Productivité avait envoyé une mission aux Etats-Unis. Un membre de la mission, René Cavé, ingénieur en chef du Corps de l'Armement, a participé au congrès annuel de l'ASQC où il a découvert ces méthodes, qui étaient alors inconnues en France. A son retour, il a écrit un ouvrage⁴ qui les a fait connaître, mais il n'avait pas compris que le principe du « control chart » est d'induire une recherche de causes. C'est pourquoi il a présenté des méthodes qui ne pouvaient pas conduire à la stabilité du processus de production, demandée par Shewhart. Et comme en plus il ne parlait pas bien anglais, il a traduit ce terme par « carte de contrôle⁵ ». Son livre contenait de regrettables erreurs qui persistent encore aujourd'hui, mais il faut lui reconnaître le mérite d'avoir lancé un mouvement qui conduira en 1957 à la fondation de l'Association Française pour le Contrôle de la Qualité (AFCIQ).

Les méthodes de Shewhart sont arrivées au Japon en 1950 lorsque Deming a donné des conférences à Tokyo devant un auditoire de directeurs généraux. Il leur a expliqué l'importance des méthodes statistiques comme outil de management et mis l'accent sur la nécessité de les appliquer tout au long de la chaîne industrielle. Il répondait à une invitation de la *Japanese Union of Scientists and Engineers* (JUSE), association fondée en 1947 dont le but était de participer à la reconstruction de l'industrie japonaise par l'étude des techniques et des méthodes de management.

Ce manuel a été publié en 1956 par Western Electric pour un usage interne. Il n'a pas été mis en vente en librairie, mais on pouvait se le procurer auprès de la direction du personnel de la compagnie. Il a été réédité dix fois jusqu'en 1985, et c'est en 1987 que j'ai acheté un exemplaire de la dernière édition dont on trouvera ici la traduction. La compagnie Western Electric n'existe plus depuis 1985, car la Commission fédérale des communications, sous la présidence de Ronald Reagan, avait ordonné le démantèlement du groupe AT&T. C'est donc à l'adresse indiquée par Deming à ses lecteurs, le service commercial de AT&T Technologies à Indianapolis, que je l'ai commandé.

Le livre est maintenant introuvable, sauf chez quelques bouquinistes. La société américaine qui me l'a vendu a disparu à son tour en 1995. Elle a éclaté en trois sociétés faisant respectivement de la production, de l'informatique et du service. La première, Lucent Technologies, a été achetée par Alcatel en 2006. L'année suivante Alcatel-Lucent annonce de fortes suppressions d'emplois. La fusion des deux sociétés étant considérée comme un échec par les milieux financiers, leurs deux dirigeants démissionnent en 2008 avec une grosse indemnité de départ. En 2012, le groupe annonce à nouveau de fortes suppressions d'emplois. Qui se souvient encore de la grande aventure de Hawthorne Western Electric⁶ ?

Jean-Marie Gogue

Je remercie chaleureusement Philippe Pruvost dont les remarques judicieuses m'ont permis d'améliorer cette traduction.

⁴ René Cavé, *Le contrôle statistique des fabrications*, Eyrolles Paris 1953.

⁵ Le terme « carte de contrôle » peut faire penser à une carte qui sert à vérifier des informations, comme une carte d'identité. C'est tout le contraire d'un « control chart », qui sert à garder un processus sous contrôle.

⁶ C'est à Hawthorne, entre 1927 et 1932, qu'Elton Mayo a fait ses célèbres expériences sur le comportement des ouvriers, dans une étude qui est à l'origine de la sociologie du travail.

Préface du Comité de Rédaction

Ce livre n'est pas un traité de contrôle statistique de la qualité. Il ne cherche pas à discuter de la théorie du contrôle de la qualité ; il n'est pas fait non plus pour donner des exemples d'application du contrôle de la qualité. Il a principalement pour but de décrire des procédures qui, si elles sont suivies, tendront à préserver les aspects essentiels des programmes de contrôle de la qualité chez Western Electric. On peut le considérer en quelque sorte comme une collection des techniques et des méthodes qui se sont avérées les plus utiles pour le succès de ces programmes. Une grande partie des matériaux est basée sur les cours de formation qui ont été donnés au cours des six ou sept dernières années à des ingénieurs, des responsables d'atelier et des cadres de tout niveau du management.

Ce livre n'est pas écrit dans un langage technique ; nous n'avons pas cherché à écrire pour des statisticiens professionnels ou des mathématiciens. Les techniques qui sont décrites ici sont essentiellement celles qui sont utilisées dans tous les types d'industries depuis leur développement dans les années 20 par le Dr. Shewhart. Les traits les plus caractéristiques du programme de Western Electric sont peut-être : (a) l'accent qui est mis sur les applications à l'ingénierie et aux opérations plutôt qu'à l'inspection ; (b) l'accent qui est mis sur le graphique de contrôle, plus particulièrement sur l'étude de capacité du processus, fondement de tout le programme.

Le livre insiste aussi sur l'importance de l'équipe de contrôle de la qualité comme moyen de mise en œuvre des méthodes de contrôle de la qualité.

Sur certains sujets, tels que les plans d'expériences et la corrélation, il n'a pas été possible de donner plus qu'une brève discussion des principes et une explication sommaire de la terminologie. Nous avons pensé qu'il était préférable de le faire, même brièvement, plutôt que d'omettre ces sujets entièrement. Nous sommes volontairement restés concis sur les méthodes d'échantillonnage, en partie en raison de l'accent mis sur l'ingénierie et les opérations, et en partie parce que le sujet a été traité ailleurs de manière adéquate.

Une grande partie du livre est écrite dans la forme impérative pour faciliter son usage comme document de travail. Quand nous écrivons « *c'est ainsi qu'il faut prendre des échantillons* » ou « *c'est ainsi qu'il faut marquer les profils* », cela ne veut pas dire que c'est la seule façon de procéder.

Il faut aussi garder présent à l'esprit que ce livre ne prétend en aucune manière couvrir tout le champ du contrôle statistique de la qualité. Il décrit certaines procédures et certaines méthodes sur lesquelles la compagnie Western Electric a voulu mettre l'accent afin d'assurer les résultats attendus de ses programmes de contrôle de la qualité⁷.

Bonnie B. Small
Présidente du Comité de Rédaction

⁷ Quand Western Electric donnait des cours de formation aux ingénieurs et cadres, les graphiques de contrôle étaient encore tracés à la main. On peut maintenant le faire à la machine grâce à des outils qui se trouvent sur <http://www.fr-deming.org/logiciels.html>

Table des matières

Préface du traducteur	3
Préface du Comité de Rédaction	5

Première partie Principes fondamentaux

I. Définitions

1. Contrôle statistique de la qualité	13
2. Processus	13
3. Techniques essentielles du contrôle de la qualité	14

II. Introduction aux graphiques de contrôle

1. Phénomènes statistiques dans le monde qui nous entoure	15
2. Principales sortes de graphiques de contrôle	19
3. Graphique Xb et R	20
4. Graphique p et autres graphiques aux attributs	22
5. Graphique aux mesures individuelles	24
6. Tests pour les profils anormaux	26
7. Profils spéciaux	27
8. Interprétation des graphiques de contrôle	28

III. Eléments essentiels d'un programme de contrôle de la qualité

1. Etudes de capabilité du processus pour obtenir des informations et résoudre des problèmes	30
2. Graphiques de contrôle de processus pour assurer des résultats tangibles dans l'atelier	32
3. Réunions opérationnelles pour le contrôle de la qualité	33

Deuxième partie Applications à l'ingénierie

I. Etude de capabilité de processus

1. Base scientifique de l'étude de capabilité de processus	37
2. Obtention des données	39
3. Analyse des données	41
4. Estimation de la capabilité	44
5. Utilisation de l'information donnée par une étude de capabilité	45
6. Passage de l'étude de capabilité au graphique de contrôle d'atelier	46
7. Exemple d'une étude de capabilité de processus	48
8. Etude de performance	54

II. Plans d'expériences

1. Place des plans d'expériences dans une étude de capabilité	55
2. Comparaison de deux méthodes	57
3. Erreur de mesure	59
4. Expérience à quatre facteurs	62
5. Conclusion finale	66

III. Spécifications

1. Des spécifications en général	67
2. Relations entre le processus et la spécification	68
3. Comment éviter les conflits avec les spécifications	70
4. Addition statistique des tolérances	70

IV. Distributions

1. Caractéristiques des distributions de fréquences	73
2. Distributions obtenues à partir d'échantillons	75
3. Méthodes pour tracer une distribution	76
4. Applications pratiques	76

V. Corrélation

1. Méthodes graphiques pour étudier la corrélation	77
2. Droites de régression	78
3. Analyse de corrélation	79

VI. Profils des graphiques de contrôle

1. Théorie des graphiques de contrôle	81
2. Interprétation du graphique Xb	83
3. Interprétation du graphique R	84
4. Interprétation conjointe des graphiques Xb et R	84
5. Interprétation des graphiques aux attributs	85
6. Interprétation des graphiques aux mesures individuelles	86
7. Analyse des profils	87
8. Profil naturel	87
9. Cycles	87
10. Tendances	88
11. Changement graduel de niveau	89
12. Changement soudain de niveau	89
13. Bouquet de points	90
14. Instabilité	91
15. Mélange	92
16. Stratification	93
17. Profil bizarre	95

Troisième partie Applications à l'atelier

I. Graphiques de contrôle de processus

1. Planning des graphiques de contrôle	99
2. Procédures détaillées de mise en œuvre	103
3. Modifications des graphiques de contrôle	105

II. Introduction des graphiques dans l'atelier

1. Explications des graphiques au personnel	107
2. Avantages des graphiques de contrôle	108
3. Instructions pour le contrôleur de processus	109

III. Actions sur les graphiques de contrôle

1. Importance de la rapidité d'exécution	113
2. Action du contrôleur de processus	113
3. Actions des opérateurs	113
4. Action du chef d'atelier	114
5. Action de l'équipe de contrôle de la qualité	114

IV. L'équipe de contrôle de la qualité

1. Réunions régulières de l'équipe	117
2. Couverture du contrôle de la qualité	118
3. Rapports d'avancement	118
4. Réduction des coûts	119
5. Audit des graphiques de contrôle	119

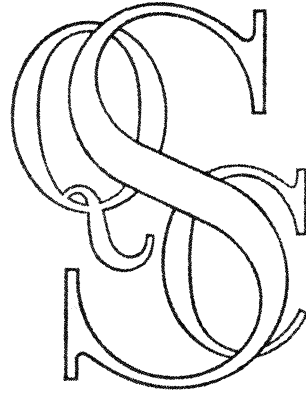
Quatrième partie Procédures d'inspection

I. Principes de l'inspection

1. Place de l'inspection dans un programme qualité	123
2. Tri et échantillonnage	124
3. Plans d'inspection	125

II. Acceptation par échantillonnage

1. Concepts élémentaires	127
2. Classification des plans d'échantillonnage	129
3. Plans d'échantillonnage par lots	130



Première partie

Principes fondamentaux

I

Définitions

1. Contrôle statistique de la qualité

Le mot "statistique" signifie que nous avons affaire à des nombres, et plus particulièrement que nous traitons des nombres pour en tirer des conclusions.

Le mot "qualité" ne signifie pas seulement qu'un produit est bon ou mauvais. Il concerne les *caractéristiques* d'un objet ou d'un processus qui est mis à l'étude.

Le mot "contrôle" signifie que nous gardons une chose entre certaines limites, ou que nous conduisons une chose à se comporter comme nous le voulons.

Quand ces trois mots sont mis ensemble, le contrôle statistique de la qualité, appliqué à une opération de fabrication, signifie que nous étudions les caractéristiques de notre processus afin qu'il se comporte comme nous le voulons.

Le mot "processus" qui est utilisé ici peut avoir plusieurs significations.

2. Processus

Un processus est un ensemble de conditions, ou un ensemble de causes, qui agissent ensemble pour produire un résultat donné. Sur un site de fabrication, nous pensons naturellement à des séries qui aboutissent, par exemple, à la production de câbles, de tubes électroniques, de relais, de commutateurs et d'autres équipements.

Toutefois, comme le mot "processus" signifie simplement un *système de causes*, un processus peut être beaucoup plus simple ou beaucoup plus complexe que ceux que nous venons d'évoquer. Le "processus" que nous choisirons d'étudier dans le contrôle statistique de la qualité pourra être :

- une machine ou un organe ;
- une personne, ou un simple geste fait par une personne ;
- un équipement de test ;
- une méthode de mesure ;
- une méthode d'assemblage ;
- une tâche administrative ;
- un groupe de machines ;
- un groupe de personnes (par exemple le personnel d'un atelier) ;
- une combinaison de personnes, de machines, de matériaux, de méthodes, etc. ;
- une méthode de fabrication, par exemple traitement chimique ;
- une activité mentale ;
- des éléments humains immatériels, par exemple attitudes, motivations et aptitudes ;
- etc.

Au sens le plus étroit du terme, un "processus" est l'action d'une seule cause. Au sens le plus large, c'est l'action d'un "système de causes" qui peut être très compliqué. C'est pourquoi il est possible de faire des "études de capabilité des processus" concernant pratiquement tous les types de problèmes d'ingénierie, de production, d'inspection ou de management.

3. Techniques essentielles du contrôle de la qualité

Dans les programmes de contrôle de la qualité dont la description est faite dans ce manuel, les techniques suivantes sont essentielles :

1. Etudes de capabilité des processus.
2. Graphiques de contrôle des processus.
3. Inspection statistique par échantillonnage.
4. Plan d'expérience statistique (souvent traité au moyen de graphiques de contrôle).

Le principal concept présenté dans ce manuel est celui du graphique de contrôle, qui consiste en une série de points représentant des observations ou des mesures sur des échantillons. La remarquable particularité d'un graphique de contrôle est son aptitude à mettre les données sous forme de profils qui, lorsqu'ils sont traités statistiquement, peuvent conduire à une information sur le processus.

L'étude de capabilité est utilisée par les contremaîtres, les ingénieurs et les cadres pour obtenir des informations sur le comportement d'un processus.

Les graphiques de contrôle sont utilisés dans les ateliers pour augmenter les rendements, réduire les rebuts et les réparations, et aider les gens à faire un meilleur travail.

L'inspection statistique par échantillonnage est utilisée par les inspecteurs comme une base scientifique pour accepter ou refuser des produits.

Le plan d'expérience est utilisé dans les problèmes de recherche et de développement pour étudier les effets simultanés de plusieurs variables et explorer l'inconnu d'un système de causes.

Ces quatre techniques sont décrites en détail dans les chapitres qui suivent.

II

Introduction aux graphiques de contrôle

1. Phénomènes statistiques dans le monde qui nous entoure

Si nous rassemblons des données pour résoudre un problème, pour comprendre une série d'évènements ou pour comprendre une situation dans une fabrication, nous voyons toujours des variations. Les nombres ne sont pas exactement les mêmes d'un point à l'autre ou d'un instant à l'autre ; ils montrent des différences. Si nous portons ces nombres sur une feuille de papier millimétré afin d'étudier les variations, nous voyons toujours un profil en zigzag. Les figures 1 à 4 montrent des exemples de profils⁸ fluctuants.

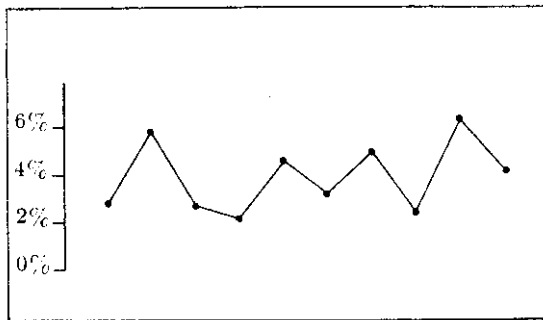


Figure 1. Pourcentage journalier de bobines mal assemblées.

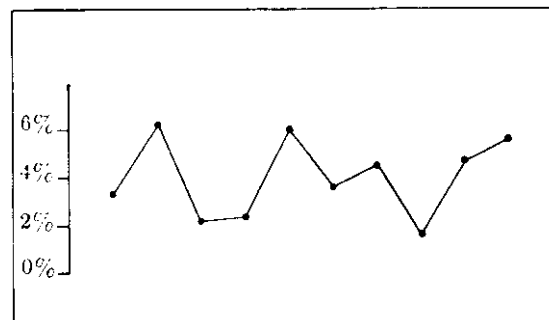


Figure 2. Pourcentage journalier de soudures mal centrées.

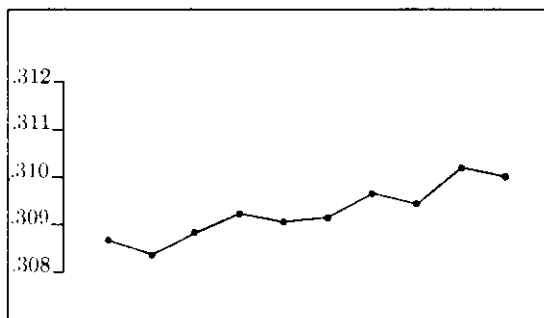


Figure 3. Pièces sortant successivement d'une machine à visser (diamètre).

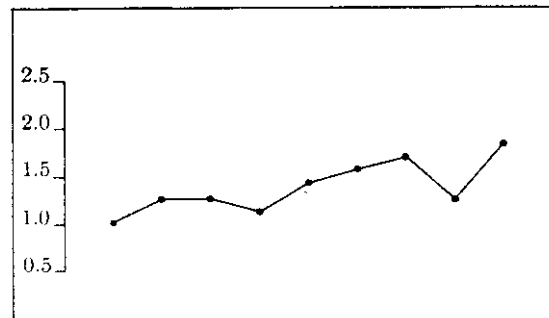


Figure 4. Mesures électriques sur une série d'unités assemblées (niveau de bruit).

Dans le premier cas, une ouvrière posait des têtes de bobines sur des noyaux magnétiques. Le contremaître a fait l'enregistrement du pourcentage journalier d'assemblages mal fixés par cette ouvrière. Il a trouvé qu'il variait ; ce n'était pas le même pourcentage tous les jours.

La figure 2 est un enregistrement obtenu sur une opération de soudage automatique. C'est une opération d'un type entièrement différent de celui de la figure 1. Elle implique différents

⁸ En anglais : patterns

matériaux, différentes machines, différentes ouvrières, différents problèmes. Quand le contremaître a enregistré le pourcentage journalier de soudures mal centrées, il a trouvé qu'il variait de la même manière que sur la figure 1. Ce n'était pas tous les jours le même pourcentage.

On a trouvé la même chose en portant sur un graphique les dimensions de pièces sortant successivement d'une machine de vissage (figure 3), ainsi que les caractéristiques électriques d'une série d'unités assemblées (figure 4). Toute série de nombres provenant d'un processus, quand ils sont mis à la suite les uns des autres, forme un profil fluctuant. Même des mesures répétées sur le même objet, heure après heure, jour après jour, ne seront pas exactement identiques.

Des variations semblables se trouvent sur les chiffres comptables, les chiffres de production, les chiffres d'absentéisme, les températures, les pressions, les rapports médicaux ou sur tout autre série de nombres provenant d'un processus industriel. On ne connaît pas d'entreprises dans lesquelles les variations n'existent pas.

Quelles sont les causes des fluctuations sur un profil ?

Les fluctuations dans les données sont causées par un grand nombre de variations rapides ou de différences : différences de matériaux, d'équipements, de conditions climatiques ou de réactions physiques et mentales des gens. La plupart de ces différences sont extrêmement faibles. Elles provoquent des fluctuations du profil qualifiées de "normales". Toutefois, une grande différence, plus importante que toutes les autres réunies, peut survenir. Par exemple une matière première a été prise dans un lot différent ; le régleur de la machine a changé le réglage, une ouvrière novice a pris la place d'une ouvrière expérimentée. Ce sont des causes qui font fluctuer le profil de manière "anormale".

L'expérience montre qu'il existe des différences visibles entre les profils "normaux" et "anormaux". Il est possible de les mettre en évidence et de les étudier au moyen de calculs basés sur des lois statistiques bien connues.

Quand on sait qu'un profil est anormal, il est possible d'aller plus loin et de trouver la cause de cette anomalie. Ainsi, il est possible de détecter, d'identifier et d'étudier le comportement des *causes*.

Distributions

Les fluctuations ne sont pas les seuls phénomènes statistiques observables dans la nature. On sait depuis longtemps que si l'on prend un grand nombre d'observations sur une grandeur physique, ou un grand nombre de mesures sur un produit industriel, elles tendent à se grouper autour d'une valeur centrale avec une certaine dispersion d'un côté à l'autre. La figure formée par ces mesures est une "distribution de fréquences". On observe que si les causes de la dispersion ne changent pas, la distribution a tendance à prendre une forme caractéristique, d'autant plus précise que le nombre d'observations ou de mesures est grand. Il faut en conclure que si le système de causes est constant, la distribution observée tend à se rapprocher d'une "loi de distribution". Parmi les lois de la nature, c'est l'une des plus fondamentales.

L'expérience nous apprend que ces deux phénomènes : les fluctuations et les distributions, dépendent l'un de l'autre. Il en résulte qu'on peut utiliser des limites statistiques calculées à partir des distributions pour prévoir le comportement d'un profil normal.

Donc on peut dire que lorsque des résultats de mesure proviennent d'un système de causes déterminé, ils ne sont généralement pas identiques. Ils varient de manière "aléatoire". Néanmoins, si le processus n'est pas perturbé, ces mesures fluctuantes resteront entre des

limites mathématiques. Quand ces mesures sont accumulées, elles tendent à former une distribution prévisible.

Ces deux concepts ont été développés en détail par Shewhart.

Limites statistiques pour des profils fluctuants

En utilisant certaines équations établies à partir de lois statistiques, il est possible de calculer des "limites" pour un profil donné. Si un profil est anormal, ses fluctuations seront en désaccord avec les limites. Voici deux exemples de calcul de limites statistiques.

(1) *Limites statistiques pour le graphique sur l'opération des têtes de bobines (figure 1).*

1. On prend le pourcentage moyen de bobines mal assemblées pendant la période observée. Dans ce cas, il était de 4%.
2. On prend le nombre journalier moyen de bobines assemblées. Dans ce cas, il était de 400
3. On porte ces deux nombres dans l'équation pour le calcul des limites du graphique *p*.

Les limites trouvées sont 2,94 % de chaque côté de la moyenne, soit 1,06 % et 6,94 %.

(2) *Limites statistiques pour le graphique sur l'opération de soudage (figure 2).*

Le pourcentage moyen de soudures mal centrées était de 4 % ; le nombre journalier moyen de soudures était de 1 000. La même équation donne un résultat de 2,14 % pour la limite inférieure et 5,86 % pour la limite supérieure.

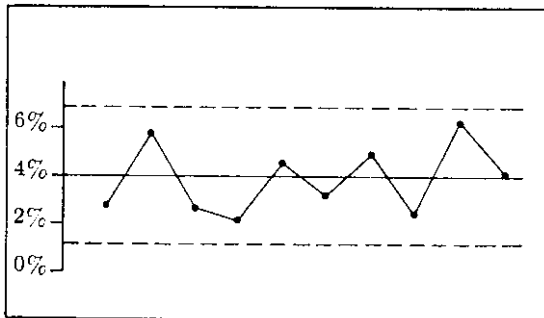


Figure 5. Graphique de contrôle des bobines.

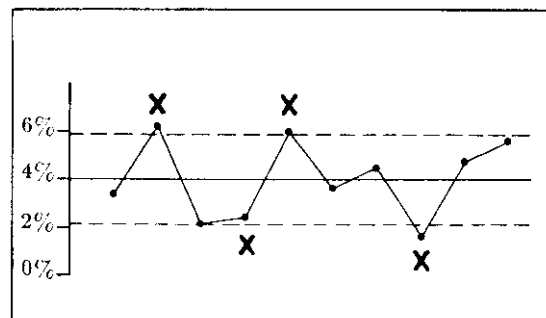


Figure 6. Graphique de contrôle des soudures.

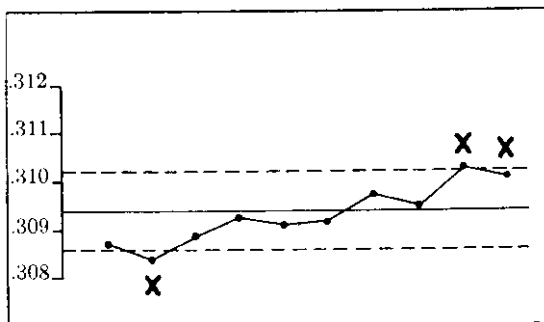


Figure 7. Graphique de contrôle du vissage.

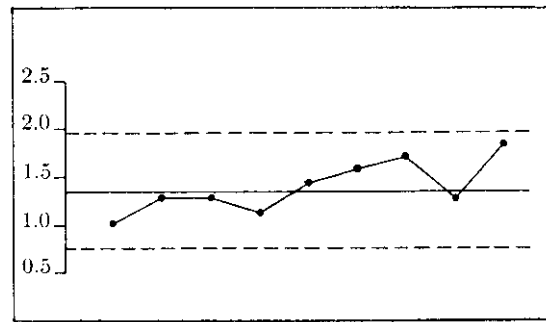


Figure 8. Graphique de contrôle des unités assemblées.

(3) *Limites statistiques pour les graphiques sur les deux autres opérations.*

Les données étant d'un type différent du précédent, on utilise l'équation pour le calcul des limites des mesures individuelles.

Quand on ajoute des limites statistiques à un profil fluctuant, le résultat se nomme "graphique de contrôle". C'est l'un des moyens les plus sensibles que l'on connaisse pour analyser des données et obtenir des informations (Figures 5 à 8).

Sens d'un graphique de contrôle

Les limites de contrôle⁹ servent à déterminer si un profil est normal ou anormal. On utilise la procédure suivante :

1. Vérifier si le profil est en conflit avec les limites de contrôle. C'est le cas lorsque (1) il déborde des limites, et (2) il comporte des amas de points à l'intérieur des limites.
2. Marquer d'un X chaque point anormal ou amas anormal.
3. Si le profil n'est pas en conflit avec les limites, on le considère comme "normal" et l'on dit que le processus est "sous contrôle".
4. Si le profil est en conflit avec les limites, on le considère comme "anormal" et l'on dit que le processus est "hors contrôle".

Quand le profil est anormal, cela signifie que le processus est affecté par des perturbations extérieures. Les personnes qui connaissent le processus doivent chercher quelles sont ces perturbations extérieures.

Sur la plupart des graphiques de contrôle, nous préférons avoir des séries plus longues que celles des figures 5 à 8. Dans les discussions qui suivent, ces graphiques seront considérés comme des portions d'un graphique plus complet.

On notera que les processus des figures 5 et 8 sont sous contrôle et que les processus des figures 6 et 7 sont hors contrôle. En l'absence de limites de contrôle, les figures 5 et 6 seraient très semblables, mais tout change avec les limites de contrôle. D'où ce principe fondamental du contrôle statistique de la qualité :

Pour interpréter les données correctement, il faut (a) un profil et (b) des limites de contrôle.

La confiance accordée aux graphiques de contrôle est fondée sur l'expérience

Personne n'est obligé d'accepter en toute confiance la preuve donnée par un graphique de contrôle. Il est toujours possible de faire une étude pour voir si le graphique est correct. Par exemple, quand les responsables de l'opération de soudage (figure 6) ont vérifié soigneusement tous les éléments du processus, ils ont été surpris de trouver que la régulation du voltage marchait mal et qu'un technicien de maintenance ne fixait pas les électrodes correctement. Quand ces deux problèmes ont été réglés, le processus est passé sous contrôle. Le graphique avait révélé la présence de "causes" dont les gens n'avaient pas conscience.

Ceci est arrivé des centaines de fois dans les ateliers et les laboratoires. Jour après jour, graphique après graphique, l'expérience prouve que le graphique était correct. En outre le management est directement intéressé par le fait que lorsqu'un grand nombre de personnes dans une usine commencent à travailler régulièrement avec les graphiques de contrôle, en suivant leurs indications, l'usine commence invariablement à montrer quelques résultats remarquables :

⁹ Ce sont les limites de contrôle dites "à trois sigma".

- Les coûts diminuent.
- La qualité et les rendements s'améliorent rapidement.
- Les rebuts et les réparations diminuent
- Les problèmes relatifs aux spécifications et aux demandes des clients sont facilement résolus.

2. Principales sortes de graphiques de contrôle

Les graphiques de contrôle des figures 5 à 8 étaient basés sur des pourcentages ou sur des mesures individuelles. Toutefois, des limites de contrôle peuvent être appliquées facilement à tout autre forme de données. Certaines sortes de données sont plus sensibles que d'autres pour détecter les causes qui perturbent le processus. Voici les sortes de graphiques les plus courants, classés par ordre de sensibilité décroissante :

1. Etendue (différence entre la plus forte et la plus faible valeur d'un petit groupe de mesures).
2. Moyenne (spécialement de petits groupes de mesures).
3. Pourcentage (comme dans les graphiques pour les bobines et les soudures).
4. Mesures individuelles (température, pression, composition chimique, etc.)

Les graphiques de l'étendue et de la moyenne, qui sont les plus sensibles, sont mis ensemble pour former le "graphique Xb et R ". Ce graphique double est le plus sensible de tous les graphiques pour diagnostiquer des problèmes en production. Puis viennent le "graphique p " pour les pourcentages, et le "graphique mR " pour les mesures individuelles.

Graphique Xb et R

On le nomme aussi "graphique moyenne et étendue". Xb est la moyenne¹⁰ d'un petit échantillon et se prononce "X-barre". R est l'étendue¹¹ du même échantillon. Sur le graphique, les points vont par paires, un pour la moyenne et un pour l'étendue.

Il faut lire le graphique R en premier, car il permet d'identifier directement certaines causes. On lit ensuite le graphique Xb qui permet d'identifier d'autres causes. Les causes qui affectent les deux graphiques sont généralement différentes.

Graphique p

On le nomme aussi "graphique des pourcentages" ou "graphiques aux attributs". Il s'agit souvent d'un pourcentage de pièces défectueuses. Il est moins sensible que le précédent, car il n'a qu'un profil. Il concerne davantage que le précédent la connaissance du métier. Par conséquent il est utilisé surtout dans les situations où les causes importantes sont déjà connues.

Graphique aux mesures individuelles

Ce graphique est utilisé pour des nombres avec lesquels on peut difficilement former des échantillons. Le calcul des limites de contrôle est basé sur les "étendues mobiles" qui sont les valeurs absolues des différences entre les nombres pris successivement deux à deux. C'est un graphique moins sensible que le précédent, mais il présente les mêmes profils et on l'interprète de la même manière.

¹⁰ NdT. Le clavier d'ordinateur ne comportant pas le symbole habituel de la moyenne, c'est-à-dire la lettre X surmontée d'une barre, je l'ai remplacé ici par le symbole Xb .

¹¹ En anglais : range.

3. Graphique Xb et R

Pour tracer ce graphique, il est nécessaire que les mesures soient des variables continues, par exemple des longueurs, des diamètres, des résistances, etc.

Définitions et symboles

Les symboles utilisés pour ce graphique sont les suivants :

X = valeur individuelle

n = nombre d'observations dans un groupe, souvent nommé "taille de l'échantillon". Ce nombre peut être égal à 2, 3, 4, 5, mais rarement monter jusqu'à 10

Xb = moyenne d'un échantillon de n mesures

Xdb = moyenne d'une série de Xb

R = étendue d'un échantillon de n mesures

A_2 = facteur utilisé pour calculer les limites de contrôle pour le graphique Xb

D_3 = facteur utilisé pour calculer la limite inférieure de contrôle du graphique R

D_4 = facteur utilisé pour calculer la limite supérieure de contrôle du graphique R

Les facteurs A_2 , D_3 et D_4 varient avec la taille de l'échantillon. Sélectionnez les facteurs appropriés dans le tableau suivant :

n	A_2	D_3	D_4
2	1,88	0,00	3,27
3	1,02	0,00	2,57
4	0,73	0,00	2,28
5	0,58	0,00	2,11
6	0,48	0,00	2,00
7	0,42	0,08	1,92
8	0,37	0,14	1,86
9	0,34	0,18	1,82

Instructions pour faire un graphique Xb et R

Toujours faire le graphique R avant le graphique Xb . Vous devez procéder ainsi :

Graphique R

1. Choisir la taille de l'échantillon.
2. Obtenir une série de groupes contenant chacun n mesures. Il en faut au moins 20, plus si possible, mais pas moins de 10.
3. Calculer R pour chaque échantillon et faire la moyenne des R . C'est la ligne centrale du graphique R .
4. Multiplier la moyenne des R par D_3 et D_4 pour obtenir les limites de contrôle inférieure et supérieure du graphique R .
5. Prendre une feuille de papier millimétré et mettre une échelle appropriée en bas de la feuille comme on le verra sur les figures 9 et 10.
6. Mettre les points correspondants aux valeurs successives de R et les relier par des traits continus.

7. Marquer les X suivant les règles qui définissent un profil anormal.
8. Interpréter le graphique.

Graphique Xb

1. Utiliser exactement les mêmes groupes de mesure que pour le graphique R .
2. Calculer Xb pour chaque groupe et calculer la moyenne des Xb . C'est la ligne centrale du graphique Xb .
3. Multiplier la moyenne des R par A_2 pour obtenir l'écart des limites de contrôle du graphique Xb par rapport à la ligne centrale.
4. Mettre une échelle appropriée en haut de la feuille de papier millimétré.
5. Mettre les points correspondants aux valeurs successives de Xb , chaque point étant à la verticale du point correspondant du graphique R et les relier par des traits continus.
6. Marquer les X suivant les règles qui définissent un profil anormal.
7. Interpréter le graphique.

Exemple d'utilisation d'un graphique Xb et R

Un atelier avait un problème pour obtenir une largeur spécifiée sur une pièce. L'ingénieur a décidé de prendre un échantillon et de s'en servir pour tracer une distribution de fréquences. Elle lui a permis de voir des pièces hors tolérances des deux côtés. Aucune solution n'étant en vue, l'ingénieur a fait une autre tentative. Les pièces étaient produites par deux machines supposées fonctionner de la même façon. Il a décidé de prendre un échantillon sur chaque machine. Les deux distributions de fréquences étaient semblables à la précédente. C'est alors qu'il a décidé de construire un graphique Xb et R pour chacune des deux machines.

Ces graphiques ont montré immédiatement qu'il y avait une différence entre les deux machines. La machine N° 1 avait un profil large sur son graphique R (figure 9) et le profil était hors contrôle. Cela voulait dire que la machine ne marchait pas régulièrement. Il fallait la réparer.

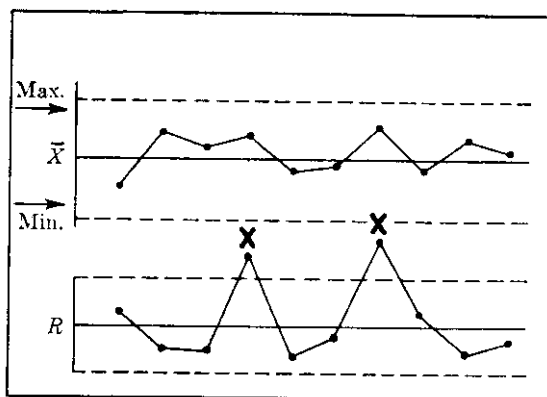


Figure 9. Graphique Xb et R pour la machine N° 1

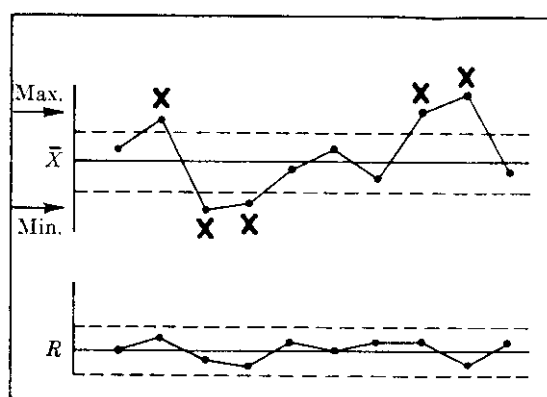


Figure 10. Graphique Xb et R pour la machine N° 2

Quand le service de maintenance a vérifié la machine N° 1, on a trouvé un palier usé. Quand on l'a remplacé, le graphique R est devenu beaucoup plus étroit et les produits sont restés dans les tolérances spécifiées.

La cause du problème sur la machine N° 2 était entièrement différente. Elle avait été bien réparée, comme le montre son graphique R (figure 10) mais le centre de la distribution se

déplaçait en permanence, ce qui explique que le profil Xb était hors contrôle. Les réglages étaient sans doute mauvais ou bien ils changeaient trop souvent. Quand le régleur a reçu pour instruction de ne plus régler la machine sur la base d'une ou deux mesures et d'utiliser un graphique de contrôle, le problème a disparu.

Remarques sur le graphique Xb et R

1. En étudiant les graphiques moyenne et étendue ensemble, il est possible de savoir si la distribution est symétrique ou non.
2. En étudiant les graphiques moyenne et étendue ensemble, il est possible de dire si le produit est capable d'être conforme à une spécification.
3. Il ne faut pas confondre les limites de contrôle du graphique Xb avec les limites spécifiées qui se trouvent habituellement sur les plans de fabrication. Les limites de contrôle sont des limites naturelles du processus, qui sont déterminées par un calcul à partir du processus lui-même. Les limites qui se trouvent sur un plan sont artificielles. Elles peuvent avoir un lien raisonnable ou non avec les limites naturelles du processus. L'un des buts du graphique de contrôle est de comparer les limites naturelles avec les limites spécifiées.
4. Les limites de contrôle d'un graphique Xb sont pour des moyennes, alors que les limites spécifiées sur un plan sont pour des objets individuels.
5. Les données utilisées pour construire un graphique Xb et R peuvent aussi être utilisées pour construire un graphique aux mesures individuelles ou une distribution de fréquences. Ces deux méthodes peuvent donner des informations complémentaires, mais ne remplacent pas la première.

4. Graphique p et autres graphiques aux attributs

Le graphique p ne fait pas appel à des mesures physiques comme des épaisseurs ou des résistances électriques. Il suffit de compter des pièces hors tolérances ou abîmées et de traduire ce nombre en pourcentage. Ce type de mesure se nomme *mesure par attributs*.

Le graphique p est utilisé quand il est difficile ou trop coûteux de faire des mesures physiques, ou quand on veut combiner plusieurs types de défauts dans un pourcentage global. Toutefois, si plusieurs caractéristiques sont combinées sur un seul graphique de contrôle, le graphique p devient progressivement plus difficile à interpréter.

Définitions et symboles

Les symboles utilisés pour ce graphique sont les suivants :

n = nombre d'unités dans un échantillon

p = proportion d'unités défectueuses dans un échantillon

pb = proportion moyenne d'unités défectueuses dans une série d'échantillons

Instructions pour faire un graphique p

Vous devez procéder ainsi :

1. Obtenir une série d'échantillons de taille adéquate. 50 et 100 sont des tailles convenables. Si tout le lot a été vérifié, l'échantillon sera le lot lui-même. Il faut avoir au moins 20 groupes, si possible, mais pas moins de 10.

2. Calculer pb . C'est la ligne centrale du graphique p .
3. Calculer les limites de contrôle du graphique p en utilisant les formules ci-dessous.
4. Choisir une échelle adéquate et préparer le graphique sur une feuille de papier millimétré.
5. Mettre les points correspondants aux valeurs successives de p et les relier par des traits continus.
6. Marquer les X suivant les règles qui définissent un profil anormal.
7. Interpréter le graphique (Figure 11).

Les formules pour calculer les limites de contrôle sont les suivantes :

$$\text{Limite supérieure} = pb + 3 \sqrt{pb(1-pb)/n}$$

$$\text{Limite inférieure} = pb - 3 \sqrt{pb(1-pb)/n}$$

Valeur moyenne de n

Si les échantillons utilisés pour un graphique p n'ont pas tous la même taille, on peut utiliser la *taille moyenne d'échantillon* dans le calcul des limites de contrôle. Dans ce cas, la taille du plus grand échantillon ne doit pas être supérieur au double la taille moyenne, et celle du plus petit échantillon ne doit pas être inférieure à la moitié de la taille moyenne. Mais il est préférable d'éviter ce problème en faisant que la taille d'un échantillon soit constante.

Exemple d'utilisation d'un graphique p

Dans la fabrication d'un relais, 24 contacts en palladium sont soudés à l'extrémité de 24 ressorts. L'une des caractéristiques demandées est le bon emplacement des contacts sur les ressorts. La tolérance spécifiée pour le décentrement des contacts donne un maximum de 0,25 mm. La machine de soudage automatique qui fait cette opération a deux têtes de soudage : la première pour les contacts de nombre impair et la seconde pour les contacts de nombre pair.

Dans le processus de test de la machine, on a fait un graphique p pour chaque tête. Au bout de quatre jours, les graphiques indiquaient 10 % de soudures défectueuses pour la première tête et 22 % pour la seconde tête, dont le profil était hors contrôle.

Une étude a été faite sur les mécanismes d'alimentation et de guidage des deux têtes. Les modifications apportées ont réduit le pourcentage de défectueux des deux têtes à 3 % et ont mis leurs profils sous contrôle.

Le processus a été poursuivi à ce niveau, et les graphiques p ont continué à être utilisés sur une base d'inspection unitaire. On a observé de temps en temps des points hors contrôle dont on a trouvé la cause. De nouvelles modifications ont stabilisé le processus à une moyenne de 0,5 % de défectueux. Le département d'assemblage a jugé que c'était un niveau acceptable.

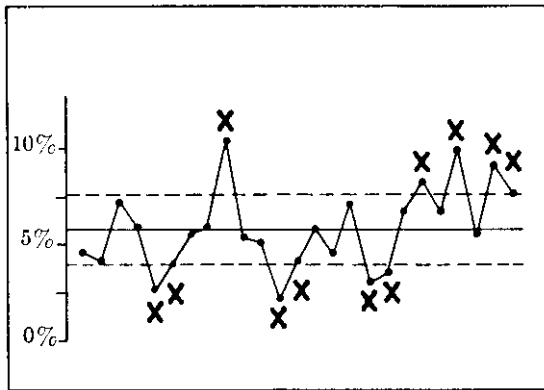


Figure 11. Exemple de graphique p

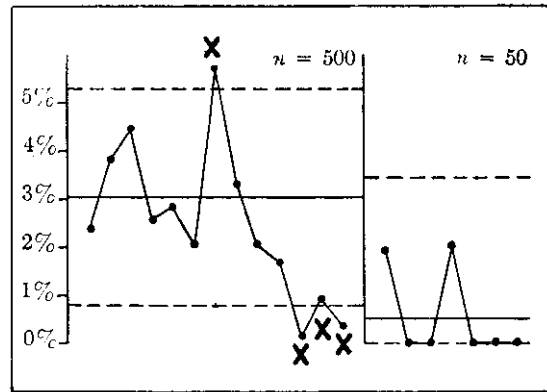


Figure 12. Amélioration résultant d'un graphique p

On a continué à utiliser les graphiques p avec un échantillonnage réduit. La figure 12 fait apparaître la réduction du pourcentage de défectueux apporté par l'utilisation efficace de graphiques p .

Remarques sur le graphique p

1. Quand le calcul donne une limite inférieure de contrôle inférieure à zéro, il faut la mettre à zéro sur le graphique p .
2. Sur l'échelle verticale d'un graphique p , il est permis de mettre des valeurs décimales ou des pourcentages. Dans un atelier, il est souvent préférable de mettre des pourcentages.
3. Toutefois, quand on calcule les limites de contrôle, il faut toujours utiliser les valeurs décimales de p . Les limites sont converties en pourcentage une fois que le calcul a été fait.
4. Il existe trois autres sortes de graphiques aux attributs. (1) le graphique np donne le nombre de défectueux à la place du pourcentage. Il est nécessaire pour cela que tous les échantillons aient la même taille. (2) Le graphique c donne le nombre de défauts au lieu du nombre de défectueux. Il est préférable de l'utiliser quand des pièces contiennent plusieurs défauts. La possibilité de défauts est théoriquement infinie. (3) Le graphique u donne le nombre moyen de défauts par unité dans un échantillon de n unités. Les formules de calcul de la moyenne et des limites de contrôle sont particulières, mais le marquage et l'interprétation sont les mêmes que pour le graphique p .

5. Graphique aux mesures individuelles

Ce graphique est utilisé pour de nombreuses sortes de données, principalement :

- a. Les données comptables comme les quantités expédiées, les rendements, les taux d'absentéisme, les pertes de marchandises, les taux d'inspection, les coûts de maintenance, les taux d'accidents, les jours de maladie, etc.
- b. Les données de production comme les températures, les pressions, les voltages, l'humidité, la conductivité, la composition des gaz, les résultats d'analyse chimique, etc.

Définitions et symboles

Le seul nouveau symbole est mR , abréviation de "moving Range" (étendue mobile). C'est la valeur absolue de la différence entre les paires successives de nombres dans une série de nombres. Donc on fait la différence entre le premier et le second, puis entre le second et le troisième, puis entre le troisième et le quatrième, etc. Donc chaque nombre intervient dans deux étendues mobiles, et la quantité d'étendues mobiles est égale à la quantité de nombres moins un.

Instructions pour faire un graphique aux mesures individuelles

Les limites sont calculées à partir des étendues mobiles. Pour faire ce graphique, il faut procéder ainsi :

1. Saisir d'abord une série de nombres individuels. Il en faut au moins 20 si possible, mais pas moins de 10.
2. Calculer la différence entre le premier nombre et le second, entre le second et le troisième et ainsi de suite jusqu'au dernier. Ce sont les étendues mobiles mR . Mettre partout un signe plus.
3. Calculer la moyenne Xb des nombres de la série. C'est la ligne centrale du graphique.
4. Calculer la moyenne mRb des étendues mobiles calculées à la deuxième étape. Ne pas oublier que leur nombre est $n - 1$.
5. Multiplier mRb par 2,66 (un facteur constant). Le nombre obtenu donne la position des limites de contrôle par rapport à la moyenne : $Xb \pm 2,66 mRb$
6. Choisir une échelle adéquate et préparer le graphique sur une feuille de papier millimétré.
7. Mettre les points des mesures individuelles et les relier par des traits continus.
8. Marquer les X suivant les règles qui définissent un profil anormal.
9. Interpréter le graphique.

Les figures 13 et 14 sont deux exemples de graphiques aux mesures individuelles.

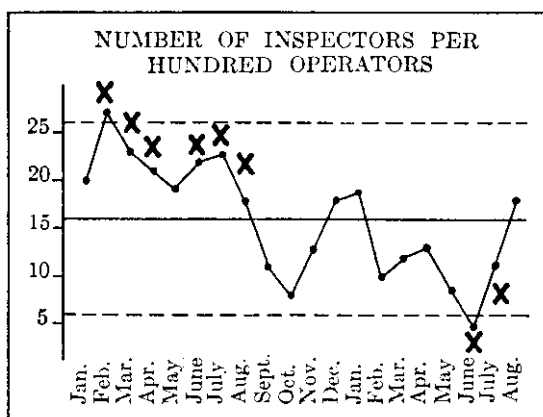


Figure 13. Graphique pour des taux d'inspection

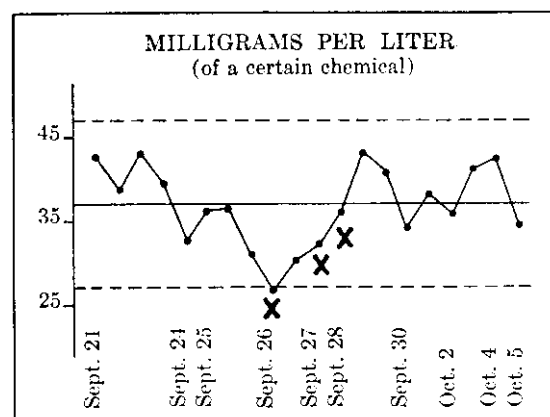


Figure 14. Graphique pour des analyses chimiques

6. Tests pour les profils anormaux

Les points portés sur un graphique de contrôle forment un profil irrégulier qui peut être classifié en "normal" ou "anormal". L'aptitude à interpréter le graphique de contrôle dépend de l'aptitude à faire cette classification.

Les tests qui vont suivre sont enseignés dans toutes les classes de formation de Western Electric. Ils impliquent (a) une vérification visuelle sur chaque point pour voir si le profil est normal ou non, et (b) le marquage de chaque point qui réagit à cette vérification. Ces tests doivent être mémorisés et pratiqués par l'utilisateur jusqu'à ce qu'ils soient appliqués automatiquement à la simple vue d'un profil. *Tous les graphiques de contrôle doivent être marqués automatiquement avec des X dès qu'ils ont été tracés.*

Un graphique de contrôle est essentiellement une image de la distribution d'un échantillonnage. Un exemple est donné figure 15. Si les points étaient mis à une extrémité du graphique, ils formeraient une distribution comme sur la figure 16.

Les connaissances théoriques et pratiques sur les distributions d'échantillonnages sont très nombreuses. On en déduit les caractéristiques des profils normaux et anormaux.

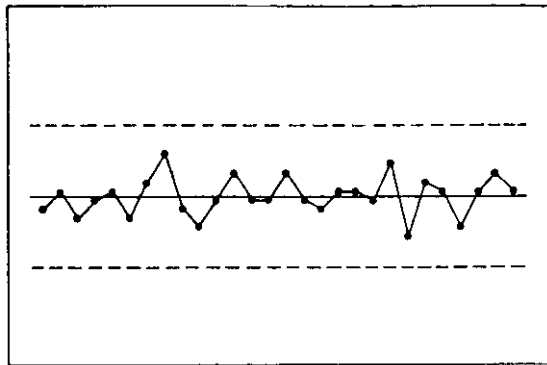


Figure 15. Profil typique d'un graphique de contrôle

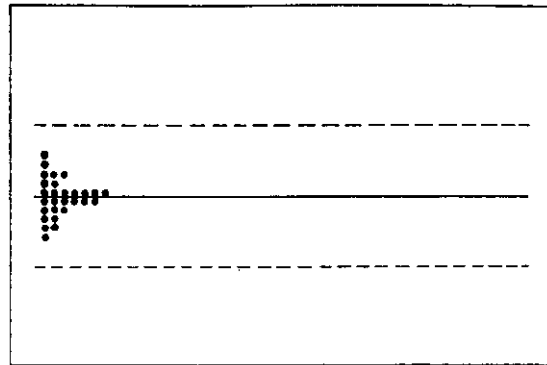


Figure 16. Distribution des points du graphique

Caractéristiques d'un profil normal

La première caractéristique d'un profil normal est que ses points fluctuent suivant les lois du hasard. En conséquence, il n'y a pas d'ordre reconnaissable. De plus, étant donné que les valeurs d'une distribution tendent à se grouper près du centre, il est naturel que la plupart des points du graphique de contrôle soient proches de la ligne centrale et s'équilibrent de part et d'autre. Enfin, la plupart des distributions ayant des "queues" jusqu'à ± 3 sigma, il est naturel qu'un point du graphique s'approche parfois d'une limite à trois sigma.

Un profil naturel doit posséder simultanément ces trois caractéristiques. Le profil est jugé anormal si l'une d'elles est manquante.

Caractéristiques d'un profil anormal

Les profils anormaux tendent à faire apparaître soit de grandes fluctuations, soit un déséquilibre de points de part et d'autre de la ligne centrale. On peut assez souvent les reconnaître d'un simple coup d'œil. Cependant, quand des tests formels sont disponibles, l'interprétation des profils a pour base le calcul des probabilités ; elle repose donc sur une base scientifique. Les tests ci-dessous peuvent être appliqués à tous les types de graphiques de contrôle et chacun sera capable de les interpréter de la même façon.

Tests d'instabilité

Les tests d'instabilité sont les plus importants. Leur but est de déterminer si le système de causes a changé. Si nous considérons mentalement la surface comprise entre la ligne centrale et l'une des limites de contrôle, nous pouvons la diviser en trois parties égales, chacune ayant pour hauteur un sigma. Ceci définit la "zone à trois sigma", la "zone à deux sigma", et la "zone à un sigma". Le profil est jugé anormal dans chacun des cas qui vont suivre.

Règles de Western Electric

1. Un point unique tombe à l'extérieur de la zone à trois sigma. Il faut le marquer d'un X (parce qu'il a réagi au test).
2. Deux points parmi trois points successifs tombent en dehors de la zone à deux sigma. Il faut marquer d'un X le second (parce que c'est lui qui a réagi au test).
3. Quatre points parmi cinq points successifs tombent en dehors de la zone à un sigma. Il faut marquer d'un X le dernier (parce que c'est lui qui a réagi au test).
4. Huit points successifs tombent dans la zone à un sigma. Il faut marquer d'un X tous les huit.

Les mêmes tests d'instabilité s'appliquent de chaque côté de la ligne centrale, mais s'appliquent séparément. Par exemple deux points ne comptent pas dans la règle 2 si l'un est au-dessus de la ligne centrale et l'autre au-dessous.

7. Profils spéciaux

Les profils ci-dessous s'ajoutent aux profils d'instabilité. L'aptitude à les reconnaître augmente considérablement l'efficacité du graphique de contrôle, car elle étend le champ des interprétations. Ils sont différents des profils d'instabilité parce que les six zones du graphique qui ont été définies précédemment sont observées globalement.

(1) Stratification

Si les variations du profil sont très faibles en comparaison de l'intervalle entre les limites de contrôle, le graphique indique une stratification des échantillons. Cela signifie que l'échantillonnage est fait systématiquement en sorte que deux distributions ou plus sont représentées.

(2) Mélange

Si le profil fait apparaître une tendance à éviter la ligne centrale, avec trop de points près des limites de contrôle, c'est l'indication d'un mélange. On peut considérer qu'il y a mélange quand 8 points se succèdent de part et d'autre de la ligne centrale sans jamais tomber dans une zone à un sigma.

(3) Variable systématique

La présence d'une variable systématique dans le processus est indiquée par une longue série régulière de points, alternativement placés au-dessus et au-dessous de la ligne centrale.

(4) Couplage de deux graphiques

Deux variables d'origine différente sont vraisemblablement liées l'une à l'autre quand une longue série de points de leurs profils respectifs se déplacent de haut en bas à l'unisson.

(5) Tendance

Une tendance est généralement indiquée sur un graphique par une longue série de points qui ne changent pas de direction.

8. Interprétation des graphiques de contrôle

Sens du graphique R

Ne pas oublier que le graphique R traduit *l'uniformité et la cohérence*. Si le graphique R est étroit, c'est que le produit est uniforme. S'il est large, c'est qu'il ne l'est pas. Si le graphique R est hors contrôle, le processus contient quelque chose qui ne fonctionne pas régulièrement. L'uniformité du produit est améliorée par une bonne maintenance des machines et une bonne formation des opérateurs.

Sens du graphique Xb

Ne pas oublier que le graphique Xb traduit le fait que le processus est centré. Si le graphique Xb est normal, le centre du processus ne dérive pas. Si le graphique Xb fait apparaître une tendance, c'est que le centre du processus dérive graduellement. Si le graphique Xb est hors contrôle, c'est que le centre du processus change rapidement et de façon irrégulière.

Les processus sont habituellement centrés par :

- le réglage des machines ;
- les caractéristiques des matériaux utilisés ;
- les techniques pratiquées par les opérateurs.

Sens du graphique p

Ne pas oublier que le graphique p traduit une proportion. Quand le profil change sur un graphique p , cela veut dire que la proportion a changé. Un changement de niveau peut signifier que (a) le pourcentage de produits défectueux a augmenté ou diminué, ou que (b) la définition d'un "produit défectueux" n'est plus la même.

Si le graphique p est irrégulier, il faut chercher les causes qui vont et viennent par intermittences. Les causes les plus habituelles sont une mauvaise formation des opérateurs et un mauvais contrôle des pièces détachées.

Sens du graphique aux mesures individuelles

Sur un graphique aux mesures individuelles, il faut d'abord chercher des tendances. Ensuite, il faut regarder si les fluctuations deviennent plus étroites ou plus larges. Les fluctuations montrent l'uniformité et la cohérence du processus de la même manière que sur un graphique R .

Conclusion

On peut poursuivre l'interprétation des graphiques de contrôle aussi loin que l'on veut. Toutefois, les idées les plus importantes sont très simples et chacun peut apprendre à faire sa propre interprétation après avoir regardé seulement quelques graphiques de contrôle. Les ingénieurs et les contremaîtres qui ont compris les principes passés en revue dans ce chapitre seront capables de faire un usage efficace de ces graphiques dans une grande variété de problèmes.

III

Eléments essentiels d'un programme de contrôle de la qualité

Introduction

Il est assez commun de voir des graphiques de contrôle utilisés pour résoudre des problèmes isolés : par exemple, pour déterminer la capacité d'une machine particulière ; pour encourager les opérateurs d'un secteur donné à être plus soigneux ; pour résoudre une difficulté particulière concernant les spécifications de l'ingénierie, etc. De telles utilisations des graphiques de contrôle sont appelées *applications du contrôle de la qualité*, mais elles ne constituent pas un *programme de contrôle de la qualité*. Un "programme" implique l'application régulière, systématique et continue des graphiques (et d'autres techniques associées) à des problèmes dans un secteur donné, dès qu'ils surviennent. Le programme commence habituellement avec des problèmes d'atelier et de bureau d'études et s'étend plus tard à des domaines extérieurs à l'ingénierie et à la fabrication, par exemple le domaine de l'*inspection* ou du *management*. Un programme de contrôle de la qualité demande (a) une compréhension des techniques statistiques, (b) un plan de développement et (c) une série d'étapes systématiques pour mettre en œuvre le plan. Alors que les détails du planning peuvent varier d'un endroit à un autre, le schéma de développement de Western Electric comprend généralement les points suivants :

1. Le management sélectionne un certain domaine (un atelier, un type de produit, un groupe d'opérations, etc.) pour y commencer le travail.
2. Un programme de formation est conduit pour que tous les ingénieurs et les contremaîtres, ainsi que tous les membres du management, se familiarisent avec les fondamentaux des graphiques de contrôle.
3. Le management fournit un ou plusieurs ingénieurs qualité, formés non seulement pour utiliser des graphiques, mais aussi pour aider d'autres personnes à les utiliser efficacement.
4. Le management constitue une ou plusieurs "équipes de contrôle de la qualité", formées d'un ingénieur produit, d'un contremaître et d'un ingénieur qualité. L'équipe est responsable de toutes les applications dans son secteur.
5. Le management fixe un but vers lequel l'équipe dirigera ses efforts. Le but pourra être : (a) une réduction des coûts, (b) une amélioration de la qualité, (c) une réduction des rebuts, des réparations, du temps de réparation, etc., (d) l'élimination de "bouchons" et d'autres interruptions dans l'atelier, (e) l'amélioration de l'efficacité d'un atelier, (f) la réduction de l'inspection, (g) l'amélioration du traitement des données, (h) des processus de production plus stables. L'équipe doit faire des rapports d'avancement à intervalles réguliers.
6. Le management guide le programme à ses différentes étapes pour s'assurer qu'il se développe correctement.

Etapas du programme

Le programme se développe normalement à travers plusieurs phases. Le temps de développement varie d'un endroit à un autre, mais chaque phase peut demander une à trois années. Un bon planning préliminaire permet souvent de raccourcir la durée.

Phase I. Développement initial.

Ceci comprend (a) faire la formation, (b) constituer les équipes, (c) surmonter la résistance aux graphiques de contrôle, (d) développer la coopération entre la production et l'ingénierie.

Phase II. Couverture atelier.

Ceci comprend (a) faire les études initiales de capabilité et de performance, (b) trouver le nombre convenable et le type de graphiques à utiliser dans l'atelier, (c) commencer à réduire les pertes, réduire l'inspection et obtenir plus de stabilité des processus.

Phase III. Ingénierie.

Ceci comprend (a) remettre l'accent sur les études de capabilité des processus, (b) utiliser les plans d'expériences, (c) attaquer directement les problèmes fondamentaux de l'ingénierie. Pendant cette période, on peut aussi commencer des applications dans le domaine du management.

Phase IV. Recherche.

On met l'accent sur les études de capabilité des processus pour explorer de nouvelles méthodes et de nouvelles techniques, éliminer des opérations difficiles ou coûteuses, améliorer la conception des outils et des produits. Le programme peut comporter des enquêtes et des audits.

Le management notera que, tout au long de ce programme, priorité est donnée aux études de capabilité des processus. Elles impliquent l'utilisation basique de graphiques de contrôle pour détecter des causes attribuables et résoudre des problèmes. Toutes les autres parties du programme reposent sur les études de capabilité des processus et leur sont soigneusement intégrées.

Les études de capabilité des processus sont renforcées, si nécessaires, par d'autres techniques comme les plans d'expériences. Les pages qui suivent décrivent ces parties du programme de manière générale et montrent comment elles peuvent être intégrées pour former un système complet avec lequel on peut travailler.

1. Etudes de capabilité du processus pour obtenir des informations et résoudre des problèmes

Définition du terme "étude de capabilité du processus"

Dans ce livre, le terme "étude de capabilité du processus" désigne l'étude systématique d'un processus au moyen de graphiques de contrôle afin de découvrir s'il se comporte normalement ou pas ; plus une étude sur tout comportement anormal pour déterminer sa cause ; plus une action pour éliminer tout comportement anormal qu'il est souhaitable d'éliminer pour des raisons économiques. Le comportement normal du processus après l'élimination des perturbations est nommé "capabilité du processus".

L'information développée à partir de l'étude de capabilité du processus est utilisée de la manière suivante :

1. L'information immédiate a pour résultat la solution de nombreux problèmes d'ingénierie. Elle est utilisée pour (a) mettre en marche les processus de l'atelier, (b) étudier les problèmes de l'atelier, (c) établir ou vérifier les spécifications, (d) obtenir de nouvelles connaissances sur les relations de cause à effet ou sur des questions semblables qui se posent dans l'ingénierie, enfin (e) déterminer ce qui est normal pour toutes sortes de normes, des pertes de marchandises aux salaires et aux primes. L'un des objectifs d'une étude de capabilité d'un processus est donc de découvrir des occasions de réduire les coûts.
2. Si la capabilité initiale du processus n'est pas suffisante pour résoudre les problèmes listés plus haut, l'information donnée par les graphiques de contrôle peut conduire à la mise au point d'un nouveau processus ayant une meilleure capabilité.

Base théorique de l'étude de capabilité du processus

Cette théorie est exposée en détail dans la seconde partie de ce traité. Pour la résumer brièvement, les points essentiels que le management doit garder présents à l'esprit sont les suivants :

1. Dans la plupart des processus, une étude de capabilité fait apparaître un grand nombre de variations initiales. Certaines sont normales, naturelles : elles proviennent des variations normales des gens, des matériaux, des outils, des machines et d'autres éléments du processus. En revanche, certaines variations sont anormales. Elles sont dues à des choses qui peuvent être changées ou corrigées, comme une mauvaise formation des ouvriers, une mauvaise maintenance des machines, etc.
2. Si des études de capabilité n'ont pas été menées auparavant sur le processus, les variations anormales en représentent probablement la plus grande partie. C'est aussi peut-être la partie qui provoque des problèmes dans l'atelier, empêche le bureau d'études de faire des expériences concluantes et entraîne des coûts de fabrication et d'inspection élevés.

L'étude de capabilité du processus agira pour détecter et réduire les variations anormales. Elles représentent néanmoins une riche source d'information pour le bureau d'études et l'atelier. *Les variations anormales produiront des profils significatifs sur un graphique de contrôle, et ceux-ci à leur tour rendront possible la détection et l'étude de relations de cause à effet.* Le bureau d'études et l'atelier peuvent ainsi tirer parti des variations anormales pour une meilleure connaissance du processus.

La seconde partie de ce traité explique comment l'élimination des variations anormales peut donner :

1. des normes adaptées ;
2. des spécifications réalistes ;
3. de bonnes prévisions, de bonnes estimations ;
4. une mesure fiable des capacités de la machine, de l'ouvrier, des matériaux, etc.

Elle explique aussi comment l'exploitation des variations anormales peut donner :

1. un processus amélioré ;
2. des coûts de fabrication plus faibles ;
3. moins d'inspection ;
4. la solution de nombreux problèmes inexplicables pour les ingénieurs.

Tous ces résultats dépendent de l'aptitude à distinguer les variations normales des variations anormales, ce que les études de capabilité permettent de faire.

Procédure statistique d'une étude de capabilité

Ceci est un bref résumé des procédures utilisées dans une étude de capabilité sur un processus.

1. La personne qui fait l'étude est ordinairement un contremaître ou un ingénieur. De nombreuses études de capabilité d'un processus sont faites conjointement par les membres de l'équipe qualité.
2. La personne qui fait l'étude obtient des données sur le processus et les porte sur les graphiques de contrôle. Ceux-ci montrent aussitôt si le processus fonctionne normalement.
3. Si le processus ne fonctionne pas normalement, les profils ont tendance à prendre une dizaine de formes facilement reconnaissables qui peuvent être associées à des causes.
4. Dans le cas où les causes de perturbation sur le premier graphique ne seraient pas immédiatement apparentes, il existe des techniques permettant de remonter à la source en divisant l'étude en plusieurs voies.
5. Si ces techniques ne donnent pas la réponse, on peut utiliser un plan d'expérience.
6. La détection des causes anormales est terminée quand le graphique de contrôle montre des profils normaux, ou quand le processus atteint un point économique au-delà duquel il est évident qu'on ne peut rien gagner de plus.

Signification économique de l'étude de capabilité d'un processus

Dès que les capabilités du processus sont connues, il devient possible de mettre en place dans l'atelier les contrôles adéquats, d'obtenir des changements dans les spécifications qui ne sont pas nécessaires, de réduire les inspections et de fixer des normes adaptées.

2. Graphiques de contrôle de processus pour assurer des résultats tangibles dans l'atelier

Définition du terme " graphique de contrôle de processus"

Dans ce manuel, le terme "graphique de contrôle de processus" désigne un graphique de contrôle au bénéfice de l'atelier. Il est utilisé (a) pour prévenir les défauts, (b) pour détecter les problèmes de l'atelier à la source et (c) pour avoir un processus stable, d'un fonctionnement régulier et produisant une haute qualité à un coût minimum.

Base théorique du graphique de contrôle de processus

La théorie du graphique de contrôle d'un processus peut être expliquée en trois étapes :

1. L'objectif des graphiques dans l'atelier est de conduire les distributions vers un état aussi économique que possible.
2. En l'absence de graphiques de contrôle, des variables indésirables viennent perturber les distributions. Il en résulte des problèmes de qualité, une efficacité médiocre, des retards de livraisons, des rebuts excessifs et un taux excessif de produits refusés à l'inspection.
3. Les graphiques de contrôle permettent d'éviter ces problèmes. Ils sont conçus pour trouver et éliminer les variables indésirables dès leur apparition.

Importance des graphiques de contrôle de processus

Les graphiques de contrôle de processus ont une importance inestimable dans le programme de contrôle de la qualité. Sans eux, les plus brillantes analyses d'études de capabilité et de plans d'expériences peuvent échouer à se traduire en augmentation de production et en réduction de coût. De plus, il est pratiquement impossible de conduire avec succès des plans d'expériences si les variables de l'atelier ne sont pas sous contrôle.

Sur les nouveaux processus, quand il y a beaucoup d'inconnues dans l'ingénierie, les graphiques de contrôle de processus doivent être considérés comme indispensables. Sur les processus plus anciens, quand les ingénieurs et les contremaîtres ont de grandes connaissances et beaucoup d'expérience, les graphiques de contrôle de processus sont encore nécessaires pour une meilleure efficacité.

Nombre de graphiques

Il existe deux sortes de graphiques de contrôle de processus : ceux qui ont pour but de contrôler la qualité de l'opération suivante, et ceux qui ont pour but de minimiser les pertes sur l'opération elle-même. Les deux sont nécessaires.

Le nombre total dans un atelier varie suivant la nature des opérations et le nombre d'inconnues. Un produit compliqué ne nécessite pas nécessairement beaucoup de graphiques. Ce nombre a tendance à être faible quand seule la technique de l'opérateur entre en jeu, et plus élevé quand les variables concernent plusieurs opérateurs et plusieurs machines.

3. Réunions opérationnelles pour le contrôle de la qualité

Pratiquement toutes les actions nécessaires au contrôle de la qualité concernent plusieurs fonctions, dont au minimum l'ingénierie et la production. Le plus souvent, spécialement dans les premières étapes, on fait aussi appel à l'aide directe d'un ingénieur qualité. Dans ces conditions, trois personnes sont conjointement responsables de la mise en œuvre du contrôle de la qualité et de son suivi ; ce sont l'ingénieur produit, le chef d'atelier et l'ingénieur qualité. On dit souvent qu'ils forment une "équipe de contrôle de la qualité".

Cette technique est empruntée au domaine de la "recherche opérationnelle". L'ingénieur produit apporte le savoir-faire technique, l'information sur les coûts, l'accès à la gestion des plans, les contacts avec les fournisseurs, etc. Le chef d'atelier apporte ses connaissances pratiques, sa capacité de prendre des décisions et son expérience du dialogue avec le personnel. L'ingénieur qualité apporte des conseils en statistique et son expérience de certains problèmes. Ensemble, ils peuvent faire des merveilles en peu de temps.

Structure et tâches de l'équipe de contrôle de la qualité

L'expérience montre que si des dispositions formelles n'ont pas été prises pour le travail d'équipe, les rapports entre la production et l'ingénierie tendent à devenir désordonnés ou irréguliers, l'action étant souvent limitée aux urgences. Dans ce cas, le programme de contrôle de la qualité ne se développe pas solidement. Inversement, quand l'équipe se réunit régulièrement suivant un calendrier et travaille sur les graphiques de contrôle, on ne connaît pas de cas où elle n'a pas obtenu de bons résultats.

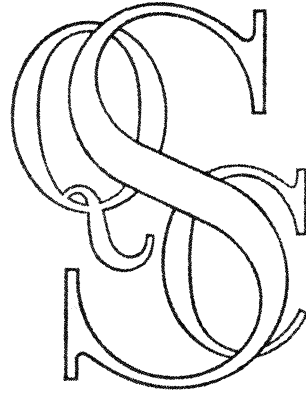
Par conséquent, pour que le programme se développe le plus rapidement possible, il faut constituer une équipe de contrôle de la qualité pour chaque ligne de produit ou pour chaque type d'opération. Les tâches et les responsabilités de l'équipe sont les suivantes :

1. Planifier et conduire les études de capacité du processus (ou les plans d'expériences) qui ne peuvent pas être conduits par l'ingénieur produit à lui seul.
2. Planifier les graphiques de contrôle du processus dans l'atelier ; déterminer le type et le nombre de graphiques.
3. Installer les graphiques de contrôle, former les responsables et leur donner les documents nécessaires.
4. Maintenir une surveillance permanente sur tous les graphiques de contrôles de processus afin de s'assurer qu'ils sont utilisés efficacement et produisent un maximum d'économies. Il faut notamment retirer les graphiques inutiles, allonger les intervalles de mesure quand les processus sont mis sous contrôle, ou ajouter de nouveaux graphiques suivant les besoins. Il faut faire aussi des audits réguliers de tous les graphiques de contrôle pour s'assurer qu'ils sont bien compris et utilisés.
5. Suivre les actions indiquées par les graphiques. Faire des rapports d'avancement.

Supervision du management

Pour que les équipes de contrôle de la qualité fonctionnent correctement, il faut qu'elles aient conscience de l'intérêt et du soutien du management à tous les niveaux. Le management doit assister à la formation des équipes, faire apparition dans leurs réunions de temps à autre, suivre les rapports d'avancement et reconnaître les bonnes réalisations.

Il faut aussi que le management vérifie que le programme progresse régulièrement d'une phase à l'autre, et en temps voulu.



Seconde partie

Applications à l'ingénierie

I

Etude de capabilité de processus

Ce chapitre a pour objet la théorie et la pratique de l'étude de capabilité de processus. Cette étude commence avec la sélection d'un problème à étudier, qu'il faut d'abord traduire en termes statistiques. Le problème est ensuite résolu en appliquant un ensemble de procédures. Pour finir, la solution est à nouveau traduite dans les termes initiaux.

L'étude de capabilité de processus est une technique de base pour analyser des données. On peut l'utiliser pour tous les types de données obtenues à partir d'un processus de production. Elle peut être faite par un ingénieur, un contremaître ou toute personne ayant une responsabilité sur le processus. Toutefois, l'étude de capabilité du processus est d'abord une technique de recherche, et à ce titre elle est particulièrement importante dans tous les domaines de l'ingénierie.

1. Base scientifique de l'étude de capabilité de processus

Définitions

Processus

Ce terme se rapporte à un système de causes. C'est une combinaison de conditions qui agissent ensemble pour produire un résultat donné. C'est souvent une combinaison d'hommes, de matériaux, de machines et de méthodes, mais il peut avoir d'autres significations. Le processus étudié peut être aussi simple que le mouvement d'une main, mais il peut être aussi complexe que l'ensemble des opérations d'une usine.

Capabilité d'un processus

Ce terme se rapporte au comportement normal d'un processus qui est dans un état de contrôle statistique ; c'est une série d'effets produits quand le processus n'est pas affecté par des causes extérieures. Dans une fabrication, c'est son aptitude à produire des objets semblables. Il faut que le contrôle statistique soit maintenu pendant une assez longue période de temps dans des conditions données. La capabilité du processus peut s'exprimer en pourcentage de défectueux ou avec une distribution. Dans ce cas, elle se rapporte à une distribution qui ne doit pas être condensée.

La "capabilité" d'un processus n'est pas la même chose que sa "performance", car une performance comprend toutes sortes de variables supplémentaires et de perturbations indésirables dans le système de causes. La capabilité est la performance naturelle après l'élimination des influences extérieures.

Etude de capabilité de processus

C'est une procédure systématique pour déterminer la capabilité du processus au moyen de graphiques de contrôle, et pour changer le processus, au besoin, pour obtenir une meilleure capabilité. Elle doit être poursuivie tant que le problème qui est à l'origine n'a pas été résolu.

Aperçu de la technique

Le champ d'application de cette technique est très vaste. Les études de capacité de processus peuvent s'appliquer à presque tous les problèmes de management, d'ingénierie, de production et d'inspection. Nous donnons ici une liste des problèmes qui peuvent être résolus quand cette technique est appliquée correctement. Ces problèmes sont essentiellement liés à la nature et au comportement d'une *distribution*. S'ils peuvent être résolus, c'est parce que les études de capacité de processus donnent une méthode pour analyser et modifier les distributions.

(1) Qualité

- Trop de défauts en production
- Trop de défauts à l'inspection finale
- Trop de défauts à l'inspection entrante
- Produit instable

(2) Coûts

- Trop d'inspection
- Trop de réglages
- Trop de réparations
- Trop de rebuts
- Trop de pertes de marchandises
- Retards dans la production
- Faibles rendements

(3) Informations

- Effets des modifications
- Degré de formation des ouvriers
- Erreurs de mesure

(4) Administration

- Evaluation des coûts
- Evaluation des pertes
- Evaluation des rendements

(5) Recherche et développement

- Nouveaux produits
- Nouvelles méthodes
- Réduction des coûts de R&D
- Achat de nouvelles machines

Les étapes d'une expérience scientifique

L'étude de capacité d'un processus suit la démarche en quatre étapes de la recherche scientifique : (1) expérience, (2) hypothèse, (3) test d'hypothèse, (4) expérience suivante.

L'expérience consiste à collecter des informations sur le processus en différents points et à différents instants.

L'hypothèse est que les observations, si elles sont faites sur un processus stable, ne présenteront que des fluctuations naturelles.

Le test d'hypothèse est effectué en prenant un graphique de contrôle et en vérifiant son profil. Si ce profil est anormal, c'est qu'une cause attribuable s'est introduite dans le processus normal. Elle est identifiée par une étude appropriée.

L'expérience suivante est effectuée, suivant le résultat du test, après que le processus a été modifié, la spécification révisée, ou qu'on a collecté plus d'informations.

<i>Expérience scientifique</i>	<i>Etude de capabilité du processus</i>
1. Expérience	1. Collecter des données sur le processus
2. Hypothèse	2. Tracer des profils statistiques
3. Test d'hypothèse	3. Interpréter les profils
4. Expérience suivante	4. Suivre les indications des profils

2. Obtention des données

Certains processus peuvent être étudiés par saisie directe des données sur le processus, par exemple mesure de la température d'un four. D'autres peuvent être étudiés en observant les effets du processus sur le produit, par exemple le diamètre d'une pièce. Dans les deux cas, une étude de capabilité de processus commence en obtenant une série de mesures ou des pourcentages de défauts.

Dans le cas où il faut choisir entre des mesures continues et des mesures par attributs, il est bon de se donner la peine de trouver une méthode pour obtenir des valeurs réelles. Cela permettra de tirer avantage de la grande sensibilité du graphique Xb et R .

Où et comment utiliser des graphiques Xb et R

Le graphique Xb et R exige moins de données que tout autre graphique de contrôle pour obtenir la même quantité d'information. C'est celui qu'il faut utiliser quand les mesures sont coûteuses ou quand l'essai est destructif. De plus, il possède deux avantages que les autres n'ont pas :

(1) *Sur ce graphique, différentes sortes de problèmes apparaissent de différentes façons*

Par exemple, sur le sous-graphique Xb on voit qu'une machine est mal réglée, tandis que sur le sous-graphique R on voit qu'une pièce est cassée. Un graphique Xb et R peut répondre à des questions comme : pourquoi obtient-on des résultats incohérents ? Qu'est-ce qui provoque tant de problèmes à cette fréquence ? En général, plus le produit est nouveau, plus il est nécessaire d'utiliser des graphiques Xb et R .

(2) *Ce graphique permet d'étudier le processus indépendamment des spécifications*

Les graphiques Xb et R commencent avec le processus lui-même et donnent une image de ce qu'il peut donner. Ensuite, le processus peut être comparé ou non avec les spécifications, suivant la nature du problème. Pour cette raison, les graphiques Xb et R peuvent servir à changer les spécifications en fixant des limites plus réalistes.

Où et comment utiliser des graphiques p

Un graphique p exige des échantillons plus grands qu'un graphique Xb et R . Il est moins souple et moins sensible qu'un graphique Xb et R pour les raisons suivantes :

- Le graphique p ne peut pas dire si le problème est causé par un manque de contrôle de la valeur moyenne, par le fait que les limites spécifiées sont trop étroites, ou par une dispersion incontrôlée du processus.

- Le graphique p ne peut pas prévenir les dérives du processus tant que ces dérives n'ont pas entraîné la présence de produits défectueux.

D'autre part, un graphique p a souvent l'avantage d'utiliser des données qui sont déjà disponibles dans l'atelier, alors que pour un graphique Xb et R , il est généralement nécessaire d'obtenir des données spéciales.

Les graphiques p sont couramment utilisés pour étudier un processus d'assemblage en entier. Un seul pourcentage peut recouvrir tous les défauts et toutes les caractéristiques. Ce type de graphique peut constituer par lui-même une étude de capacité parfaitement valable, et il donnera aussi une bonne estimation de l'efficacité des changements, des corrections et des améliorations qui résultent d'autres études.

Toutefois, quand ils sont utilisés seuls sur un processus, les graphiques p sont souvent difficiles à interpréter. Les causes de profils anormaux peuvent être si profondément cachées qu'il est impossible de les trouver. Il faut alors les diviser en plusieurs graphiques concernant des défauts individuels.

Précautions pour obtenir les mesures

Quand on fait une étude de capacité de processus, il est nécessaire de planifier soigneusement la façon de collecter les données. Les règles suivantes sont basées sur l'expérience de nombreux ingénieurs.

1. Collecter les données, si possible, dans le même ordre que celui de la sortie des produits.
2. S'arranger pour saisir les données sur le produit dès sa sortie, plutôt qu'après une opération de tri ou de réglage (sauf si l'étude a pour objet le tri ou le réglage).
3. Décider à l'avance de la technique à utiliser pour les mesures.
4. Décider à l'avance de combien de mesures doivent être saisies, et de l'endroit exact où les mesures doivent être faites.
5. Veiller à ce que l'identification des mesures soit enregistrée à côté des mesures. Par exemple l'heure et le jour, le numéro de la machine, le nom de l'opérateur, le nombre d'ensembles de tests, etc.
6. Dire à la personne qui fait les mesures de noter tous les changements apportés au processus pendant l'étude.
7. Si les données doivent être saisies sur un produit ayant plusieurs sources de production (par exemple plusieurs machines ou plusieurs opérateurs), décider à l'avance si toutes ces sources seront couvertes, ou seulement une ou deux.
8. Si les données doivent être saisies sur un processus ayant un ensemble de conditions, décider à l'avance si toutes les conditions seront couvertes, ou seulement une ou deux.

Nombre de données requises pour une étude de capacité de processus

Une étude faite avec des graphiques Xb et R doit couvrir au moins trois périodes de temps. Un nombre convenable de données pourrait être, pour commencer :

Première période	50 mesures
Seconde période	25 mesures
Troisième période	25 mesures

Quand l'étude est faite avec des graphiques p , elle doit aussi couvrir trois périodes de temps. Un nombre convenable de données pourrait être de 25 échantillons pour chaque période. Chaque échantillon peut représenter 50 à 100 unités.

Sélection des échantillons

Les échantillons doivent être sélectionnés afin de minimiser toutes les sources de variations autres que le facteur qui est étudié. Cet objectif peut habituellement être réalisé si chaque sous-groupe est formé d'unités produites les unes à la suite des autres.

Identification des données

Dans la collecte des données, il faut identifier soigneusement les différentes périodes de temps. Il faut aussi identifier tout changement à la source des données, ou toute condition environnementale qui pourrait affecter les résultats. Par exemple quand les données proviennent jusqu'à un certain point du graphique d'un endroit de l'usine, puis d'un autre endroit à la suite d'un déménagement. Par exemple encore quand la conception du produit a changé, ou quand l'atelier a reçu un nouveau contremaître.

Plus il y a de façons d'identifier les données, plus il est possible d'apprendre à partir de l'étude de capacité du processus. C'est l'un des premiers principes de l'analyse statistique avec des graphiques de contrôle et c'est là que se trouve une grande partie de leur puissance.

3. Analyse des données

Echelles du graphique

Les échelles doivent être choisies afin d'avoir une largeur suffisante pour les limites de contrôle. Il est préférable qu'elles soient à 3 ou 4 centimètres de distance. Pour les graphiques Xb et R , la distance doit être sensiblement la même.

Calcul des limites

Quand les données incluses dans une étude de capacité de processus recouvrent plusieurs ensembles de conditions, on peut se demander si la ligne centrale et les limites de contrôle doivent être calculées à partir de toutes les données ou à partir d'une portion seulement. On retiendra comme principe que la portion des données utilisée pour faire les calculs est sans importance, pourvu que le nombre de données soit suffisant. Une sélection de données différente peut avoir pour résultat des limites de contrôle différentes, mais les conclusions seront les mêmes.

Quand le graphique comporte moins de 20 points, que ce soit un graphique Xb et R , un graphique p ou un graphique aux mesures individuelles, il est préférable d'utiliser toutes les données pour calculer les limites de contrôle.

Quand on ajoute des données, il faut prolonger les limites de contrôle qui existent déjà sur le graphique et porter les points correspondants. Si le profil montre que les nouvelles données sont significativement différentes des anciennes, et dans ce cas seulement, on peut calculer de nouvelles limites. Sinon le calcul de nouvelles limites risque facilement de conduire à de fausses conclusions.

Etude des profils

L'analyse préliminaire d'une étude de capacité d'un processus comporte deux étapes.

1. Ecrire soigneusement sur le graphique tous les faits relatifs aux données. Ils serviront plus tard à séparer les données en fonction des sources. Noter aussi toutes les conditions environnementales pouvant affecter les résultats, par exemple la réparation d'un appareil.
2. Examiner soigneusement les profils et marquer les X. Déterminer le type d'instabilité (cycle, tendance, dérive graduelle, dérive brusque, fluctuation erratique, profil bizarre, interaction). L'écrire à côté des X. Noter aussi les informations éventuelles, comme par exemple "outil utilisé".

Une étude de capabilité bien conduite donnera toujours des informations intéressantes, que les profils soient normaux ou anormaux. Cependant le graphique sera utilisé de manière différente suivant qu'un profil est normal ou anormal.

Conclusions à partir d'un profil normal

La première signification d'un profil normal est que le processus est sous contrôle. Il est stable et n'est pas perturbé par des causes extérieures. Il tend à se répéter jour après jour, et par conséquent il est prévisible. On peut déterminer par le calcul les caractéristiques sous-jacentes : le centre, la forme et la dispersion de la distribution.

On peut aussi estimer par le calcul le pourcentage de pièces hors tolérance, et établir des standards pour les budgets, les prévisions commerciales, les primes, etc.

Conclusions à partir d'un profil anormal

Un profil anormal indique que le processus est hors contrôle. Il n'est pas prévisible. Il peut tendre à se répéter ou pas. On ne peut pas déterminer par le calcul les caractéristiques sous-jacentes. On peut cependant obtenir des informations utiles.

Dans une étude de capabilité de processus, la première signification d'un profil anormal est le fait que *des causes importantes, capables d'avoir une grande influence sur le processus, sont présentes sous une forme susceptible d'être étudiée*. Tandis que les profils normaux sont utilisés surtout pour établir des standards et faire des estimations, *les profils anormaux sont utilisés principalement pour acquérir une nouvelle connaissance du processus*.

Les profils anormaux peuvent être divisés en deux catégories : relativement simples et relativement complexes.

Profils relativement simples

Cycles
Tendances
Changements de niveau brusques ou progressifs
Certaines variations systématiques

Profils relativement complexes

Mélanges stables et instables
Profils bizarres
Grappes de points
Stratification
Couplage de deux graphiques
Interaction
Instabilité

On peut généralement interpréter les profils anormaux simples en ayant de bonnes connaissances techniques ou une bonne expérience de l'atelier. Mais les profils anormaux complexes doivent être réduits à une forme simple avant que l'on puisse y travailler.

Simplification d'un profil anormal complexe

Pour simplifier un profil anormal complexe, l'approche basique est de séparer les données en fonction de différentes sources. Une telle séparation est évidente dans de nombreuses

études, par exemple quand le processus comporte plusieurs machines, plusieurs opérateurs, plusieurs sources d'approvisionnement, etc.

Dans d'autres cas, la méthode est moins simple. Par exemple une machine peut se comporter de deux façons différentes suivant qu'elle a une bonne ou une mauvaise maintenance. De même, un opérateur peut avoir deux comportements différents suivant qu'il a reçu ou non une formation.

Dans les études d'ingénierie, les méthodes suivantes sont utilisées pour séparer les données :

- Méthode A. Simple décomposition
- Méthode B. Elimination de variables
- Méthode C. Réarrangement de données
- Méthode D. Plans d'expériences

Toutes ces méthodes ont un même objectif : tenter de séparer les données en catégories significatives en sorte que les profils deviennent suffisamment simples pour permettre leur interprétation.

Méthode A : Simple décomposition

On utilise cette méthode quand certaines des sources possibles de complexité sont connues, ou au moins suspectées. Il faut procéder ainsi :

1. Séparer les données du premier graphique suivant les sources. Tracer un graphique pour chaque source. Le graphique dont le profil est le moins stable, ou celui qui ressemble au profil d'origine, est vraisemblablement celui qui contient les causes les plus importantes. C'est sur cette source qu'il faut concentrer les efforts.
2. Saisir à nouveau les données de cette portion et les séparer à nouveau suivant d'autres sources possibles.
3. Les profils deviennent de plus en plus simples à chaque séparation. Continuer jusqu'à ce que les profils soient stables¹².

Méthode B : Elimination de variables

On utilise cette méthode quand on n'a pas de base pour séparer les données. Il faut procéder ainsi :

1. Le profil d'origine est utilisé pour découvrir une variable qui a besoin d'être éliminée. Pour cela, il faut avoir une bonne connaissance du graphique de contrôle et être habitué à interpréter des profils.
2. Dès que la première variable est trouvée, faire le nécessaire pour l'éliminer du processus. Ensuite, collecter des données à nouveau pour faire une seconde étude de capabilité. Les profils seront plus simples que la première fois.
3. Continuer jusqu'à ce que les profils deviennent naturels ou jusqu'à ce qu'ils ne soient que de simples changements de niveau ou de simples tendances.

Cette méthode de simplification des profils peut être utilisée dans toutes les situations. C'est souvent la seule méthode possible s'il y a des variables compliquées ou beaucoup d'inconnues.

¹² NdT. Un diagramme en arête de poisson est très utile pour réaliser cette étude.

Méthodes C et D : Réarrangement de données et plan d'expérience formel

Si les données utilisées dans l'étude ont été identifiées de différentes façons, il peut être possible de simplifier le profil en réarrangeant simplement les données. Les méthodes utilisées pour cela sont des études de corrélation, des "arrangements de tendances" et des plans d'expériences formels.

4. Estimation de la capabilité

La capabilité d'un processus peut être exprimée numériquement de deux façons différentes : (a) comme une distribution avec un certain centre, une certaine forme et une certaine dispersion ; (b) comme un pourcentage de pièces en dehors de limites spécifiées. Dans le premier cas, la capabilité est estimée à partir d'un graphique Xb et R ; dans le second, à partir d'un graphique p .

Estimation du centre, de la forme et de la dispersion avec un graphique Xb et R

À la fin de l'étude de capabilité du processus, vous avez obtenu un ensemble de profils contrôlés. Vous pouvez en déduire la distribution que le processus est capable de produire.

- **Centre.** Le centre de la distribution est la ligne centrale du graphique Xb
- **Forme.** La forme peut être estimée en traçant une distribution de fréquences des données qui ont produit le profil sous contrôle. Plusieurs centaines de mesures sont nécessaires pour donner une estimation fiable.
- **Dispersion.** La dispersion peut être calculée suivant la théorie des distributions qui sera exposée dans le quatrième chapitre.

Estimation d'un pourcentage avec un graphique Xb et R

Le pourcentage des caractéristiques qui se trouveront en dehors d'une limite donnée, ou le pourcentage des produits qui se trouveront hors tolérances, peut être estimé à partir des paramètres d'un graphique Xb et R sous contrôle. La valeur est calculée suivant la théorie des distributions qui sera exposée dans le quatrième chapitre.

Estimation d'un pourcentage avec un graphique p

La capabilité du produit, en termes de pourcentage, est simplement la ligne centrale du graphique p . C'est une première estimation du pourcentage des produits qui se trouveront hors tolérances, tant que le graphique p est la seule source de données.

Estimation d'une capabilité quand le profil n'est pas sous contrôle

Il peut arriver qu'on soit obligé d'estimer la capabilité d'un processus avant qu'il soit possible de mettre le profil sous contrôle. Dans ce cas l'estimation ne peut être que grossière. Cependant, des estimations basées sur les premiers profils d'une étude de capabilité, même s'ils sont hors contrôle, sont meilleures que des estimations faites en l'absence d'une étude de capabilité.

1. Si le profil montre une tendance, il faut en déterminer la cause et décider quelle portion du profil représente le mieux le comportement du processus dans l'avenir.
2. Si le profil est périodiquement hors contrôle, cela peut signifier qu'il est soumis à des causes différentes. Il faut essayer de trouver quel sera le bon niveau quand le processus passera sous contrôle.

Quand on donne une estimation faite hors contrôle, il faut toujours expliquer la base de l'estimation et faire voir le profil correspondant. Il faut aussi toujours garder présent à l'esprit qu'une estimation faite à partir de données hors contrôle n'est jamais fiable.

5. Utilisation de l'information donnée par une étude de capabilité de processus

La première étape dans l'utilisation de l'information est de voir si la capabilité du processus a les caractéristiques demandées. Un produit peut être sous contrôle mais à un niveau totalement inacceptable. Il peut être sous contrôle avec 50 % de produits qui ne répondent pas aux spécifications. Il peut être sous contrôle mais avec une dispersion telle qu'il est impossible d'avoir un bon rendement. De plus, on a pu rencontrer des problèmes de mesure, et il faut peut-être des données supplémentaires pour accorder les spécifications avec la capabilité du processus.

Dans tous les cas, trois actions sont possibles :

- Actions sur le processus
- Actions sur les données
- Actions sur la spécification

Pour déterminer quelle action est nécessaire, il faut commencer par :

- S'assurer que le graphique est sous contrôle statistique.
- Vérifier le niveau des graphiques $X\bar{b}$ ou p pour voir si c'est le niveau souhaité.
- Dans le cas d'un graphique $X\bar{b}$ et R , vérifier la ligne centrale du graphique R pour voir si la dispersion du processus n'est pas trop grande.

Ces points étant vérifiés, on passera aux étapes suivantes.

Actions sur le processus

(1) Décider de ce qu'il faut faire au sujet des causes attribuables connues. Il est possible de les éliminer ou de les laisser dans le processus. Celles que vous ne voudrez peut-être pas éliminer sont :

- l'usure normale des outils,
- les variations raisonnables du réglage des machines,
- les variations inévitables des caractéristiques des matières premières,
- les différences ordinaires entre les opérateurs, etc.

Si ces causes restent dans le processus, il faudra mettre un graphique de contrôle dans l'atelier pour les faire tenir entre les limites.

(2) Décider s'il est payant d'établir un nouveau processus ayant une capabilité plus étroite. On peut faire des économies en réduisant la dispersion entre les spécifications, mais alors il est nécessaire de faire un plan d'expérience ou une nouvelle étude de capabilité.

(3) Trouver si le processus actuel peut être installé ailleurs pour avoir de meilleurs résultats ou de meilleurs rendements.

(4) La plupart de ces actions ont pour but d'installer des graphiques de contrôle dans l'atelier. Il faut donc voir si le processus a une capabilité satisfaisante. Ce sont les graphiques de contrôle dans l'atelier qui le diront.

Actions sur les données

- (1) Erreurs de mesure. Certains indices peuvent faire penser que les mesures ne sont pas reproductibles. Dans ce cas, l'ingénieur peut avoir besoin de faire une étude sur les erreurs de mesure avant de collecter des données pour une étude ultérieure.
- (2) Quantité de données inadéquate. Le profil du graphique ne permet pas de conclure. Il faut donc collecter plus de données pour résoudre le problème.

Actions sur les spécifications

Elles peuvent prendre au minimum six formes différentes.

- (1) Essayer d'élargir les spécifications qui se sont avérées plus étroites que la capacité du processus.
- (2) Essayer de rétrécir les spécifications si, par ce moyen, on peut obtenir des avantages économiques ou recevoir moins de réclamations.
- (3) Éliminer les spécifications qui se sont avérées inutiles.
- (4) Ajouter des spécifications quand elles sont nécessaires ou souhaitables.
- (5) Décaler les valeurs nominales des spécifications quand elles sont mal placées.
- (6) Ré-écrire les spécifications inexacts ou obscures.

Ne vous découragez pas si vous trouvez qu'une étude de capacité de processus conduit seulement à une autre étude, puis celle-ci à une troisième, etc. Le problème que vous abordez existe peut-être depuis des années. Il est sans doute impossible de résoudre une situation aussi embrouillée en une quinzaine de jours. Certaines études de capacité de processus peuvent durer six mois.

Le facteur déterminant, c'est que l'étude continue de révéler des informations qui conduisent à une réduction des coûts, ou à une amélioration de la qualité, ou aux deux.

6. Passage de l'étude de capacité de processus au graphique de contrôle d'atelier

Quand l'ingénieur a obtenu certaines informations d'une étude de capacité de processus, il sait quelles sont les distributions qui peuvent être gardées sous contrôle avec un coût raisonnable. Il souhaite alors installer un contrôle du processus dans l'atelier, pour lui permettre d'entretenir la distribution désirée et d'obtenir les bénéfices désirés. Le graphique de contrôle dont l'atelier a besoin est très souvent un modèle standard.

L'ingénieur ne doit pas perdre de vue que, alors que la technique du graphique de contrôle est utilisée pour les études de capacité et les graphiques de contrôle d'atelier, les deux applications sont entièrement différentes. Il est conseillé d'étudier ces différences avant d'essayer d'installer un graphique de contrôle dans un atelier.

Préparatifs pour l'installation d'un graphique de contrôle

L'ingénieur devrait avoir fait l'expérience de tous les éléments du processus avant d'installer un graphique d'atelier. Il devrait avoir étudié les effets des changements de

matériaux, de méthodes, de personnels et d'outils. Il devrait aussi avoir pesé l'économie de chaque changement, en sorte que les standards de l'atelier puissent avoir un véritable sens économique. Mais il faut reconnaître qu'il est rarement possible pour un ingénieur de mener une telle étude avant l'installation du graphique.

CARACTÉRISTIQUE	ETUDE DE CAPABILITÉ DE PROCESSUS	GRAPHIQUE DE CONTROLE DE PROCESSUS
OBJET	Obtenir des informations	Maintenir une distribution préétablie
ECHANTILLONS	Relativement peu d'échantillons	Une série continue
ANALYSE	Faire très soigneusement l'analyse et l'interprétation	L'atelier ne surveille que les changements de profils
ACTION	Tout changement, bon ou mauvais, peut être important	L'atelier n'agit que sur les changements indésirables
INFORMATIONS	Les formes des distributions, les moyennes et les dispersions sont étudiées	L'attention est portée principalement sur la moyenne et la dispersion (ou le pourcentage)
LIGNES CENTRALES	Les lignes centrales sont calculées à partir des données pour refléter la distribution du processus	Les lignes centrales sont établies pour représenter un équilibre entre la qualité et le coût
RELATION AVEC LA SPECIFICATION	La relation avec la spécification est vérifiée attentivement. L'étude peut conduire à des changements	Le graphique de contrôle a été fait pour assurer une relation appropriée avec la spécification

Figure 17. Différence entre une étude de capabilité de processus et un graphique de contrôle de processus

Installation d'un graphique de contrôle dans l'atelier

La procédure suivante est utilisée pour traduire les informations concernant la capabilité du processus sous une forme permanente destinée à l'atelier.

1. Baser le graphique de contrôle d'atelier sur la capabilité "long terme" du processus plutôt que sur sa capabilité "court terme". La première comprend l'effet normal de l'usure des outils et des variations mineures d'un lot de pièces à un autre. La seconde est relative au concept de "tolérance normale" que l'ingénieur traduit par un écart de plus ou moins trois sigma par rapport à la moyenne.
2. Décider s'il est nécessaire de maintenir un niveau le plus constant possible ou de laisser dériver la distribution. Déterminer alors jusqu'où peut aller la dérive. Mettre les lignes centrales en accord avec cette décision.
3. Calculer les limites de contrôle à partir des profils de votre étude qui sont sous contrôle. Les détails pratiques de l'installation du graphique seront fixés par l'équipe de contrôle de la qualité.
4. Travailler avec l'atelier régulièrement et avec des intervalles fréquents en utilisant les informations issues du graphique. La troisième partie de ce manuel contient à ce sujet de sages conseils qui ont été accumulés pendant de nombreuses années d'application du contrôle statistique de la qualité. Ils seront utiles aux ingénieurs et aux opérateurs.

Sur un graphique Xb et R , la présence d'une ou deux limites spécifiées est souvent un facteur dans l'établissement du graphique. D'autres considérations économiques peuvent aussi exercer une forte influence sur les décisions de l'ingénieur, notamment :

1. Certains processus ne sont pas capables, dans l'état actuel des connaissances de l'ingénierie et de la fabrication, de sortir des produits compatibles avec les limites spécifiées.
2. Certaines spécifications ne sont pas compatibles les unes avec les autres. Si le processus tourne à un niveau qui permet de respecter certaines limites spécifiées, de grandes quantités de produits seront en dehors de certaines autres limites.
3. Certains processus ont un niveau optimum qui minimise, dirons-nous, les difficultés d'assemblage. L'ingénieur peut décider de faire tourner le processus bien à l'intérieur des spécifications, ou au contraire de s'écarter des valeurs nominales.
4. Certains processus, comme le soudage, tendent à provoquer des dérives dans les distributions. On peut anticiper ces dérives en choisissant un niveau optimum pour les opérations en amont.
5. Certains défauts sont économiquement moins indésirables que d'autres. Il faut parfois choisir de réparer des défauts sur une opération plutôt que sur une autre.
6. Il faut parfois modifier des spécifications en fonction des informations données par les graphiques de contrôle d'atelier.

7. Exemple d'une étude de capabilité de processus

Le problème concernait une caractéristique électrique sur un certain type de commutateur. L'appareil était fabriqué sur une machine avec 12 têtes différentes. Les performances étaient irrégulières ; il semblait que les têtes présentaient de grandes différences, et un fort pourcentage du produit était rejeté pour cause de non-conformité aux spécifications. L'équipe de contrôle de la qualité a entrepris une étude de capabilité du processus.

Avant de collecter les données, l'équipe a pris les décisions suivantes :

- Caractéristique mesurée : force magnétomotrice
- Nombre d'unités par échantillon : 5
- Nombre d'échantillons : 50
- Type de graphique : Xb et R
- Source à étudier : tête N° 6
- Personne chargée de collecter les données : le régleur de la machine
- rythme de travail : 10 à 15 échantillons par jour.

Commentaires sur ces décisions

L'équipe a fait correctement des plans à l'avance pour collecter des données convenables. La période d'observation est suffisante pour garantir que les données représentent le système de causes. En outre, le régleur a reçu des instructions précises.

Graphique de contrôle

Le graphique de contrôle obtenu à partir des données initiales est représenté figure 18. De nombreux points sont hors contrôle. C'est un profil complexe, typique de ce que l'on voit souvent au début d'une étude.

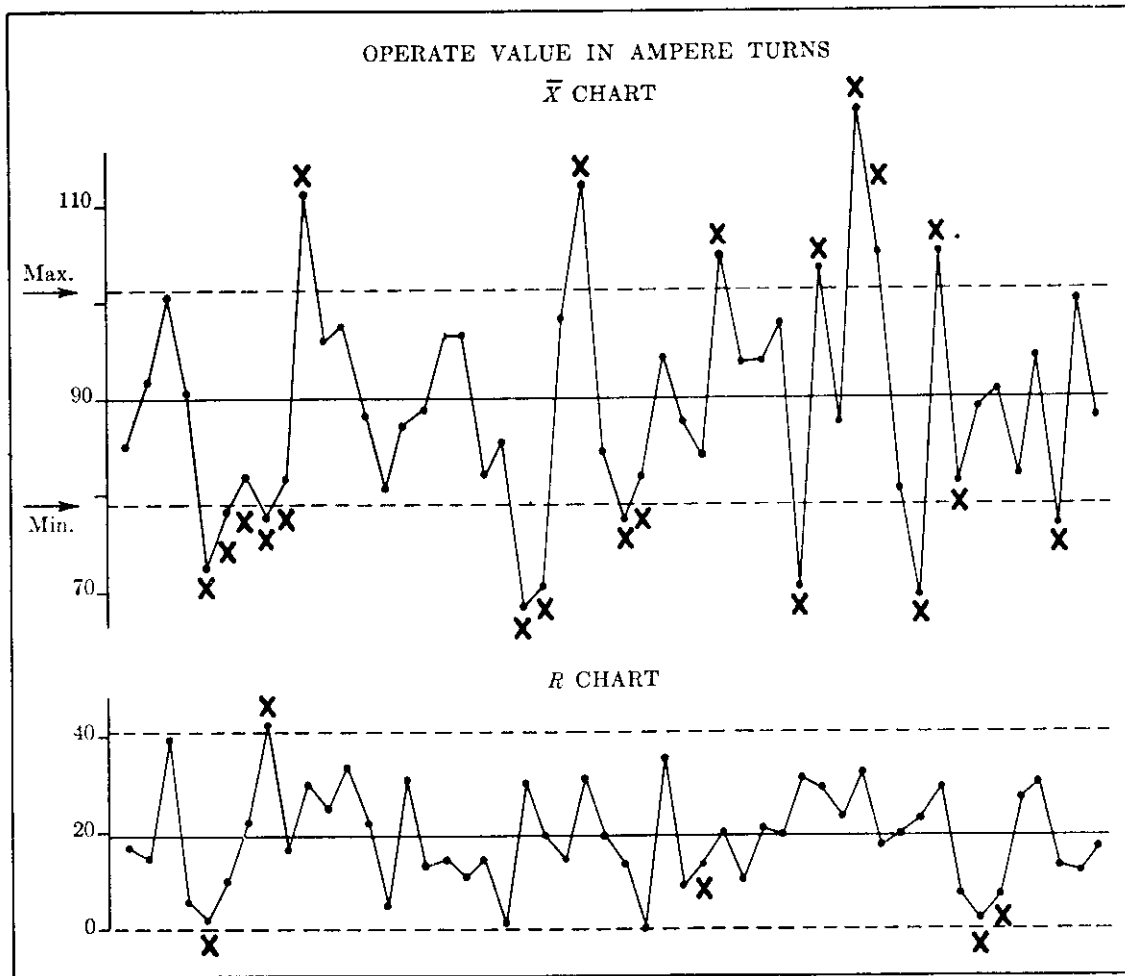


Figure 18. Premier graphique \bar{X} et R dans une étude de capabilité de processus.

Analyse statistique de la figure 18

Profil complexe. Il est aussi important pour l'équipe de savoir ce qu'il ne faut pas faire que de savoir ce qu'il faut faire. Voici des exemples de ce qu'il *ne faut pas faire* avec ce profil :

1. Ne pas abandonner, ni conclure que ce n'est pas un domaine intéressant pour appliquer le contrôle statistique de la qualité.
2. Ne pas décider d'ignorer ce profil ; il faut au contraire collecter plus de données et voir si le problème disparaît.
3. Ne pas perdre son temps en essayant de trouver des causes attribuables aux points hors contrôle de ce profil. Il sera virtuellement impossible de les trouver avec un profil de cette forme.

En revanche, il faut reconnaître ceci :

1. Pour interpréter correctement un profil complexe, il faut être capable d'interpréter le graphique R. Ici le profil du R est "masqué", ce qui signifie qu'il est gonflé par la présence de variables cachées. Pour pouvoir l'interpréter, il faudra réduire cette inflation.
2. Pour réduire l'inflation, il faut éliminer une (au moins) des grandes variables du processus. Le graphique donne presque toujours un indice pour la trouver.

Dans le cas présent, nous voyons que les fluctuations sur le graphique Xb sont beaucoup plus larges que les fluctuations sur le graphique R . Cela indique un sur-réglage. Par conséquent, il faut chercher un réglage visible du processus et l'éliminer avant de collecter d'autres données.

Action résultant de cette analyse

En regardant les notes du régleur de la machine, l'équipe a trouvé qu'un instrument avait été réglé de temps à autre pour éviter une "dérive" du processus. On a donné l'ordre au régleur de ne faire aucun réglage sur cet instrument pendant la nouvelle collecte de données. Le résultat apparaît sur la figure 19.

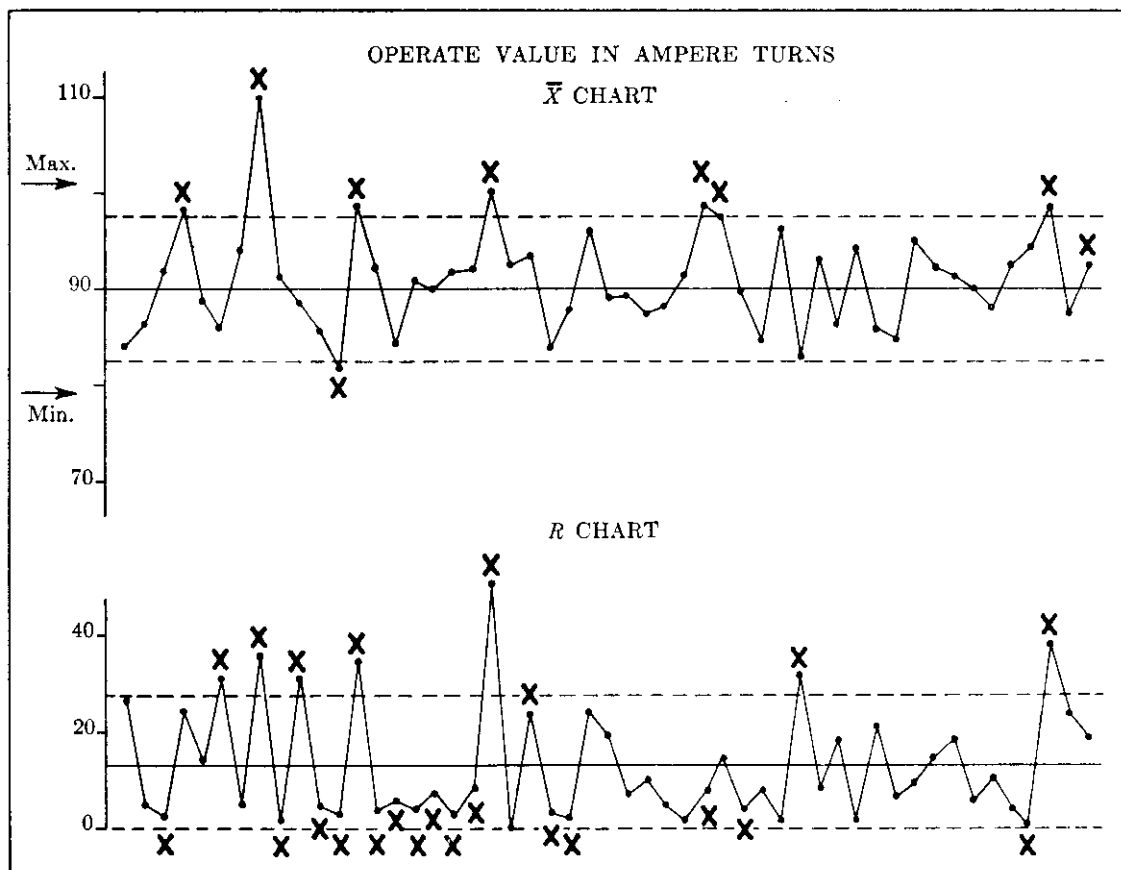


Figure 19. Second graphique Xb et R dans une étude de capacité de processus.

Analyse statistique de la figure 19

Ce graphique montre l'effet de l'élimination d'un réglage. Le profil Xb est plus stable, ce qui montre que le réglage de l'instrument était l'une des variables de contrôle. En revanche le graphique R montre l'effet opposé. Ceux qui n'ont pas l'habitude de lire les graphiques de contrôle peuvent penser que ce profil est pire que le précédent.

Néanmoins, ce graphique R contient la clé pour résoudre le problème. On peut le voir en comparant les graphiques R des deux figures. Le premier profil était obscur et impossible à interpréter. Le second est anguleux et clair ; il est facile à interpréter. Sa forme montre que l'une des principales variables est éliminée.

Ce phénomène est semblable au filtrage du bruit dans un circuit électrique. Quand une partie du bruit (l'inflation) a été éliminée, le signal peut passer plus clairement.

Pour interpréter le graphique R de la figure 19, il faut procéder ainsi :

1. Le profil a été reconnu aussitôt comme "instable". Ce peut être l'effet d'une cause unique agissant sur le processus de façon irrégulière, ou bien l'effet de plusieurs causes agissant ensemble. La première chose à faire est de chercher dans le processus des formes instables de mélanges.
2. Nous verrons au chapitre VI que les formes instables de mélanges sont provoquées par la présence simultanée de plusieurs distributions. Quand elles apparaissent sur le graphique R , comme on le voit ici, c'est que les échantillons viennent au hasard de plusieurs sources combinées. Cela n'a pas été fait délibérément. S'il y a des mélanges dans le processus, c'est provoqué par quelque chose dont on n'a pas conscience.
3. Certaines causes possibles de mélanges peuvent être éliminées rapidement. Les autres doivent être soigneusement vérifiées.

Action résultant de cette analyse

L'équipe a vérifié tous les dispositifs mécaniques concernant le positionnement ou la fixation des assemblages. On a changé l'une des fixations et refait l'alignement magnétique de certaines pièces. Le résultat apparaît sur la figure 20.

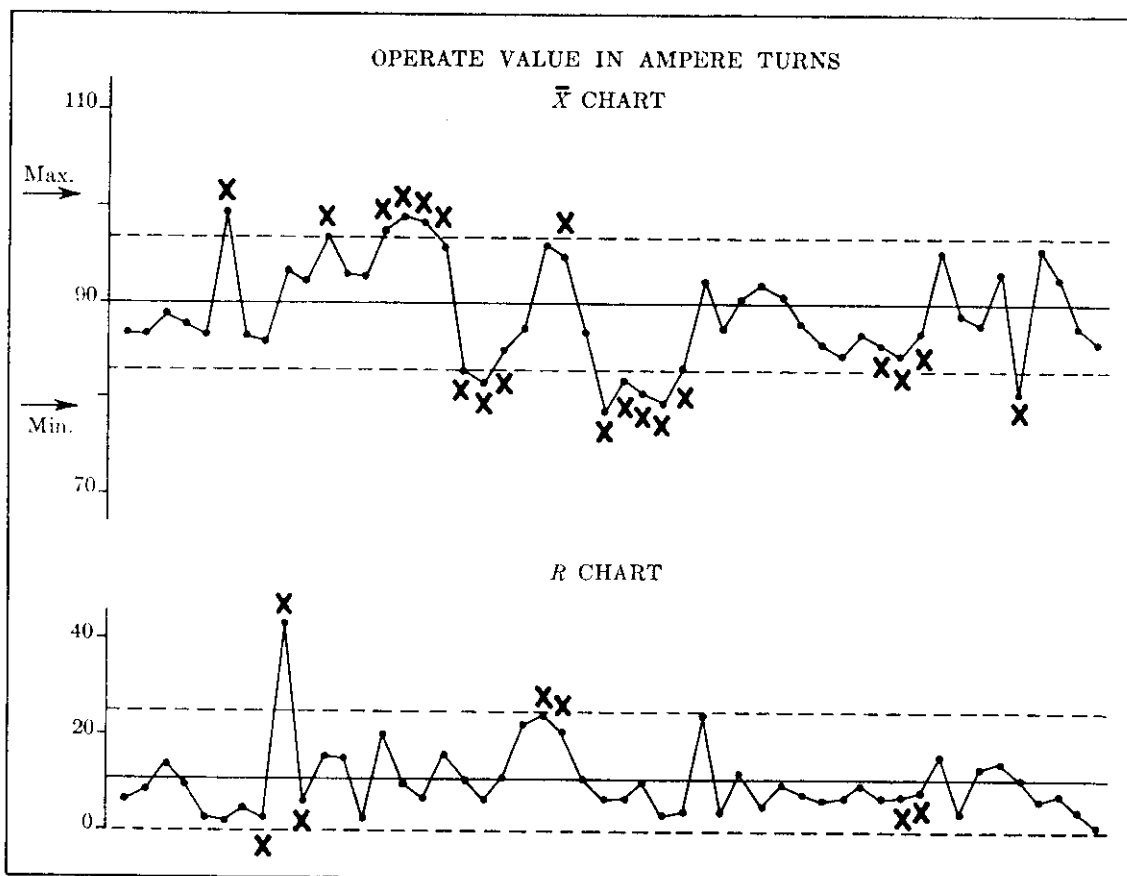


Figure 20. Troisième graphique Xb et R dans une étude de capabilité de processus.

Analyse statistique de la figure 20

Ce graphique montre l'effet de l'amélioration du positionnement et de l'alignement. Une grande partie de l'instabilité sur le graphique R a disparu. Le graphique Xb montre aussi des fluctuations plus petites, qui se répètent suivant des cycles plus ou moins réguliers.

Les cycles étaient présents sur les deux premiers profils. Mais il aurait été presque impossible de les reconnaître à cause de la présence d'autres variables, plus grandes et plus irrégulières.

Il est assez facile de tracer la cause des cycles. On a trouvé qu'ils étaient associés au *temps de refroidissement observé* avant d'enlever les assemblages d'un certain mandrin.

On peut lire beaucoup de choses sur un graphique de contrôle quand les profils deviennent plus simples. Dans ce cas par exemple, les cycles du graphique *Xb* tendent à "suivre" ceux du graphique *R*. C'est ce qui arrive souvent quand l'opérateur a tendance à raccourcir une opération.

Action résultant de cette analyse

L'ingénieur a installé une minuterie automatique pour éviter que l'opérateur retire trop vite les assemblages. Le résultat apparaît sur la figure 21.

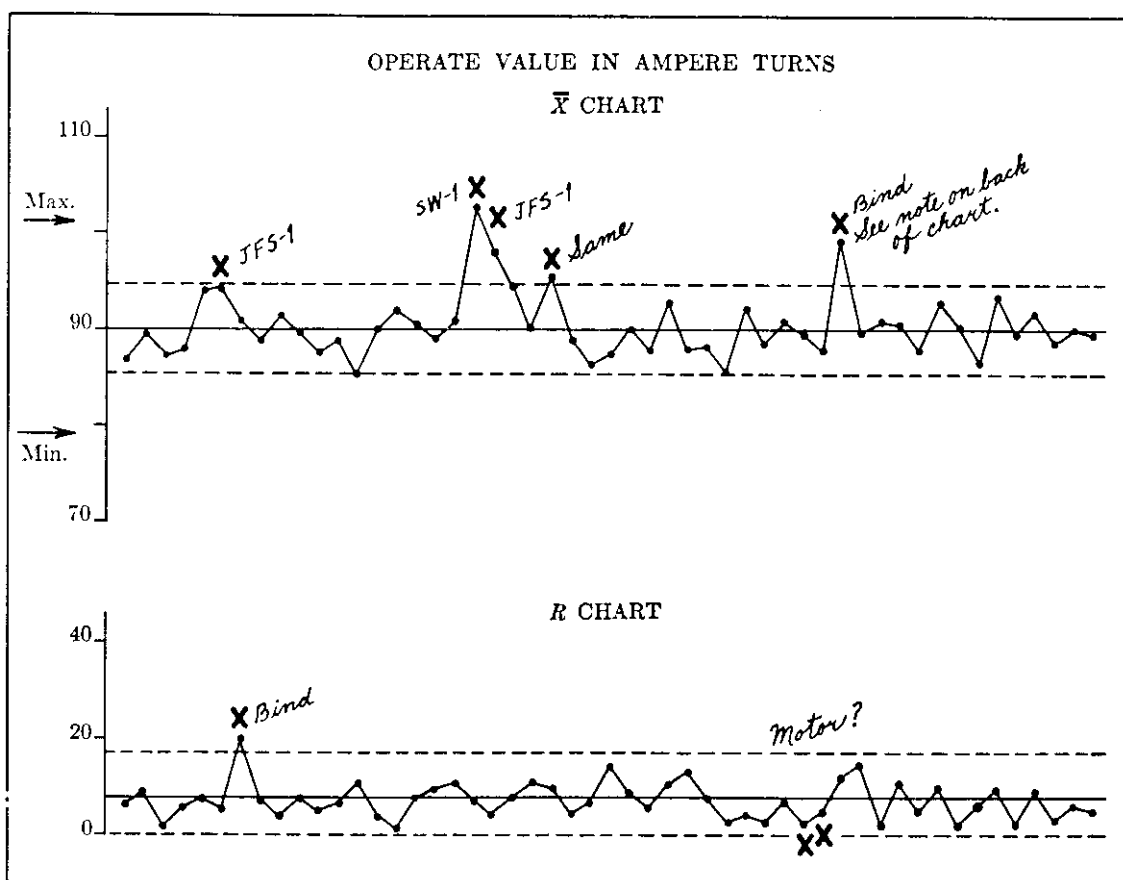


Figure 21. Quatrième graphique *Xb* et *R* dans une étude de capabilité de processus.

Analyse statistique de la figure 21

Ce graphique montre l'effet de l'installation d'une minuterie automatique. Un seul point est hors contrôle. Ceci indique que la plupart des grandes causes attribuables ont été éliminées. D'autre part, il est facile de voir les causes résiduelles, car elles apparaissent isolément. Dans cet exemple, on a trouvé que plusieurs points hauts étaient provoqués par un trop fort serrage.

Action résultant de cette analyse

L'ingénieur a changé la position des moteurs sur les têtes afin de diminuer le serrage des assemblages. Le résultat apparaît sur la figure 22.

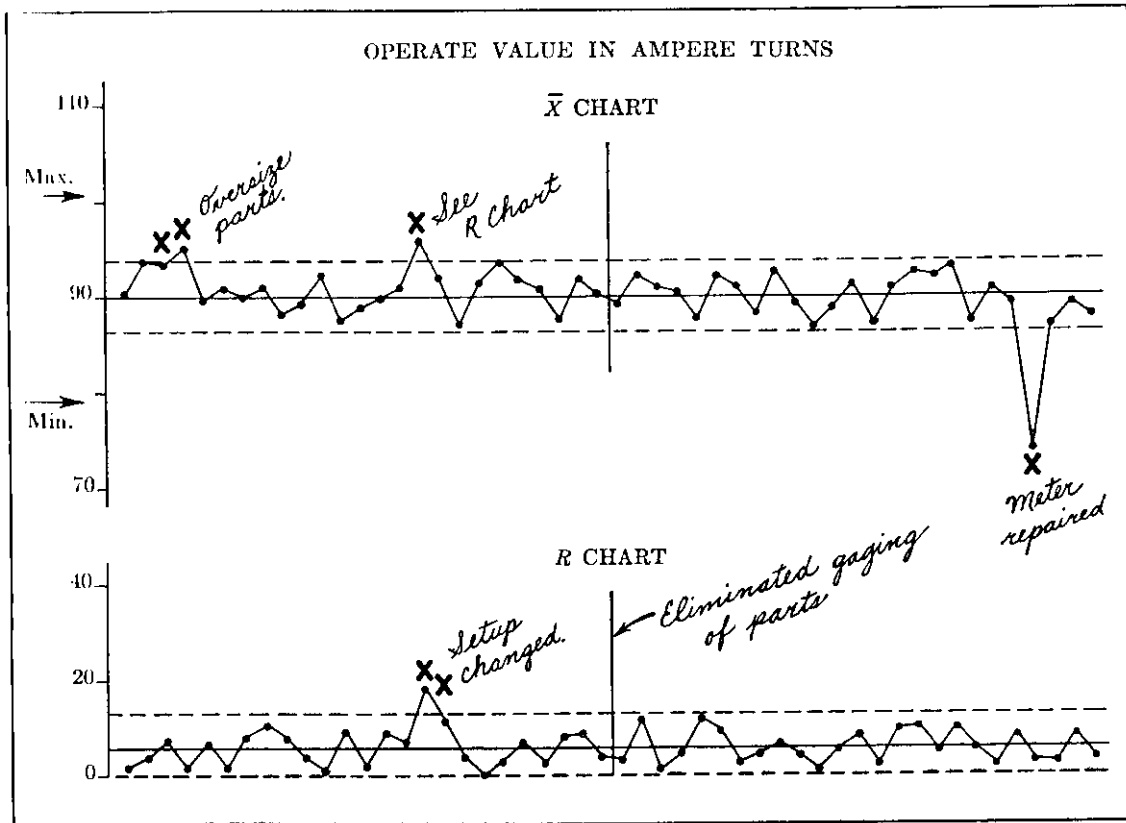


Figure 22. Cinquième graphique $X\bar{}$ et R dans une étude de capabilité de processus.

Analyse statistique de la figure 22

C'est le cinquième graphique de l'étude. Il montre peu de changements par rapport au quatrième. Le niveau du graphique R a baissé légèrement, ce qui traduit l'effet de la relocalisation des moteurs. L'atelier est capable maintenant de trouver les causes quand des points hors contrôle apparaissent.

Capabilité du processus

Valeur centrale = 90 ampères-tours

Sigma = 2,8 ampères-tours

Etendue = $90 \pm 8,4$ ampères-tours

La spécification demande 90 ± 11 ampères-tours. Le processus est maintenant capable de tenir la spécification facilement et économiquement.

Notes sur les résultats

A l'origine, la distribution avait au minimum une dispersion de ± 25 ampères-tours, et 40 % des produits étaient hors tolérances.

La réduction de coût a été obtenue par (a) moins de défectueux, (b) une plus grande production horaire, et (c) moins d'inspections. La fiabilité du produit a été améliorée.

Les informations sur la tête N°6 ont été appliquées aux autres têtes, qui ont toutes été pourvues de graphiques de contrôle.

Les graphiques sont maintenant utilisés pour évaluer l'effet des changements du processus. Par exemple l'atelier voulait éliminer 100 % des inspections de certaines pièces détachées. Les graphiques n'ayant trouvé aucun effet négatif, le changement a été fait.

Conclusion

Cette étude a été relativement longue. Dans certains cas, les causes sont suffisamment simples pour apparaître dès le premier graphique.

8. Etude de performance

Les études de performances peuvent remplacer temporairement des études de capacité de processus. Elles sont faites en sélectionnant des données pendant une certaine période, en calculant les limites de contrôle et en déterminant si les données sont sous contrôle. Ceci permet à l'ingénieur de tirer quelques-unes des conclusions qu'il tirerait d'une étude de capacité de processus, et s'avère parfois utile jusqu'à ce qu'une étude plus complète puisse être faite.

Une série d'études de performances peut être équivalente à une étude de capacité de processus, pourvu que la détection et l'élimination des causes soient faites tout au long des études successives. Les ingénieurs y ont souvent recours pour mettre en place des graphiques de contrôle dans un atelier. La procédure est la suivante :

1. Obtenir suffisamment de données pour environ 20 points sur le graphique. Calculer les limites de contrôle et déterminer si le profil est sous contrôle. Mettre en place temporairement un graphique de contrôle dans l'atelier en accord avec ces informations.
2. Travailler avec l'atelier pour mettre le graphique sous contrôle ou améliorer son profil. Quand le profil s'améliore, sélectionner une période de données d'environ 20 points et calculer de nouvelles limites de contrôle. Utiliser ces limites pour un second graphique de contrôle d'atelier qui sera temporaire.
3. Répéter ce processus à intervalles réguliers afin de profiter des améliorations progressives.

La figure 23 compare une étude de performance avec une étude de capacité de processus.

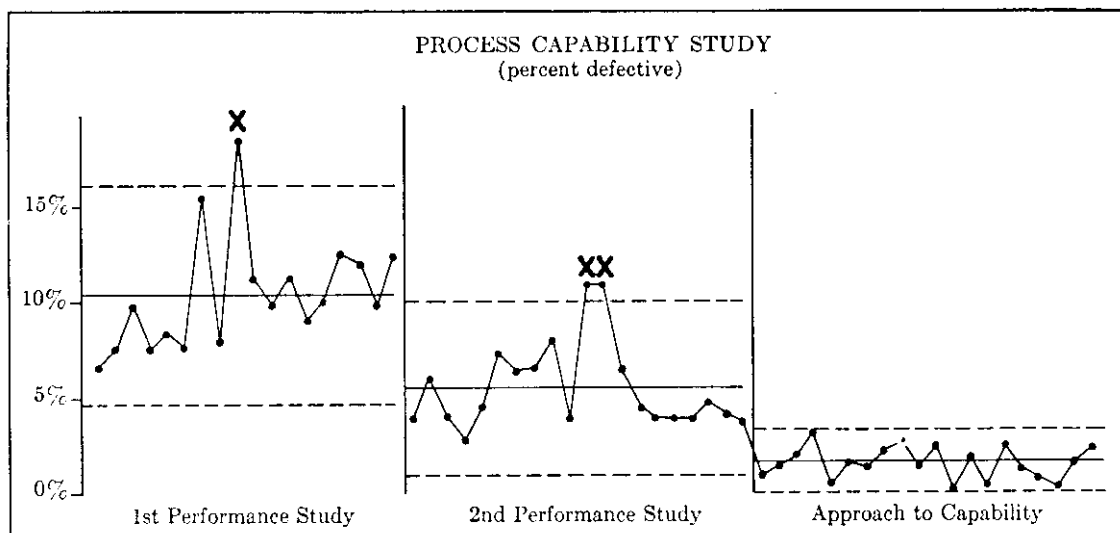


Figure 23. Une succession d'études de performances peut être équivalente à une étude de capacité de processus.

II

Plans d'expériences

Ce chapitre a pour objet les principes élémentaires de la méthode statistique des plans d'expériences¹³. L'ingénieur est présumé familier avec la pratique des études de capabilité des processus qui est traitée dans le premier chapitre. On suppose qu'il sait parfaitement que des différences apparentes dans les données peuvent avoir ou ne pas avoir une signification, et qu'il est nécessaire d'appliquer aux données des tests statistiques pour découvrir s'il existe des effets significatifs.

Les pages qui suivent décrivent trois types de plans d'expériences avec lesquels les ingénieurs et le personnel d'atelier sont appelés à travailler plus souvent qu'avec d'autres.

Bien qu'il soit question de méthodes statistiques autres que les graphiques de contrôle, ce chapitre met l'accent sur l'analyse des graphiques de contrôle. Il considère les plans d'expériences comme une étape dans une étude de capabilité de processus. Il insiste particulièrement sur la recherche des causes qui sont si profondément cachées qu'il est très difficile de les découvrir avec d'autres méthodes.

1. Place des plans d'expériences dans une étude de capabilité

Rappel de la théorie de l'étude de capabilité de processus

Les variations du processus sont séparées dans des graphiques de contrôle selon les portions normales et anormales. La portion anormale est étudiée afin d'en identifier les causes et de les éliminer. Quand les causes sont supprimées, le processus est réduit à sa véritable capabilité. Il est clair que l'étape cruciale de cette étude est *d'enquêter et d'identifier les causes*. Si l'ingénieur ne peut pas franchir cette étape, il ne pourra pas obtenir de bons résultats.

Dans la majorité des cas, quand l'ingénieur observe les profils des graphiques de contrôle, il trouve des raisons évidentes aux changements. Avec sa connaissance du métier, il doit pouvoir dire ce qui provoque des variations anormales. Il doit apprendre à identifier et à interpréter les 14 types de profils qui sont expliqués au chapitre VI.

Si ce n'est pas suffisant, l'ingénieur peut recourir aux techniques dites de "décomposition". Il sépare les données en fonction de différentes sources. Il utilise des diagrammes de dispersion ou des arrangements de tendances pour trouver des corrélations.

Finalement, si toutes les ressources ordinaires échouent et si les causes restent cachées si profondément qu'il est incapable de les trouver, il peut utiliser un plan d'expérience pour casser la variation en morceaux et trouver la solution. Les observations obtenues dans les

¹³ NdT. Depuis la première édition du manuel en 1956, l'objet de ce chapitre est devenu un sujet classique qui se trouve dans la plupart des cours de statistique de niveau supérieur. Ceci m'a permis d'en abrégé la présentation, ainsi que celle des chapitres IV et V. Voir : *Statistics for Experimenters* de George Box, John Hunter et William Hunter, Wiley & Sons, 2005.

étapes précédentes de l'analyse sont vitales pour réaliser ce plan d'expérience. L'omission des étapes précédentes conduit souvent à l'échec.

Comparaison entre un plan d'expérience et une étude de capabilité de processus

Une étude de capabilité de processus peut être considérée comme un plan d'expérience à un facteur. Le seul facteur étudié est le temps (ou tout autre facteur comme un numéro d'ordre mis en abscisse du graphique de contrôle). Au contraire, un plan d'expérience peut comporter plusieurs facteurs qui seront étudiés conjointement. Les données sont arrangées et réarrangées pour que l'étude soit en accord avec ces facteurs. Le terme "plan d'expérience" vient du fait que les données sont collectées de manière à permettre ces réarrangements.

D'un autre point de vue, le plan d'expérience est une technique beaucoup plus limitée que l'étude de capabilité de processus. Celle-ci est concernée par les effets de tous les facteurs de variation de la caractéristique étudiée. La règle selon laquelle des études de capabilité concernent plusieurs points dans le temps vient du fait qu'il est nécessaire de permettre à des changements qui n'ont pas été anticipés ou pas voulus d'apparaître dans le processus. Au contraire, dans un plan d'expérience, on essaye d'éliminer tous les facteurs qui n'ont pas été sélectionnés pour l'étude.

Le plan d'expérience est une technique puissante, très utile quand on l'emploie dans des circonstances appropriées et avec des précautions appropriées. Toutefois, c'est une technique à utiliser avec réserve, et à ne substituer en aucune circonstance à une étude de capabilité de processus.

Signification des mots "expérience" et "techniques expérimentales"

Toute étude de capabilité de processus peut être considérée comme une expérience. Son but est d'apprendre ce que le processus est capable de faire. En changeant quelques éléments dans le processus et en observant les effets sur les graphiques, on peut utiliser l'étude de capabilité de processus comme une technique expérimentale.

D'ordinaire cependant, quand on parle d'une "expérience" sur un processus, on pense à quelque chose de plus limitée qu'une étude de capabilité, plus concerné par la recherche. On fait parfois une expérience avant même de chercher à découvrir comment serait le meilleur processus. Les techniques expérimentales permettent d'étudier les effets de plusieurs variables simultanément, avec leurs interactions. Ces techniques sont utiles pour perturber délibérément des causes qui sont en équilibre, mettre de côté les effets des causes cachées, et étudier les effets possibles de certaines variables pendant le développement du produit.

Types d'expériences

Toutes sortes d'expériences sont faites sur les processus industriels, depuis des changements informels et non-officiels jusqu'à des plans d'expériences formels qui peuvent durer des mois. Voici une liste de quelques-unes de ces expériences, classées par ordre de formalisme croissant.

1. Méthode "trial and error". On introduit un changement dans le processus pour voir le résultat.
2. Production de "lots spéciaux" plus ou moins bien identifiés.
3. Productions pilotes, avec des éléments placés dans le processus de manière délibérée pour voir si l'on obtient les effets attendus.
4. Un plan d'expérience simple consistant à comparer deux méthodes.

5. Un plan d'expérience plus compliqué avec plusieurs facteurs.
6. Un plan d'expérience encore plus compliqué permettant d'étudier les interactions entre les facteurs.
7. Un plan d'expérience avec de nombreux facteurs disposés de façon compliquée.
8. Un plan d'expérience global de type "recherche opérationnelle".

Les conclusions des deux premières expériences peuvent être testées sur des graphiques de contrôle. Les productions pilotes (type 3) peuvent être analysées avec une étude de capacité de processus. Les expériences de type 4, 5 et 6, qui comportent un nombre limité de facteurs et des interactions simples, seront discutées dans le présent chapitre. Le manuel ne traitera pas des deux dernières.

2. Comparaison de deux méthodes

L'expérience la plus simple qu'un ingénieur peut être conduit à faire, qui est aussi l'expérience la plus commune dans l'industrie, consiste à comparer deux machines ou deux méthodes. Le contexte est le suivant :

L'ingénieur a conçu la Méthode 1 dans l'espoir qu'elle sera supérieure à la Méthode 2. La variable qui l'intéresse est une certaine propriété électrique. Il veut que les mesures soient aussi uniformes que possible. Il met en œuvre les deux méthodes et obtient pour chacune d'elles une vingtaine de données.

Une simple comparaison des deux ensembles de données ne lui permet pas de dire si la méthode 1 est meilleure que la méthode 2. Il décide de faire un test statistique. Son but est de pouvoir prendre une décision : adopter la Méthode 1 ou bien l'abandonner et essayer autre chose.

Méthodes d'analyse

La méthode analytique recommandée dans ce manuel est le graphique de contrôle. Cependant, cet ingénieur a quelques connaissances sur des techniques qui sont souvent utilisées pour analyser des données expérimentales : les tests de normalité, les tests sur la variance, les tests sur la moyenne. Il décide donc de passer à des méthodes statistiques.

Analyse par des méthodes statistiques formelles

Les méthodes statistiques formelles exigent certaines hypothèses, notamment :

1. Normalité de la distribution
2. Equivalence des variances
3. Constance du système de causes

Des tests existent pour les deux premières hypothèses. En revanche, le seul moyen de tester la constance du système de causes est l'utilisation d'un graphique de contrôle. Dans une analyse classique, on suppose ordinairement que le système de causes n'a pas changé pendant la collecte des données, parce qu'on a le sentiment que toutes les conditions sont restées constantes.

Conclusions préalables

Les tests ont permis de conclure que les données des deux méthodes peuvent être traitées comme provenant d'une distribution normale, et que les variances des deux méthodes peuvent être considérées comme égales. L'ingénieur considère en outre que les deux

systèmes de causes sont restés constants. Dans ces conditions, il peut faire un test pour savoir s'il existe une différence significative entre les moyennes.

Résultat du test des moyennes

Le test indique clairement qu'il n'existe pas de différence significative entre les moyennes des échantillons provenant de la Méthode 1 et de la Méthode 2. L'ingénieur devrait en conclure que les deux méthodes sont équivalentes.

Analyse du graphique de contrôle

Le graphique de contrôle présente certains avantages sur d'autres méthodes d'analyse :

1. Il prend en compte l'ordre dans lequel les données ont été saisies.
2. Il n'impose pas les hypothèses de normalité, d'équivalence des variances et de constance du système de causes.

Dans certaines circonstances, le graphique de contrôle peut donc donner des résultats différents de ceux des méthodes statistiques formelles.

L'ingénieur a donc construit un graphique Xb et R . Les données étant en nombre limité, il a formé des groupes de 2 mesures. Le graphique, représenté sur la figure 24, s'interprète comme tout autre graphique de contrôle.

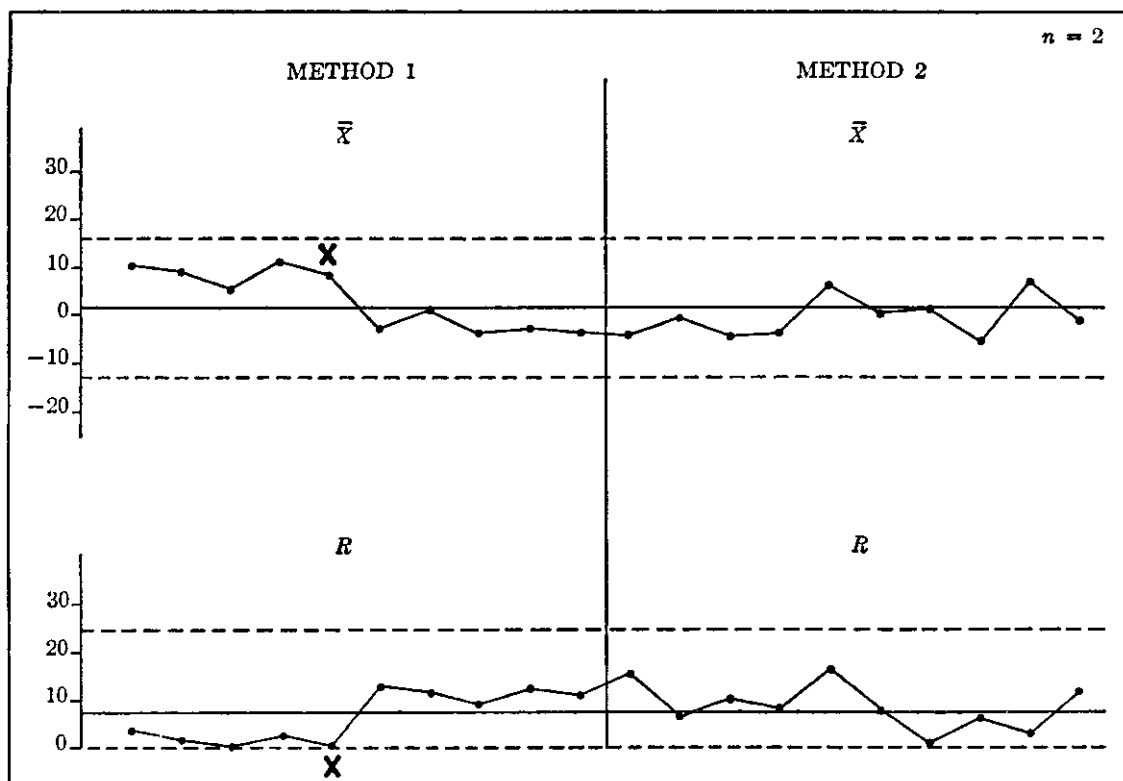


Figure 24. Graphique de contrôle pour la Méthode 1 et la Méthode 2

Les profils Xb et R de la Méthode 1 sont hors contrôle. Nous parvenons donc à la conclusion que les données de la Méthode 1 ne peuvent pas être considérées comme issues d'une population normale, et que le système de causes n'est pas constant. Mais la Méthode 1 serait supérieure à la Méthode 2 si les conditions de la première portion de l'expérience étaient maintenues.

Par conséquent, si l'ingénieur parvient à découvrir la variable qui a modifié les résultats de la seconde portion, la Méthode 1 sera plus uniforme que la Méthode 2 et donnera de meilleures performances.

Résultats pratiques de l'étude du graphique de contrôle

En cherchant ce qui était arrivé dans la Méthode 1, l'ingénieur a vu qu'une petite pièce était bloquée. Après avoir réparé le défaut, il a obtenu des résultats uniformes et très supérieurs à ceux de la Méthode 2.

Comparaison entre le graphique de contrôle et d'autres méthodes statistiques

Malgré le fait que cette expérience a donné des conclusions différentes, Il n'y a pas de conflit théorique entre le graphique de contrôle et d'autres méthodes statistiques. L'accord aurait été parfait si le système de causes de la Méthode 1 avait été constant. Pour cette raison, il est souhaitable d'utiliser de préférence le graphique de contrôle pour analyser les expériences décrites dans ce manuel.

3. Erreur de mesure

Contexte

Voici une expérience un peu plus compliquée que la précédente. Elle implique deux facteurs différents dont les effets doivent être étudiés séparément. Le contexte est le suivant :

Deux instruments sont disponibles pour mesurer un certain produit. Le premier instrument est réputé meilleur que le second. Toutefois, on a mesuré le produit avec les deux instruments afin de les comparer. Les premiers résultats ne montrent pas qu'un instrument est meilleur que l'autre. Nous voulons faire un test statistique sur les deux instruments.

Pour résoudre le problème, il est nécessaire de faire un "plan d'expérience" qui séparera les erreurs de mesure des variations du produit. Ce n'est plus une expérience dans laquelle on s'intéresse seulement aux variations du produit.

Données initiales

Au départ, 50 unités du produit ont été mesurées avec l'Instrument 1, puis les mêmes unités ont été mesurées dans le même ordre avec l'Instrument 2. Toutes les mesures ont été faites soigneusement par le même opérateur.

L'ingénieur a pris les données pour faire un graphique de contrôle \bar{X} et R . Il a porté les données dans l'ordre initial des mesures, celles de l'Instrument 1 précédant celles de l'Instrument 2. En étudiant le graphique, il a été déçu de voir qu'il n'y avait apparemment pas de différence entre les instruments. Les données étaient stables.

A la réflexion, la ressemblance entre les deux parties du graphique n'avait rien de surprenant. Le graphique montrait simplement des résultats de mesures faites sur les mêmes unités du produit et dans le même ordre avec deux instruments. L'effet de l'instrument de mesure n'était pas assez grand pour masquer les variations du produit.

Plan d'expérience pour l'étude d'une erreur de mesure

Le plan d'expérience pour ce type d'étude est très simple. Il suffit de mesurer une nouvelle fois, et dans le même ordre, les mêmes unités du produit. La première série de mesures sera notée A, la seconde sera notée B. On s'intéressera pour l'instant à l'Instrument 1.

Quatre colonnes sont préparées sur une feuille de travail. Les mesures A sont inscrites sur la colonne de gauche ; les mesures B sont inscrites sur la colonne voisine. Les deux autres colonnes sont destinées aux valeurs Xb et R d'un graphique de contrôle.

Il est maintenant possible de former des échantillons de deux unités en prenant les mesures horizontalement au lieu de les prendre verticalement, en sorte que la mesure A et la mesure B qui sont écrites sur une même ligne forment un groupe.

Cette procédure est répétée de la même façon pour l'Instrument 2.

Un graphique de contrôle a été fait pour chaque instrument. Ces graphiques apparaissent sur les figures 26 et 27.

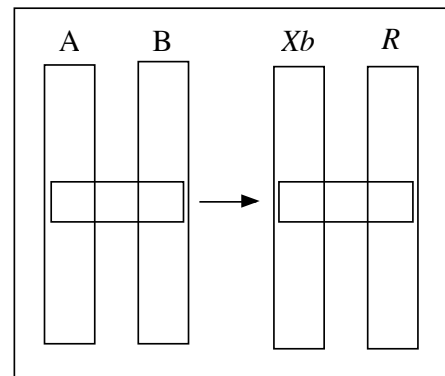


Figure 25. Calcul de Xb et R pour l'étude de l'erreur de mesure.

Graphique pour l'étude de l'erreur de mesure

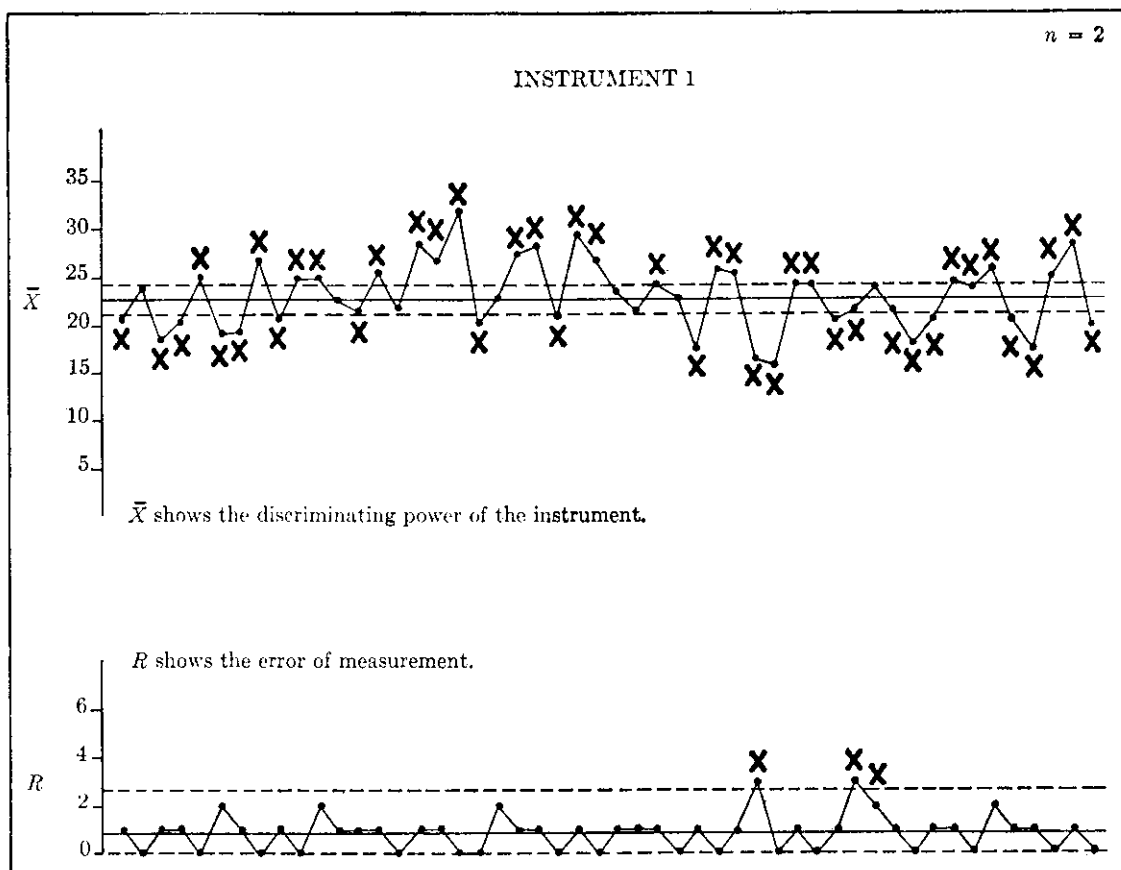


Figure 26. Graphique de l'erreur de mesure de l'instrument 1.

Le sous-graphique R montre directement la grandeur de l'erreur de mesure. C'est parce que les valeurs de R représentent les différences entre des mesures faites par le même instrument sur la même pièce du produit. L'instabilité signifie que l'opérateur a des difficultés en prenant la mesure.

Le sous-graphique Xb montre le pouvoir discriminant de l'instrument. Les limites de contrôle, calculées à partir de R , représentent l'aptitude de l'instrument à distinguer une pièce d'une autre.

Un bon instrument de mesure doit avoir des limites de contrôle étroites, comme celui-ci, en sorte que presque tous les points sont en dehors des limites. C'est totalement différent de ce qui est attendu du graphique de contrôle ordinaire.

Comparaison des instruments

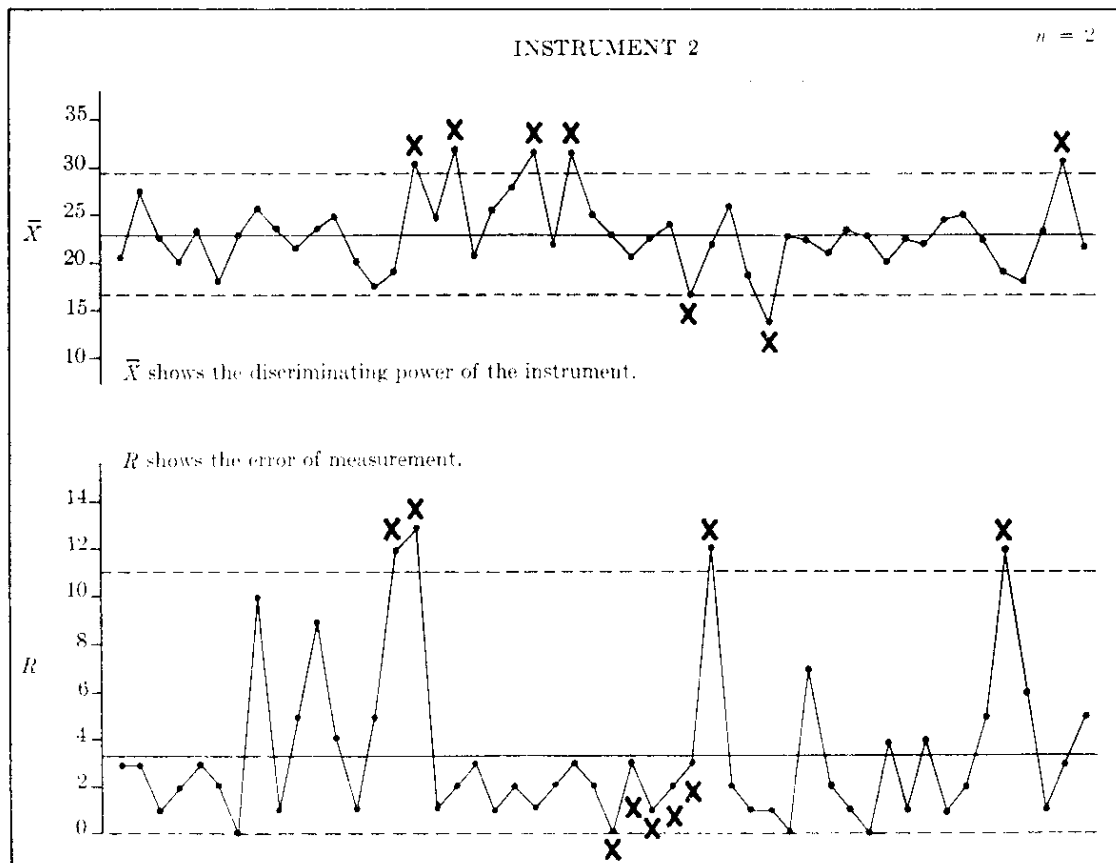


Figure 27. Graphique de l'erreur de mesure de l'instrument 2.

On voit au premier coup d'œil que l'erreur de mesure de l'instrument 2 est beaucoup plus grande que celle de l'instrument 1. Non seulement elle est au moins quatre fois plus élevée, mais les indications d'instabilité y sont beaucoup plus nombreuses. L'opérateur qui utilise cet instrument aura beaucoup plus de problèmes.

Cette fois, les limites de contrôle du sous-graphique Xb sont très larges, à cause de la valeur excessive de l'erreur de mesure. Il en résulte que le pouvoir discriminant de l'instrument 2 est nettement plus faible que celui de l'instrument 1.

Autres méthodes statistiques

On peut analyser l'erreur de mesure avec d'autres méthodes statistiques. Toutefois, le graphique de contrôle a pour avantages :

- (a) Sa simplicité
- (b) Un calcul immédiat
- (c) Une présentation graphique

4. Expérience à quatre facteurs

Contexte

Cette expérience est plus compliquée que les précédentes. Elle comporte quatre facteurs différents dont les effets doivent être séparés et étudiés. Le contexte est le suivant :

Une usine fabrique un produit avec un rendement assez faible. Plusieurs études de capabilité de processus ont été faites sans grand succès, avec des résultats parfois contradictoires. Elles ont néanmoins identifié des facteurs qui pourraient être importants dans certaines conditions. La situation demande un type de plan d'expérience permettant d'étudier simultanément plusieurs variables.

Plan d'expérience

En faisant un plan d'expérience adéquat, il était possible d'étudier quatre facteurs en une seule expérience qui demandait seulement 16 pièces du produit. Les variables furent étiquetées A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, pour constituer un "bloc équilibré" représenté par un carré de 16 cases. Ce plan est un "plan factoriel complet à deux niveaux".

Dans le déroulement du plan, chaque variable peut être étudiée séparément, mais il est possible également d'étudier des combinaisons de variables. Par exemple C2 peut avoir un certain effet avec A2 mais un effet totalement différent avec A1. De tels effets se nomment des "interactions".

Il peut y avoir aussi des effets non identifiés qui ne sont pas attribuables à des combinaisons de variables. Ils sont connus sous le nom de "résidu".

Méthode d'analyse

Une expérience de ce type est analysée par la méthode nommée "analyse de variance". Cette méthode consiste à étudier toutes les variances trouvées dans les données et à les partager en sorte qu'il est possible de distinguer la variance associée à chaque variable et à chaque combinaison de variables.

		A1		A2	
		B1	B2	B1	B2
C1	D1	3	4	0	6
	D2	0	5	-1	4
C2	D1	3	-4	4	-1
	D2	5	0	3	2

A1 - Nickelage standard
 A2 - Nickelage fin
 B1 - Activation normale
 B2 - Activation spéciale
 C1 - Nettoyage normal
 C2 - Nettoyage spécial
 D1 - Temps de séchage court
 D2 - temps de séchage long

Figure 28. Résultats de mesure sur les 16 pièces du produit.

L'analyse de variance peut se faire suivant deux méthodes différentes :

1. La méthode de la somme des carrés
2. La méthode du graphique de contrôle

Ces méthodes donnent les mêmes résultats. Nous allons les comparer.

METHODE DE LA SOMME DES CARRÉS

On prépare une feuille de calcul sur laquelle sont portées les sommes des carrés des variances de toutes les sources de variation. Ce sont (1) les facteurs individuels : A, B, C, D, (2) les combinaisons de deux facteurs : AB, AC, AD, BC, BD, CD, et (3) les combinaisons de trois facteurs : ABC, ABD, ACD, BCD.

On prépare ensuite un tableau d'analyse de variance sur lequel sont portés les sommes des carrés et les *carrés moyens*, valeurs obtenues avec des calculs assez compliqués. On calcule le résidu, qui est l'estimation de la variance résiduelle si toutes les sources de variations étaient supprimées. Il existe pour cela plusieurs méthodes. Enfin le rapport carré moyen / résidu est comparé à une table statistique (table de F) qui indique si l'effet considéré est "significatif" avec un certain niveau de confiance.

Conclusion de l'analyse du tableau

Le résultat de cette analyse est qu'il se passe une chose "extrêmement significative" avec l'interaction BC. Mais cette méthode ne dit pas comment les effets interfèrent.

METHODE DU GRAPHIQUE DE CONTROLE

De nombreuses informations sont disponibles quand on utilise un graphique de contrôle pour analyser des expériences comportant plusieurs facteurs. Les graphiques de contrôle ont l'avantage (a) de la simplicité et (2) de l'information contenue dans les profils. Ils sont habituellement plus faciles à comprendre et à interpréter que les autres formes d'analyse. Toutefois, il est nécessaire d'apprendre certaines nouvelles techniques relatives au calcul des limites de contrôle et au pointage.

Les explications qui suivent ne concernent que la partie de la méthode qui est directement comparable avec la méthode de la somme des carrés présentée plus haut. D'autres informations sont disponibles dans les cours d'ingénierie avancée qui sont donnés par Western Electric dans ses différents établissements.

Base de l'analyse

Quand des graphiques de contrôle sont utilisés pour analyser des expériences comportant plusieurs facteurs, les limites de contrôle sont habituellement basées sur le "résidu" plutôt que sur la série de données. Ceci est la seule différence avec d'autres utilisations des graphiques de contrôle. Le résultat est le même que dans la méthode de la somme des carrés, mais on l'obtient très facilement à partir du diagramme de la figure 29. Les instructions suivantes s'appliquent à un plan factoriel à deux niveaux.

1. Visualiser les cases hachurées et non hachurées
2. Ajouter les nombres des cases hachurées, puis ceux des cases non hachurées, faire la différence et diviser par 4. Le résidu est la valeur absolue du nombre obtenu.

En suivant un processus analogue, on peut éventuellement retrouver tous les effets qui ont été calculés avec la première méthode.

1. Identifier chaque case sur le diagramme de la figure 30.
2. Calculer les effets en utilisant les formules de la figure 31.

Méthode de construction du graphique

1. Sélectionner deux des facteurs qui semblent particulièrement intéressants à étudier. Dans l'exemple présent, ce sont B et C.

- Chercher ces facteurs dans le guide de construction du graphique de contrôle pour une expérience factorielle¹⁴. On y trouvera (a) les titres à mettre en haut du graphique, (b) les identifications à mettre en bas du graphique et (c) l'ordre dans lequel les points doivent être mis.

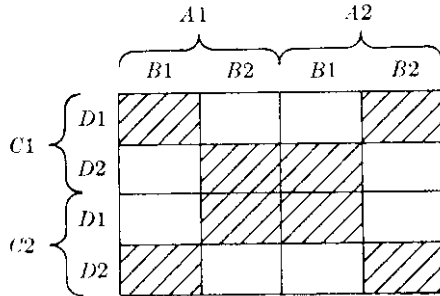


Figure 29. Diagramme pour le calcul du résidu.

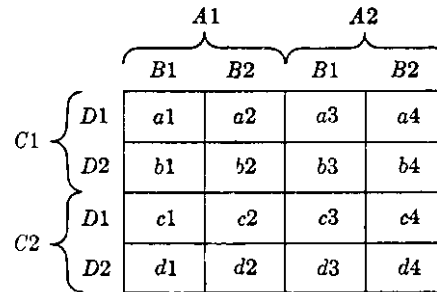


Figure 30. Identification des cases.

Le graphique est un graphique Xb et R avec des groupes de 2. Il comporte 8 points, chaque groupe est composé de D1 et D2. Des limites correspondant aux niveaux de confiance 1 % et 5 % ont été ajoutées aux limites standard 3 sigma.

<i>Main Effects</i>	
A	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a3 - b2 + b4 - c2 + c4 - d1 + d3) = + .25$
B	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a2 - b3 + b4 - c3 + c4 - d1 + d2) = - .25$
C	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 - a4 - b2 - b3 + c1 + c4 + d2 + d3) = -2.25$
D	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 - a4 + b1 + b4 - c2 - c3 + d2 + d3) = + .75$
<i>First Order Interactions</i>	
AB	Res. + $\frac{1}{2}(+b1 - b2 - b3 + b4 + c1 - c2 - c3 + c4) = +2.75$
AC	Res. + $\frac{1}{2}(+a2 - a4 + b1 - b3 - c2 + c4 - d1 + d3) = +1.75$
AD	Res. + $\frac{1}{2}(+a2 - a4 - b2 + b4 + c1 - c3 - d1 + d3) = -1.25$
BC	Res. + $\frac{1}{2}(+a3 - a4 + b1 - b2 - c3 + c4 - d1 + d2) = -8.75$
BD	Res. + $\frac{1}{2}(+a3 - a4 - b3 + b4 + c1 - c2 - d1 + d2) = +2.25$
CD	Res. + $\frac{1}{2}(+a2 + a3 - b2 - b3 - c2 - c3 + d2 + d3) = +3.25$
<i>Second Order Interactions</i>	
ABC	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a2 + a3 - a4 + c1 - c2 - c3 + c4) = + .25$
ABD	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a2 + a3 - a4 + b1 - b2 - b3 + b4) = - .75$
ACD	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a3 + b1 - b3 + c1 - c3 - d1 + d3) = - .75$
BCD	Res. + $\frac{1}{2}(-a1 + a2 + b1 - b2 + c1 - c2 - d1 + d2) = + .75$

Figure 31. Calcul des effets par la méthode du graphique de contrôle.

Analyse du graphique

- La combinaison B2-C2-D1 (activation spéciale - nettoyage spécial - temps de séchage court) qui est au-dessous de la limite inférieure de contrôle doit être évitée.
- Les combinaisons B1-C2 (activation normale - nettoyage spécial) et B2-C1 (activation spéciale - nettoyage normal) qui réagissent au test "4 parmi 5" au-dessus de la limite supérieure de contrôle sont favorables.
- La combinaison B1-C1-D2 (activation normale - nettoyage normal - temps de séchage long) qui est au-dessous de la limite inférieure à 5 % est à éviter de préférence. Un long séchage dans les conditions normales risque de faire aller les choses plus mal.

¹⁴ NdT. Ce guide est disponible dans un autre manuel.

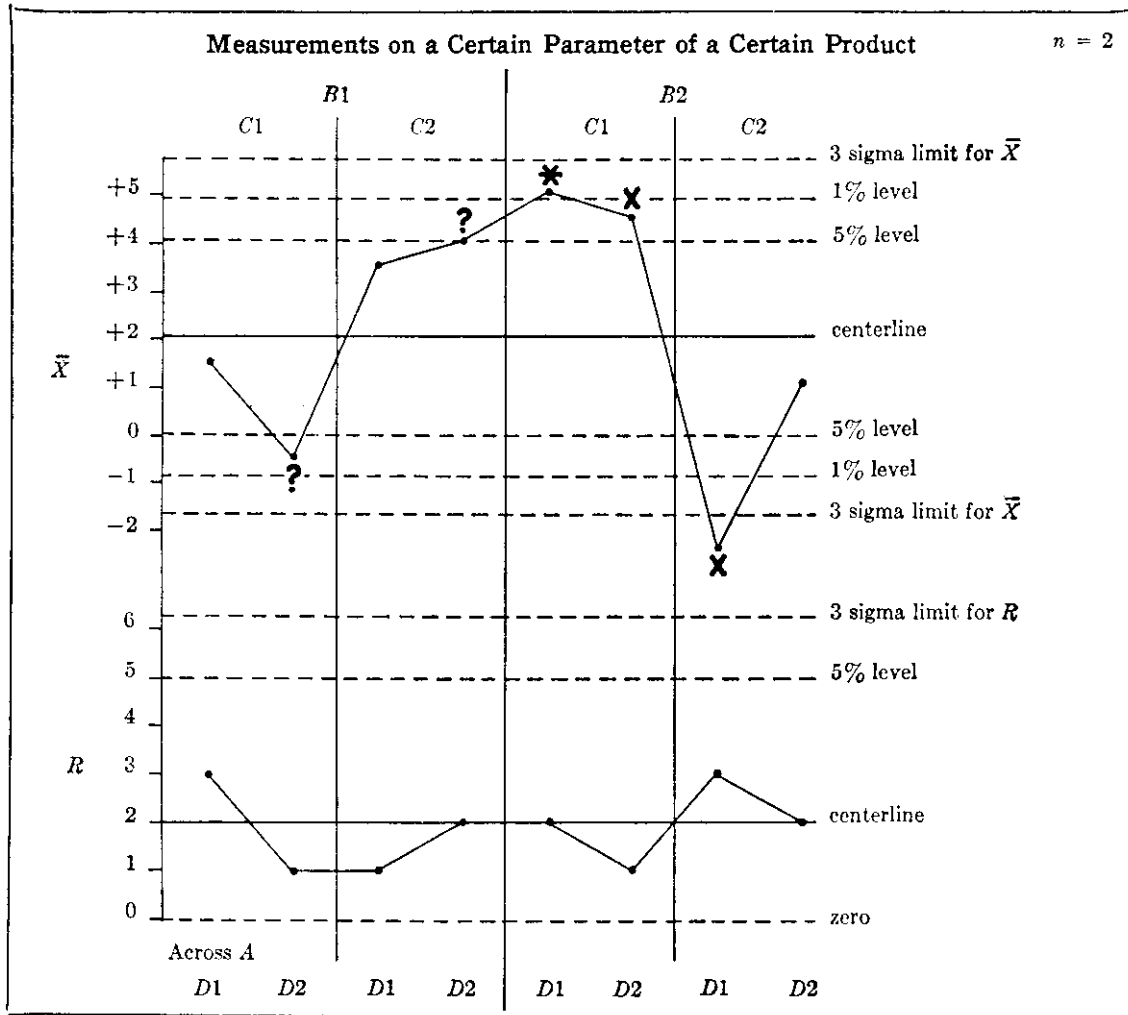


Figure 32. Analyse du graphique de contrôle.

Conclusion de l'étude

1. Il est souhaitable d'utiliser l'activation spéciale, mais seulement si elle est suivie d'un nettoyage normal.
2. L'activation spéciale donne de très mauvais résultats quand elle est suivie d'un nettoyage spécial.
3. Si par hasard il est nécessaire d'utiliser le nettoyage spécial, il faut prolonger le temps de séchage.
4. L'épaisseur du nickelage n'a pas d'importance.
5. Si l'activation normale est utilisée, il faudra probablement faire un nettoyage spécial.
6. Si l'activation normale est utilisée sans nettoyage spécial, il n'est pas conseillé de prolonger le séchage.

Le graphique de contrôle explique les contradictions du début. Les ingénieurs de l'usine disaient qu'un nettoyage spécial était préférable ; c'était en accord avec une partie du graphique. Les ingénieurs de Western Electric disaient le contraire ; c'était en accord avec une autre partie du graphique. L'atelier disait qu'un temps de séchage plus long augmenterait le rendement ; c'était vrai seulement avec une activation spéciale et un nettoyage spécial.

5. Conclusion finale

Toutes les expériences du type discuté dans ce chapitre demandent un nombre minimum de données. Elles doivent être utilisées comme des moyens d'obtenir des indications rapides sur les meilleures voies de recherche. Les variables qui ont été trouvées significatives dans l'expérience sont probablement des variables importantes. On peut les utiliser pour améliorer le processus, réduire les coûts ou expliquer des effets qui restaient inexplicables jusque-là.

D'autre part, les variables qui n'ont pas été trouvées significatives dans l'expérience ne sont pas à négliger. La quantité de données utilisée dans les plans d'expériences peut être suffisante pour établir que certaines variables sont significatives, mais il faut un nombre beaucoup plus grand de données pour établir l'absence de signification. Ceci est vrai autant quand l'expérience est analysée par des graphiques de contrôle que par toute autre méthode.

Dans tous les cas, l'ingénieur doit concevoir ses expériences sur la base des études de capabilité de processus qui ont été faites antérieurement, et il doit vérifier toutes les conclusions de ses expériences en faisant d'autres études de capabilité de processus. Il doit se garder de la tentation de substituer les conclusions rapides de ce type d'expérience à l'analyse plus large et plus fiable qui fait partie d'une étude de capabilité de processus.

III

Spécifications

1. Des spécifications en général

Dans les processus de fabrication, on est intéressé par les caractéristiques de chacune des unités produites. Même lorsqu'on tente d'étudier le processus en prenant des échantillons, comme dans les études de capabilité de processus ou dans les graphiques de contrôle d'atelier, on est intéressé par la distribution globale des individus, et c'est pour cela qu'on utilise des échantillons. Les spécifications sont établies par des ingénieurs R&D ou des ingénieurs produit afin de fixer des restrictions convenables sur :

- les unités individuelles,
- la distribution des unités individuelles.

Type A. La spécification donne une limite et d'autres exigences qui s'appliquent à chaque unité du produit, indépendamment des autres unités du même produit. Par exemple pour une longueur : $4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. On considère que le produit est conforme à la spécification si chaque unité est à l'intérieur des limites ou sur une limite, même si elles sont toutes exactement sur une limite.

Type B. La spécification définit la distribution que le produit doit avoir pour être acceptable. Par exemple : "La moyenne du produit ne doit pas être supérieure à 0,5 millivolt et les unités individuelles doivent être distribuées normalement autour de cette moyenne avec une dispersion ne dépassant pas + 0,3 Millivolt." On dit parfois que ce sont des "exigences de distribution". Elles peuvent être accompagnées ou non de limites de type A.

Quelquefois, les exigences de ce type sont spécifiées en termes de graphiques Xb et R . Dans ce cas, la spécification donne la ligne centrale et les limites de contrôle, et le produit est acceptable tant que des échantillons du produit pris au hasard montrent un profil stable sur ce graphique.

Type C. La spécification donne des exigences qui doivent être respectés par la plupart des unités du produit, mais elle permet qu'un certain pourcentage ne la respecte pas. Par exemple : "La résistance ne doit pas dépasser 173 ohms. Toutefois, le produit serait considéré acceptable si cette limite n'est pas dépassée par 2 % des pièces et si aucune ne dépasse 178 ohms".

Les spécifications de type A sont en majorité sur la plupart des produits. Toutefois, le nombre de spécifications de type B augmente progressivement. Il faut avoir conscience que de nombreuses spécifications sont écrites comme si elles étaient de type A, alors que l'auteur avait à l'esprit une certaine distribution en espérant qu'elle serait respectée par le produit. Dans l'esprit de l'auteur, c'est donc une spécification de type B.

2. Relations entre le processus et la spécification

Pour faire une comparaison valable entre un processus et une spécification, il est nécessaire d'avoir un graphique \bar{X} et R où les deux profils sont sous contrôle. En suivant les indications données au chapitre I, on peut prévoir, avec une précision plus ou moins grande, quelle partie de la distribution tombera en dehors des limites. Quatre relations peuvent exister entre un processus et ses spécifications.

(1) *L'étalement du processus est plus faible que la différence entre le maximum et le minimum spécifiés, le processus étant correctement centré. Voir figure 33.*

Actions possibles :

1. Maintenez le contrôle en conservant les valeurs spécifiées.
2. Envisagez la modification des limites de contrôle.
3. Considérez la possibilité de réduire l'inspection.

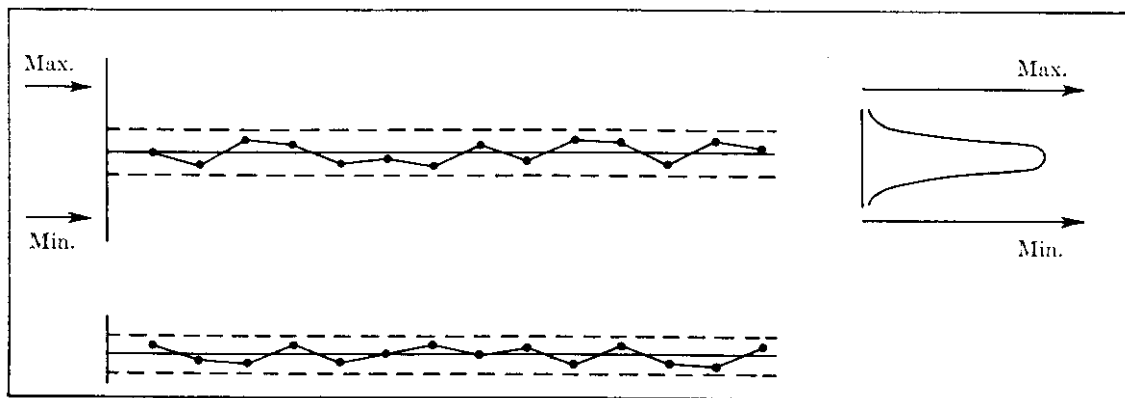


Figure 33. Processus plus étroit que les limites spécifiées.

(2) *L'étalement du processus est égal à la différence entre le maximum et le minimum spécifiés, le processus étant correctement centré. Voir figure 34.*

Actions possibles :

1. Vérifiez en permanence que le processus reste centré.
2. Préparez-vous à faire un tri si la distribution se déplace.
3. Essayez de réduire la dispersion avec un plan d'expérience.
4. Faites élargir les spécifications.

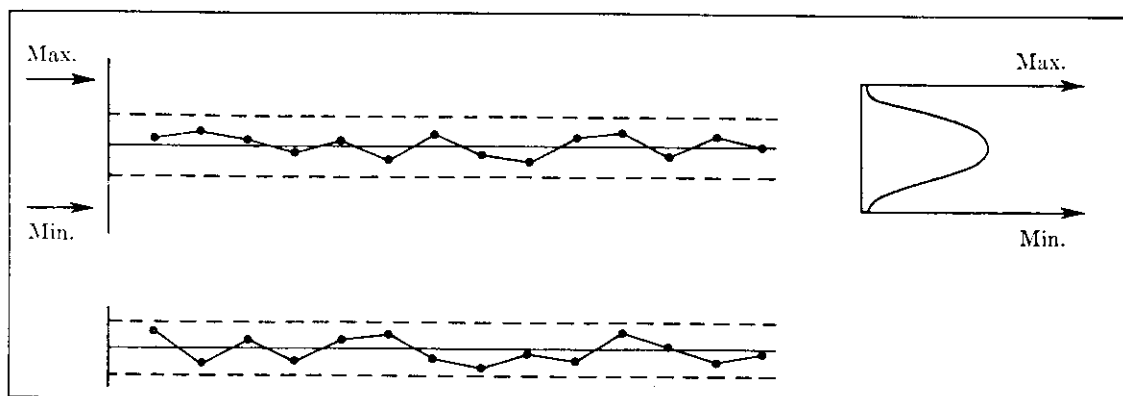


Figure 34. Processus égal aux valeurs spécifiées.

(3) *L'étalement du processus est plus faible que la différence entre le maximum et le minimum spécifiés, mais le processus est fortement décentré. Voir figure 35.*

Actions possibles

1. Essayez de bien centrer la distribution à l'intérieur des limites spécifiées. Maintenez le contrôle à ce niveau.
2. Si l'atelier est incapable de centrer la distribution entre les limites, écrivez sur le registre : *affaire à régler*. Le problème sera étudié dans les réunions de contrôle de la qualité. Au besoin, faites un plan d'expérience. N'abandonnez pas tant que le problème n'est pas réglé.
3. Déterminez si la valeur nominale peut être déplacé sans inconvénient pour le produit. Dans ce cas, faites modifier la spécification.

Il arrive parfois qu'après avoir déplacé une distribution pour se conformer à une spécification, on trouve que le produit ne se conforme plus à une autre spécification. Dans ce cas, il peut y avoir une corrélation entre les caractéristiques, de sorte que les deux spécifications sont incompatibles. Il faut alors mettre un graphique de contrôle sur chaque caractéristique et étudier ces deux graphiques ensemble. Un plan d'expérience permettra éventuellement de trouver une solution optimale.

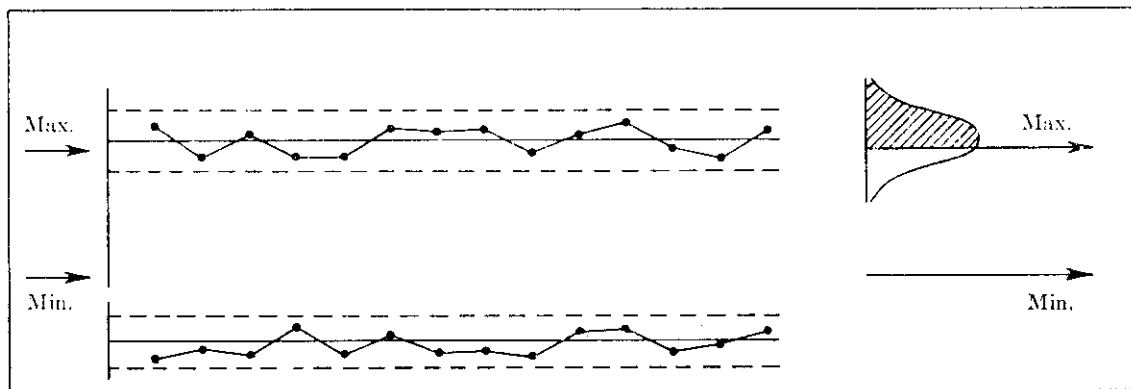


Figure 35. Processus décentré.

(4) *L'étalement du processus est plus grand que la différence entre le maximum et le minimum spécifiés. Voir figure 36.*

Actions possibles

1. Essayez d'élargir les spécifications.
2. Essayez de réduire l'étalement du processus en réalisant un plan d'expérience.
3. Tant que le problème n'est pas résolu, faites un tri à 100 % du produit.
4. Visez un niveau qui donnera un équilibre économique entre les coûts relatifs, y compris ceux des réparations et des rebuts. Maintenez le contrôle à ce niveau.
5. Faites des changements fondamentaux dans le processus. Par exemple, il peut être nécessaire d'acheter une nouvelle machine, de concevoir de nouveaux outils ou d'utiliser de nouvelles méthodes.

Remarque

Ces comparaisons s'appliquent à toutes les distributions, normales ou non. Toutefois, si la distribution n'est pas normale, le centre de la distribution peut être localisé à une certaine distance du milieu de l'intervalle des limites spécifiées.

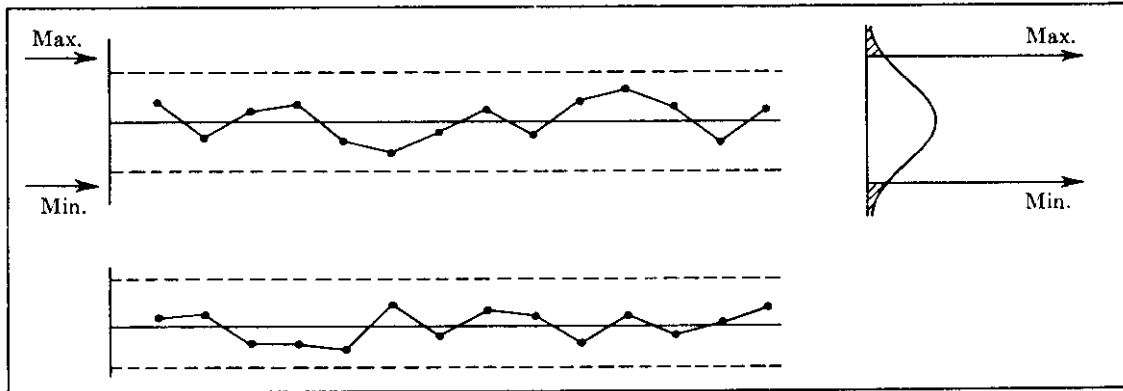


Figure 36. Processus plus large que les limites spécifiées.

3. Comment éviter les conflits avec les spécifications

Si les graphiques Xb et R montrent que la distribution naturelle du processus est trop large pour tenir entre les limites spécifiées (condition 4), ou si le processus ne peut pas être centré correctement (condition 3), il y a évidemment un conflit entre le processus et la spécification. Il y a trois façons de le résoudre :

- (1) Changer le processus.
- (2) Changer la spécification.
- (3) Trier et réparer

Il faut essayer en premier lieu de modifier le processus. Si les changements nécessaires coûtent très cher, les ingénieurs doivent regarder attentivement la spécification. La procédure habituelle est d'examiner les tolérances pour voir quel serait l'effet d'un nouveau jeu de tolérances sur l'assemblage, le fonctionnement ou l'interchangeabilité du produit.

Pour réduire les coûts de fabrication au minimum, les tolérances doivent être aussi larges que la conception le permet, plutôt qu'être aussi étroites que l'atelier en est capable.

Le tri et la réparation sont des moyens très coûteux de traiter les problèmes de spécifications ; on ne doit les considérer qu'en dernier ressort.

Voici deux conseils qui seront utiles aux ingénieurs pour éviter les coûts inutiles résultant des conflits avec les spécifications :

1. L'étendue naturelle d'un processus est habituellement de $\pm 3\sigma$. Pour que la fabrication soit économique, les tolérances spécifiées doivent respecter ces valeurs.
2. De plus, il est rarement possible de faire tourner un processus exactement au même niveau mois après mois. Il faut donc prendre quelque liberté pour permettre de légers déplacements du centre. On considère souvent une variation de $\pm\sigma$ comme acceptable. Dans ce cas, les tolérances spécifiées seront de $\pm 4\sigma$.

4. Addition statistique des tolérances

Chaque fois que deux ou plusieurs pièces détachées sont assemblées, l'opération d'assemblage crée de nouvelles dimensions et de nouvelles distributions qui n'existaient pas avant l'assemblage. L'ingénieur est intéressé par la prévision des caractéristiques de l'assemblage, et par l'attribution de tolérances aux pièces détachées afin de permettre la fabrication la plus économique pour les pièces détachées comme pour l'assemblage.

Les problèmes d'assemblage de cette nature font appel à l'addition des distributions. La distribution d'une pièce est ajoutée à la distribution d'une autre pièce, et ainsi de suite jusqu'à l'assemblage final.

Théorie de l'addition des distributions

Les lois statistiques les plus importantes concernant l'addition des distributions sont les suivantes :

(1) *Loi des sommes et des différences des moyennes.* Si les pièces sont assemblées de telle sorte que certaines dimensions sont ajoutées tandis que d'autres dimensions sont retranchées, la dimension moyenne de l'assemblage est la somme algébrique des dimensions moyennes des pièces.

(2) *Loi des sommes des variances.* Dans un assemblage de pièces prises au hasard, la variance de l'assemblage est la somme des variances des pièces. (Nous rappelons que la variance est le carré de l'écart type.)

Cette loi donne un résultat différent de celui qu'un ingénieur obtiendrait intuitivement. Le calcul pour l'assemblage de deux pièces est le suivant :

Soient σ_A l'écart type de la pièce A et σ_B l'écart type de la pièce B

$$\text{L'écart type de l'assemblage est } \sigma_T = \sqrt{(\sigma_A)^2 + (\sigma_B)^2}$$

Tolérances d'un assemblage

La loi de la somme des variances joue un rôle important dans le travail d'assemblage, car la racine carrée d'une somme de carrés est toujours inférieure à la somme des valeurs qui ont été élevées au carré. Par exemple, si ces valeurs sont respectivement 0,003 et 0,004, leur somme est 0,007. En revanche, la loi de la somme des variances donne 0,005. Cela signifie qu'un assemblage de pièces prises au hasard a toujours *une étendue plus faible que ce qu'indiquerait la simple somme des étendues*. Les ingénieurs connaissent cette propriété et l'utilisent à leur avantage.

Chevauchement des tolérances

Quand on ajoute sur un plan les tolérances spécifiées pour toutes les pièces et qu'on trouve que le total est supérieur à la tolérance de l'assemblage, ce phénomène est connu sous le nom de "chevauchement de tolérances".

Cela peut être une cause d'inquiétude ou non, car on sait, grâce à la loi statistique donnée plus haut, que l'étendue de l'assemblage de pièces prises au hasard est inférieure à la somme des étendues.

Les problèmes posés par l'utilisation du chevauchement de tolérances dans l'assemblage peuvent avoir les causes suivantes :

1. Les variances des composants ne correspondent pas aux tolérances spécifiées sur le plan.
2. Les moyennes des composants ne correspondent pas aux valeurs nominales spécifiées sur le plan.
3. Les composants ne sont pas assemblés au hasard.
4. La variance de l'assemblage, si elle a été calculée, n'est pas compatible avec la tolérance de l'assemblage spécifiée sur le plan.

Les informations sur les moyennes et les variances réelles des composants et de l'assemblage doivent toujours provenir d'études de capabilité de processus ou de graphiques de contrôle d'atelier.

Pièges dans l'utilisation du chevauchement de tolérances

La loi des sommes de variances donnée précédemment s'applique dans tous les cas où les écarts types des composants sont connus. Les ingénieurs souhaitent parfois utiliser cette loi à leur avantage sans avoir une connaissance préalable de ce que peuvent être les écarts types. Dans ce cas, ils peuvent tenir le raisonnement suivant :

On peut admettre que les composants ont tous une distribution normale, avec une étendue égale à la tolérance spécifiée sur le plan. Il est donc possible, dans le calcul de la tolérance de l'assemblage, de remplacer "écart type" par "tolérance spécifiée".

Le danger de ce type de calcul est que l'ingénieur n'a aucun moyen de vérifier ses suppositions. Si les composants ne sont pas distribués normalement autour de la valeur nominale, ou si leur étendue n'est pas égale à la tolérance, l'atelier peut avoir de sérieux problèmes quand les tolérances sont calculées de cette manière.

En particulier, *l'atelier aura certainement un problème si, à tout moment, l'étendue du processus est considérablement plus étroite que la tolérance.* Pour éviter ce problème, l'ingénieur doit adopter les règles suivantes :

- Calculez toujours la tolérance de l'assemblage à partir d'une étude de capabilité de processus. Si aucune information n'est disponible, utilisez votre meilleure estimation de la capabilité probable du processus et ne vous inquiétez pas du fait que votre estimation pourrait être inexacte.
- Quand vous utilisez des spécifications qui comportent des chevauchements de tolérances, fournissez toujours à l'atelier des graphiques de contrôle montrant les distributions réelles des composants. Les assemblages seront les sommes statistiques des distributions qui apparaissent sur les graphiques de contrôle, et celles-ci sont parfois très différentes des distributions sous-entendues sur le plan.

IV

Distributions

1. Caractéristiques des distributions de fréquences

Les distributions de fréquences ont trois caractéristiques ; elles donnent des informations qui sont souvent très utiles :

- (1) Centre
- (2) Étalement
- (3) Forme

Chacune de ces caractéristiques peut être décrite facilement au moyen de mesures statistiques qui sont normalisées.

Centre de la distribution

Quand les observations sont représentées par des points sur une distribution de fréquences, ces points ont généralement tendance à se grouper autour d'une valeur centrale. Les mesures courantes de cette "tendance centrale" sont :

- La moyenne arithmétique
- La médiane
- Le mode

Moyenne arithmétique

Elle est notée par le symbole \bar{X} . On la calcule en faisant la somme des valeurs observées et en divisant par le nombre d'observations.

Médiane

Elle est notée par le symbole MED. On la calcule en rangeant les mesures par ordre de valeurs croissantes, puis en les comptant jusqu'à atteindre (a) une valeur, ou (b) une paire de valeurs, telles que le nombre de valeurs soit le même de part et d'autre. Si c'est une valeur unique, c'est la médiane. Si c'est une paire, la médiane est la moyenne des deux.

Mode

Plus rarement utilisé, le mode représente le maximum de points sur la courbe de distributions. Si la distribution n'est pas symétrique, la médiane et le mode ne coïncident pas avec la moyenne arithmétique.

Étalement de la distribution

L'étalement d'une distribution traduit l'intensité des variations des valeurs individuelles autour de la moyenne. Les mesures courantes de l'étalement, qui sont toutes utilisées dans le contrôle de la qualité, sont les suivantes :

- La variance.
- L'écart type (racine carrée de la variance).
- L'étendue (différence entre les valeurs extrêmes d'un groupe de valeurs).

Variance

Elle est notée par le symbole σ^2 . On la calcule de la façon suivante :

- Obtenir la moyenne des valeurs.
- Calculer la différence entre chaque valeur et la moyenne.
- Elever les différences au carré.
- Faire la somme et la diviser par le nombre de valeurs.

$$\sigma^2 = \sum (X - \bar{X})^2 / n$$

Ecart type

L'écart type est noté par le symbole σ . On trouve dans la littérature plusieurs méthodes de calcul.

Ecart type d'un univers

Pour se référer à l'écart type d'un univers sous-jacent, on utilise le symbole σ' . Dans l'industrie, sa valeur est généralement inconnue, mais on peut l'estimer à partir d'un échantillon en utilisant la formule générale :

$$\sigma' = \sigma / c_2$$

Ou bien, si le graphique R est sous contrôle :

$$\sigma' = Rb / d_2$$

Les facteurs c_2 et d_2 varient selon la taille de l'échantillon :

n	c_2	d_2	n	c_2	d_2
2	0,5642	1,128	6	0,8686	2,534
3	0,7236	1,693	7	0,8882	2,704
4	0,7979	2,059	8	0,9027	2,847
5	0,8407	2,326	9	0,9139	2,970

Etendue

Elle est notée par le symbole R . On la calcule en faisant la différence entre la plus grande valeur d'un groupe de mesures et la plus petite. Elle est utilisée dans le contrôle de la qualité pour détecter certains types de causes attribuables.

Forme de la distribution

La troisième caractéristique importante d'une distribution est sa forme. La plupart des distributions observées ont une forme irrégulière, mais on en trouve parfois qui sont assez uniformes et symétriques. Les formes les plus importantes sont :

- Distribution normale
- Distributions symétriques
- Distributions asymétriques
- Distributions multimodales

Distribution normale

Quand les statisticiens parlent d'une "distribution normale", il s'agit d'une distribution qui est définie spécifiquement par une certaine équation mathématique. Elle est parfaitement symétrique autour de la moyenne et sa forme est la populaire "courbe en cloche".

Tests de normalité

Dans certaines occasions, l'ingénieur peut vouloir tester un groupe de données afin de savoir s'il peut raisonnablement provenir d'une population normale. Les tests de normalité satisfaisants demandent de grandes quantités de données. Mais l'ingénieur ne doit pas oublier que, dans de nombreuses applications du contrôle de la qualité, il n'est pas nécessaire de savoir si une distribution est normale.

Distributions symétriques, mais pas normales

L'ingénieur ne doit pas supposer que toutes les distributions symétriques sont normales. Certaines sont plus plates que la normale, certaines sont plus pointues. Il est rarement utile de mesurer le degré d'aplatissement, mais l'ingénieur doit savoir que cette caractéristique existe.

Distributions asymétriques

Le degré d'asymétrie est mesuré par un facteur " k ". Une distribution théorique asymétrique assez répandue est connue sous le nom de "seconde approximation de la courbe normale". Il existe des tables qui donnent les pourcentages de surface associés à ces courbes. Dans certains cas, elles sont utilisées pour estimer le *pourcentage en dehors des limites*.

Distributions multimodales

Elles résultent généralement de la présence de deux ou plusieurs systèmes de causes.

2. Distributions obtenues à partir d'échantillons

Distribution d'échantillonnage

En général, la façon la plus pratique de collecter des données est de former des petits échantillons, par exemple de cinq pièces. On peut rassembler les mesures individuelles pour former une distribution de fréquences. Cependant, on peut aussi former, avec les mêmes données, une distribution des moyennes des échantillons, à condition que ceux-ci soient en nombre suffisant. La seconde distribution sera considérablement moins large que la première. On dit que c'est une "distribution d'échantillonnage".

Les distributions d'échantillonnage sont à la base de la plupart des graphiques de contrôle.

Rapport entre la population et une distribution d'échantillonnage

La distribution sous-jacente du processus est nommée tantôt "univers", tantôt "population", tantôt "distribution-mère". Sa relation avec une distribution d'échantillonnage est la suivante :

1. Le centre de la distribution d'échantillonnage des moyennes est le même que celui de la distribution-mère.
2. La forme de la distribution d'échantillonnage des moyennes est gouvernée dans une certaine mesure par la distribution-mère, mais en général la distribution d'échantillonnage a tendance à suivre d'assez près la distribution normale, même quand la distribution-mère est irrégulière, asymétrique, triangulaire ou rectangulaire.

En pratique, l'ingénieur peut supposer que la distribution d'échantillonnage des moyennes est approximativement normale.

3. L'écart type de la distribution d'échantillonnage des moyennes s'obtient en divisant par \sqrt{n} celui de la distribution-mère. Si $n = 5$ (valeur courante sur les graphiques de contrôle), $n = 2,236$

3. Méthodes pour tracer une distribution

Quand une distribution de fréquences est faite d'un grand nombre d'observations dispersées sur beaucoup de valeurs différentes sur l'échelle de mesure, il convient habituellement de les grouper en intervalles ou cellules. Disposez les intervalles de façon à ce qu'il y ait, si possible, entre 10 et 30 cellules.

Les frontières des cellules doivent être disposées de sorte qu'une mesure ne puisse être placée que dans une seule cellule. La largeur des cellules doit être la même, et le nombre d'observations dans chaque cellule ne doit pas être inférieur à 25.

Histogrammes

Une façon plus formelle de tracer une distribution de fréquences consiste à dresser une série de colonnes ayant chacune la largeur d'une cellule. La hauteur de la colonne représente le nombre d'observations dans chaque cellule. Une telle représentation des données se nomme un "histogramme". Il est utilisé de la même façon qu'une distribution de fréquences.

Ajustement d'une courbe aux données

On demande souvent aux ingénieurs de faire "coller" une courbe théorique avec un ensemble de données observées. L'exemple donné habituellement est la comparaison des données observées avec une courbe de la distribution normale. Pour faire cela, l'ingénieur doit d'abord calculer la moyenne et l'écart type des données observées. Puis il doit trouver quelles sont les surfaces de la courbe théorique qu'il va reproduire (on les trouve habituellement sur des tables). En troisième lieu, il doit être capable d'ajuster les échelles des données observées sur celles de la courbe théorique, en sorte que les surfaces soient égales.

4. Applications pratiques

Une distribution de fréquences de mesures individuelles trouvées dans un échantillon présente pratiquement toutes les caractéristiques de la distribution-mère du produit. De telles distributions observées sont utiles pour :

- Comparer une série d'unités avec la spécification.
- Suggérer la forme de la distribution-mère.
- Indiquer certaines divergences ou certaines particularités dans les données.

Toutefois, les distributions observées doivent être utilisées avec précaution, et les ingénieurs doivent se garder d'essayer d'obtenir à partir des distributions plus d'informations que ce qu'elles peuvent donner. Il ne faut pas essayer de tirer des conclusions générales des distributions tant que les données ne sont pas sous contrôle. Cet état de choses ne peut être déterminé que par l'utilisation de graphiques de contrôle.

V Corrélation

1. Méthodes graphiques pour étudier la corrélation

Diagramme de dispersion

Le moyen le plus simple d'étudier une corrélation consiste à tracer un diagramme de dispersion. Pour cela, il faut obtenir des valeurs des deux variables, x et y , par paires. Chaque point du diagramme représente une paire, x étant en abscisse et y en ordonnée.

On dit que la corrélation est positive si les valeurs de y augmentent quand les valeurs de x augmentent. On dit qu'elle est négative si les valeurs de y diminuent quand les valeurs de x augmentent. On dit qu'il n'y a pas de corrélation si les valeurs de y augmentent ou diminuent quand les valeurs de x augmentent.

Dispositions en tendance

Puisque la corrélation peut être définie comme une tendance de la variable y à augmenter ou à diminuer quand la variable x augmente, il est possible d'utiliser un graphique de contrôle pour tester la corrélation. Cette technique est semblable à la précédente :

1. Disposer les paires de valeurs mesurées dans l'ordre de x croissant. Puis, en ignorant x , diviser les données en sous-groupes et tracer un graphique de contrôle pour y . Cette méthode est valable pour tous les types de données.
2. Si le graphique fait apparaître une tendance vers le haut, c'est qu'il y a une corrélation positive. Si la tendance est vers le bas, c'est qu'il y a une corrélation négative. Si le graphique reste sous contrôle, il n'y a aucune raison de conclure qu'il existe une corrélation entre les deux variables.

De plus, le graphique de contrôle permet de voir si la variabilité de y augmente ou diminue quand x augmente. La variabilité peut changer sans que la moyenne change.

Pour que la sensibilité soit maximum, il faut utiliser un graphique $X\bar{b}$ et R , en prenant plusieurs mesures de y (par exemple 4 ou 5) pour chaque mesure de x . On peut aussi utiliser un graphique aux valeurs individuelles.

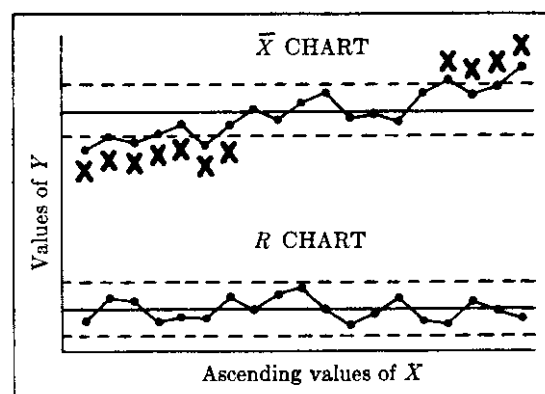


Figure 37. Corrélation positive entre x et y .

Détermination de la pente

Souvent, il est possible de tracer une "droite de tendance" sur un diagramme de dispersion, sans faire aucun calcul. Quand un ingénieur essaye de le faire d'un simple coup d'œil, il risque de se tromper. En cas de doute, il faut donc calculer la "droite de régression".

2. Droites de régression

Une droite de régression est une droite qui représente le plus exactement possible la pente de paires de données corrélées. La "droite du meilleur ajustement" est définie comme celle pour laquelle la *somme des carrés des distances* à cette droite est minimum. La méthode correspondante est connue sous le nom de "méthode des moindres carrés".

Comment calculer une droite de régression

On remplit le tableau ci-dessous :

Variables	x	y	xy	x^2
Données				
Totaux				
Symboles	Σx	Σy	Σxy	Σx^2

L'équation de la droite de régression est :

$$y = mx + c$$

dans laquelle :

$$m = \{ \Sigma xy - (\Sigma x)(\Sigma y) / n \} / \{ \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2 / n \}$$

$$c = \{ (\Sigma x)(\Sigma xy) - (\Sigma y)(\Sigma x^2) \} / \{ (\Sigma x)^2 - n(\Sigma x^2) \}$$

Après avoir tracé la droite de régression, on peut s'assurer, pour vérifier les calculs, qu'elle passe bien par le point dont les coordonnées sont les moyennes de x et de y .

Régression de y sur x et de x sur y

La droite de régression décrite au paragraphe précédent est connue sous le nom de "régression de y sur x ". On l'utilise pour prévoir ou estimer les valeurs de y quand x est donné. Cela suppose que x est la "variable indépendante", une variable dont les valeurs peuvent être fixées ou sont connues exactement. Cela suppose aussi que y est une "variable dépendante" dont les valeurs varient avec celles de x .

Il serait possible également de calculer une droite pour la "régression de x sur y ". Dans ce cas, on supposerait que y est la variable indépendante tandis que x est la variable dépendante, et l'on utiliserait la droite pour prévoir ou estimer les valeurs de x quand y est donné. Pour faire le calcul, il suffit d'inverser x et y dans les équations données ci-dessus.

En temps ordinaire, les deux droites de régression ne sont pas les mêmes quand elles sont tracées pour un même ensemble de données. Si l'ingénieur n'a aucune raison de considérer que l'une ou l'autre variable est indépendante, il peut calculer les deux droites de régression et les comparer. En pratique, la droite de régression la plus utile est souvent une droite tracée à mi-chemin entre les deux.

3. Analyse de corrélation

L'ingénieur peut désirer obtenir une mesure mathématique du degré de corrélation entre deux groupes de variables, qu'il ait calculé une droite de régression ou non. Le degré de corrélation est mesuré par le "coefficient de corrélation" (désigné par le symbole " r "). On le calcule avec la formule suivante :

$$r = \frac{\sum \{ (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \}}{n \sigma_x \sigma_y}$$

Les termes du dénominateur sont les racines carrées des variances de x et de y .

Signification de " r "

La valeur de r est positive quand il existe une corrélation positive entre les variables, et négative quand il existe une corrélation négative. Si $r = 0$, il faut conclure qu'il n'y a pas de corrélation. Si $r = \pm 1$, il existe une forte corrélation. Si $r = \pm 0,5$, il existe une faible corrélation.

Précautions à prendre

1. Une forte corrélation ne signifie pas nécessairement qu'il existe une relation de cause à effet entre x et y . Par exemple, si les statistiques montrent qu'il y a une forte corrélation positive entre les salaires des professeurs et la consommation nationale d'alcool, cela ne prouve pas que les professeurs les mieux payés sont ceux qui consomment le plus d'alcool.
2. Alors que deux ensembles de nombres indépendants ont *en moyenne* un coefficient de corrélation nul, des échantillons peuvent avoir un coefficient de corrélation non nul, à cause des fluctuations de l'échantillonnage. La valeur de " r " n'indique donc pas nécessairement une corrélation entre deux ensembles de nombres.

Il ne faut pas tirer de conclusions basées sur le coefficient de corrélation avant d'avoir testé sa signification de la façon suivante :

Multiplier r par \sqrt{n} (n étant le nombre de paires utilisées pour le calcul de r). Le résultat s'appellera " t ".

$$t = r \sqrt{n}$$

Si t est supérieur à 3, on peut considérer que la corrélation est significative. Elle peut ne pas être significative dans le cas contraire.

VI

Profils des graphiques de contrôle

Ce chapitre rassemble une grande partie des informations dont l'ingénieur a besoin pour interpréter les profils des graphiques de contrôle dans les études de capabilité de processus ou les plans d'expériences. Nous supposons qu'il connaît déjà la théorie élémentaire des graphiques de contrôle, qui a été exposée dans la première partie. Nous supposons aussi qu'il a l'habitude d'analyser les graphiques de contrôle d'atelier. Ce chapitre ne fait pas double emploi avec la théorie élémentaire ; son but est de donner de nouveaux matériaux de référence à ceux qui voudraient avoir une compréhension plus profonde des graphiques de contrôle.

1. Théorie des graphiques de contrôle

Des graphiques de contrôle en général

Le graphique de contrôle est essentiellement un ensemble de limites statistiques appliquées à une suite de points représentant un processus en cours d'étude. Les données qui concernent chaque point individuellement sont aléatoires, mais les points sont marqués délibérément dans un ordre non aléatoire afin de représenter les variables les plus importantes.

Dans une étude de capabilité de processus, on considère habituellement que la variable la plus importante est le temps. Par conséquent, les points sont marqués dans l'ordre chronologique, c'est-à-dire dans l'ordre de la production ou dans l'ordre des essais.

Causes attribuables

Le graphique de contrôle a une aptitude remarquable pour détecter et à identifier les causes. Les profils anormaux sont associés à des causes. Les "causes" sont des perturbations ou des influences internes qui modifient le comportement ordinaire du processus.

Les causes qui perturbent le processus sont appelées "causes attribuables" parce qu'elles peuvent être attribuées à quelque chose de particulier. Elles sont toujours associées à un comportement anormal du processus.

Les variations "normales" du processus sont également le résultat de certaines causes, mais elles sont considérées comme "non attribuables". Leur amplitude est relativement faible, elles sont nombreuses et étroitement mêlées. C'est pourquoi il n'est pas possible de les "attribuer" sans faire un effort particulier.

Les causes attribuables sont détectées par le graphique de contrôle de deux manières différentes¹⁵.

1. *Certaines perturbations apparaissent et disparaissent périodiquement dans le processus.* Elles peuvent par exemple être provoquées par les opérations de réglage d'une machine. Elles n'affectent pas les observations rapprochées, comme à l'intérieur

¹⁵ NdT. On reconnaîtra ici l'analogie entre, d'une part, les causes "inter-échantillons" et "intra-échantillon" des graphiques de contrôle et, d'autre part, les variances "inter-classes" et "intra-classe" de l'analyse de variance.

d'un petit échantillon, mais elles affectent les observations éloignées, qui se trouvent dans des échantillons différents. Ce sont des causes "inter-échantillons".

2. *Certaines perturbations sont présentes dans le processus pendant de longues périodes.* C'est par exemple le résultat d'un mélange de produits provenant de plusieurs machines ou de plusieurs opérateurs. Ces causes continues affectent aussi bien les observations rapprochées que les observations éloignées. Ce sont des causes "intra-échantillon".

Les causes "intra-échantillon" tendent à produire des effets identifiés comme des instabilités, des cycles, des tendances, etc. Les causes "inter-échantillons" tendent à produire des effets identifiés comme des stratifications et des mélanges stables. Les profils ayant des causes "intra-échantillon" tendent à être trop larges pour les limites de contrôle, tandis que Les profils ayant des causes "inter-échantillons" tendent à être trop étroits pour les limites de contrôle. Le seul profil naturel est celui qui provient de l'absence de perturbations de toutes sortes.

Il faut noter que les causes attribuables ne sont pas toutes mauvaises et que toutes ne doivent pas être éliminées. Elles peuvent aussi être la source d'informations importantes.

Sous-groupes rationnels

L'une des principales sources de la puissance du graphique de contrôle est dans la manière de planifier les échantillons avant la collecte des données. Les échantillons sont planifiés de façon à former chacun un "sous-groupe rationnel", aussi indépendant que possible des causes attribuables. On peut ainsi penser que si plusieurs réglages d'une machine ont un effet sur les caractéristiques, toutes les unités de l'échantillon viendront du même réglage, que si plusieurs lots ont un effet sur les caractéristiques, toutes les unités de l'échantillon viendront du même lot, etc. Ainsi les différences entre les réglages, les lots, etc. apparaîtront sur les différences entre les échantillons.

Nous dirons qu'un sous-groupe rationnel représente aussi fidèlement que possible un ensemble de conditions homogènes. En général, on sait que les conditions de fabrication tendent à changer de temps en temps à cause de variables dont nous n'avons pas conscience. Par conséquent, pour obtenir des sous-groupes qui ont le maximum de chances d'être rationnels, il faut essayer de mettre dans un échantillon des unités produites en un temps le plus court possible.

Un petit groupe d'unités produites consécutivement à partir d'un processus formera probablement un "sous-groupe rationnel", c'est-à-dire qu'il sera fait probablement d'un ensemble d'unités produites au hasard et représentant l'état du processus à l'instant précis où l'échantillon a été prélevé.

Malgré ces précautions, il peut se faire que des sous-groupes que l'on croit rationnels contiennent des causes attribuables. Ce sont les causes "intra-échantillon" décrites au paragraphe précédent. Elles sont plus difficiles à interpréter que les causes "inter-échantillons". Pour cette raison, l'utilisation des graphiques de contrôle sera très simplifiée si les données sont recueillies soigneusement en sous-groupes rationnels.

Ordre de la production (ou des essais)

Quand la théorie énonce que les échantillons doivent être pris, autant que possible, dans l'ordre de la production, il ne faut pas oublier que l'ordre de la production est considéré comme relatif à un seul système de causes. Ainsi, quand un opérateur prend des échantillons sur une machine à bobiner avec plusieurs broches, ou sur une machine à riveter avec plusieurs têtes, on ne doit pas considérer que ces échantillons ont été pris "dans l'ordre de la

production" au sens de la théorie des graphiques de contrôle. Si la machine à riveter possède six têtes, il faut faire six graphiques de contrôle.

Termes techniques associés aux graphiques de contrôle

Limites de contrôle

Les limites de contrôle sont des limites statistiques utilisées pour interpréter le profil d'un graphique de contrôle. Sauf avis contraire, ce sont les limites de contrôle à 3 sigma. Il est important de ne pas les confondre avec les limites données par une spécification.

Limites naturelles du processus

Les limites 3 sigma pour les unités produites par un processus sous contrôle sont parfois appelées "limites naturelles". Elles ne sont pas nécessairement reliées aux limites de la spécification ou à d'autres limites arbitraires.

Ligne centrale

La ligne centrale d'un graphique de contrôle est une ligne horizontale qui passe au centre d'un ensemble de points fluctuants. Son niveau est calculé avec les données du graphique. Dans certains cas, elle ne passe pas à travers les points. Par exemple, elle peut avoir été obtenue à partir d'une série de données obtenue précédemment.

Niveau

Le niveau d'un graphique de contrôle est une droite, réelle ou imaginaire, qui passe au centre d'une série de points de ce graphique. Le niveau peut ne pas être le même que la ligne centrale, car il est toujours relatif aux points présents sur le graphique, tandis que la ligne centrale peut provenir d'autres sources. Plusieurs niveaux peuvent apparaître sur un même graphique de contrôle.

2. Interprétation du graphique Xb

Le graphique Xb montre où le processus est centré. Il représente la moyenne de la distribution créée par le processus. Si le centre de la distribution dérive, le profil Xb dérive avec lui. Si le centre de la distribution suit une tendance, le profil Xb suit la même tendance.

Causes affectant le graphique Xb

Les causes les plus courantes qui affectent un graphique Xb sont les suivantes :

(1) Causes Xb directes

Les causes Xb directes ont toutes un élément commun : quand elles entrent dans le processus, elles sont capables d'affecter tout le produit en même temps. Par exemple, quand la température change dans un bain d'électrolyse, le changement affecte toutes les pièces qui sont plongées dans le bain. Ce type de cause est susceptible de faire dériver le centre d'une distribution sans modifier sa dispersion. Parmi les nombreux changements possibles dans une fabrication, on peut noter les changements de matière première, d'opérateur, d'inspecteur, de réglage d'une machine, etc.

(2) Causes Xb indirectes

Il existe trois types de causes Xb indirectes. Elles apparaissent à la fois sur le graphique R et sur le graphique Xb , mais en réalité ce sont des causes R . Leur apparition sur le graphique Xb est la conséquence du graphique R . L'ingénieur doit étudier attentivement ce qui suit :

1. Il peut arriver que le graphique Xb soit affecté par un *changement dans les proportions de deux ou plusieurs distributions* formant un mélange. Ce type de cause est généralement détecté sur le graphique R .
2. Une anomalie de la distribution peut provoquer un profil bizarre sur le graphique R . Le graphique Xb suivra le graphique R en passant hors contrôle lui aussi.
3. Enfin, si le niveau augmente ou diminue sur le graphique R par rapport aux limites calculées antérieurement, les limites de contrôle du graphique Xb ne seront plus valables. Par conséquent, on ne pourra plus utiliser ces limites pour déterminer si des points du graphique Xb sont hors contrôle.

Ces trois possibilités justifient la règle qui est donnée dans ce Manuel à plusieurs reprises : N'essayez pas d'interpréter le graphique Xb tant que le graphique R est hors contrôle. Éliminez les causes R d'abord, et vous aurez une chance de voir disparaître les causes Xb en même temps.

3. Interprétation du graphique R

Le graphique R mesure l'uniformité ; il réagit à un changement de variabilité. Plus les résultats d'un processus sont uniformes, plus faible sera la moyenne des R .

Si toutes les unités dans le produit reçoivent le même traitement, le graphique R aura tendance à rester sous contrôle. Si le graphique R ne reste pas sous contrôle, ou si son niveau augmente, c'est que certaines unités reçoivent un traitement différent des autres. Cela peut signifier qu'un autre système de causes a été introduit dans le processus.

Il peut arriver que le niveau du graphique R augmente. Si le graphique R reste sous contrôle à ce niveau, c'est qu'un nouvel élément est entré dans le système de causes et qu'il fait partie du processus. C'est le plus souvent un élément indésirable. Par exemple, un composant de moins bonne qualité, une pression pour augmenter la production, des opérateurs moins compétents, une maintenance moins sérieuse, etc. sont des causes indésirables.

Si le niveau du graphique R diminue de sorte que le graphique reste sous contrôle à ce niveau, c'est qu'un élément du système a été éliminé. Par exemple, les opérateurs ont reçu une nouvelle formation, le programme de maintenance a été amélioré, etc.

Le graphique R est beaucoup plus sensible que les autres graphiques à un grand nombre de causes attribuables. Étant donné que ces causes affectent sérieusement l'interprétation des autres graphiques, on doit le considérer comme le graphique le plus important dans une étude de capacité de processus.

4. Interprétation conjointe des graphiques Xb et R

Étant donné que les graphiques Xb et R sont concernés par différentes phases de l'étude de la distribution des données, il est important de les interpréter conjointement. En effet, dans cette étude, on s'intéresse à la fois au centre et à l'étendue de la distribution. En considérant les deux graphiques ensemble, on peut obtenir de nouvelles informations qui ne peuvent pas être obtenues en les considérant séparément.

Le principe pour obtenir ces informations additionnelles est le suivant :

Quand des échantillons sont pris au hasard dans une distribution normale, il n'y a pas de corrélation entre les valeurs de Xb et de R . En d'autres termes, le fait que Xb soit grand ou petit ne signifie pas que R soit grand ou petit, et vice-versa. Par conséquent, les profils Xb et R sont indépendants l'un de l'autre.

En revanche, si les échantillons sont pris dans une distribution très dissymétrique, il y aura une corrélation entre les valeurs de Xb et de R . Dans un cas, si la distribution présente une plus grande densité de points dans la partie haute, cette corrélation est positive. Dans l'autre cas, si la distribution présente une plus grande densité de points dans la partie basse, cette corrélation est négative.

Dans le premier cas, le graphique Xb aura tendance à montrer le même profil que le graphique R , tandis que, dans le second cas, il aura tendance à montrer un "profil inversé".

5. Interprétation des graphiques aux attributs

Un graphique p montre les proportions dans lesquelles une distribution a été divisée. Il est souvent utilisé pour représenter un "pourcentage de défectueux", la distribution étant partagée entre défectueux et non défectueux. Dans ce cas, les unités du produit sont simplement comparées à une spécification pour être rangées en deux groupes.

Les graphiques p sont également utilisés pour représenter n'importe quelle proportion sans être associés à des questions de produits défectueux. Par exemple, on peut les utiliser pour montrer la proportion d'unités dont le voltage est compris entre deux limites.

Les graphiques p peuvent être combinés à volonté, soit sur la base d'une seule caractéristique, soit sur la base de plusieurs caractéristiques réunies. L'interprétation dépend largement de la connaissance du nombre de caractéristiques. C'est particulièrement important dans le cas d'une étude de capacité de processus où les premiers graphiques p apparaissent sous contrôle. Cette situation peut traduire un "équilibre statistique" entre les caractéristiques, plutôt que la présence d'un seul système de causes.

Causes affectant le graphique p

Le graphique p ne traduit pas directement toutes les caractéristiques de la distribution. C'est-à-dire qu'il n'indique pas la moyenne, l'étendue et la forme de la distribution. Il montre simplement la classification arbitraire de la distribution en deux ou plusieurs parties. Pour cette raison, il est plus difficile d'identifier des causes spécifiques qui le concernent probablement.

Les causes d'un graphique p hors contrôle sont toutes celles qui peuvent affecter le centre, la dispersion ou la forme de la distribution du produit. Le graphique p est aussi très sensible aux causes qui affectent les standards utilisés comme base de la classification.

En cherchant les causes d'un graphique p hors contrôle, l'ingénieur doit s'appuyer fortement sur sa connaissance du métier. Il doit trouver les conditions environnementales qui sont associées au graphique et faire une recherche systématique des éléments qui peuvent contribuer à ces conditions. Ces éléments sont les suivants :

1. Matériaux (comprenant la fabrication et l'inspection).
2. Machines (comprenant outils, équipements, jauges et autres appareils).
3. Méthodes (comprenant les plans et les procédures).
4. Hommes (comprenant leur formation, leurs attitudes et leur expérience).

Au cours de toute investigation sur les causes affectant les graphiques p , l'ingénieur ne doit pas perdre de vue que de grandes variables peuvent se manifester de temps en temps dans le processus sans apparaître sur les graphiques.

Erreurs à éviter avec un graphique p

1. *Penser trop rapidement qu'un graphique p est sous contrôle.* Comme nous l'avons mentionné plus haut, un graphique p qui paraît sous contrôle peut traduire simplement un équilibre entre plusieurs types de défautueux. Avant de conclure qu'un graphique p est sous contrôle alors qu'il rassemble plusieurs types de défautueux, étudier chaque source séparément.
2. *Ne pas tenir compte d'un changement dans les standards.* L'une des premières choses à voir en étudiant un graphique p est la possibilité d'un changement des critères d'inspection ou de l'application de ces critères. Si l'inspecteur s'arrête de regarder certains défauts, le niveau du graphique p va baisser
3. *Se concentrer sur les défauts dont le pourcentage est élevé.* Quand un ingénieur analyse des graphiques p dans le cadre d'une étude de capacité de processus, il a souvent tendance à porter son attention sur les graphiques dont le niveau est élevé, en ignorant ceux dont le niveau est plus faible mais qui sont sérieusement hors contrôle. Il doit garder présent à l'esprit que les profils hors contrôle sont une excellente source d'information.

6. Interprétation des graphiques aux mesures individuelles

Ces graphiques montrent les fluctuations de mesures individuelles faites dans un ordre déterminé. L'ordre est souvent basé sur le temps, mais dans des analyses spéciales, l'ordre peut correspondre à des codes, des types de produits, etc. Les graphiques aux mesures individuelles sont utilisés pour montrer des tendances générales, des variations inhabituelles ou des relations entre certaines mesures et certains standards.

De nombreux états passagers qui apparaissent sur un graphique Xb et R peuvent aussi être détectés sur un graphique aux mesures individuelles, mais avec moins de précision. Les tests pour profils anormaux sont moins fiables que sur un graphique Xb et R , car les graphiques aux mesures individuelles peuvent être sérieusement affectés par un changement de forme de la distribution. Il est parfois conseillé de vérifier les conclusions tirées à partir d'un graphique aux mesures individuelles en construisant un graphique Xb et R .

D'autre part, certaines informations sont obtenues plus simplement avec un graphique aux mesures individuelles qu'avec un graphique Xb et R . Ce sont notamment les suivantes :

1. **Cycles.** Les cycles courts, en particulier, peuvent ne pas apparaître sur un graphique Xb et R .
2. **Tendances.** Elles apparaissent plus rapidement sur un graphique aux mesures individuelles, mais il faut se méfier de tendances apparentes qui n'existent pas en réalité.
3. **Mélanges.** Comme sur un graphique Xb et R , les mélanges sont caractérisés par l'absence de points près du milieu du profil avec un nombre excessif de points près des limites.
4. **Bouquets de points.** Si des anomalies sont concentrées en certains endroits plutôt que d'être réparties au hasard dans les données, elles peuvent être détectées plus rapidement sur un graphique aux mesures individuelles que sur un graphique Xb et R .
5. **Relation du profil avec la spécification.** Ce graphique montre très facilement où se trouvent les mesures par rapport aux limites spécifiées.

Erreurs à éviter avec un graphique aux mesures individuelles

Sur ce graphique, la taille de l'échantillon est 1. Les limites de contrôle sont donc les mêmes que si l'on utilisait un graphique Xb où $n = 1$. Si la distribution est symétrique, les limites de contrôle peuvent coïncider avec les limites spécifiées. Mais il ne faut pas oublier que la forme de la distribution est très importante pour déterminer quelle portion du produit dépassera les limites spécifiées.

7. Analyse des profils

Les paragraphes suivants décrivent 10 profils que l'on rencontre habituellement quand on observe des graphiques Xb et R , des graphiques aux attributs ou des graphiques aux mesures individuelles. Chaque profil est expliqué par une brève description et illustré par une figure typique du profil d'un graphique de contrôle (excepté le profil naturel, dont un exemple se trouve dans la première partie du Manuel). Les distributions correspondantes sont aussi représentées.

8. Profil naturel

Un profil naturel est celui qui ne donne aucun indice d'anomalie sur une longue série de points. Le système de causes est équilibré et le processus est "sous contrôle".

Toutefois, la stabilité n'est pas une raison suffisante pour dire que le profil est naturel (ou normal). Un profil de stratification peut paraître stable, mais il fournit une preuve évidente de la présence de causes attribuables.

La distribution associée à un profil naturel est généralement régulière, unimodale et pas extrêmement plate. Mais un profil naturel n'indique pas une "distribution normale".

9. Cycles

Les cycles sont de courtes tendances dans les données qui apparaissent sur un profil de façon répétée. C'est l'indication d'une cause attribuable, car la première caractéristique d'un profil aléatoire est de ne pas se répéter. Les causes des cycles sont des variables qui vont et viennent de façon régulière. Dans le cas des machines dans un atelier, ils peuvent être associés à des successions de mouvements et de positions. Dans le cas d'opérations contrôlées manuellement, ils peuvent être associés à la fatigue individuelle ou au travail en trois équipes. Pour certains types de produits, ils peuvent être associés à des effets saisonniers.

La distribution associée aux cycles est plus large que ce que laisse prévoir le graphique R . Elle peut être bimodale, avec deux bosses. On identifie les cycles en déterminant l'intervalle de temps entre deux sommets. Par exemple, un ingénieur a observé sur un graphique Xb qu'une mesure sur sept était systématiquement plus faible que les autres. Il a rapproché cette observation du fait qu'une machine avait un tambour à sept positions.

Parmi d'autres causes pouvant créer ce type de profil, on peut trouver notamment :

- Les effets saisonniers, comme la chaleur et l'humidité.
- La fatigue des opérateurs.
- La rotation des équipes.
- Le changement des outils.
- Les plans de maintenance.
- Les fluctuations de tension électrique.
- etc.

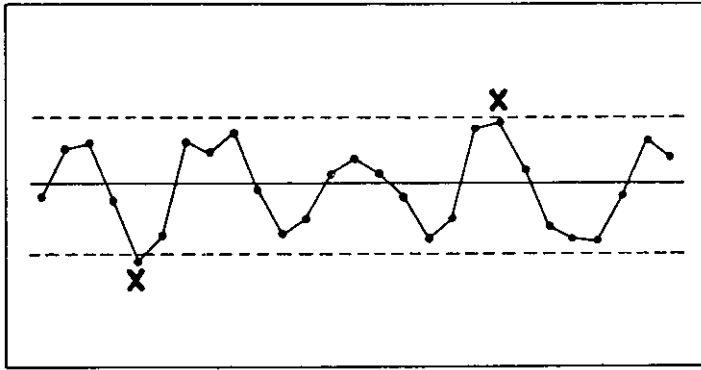


Figure 38. Cycles.

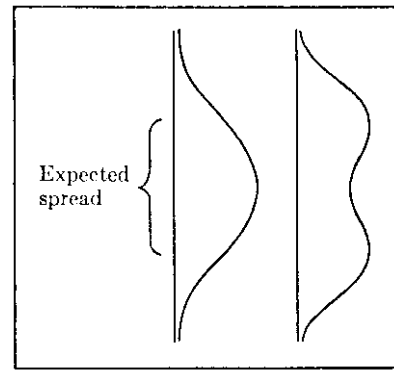


Figure 39. Distributions associées à des cycles.

10. Tendances

Une tendance se définit comme un mouvement continu vers le haut ou vers le bas. Elle se manifeste par une longue série de points qui ne changent pas de direction.

La distribution associée à une tendance est aplatie et plus large que ce qu'annoncerait un graphique R . Les tendances sont d'habitude assez faciles à identifier. Elles résultent de plusieurs sortes de causes qui agissent graduellement sur le processus. Si une tendance apparaît sur un graphique Xb , c'est que le centre de la distribution monte ou descend graduellement. Si elle apparaît sur un graphique R , c'est que la dispersion augmente ou diminue graduellement. Si elle apparaît sur un graphique p , c'est que le pourcentage de défectueux augmente ou diminue graduellement.

Il faut être prudent quand un profil semble présenter une tendance, parce qu'il est très facile de voir des tendances quand il n'en existe pas réellement. Les causes de tendances les plus fréquentes sont les suivantes :

- L'usure des outils ou des jauges.
- Un étalonnage inadéquat des instruments de test.
- La dégradation des solutions chimiques de décapage ou de nickelage.
- L'encrassement des pompes.
- Un changement continu des proportions de lots.
- Des facteurs humains, comme une pression croissante de la direction.
- etc.

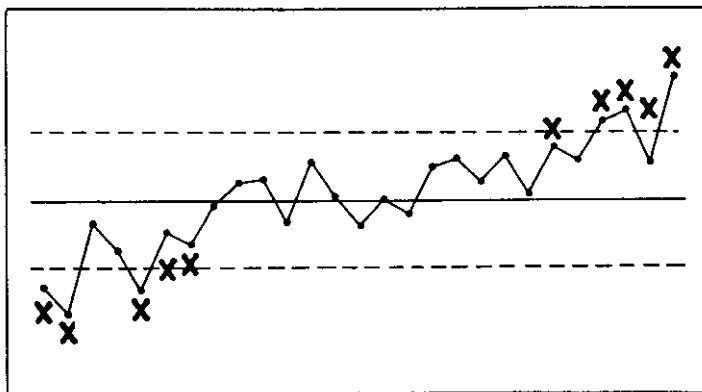


Figure 40. Tendance.

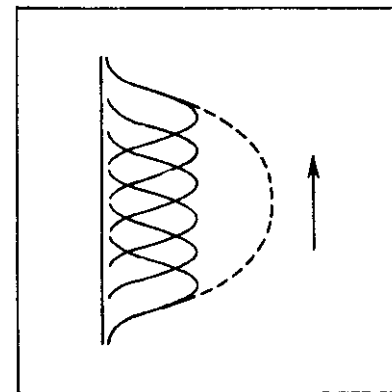


Figure 41. Distribution associée à une tendance.

11. Changement graduel de niveau

Un changement graduel de niveau indique généralement une ou deux choses :

1. Il y a dans le processus un élément qui est capable d'affecter d'abord quelques unités, puis un nombre d'unités de plus en plus grand. Par exemple, un groupe de nouveaux opérateurs est arrivé. A mesure qu'ils ont une meilleure formation (ce qui peut prendre plus ou moins de temps), la distribution est affectée dans une proportion de plus en plus grande. La même chose peut arriver quand de nouveaux appareils sont introduits l'un après l'autre, quand d'anciens lots du magasin, mal contrôlés, sont remplacés par de nouveaux lots, bien contrôlés, quand un programme de maintenance s'étend progressivement à de plus en plus d'équipements, quand les opérateurs commencent à suivre leurs graphiques de contrôle plus attentivement, etc.
2. Il peut arriver que certains éléments du processus aient changé brutalement, mais à cause de la grande quantité du produit qui "entre en circulation", leurs effets apparaissent graduellement.

Dans les deux cas, un changement graduel donne des profils comme celui de la figure 42. La distribution totale, comprenant les deux niveaux, est plus large que ce que peut faire prévoir le graphique *R*.

Les changements graduels sont très fréquents au début d'un programme de contrôle de la qualité. Ceux qui ne parviennent pas à un autre niveau sont identifiés comme des "tendances".

Les causes qui créent ce type de profil sont typiquement les suivantes :

- L'introduction progressive de nouveaux composants.
- Une meilleure formation des opérateurs.
- Un changement du programme de maintenance.
- De meilleurs appareils.
- De meilleures méthodes.
- etc.

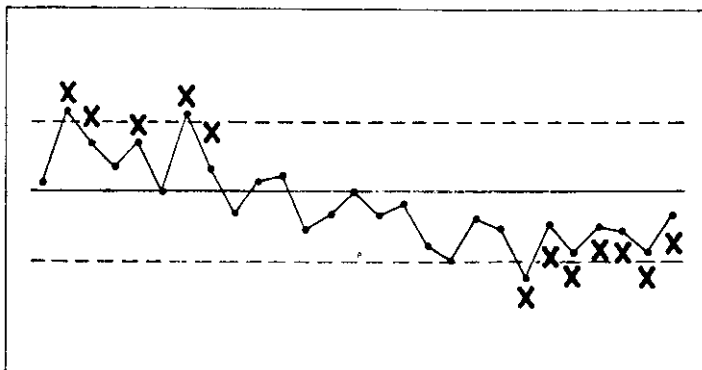


Figure 42. Changement graduel de niveau.

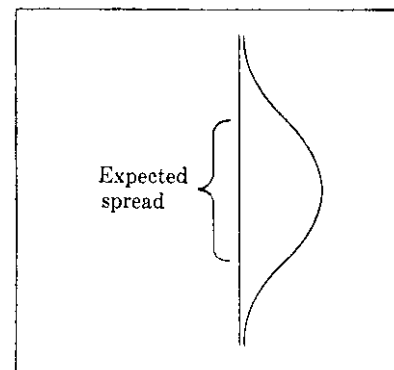


Figure 43. Distribution associée à un changement graduel de niveau.

12. Changement soudain de niveau

Un changement soudain de niveau ne fait apparaître des points marqués d'un signe X que sur la partie droite du profil.

Si les deux périodes sont représentées ensemble sur une même distribution, celle-ci sera unimodale ou bimodale. On peut voir des changements soudains sur un grand nombre de graphiques de contrôle couramment utilisés.

1. Sur un graphique Xb , ce type de profil indique l'introduction brutale dans le processus d'un nouvel élément (habituellement une cause unique) qui déplace le centre de la distribution vers un nouvel emplacement, puis cesse d'agir. Le profil monte ou descend depuis la ligne centrale et se stabilise autour du nouvel emplacement.
2. Sur un graphique R , une soudaine montée du niveau indique généralement l'introduction d'une nouvelle distribution dans le produit, s'ajoutant à la distribution qui existait précédemment. Une soudaine baisse du niveau indique généralement le retrait d'une distribution.
3. Sur un graphique p , ce type de profil indique un changement important dans la distribution du produit ou dans la méthode de mesure.

Un changement soudain de niveau est l'un des profils les plus faciles à interpréter. Parmi de nombreuses causes, on peut noter les suivantes :

- Un changement de composant ou de matière première.
- Un nouvel opérateur.
- Un nouvel inspecteur.
- Une nouvelle machine.
- Un nouveau réglage.
- Un manque d'attention des opérateurs.
- etc.

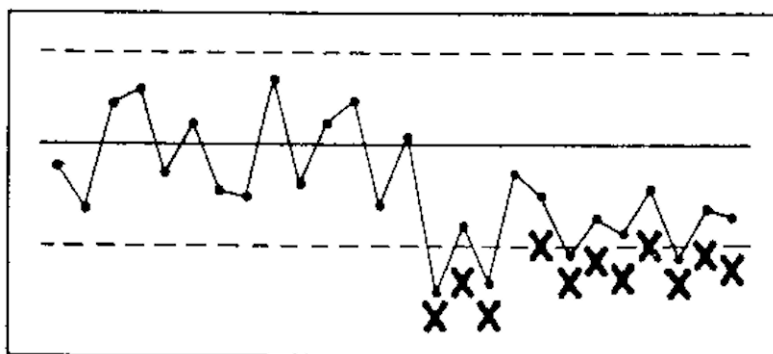


Figure 44. Changement soudain de niveau.

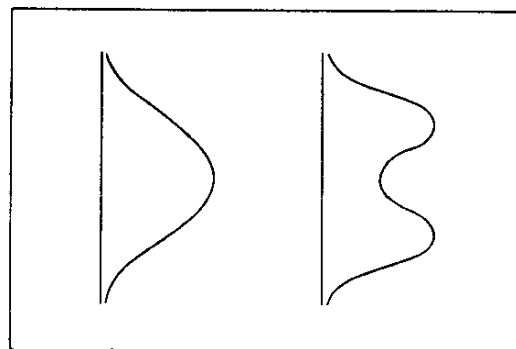


Figure 45. Distributions associées à un changement soudain de niveau.

13. Bouquet de points

L'une des caractéristiques d'un profil naturel est que les mesures de toute amplitude ont tendance à se répartir plus ou moins uniformément sur l'ensemble des données. Si des mesures se regroupent en un seul endroit pour former un bouquet de points, cela signifie que le profil n'est pas naturel. La répartition des points n'est pas aléatoire, et cette anomalie est le signe de l'introduction soudaine dans le produit d'un système de causes différent. Par exemple, les points du bas de la figure 46 provenaient d'une palette de pièces refusées qui avait été expédiée accidentellement. Un profil similaire avait été obtenu en fabrication sur un poste de pulvérisation d'un matériau conducteur sur des disques. Le pochoir avait glissé et le matériau conducteur s'était répandu jusqu'au bord des disques. La distribution sous-jacente est un mélange où quelques unités sont distinctement séparées du reste du produit.

De telles indications sont parfois observées sur des graphiques Xb , mais elles tendent à se produire plus fréquemment sur des graphiques aux mesures individuelles, des graphiques R ou des graphiques p . Dans de nombreux cas, c'est le graphique aux mesures individuelles qui est le plus sensible pour relever ce type d'anomalie.

Les principales causes d'un bouquet de points sont les suivantes :

- Difficultés de mesure.
- Changement d'étalonnage d'un appareil de mesure.
- Changement dans une sélection du produit.
- Causes environnementales.

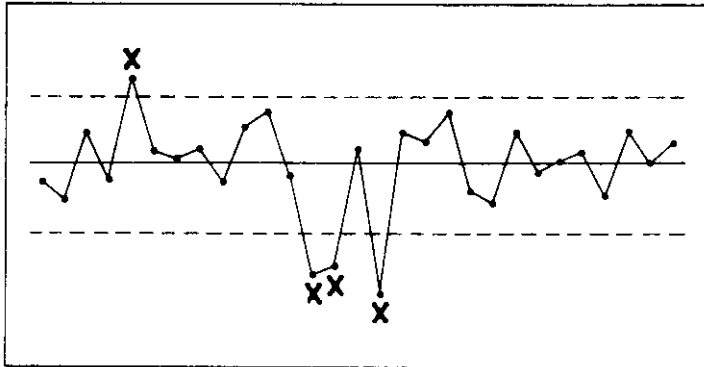


Figure 46. Bouquet de points.

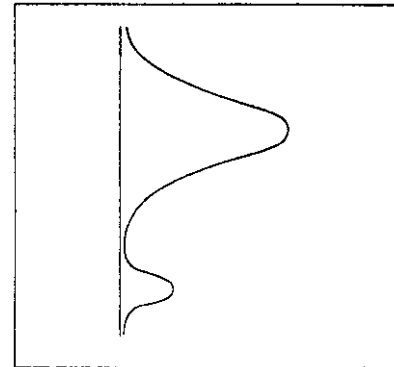


Figure 47. Distribution associée à un bouquet de points.

14. Instabilité

L'instabilité d'un profil se manifeste par des fluctuations anormalement grandes. Le profil comporte des points irréguliers qui sont marqués "X" en haut et en bas. Les fluctuations sont souvent trop larges pour tenir entre les limites de contrôle. Ce type de profil peut se produire de deux façons :

- Il peut arriver qu'une cause simple, capable d'affecter le centre ou la dispersion de la distribution, agisse sur le processus de manière aléatoire.
- Il peut arriver que plusieurs causes, chacune capable d'affecter le centre ou la dispersion de la distribution, agissent ensemble sur le processus.

Dans le dernier cas, le profil peut devenir très complexe. Les causes sont plus difficiles à identifier que sur des profils plus simples. La distribution sous-jacente a souvent une forme large et irrégulière, avec plusieurs sommets.

L'instabilité d'un processus est souvent associée à des mélanges ; un mélange instable peut être considéré comme une forme spéciale d'instabilité. Il y a deux façons de découvrir les causes d'une instabilité complexe :

1. Cherchez d'abord dans le processus les mélanges instables. Ce sont les causes les plus faciles à détecter et à éliminer. Ensuite, le profil instable sera plus facile à interpréter.
2. Si le profil est toujours complexe, divisez le processus en de plus petites opérations et faites un graphique de contrôle pour chacune d'elles. Cherchez le profil qui ressemble le plus au profil d'origine, et divisez le graphique à nouveau. Continuez jusqu'à ce que le profil soit facile à interpréter.

N'oubliez pas, en analysant un profil instable, que les causes finales seront certainement assez simples. Elles semblent compliquées parce qu'elles forment des combinaisons. Les causes d'instabilité les plus fréquentes sont les suivantes :

Causes simples

- Sur-réglage d'une machine.

- Supports mal fixés sur un appareil.
- Négligence d'un opérateur sur le respect des consignes.
- Mélange de plusieurs lots différents dans un magasin.
- Mélanges de pièces différentes sur une chaîne d'assemblage.

Causes complexes

- Effet de plusieurs variables sur une caractéristique finale.
- Effet d'opérations de tri à différentes étapes du processus.
- Effet de différences dans les méthodes de test.
- Effet d'un travail expérimental du bureau d'études.

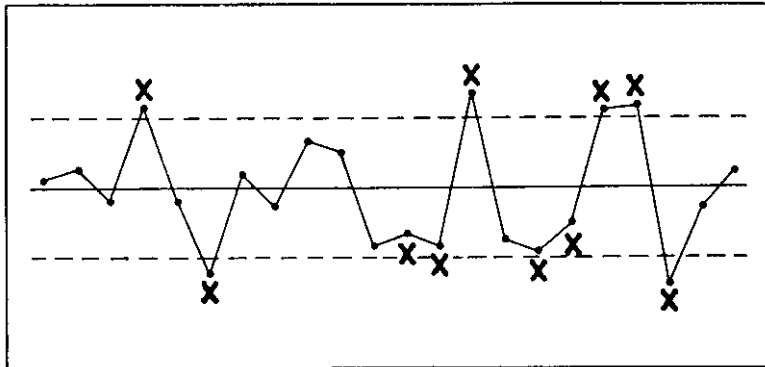


Figure 48. Instabilité sur un graphique \bar{X} .

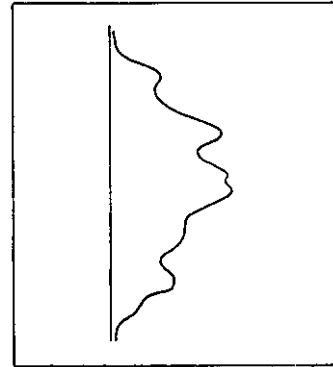


Figure 49. Distribution associée à une instabilité.

15. Mélange

Sur ce profil, les points ont tendance à tomber près de la limite supérieure et de la limite inférieure en restant absents près du milieu. Les lignes joignant deux points sont anormalement longues. Voir figure 50.

En fait, ce profil est la combinaison de deux profils différents sur le même graphique. Ils ont deux niveaux différents, l'un étant au niveau haut, l'autre étant au niveau bas.

Quand les distributions qui composent le mélange gardent les mêmes positions relatives et les mêmes proportions pendant une certaine période de temps, c'est un "mélange stable". Quand les positions relatives et les proportions ne sont pas constantes, c'est un "mélange instable". Les mélanges instables sont parmi les profils les plus répandus. Leur détection et leur élimination facilitent beaucoup l'interprétation des autres profils.

Causes d'un mélange stable

- Différences persistantes entre des composants, des opérateurs, etc.
- Confusion entre des pièces d'origines différentes dans un magasin.
- Utilisation de jauges ou de méthodes de mesure différentes.
- Echantillonnage non effectué au hasard.

Causes d'un mélange instable

- Différences de courte durée entre des composants, des opérateurs, etc.
- Sur-réglage du processus (réglages trop fréquents).
- Négligence des opérateurs sur le respect des consignes.
- Manque de fiabilité des équipements.
- Fatigue des opérateurs.
- Opérations de tri occasionnelles.

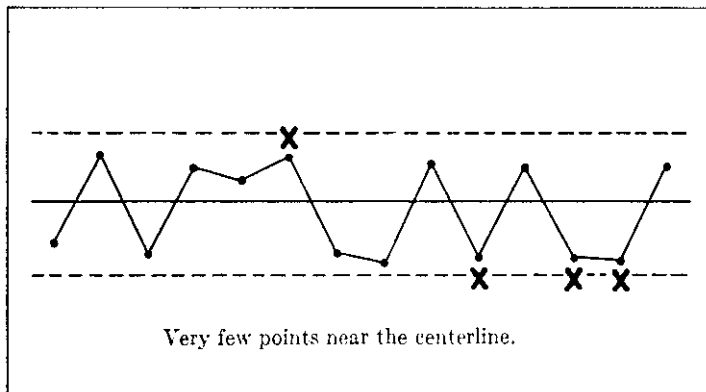


Figure 50. Mélange.

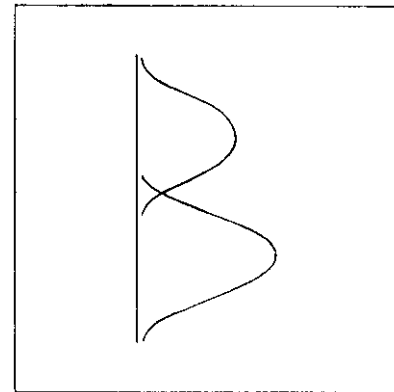


Figure 51. Distribution associée à un mélange.

16. Stratification

La stratification est une forme de mélange stable qui est caractérisée par une constance artificielle. Au lieu de fluctuer naturellement entre les limites de contrôle, avec certains points qui s'approchent parfois des limites, un profil stratifié serre de près la ligne centrale et s'en écarte peu. En d'autres termes, la stratification se traduit par des fluctuations anormalement faibles.

Comme le montre la figure 53, la distribution sous-jacente est composite, faite de petites distributions qui sont radicalement différentes.

On dit parfois que la stratification montre un profil *anormalement calme*. Il ne faut pas faire l'erreur de croire qu'un pareil profil fait apparaître un "bon contrôle". Au contraire, il révèle un manque de contrôle, parce que les distributions qui pourraient être les mêmes sont en réalité très différentes. Les paragraphes qui suivent expliquent comment se forme un profil stratifié.

Formation d'un profil stratifié

Une stratification se produit quand des échantillons sont pris de manière cohérente dans des distributions largement différentes, de telle sorte que dans chaque échantillon une ou plusieurs unités proviennent de chacune de ces distributions. La façon la plus courante d'obtenir cet effet consiste à permettre à la personne qui prélève l'échantillon de prendre quelques opérateurs, quelques machines, etc. Les gens le font parfois, sans réaliser les possibles conséquences, dans le souci d'avoir un "échantillon représentatif".

Quand on fait l'échantillonnage de cette manière, la sélection des unités n'est pas faite au hasard, et par conséquent le profil ne va pas fluctuer comme dans le cas d'un échantillonnage au hasard. Sur un graphique *R*, par exemple, le *niveau* du graphique sera anormalement haut à cause de la séparation entre les distributions. Les *fluctuations*, en revanche, seront anormalement faibles parce que les unités les plus grandes et les plus petites de chaque échantillon sont assez similaires. On peut le voir dans l'exemple suivant :

Imaginons cinq machines qui produisent des distributions très différentes les unes des autres. Voir figure 53. La dispersion de chaque distribution individuelle est $\pm 0,001$ mais la distance entre la plus haute et la plus basse est environ 0,005. Un technicien prend une pièce de chaque machine pour faire un échantillon de cinq.

Quand le technicien prend un échantillon de cette manière et calcule la valeur de R , le résultat sera principalement la différence entre les machines la plus haute et la plus basse. Les valeurs successives de R seront peu différentes les unes des autres, mais elles seront toutes au voisinage de 0,005. Leur profil sera entièrement différent d'une série de valeurs naturelles de R , qui (si elles ont une étendue moyenne d'environ 0,005) vont fluctuer tout le temps entre zéro et 0,001. Sur la figure 53, il n'existe aucune possibilité d'avoir une étendue supérieure à 0,007 ou inférieure à 0,003. Par conséquent, le profil montrera des fluctuations anormalement petites comparées avec un profil naturel qui a la même étendue moyenne.

Stratification sur un graphique p

Des profils stratifiés peuvent se former sur un graphique p à la réception d'un produit s'il existe de grandes différences entre divers conteneurs et si les échantillons sont sélectionnés de sorte que chaque échantillon comporte toujours quelques unités de chaque conteneur. Voici un exemple poussé à l'extrême :

Si un conteneur était composé uniquement de défectueux, s'il n'y avait aucun défectueux dans tous les autres conteneurs, et si l'inspecteur prenait un nombre égal d'unités dans chaque conteneur, tous les échantillons auraient exactement le même nombre de défectueux. Un graphique p du pourcentage de défectueux ne ferait apparaître qu'une droite horizontale. La stratification serait si grande que toutes les fluctuations de l'échantillonnage seraient éliminées.

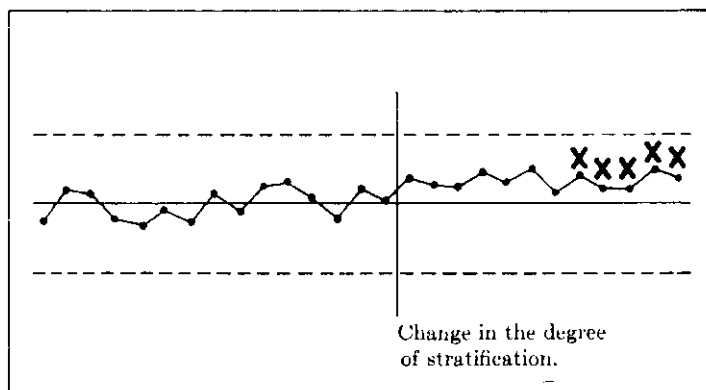


Figure 52. Stratification.

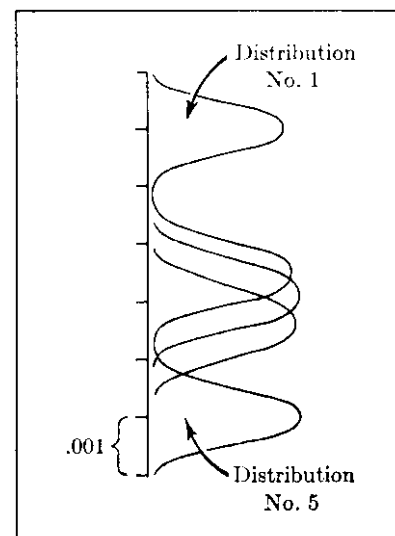


Figure 53. Distribution associée à une stratification.

Causes de stratification

Tout élément du processus qui est réparti systématiquement entre les échantillons peut être la cause d'une stratification. Il peut s'agir d'une machine si chaque machine fait partie de l'échantillon. Il peut s'agir d'une broche si chaque broche de la machine fait partie de l'échantillon. Il peut s'agir d'une boîte du produit si chaque boîte fait partie de l'échantillon.

Les stratifications sont moins visibles sur les graphiques Xb que sur les graphiques R . Elles ne peuvent pas apparaître sur les graphiques aux mesures individuelles. Parfois cependant, sur ces graphiques, les limites de contrôle peuvent être gonflées par des mélanges¹⁶.

17. Profil bizarre

Les profils bizarres¹⁷ résultent de la présence d'une simple unité ou d'une simple mesure largement différente des autres. De telles unités sont généralement produites par un système de causes venant de l'extérieur. Toutefois, certains points d'apparence bizarre peuvent faire partie du processus. C'est le cas, par exemple, des ruptures diélectriques des condensateurs.

Une autre source habituelle de profils bizarres est l'erreur de calcul. Parfois, un point est bizarre simplement parce que la personne qui l'a tracé sur le graphique n'a pas bien lu les données ou s'est trompée d'échelle.

D'autres causes possibles sont les suivantes :

- Accident de manutention.
- Opération incomplète.
- Panne de machine.

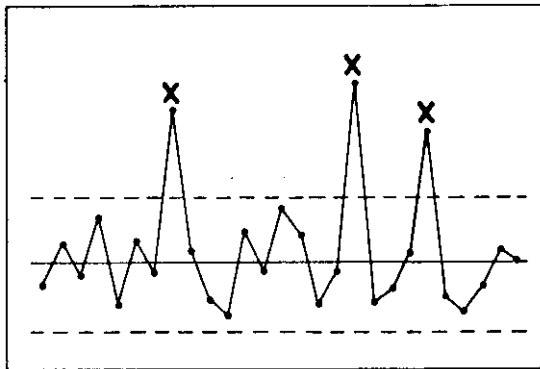


Figure 54. Profil bizarre.

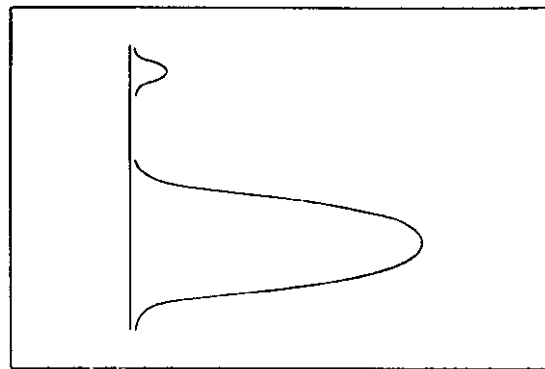
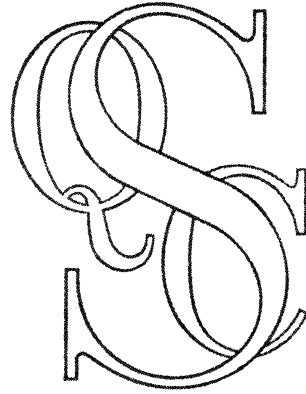


Figure 55. Distribution associée à un profil bizarre.

¹⁶ NdT. Le gonflement des limites de contrôle des graphiques aux mesures individuelles a été étudié par W. Edwards Deming sous le nom de *Tampering*. Il est souvent provoqué par une auto-corrélation des mesures. Voir *Out of the Crisis*, op. cit. page 329 ; ou *Hors de la crise*, Economica, page 45.

¹⁷ En anglais : Freaks.



Troisième partie

Applications à l'atelier

I

Graphiques de contrôle de processus

Cette partie du Manuel couvre le planning, l'installation et l'utilisation des graphiques de contrôle pour les processus opérationnels. L'ensemble des graphiques de contrôle est le centre autour duquel tourne tout le programme de l'atelier.

Les plans d'expériences sont une aide pour faire les études de capabilité de processus. Ces études permettent d'obtenir des informations sur le processus. Les plans d'échantillonnage utilisés par l'inspection servent à vérifier la pertinence des contrôles.

Toutefois, tant que les plans d'expériences n'ont pas été traduits en capabilités de processus, et que les capabilités de processus n'ont pas été traduites à leur tour en résultats tangibles dans l'atelier, toutes les améliorations apportées par les expériences et les études de capabilité ne sont que du papier. De la même façon, tant que l'atelier ne contrôle pas ses processus, il n'est pas possible de réaliser les économies et de profiter des avantages de l'inspection par échantillonnage.

Pour cette raison, la partie consacrée à l'atelier est certainement, dans une large mesure, la partie la plus importante du Manuel.

Objectifs de l'atelier

A la mise en oeuvre de graphiques de contrôle sur une zone donnée, ou sur un poste de travail donné, il est nécessaire d'avoir présents à l'esprit des objectifs tangibles qui sont notamment :

- a. Améliorer la qualité.
- b. réduire les pertes et les réparations.
- c. Rendre le processus plus stable, c'est-à-dire moins sujet à des problèmes imprévisibles.
- d. Trouver les causes de certaines difficultés rencontrées couramment.
- e. Découvrir les opérations capables d'influencer d'autres opérations.
- f. Vérifier la pertinence des spécifications, etc.

Ces objectifs s'accordent tous avec l'objectif général du contrôle de la qualité qui est d'améliorer la qualité et en même temps de réduire les coûts.

Les détails du planning, de l'installation et de l'utilisation des graphiques de contrôle de l'atelier devront être traités conjointement par l'ingénierie et l'équipe de contrôle de la qualité.

1. Planning des graphiques de contrôle

Où placer les premiers graphiques

Presque tous les ateliers ont besoin d'un certain nombre de graphiques de contrôle. Les graphiques doivent être mis en place de façon à faire apparaître les "causes de variations"

significatives qui concernent chaque poste de travail. Il existe trois moyens permettant de découvrir ces causes de variation.

(1) *Etudes de capacité de processus*. Ces études se terminent souvent en indiquant les emplacements adéquats pour les graphiques de contrôle.

(2) *Etudes de performance*. On peut les utiliser dans les cas suivants :

- a. L'atelier a des difficultés pour satisfaire une exigence.
- b. L'atelier effectue de nombreuses réparations.
- c. Il faut régler plusieurs fois les assemblages.
- d. On fait de l'inspection à 100 %

(3) *Nature de l'opération ou de la caractéristique à étudier*. Les situations suivantes bénéficieront presque toujours de graphiques de contrôle, qu'il y ait une indication apparente de problème ou non :

- a. Les cas où un opérateur contrôle directement des résultats importants.
- b. Les cas où le réglage doit tenir la machine entre des marges étroites.
- c. Les cas où il est souhaitable, pour des raisons économiques, de fixer la distribution
- d. Les cas où il est souhaitable d'étudier la question des spécifications.

Comment choisir le type de graphique approprié

Trois types de graphiques de contrôle sont habituellement utilisés dans les ateliers :

- a. Graphiques $X\bar{b}$ et R .
- b. Graphiques p (ou autres graphiques aux attributs)
- c. Graphiques aux mesures individuelles basés sur l'étendue mobile.

Graphiques $X\bar{b}$ et R

On les utilise pour :

1. Les nouveaux postes de travail, où le bureau d'études n'a pas résolu tous les problèmes.
2. Les postes de travail qui sont en production depuis un certain temps, mais qui ont des problèmes chroniques.
3. Les cas où il est difficile ou coûteux d'obtenir des données, comme dans les essais destructifs.
4. Les cas où il y a des problèmes d'assemblage difficiles, comme des tolérances qui se chevauchent.
5. Les cas où le graphique peut servir à faire un diagnostic.
6. Les cas où l'on souhaite obtenir des changements dans les spécifications.
7. Les cas où l'on souhaite réduire l'inspection entrante au minimum.
8. Les cas où l'atelier doit déterminer quand il faut régler une machine.
9. Les cas où l'on a utilisé des graphiques aux attributs sans parvenir à les mettre sous contrôle.

Graphiques p (ou autres graphiques aux attributs)

On les utilise dans les cas suivants :

1. Un graphique peut aider les opérateurs à faire un meilleur travail.
2. On souhaite réduire les réparations et les rebuts.
3. Les cas où l'on souhaite obtenir l'historique du poste de travail. Un graphique p sera plus utile qu'un graphique Xb et R parce qu'il permet de combiner plusieurs caractéristiques sur un même graphique.
4. Les cas où l'on souhaite étudier les tendances de certains défauts.
5. Les cas où l'on veut avoir un moyen de détecter des causes assignables et où il n'est pas possible économiquement de le faire avec des graphiques Xb et R .

Graphiques aux mesures individuelles basés sur l'étendue mobile.

On les utilise pour :

1. Les opérations où il n'est pas possible d'obtenir plus d'une mesure par échantillon, par exemple la température d'un four, la pression d'un gaz, une analyse chimique ou une quantité de liquide.
2. Les cas où les données proviennent de la comptabilité. On ne peut pas les obtenir avant la fin de la semaine ou du mois.
3. Tous les cas où il n'est pas possible d'utiliser les autres types de graphiques.

Comment déterminer le nombre correct de graphiques

Il est rarement possible de déterminer, au début, combien de graphiques seront nécessaires. On peut cependant le déterminer au bout d'un certain temps.

1. Au début, mettez des graphiques sur toutes les caractéristiques qui vous semblent importantes. Les graphiques eux-mêmes vous donneront des informations sur leur utilité.
2. Au cours du temps, supprimez les graphiques dont la nécessité n'est pas certaine. Ajoutez-en d'autres qui vous semblent nécessaires.
3. Tenez à jour un registre du nombre de graphiques dans l'atelier. Il est préférable de séparer les types de graphiques. En général, vous constaterez au bout de quelques mois que le nombre de graphiques tend à augmenter. Ensuite, il peut se stabiliser ou même décroître. Ce ne sont pas nécessairement les mêmes graphiques qu'au début.
4. Si les graphiques sont utilisés efficacement et si de nouvelles connaissances sont acquises, vous trouverez que la proportion des graphiques Xb et R augmente tandis que celle des graphiques p diminue.
5. Toutes les décisions relatives à l'addition ou au retrait de graphiques doivent être prises conjointement par l'ingénierie et l'équipe de contrôle de la qualité.

Comment s'assurer que les graphiques sont établis correctement

Les graphiques d'atelier ne sont pas conçus pour être interprétés de la même manière que les études de capacité de processus. Quand un graphique utilisé dans une étude de capacité de processus est hors contrôle, cela signifie "voici une information supplémentaire". Il est même essentiel parfois qu'un graphique devienne hors contrôle afin de résoudre le problème.

En revanche, les graphiques de contrôle de processus sont volontairement établis pour qu'un "hors contrôle" soit synonyme de problème. Sur un graphique de contrôle de processus, une condition "hors contrôle" signifie :

- a. Une partie du produit ne respecte pas les spécifications.
- b. Les difficultés d'assemblage vont augmenter.
- c. Les opérations suivantes vont souffrir.
- d. Les rendements vont chuter.
- e. Il y aura trop de réparations, ou trop de résultats indésirables. Toutefois, si un graphique peut passer hors contrôle sans qu'il y ait un problème, c'est qu'il n'a pas été établi correctement pour l'atelier.

Voici quelques-unes des conditions qui peuvent faire que des graphiques de contrôle ne sont pas établis correctement :

1. La cause du problème, signalée par un "hors contrôle" est trop éloignée du point où se trouve le graphique. Dans ce cas, il sera trop difficile pour l'atelier de la trouver.
2. Le produit peut avoir été trié ou inspecté à 100 % avant d'arriver à l'endroit où est pris l'échantillon. Dans ce cas, l'information nécessaire pour le contrôle a probablement été jetée avec les défectueux.
3. Le graphique essaye de couvrir de trop nombreuses caractéristiques à la fois. C'est souvent vrai avec les graphiques *p*. Quand le graphique fait apparaître un problème, l'atelier n'a aucun moyen de savoir quelle est la caractéristique hors contrôle.
4. Même quand le graphique couvre une seule caractéristique, celle-ci peut être affectée par un trop grand nombre de causes. Par exemple, un ingénieur était très impatient de passer à l'action sur un graphique de contrôle de l'atelier. Quand on lui a demandé de faire une liste de toutes les causes qui pouvaient mettre la caractéristique hors contrôle, il en a trouvé plusieurs dizaines.

L'équipe de contrôle de la qualité doit s'assurer que tous les graphiques sont statistiquement corrects, correctement planifiés et correctement utilisés.

Les échelles sont importantes sur les graphiques de contrôle de processus, car des échelles inadéquates peuvent diminuer la lisibilité ou la facilité d'emploi. Si des fluctuations sont très grandes à cause de l'échelle du graphique, l'opérateur peut avoir tendance à sur-régler la machine. D'autre part, si l'échelle est telle que les fluctuations sont très petites, le personnel de l'atelier peut tarder à agir parce qu'il a l'impression que les fluctuations n'ont pas une grande importance.

A mesure que le processus passe mieux sous contrôle, les fluctuations sur les graphiques de contrôle deviennent plus petites. Il peut être nécessaire alors d'agrandir les échelles de temps en temps pour obtenir des profils plus lisibles.

Si les limites des spécifications doivent être indiquées sur le graphique, il est nécessaire d'en tenir compte en mettant les échelles. Les limites spécifiées seront indiquées seulement par des flèches dans la marge, afin qu'elles ne soient pas confondues avec les limites de contrôle.

Opérations n'ayant pas besoin d'être suivies par des graphiques

Il n'est pas nécessaire de planifier des graphiques de contrôle pour toutes les opérations. Certaines opérations n'ont pas besoin d'être vérifiées. Sur d'autres, il suffira que l'opérateur vérifie quelques pièces de temps en temps. Il ne faut pas trop se fier à ces légères

vérifications. Seuls de petits échantillons peuvent permettre de voir si une caractéristique du produit est dans de bonnes conditions ou non.

2. Procédures détaillées de mise en œuvre

Généralités

Pendant la mise en place des graphiques dans l'atelier, il faut suivre les étapes suivantes :

Décider où le processus doit être vérifié, où et comment les échantillons doivent être prélevés. La vérification du processus doit se faire le plus tôt possible après l'opération à contrôler. L'échantillon doit être sélectionné de façon à détecter les changements du processus aussi rapidement et aussi économiquement que possible. Il faut s'assurer que les échantillons sont vraiment représentatifs du processus.

1. *Décider quel sera l'intervalle entre les prises d'échantillons.* Ceci dépend de (a) le coût des vérifications et (b) la rapidité avec lesquels le processus peut changer. La fréquence nécessaire pour les vérifications peut être de quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Au début, il est généralement nécessaire de prendre des échantillons plus fréquemment que lorsque le processus commence à se stabiliser. Une responsabilité importante de l'équipe de contrôle de la qualité est de suivre les fréquences sur tous les graphiques de contrôle afin d'augmenter autant que possible les intervalles entre les vérifications.
2. *Décider quelle sera la taille de l'échantillon.* Habituellement, elle est déterminée par le type de graphique. Il ne faut pas hésiter à choisir des tailles d'échantillon autres que celles qui sont recommandées ici. Les possibles implications de la taille de l'échantillon choisie doivent être discutées soigneusement par l'équipe de contrôle de la qualité.
3. *Décider quelles seront la ligne centrale et les limites de contrôle du graphique.* Dans une étude de capacité de processus, elles sont simplement calculées à partir des données. Pour un graphique de contrôle de processus, c'est une décision du bureau d'études.
4. *Fournir au personnel tout ce qui est nécessaire pour obtenir les données et tenir les graphiques.* Ce seront des instruments de mesure, des jauges et d'autres dispositifs. Il faudra aussi désigner la personne qui prendra les échantillons, fera les mesures et remplira les graphiques. Il faudra lui donner une formation.
5. *Ecrire un document donnant les instructions spécifiques de l'atelier pour l'utilisation de chaque graphique.* Ce travail est la responsabilité de l'ingénieur produit. Le document doit comprendre les instructions sur la façon de prendre les échantillons, faire les mesures, faire les calculs, marquer les profils et décider de ce qu'il faut regarder quand le graphique passe hors contrôle. L'ingénieur produit est assisté dans ce travail par l'équipe de contrôle de la qualité. A mesure que l'expérience s'accumule, ce document peut être modifié pour donner d'autres informations.

Lignes centrales

Sur un graphique de contrôle de processus, la ligne centrale est fixée par décision du bureau d'études. Elle représente la place (ou les places) où l'équipe de contrôle de la qualité a trouvé souhaitable et possible que le processus fonctionne. Trois techniques sont possibles pour placer la ligne centrale.

- (A) La ligne centrale peut être choisie pour représenter la *moyenne souhaitée* pour le processus, c'est-à-dire la place où la distribution devrait être pour obtenir les meilleurs résultats. Les "meilleurs résultats" se réfèrent à la meilleure qualité, les rendements les plus élevés et les coûts les plus faibles. Il est préférable que la décision d'utiliser ce type de ligne centrale soit prise à la suite d'une étude de capabilité de processus.

Alors que ce type de ligne centrale est parfois utilisé sur des graphiques R ou des graphiques p , il est couramment utilisé sur des graphiques Xb et des graphiques aux mesures individuelles.

- (B) Quand la moyenne souhaitée n'est représentée nulle part, il peut y avoir une limite supérieure ou inférieure que le bureau d'études ne veut pas voir dépasser. Dans ce cas, la ligne centrale du graphique est tracée pour représenter *la plus haute ou la plus basse moyenne admissible*.

Ce type de ligne centrale peut être utilisé pour tous les types de graphiques de contrôle. Sur un graphique R ou un graphique p , il représente souvent la meilleure performance que le processus a été capable de faire.

- (C) Dans de nombreux cas, il existe une zone, ou une "bande" de niveaux acceptables dans laquelle le bureau d'études veut que le processus fonctionne. Par exemple, il peut permettre une dérive de quelques centièmes de millimètre sur l'usure des outils, de petites différences inévitables entre le réglage des machines, ou de petites différences entre des lots de pièces. On ne fera pas attention aux fluctuations du processus tant que la distribution ne sortira pas de cette bande autorisée.

On tracera dans ce cas deux lignes centrales, une ligne haute et une ligne basse. Cette double ligne centrale sera mise seulement sur des graphiques Xb ou des graphiques aux mesures individuelles, jamais sur des graphiques R .

Précautions à prendre pour placer les lignes centrales

Ne mettez jamais une ligne centrale sur un graphique de contrôle de processus en un point où il est impossible que le processus fonctionne. Toutefois, les lignes centrales peuvent être placées de manière à encourager le processus à s'améliorer. Il faut disposer de données suffisantes pour montrer qu'une amélioration est possible.

Limites de contrôle

Dans tous les cas, les limites de contrôle pour les graphiques de contrôle de processus doivent être placées à la distance correcte de la ligne centrale. Une fois que la ligne centrale a été fixée, les limites de contrôle suivent automatiquement.

Il y a cependant une différence essentielle entre les limites de contrôle sur les graphiques de contrôle de processus et les limites de contrôle des études de capabilité de processus. Toutes les études de capabilité de processus utilisent deux limites de contrôle, une de chaque côté de la ligne centrale. Pour les graphiques d'atelier, il est possible de ne pas mettre l'une des limites de contrôle (sur les graphiques Xb et les graphiques aux mesures individuelles) dans l'un des cas suivants :

- a. Si un graphique Xb ou un graphique aux mesures individuelles possède une double ligne centrale, ne tracez pas les limites de contrôle extérieures. C'est parce que l'atelier n'a pas à intervenir quand le processus dérive entre les lignes centrales.

- b. Si la ligne centrale d'un graphique \bar{X} ou d'un graphique aux mesures individuelles est fixée au plus haut niveau permissible, ne tracez que la limite supérieure de contrôle. C'est parce que l'atelier n'a pas à intervenir quand le processus est au-dessous de ce niveau.
- c. Pour une raison analogue, si la ligne centrale est fixée au plus bas niveau permissible, ne tracez que la limite inférieure de contrôle.

Il est possible de ne pas mettre de limite inférieure de contrôle sur un graphique p après que le processus a été stabilisé à un niveau économique. Cette absence de limite de contrôle montrera que l'atelier n'a pas à s'efforcer de faire encore des améliorations.

Dans tous les cas où une limite de contrôle est présente, on attend de l'atelier qu'il applique des tests pour profils anormaux et qu'il marque des "x" sous les points correspondants. Un "x" appelle toujours à passer à l'action.

Un point spécialement important concernant le graphique R est que la limite inférieure de contrôle ne doit jamais être supprimée. C'est à cause de la grande importance économique des informations contenues à la partie inférieure du graphique R .

3. Modifications des graphiques de contrôle

Les graphiques de contrôle de processus sont dynamiques plutôt que statiques ; ils ont besoin d'être étudiés et changés continuellement. La forme du graphique peut changer avec les changements dans le processus, le planning, les exigences, la conception du produit, etc. Les graphiques en service doivent être évalués de façon répétée à la lumière des résultats ou des connaissances acquises. Les raisons de mettre à jour régulièrement les graphiques de contrôle de processus sont les suivantes :

- Faciliter leur lisibilité et leur interprétation.
- Bénéficier des dernières décisions économiques.
- Supprimer les graphiques devenus inutiles.
- Rassembler plusieurs graphiques en un seul par économie.
- Séparer un seul graphique en plusieurs pour une meilleure analyse.
- Réduire ou augmenter les intervalles entre les échantillons.
- Bénéficier des améliorations.

Incorporer les nouvelles connaissances acquises par les études de capacité de processus.

En général, les graphiques de contrôle de processus doivent changer à chaque changement de l'état des connaissances. Le besoin de changements fréquents explique l'existence des équipes de contrôle de la qualité. C'est aussi pour cela que les informations concernant le contrôle des processus doivent être écrites sur des documents séparés.

II

Introduction des graphiques dans l'atelier

La plupart des responsabilités du contrôle de la qualité sont partagées entre plusieurs personnes, et l'introduction de graphiques de contrôle dans l'atelier ne fait pas exception. L'équipe de contrôle de la qualité est responsable de l'introduction correcte des graphiques et doit s'assurer qu'ils marchent bien. Le chef d'atelier a une responsabilité particulière dans cette relation, car il est membre de l'équipe et c'est lui qui traite directement avec les opérateurs. Ses responsabilités spécifiques sont notamment les suivantes :

- (1) S'informer sur les principes généraux du contrôle de la qualité tels qu'ils sont traités dans la première partie de ce Manuel.
- (2) Comprendre le rôle de tous les graphiques dans ce domaine.
- (3) Expliquer les points suivants à tous ses subordonnés qui seront concernés directement par les graphiques :
 - (a) L'importance des graphiques.
 - (b) Comment ils fonctionnent.
 - (c) Les avantages qu'ils vont retirer de l'utilisation correcte des graphiques.
 - (d) Le fait qu'il entend utiliser lui-même les graphiques dans son travail.
- (4) S'assurer que les gens qui traceront et liront les graphiques savent le faire correctement.
- (5) Surveiller les graphiques, et d'autres contrôles de processus, pour voir s'ils fonctionnent comme prévu.

Ce chapitre est basé sur l'expérience de nombreux contremaîtres dans (1) l'introduction des graphiques, (2) l'explication des avantages qu'on peut en retirer et (3) la conduite du travail des gens qui vérifient un processus.

1. Explications des graphiques au personnel

Il est possible d'introduire des graphiques de contrôle dans l'atelier sans explications spéciales. A mesure que le temps passe et que les opérateurs commencent à poser des questions, le chef d'atelier¹⁸ peut répondre aux questions avec autant de détails qu'il estime nécessaires. En peu de temps, les gens seront habitués aux graphiques et les accepteront.

En général, cependant, il est préférable de préparer les gens soigneusement à l'avance pour l'introduction des graphiques. Beaucoup de contremaîtres le font en tenant une réunion avec leurs opérateurs environ deux semaines avant d'introduire les graphiques.

Tous les membres de l'équipe de contrôle de la qualité doivent participer à cette réunion. La discussion porte sur les sujets suivants :

¹⁸ NdT. Le chef d'atelier est un contremaître de grade supérieur.

1. Un exposé du chef d'atelier (environ 10 minutes) pour expliquer que les graphiques vont bientôt commencer. Il en donne la description, et il explique comment des opérateurs d'autres ateliers en ont tiré profit. Il faut aussi qu'il explique comment les graphiques sont faits ; qui sera le contrôleur de processus¹⁹ ; comment les échantillons seront prélevés, calculés et graphiqués. Il doit insister sur le fait que l'idée principale est de rendre le produit bon la première fois, plutôt que d'avoir à le réparer ou à le trier par de l'inspection.
2. Une démonstration par l'ingénieur de contrôle de la qualité (environ 20 minutes) pour expliquer comment fonctionnent les graphiques de contrôle. Il utilisera un schéma si les premiers graphiques sont des graphiques Xb et R ; une boîte de billes si les premiers graphiques sont des graphiques p . Il expliquera le sens des limites de contrôle et dira ce qu'il faut faire quand des "x" apparaissent sur un graphique.
3. Une déclaration de l'ingénieur produit, en termes simples et au niveau des opérateurs, pour expliquer comment leur produit est fait, pourquoi les graphiques sont importants et quelles sont les caractéristiques qu'il faut contrôler.
4. Une période de questions (peut-être 20 minutes) pendant laquelle les opérateurs sont encouragés à poser des questions. Elles pourront porter sur le travail du contrôleur de processus ou sur les effets possibles des graphiques sur les opérateurs et sur leur travail.

Cette réunion devra être suivie d'autres réunions après la mise en service des premiers graphiques. Dans ces réunions, le chef d'atelier mettra en avant les graphiques qui sont en train de s'améliorer et l'on discutera des raisons pour lesquelles d'autres graphiques sont en difficulté. A mesure que le travail s'améliore et commence à se stabiliser dans un état de contrôle, il verra que les opérateurs ont la satisfaction de comprendre ce qui se passe. Tous ceux qui ont travaillé avec des graphiques de contrôle seront fiers d'avoir pris part à cette réussite.

Importance de ces réunions

Une grande partie du succès des graphiques de contrôle dans un secteur donné dépend de la façon dont ces réunions sont conduites. Beaucoup d'équipes de contrôle de la qualité invitent non seulement les opérateurs, mais aussi les représentants syndicaux, les agents de maintenance et les membres du service de paye. Ceci permet de mieux comprendre les problèmes des opérateurs.

2. Avantages des graphiques de contrôle

Avantages pour le personnel technique

- (1) Le contrôle de la qualité implique une nouvelle manière de travailler. Il devient possible de déterminer scientifiquement jusqu'où le processus peut aller.
- (2) Les graphiques ont tendance à rendre le travail du personnel technique plus facile. Ils permettent de déterminer la meilleure combinaison homme-machine. Ils ont une connaissance bien définie de la capacité de la machine ou du processus. Ils ont donc de meilleures réponses aux questions qui sont soulevées quand quelque chose va mal.

¹⁹ NdT. Le mot "contrôleur" peut ici prêter à confusion. Ce n'est pas un employé qui vérifie que tout est en règle, au sens français habituel, comme dans le train, mais un opérateur chargé de tenir un graphique de contrôle. En anglais : "process checker".

- (3) Les graphiques permettent de travailler avec les distributions plutôt qu'avec des tolérances "mini maxi". Avec les graphiques de contrôle, il y a moins d'embouteillages et moins de périodes de crise. Les problèmes sont appréhendés dès leur apparition, de sorte que la chaîne de fabrication n'est pas envahie de pièces défectueuses.
- (4) Quand des changements sont faits sur une opération particulière, les graphiques indiquent quel sera l'effet sur le produit final. Le graphique dit au régleur de la machine comment faire le réglage. Les graphiques peuvent être utilisés pour séparer les problèmes des machines de ceux des opérateurs, ou pour dire si une machine a besoin d'être réparée sans avoir besoin d'être réglée.
- (5) Quand le travail est couvert par des graphiques de contrôle, il est plus facile d'obtenir rapidement de l'aide du bureau d'études, et il est plus facile d'aplanir les difficultés avec l'inspection.

Avantages pour les opérateurs

- (1) Les graphiques permettent d'identifier des outils, des dispositifs, des jauges, des pièces détachées, etc. qui ne conviennent pas. C'est pour cette raison qu'il est plus facile de retrouver les bonnes conditions de travail avec des graphiques.
- (2) Les opérateurs n'ont plus à se sentir responsables des fluctuations normales du processus ou des difficultés qu'ils ne peuvent pas contrôler.
- (3) Les graphiques aident les opérateurs à réaliser un meilleur produit sans prendre plus de temps. Ceci peut contribuer à augmenter leurs revenus.
- (4) Les graphiques rendent le travail plus intéressant. Les gens peuvent suivre les progrès de leur travail. Ils savent aussi où le processus marche tout le temps et ils n'ont pas peur que le produit soit refusé par l'inspection.
- (5) Les graphiques font voir quand le travail est bien fait. La plupart des opérateurs sont fiers de leurs graphiques de contrôle.

3. Instructions pour le contrôleur de processus

Le terme "contrôleur de processus" désigne toute personne qui est responsable de prendre des échantillons et de tracer des graphiques. Cette personne peut être spécialement désignée dans le groupe pour faire ce travail, ou bien c'est l'opérateur lui-même.

Ce que le contrôleur de processus doit savoir

Un contrôleur de processus doit savoir comment prélever correctement un échantillon ; comment vérifier les caractéristiques nécessaires ; comment faire les calculs ; comment tracer les graphiques et comment reconnaître les profils anormaux.

L'équipe de contrôle de la qualité est responsable de voir si le contrôleur de processus est correctement formé pour ce travail. La formation doit comprendre l'aptitude à interpréter les profils. Chaque contrôleur de processus doit avoir une copie du document "Instruction générale pour le contrôle des processus" et bien connaître les précautions à prendre.

Un nouveau contrôleur de processus doit travailler assez longtemps avec un membre de l'équipe de contrôle de la qualité (généralement l'ingénieur qualité) pour être sûr de bien comprendre les habitudes du métier. Une grande partie du succès des graphiques de contrôle provient de la rapidité et de la fiabilité du contrôleur de processus.

Prélèvement des échantillons

Etant donné que toutes les informations proviennent d'échantillons, il est important de s'assurer que ceux-ci ont été sélectionnés correctement. Le prélèvement correct d'un échantillon obéit à des lois statistiques. Si celui qui sélectionne les échantillons a transgressé les lois statistiques, les échantillons peuvent facilement conduire à des résultats erronés.

Certaines choses que le contrôleur de processus doit savoir quand il prélève des échantillons sont marquées dans le plan de contrôle. Ce sont habituellement la taille de l'échantillon, l'intervalle normal entre les contrôles et l'endroit du prélèvement. Par exemple, il doit prélever sur la chaîne les dernières pièces fabriquées ; ou bien prendre un échantillon dans un bac contenant toutes les pièces fabriquées depuis le dernier prélèvement, etc. Ces consignes doivent être strictement respectées. De plus, le contrôleur de processus doit prendre les précautions suivantes.

1. Les échantillons doivent donner une image non-biaisée du processus. Il ne faut pas prendre délibérément des pièces dont on a une raison de penser qu'elles sont différentes des autres. Quand cinq pièces sont prises au hasard dans un bac, c'est un échantillon non-biaisé du processus pendant le temps où ces pièces ont été fabriquées.
2. Il ne faut pas sélectionner des pièces de l'échantillon faites sur des machines différentes ou avec des opérateurs différents, à moins que ce soit demandé par le plan de contrôle.
3. Si des contrôles sont faits à des intervalles comme, par exemple, une demi-heure, il ne faut pas commencer exactement toutes les demi-heures, car certains opérateurs pourraient anticiper l'échantillonnage et travailler différemment.
4. Toujours utiliser le seul échantillon prélevé, ne pas recommencer. C'est-à-dire que si l'on n'aime pas ce qui se trouve dans un échantillon, il ne faut pas l'ignorer et en prendre un autre.
5. Les intervalles indiqués sur le plan de contrôle sont supposés suffisants dans des conditions normales. En cas d'urgence, le chef d'atelier peut demander au contrôleur de processus de prendre des échantillons plus souvent. Dans ce cas, tous les échantillons doivent être représentés sur le graphique. Il ne faut en jeter aucun.

Si le chef d'atelier trouve que la taille de l'échantillon, la fréquence d'échantillonnage ou la méthode de sélection des échantillons indiqués sur le plan de contrôle ne conviennent pas, il doit faire changer le plan de contrôle. Tant qu'il n'est pas changé, le contrôleur de processus ne doit pas changer de méthode, car il violerait inconsciemment les règles statistiques.

Traçage des graphiques de contrôle

Pour tracer correctement les graphiques, le contrôleur de processus doit connaître les règles suivantes :

1. Porter les points le plus rapidement possible, dès que les données sont connues.
2. Faire attention à l'échelle du graphique. Les points doivent être portés à la bonne place. En particulier, il faut remarquer que l'échelle du graphique R est différente de celle du graphique Xb .
3. Porter tous les points sur le graphique, y compris ceux qui sont hors contrôle. Le graphique n'aurait aucune valeur s'il ne montrait que les meilleurs points.
4. Identifier tous les points avec la date, l'heure, le nombre de machines, etc.

5. Dès qu'un point est porté sur le graphique, vérifier s'il doit être marqué d'un "x".
6. Noter sur le graphique tous les changements du processus qui, dans l'opinion du chef d'atelier et d'après son expérience, peuvent avoir affecté le profil.

Pour finir, celui (ou celle) qui saisit les données sur un échantillon doit avoir conscience de ce qui lui est demandé. Il doit savoir où il faut faire les mesures sur une pièce (au bord, au centre, etc.) Il doit savoir combien il faut faire de mesures sur chaque pièce. Il doit savoir se servir d'une jauge. Dans le cas d'une inspection visuelle, il doit avoir une bonne connaissance des critères visuels. En cas de doute, il doit prévenir immédiatement le chef d'atelier.

Apparence des graphiques de contrôle

Dans un atelier, il est difficile de tenir les graphiques nets et propres. La netteté est un atout, c'est pourquoi le contrôleur de processus doit porter les points et marquer les "x" de façon précise. Les ratures, les gommages et les lignes mal tracées ne peuvent que rendre les graphiques plus difficiles à lire.

D'un autre côté, les graphiques en service dans un atelier ont souvent tendance à être couverts de traces de doigts, éclaboussés d'huile et gribouillés de notes illisibles. De tels graphiques, donnant ainsi la preuve qu'ils sont discutés et utilisés, sont beaucoup plus susceptibles de faire le travail auquel ils sont destinés.

III

Actions sur les graphiques de contrôle

1. Importance de la rapidité d'exécution

Le planning des graphiques de contrôle d'atelier suppose toujours que les contrôles seront documentés, que le diagnostic sera fait rapidement et que les remèdes seront aussitôt efficaces. Tout retard dans une action peut avoir des effets négatifs :

1. Un retard peut signifier qu'une quantité importante d'unités indésirables sera produite. Cela réduira les rendements, augmentera les rebuts et augmentera le nombre d'articles refusés par l'inspection.
2. Un retard peut signifier que la cause du problème est plus difficile à identifier que d'habitude, et même que très souvent elle ne sera pas identifiée du tout. Un axiome de Western Electric dit que les causes attribuables doivent être identifiées pendant que ces causes sont actives.

2. Action du contrôleur de processus

Dès que le contrôleur de processus observe qu'un graphique est hors contrôle, il doit immédiatement amorcer une action prévue dans le document d'instructions générales pour le contrôle des processus. Le graphique est hors contrôle quand un point est marqué "x". L'action consiste d'habitude à notifier à un responsable qu'une condition "hors contrôle" vient d'apparaître. Cette personne est soit le régleur de la machine, soit l'opérateur, soit parfois le contremaître.

En outre, le contrôleur de processus peut faire d'autres démarches pour s'assurer que l'action n'est pas retardée. Certains contremaîtres ont un dossier spécial où les contrôleurs de processus mettent les graphiques qui n'ont pas été mis immédiatement sous contrôle. Dans d'autres cas, le contrôleur de processus alerte simplement le contremaître ou ajoute un commentaire sur le graphique.

3. Actions des opérateurs

Suivant la nature du processus et la condition du graphique qui est hors contrôle, le régleur de la machine vérifie le processus, la machine, les équipements, les pièces détachées, l'opérateur ou la méthode. Si une action immédiate est possible, il corrigera immédiatement la condition hors contrôle. Si une action immédiate n'est pas possible, il déclenchera immédiatement l'action appropriée et en informera le contremaître. Si l'action doit être retardée pour quelque raison que ce soit, il rédigera une note disant ce qui a été fait.

Si le régleur de la machine ou un autre responsable est incapable de dire quelle action doit être faite, il doit rapidement prévenir le contremaître pour obtenir une aide spéciale. Dans ce cas, le contremaître peut demander l'aide d'une personne extérieure.

4. Action du Chef d'atelier

Le chef d'atelier doit faire immédiatement une investigation dans tous les cas où ses gens ont besoin d'aide dans l'utilisation des graphiques. En outre, il doit surveiller le "tableau des problèmes" ou d'autres dispositions prises pour les graphiques qui n'ont pas été remis sous contrôle. Il doit aussi vérifier de temps en temps tous les graphiques pour s'assurer que les actions demandées ont été faites. Les cas portés à son attention sont en général de deux types.

1. *Quand l'action nécessaire est connue mais ne peut pas être faite immédiatement.* Dans ce cas, le chef d'atelier doit écrire une explication sur le graphique de contrôle et discuter le problème à fond à la réunion suivante de l'équipe de contrôle de la qualité.
2. *Quand l'action nécessaire n'est pas connue, de sorte que le chef d'atelier doit la déterminer.* Cela demande de sa part une certaine aptitude à mener une investigation. Etant donné que lorsqu'un graphique nécessite une investigation c'est un support valable pour faire une formation, il mènera son investigation avec l'aide du régleur.

L'investigation pour déterminer quelle action est nécessaire se déroulera de la manière suivante :

- a. Assurez-vous que les "X" sont marqués correctement sur tous les graphiques en accord avec les tests standard. Les graphiques sont plus faciles à interpréter avec les "X".
- b. Rapprochez, si possible, les profils avec des choses que vous connaissez sur l'opération ou sur le processus. Ce sera d'autant plus facile que vous avez une longue expérience des graphiques de contrôle.
- c. Si vous ne pouvez pas découvrir immédiatement pourquoi le graphique se comporte ainsi, passez aux étapes suivantes :
 1. Identifiez ce qui est mauvais ou inhabituel de la part des opérateurs ou des machines. D'où provient ce lot de pièces ? d'où provient ce liquide de décapage ? etc.
 2. Souvent, les graphiques qui sont difficiles à interpréter par eux-mêmes deviennent clairs quand on les compare à d'autres graphiques. Prenez l'habitude de regarder tous les graphiques qui sont en ordre, en commençant par les opérations les plus anciennes. Cherchez les graphiques qui réagissent les uns sur les autres. Vous pouvez éventuellement initialiser un nouveau graphique pour faire la lumière sur celui que vous êtes en train d'examiner.
 3. La plupart des causes sont associées à des éléments du processus qui n'ont pas un caractère d'unicité, comme ceux qui comportent plusieurs opérateurs, plusieurs machines, plusieurs broches sur une machine, plusieurs états de surface, etc. Dans le cas contraire, les causes peuvent être liées à l'usure des pièces ou à la fatigue des opérateurs.
 4. Au besoin, discutez du profil avec d'autres personnes qui connaissent bien le travail : ingénieurs produit, agents de maintenance, inspecteurs, etc. Discutez aussi avec les autres membres de l'équipe de contrôle de la qualité.

5. Action de l'équipe de contrôle de la qualité

Alors que le personnel d'atelier a pour mission de prendre des actions immédiates comme nous l'avons indiqué, l'équipe de contrôle de la qualité est fondamentalement responsable de s'assurer que les équipes de contrôle de l'atelier fonctionnent bien. Si l'atelier ne rencontre

pas moins de problèmes, ou si les gens de l'atelier ont du mal à déterminer l'action à entreprendre pour résoudre un problème, l'équipe doit immédiatement vérifier la liste suivante, qui indique des causes possibles de cette incapacité :

1. L'atelier garde des graphiques inutiles, ou bien l'équipe n'a pas réussi à mettre en place les graphiques nécessaires.
2. L'atelier utilise de mauvaises méthodes pour prélever les échantillons, une mauvaise fréquence d'échantillonnage, des limites de contrôle incorrectes, etc.
3. Des erreurs sont faites dans les mesures, les calculs et les traçages, en sorte que le graphique de contrôle ne donne pas une image valide du processus.
4. L'atelier ne sait pas faire les actions indiquées quand un graphique passe hors contrôle.
5. L'équipe de contrôle de la qualité ne s'intéresse pas suffisamment à ce que fait l'atelier quand un graphique est hors contrôle.

Parmi les choses que l'équipe de contrôle de la qualité peut avoir à faire en rapport direct avec les graphiques de contrôle, on notera les actions suivantes :

- a. Redonner des instructions aux opérateurs ou aux contrôleurs de processus.
- b. Donner une meilleure méthode pour vérifier le réglage des machines.
- c. Donner un moyen d'obtenir de meilleures pièces détachées.
- d. Emettre un ordre pour réviser une machine.
- e. Obtenir une meilleure maintenance des installations et du matériel d'essai.
- f. Faire vérifier les jauges.
- g. Discuter avec un fournisseur.
- h. Changer une méthode.
- i. Modifier un outil.
- j. Modifier le plan.
- k. Modifier la spécification.
- l. Conduire un plan d'expérience.

IV

L'équipe de contrôle de la qualité

Ce chapitre met l'accent sur l'importance de l'équipe de contrôle de la qualité. Cette importance apparaît dans le planning et l'installation des graphiques (chapitre I), la formation du contrôleur de processus (chapitre II) et l'utilisation des graphiques de contrôle comme guide de l'action (chapitre III). On trouvera ici de nouveaux détails sur ses activités.

1. Réunions régulières de l'équipe

Rappelons que l'équipe de contrôle de la qualité se compose de l'ingénieur produit, du chef d'atelier et de l'ingénieur qualité attaché à un secteur donné. Le premier but de l'équipe est de s'assurer de la coopération directe et constante entre les opérations et le bureau d'études dans tous les problèmes concernant le contrôle de la qualité, et aussi de veiller à ce que les méthodes statistiques soient utilisées correctement et de manière cohérente.

La première étape de la création d'une équipe de contrôle de la qualité est une réunion entre le chef d'atelier et les ingénieurs afin de réfléchir au travail sous l'angle du contrôle des processus et de planifier les premières études de capabilité et les premiers graphiques. Ensuite, l'équipe devrait se réunir une fois par semaine ou une fois par mois, selon les conditions de travail. Les réunions doivent être plus fréquentes au début, sans excéder une fois par semaine, et moins fréquentes quand les processus commencent à être sous contrôle.

La principale activité d'une réunion consiste à regarder les graphiques de contrôle. Un membre de l'équipe ramasse tous les graphiques en service et les apporte à la réunion.

Voici les points qui sont abordés normalement dans chaque réunion :

- (1) Vérifier les actions que l'on a promis de faire à la réunion précédente.
- (2) Passer en revue tous les graphiques dans l'ordre des opérations et noter leurs progrès. Noter aussi les caractéristiques qui posent des problèmes et les graphiques qui semblent réagir les uns sur les autres. Discuter les causes des profils anormaux.
- (3) Supprimer les graphiques devenus inutiles. Se mettre d'accord sur les graphiques qu'il est nécessaire de modifier. Prévoir au besoin de nouvelles études de capabilité.
- (4) Décider de nouvelles actions selon la situation présente dans l'atelier. Ces actions peuvent concerner d'autres secteurs ou d'autres départements. Se mettre d'accord sur la personne qui va les prendre en charge.

Certaines autres choses peuvent être faites, mais pas nécessairement à chaque réunion :

- (1) Le groupe peut réécrire certaines parties du plan de contrôle, concernant notamment le prélèvement des échantillons, l'enregistrement des données ou le traçage des graphiques.
- (2) Il peut décider la meilleure façon de former un nouveau contrôleur de processus.

- (3) Il peut planifier des réunions spéciales avec les opérateurs et les régleurs pour les informer des progrès ou pour introduire de nouveaux graphiques.
- (4) Il peut discuter les résultats rapportés par l'inspection finale ou étudier l'effet d'un nouveau plan d'échantillonnage pour l'inspection finale.
- (5) Il peut planifier et conduire des plans d'expériences ou des programmes de réduction de coûts.
- (6) Il peut planifier et écrire des rapports d'avancement pour informer d'autres personnes sur les activités de l'équipe et sur la situation dans l'atelier.

Dans tous les cas, les réunions seront conduites sur une base systématique et couvertes par des rapports écrits. Ceux-ci doivent comporter, entre autres choses, un résumé des résultats des programmes de réduction de coûts.

2. Couverture du contrôle de la qualité

La couverture idéale du contrôle de la qualité est obtenue quand toutes les opérations sont étudiées systématiquement afin de déterminer leurs possibilités et le niveau de contrôle qui leur est nécessaire.

Il n'est pas possible de garder une trace du contrôle de la qualité en regardant seulement le nombre de graphiques de contrôle, car il existe un grand nombre d'opérations qui n'en ont pas besoin. En revanche, c'est nécessaire pour toutes les opérations qui doivent être *étudiées*. Par conséquent, le progrès se mesure au nombre d'opérations qui ont été étudiées.

Le terme "opérations" est utilisé ici dans le même sens que dans les études pour les primes d'intéressement. C'est-à-dire que c'est le nombre total d'activités distinctes, ou d'ensembles d'activités reliées entre elles, qui est nécessaire pour réaliser le produit.

L'équipe de contrôle de la qualité peut donc, quand elle vérifie la couverture du contrôle de la qualité, suivre la liste des opérations qui existe déjà chez Western Electric pour les primes d'intéressement.

Rapport sur le nombre de graphiques

En plus du nombre d'opérations couvertes, il est utile d'enregistrer le nombre de graphiques installés, par types.

3. Rapports d'avancement

Etant donné que le management a un intérêt vital dans le progrès du programme de contrôle de la qualité, l'une des importantes obligations de l'équipe de contrôle de la qualité est de tenir le management informé à des intervalles réguliers. L'équipe doit sortir un rapport d'avancement formel un an au plus tard après le démarrage des activités de contrôle de la qualité. Ensuite, les rapports doivent être sortis environ tous les six mois. Les rapports peuvent couvrir l'amélioration de la qualité, la réduction des coûts, la réduction du nombre d'inspections ou tout autre sujet parmi ceux du programme de contrôle de la qualité.

Les rapports doivent être concis et factuels. Ils doivent comporter des valeurs numériques présentées, si possible sous forme de tableaux. Ils doivent comporter une brève présentation des plans de contrôle de qualité pour un avenir immédiat.

On peut trouver des matériaux pour les rapports d'avancement dans :

- Les comptes-rendus des réunions.

- Les enregistrements de la couverture du contrôle de la qualité.
- Les enregistrements du département d'inspection.

4. Réduction des coûts

Au cours des réunions de l'équipe de contrôle de la qualité, on constate souvent que d'importantes économies peuvent être réalisées en appliquant les méthodes de contrôle de la qualité. Ces réductions de coût sont obtenues grâce à :

- A. Une réduction des opérations d'inspection finale.
- B. Une réduction des opérations de tri.
- C. L'utilisation de graphiques de contrôle pour avoir des distributions centrées et maintenir les processus sous contrôle.
- D. L'utilisation d'études de performance pour améliorer les processus existants et pour développer de nouveaux processus.

La réalisation de programmes formels de réduction de coût est très souvent l'un des premiers objectifs de l'équipe de contrôle de la qualité. Les progrès dans ce domaine sont examinés périodiquement dans les réunions. Les buts et les résultats du programme sont expliqués aux opérateurs et aux régleurs pour en obtenir la plus grande coopération possible.

Les réductions de coût sont résumées périodiquement dans les rapports d'activité. A mesure que le programme de contrôle de la qualité se développe, les efforts pour réduire les coûts deviennent de plus en plus importants.

5. Audit des graphiques de contrôle

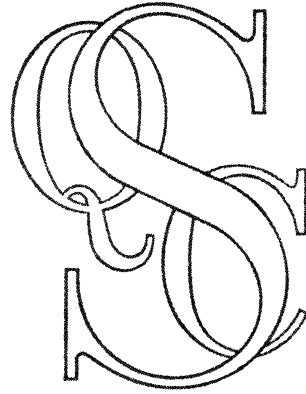
Il est souhaitable d'avoir périodiquement une revue formelle des activités de contrôle de la qualité conduite par une personne extérieure à l'équipe. Le but est de s'assurer que les pratiques du contrôle de la qualité dans l'atelier sont uniformes et que les contrôles des processus ne sont pas négligés ou méconnus du personnel.

Un audit formel des graphiques de contrôle est effectué au moyen d'un questionnaire qui comprend la vérification des points suivants :

- Nombre de graphiques
- Traçage des graphiques
- Mise à jour des graphiques
- Marquage des "x" sur les graphiques
- Notes inscrites sur les graphiques
- Actions provoquées par les graphiques
- Données utilisées
- Jauges et équipements de test
- Méthodes d'échantillonnage

L'objet de cet audit étant de mettre à jour leur travail, et non de les prendre en faute, les membres de l'équipe sont prévenus à l'avance.

Quand l'audit est terminé, des recommandations sont envoyées aux membres de l'équipe, à la suite desquelles une discussion plus ou moins formelle est engagée. Après la discussion, un rapport formel est rédigé pour être envoyé au management et aux membres de l'équipe. Un suivi est fait périodiquement pour s'assurer que tous les points ont été traités.



Quatrième partie

Procédures d'inspection

I

Principes de l'inspection

Ce chapitre du Manuel couvre la philosophie générale de l'inspection telle qu'elle est appliquée sur les sites de Western Electric. Le terme "inspection" se rapporte strictement aux activités du personnel placé sous les ordres de la division de l'Inspection. Il ne comprend ni les contrôles de processus ni les filtrages du produit quand ils sont exécutés par la division des Opérations. Le but de cette quatrième partie est d'expliquer la relation entre l'inspection et le contrôle des processus, et de mettre l'accent sur les différences entre les procédures d'acceptation et de rejet utilisées par l'Inspection et le "tri opérationnel" qui peut être fait par les Opérations

Bien que ce ne soit pas l'objectif principal d'un programme de contrôle de la qualité, des bénéfices importants peuvent être obtenus par l'application des principes du contrôle de la qualité à la planification de l'inspection. Une retombée importante est la réduction du volume d'inspection nécessaire. Une autre retombée est le fait qu'avec une inspection correctement planifiée, la division des Opérations devient responsable de la qualité de ses produits.

1. Place de l'inspection dans un programme qualité

Un programme qualité essaye de prévenir les défauts par l'amélioration et le contrôle des processus. Des vérifications sont faites par le département des opérations à des intervalles réguliers et sont utilisées comme base pour une action concernant le processus, plus précisément pour dire si le produit doit être laissé tel quel ou si une action est nécessaire pour corriger des conditions indésirables. Cette action sur le processus a presque invariablement pour résultat une amélioration régulière de la qualité et, en même temps, une réduction régulière du coût.

Cependant, un programme complet de contrôle de la qualité demande plus qu'une vérification du processus. Pour tenir l'objectif d'une qualité satisfaisante au moindre coût, il est nécessaire d'inclure aussi une inspection correcte. Le terme "inspection" tel qu'il est utilisé ici signifie "*inspection d'acceptation*", ce qui consiste à examiner une quantité spécifique de produit pour donner une base à l'action concernant un produit particulier, c'est-à-dire pour décider si le produit doit être accepté et passer à l'utilisateur, ou bien s'il faut faire une autre action telle des rebuts, des réparations, etc.

L'inspection par échantillonnage fournit, en effet, une vérification de la pertinence des contrôles de processus. Si le processus a été contrôlé convenablement par le département des opérations, le produit passera l'inspection finale sans problème et sans retard. Sinon, l'inspection jouera un rôle de filtre qui empêchera de sortir le mauvais produit.

L'inspection en urgence n'est jamais économique. Dans des conditions normales, l'inspection est maintenue à un niveau économique. Meilleur sera le contrôle du processus, plus rares seront les périodes d'inspection en urgence. Il existe donc un rapport bien défini entre l'économie de l'inspection et le contrôle du processus.

L'inspection peut contribuer au programme d'une autre manière. Au début, les résultats d'inspection sont souvent utilisés pour détecter des problèmes et montrer où le contrôle du processus est nécessaire. Le personnel d'inspection prend parfois une part active à ces mesures.

Cependant, il est important que, dans ce cas particulier, l'inspection soit laissée entre les mains du personnel de l'atelier. L'inspection formelle est une fonction complètement séparée qui est concernée par l'évaluation des résultats finaux.

L'inspection ne peut jamais être complètement éliminée²⁰

L'un des objectifs d'un programme de contrôle de la qualité est de réduire le volume des inspections. Toutefois il n'est jamais possible d'éliminer l'inspection entièrement. L'organisation de l'inspection a des responsabilités qu'elle ne peut pas déléguer à d'autres organisations. L'une de ses obligations est de certifier au client la quantité et la qualité du produit pour que le paiement puisse être effectué. Ceci impose une organisation séparée de l'organisation qui fabrique le produit.

De plus, le département d'Inspection représente l'utilisateur qui peut être : soit une autre organisation, soit le client final. L'acceptation ou le refus du produit avant qu'il ne quitte le département des Opérations peut éviter de faire des manutentions et éviter des négociations considérables qui auraient lieu si l'utilisateur faisait sa propre inspection.

Par conséquent, l'inspection doit (1) assurer que la division des Opérations accomplit ses fonctions correctement, et (2) procurer des garde-fous convenables contre l'expédition de produits défectueux. Il faut pour cela examiner en détail chaque unité du produit. C'est l'inspection à 100 %. Le même but peut être atteint si l'on décide d'accepter ou de refuser le produit après en avoir examiné seulement une partie. C'est l'inspection par échantillonnage. En règle générale, c'est la seconde procédure qui est la plus économique.

2. Tri et échantillonnage

Avant le début d'un programme de contrôle de la qualité, il est tout à fait banal que la division de l'Inspection fasse une inspection à 100 % dans les conditions suivantes :

- (1) Quand un poste de travail vient juste d'entrer en production, ou quand la production est extrêmement limitée. Dans ce cas, l'échantillonnage n'est pas pratique.
- (2) Quand une exigence est tellement critique que la vérification de toutes les unités est jugée nécessaire. Par exemple, si un défaut peut affecter la sécurité des personnes.
- (3) Quand le produit est tel qu'il faut trier les pièces sans interruption pour atteindre un niveau de qualité acceptable. Dans ce cas, le tri est nécessaire à la qualité.

La plupart des inspections à 100 % dans l'industrie sont faites pour la troisième raison.

Dans un programme de contrôle de la qualité, on considère qu'il est normal que la division de l'Organisation fasse des inspections à 100 % pour l'une ou l'autre des deux premières raisons. Mais dans le troisième cas, c'est la division des Opérations qui fait le tri tandis que

²⁰ NdT. En 1982, W. Edwards Deming a démontré que la corrélation est nulle entre les proportions de pièces défectueuses dans un échantillon et dans le lot où il a été prélevé si ce lot provient d'une production sous contrôle. Par conséquent, l'inspection par échantillonnage est parfaitement inutile quand la production est sous contrôle. Voir *Hors de la crise*, op. cit. page 302.

c'est la division de l'Inspection qui fait l'échantillonnage. Ceci rend la division des Opérations responsable de la qualité et ouvre la porte à une amélioration plus rapide des processus en incitant les opérateurs à se débarrasser du tri au plus vite.

Tri opérationnel et tri correctif

Quand le tri est effectué par la division des Opérations, on fait la distinction entre le tri nécessaire ou inévitable, résultant de la nature ou de la capacité de l'opération, et le tri évitable qui résulte de l'incapacité de faire le travail correctement. Les études de capacité de processus sont utilisées pour déterminer combien doivent être considérés comme inévitables.

Quand une étude de capacité de processus montre que le processus n'est pas capable de sortir le produit avec une qualité acceptable, même si le travail est fait correctement, il faut faire un tri pour éliminer les défectueux. Il est connu sous le nom de "tri opérationnel" parce que c'est une partie essentielle des opérations.

En revanche, si le processus est capable de sortir un produit de qualité acceptable, et cependant si des défectueux sont produits à cause d'une mauvaise main d'œuvre ou de défauts dans le processus, le tri se nomme "tri correctif". C'est le cas, par exemple, quand la négligence d'un opérateur fait que 12 % des pièces produites sont défectueuses, alors que normalement la capacité du processus ferait que 2 % seulement seraient défectueuses.

Voici la marche à suivre pour déterminer le besoin d'un tri opérationnel :

- A. Faire des études de capacité du processus pour trouver son comportement normal. Éliminer, autant que possible, les causes attribuables qui sont dues à l'incapacité de faire tourner le processus correctement. Si la capacité qui résulte de ces études est suffisamment bonne pour tenir les standards de qualité exigés, un tri opérationnel n'est pas nécessaire.
- B. Si la capacité normale n'est pas assez bonne pour tenir les standards de qualité exigés, déterminer ce qu'il faut faire pour améliorer le processus. Parfois, les changements nécessaires sont simples et rapides : par exemple, faire un chanfrein sur un équipement, réduire le jeu d'un assemblage, installer une minuterie automatique, etc. D'autre part, les graphiques de contrôle d'atelier améliorent beaucoup les performances de presque tous les processus qui dépendent surtout de la technique des opérateurs. Dans tous ces cas, il ne sera pas utile de prévoir un tri opérationnel.
- C. Si la capacité du processus n'est pas suffisamment bonne pour tenir les standards de qualité et s'il n'est pas possible de l'améliorer immédiatement, un tri opérationnel doit être prévu comme une mesure temporaire jusqu'à ce que le processus soit amélioré.

Dans tous les cas, l'un des devoirs de l'équipe de contrôle de la qualité est d'éliminer le tri opérationnel le plus tôt possible grâce à des améliorations du processus.

3. Plans d'inspection

Le coût de l'inspection est généralement modeste en comparaison des autres coûts de production. Néanmoins, les procédures d'inspection peuvent avoir un effet important non seulement sur le coût de l'inspection mais aussi sur le coût de la fabrication. Pour cette raison, toutes les procédures d'inspection nécessitent une bonne organisation, à laquelle plusieurs personnes peuvent contribuer.

- (1) L'ingénieur de fabrication est responsable du planning d'inspection et de la rédaction d'un document décrivant les procédures d'inspection.

- (2) Les ingénieurs qualité donnent généralement leur aide pour les aspects statistiques du planning d'inspection, dont notamment la sélection des niveaux de qualité et la fourniture de méthodes d'inspection convenables. De plus, ils peuvent aider à vérifier l'économie des plans d'inspection et s'assurer que les pratiques d'inspection du site sont cohérentes.
- (3) Les contremaîtres d'inspection font de nombreuses suggestions très utiles pour les plans d'inspection. Leur expérience est une bonne source d'information pour les ingénieurs.
- (4) Les contremaîtres de l'atelier participent aussi à l'élaboration des plans d'inspection, car leur opinion a une incidence sur les coûts de fabrication. Il est recommandé à l'équipe de contrôle de la qualité de discuter à l'avance de tous les changements proposés pour les procédures d'inspection. C'est un moyen de promouvoir une bonne entente et de s'assurer que les procédures adoptées seront pratiques et économiques.

II

Acceptation par échantillonnage

1. Concepts élémentaires

Généralités

Supposons que l'on ait un gros volume de produits avec 4 % de défectueux. Si l'on prend un échantillon de 100 pièces et s'il représente exactement le produit, on s'attend à trouver dans cet échantillon quatre pièces défectueuses. Néanmoins, l'expérience montre qu'il peut contenir plus ou moins de quatre pièces défectueuses. Par exemple sur dix prélèvements effectués, deux échantillons contenaient quatre défectueux, le meilleur en contenait un et le moins bon en contenait sept.

Dans le contrôle de processus, un tel échantillon serait tracé sur un graphique p qui montrerait un profil fluctuant. Dans l'inspection par échantillonnage, les résultats ne sont pas portés sur un graphique, mais le même profil fluctuant existe.

Un plan d'échantillonnage fixe une certaine limite nommée "nombre acceptable" qui définit le nombre maximum de défectueux acceptable dans un échantillon. Quand la fluctuation de l'échantillonnage fait que le nombre acceptable est dépassé, l'inspecteur refuse le produit. Dans le cas contraire, l'inspecteur accepte le produit. Les produits de mauvaise qualité ont un profil fluctuant assez différent de celui des produits de bonne qualité et, pour cette raison, le plan d'échantillonnage conduira à refuser une plus grande proportion de produits de mauvaise qualité.

Il faut retenir deux choses importantes dans l'utilisation d'un plan d'échantillonnage :

- (a) Quand le produit se détériore, le plan d'échantillonnage ne refuse pas nécessairement tous les articles qui lui sont soumis. Il refuse seulement une plus grande *proportion* du produit si la qualité est moins bonne.
- (b) Une quantité individuelle du produit qui est refusée par le plan d'échantillonnage n'est pas nécessairement pire qu'une quantité individuelle du produit qui est acceptée. Un plan d'échantillonnage est basé sur la proportion du produit *représentée par une longue série d'échantillons*, qui sera, à long terme, acceptée ou refusée.

Taille d'échantillon et nombre acceptable

La taille d'échantillon est le nombre de pièces prélevées pour être inspectées. Le nombre acceptable, comme indiqué plus haut, est le plus grand nombre de défectueux dans l'échantillon qui permettra que le produit soit accepté. Ces deux nombres mis ensemble déterminent la proportion d'un produit d'une qualité donnée qui sera, à long terme, accepté ou refusé.

Dans le cas d'échantillonnages doubles ou multiples, l'inspecteur peut avoir plusieurs tailles d'échantillon et plusieurs nombres acceptables.

Probabilité d'acceptation

La "probabilité d'acceptation" d'un plan d'échantillonnage est le pourcentage d'échantillons, faisant partie d'une longue série, qui conduira à accepter le produit. Si le produit compte 4 % de défectueux et si l'inspecteur a pour consigne de prendre des échantillons de 100 avec un nombre acceptable de 5, il acceptera à long terme environ 80 % du produit. On dit que la probabilité d'acceptation de ce produit est environ 80 %.

Il est possible de calculer la probabilité d'acceptation d'un produit de qualité donnée en utilisant n'importe quelle combinaison d'une taille d'échantillon et d'un nombre acceptable. Elle s'exprime habituellement sous une forme décimale plutôt qu'en pourcentage.

Courbe OC

Une caractéristique des plans d'échantillonnage est que la probabilité d'acceptation est grande tant que le produit est très bon et qu'elle baisse quand le produit devient moins bon. Il existe des courbes théoriques qui donnent les probabilités d'acceptation pour tous les niveaux possibles de pourcentage de défectueux. On les connaît sous le nom de "courbes OC" (Operating Characteristic Curves). La figure 56 représente la courbe OC du plan d'échantillonnage indiqué plus haut à titre d'exemple.

Pour trouver quelle proportion du produit sera acceptée si le produit compte 4 % de défectueux, cherchez 0.04 sur l'échelle horizontale et tracez à partir de là une droite verticale jusqu'à ce qu'elle coupe la courbe. Tracez alors une droite horizontale qui vous donnera la probabilité d'acceptation sur l'échelle verticale.

Le nombre trouvé sur l'échelle verticale est un peu au-dessous de 0.8. Cela signifie qu'un peu moins de 80 % du produit sera accepté.

Les probabilités données par une courbe OC sont basées sur l'hypothèse que les échantillons sont prélevés au hasard.

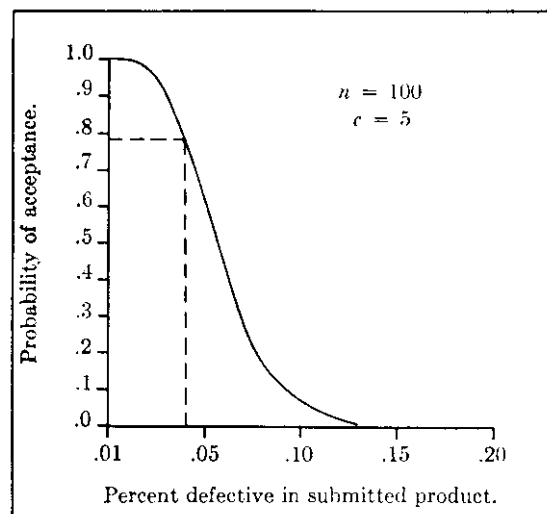


Figure 56. Courbe OC.

Risque du producteur

On dit souvent des plans d'échantillonnage qu'ils ont un certain "risque producteur". Ce risque est défini comme la probabilité de refuser le produit alors que la qualité du lot en question est relativement bonne. Pour les contremaîtres, c'est le risque de voir un produit refusé par l'inspection alors qu'il a été fabriqué normalement.

Pour évaluer le risque producteur, on procède de la manière suivante :

- (1) Prendre la courbe OC qui correspond au plan d'échantillonnage utilisé.
- (2) Estimer le pourcentage de défectueux quand le processus fonctionne à sa capacité normale.
- (3) Porter ce pourcentage sur l'échelle horizontale de la courbe OC et en déduire la probabilité d'acceptation.

- (4) Faire la différence entre 1 et le nombre trouvé. C'est le risque producteur pour le pourcentage de défectueux estimé dans le processus.

Exemple : Supposons qu'un processus tourne avec 3 % de défectueux et que l'inspection utilise un plan d'échantillonnage correspondant à la courbe OC de la figure 56. La probabilité d'acceptation est de 92 %. Il en résulte que le risque producteur est de 8 %.

Risque du consommateur

On dit aussi que les plans d'échantillonnage ont un certain "risque consommateur". Il est défini comme la probabilité d'accepter le produit alors que la qualité du lot en question est relativement mauvaise. Pour les contremaîtres, c'est le risque de voir l'inspection accepter un produit que le consommateur ne trouvera pas satisfaisant.

Pour évaluer le risque consommateur, on procède de la manière suivante :

- (1) Prendre la courbe OC qui correspond au plan d'échantillonnage utilisé.
- (2) Découvrir le pourcentage de défectueux que le consommateur peut considérer comme inacceptable.
- (3) Porter ce pourcentage sur l'échelle horizontale de la courbe OC et en déduire la probabilité d'acceptation. C'est le risque consommateur pour le pourcentage de défectueux estimé dans le processus.

Exemple : Supposons encore que le processus tourne avec 3 % de défectueux et que l'inspection utilise un plan d'échantillonnage correspondant à la courbe OC de la figure 56. La probabilité d'acceptation est environ de 10 %. C'est le risque consommateur.

2. Classification des plans d'échantillonnage²¹

Plans de type AQL

Les plans d'échantillonnage qui ont une grande probabilité d'acceptation pour les faibles pourcentages de défauts sont définis par leur AQL (Acceptable Quality Level). Pour les contremaîtres, c'est le niveau maximum du pourcentage moyen de défectueux qui sera accepté par l'inspection.

Les contrats d'achat du gouvernement spécifient très souvent des AQL pour divers produits. Dans ce cas, l'agence gouvernementale d'inspection sélectionne chaque fois un plan d'échantillonnage correspondant à l'AQL spécifié. Pour lui faciliter la tâche, l'U.S. Department of Defense a publié un recueil de plans d'échantillonnages classés suivant leur AQL. Ce recueil est communément désigné comme les "Tables Mil. Std. 105A".

Ces plans sont très largement utilisés dans l'industrie, l'Armée, la Navy et l'Air-Force.

Plans de type LTPD

Les plans d'échantillonnage qui ont une faible probabilité d'acceptation pour les grands pourcentages de défauts sont définis par leur LTPD (Lot Tolerance Percent Defective). Pour

²¹ NdT. J'ai supprimé de ce chapitre plusieurs méthodes d'inspection qui ont été totalement abandonnées en 1984 sous l'influence de Deming. On en trouve de nombreux exposés dans la littérature technique de l'après-guerre. Elles avaient été introduites en France par l'Armée américaine dans le cadre du Plan Marshall.

les contremaîtres, c'est le niveau minimum du pourcentage moyen de défectueux qui sera refusé par l'inspection.

Pour faciliter la sélection sur cette base, Dodge et Romig ont publié des tables de plans d'échantillonnage classés suivant leur LTPD. Cette classification est utile chaque fois que l'on veut s'assurer qu'un produit d'une qualité particulière aura une faible probabilité d'acceptation.

Plans de type AOQL

Il est également possible de classer les plans d'échantillonnage sur une troisième base, selon leur AOQL (Average Outgoing Quality Limit). C'est une valeur moyenne du pourcentage de défectueux qui peut être calculée pour tous les plans d'échantillonnage quand on peut inspecter le produit à 100 %. Elle vient compléter le plan d'échantillonnage quand on envisage de faire une inspection à 100 % sur tous les lots rejetés par le plan.

Dodge et Romig ont publié des tables où les plans d'échantillonnage sont classés suivant leur AOQL. Ces tables sont utiles chaque fois que l'on veut établir un niveau de qualité maximum à la sortie de la production et obtenir ce résultat par une combinaison de l'échantillonnage et de l'inspection à 100 %.

3. Plans d'échantillonnage par lots

Les plans d'échantillonnage par lots peuvent être utilisés chaque fois que le produit peut facilement être séparé en lots. Un "lot" est défini comme un rassemblement de pièces similaires soumises à une inspection. Le nombre de pièces est nommé "taille de l'échantillon". La taille de l'échantillon peut être le nombre inscrit sur le bordereau de livraison, ou simplement le nombre de pièces produites pendant un temps déterminé. Le lot utilisé doit être clairement défini sur le document utilisé par l'inspection.

Les plans d'échantillonnage par lots sont nommés "échantillonnage simple" si l'acceptation ou le refus est basé sur un seul échantillon, "échantillonnage double" ou "échantillonnage multiple" s'il est prévu que, dans certaines circonstances, il faut prendre un second échantillon ou plusieurs échantillons successifs.

La "taille d'échantillon" est le nombre de pièces prélevées au hasard dans le lot. C'est toujours un nombre, jamais un pourcentage. Le "nombre acceptable" est le nombre maximum de défectueux à chaque étape du plan d'échantillonnage.

Description des plans d'échantillonnage simple, double et multiple

Echantillonnage simple

L'échantillonnage simple signifie que la décision d'accepter ou de refuser le lot est basée sur l'inspection d'un seul échantillon. L'inspecteur dispose d'une taille d'échantillon et d'un nombre acceptable. Le refus est prononcé quand le nombre acceptable est dépassé.

Echantillonnage double

L'échantillonnage double signifie que l'inspection du premier échantillon conduit à accepter, à refuser ou à prendre un second échantillon. L'inspection du second échantillon, quand elle est demandée, conduit à la décision d'accepter ou de refuser.

Dans ce cas, l'inspecteur dispose de deux tailles d'échantillons et de deux nombres acceptables. Le second de ces nombres s'applique à la combinaison des deux échantillons.

L'acceptation est prononcée quand le nombre de défectueux est inférieur au premier ; le refus est prononcé quand le nombre de défectueux est supérieur au second.

Echantillonnage séquentiel

L'échantillonnage séquentiel signifie qu'après l'inspection de chaque échantillon une décision est prise d'accepter, de refuser ou d'inspecter un autre échantillon. L'inspection se poursuit aussi longtemps qu'il est nécessaire de parvenir à une décision d'accepter ou de refuser. Dans certains cas, un plan séquentiel fait prendre une série de *groupes d'unités*, au lieu d'une série d'échantillons individuels. C'est un "échantillonnage séquentiel de groupe".

Echantillonnage multiple

L'échantillonnage multiple est une forme d'échantillonnage séquentiel de groupe dans lequel le plan est tronqué. C'est-à-dire qu'une limite maximale est fixée pour le nombre de groupes qui ont besoin d'être inspectés afin de parvenir à une décision d'accepter ou de refuser.

Dans ce cas, l'inspecteur dispose d'une série de tailles d'échantillons, et pour chacune d'elles de deux nombres : l'un pour accepter et l'autre pour refuser. Si le nombre de défectueux est supérieur au premier, il accepte ; s'il est inférieur au second, il refuse. S'il tombe entre les deux, l'inspecteur doit inspecter un autre échantillon.

Composé par Jean-Marie Gogue
Dernière mise à jour : avril 2013