

WALTER A. SHEWHART

Le contrôle statistique

Extrait de : *Les fondements de la maîtrise de la qualité* (1989)

Texte original : *Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control* (1939)

Traduit de l'américain par Jean-Marie Gogue

Trois étapes dans le contrôle de la qualité

De façon générale, on considère trois étapes dans un processus de contrôle de la qualité : *la spécification* de ce qu'on demande, *la production* des objets demandés, et *l'inspection* des objets réalisés, pour voir s'ils sont conformes à la spécification. Correspondant à ces trois étapes, il y a trois sens différents selon lesquels le contrôle statistique peut jouer un rôle important dans la recherche de l'uniformité de la qualité d'un produit manufacturé. C'est (a) le concept d'un état statistique constituant une limite vers laquelle on peut espérer tendre en améliorant l'uniformité de la qualité ; (b) une opération ou une technique pour atteindre l'uniformité ; (c) un jugement. Nous allons considérer ici ces trois significations du contrôle statistique, et le rôle que joue chaque signification dans la théorie et dans la technique du contrôle économique. Nous examinerons d'abord brièvement l'histoire du contrôle de la qualité jusqu'au jour où des ingénieurs ont mis en place la technique des graphiques de contrôle, qui est en soi une opération de contrôle.

Historique du contrôle de la qualité

Des pièces ajustées il y a 10 000 ans. Ce qui différencie dans une large mesure l'homme de l'animal, c'est le contrôle de son environnement, en particulier la production d'outils et leur utilisation. Il semble que l'espèce humaine a commencé à façonner et à utiliser des outils de pierre il y a environ un million d'années. Après cette progression, le contrôle a longtemps stagné. C'est à une époque relativement récente, il y a environ 10 000 ans, que l'homme a commencé à faire des assemblages de pièces, selon une technique mise en évidence par les trous que l'on voit sur les instruments de l'époque. Pendant cette longue période, chaque homme fabriquait ses propres outils.

Des pièces interchangeables en 1787. On suppose que les Égyptiens utilisaient déjà il y a 5 000 ans des arcs et des flèches interchangeables. Mais ce n'est qu'en 1787, il y a environ cent cinquante ans, que le concept de l'interchangeabilité des pièces fut réellement mis en application. Ainsi, c'est hier seulement que l'homme a commencé à étudier la technique de la production de série !

Tolérance simple en 1840 ; tolérances doubles en 1870. D'un point de vue historique, il est significatif que cette première étape ait eu lieu sous l'influence du concept d'une science exacte, selon laquelle on essayait de produire des pièces de dimensions exactes. Aujourd'hui, alors que nous sommes habitués à utiliser des tolérances, cette façon de procéder nous paraît bien étrange. Mais ce n'est que vers 1840 que le concept de tolérance simple fit son apparition, et vers 1870 le concept de tolérance double.

Pourquoi ces trois étapes : exactitude - tolérance simple - tolérance double ? La réponse est très simple. Les fabricants ont découvert très tôt qu'ils ne pouvaient pas réaliser des objets exactement semblables pour atteindre une qualité donnée. De plus, il n'était pas nécessaire qu'ils soient exactement semblables et tenter d'y parvenir coûtait beaucoup trop cher. C'est pourquoi, vers 1840, ils ont abandonné l'exigence d'exactitude pour adopter une tolérance simple. Examinons comment ceci fut mis en œuvre.

Si nous considérons par exemple un appareil qui comporte un arbre cylindrique placé dans un palier, on peut assurer l'interchangeabilité en utilisant simplement un calibre "mini" sur le palier et un calibre "maxi" sur l'arbre, les deux calibres devant pouvoir entrer dans la pièce correspondante. Dans ce cas, le jeu minimum entre les deux pièces est donné par la différence entre les diamètres des deux calibres. Mais cette méthode de calibrage ne donne pas *le jeu maximum*. Le responsable de production réalisa bientôt qu'un ajustement large entre une pièce et le calibre avait pour effet un jeu trop grand pour que cette pièce puisse être acceptée. Il chercha donc alors à produire des pièces dont les dimensions étaient aussi proches que possible de celles du calibre, pour rencontrer la même difficulté que celui qui essayait de faire des pièces exactement semblables. C'est pourquoi l'introduction des calibres "mini-maxi" en 1870 représente un grand pas en avant. Ces calibres, en fixant les tolérances de chaque pièce détachée, réduisaient les coûts et délivraient le responsable de production d'une contrainte inutile. *Il n'avait plus besoin de perdre son temps à essayer d'être exact*, il lui suffisait simplement de rester dans les limites de tolérances.

Pièces défectueuses : inspection. Bien que cette étape soit d'une grande importance, un progrès restait à accomplir. Les limites sont nécessairement établies de façon que, de temps en temps, une caractéristique de qualité tombe en dehors des limites spécifiées, ce qui fait qu'une pièce est défectueuse. La réparation ou l'élimination des pièces défectueuses augmente le coût de production. Mais la recherche des causes de défauts afin de les éliminer entraîne d'autres dépenses. C'est pourquoi, après l'introduction des limites de tolérance "mini-maxi", le problème qui subsistait était d'essayer de réduire la proportion p de défectueux au point que le taux d'accroissement du coût de contrôle vienne à égaler le taux d'accroissement des économies engendrées par la diminution du nombre de pièces refusées.

Par exemple pour la production du matériel que l'on voit dans une usine de téléphones, des matières premières sont littéralement rassemblées à partir des quatre coins de la terre. Plus de 110 000 types de pièces détachées différentes sont produites. Aux différentes étapes de la production, des inspections sont mises en place pour arrêter les pièces défectueuses avant qu'elles atteignent le poste d'assemblage final. À chaque étape, il faut déterminer le volume économique minimum des pièces qu'il faut mettre au rebut.

Les essais destructifs : la nécessité d'un échantillon. Mais le problème de réduire autant que possible la proportion de pièces défectueuses n'était pas le seul qui restait à résoudre. Les essais de nombreuses caractéristiques, telles que la résistance mécanique, la composition chimique, le temps de réponse d'un fusible, etc. sont destructifs. Dans ce cas, il est impossible de tester toutes les pièces produites, et les ingénieurs doivent faire appel à l'échantillonnage. Mais quelle doit être l'importance d'un échantillon pour être sûr que l'on est en présence du degré de qualité recherché ?

Le graphique de contrôle de la qualité. Les recherches effectuées pour résoudre ces deux problèmes ont donné naissance à l'opération de contrôle statistique utilisant le graphique de contrôle de la qualité en 1924. L'introduction de cette méthode peut donc être considérée comme le point de départ de l'application des techniques statistiques dans le contrôle de la qualité d'un produit manufacturé au sens où nous le considérons ici.

Mais pourquoi, peut-on se demander, voit-on apparaître cent cinquante ans environ après le début de la production de série un intérêt aussi soudain pour l'application des méthodes statistiques dans l'industrie ? En réponse à cette question, nous trouvons au moins deux raisons importantes. La première est le développement rapide de la normalisation. Le premier organisme de normalisation industrielle fut créé en Grande Bretagne en 1901. Puis, à partir de 1917, l'importance de normes nationales et même de normes internationales s'est imposée rapidement. La mission essentielle de ces organismes de normalisation consiste à préparer les spécifications des caractéristiques de qualité

demandées. Mais lorsqu'on en vient à rédiger une telle spécification, deux types de problèmes apparaissent :

- réduire au minimum le nombre de refus
- réduire au minimum le coût de l'inspection nécessaire pour donner l'assurance de la qualité voulue, au sens que nous avons exposé plus haut.

C'est ainsi que le développement de la normalisation a provoqué une prise de conscience de l'importance de ces problèmes dans l'industrie.

La seconde raison est un changement d'idéologie qui est apparu vers 1900 de façon plus ou moins radicale. Nous sommes passés du concept de l'exactitude de la science qui prévalait en 1787, au moment de l'introduction du concept d'interchangeabilité, aux concepts de probabilité et de statistique qui se sont imposés dans presque tous les domaines de la science à partir de 1900. Tandis que le concept de production de série est né en 1787 d'une science exacte, le concept sous-jacent à la technique de graphique de contrôle de la qualité est né en 1924 d'une science probabiliste.

Pour simplifier les choses, nous pouvons comparer l'action d'un fabricant qui cherche à produire des pièces dont les caractéristiques de qualité tombent dans une certaine gamme de tolérances avec le tir à la cible. Supposons que l'un de nous tire à la cible. Il n'a pas mis dans le mille et on lui demande pourquoi. Son excuse sera probablement "la malchance". Si l'on avait posé la même question à l'un de nos lointains ancêtres, il aurait pu attribuer son échec à la force du destin ou à la volonté des dieux. J'ai tendance à penser que ces excuses sont de bien des façons aussi bonnes ou mauvaises l'une que l'autre.

Nous ne sommes peut-être pas beaucoup plus sages en attribuant nos échecs à la malchance que l'étaient nos ancêtres lorsqu'ils attribuaient leurs échecs au destin ou aux dieux. Mais à partir de 1900, les ingénieurs ont montré qu'ils n'étaient pas prêts à attribuer tous ces échecs à la malchance. Cette attitude représente un remarquable changement dans l'idéologie qui caractérise le développement de l'application des statistiques dans le contrôle de la qualité.

Développements depuis 1870. Avec l'apparition des tolérances "mini-maxi" en 1870, on a pris l'habitude de préciser que chaque caractéristique importante X d'un produit donné devait se trouver entre deux limites. Une telle spécification est par définition une exigence concernant la caractéristique X de la pièce terminée. Elle donne une base sur laquelle la qualité d'un produit donné pourra être calibrée afin de savoir s'il répond ou non à une demande. De ce point de vue, le processus de préparation d'une spécification est extrêmement simple. Connaissant les limites entre lesquelles il est souhaitable de placer une caractéristique de qualité X , il suffit d'écrire sur la spécification du produit fini que ces limites sont impératives. Pour celui qui a en main une telle spécification, l'étape suivante consiste à faire les mesures nécessaires pour classer chaque pièce dans la catégorie des pièces conformes à la spécification ou dans celle des pièces non-conformes.

Une simple spécification des limites de tolérance n'est pas toujours satisfaisante. Deux problèmes surgissent. Supposons que la qualité considérée, par exemple le temps de réponse d'un fusible, est de celles qui ne peuvent se vérifier qu'au moyen d'essais destructifs. Comment peut-on donner l'assurance que la qualité d'un fusible répondra aux spécifications sans détruire le fusible pendant le processus ? Ou encore, même si la caractéristique de qualité peut se mesurer par un essai non-destructif, il y a toujours une certaine proportion p qui se place en dehors des limites de tolérance. Comment pouvons-nous réduire cette proportion de pièces non-conformes à un minimum économique ? On voit facilement que la spécification des limites de tolérance "mini-maxi" n'est pas un moyen suffisant du point de vue de l'économie et du contrôle de la qualité.

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, nous allons considérer le contrôle sous trois points de vue différents : celui de la spécification, celui de la production et celui de

l'inspection de la qualité. Ceci nous permettra de bien comprendre le rôle joué par la théorie statistique dans le contrôle économique de la qualité d'un produit manufacturé.

Voyons par exemple ce qui peut arriver quand nous voulons produire en grande quantité un certain matériau ou un certain objet physique dont les pièces sont symbolisées par les lettres :

$$O_1, O_2, \dots, O_i, \dots, O_n, \dots, O_{n+1}, \dots, O_{n+j}, \dots \quad (1)$$

Nous supposons qu'un processus de production donné peut être utilisé pour produire un nombre de pièces infiniment grand. Nous allons voir que, correspondant aux trois étapes du contrôle, il existe au moins trois sens avec lesquels l'expression "contrôle statistique" peut s'utiliser dans l'hypothèse d'une séquence infinie d'un même produit.

Le concept d'état de contrôle statistique. En premier lieu, avant la production du premier objet, l'ingénieur peut avoir l'intention d'atteindre une séquence qui a la propriété d'avoir été obtenue dans un état de contrôle statistique. En second lieu, avant de commencer la production d'une séquence d'objets, il est à peu près sûr qu'il va fixer son attention sur les actions ou les opérations qu'il veut voir effectuer au cours de cette production. Souvent, quand le but est de produire une séquence d'objets qui ont une caractéristique de qualité spécifiée entre certaines limites, l'ingénieur introduit une *opération de contrôle* dans le processus de production. Par exemple, la littérature scientifique et technique dont nous disposons contient de nombreux articles exposant le "contrôle de la qualité" au moyen de calibres, d'instruments de mesure et de dispositifs mécaniques variés.

L'opération de contrôle statistique. Afin de distinguer l'opération de contrôle au sens le plus général de celle dans laquelle on utilise des techniques statistiques afin d'atteindre un état de contrôle statistique, il est d'usage de nommer cette dernière opération une *opération de contrôle statistique*. Ce n'est pas le simple usage de techniques statistiques qui transforme une opération de contrôle en une opération de contrôle statistique. Mais l'usage de techniques statistiques constitue un moyen d'atteindre le but défini ici comme un état de contrôle statistique. Il faut bien remarquer que le but recherché peut se concevoir avant la production d'une séquence d'objets qui auront les caractéristiques demandées, indépendamment des conditions de production de cette séquence. Par exemple, nous pouvons concevoir un état de contrôle statistique sans savoir par quel moyen nous atteindrons cet état en pratique. Mais en revanche, avant de pouvoir décrire une opération de contrôle statistique, sauf à dire que c'est un moyen d'atteindre un but, il nous faut trouver expérimentalement comment faire une telle opération.

Une exigence concernant le contrôle. Considérons l'exigence spécifiée suivante, pour un produit fini :

(A) La qualité des objets O devra être contrôlée statistiquement en ce qui concerne la caractéristique de qualité X.

Il semble naturel de considérer que l'exigence (A) implique que les qualités d'une séquence de pièces d'un produit, représentées par les symboles O, seront présentes dans le produit fabriqué. Par exemple, nous pourrions, comme nous le verrons bientôt, interpréter cette exigence comme le fait que la séquence des caractéristiques X relatives à la séquence des objets O doit être une suite de nombres au hasard. D'autre part, nous pourrions interpréter l'exigence (A) comme la réponse du système causal sous-jacent à l'opération de production des objets à certaines conditions physiques. De toute façon, on peut exprimer cette exigence avant la production du premier objet O. C'est ce qu'on fait habituellement.

Une conclusion probable concernant le contrôle. Comparons maintenant l'exigence (A) avec l'affirmation suivante au sujet du contrôle :

(B) La qualité des objets O est contrôlée statistiquement en ce qui concerne la caractéristique de qualité X.

C'est un jugement ou une conclusion probable que la qualité du produit répond réellement à l'exigence exprimée par (A). Etant donné que nous supposons ici que le processus de fabrication est capable de réaliser un nombre infiniment grand de pièces du produit, il en résulte en pratique que l'affirmation (B) ne peut se faire sans une hypothèse qui n'a pas encore été émise concernant les objets O. Cette conclusion probable est fondée sur des données antérieures obtenues par le processus qui consiste à faire une série de pièces du produit et à les tester. En d'autres termes, c'est une conclusion émise à partir du produit déjà fait qui s'applique au produit qui sera fait dans l'avenir. La signification complète de l'affirmation (B), comme nous le verrons plus loin, ne doit pas être liée seulement à la notion de contrôle au sens d'une spécification, mais aussi à la notion de contrôle au sens d'une conclusion fondée sur des données spécifiques montrant que cette exigence est satisfaite.

Il est essentiel, par conséquent, d'examiner soigneusement les trois sens de l'expression "contrôle statistique" :

- (1) comme caractérisant l'état de contrôle ;
- (2) comme une opération ;
- (3) comme un jugement.

Cette condition est nécessaire si nous voulons voir comment l'accomplissement du contrôle économique de la qualité d'un produit manufacturé implique la coordination des efforts dans les trois étapes : *spécification, production, et inspection*.

L'ÉTAT DE CONTRÔLE STATISTIQUE

Deux aspects du contrôle. L'idée de contrôle est celle d'une *action pour atteindre un but choisi*. Dans ce sens, le contrôle nécessite à la fois une action et un but. Par exemple, dans la phrase citée en tête de ce chapitre, nous trouvons l'expression du besoin de contrôler la qualité de l'acier pour atteindre une plus grande uniformité : c'est le but. La personne chargée du contrôle concentre probablement son attention sur ce qu'elle est censée faire au cours du processus d'élaboration de l'acier, tandis que celle qui utilise l'acier sera intéressée d'abord par le résultat final, tel qu'il est déterminé par des mesures quantitatives de la qualité du produit fini. Par conséquent, il y a deux façons de considérer le contrôle en général et le contrôle statistique en particulier : du point de vue de l'acte physique de production et du point de vue du résultat final qui se manifeste par l'uniformité de la qualité. Partant de cette dualité, il y a deux façons de concevoir l'état de contrôle statistique. C'est, d'une part, un état physique qui peut se décrire en termes physiques et, d'autre part, un état mathématique qui se caractérise par les aspects quantitatifs du résultat final et qui peut se décrire en termes mathématiques comme une opération de tirage au hasard.

Certains préféreront dire qu'il n'existe pas d'état de contrôle au sens mathématique, mais simplement la *description* mathématique d'un état physique. C'est parfaitement satisfaisant pour moi, à condition que cette description s'accompagne d'une explication de ce que le mathématicien veut dire lorsqu'il parle d'une opération de tirage d'un échantillon au hasard et que ce ne soit pas une simple description de résultats obtenus mathématiquement. Toutefois, dans le même ordre d'idées, il n'existe pas d'état physique de contrôle *observable*, sauf en des termes descriptifs qui caractérisent une opération. C'est par exemple un tirage non exhaustif d'échantillons dans un bol, une observation répétée dans des conditions identiques ou un processus de contrôle de la qualité dans lesquelles les causes de variabilité sont détectées et éliminées aussi soigneusement que possible. Par conséquent, pour être plus exact, nous devrions parler peut-être de *descriptions*

physiques et mathématiques de l'état de contrôle, mais pour simplifier l'exposé tout en tenant compte des opérations physiques et mathématiques, nous ne parlerons que des « états physiques et mathématiques ».

En arrière-plan de nos considérations sur les deux états de contrôle statistique, examinons d'abord l'objectif que se fixe l'ingénieur, qui est de fabriquer un produit de qualité uniforme. Nous dirons que la qualité doit être reproductible dans certaines limites, ou bien que l'ingénieur doit être capable de prévoir avec un minimum d'erreur la proportion du produit futur qui sera réalisée par un processus donné avec une qualité qui se situe à l'intérieur de limites spécifiées. L'ingénieur désire réduire la variabilité de la qualité à un minimum économique. En d'autres termes il veut avoir : (a) une méthode rationnelle de prévision sujette à une erreur minimum et (b) un moyen de réduire autant que possible la variabilité de la qualité d'un produit donné pour un coût de production donné.

Est-il possible de contrôler le processus de production de telle sorte que ces deux demandes puissent être satisfaites ? Dans ce cas, comment l'ingénieur saura-t-il que le processus de production est dans l'état de contrôle recherché ? Comment cet état se caractérise-t-il ? Est-ce par la description des opérations physiques mises au point par l'ingénieur pour réaliser le produit ? Est-ce en des termes de données quantitatives que l'on peut obtenir à partir du produit lorsqu'il est en état de contrôle ? ou est-ce par la combinaison des deux ? Pour fixer une base permettant de répondre à ces questions, nous devons examiner, d'une part, les aspects physiques de l'état de contrôle et, d'autre part, les aspects mathématiques des données quantitatives obtenues dans un état de contrôle donné.

L'état physique de contrôle statistique. L'expérience idéale du bol. Considérons d'abord une expérience idéale. Supposons que nous avons N jetons physiquement identiques avec un nombre écrit sur chacun d'eux. Nous les mettons dans un bol et nous tirons des échantillons successifs de n jetons. Nous en tirons un chaque fois, nous le remettons dans le bol après avoir lu son inscription et nous agissons soigneusement. L'expérience montre que les différences entre les échantillons tirés dans de telles conditions sont prévisibles au sens de la probabilité et que nous ne pouvons rien faire pour réduire la variabilité dans les échantillons. Il en résulte que l'opération physique qui consiste à tirer ainsi des séries d'échantillons constitue un moyen empirique de décrire un état physique de contrôle statistique.

Mais ce n'est pas l'affaire de l'ingénieur de tirer des jetons d'un bol. Son affaire, c'est la mesure, sous différentes formes. Supposons qu'il soit possible d'atteindre un état physique de contrôle statistique pour de telles mesures. Comment l'ingénieur fait-il pour obtenir cet état ? La réponse est qu'en faisant une série de mesures répétitives d'une constante physique ou en produisant des unités d'un même type de produit, il essaye de contrôler toutes les causes de variabilité jusqu'à ce qu'il ait obtenu un état dans lequel les conditions restent, comme on dit, « essentiellement les mêmes ».

Il est utile de noter que le concept d'un état physique de contrôle statistique tel que nous l'illustrons par l'exemple des tirages dans un bol est bien le même que le concept d'une chose faite « physiquement au hasard ». Par exemple Neyman dit : « Il y a des expériences qui, même si elles sont faites de façon répétée avec le plus grand soin pour garder les conditions constantes, conduisent à des résultats variés. Elles sont soumises au hasard ». Est-ce à dire que nous pouvons nous fier à notre capacité de percevoir si les conditions sont contrôlées avec le plus grand soin ? Est-ce que nous ne ferons pas fausse route en déclarant que ces expériences sont soumises au hasard et en agissant comme si elles étaient soumises au hasard ? Il me semble qu'il est beaucoup plus sûr de prendre *une seule* opération physique, telle que le tirage d'un bol comme modèle physique d'un acte répété qui est soumis au hasard, puis d'exiger que toute autre opération répétitive que l'on pense être soumise au hasard produise en plus des résultats qui ressemblent d'une certaine façon aux résultats du tirage dans un bol, avant d'agir comme si l'opération en question était soumise au hasard. D'après mon expérience, cette précaution semble particulièrement importante, car presque

tous les ensembles de données que j'ai pu observer alors qu'ils étaient supposés être pris « dans les mêmes conditions essentielles » ne répondaient pas à cette condition supplémentaire d'être semblables d'une certaine façon à ceux tirés d'un bol.

Le concept d'un état de contrôle statistique doit définir de façon abstraite, et par conséquent commune à tous les cas pouvant se présenter, l'état physique de contrôle statistique. Donc, même si nous sommes d'accord pour considérer que l'échantillonnage dans un bol constitue un état physique de contrôle statistique, qu'y a-t-il de commun entre cet état physique et celui du contrôle statistique d'un processus de production ? La réponse est claire : ce sont les résultats qui permettront de le savoir. Le seul espoir que nous avons de définir objectivement une caractéristique commune à de tels états est de le faire en considérant certains aspects quantitatifs de leurs caractéristiques observables. Mais pour obtenir une telle base de comparaison, il faut absolument se tourner vers les mathématiques et essayer de trouver une façon abstraite de décrire un état de contrôle statistique en termes de caractéristiques de séquences de nombres que nous espérons obtenir en répétant une opération choisie suivant un mode aléatoire.

Pour être susceptible d'une application pratique, le concept de contrôle statistique ne doit pas être défini seulement en termes de système physique, mais aussi en termes de caractéristiques observables d'un système capable de produire une séquence infinie et de caractéristiques quantitatives de la séquence infinie produite par un tel système.

L'état mathématique de contrôle statistique. Considérons un système aléatoire dans lequel la variation de qualité d'un produit donné est telle que la fréquence avec laquelle on espère produire une pièce avec une caractéristique de qualité X située dans un intervalle $X + dX$ est donnée par une expression de la forme :

$$dp = f(X) dX \quad (2)$$

dans laquelle $f(X)$ est une fonction mathématique.

Un mathématicien aura tendance à accepter l'équation (2) comme étant la définition mathématique d'un univers statistique où la qualité X est dans un état statistique de contrôle. Voyons néanmoins pourquoi l'équation (2) ne peut pas être prise comme une description complète de ce que nous nommons ici un état statistique. Considérons par exemple un processus de production qui réalise une séquence infiniment grande d'objets ayant une certaine qualité X . Soit :

$$X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n, X_{n+1}, \dots, X_{n+j}, \dots \quad (3)$$

une suite de mesures de la qualité sur une telle séquence d'objets, saisies dans l'ordre de leur production. Pouvons-nous utiliser l'équation (2) comme base pour déterminer si la séquence (3) a été produite dans des conditions de contrôle statistique ? Il y a, nous allons le voir maintenant, trois raisons qui nous en empêchent.

1. Même pour la séquence infinie, il n'y a pas une seule fonction $f(X)$ qui puisse être utilisée comme base de comparaison.
2. L'équation (2) décrit une propriété d'une séquence infinie qui est approchée en tant que limite statistique, et non pas une propriété d'une partie finie de celle-ci. Or, en pratique, nous avons toujours affaire à une partie finie de la séquence.
3. Dans une telle définition, il n'y a rien qui mette explicitement une restriction à l'ordre de la séquence (3), même s'il est essentiel que cet ordre soit ce que les mathématiciens nomment "ordre aléatoire".

Essai pour la définition d'un ordre aléatoire. Nous allons chercher à déterminer de quelle manière il est légitime de demander, avec la possibilité de le vérifier opérationnellement, si une

séquence de n termes observés est aléatoire. Si nous décidons, comme je l'ai fait plus haut, de considérer comme aléatoire l'opération de tirage dans un bol, nous pouvons théoriquement obtenir une classe infinie de séquences finies composées des mêmes nombres n en procédant d'une façon très simple :

Ecrire les nombres n sur autant de jetons symétriques ; mettre les jetons dans un bol et agiter soigneusement celui-ci ; tirer ensuite les jetons un par un sans les remplacer et noter les nombres dans l'ordre trouvé. En répétant indéfiniment ce processus, nous obtenons un ensemble infini de séquences finies de nombres n dont chacune peut se comparer avec la séquence d'origine.

Nous sommes maintenant en mesure de faire deux observations d'une importance capitale pour le travail de contrôle de la qualité. Premièrement, nous n'avons aucun espoir de parvenir à la définition pratique d'un ordre aléatoire pour une séquence spécifique. En revanche, il apparaît que la seule manière vérifiable opérationnellement de définir un ordre aléatoire est fondée sur une opération aléatoire choisie. Deuxièmement, l'hypothèse faite par l'expérimentateur quand il dit qu'une séquence n'est pas aléatoire ne peut être vérifiée que par des expériences ultérieures. Par exemple une étude du système causal qui a produit la séquence trouvée au départ, que l'expérimentateur a qualifiée de non-aléatoire, mettra en évidence les moyens par lesquels ce système peut être modifié en éliminant les causes identifiées.

Le nombre de méthodes suivant lesquelles l'ordre d'une séquence d'origine s'exprime en termes d'ordre de sous-ensembles est illimité ; elles se traduisent par un nombre infiniment grand de statistiques telles que la moyenne, l'écart-type et les moments, pour ne citer que quelques notions habituelles. Il y a aussi un nombre infiniment grand de moyens de découper la séquence en sous-ensembles. En d'autres termes, nous pouvons considérer tous les résultats de ce qu'il est convenu de nommer la théorie mathématique de la distribution, qui ne cesse d'ailleurs de s'enrichir, comme une base pour caractériser l'ordre d'une telle séquence. Personnellement, je suis enclin à considérer la théorie de la distribution comme un réservoir infiniment vaste de critères au moyen desquels nous pouvons décrire l'ordre d'une séquence caractérisant l'état physique de contrôle statistique.

La description d'un état de contrôle n'est pas unique. Dans les paragraphes précédents, nous avons rapidement indiqué les nombreuses difficultés rencontrées par celui qui recherche une description unique des caractéristiques que doit avoir une séquence produite à partir d'un état de contrôle statistique. Nous avons apporté des faits à l'appui de l'idée qu'une description unique est impossible. Nous avons porté notre attention sur l'importance de l'ordre suivant lequel les nombres apparaissent dans la séquence comme constituant une partie des conditions de toute définition d'un état mathématique de contrôle statistique. Et pourtant, ici encore, nous n'avons pas défini un test unique, nécessaire et suffisant pour définir l'ordre que le mathématicien considère comme aléatoire. Alors que pouvons-nous conclure au sujet de la définition de l'état de contrôle en termes purement mathématiques ?

Il est évident que nous ne pouvons pas espérer spécifier complètement l'état mathématique de contrôle statistique. Afin de caractériser cet état, notre ambition sera tout au plus de choisir arbitrairement des critères et de choisir arbitrairement une opération aléatoire telle que le tirage dans un bol, en veillant bien à ce que chaque critère prenne en compte l'ordre de la séquence. La définition du hasard en termes d'opération physique est évidemment sans effet sur les opérations mathématiques de la théorie statistique, parce que le hasard est purement et simplement, en ce qui concerne ces opérations mathématiques, un terme non défini. La théorie mathématique formelle et abstraite connaît une existence indépendante et parfois solitaire. Mais lorsqu'un terme mathématique non défini tel que le hasard reçoit une définition opérationnelle en termes physiques, il prend une signification empirique et pratique. Alors tout théorème mathématique faisant appel à ce concept dépourvu de définition mathématique peut prendre la forme d'une prévision qui dit que *si vous agissez de telle ou telle sorte, ceci ou cela va se produire*. C'est ainsi que le processus d'une

application physique de la théorie mathématique consiste à spécifier les opérations humaines suivant lesquelles des termes dépourvus de signification mathématique reçoivent une signification physique. Nous pouvons alors nous mettre en devoir de déterminer si les prévisions qui résulteront d'événements observables physiquement et suggérées par l'exécution d'opérations mathématiques associées sont valables.

Pour vérifier empiriquement l'utilité des statistiques mathématiques, la validité des hypothèses liées à l'attribution d'une signification physique et opérationnelle au concept de hasard est d'une importance fondamentale. Par conséquent, si l'on veut que l'application de la théorie statistique soit couronnée de succès, il faut apporter le plus grand soin, d'une part, à la méthode suivant laquelle est défini l'état de contrôle statistique en termes d'opérations physiques et, d'autre part, aux opérations mathématiques associées à cette méthode, sachant que le concept de hasard sur lequel elles sont fondées n'est pas défini mathématiquement.

Comment construire un modèle d'état de contrôle statistique. Chaque fois que le système causal qui produit les variations suivant une séquence observée pour une caractéristique de qualité X vient à produire une séquence de classe aléatoire, il doit être considéré comme étant dans un état de contrôle statistique permettant de construire un modèle mathématique pour en représenter certaines caractéristiques. Les deux fonctions de ce modèle doivent être les suivantes :

- (1) Servir de méthode de calcul pour faire des prévisions.
- (2) Suggérer de nouvelles expériences physiques à réaliser pour essayer d'atteindre un état de contrôle statistique.

Dans la réalisation pratique du modèle, nous supposons que nous pouvons approcher la fonction $f(X)$ et ses paramètres en faisant comme si des limites existaient, ou plus précisément en calculant ces paramètres avec le plus grand nombre possible de termes d'une séquence infinie. Notre action sera donc fondée sur le postulat suivant :

Postulat I. Il faut choisir un modèle d'état statistique construit sur $n+1$ termes d'une séquence aléatoire de préférence à un modèle de même nature construit sur n termes.

Il ne faut pas oublier que la réalisation pratique du modèle de l'état de contrôle statistique de la façon que nous venons de décrire est limitée pour l'instant au cas où la séquence est tirée dans un bol, donc fournie par ce que nous avons choisi de nommer une opération aléatoire. Une telle opération caractérise un état physique de contrôle statistique. C'est la situation la plus favorable pour faire une prévision, et celui qui effectue les tirages ne peut pas agir sur les limites de la variabilité observée. Mais il faut aussi retenir que, logiquement, il n'y a pas nécessairement un lien entre un tel état physique et le concept indéfiniment extensible d'état statistique en termes mathématiques, selon la théorie des distributions.

LE CONTROLE STATISTIQUE EN TANT QU'OPÉRATION

Examinons d'abord ce que l'opération de contrôle est supposée réaliser. Le statisticien qui veut connaître le but d'une opération de contrôle la considérera certainement comme une procédure pour atteindre un état de contrôle statistique pour certaines variables, tandis que l'ingénieur la considérera comme un moyen d'effectuer certaines économies et d'atteindre le plus haut degré d'assurance de la qualité pour un coût donné. Ce qui intéresse probablement le statisticien et l'ingénieur, c'est de comprendre l'opération de contrôle en tant que procédure scientifique. Dans ce qui va suivre, nous tenterons de présenter les caractéristiques importantes de l'opération sous chacun de ces points de vue.

Au début de ce chapitre, nous avons relevé les étapes parcourues à partir du concept d'un assemblage exact de pièces interchangeables, fondé sur le concept d'une science exacte, pour arriver au concept de tolérances. C'est en 1924 que la théorie statistique fut utilisée pour la première fois avec le concept de deux limites d'action A et B, dites "limites de contrôle". Elles sont situées en général entre les limites de tolérance L1 et L2.

Ces limites doivent être établies de telle sorte que lorsque la qualité observée d'une pièce du produit tombe en dehors de l'intervalle A-B, même si elle reste dans l'intervalle L1-L2, il est souhaitable d'examiner le processus de fabrication afin de découvrir et d'éliminer, si possible, une ou plusieurs causes de variation qu'il est possible de soustraire aux effets du hasard. En d'autres termes, alors que les limites L1 et L2 donnent le moyen de vérifier aux calibres le produit déjà réalisé, les limites A et B donnent un moyen de diriger l'action vers le processus qui permettra l'élimination des causes de variation attribuables, de telle sorte que la qualité du produit qui n'est pas encore réalisé ait de plus faibles variations par rapport à la moyenne.

De plus, la théorie statistique du contrôle de la qualité introduit le concept de valeur espérée C située quelque part entre les limites d'action A et B. Le point C joue en quelque sorte le rôle d'objectif pour la qualité dans un état contrôlé économiquement. Nous pouvons nous arrêter un moment pour noter l'importance du point C du point de vue de la conception ou de l'utilisation des matériaux. Considérons par exemple le problème très simple de l'établissement des limites de tolérance. Supposons que l'on commence avec le concept de tolérances doubles de 1870, et que l'on veuille fixer les limites de tolérance pour n pièces détachées assemblées de telle façon que la qualité qui résulte des n pièces soit la somme arithmétique des qualités de ces pièces. Un exemple élémentaire est celui du calcul des limites de tolérance d'un empilement de n pièces plates en fonction des limites de tolérance d'une seule pièce. L'ancienne méthode consistait à additionner les limites de tolérance de toutes les pièces, mais la tolérance qui résulte d'un tel calcul est généralement plusieurs fois supérieure à la réalité. Le moyen économique de fixer de telles limites de tolérance pour un produit en état de contrôle statistique est fondé sur le concept de l'espérance d'une valeur moyenne et d'un écart-type. La valeur espérée a une importance fondamentale dans tous les travaux de conception comportant l'établissement de tolérances d'un assemblage en fonction des tolérances des pièces.

Nous voyons donc que, pour des raisons d'économie et d'assurance de la qualité, il est nécessaire de dépasser le concept de limites de tolérance que l'on trouve habituellement dans les spécifications et d'introduire deux limites d'action A et B et une valeur espérée C. C'est à la seule théorie statistique que nous devons l'arrivée de ces nouveaux concepts.

Il faut noter que s'il n'y avait aucune raison d'économie ou d'assurance de la qualité pour dépasser le concept des tolérances doubles, la théorie statistique n'aurait rien à ajouter. De même il faut noter que, bien que les limites d'action A et B se trouvent dans l'intervalle de tolérance L1- L2, le produit déjà réalisé dont l'inspection indique qu'il se situe dans l'intervalle de tolérance L1- L2 est déclaré conforme, même si sa qualité tombe en dehors de l'intervalle A- B. En d'autres termes, les limites d'action A et B ne s'appliquent pas comme on le ferait avec un calibre sur un produit déjà réalisé ; elles ont pour but d'attirer l'attention sur le fait que le processus de fabrication comporte des causes attribuables de variations de la qualité qui peuvent créer des incidents à l'avenir si elles ne sont pas trouvées et éliminées.

L'opération de contrôle statistique. Le recours aux techniques statistiques de la façon que nous venons de décrire introduit une modification dans les opérations courantes de contrôle et, de ce point de vue, constitue une "opération de contrôle statistique" orientée vers la recherche d'un état de contrôle statistique. La spécification d'une opération de contrôle statistique se compose des étapes suivantes :

1. Spécifier en général comment il faut étudier une séquence de n valeurs observées afin de trouver des indications sur l'existence de causes de variabilité attribuables.
2. Spécifier comment les données d'origine doivent être saisies et comment elles doivent être décomposées en sous-échantillons sur la base de jugements établissant si les conditions dans lesquelles les données ont été saisies étaient semblables.
3. Spécifier le critère de contrôle qui sera utilisé, en indiquant quelles statistiques seront calculées pour chaque sous-échantillon, comment elles seront traitées pour le calcul des limites d'action (ou de contrôle) et à quelle statistique s'appliquera le critère de contrôle.
4. Spécifier ce qu'il faut faire lorsqu'une statistique observée tombe en dehors de ses limites de contrôle.
5. Spécifier la quantité de données dont on doit disposer et qui doivent satisfaire au critère de contrôle avant que l'ingénieur considère qu'un état de contrôle statistique est atteint.

Dans les prochains paragraphes, je développerai rapidement chacune de ces étapes et j'indiquerai la nature des données susceptibles de montrer que, dans la pratique, l'ensemble de l'opération a bien atteint son objectif.

Considérons un processus de fabrication particulier tel que la réalisation d'un certain type d'objet, et supposons comme nous l'avons déjà fait que cette opération peut être répétée un grand nombre de fois. Supposons que nous cherchons à atteindre un état de contrôle statistique pour une certaine caractéristique de qualité X ; que nous avons déjà réalisé n pièces du produit et que les qualités de ces n pièces relatives à la caractéristique X sont disponibles dans l'ordre suivant lequel les pièces ont été produites. Nous pouvons considérer ces n valeurs de X comme les n premiers termes d'une séquence infinie correspondant à ce que nous pourrions obtenir dans des conditions semblables en répétant indéfiniment l'opération de production.

Pour comprendre l'opération de contrôle, il est essentiel de distinguer les trois types d'action qui en font partie. Ce sont (a) des opérations mentales ou des jugements sur la question de savoir si plusieurs observations ont été faites dans les mêmes conditions, (b) des opérations mathématiques telles que la construction d'un critère de contrôle, et (c) des opérations physiques telles que la recherche d'une cause attribuable quand un point observé ne satisfait pas à un critère de contrôle.

Commentaires sur la première étape de l'opération de contrôle. Pour aborder cette étape, nous devons choisir la manière d'utiliser l'ensemble des n données d'origine comme indication de l'existence de causes de variabilité attribuables. Commençons par l'hypothèse que, lorsque l'opération de production est aléatoire, c'est à dire lorsqu'elle est en état de contrôle statistique, il n'y a aucune cause attribuable dans le processus de production. Par conséquent, tout ce qui indique que l'opération est aléatoire permet de penser qu'il n'y a pas de causes attribuables. Comme nous l'avons remarqué plus haut, un ensemble de n valeurs de X considéré comme un échantillon ou une séquence peut être le résultat d'une opération qui n'est pas aléatoire. Nous devons donc prendre en compte le fait, observé précédemment, qu'il n'y a pas de test unique du caractère aléatoire du système produisant les données.

Si un ensemble de n données doit indiquer un état de contrôle, deux conclusions sont évidentes. La première est que seule l'expérience passée nous permettra de dire s'il est plus vraisemblable qu'un ensemble de n valeurs de X est le résultat d'une opération aléatoire, ou s'il est plus vraisemblable qu'il ne le soit pas.

En second lieu, l'acceptation d'une caractéristique spécifique telle que l'ordre d'un ensemble de n valeurs de X observées comme indication de l'état de contrôle peut seulement être confirmée par une expérience future. Par conséquent, un ensemble de n données observées ne peut servir

d'indication de l'état de contrôle que s'il constitue un lien entre les expériences passées et futures. C'est la seule méthode que l'on puisse vérifier opérationnellement.

En retenant que notre but principal est de détecter les causes de variabilité attribuables, il est tout naturel d'essayer de faire usage du fait que certains ordres identifiables observés dans une expérience ne pourront certainement pas être associés à tout autre ordre possible dans une expérience future.

C'est l'idée la plus raisonnable, car les ingénieurs savent bien que certains ordres observés sont vraisemblablement produits par des opérations non-aléatoires plutôt que par des opérations aléatoires. En fait, c'est seulement quand il voit une difficulté à distinguer des ordres d'un certain type : tendances, mouvements cycliques, relations fonctionnelles et effets erratiques, que l'ingénieur fait appel au statisticien.

Mais nous avons d'autres raisons de considérer l'ordre observé comme une indication du caractère non-aléatoire. Par exemple, l'ordre identifiable de trois nombres ou plus, d'où est né le concept de nombres ordinaux, est fondé sur la propriété de « ce qui est entre » et non sur les valeurs absolues des nombres ; de même, la signification d'un ordre observé est indépendante de la distribution de fréquence de l'ensemble des nombres observés aussi bien que de celle de la séquence théoriquement infinie dont les n nombres observés ne constituent qu'une partie finie.

Si nous négligeons la signification de l'ordre observé, nous pouvons encore nous demander si l'ensemble des n valeurs observées peut être considéré comme un échantillon aléatoire d'un univers supposé et tester cette hypothèse. Mais avant d'appliquer ce test, il faut d'abord admettre que l'ordre observé est donné par une opération aléatoire de telle sorte que l'on pourrait parvenir à trouver une forme fonctionnelle à cet univers et à estimer ses paramètres.

Les considérations sur le caractère indiqué dans les paragraphes précédents ont fait apparaître le besoin, dans le travail de contrôle de la qualité, de mettre l'accent sur le sens de certaines caractéristiques de l'ordre observé comme indices d'opérations non-aléatoires dans le processus de production. Le fait que le choix des ordres à observer pour identifier avec certitude le non-hasard (c'est-à-dire la présence de causes attribuables) doive se fonder sur l'expérience met simplement l'accent sur cette expérience. On ne peut mettre au point des tests efficaces pour les causes attribuables qu'en s'appuyant sur une grande expérience pratique dans le domaine en question.

Commentaires sur la seconde étape de l'opération de contrôle. Il apparaîtra peut-être que certaines différences dans les conditions de saisie des échantillons, sinon toutes, ne peuvent pas être considérées comme des causes attribuables de variabilité des X . Cependant, ces différences constituent pour commencer nos meilleures indications de causes attribuables ; elles seront confirmées ou non par des études ultérieures. Donc il est souhaitable que l'ingénieur ou le chercheur trouve un moyen de grouper les X sur la base des différences observées, afin de mettre ensuite en évidence des causes attribuables. Les ingénieurs suivent tous les jours ce type de procédure. Si les mesures décomposées ainsi en sous-groupes sont radicalement différentes d'un groupe à l'autre, ils en déduisent généralement que les différences qui leur correspondent dans les conditions constituent des causes attribuables de variation de la caractéristique de qualité X . Ils arrivent à cette conclusion sans demander conseil au statisticien. Mais par contre, si les sous-groupes ne sont pas clairement différents et se recouvrent en partie, deux voies s'ouvrent au scientifique ou à l'ingénieur. L'une consiste à dire que les conditions sont essentiellement les mêmes, et l'autre consiste à faire appel au statisticien pour lui demander si les différences observées entre les groupes proviennent des fluctuations de l'échantillonnage dans un état de contrôle statistique. Nous abordons ainsi un problème avec lequel le statisticien est depuis longtemps familier, qui est d'essayer de mettre au point un test statistique pour déterminer si plusieurs échantillons sont significativement différents.

Nous voyons apparaître ici un caractère distinctif du statisticien de contrôle. Indépendamment du résultat de l'application d'un test statistique sur les différences significatives entre les sous-groupes que l'expérimentateur a sélectionnés seulement sur la base de sa connaissance des conditions dans lesquelles les valeurs de X ont été obtenues, le statisticien de contrôle sait que l'expérience ne lui permet pas de croire que chacun de ces sous- groupes est un échantillon aléatoire du processus de production si cette idée est fondée seulement sur le fait que l'expérimentateur considère que les observations de chaque sous- groupe ont été faites dans les mêmes conditions essentielles.

Par contre, aucun ingénieur ne pensera un seul instant qu'il peut ignorer l'importance du jugement humain établissant que les conditions dans lesquelles un ensemble de n mesures a été effectué sont les mêmes ou non. Dans la mise au point d'une opération de contrôle statistique, nous ne pouvons rien faire sans un jugement humain sur les conditions, mais nous ne pouvons pas non plus le considérer comme notre seul recours. Il nous faut aussi chercher un critère de contrôle qui utilise les grandeurs numériques des qualités observées.

Commentaires sur la troisième et la quatrième étape de l'opération de contrôle. Nous considérons ces deux étapes ensemble parce qu'elles sont intimement liées. En fait, ce qu'il faut faire dans l'étape trois dépend largement de l'action menée dans l'étape quatre. Par exemple, l'étape quatre consiste à chercher une cause de variation attribuable si la statistique observée choisie dans l'étape trois tombe en dehors des limites de contrôle. Par conséquent, dans toute la mesure du possible, le critère de contrôle doit être tel que chaque fois qu'une statistique tombe en dehors des limites de contrôle, et seulement dans ce cas, il sera possible de trouver une cause de variation attribuable. Mais il faut garder présent à l'esprit qu'après avoir trouvé et éliminé une cause de variation attribuable, il faut modifier (rétrécir) les limites de contrôle. C'est pourquoi la troisième et la quatrième étape sont intimement liées.

Nous sommes maintenant en mesure d'établir un certain nombre d'exigences pratiques concernant le critère de contrôle :

1. Il doit indiquer la présence de causes de variation attribuables.
2. Il ne doit pas seulement indiquer la présence de causes attribuables mais encore faciliter la découverte de ces causes.
3. Il doit être aussi simple que possible et adaptable à une opération de contrôle permanente et auto-correctrice.
4. Il doit être tel que le risque de rechercher des causes attribuables alors qu'elles n'existent pas soit inférieur à une valeur donnée.

J'ai expliqué par ailleurs comment je conçois le critère I de contrôle (limites 3 sigma). Sans vouloir répéter ce que j'ai écrit précédemment, je vais tenter d'expliquer plus en détail, dans les paragraphes qui suivent, les principales raisons qui m'ont fait choisir ce critère. Voyons donc comment il répond aux quatre exigences pratiques énoncées ci-dessus.

La principale fonction du graphique est de détecter la présence de causes attribuables (première exigence). Il faut essayer d'être parfaitement clair sur le sens de cette fonction d'un point de vue pratique et expérimental. Une cause de variation attribuable, au sens du contrôle de la qualité, est une cause de variation que l'on peut trouver en se livrant à des expériences sans dépasser un coût proportionné à l'enjeu de la recherche. Suivant cette définition, il se peut qu'une cause attribuable aujourd'hui ne le soit plus demain, en raison d'un changement survenu dans les facteurs économiques que sont le coût et l'enjeu de la recherche de la cause. De même, un critère qui indiquerait une cause attribuable quand on l'utilise pour un processus de production n'est pas nécessairement un critère satisfaisant pour un autre processus. Il n'y a évidemment aucune méthode *a priori*, mathématique et rigoureuse, qui indique une cause attribuable dans un cas donné. On ne

peut justifier l'utilisation d'un critère que par une utilisation prolongée. Si nous insistons ici sur le fait que l'utilisation d'un critère déterminé doit être justifiée sur une base empirique, c'est afin d'éviter la confusion entre un tel critère et un test statistique de signification. Nous reviendrons sur ce point dans l'un des prochains paragraphes. Il suffit pour l'instant de retenir qu'un test statistique de signification est une conclusion *déductive* sur la base de certaines hypothèses fondamentales, et qu'il peut théoriquement s'effectuer avec toute l'exactitude voulue. En général, ce test consiste à définir une statistique d'un échantillon aléatoire de n objets d'un univers supposé et de calculer la probabilité d'obtenir une valeur observée en dehors d'un intervalle choisi.

On fait alors un choix arbitraire de la probabilité et on calcule les valeurs qui lui sont associées. Une valeur de observée est alors dite significative si elle tombe en dehors de l'intervalle correspondant. Un tel processus est *déductif*. Au contraire, quand une statistique observée tombe en dehors de ses limites de contrôle, la conclusion *inductive* consiste à dire qu'une cause attribuable existe. Pour vérifier cette conclusion inductive, il faut faire appel à des données empiriques.

Ce qu'il faut noter ensuite, c'est qu'en mettant au point un critère de contrôle, il faut utiliser le plus efficacement possible l'ordre d'apparition comme indice de la présence de causes attribuables. Nous avons déjà vu combien cet ordre est important.

Alors pourquoi faisons-nous confiance au Critère I en tant que bon indicateur de causes attribuables ? Comme nous l'avons déjà indiqué dans ce chapitre en discutant sur le sens du hasard, une expérience prolongée nous a montré qu'une séquence observée ne se retrouve presque jamais en pratique, même si elle est obtenue dans les mêmes conditions essentielles satisfaisant au Critère I. De plus, si l'on cherche des causes attribuables quand une statistique observée sort de ses limites de contrôle, on les trouve presque toujours. Ainsi, en poursuivant le processus de découverte et d'élimination des causes attribuables, nous approchons progressivement d'un état où une statistique observée sort rarement de ses limites et où, si l'on cherche des causes attribuables en ces rares circonstances, on les trouve rarement.

Il est important de noter que lorsque le Critère I est utilisé pour détecter la présence de causes attribuables, l'accent doit toujours être mis sur la décomposition de la séquence originale en sous-groupes de dimensions relativement faibles. Si cette précaution n'est pas prise, on risquera de ne pas voir la présence de causes attribuables. La nécessité d'utiliser de petits sous-groupes n'est pas imposée par le choix d'un critère particulier. Cette précaution sera nécessaire également si nous voulons utiliser un test d'analyse de variance.

En pratique, le Critère I est utile pour détecter la présence de causes attribuables non seulement quand une statistique tombe en dehors de ses limites de contrôle, mais aussi quand l'enregistrement graphique suggère la présence d'une tendance ou d'une variation cyclique, même si les valeurs observées de la statistique pour les sous-échantillons observés ne tombent pas en dehors des limites de contrôle. Par exemple, une séquence de moyennes de sous-échantillons de quatre objets révèle des effets qui n'auraient pas été détectés par la séquence d'origine. Mais il n'est évidemment pas possible de donner une règle définie pour l'usage de telles tendances et de telles variations cycliques apparentes avec la même assurance que lorsque les règles de la recherche d'une cause attribuable sont appliquées quand une statistique observée tombe en dehors des limites de contrôle.

Considérons maintenant la seconde exigence d'un critère de contrôle, c'est à dire qu'il ne doit pas seulement indiquer la présence d'une cause attribuable, mais qu'il doit le faire de manière à faciliter la découverte de la cause. Il est évident que, pour trouver et éliminer une cause attribuable lorsqu'elle est annoncée, il faut être capable de mettre le doigt sur les conditions qui existaient à l'époque où la cause était présente. Encore une fois, en considérant la séquence infinie, si une cause attribuable est présente dans les conditions C_i à C_{i+j} , le critère de contrôle doit indiquer sa présence dans l'ensemble des conditions. Le critère I sous la forme d'un graphique de contrôle est conçu pour satisfaire à cette exigence.

Nous arrivons maintenant à la troisième exigence, à savoir que le critère doit être aussi simple que possible et adaptable à une opération de contrôle permanente et auto-correctrice. L'expérience montre que le processus qui consiste à détecter et à éliminer les causes de variabilité attribuables pour atteindre un état de contrôle statistique est de longue durée. Il faut réviser de temps en temps les limites de contrôle lorsque des causes attribuables sont trouvées et éliminées. Un enregistrement permanent des graphiques de contrôle qui indique une succession de modifications permet de voir d'un seul coup d'oeil toute l'histoire des améliorations réalisées sur le processus pour atteindre un état de contrôle.

Une procédure simple est utilisée pour établir les limites de contrôle sans faire appel à des tables de probabilité, car il ne semble pas que l'on puisse gagner grand chose en essayant de calculer des limites précises au cours du travail effectué pour éliminer les causes attribuables en vue d'atteindre un état de contrôle statistique. Ce calcul serait d'ailleurs fondé sur des hypothèses fausses, nous le savons, tant qu'un état de contrôle statistique n'est pas atteint. De plus, les probabilités en question ne sont pas celles de détecter des causes attribuables mais seulement de chercher des causes alors qu'elles n'existent pas, ce qui n'est pas de première importance tant qu'un état de contrôle statistique n'est pas atteint. Alors répétons-le, la conception d'un critère efficace pour indiquer la présence de causes attribuables dépend plus de la méthode de décomposition de la séquence en sous-groupes d'une taille déterminée pris dans un certain ordre que de l'emploi d'une théorie mathématique rigoureuse de la distribution.

Quand le contrôle statistique est presque atteint, il est très important d'utiliser un critère qui n'indique pas trop souvent un incident alors qu'il n'y a pas d'incident. C'est la quatrième exigence énoncée ci-dessus. Les limites de contrôle que j'utilise le plus souvent dans mon travail sont fixées de telle sorte que lorsqu'un état de contrôle statistique est atteint, le nombre de fois où l'on recherche des causes attribuables qui n'existent pas ne dépasse pas trois sous-échantillons sur mille, quand la distribution de la statistique utilisée dans le critère est normale.

Même si nous essayons de limiter à une valeur déterminée la probabilité de rechercher des causes qui n'existent pas, il est nécessaire de choisir une valeur raisonnable en fonction du coût des recherches infructueuses. Comme il n'existe pas *a priori* de bases précises pour faire ce choix, nous pensons que les simples règles de calcul des limites de contrôle que l'on trouve dans la littérature suffisent.

Commentaires sur la cinquième étape de l'opération de contrôle. Même après avoir trouvé un critère de contrôle convenable, il faut encore trouver la réponse à une question pratique extrêmement importante, celle de la longueur de la séquence d'observations qui doit satisfaire au critère de contrôle pour que l'on soit pratiquement certain qu'un état de contrôle statistique a été atteint. Supposons que l'on applique ce critère à une courte séquence, disons une séquence de huit observations, sans détecter la présence de causes attribuables. Devons-nous conclure sur cette seule preuve que le processus ou l'opération d'où proviennent les valeurs observées est dans un état de contrôle statistique ? L'expérience du travail de contrôle de la qualité permet de répondre par la négative. Ainsi je n'ai pas vu conclure une seule fois sur la base des observations d'un échantillon réduit qu'un état de contrôle existait sans que cette conclusion soit infirmée par la suite.

Avant de continuer, nous remarquerons qu'il existe une différence fondamentale entre le fait de conclure qu'un critère de contrôle appliqué à une séquence de données n'indique pas la présence de causes attribuables et le fait de conclure que l'on est dans un état de contrôle statistique parce qu'un critère de contrôle appliqué à une séquence finie n'indique pas la présence de causes attribuables. Comme nous l'avons constaté plus haut, les causes attribuables peuvent alternativement apparaître et disparaître dans un processus ou dans une opération physique qui est répétée indéfiniment dans des conditions supposées essentiellement identiques. Il est donc possible qu'aucune cause attribuable ne soit présente au moment de l'observation d'une séquence finie, mais cette situation ne

signifie pas nécessairement qu'un état de contrôle statistique est atteint ou, en d'autres termes, que toutes les causes attribuables ont été éliminées du processus, celui-ci étant considéré comme une opération que l'on peut répéter à volonté, indéfiniment. D'après mon expérience, les premières étapes dans la recherche du contrôle d'une caractéristique de qualité comportent presque toujours la présence de causes attribuables, même quand l'opération de production est répétée dans des conditions supposées essentiellement identiques. Quand on a trouvé et éliminé ces causes attribuables, la variation de qualité tend progressivement vers un état de contrôle statistique ainsi que l'indiquent les statistiques d'échantillons successifs qui tombent entre leurs limites de contrôle, sauf quelques rares exceptions pour lesquelles des causes attribuables sont rarement trouvées.

L'expérience montre aussi qu'il est souvent faux de conclure qu'une opération répétitive est dans un parfait état de contrôle tant que l'on n'a pas obtenu, dans des conditions supposées essentiellement identiques, une séquence d'au moins *vingt cinq échantillons de quatre pièces qui satisfont au Critère I*. Dans certains cas, quand il est essentiel pour des raisons économiques ou autres d'être pratiquement certain que l'on atteint un état de contrôle, il est souhaitable d'avoir une séquence plus longue. C'est par exemple le cas où l'on veut obtenir des tolérances économiques pour une caractéristique de qualité donnée en se basant sur le fait que le processus de production est dans un état de contrôle statistique. Nous verrons au cours du chapitre suivant qu'il est nécessaire dans ce cas de ne trouver aucune indication de la présence de causes attribuables sur un échantillon d'au moins mille pièces.

L'opération de contrôle statistique dans son ensemble. Nous sommes maintenant capables de mieux voir l'opération de contrôle statistique dans son ensemble. Comme nous l'avons déjà remarqué, cette opération est *permanente et auto-correctrice*. Son but est d'atteindre un état de contrôle statistique. L'opération elle-même ne doit pas être confondue avec le critère de contrôle : cette opération n'indique pas seulement comment les données doivent être décomposées et introduites dans le critère de contrôle, ni quelles actions il faut entreprendre quand une statistique observée tombe hors de ses limites de contrôle, mais aussi combien de données il faut introduire dans le critère de contrôle sans qu'il indique la présence de causes attribuables avant que l'ingénieur agisse selon l'hypothèse qu'il a atteint un état de contrôle statistique. En ce sens, l'opération de contrôle est un processus dynamique qui met en jeu un enchaînement d'actions dans lesquelles le critère de contrôle est un simple outil. Un bon ingénieur de contrôle de la qualité, comme un bon chercheur de laboratoire, n'est pas une simple machine à raisonner mais plutôt une unité biologique sensible à un environnement en perpétuelle évolution et agissant sur cet environnement.

LE JUGEMENT DU CONTROLE STATISTIQUE

Avant d'étudier le problème du jugement du contrôle statistique, et pour affermir les fondements de cette étude, nous allons réviser les principaux points déjà abordés. L'ingénieur désire obtenir un produit de qualité uniforme et homogène. Comme base d'une caractérisation quantitative d'un tel produit, il conçoit une production qui donnera un état de contrôle statistique assurant :

- (a) la prévisibilité au sens probabiliste ;
- (b) une variabilité minimum en qualité.

Pour atteindre cet état, l'ingénieur s'aperçoit qu'il doit passer par certaines opérations de contrôle statistique dans lesquelles il utilise une technique faisant appel à des critères statistiques pour trouver et extirper des causes attribuables. Le concept d'état de contrôle statistique est essentiel pour décrire l'objectif d'une production industrielle uniforme, et l'opération de contrôle statistique est un moyen d'approcher cet objectif. Quel que soit le cas, il reste à juger de la distance entre le résultat et l'objectif, et c'est ce problème que nous allons étudier maintenant.

Pour commencer, regardons à nouveau l'affirmation « La qualité de ce produit est dans un état de contrôle statistique ». Pour les besoins de notre étude, nous la supposons équivalente à l'affirmation que la qualité du produit réalisé par le processus de production est uniforme. Nous pouvons tirer trois conclusions importantes. (1) Cette affirmation n'a de sens que pour celui qui a bien défini un état de contrôle statistique. (2) Cette affirmation est une déduction probable qui implique une prévision sur une partie non-observée de la séquence. (3) Ce que nous connaissons au sujet des n valeurs de X qui ont été observées et des résultats obtenus en appliquant la technique de contrôle statistique au processus de production constitue l'ensemble de données E à partir duquel on pourra faire la prévision P . Toute affirmation de ce type implique une prévision sur une partie de la séquence qui n'a pas été observée.

Dans ce qui suit, nous avons besoin de garder à l'esprit que l'affirmation selon laquelle la qualité d'un produit est dans un état de contrôle statistique implique une prévision P qui peut se trouver vraie ou fausse, et un ensemble de données E qui permet de croire à cette prévision. Je ferai donc le postulat fondamental :

Postulat II. Le degré objectif de croyance rationnelle en une déduction qui implique une prévision P fondée sur un ensemble de données E n'est pas une propriété intrinsèque en tant que vérité, mais il est propre à la déduction qui est faite en établissant une relation entre la prévision P et l'ensemble de données E .

Nous ne pouvons pas entrer ici dans une discussion sur toutes les raisons pour lesquelles il semble souhaitable d'adopter ce postulat, non plus que nous n'avons pu précédemment entrer dans une discussion sur toutes les raisons qui nous ont conduit à adopter le postulat I. Il suffit de rappeler que notre discussion avait pour but de montrer que pour utiliser avec succès le calcul des probabilités il faut considérer une chaîne de trois opérations : mentale, physique et mathématique. Le fait que nous dépendions d'une personne qui utilise la théorie des probabilités pour choisir à partir de son expérience les conditions qu'il considère comme les plus favorables à des conclusions valables met en relief un acte de croyance rationnelle qui nous paraît nécessaire, et cet acte est toujours une recherche destinée à relier des données passées E à une prévision P .

Trois types d'opérations nécessaires au bon usage des probabilités : mentale, physique et mathématique. S'agissant de ce postulat, nous noterons que le processus qui consiste à vérifier une hypothèse impliquant une prévision P fondée sur des données E doit être différent de celui qui consiste à vérifier la prévision P . Pour vérifier la prévision, nous n'avons pas besoin d'avoir les données présentes à l'esprit, alors que pour vérifier l'hypothèse nous devons déterminer si la prévision P est raisonnable sur la base des données E . Ainsi, une hypothèse fondée sur un ensemble de données spécifiées E peut être raisonnable ou valable sur la base de ces données même lorsqu'on a appris que cette prévision était fausse.

Nous pouvons mieux apprécier maintenant les trois concepts de contrôle statistique, c'est-à-dire un état, une opération, un jugement. L'état de contrôle statistique est un but idéal ; l'opération de contrôle statistique est un moyen d'atteindre ce but ; le jugement de contrôle statistique est de nature d'une hypothèse probable sur le fait de savoir si cet état a été atteint. Le juge de la qualité doit être familier non seulement avec les moyens statistiques consistant à spécifier l'état de contrôle statistique à partir duquel il fait ses prévisions, mais aussi avec les règles qui régissent l'établissement des faits, leur acceptation et la formulation d'hypothèses probables. En ce sens, sa mission est très voisine de celle du juge dans le droit anglo-saxon. Le juge du tribunal a ses propres règles qui régissent la présentation des faits et l'établissement de la preuve judiciaire ; de même, le juge de la qualité doit avoir des règles et des principes, dont ceux relatifs à l'hypothèse statistique.

SIGNIFICATION DU CONTROLE STATISTIQUE

Les applications habituelles de la statistique supposent un état physique dans lequel les échantillons prélevés présentent un caractère aléatoire. Des études ont montré que de tels états existent rarement de façon naturelle, du moins en physique, donc qu'ils ne peuvent être obtenus que par une opération de contrôle statistique.

Rappelons les trois étapes de contrôle : spécification, production et jugement de la qualité. Selon l'ancien concept d'une science exacte, ces trois étapes (indiquées ici par I, II et III) étaient indépendantes. Une personne pouvait spécifier l'objet voulu, une autre pouvait prendre la spécification comme un guide et réaliser cet objet. Finalement, un inspecteur, juge de la qualité, pouvait mesurer l'objet afin de voir s'il répondait aux spécifications.

La spécification, la production et l'inspection ne sont pas indépendantes. Ce schéma change complètement quand on admet que la science n'est que probable. Pour des raisons économiques aussi bien que pour atteindre une assurance de la qualité maximum dans tous les types d'activités, même en essayant de se maintenir dans un intervalle de tolérance, il devient nécessaire d'introduire les concepts d'objectif et de limites d'action. Mais pour spécifier l'objectif, il faut d'abord faire l'opération de contrôle statistique. En fait, l'objectif provient nécessairement de l'étape III, les limites d'action ayant été déterminées dans l'étape II. Mais on ne peut pas fixer ces limites d'action sans connaître les limites de tolérance qui ont été spécifiées dans la première étape. Il est particulièrement important de remarquer, je pense, que la troisième étape ne peut pas être accomplie simplement par l'inspection de la qualité des objets en tant que tels, mais qu'elle doit comporter l'inspection des objets suivant une séquence ordonnée en relation avec le processus de production. En fait, ces trois étapes doivent s'enchaîner circulairement au lieu de s'enchaîner linéairement.

Il est intéressant de considérer les trois étapes du processus de production de série comme les trois étapes de la méthode scientifique. En ce sens, la spécification, la production et l'inspection ont pour équivalents l'hypothèse, l'expérience et le test d'hypothèse. Les trois étapes constituent un processus scientifique dynamique d'acquisition de connaissances. De ce point de vue, il serait préférable de les faire figurer sur une sorte de spirale qui se rapprocherait progressivement d'une limite circulaire représentant le cas idéal où l'étape III ne fournit plus l'évidence du besoin de modifier la spécification. Le nombre de répétition des trois étapes importe peu. De cette façon, la production de série devient une méthode permanente et auto-correctrice permettant d'utiliser le plus efficacement possible les matières premières et les produits manufacturés.

Du point de vue de la spécification, il est intéressant de noter que pour définir opérationnellement une opération de contrôle, il faut spécifier non seulement certains critères de contrôle mais aussi l'opération de sélection des objets dont les qualités seront testées. Les critères qui seront utilisés dans la méthode de vérification de l'état de contrôle peuvent être choisis sans se référer à un type de produit particulier. Au contraire, pour mettre au point la méthode ayant pour but de spécifier la séquence utilisée avec les critères qui sont retenus, il faudra utiliser des informations empiriques obtenues en production. Nous devons retenir aussi comme un point très important le fait qu'une spécification de ce genre implique assez fortement l'assurance de la qualité du produit en accord avec cet ensemble de critères, particulièrement lorsqu'il n'est pas possible de tester toutes les pièces du produit. Encore une fois, sans la connaissance des résultats des tentatives préalables pour contrôler la qualité, il est impossible de spécifier de façon bien définie la quantité de données nécessaires, ainsi que la séquence à laquelle seront appliquées les critères de contrôle, établis sur ces données, qui conduisent à l'assurance de la qualité souhaitée dans la spécification du projet. Pour toutes ces raisons, il semble que des exigences de contrôle vérifiables opérationnellement, des exigences précisant combien de données il faut obtenir pour avoir l'assurance de la qualité qui convient, ne peuvent être préparées que dans la troisième étape, et seulement par quelqu'un qui ne

perdra jamais de vue ni l'intention des exigences du projet ni les résultats d'inspection accumulés qui indiquent dans quelle mesure on s'approche d'un état de contrôle statistique. Par conséquent, la spécification doit être améliorée dans la troisième étape en fonction d'une inspection qui donne des données adaptées et des critères de contrôle satisfaisants pour tous les types de produits.

La théorie statistique intervient dans chacune des trois étapes. Pour atteindre l'économie du contrôle et un maximum d'assurance de la qualité, il faut faire intervenir la théorie statistique et les techniques qui s'y rapportent dans chacune des trois étapes du contrôle de la qualité. C'est ainsi que ces techniques peuvent permettre à la production de série d'apporter une contribution importante au progrès scientifique. Par ailleurs, comme nous l'avons vu, l'état de contrôle est une limite qui est approchée mais jamais atteinte, même quand les causes attribuables de variabilité sont détectées et éliminées. Un tel état ne peut pas être obtenu en un jour. On ne peut pas l'obtenir dans la production d'une petite quantité de pièces, mais on peut s'en approcher dans une production de série continue.

L'AVENIR DE LA STATISTIQUE DANS LA PRODUCTION DE SÉRIE

On a beaucoup écrit sur l'utilisation de la théorie statistique pour étudier, découvrir et mesurer les effets d'un système de causes aléatoires inconnues. Il reste beaucoup à écrire sur l'utilisation de cette théorie et des techniques qui s'y rapportent pour parvenir à modifier un système de causes aléatoires jusqu'à obtenir le comportement que l'on a choisi. Le statisticien sait que ses prévisions sont valables si certaines hypothèses sur le système de causes sont justifiées, la plus importante étant peut-être que les effets particuliers d'un système de causes aléatoires sont des événements aléatoires. Dans une production de série, un statisticien sait bien par expérience qu'il ne trouvera pas que des effets aléatoires, même à la suite d'un bon planning. Si un statisticien industriel ignore cette réalité et fait des prévisions comme s'il n'avait affaire qu'au hasard, il risque de faire des prévisions souvent inexactes et de voir son travail discrédité. Pour cette raison, le statisticien industriel travaillant sur une production de série doit commencer par mettre au point des techniques pour déterminer dans quel cas il est légitime de considérer que les effets du système de causes sont aléatoires et que la théorie des distributions est applicable.

L'expérience du contrôle de la qualité donne une technique pratique pour détecter et éliminer les causes attribuables de variabilité dans le processus de production jusqu'à atteindre un état de contrôle statistique où les prévisions fondées sur l'hypothèse des causes aléatoires sont valables. En éliminant les causes de variabilité attribuables, on utilise le plus efficacement possible les matières premières, on augmente au maximum l'assurance de la qualité des produits manufacturés, on réduit au minimum les coûts d'inspection et les pertes relatives aux refus. Capable de payer de bons dividendes, la statistique est promise à un brillant avenir dans la production de série. Quelles en sont les conditions ?

La réponse à cette question est contenue dans les trois étapes fondamentales du contrôle de la qualité :

1. La spécification de la qualité de l'objet demandé.
2. La production d'objets conçus pour répondre à la spécification.
3. L'inspection des objets produits pour voir s'ils répondent à la spécification.

Nous avons vu que la caractéristique essentielle de la première étape est la nécessité de fixer et de mettre en application une plage de tolérance pour chaque caractéristique de qualité spécifiée. Si un producteur signe un contrat pour fournir des pièces dans une plage spécifiée et s'il trouve, en appliquant les étapes II et III, qu'une partie de son produit tombe en dehors des limites de tolérance, il perd de l'argent. Il ne doit pas signer un contrat où les limites de tolérance sont trop étroites, mais

s'il veut bien utiliser ses matériaux, il doit réduire les limites de tolérance tant qu'il peut en prendre le risque.

Evidemment, personne ne peut spécifier au gré de son inspiration une plage de tolérance qu'il faudra respecter en pratique. On doit savoir ce qui est possible dans les conditions d'une production commerciale correspondant à l'étape II, qui sera mis ensuite en évidence par l'étape III. On doit aussi tenir compte du fait, que j'ai déjà signalé et sur lequel je reviendrai, qu'un processus de fabrication sur lequel on commence à travailler n'est certainement pas en état de contrôle statistique. Un tel état ne peut s'obtenir que par l'application de certaines techniques statistiques parmi lesquelles les graphiques de contrôle. Il faut bien mettre l'accent sur le fait que les trois étapes : spécification, production et inspection, ne peuvent pas être traités séparément dans une production de série ; elles doivent au contraire être coordonnées, chaque étape venant aider la réalisation des deux autres. Il faut considérer en fait l'ensemble de ces trois étapes comme une expérience scientifique dans laquelle l'objectif est d'obtenir l'usage le plus efficace possible des matériaux disponibles.

D'une façon générale, le statisticien du futur pourra participer au projet fondamental consistant à développer ce type d'expérience. Comme nous l'avons dit plus haut, il doit concevoir d'abord des techniques de contrôle statistique pour l'élimination des causes de variation attribuables, et il utilisera ensuite les théories statistiques modernes qui sont décrites dans la littérature, en étant raisonnablement assuré que ses prévisions seront valables. Mais il doit aller plus loin que l'objectif habituellement indiqué dans la littérature et donner à chaque terme statistique qu'il utilise (variable aléatoire, justesse, précision, valeur vraie, probabilité, degré de confiance rationnelle, etc.) une signification que l'on peut vérifier opérationnellement. Les chapitres suivants représenteront nos premiers pas dans cette direction.

En un sens, le problème du statisticien dans une production de série est beaucoup plus compliqué que celui d'utiliser les plans d'expérience qui sont présentés dans la littérature statistique. Alors que la théorie statistique s'intéresse généralement à des expériences faites à une petite échelle, dans les conditions du laboratoire et par un personnel peu nombreux, la mise au point des processus de production de série doit se faire dans des conditions commerciales, avec beaucoup de monde et en opérant à une grande échelle. Cette difficulté est illustrée par le fait que, dans une production de série, les trois étapes sont généralement réalisées par des sociétés différentes ou par des divisions différentes d'une même société. Elles font souvent appel aux efforts coordonnés de centaines et même de milliers d'employés, parmi lesquels des physiciens, des chimistes, des ingénieurs, des vendeurs, des acheteurs, des juristes et des économistes. Très peu ont suivi des cours de statistique ou de calcul des probabilités, néanmoins ils doivent tous être capables d'apprécier si la contribution du statisticien peut leur être utile. Cette situation pose un problème non seulement à ceux qui ont aujourd'hui une responsabilité dans l'industrie, mais aussi à tous les responsables de la formation des dirigeants de l'industrie de demain car ils doivent donner à leurs élèves une compréhension de la statistique suffisante pour reconnaître la contribution que la théorie statistique et les techniques correspondantes peuvent leur apporter.

Une nouvelle mission pour le statisticien dans la production de série. A l'avenir, dans la production de série, le statisticien ne devra pas simplement examiner, découvrir et mesurer les effets des systèmes de causes aléatoires existants, mais il devra aussi inventer des moyens nouveaux pour changer ces systèmes et réaliser ainsi toutes les conditions nécessaires à un usage aussi efficace que possible des matériaux. Il ne devra pas se contenter de mesurer la conformité aux exigences des produits, mais il devra aussi aider à modifier ces exigences en montrant en particulier comment réduire la plage de tolérance et améliorer la qualité même des produits. Il ne devra pas se contenter de mesurer les coûts de production, mais il devra aider à les réduire.

Dans la production de série de demain, la contribution de la statistique résidera moins dans la résolution des problèmes auxquels le statisticien est habitué aujourd'hui que dans la prise en main de la coordination des trois étapes que sont la spécification, la production et l'inspection. À long terme, l'efficacité de la statistique dépendra moins de l'existence dans l'industrie d'un corps de statisticiens de formation supérieure que de la préparation de toute une génération formée à l'esprit statistique, avec des physiciens, des chimistes, des ingénieurs et bien d'autres spécialistes qui seront responsables d'une manière ou d'une autre de la préparation et de la conduite des nouveaux processus de production.