

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

F. DOURGNON

G. BOUCLIER

Quelques exemples d'emploi d'appareils de mesure dans l'industrie

Revue de statistique appliquée, tome 12, n° 1 (1964), p. 85-96

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1964__12_1_85_0

© Société française de statistique, 1964, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Revue de statistique appliquée » (<http://www.sfds.asso.fr/publicat/rsa.htm>) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (<http://www.numdam.org/conditions>). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
<http://www.numdam.org/>

QUELQUES EXEMPLES D'EMPLOI D'APPAREILS DE MESURE DANS L'INDUSTRIE

F. DOURGNON et G. BOUCLIER
Société Nouvelle de Roulements

La nécessité d'améliorer les performances des produits industriels conduit à réaliser de nouveaux appareils de mesure. Une nouvelle technique se crée ainsi de jour en jour, qui crée à son tour des problèmes et des préoccupations nouvelles. Le rôle du statisticien n'est pas seulement d'étudier un appareil mais de déceler la difficulté, d'expérimenter, de conclure et de convaincre.

Cet article expose quelques exemples tirés de l'industrie du roulement. On a voulu montrer que la précision, du point de vue statistique, n'est pas l'aboutissement d'un effort vers l'infiniment petit physique, mais la recherche d'un ordre de grandeur propre au phénomène étudié.

1. QUELQUES EXEMPLES SIMPLES

Les divers livres et articles sur les plans d'expérience mentionnent souvent des différences significatives entre observateurs, que ne pressentent pas toujours physiciens et chimistes préoccupés par des questions d'ordre technique. Il arrive ainsi au statisticien de mettre en lumière des choses inconnues. C'est que la Statistique est une méthode plus large et plus fructueuse que les méthodes classiques.

Il semble utile de rappeler d'abord certains principes relatifs à l'emploi des instruments de mesure :

L'interpolation entre deux graduations d'un instrument de mesure est souvent une erreur. Par contre, une moyenne peut s'exprimer dans certains cas avec un chiffre significatif supplémentaire car ce n'est pas une mesure, mais une interprétation de mesures.

L'attrance des cotes rondes est certaine pour tout esprit non prévenu. Des tests statistiques montrent qu'il est très difficile de s'en défaire.

Un appareil à graduation non linéaire et à amplification variable doit être utilisé dans la zone centrale.

La dispersion des valeurs lues doit s'étendre sur au moins cinq ou six classes, sinon l'appareil est insuffisamment précis.

Dans le cas particulier de mesures en série de diamètres de pièces mécaniques, il est préférable de distinguer par des opérations distinctes, la cote et l'ovalisation, que ce soit manuellement ou automatiquement, l'erreur de mesure globale étant en fin de compte plus faible et la mise sous contrôle permettant de séparer clairement le défaut de cote ou d'ovalisation.

Certains cahiers des charges spécifient et donnent des tolérances pour des mesures de diamètres et une tolérance d'ovalisation. Il est difficile d'en discerner la logique et l'intérêt pour le produit fini. Diffusés en atelier, ces cahiers des charges produisent une confusion générale des idées. La méthode habituelle consiste à faire tourner la pièce sur l'appareil de mesure et à tout lire à la fois. Le résultat est une série d'erreurs de mesures très importantes et la fabrication de nombreuses pièces hors tolérances. C'est pourquoi on a substitué, à cette méthode, deux mesures, l'une de cote au hasard, l'autre d'ovalisation ; pour cette dernière mesure seulement, on fait tourner la pièce. La notion de cote au hasard s'explique très bien du point de vue statistique : il ne s'agit pas de juger une pièce mais une fabrication au moyen d'un prélèvement. Pour cela, on connaît la loi de distribution des moyennes de n cotes au hasard. Il suffit de comparer le prélèvement à cette loi. L'expérience montre qu'en ne tenant pas trop compte des cahiers des charges mal étudiés et en y substituant des méthodes s'accordant mieux aux conditions d'atelier, on améliore la qualité, seule préoccupation réelle.

Voici quelques exemples :

1/ Des pièces sont mesurées manuellement et classées. Le nombre de classements possibles est vingt plus deux "hors cote".

En reprenant ces pièces après classement et en les mesurant à nouveau avec le plus grand soin au service Métrologie, on s'est aperçu que 3 % seulement d'entre elles étaient bien classées, tandis que 16 % se trouvaient dans la classe voisine de celle prévue, le reste étant dans des classes plus éloignées. De plus, les classes limites étaient beaucoup plus approvisionnées que les autres.

2/ Des pièces sont triées par un appareil ou l'amplification incorrecte fait utiliser la partie inférieure de la graduation. Les populations des pièces acceptées et des pièces rebutées se sont révélées superposables, l'appareil ne mesurant que sa propre erreur.

On peut déterminer la loi des écarts entre la vraie valeur et la valeur lue. Soit par exemple, n observations désignées par :

$$x_{1_1} \ x_{1_2} \ \dots \ x_{1_y} \ \dots \ x_{1_n}$$

Désignons par A_j la vraie valeur des x_j

$$\varepsilon_j = x_j - A_j$$

est l'erreur de mesure. Elle suit une loi normale. Si sa moyenne est nulle, on dit qu'il n'y a pas d'erreur systématique. Son écart-type peut-être estimé.

$$\text{soit } x_{2_1} \ x_{2_2} \ \dots \ x_{2_j} \ \dots \ x_{2_j} \ \dots \ x_{2_n}$$

une seconde série d'observations des n mêmes objets, dans le même ordre.

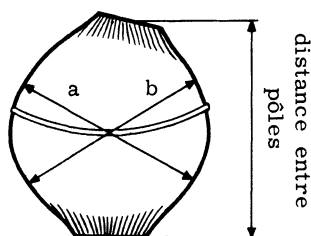
$$x_{1j} - x_{2j} = (A_j + \varepsilon_{1j}) - (A_j + \varepsilon_{2j}) = \varepsilon_{1j} - \varepsilon_{2j}$$

soit une loi normale d'écart-type $\sigma \sqrt{2}$. On en déduit σ .

Des différences hypothétiques entre observateurs, entre appareils peuvent être mises en évidence par des plans d'expérience appropriés. Le lecteur ne pourra mieux faire que d'étudier l'article de M. DELAPORTE dans le bulletin n° 9 de l'Association française pour le contrôle industriel de la qualité.

2. MESURE DES BILLES APRES MATRICAGE

Une bille après matriçage présente une forme très irrégulière comme le représente le schéma ci-dessous.



On contrôlait la distance entre pôles et le déplacé d'une demi-sphère par rapport à l'autre.

L'erreur de mesure a été trouvée égale à :

$$\sigma_1 = 0,05 \text{ mm pour la distance entre pôles}$$

$$\sigma_2 = 0,10 \text{ mm pour le déplacé (a - b)}$$

les tolérances étant respectivement 0,20 mm et 0,06 mm.

Le procédé de mesure étant impropre, mais les billes sortant bonnes en fin d'opération, on pouvait penser que la surépaisseur était très importante. En améliorant la mesure on devait pouvoir diminuer les temps de fabrication aux étapes ultérieures. L'objectif n'était pas à proprement parler qualitatif mais économique.

Si un Palmer au centième de mm donne une erreur aussi importante, ce ne sera pas dans l'appareil qu'il faudra en chercher la cause, son principe étant simple et son maniement connu, mais dans son utilisation. Les caractéristiques mesurées doivent être revues. La fabrication se faisant par matriçage une première caractéristique importante est la quantité de métal. On sait que la pesée est une des façons la plus précise de l'estimer. De plus, elle permet de faire des moyennes sans calcul et sans erreur. Pour le déplacé, l'expérience montre qu'il est plus facile de l'apprécier à l'oeil qu'en le mesurant. ⁽¹⁾ La mise sous contrôle

(1) On assiste souvent à un développement plus rapide de l'appareillage métrologique que de l'analyse logique des résultats en fabrication.

de la fabrication a permis de diminuer du tiers le temps de l'une des opérations ultérieures.

3. ENLEVEMENT DE METAL PAR RODAGE

Après rectification, les chemins de roulement sont rodés de façon à améliorer l'état de surface. L'enlèvement de métal est de quelques microns. En mesurant 20 bagues avant, puis après super finition, l'écart des moyennes des cotes donne l'enlèvement de métal avec une erreur de mesure faible. Il a été trouvé un enlèvement de métal constant d'un jour sur l'autre, très peu variable d'une machine sur l'autre, à une exception près. Ces résultats sont signalés car ils sont contraires à ce que pensaient le personnel de fabrication pour qui l'erreur de mesure s'assimilait à une faute. Une formation systématique du personnel a été réalisée.

4. ETUDE DE LA LINEARITE DE CERTAINS APPAREILS DE MESURE

Un appareil de mesure mécanique donnant une réponse "au micron" ou plus précis, pose bien des problèmes. En particulier la non-linéarité de certains d'entre eux n'apparaît pas de façon évidente par mesure directe.

Dans le cas exposé ici, l'appareil mesure un chemin de bague extérieure ou intérieure de roulement à billes. La plage de mesure est de 40 microns, l'unité est le micron.

On prélève dans la fabrication courante 20 bagues peu ovalisées, se répartissant à peu près sur 40 microns. Elles sont mesurées sur comparateur ZEISS, évidemment linéaire, l'appareil étant dérégulé après chaque mesure et les pièces numérotées de telle façon que l'opérateur ne puisse prévoir leur cote.

Chaque valeur annoncée est entachée d'une erreur de moyenne nulle par définition. Repérées et mélangées, elles sont mesurées par un autre opérateur sur l'appareil à tester. Cette série de mesures a lieu 10 fois, les 20 pièces étant mélangées chaque fois. La différence entre la valeur moyenne x_i pour une pièce donnée, et la valeur y_i correspondante obtenue sur comparateur Zeiss suit une loi normale de moyenne quelconque et de dispersion indépendante de la mesure Zeiss s'il y a linéarité. On peut dire qu'il ne doit pas y avoir de liaison entre y_i et l'écart $(x_i - y_i)$. Des tests de corrélation de rang prouvent que dans bien des cas des appareils supposés linéaires ne le sont pas.

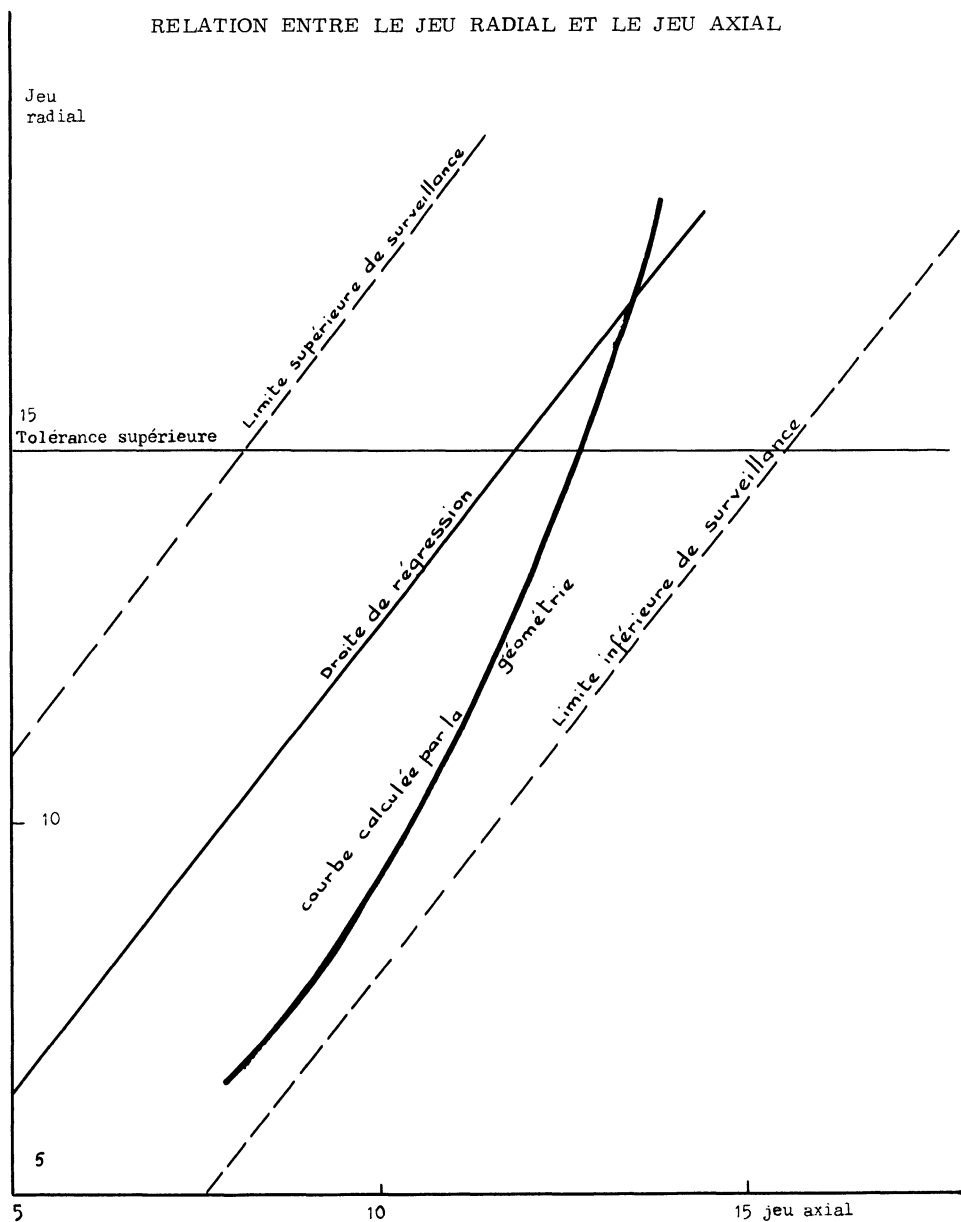
5. JEU AXIAL ET JEU RADIAL DES ROULEMENTS A BILLES

Le jeu radial seul est normalisé (ISO). Mesuré en microns l'intervalle de tolérance est 3 - 18 (pour une catégorie donnée) ; la tolérance intérieure à l'usine est 5 - 15 ⁽²⁾. Il fut retenu 5 - 15 pour 95 % des cas.

(2) L'habitude est très répandue dans les bureaux d'études de resserrer les tolérances.

La mesure du jeu radial est longue et délicate, impraticable autrement que par échantillonnage. Pour y remédier une correspondance géométrique avec le jeu axial avait été calculée et la mesure de ce dernier, plus simple, avait été substituée à celle du jeu radial. Le processus d'assemblage était le suivant : mesure et classement des bagues, classement des billes, montage, contrôle manuel du jeu axial, étalonnage périodique par un appareil de jeu axial. La proportion de jeux radiaux hors tolérance était de 30 %. Afin de réduire cette proportion on com-

Graphique n° 1
RELATION ENTRE LE JEU RADIAL ET LE JEU AXIAL



mença par améliorer la précision de la mesure des bagues, celles des billes étant correcte ; puis on étudia la liaison jeu radial-jeu axial mesuré (graphique 1) qui montra que la correspondance géométrique ne donne pas une bonne image de la réalité et que la dispersion liée était très forte, essentiellement due à l'erreur de mesure.

La mesure du jeu présente, soit des difficultés pratiques (jeu radial), soit des erreurs systématiques et aléatoires importantes (jeu axial). Il était judicieux d'améliorer le processus de montage, non celui de contrôle. La remise en ordre et la mise sous contrôle de la mesure des bagues a permis de faire passer la proportion de jeux radiaux hors tolérances à 5 % comme il avait été prévu. Cette proportion est suivie régulièrement par des prélèvements très réduits mais représentatifs.

Des remarques peuvent être faites :

1/ La normalisation ne résoud pas tous les problèmes de qualité. L'expérience de l'utilisateur montre qu'un jeu augmenté de quelques microns n'est pas nécessairement un inconvénient, ce qu'ont remarqué bien des fabricants. Il ne faut donc pas confondre "hors tolérances" et "défectueux".

2/ Les appareils de mesures précis sont délicats. Leur emploi permanent nécessite une surveillance technique poussée et un renouvellement fréquent, ce qui est coûteux.

3/ La mise sous contrôle permet d'améliorer la gestion de l'atelier tout autant que la qualité. Le montage avec une seule classe de bille a été rendu possible, de même que l'utilisation des classes immédiatement inférieures ou supérieures, au lieu de la classe prévue, sans rien modifier, ce qui a permis de ne plus fabriquer qu'une seule classe de billes au lieu d'une quinzaine et de récupérer sans inconvénient les billes à 1 micron au-dessus et au-dessous de la cote prévue.

6. ETUDE DES VIBRATIONS

Un roulement peut être bruyant de deux façons différentes : un corps métallique minime mélangé à la graisse produit des sifflements et l'usure prématurée. Des défauts de forme ou d'état de surface produisent des bruits "vibratoires" selon des fréquences différentes. Le bruit est un des problèmes les plus importants de l'industrie du roulement.

Il est nécessaire de bien préciser les éléments de ce problème.

1/ Bague extérieure, bague intérieure et billes sont évidemment toutes en cause puisque le bruit est une résultante des frottements des uns sur les autres.

2/ Le bruit vibratoire est "mesuré" par des appareils selon le principe suivant : la bague intérieure est entraînée à une vitesse définie ; la bague extérieure est fixe. Un palpeur en appui sur elle enregistre des vibrations qui sont amplifiées électroniquement et, au moyen de filtres appropriés, distribués selon trois bandes de fréquence correspondant à des écrans. La pratique habituelle consiste à trier la fabrication à la sortie des chaînes de montage.

Une observation attentive montre que la qualité semble satisfaisante à certains moments, défectueuse à d'autres. Il y a une variabilité dont la cause est intéressante à rechercher. Ce sera la ligne directrice.

La variabilité constatée provient-elle d'une des deux bagues ou des billes ou de deux ou trois de ces causes possibles ? On limitera l'étude à un numéro de grande série. En prélevant un nombre constant de bagues à la sortie de chaque machine pendant une période assez longue (deux semaines), en les repérant avec un crayon gras, en les montant avec des lots de billes différents, de telle façon que l'appairage se fasse au hasard, et en les mesurant après brassage sur appareil au bruit, de façon à neutraliser les variations périodiques possibles de cet appareil, on se trouve dans des conditions requises pour un jugement correct. On mesure les bagues après brassage de façon à neutraliser aussi tout déréglage éventuel de l'appareil de mesure en cote. En d'autres termes, l'erreur même systématique d'un appareil est peu grave et elle est indépendante du repérage des bagues ou des roulements à mesurer.

Une difficulté se pose : le processus normal prévoit le classement des bagues de 2 en 2 microns, et l'appairage avec une seule classe de billes comme il a été dit. Les populations de mesures des différentes rectifieuses de bagues n'étant pas superposables, les jeux risquent d'être liés aux rectifieuses, et indirectement aux bruits, une relation devant exister entre jeu et bruit. Le jeu a donc été mesuré pour chaque roulement.

Le plan d'expériences portait sur 1 800 roulements issus de 3 rectifieuses de bagues intérieures, 5 rectifieuses de bagues extérieures, 4 lots distincts de billes. L'ensemble des calculs de cette étude a été fait par calculatrice électronique.

1 Recherche des causes de variation de bruit vibratoire

Le tableau 1 permet d'analyser les résultats :

- d'après le lot de billes ;
- d'après la rectifieuse de bagues intérieures (B.I.)
- d'après la rectifieuse de bagues extérieures (B.E.)

TABLEAU I

Nombre de roulements	Billes	B. I.	B. E.	B. F.	M. F.	H. F.	Jeu
496	α			28,1	32,1	75,8	11,3
331	β			35,9	36,5	87,9	11,9
489	γ			27,7	31,2	75,1	11,7
498	δ			29,1	31,1	73,1	11,1
584		A		29,3	32,0	76,6	11,4
608		B		28,5	31,8	76,5	10,4
622		C		31,2	33,3	79,0	11,8
377			a	29,5	32,7	76,8	11,1
364			b	29,9	32,4	77,1	11,4
348			c	29,7	32,2	77,6	11,2
368			d	29,7	32,1	77,0	11,3
355			e	29,5	32,5	77,0	11,1

Les unités de basse fréquence (B.F.), moyenne fréquence (M.F.), et haute fréquence (H.F.) sont arbitraires. Les valeurs ne présentent d'intérêt que par comparaison entre elles.

Les jeux sont exprimés en microns.

α , β , γ , δ désignent des charges différentes de billes,
A, B, C, trois rectifieuses de bagues intérieures,
a, b, c, d, e, cinq rectifieuses de bagues extérieures.

On remarque :

- Des écarts de jeu radial trop faibles pour expliquer des différences importantes de bruit (comme on le verra plus loin). Ils peuvent provenir d'écarts de cotes de quelques dixièmes de microns entre lots de billes.

- Des résultats mauvais pour les billes B et pour les bagues intérieures C.

Le tableau 2 donne les distributions en nombre de roulements selon les billes et les bagues intérieures.

TABLEAU II

	α	β	γ	δ
Bagues intérieures				
A	115	75	167	226
B	284	43	159	122
C	97	213	163	150

Les caractères B et C sont-ils tous deux dûs à des différences réelles ou bien l'un des deux seul fait-il apparaître artificiellement l'autre en raison du nombre important (213) de roulements B C ?

En regroupant les billes α , γ et δ on obtient le tableau 3.

TABLEAU III

	$\alpha + \gamma + \delta$	β
Bagues intérieures		
A	508	75
B	565	43
C	410	213

Le tableau général 1 est ainsi ramené au tableau 4.

TABLEAU IV

	Basse fréquence		Moyenne fréquence		Haute fréquence	
	sans β	β	sans β	β	sans β	β
Bagues intérieures						
A	28,4	36,3	31,3	36,7	73,8	87,7
B	27,4	36,2	31,5	36,3	75,6	88,4
C	28,8	35,8	31,7	36,4	74,5	87,8

On voit aisément que la bille β donne de mauvais résultats dans les 3 bandes de fréquence. Par contre, pour les billes α , γ , δ ensemble, les valeurs moyennes sont acceptables et on ne constate pas d'écarts appréciables entre ces 3 machines.

De la même façon, les rectifieuses de bagues extérieures donnent des résultats comparables du point de vue pratique.

Une étude précédente avait montré que la dispersion moyenne de bruit par lot de billes était caractérisée par un écart-type $\sigma = 6,3$ en haute fréquence. L'erreur de mesure par un écart-type de $\sigma = 4,0$. On voit qu'une très grande partie de la dispersion des lots s'explique par l'erreur de mesure de l'appareil.

Une erreur de mesure importante ne rend pas inutilisable un appareil à la condition qu'il soit utilisé correctement. Le tri est contre-indiqué.

Il importe peu ici de tester des différences significatives, mais des différences pratiques. La difficulté n'est pas dans le test, mais dans le plan d'expérience réalisé dans l'atelier.

2/ Liaison entre le bruit vibratoire et la qualité des billes.

24 échantillons de 10 roulements ont été prélevés dans la production courante, représentant ainsi 24 jours de production. Il a pu se produire que la même charge de billes se soit présentée plusieurs jours de suite, diminuant l'information, mais ne biaisant pas les conclusions. Le bruit moyen a été noté et quelques billes des mêmes lots ont été envoyées pour examen. Les mesures de déformation et vibration n'ont rien donné. La mesure de l'état de surface s'est révélée peu précise. L'examen visuel de l'état de surface à la lampe binoculaire a, par contre, permis un classement.

Le tableau V montre avec évidence que l'examen à la loupe binoculaire des billes permet de prévoir les roulements silencieux et les roulements bruyants. Cette méthode est moins précise pour les roulements de qualité intermédiaire.

On peut donc prévoir le bruit d'un roulement par l'examen à la loupe binoculaire de ses billes.

Il ne restait plus qu'à remédier aux variations de qualité des billes, ce qui fût fait.

TABLEAU V

Appréciation du contrôle à la loupe binoculaire	Mesure du bruit moyen sur dix roulements	
	en haute fréquence	en basse fréquence
Qualité jugée bonne	56,6	22,0
	63,3	19,2
	39,8	17,8
	49,4	27,2
	50,6	24,4
	38,6	18,2
	37,0	20,8
	Moyenne générale : 47,8	Moyenne générale : 21,4
Qualité jugée passable	76,4	27,8
	58	22,4
	71,0	23,8
	68,2	30,0
	68,8	27,2
	71,2	24,8
	67,4	26,0
	63,4	29,0
	57,2	24,8
	65,8	27,6
	Moyenne générale : 66,7	Moyenne générale : 26,3
Qualité jugée insuffisante	70,6	27,8
	53,6	19,2
	74,2	24,0
	Moyenne générale : 66,1	Moyenne générale : 24,6
Qualité jugée défectueuse	78,8	37,8
	68,8	30,0
	70,8	28,0
	70,4	29,4
	Moyenne générale : 72,2	Moyenne générale : 31,3

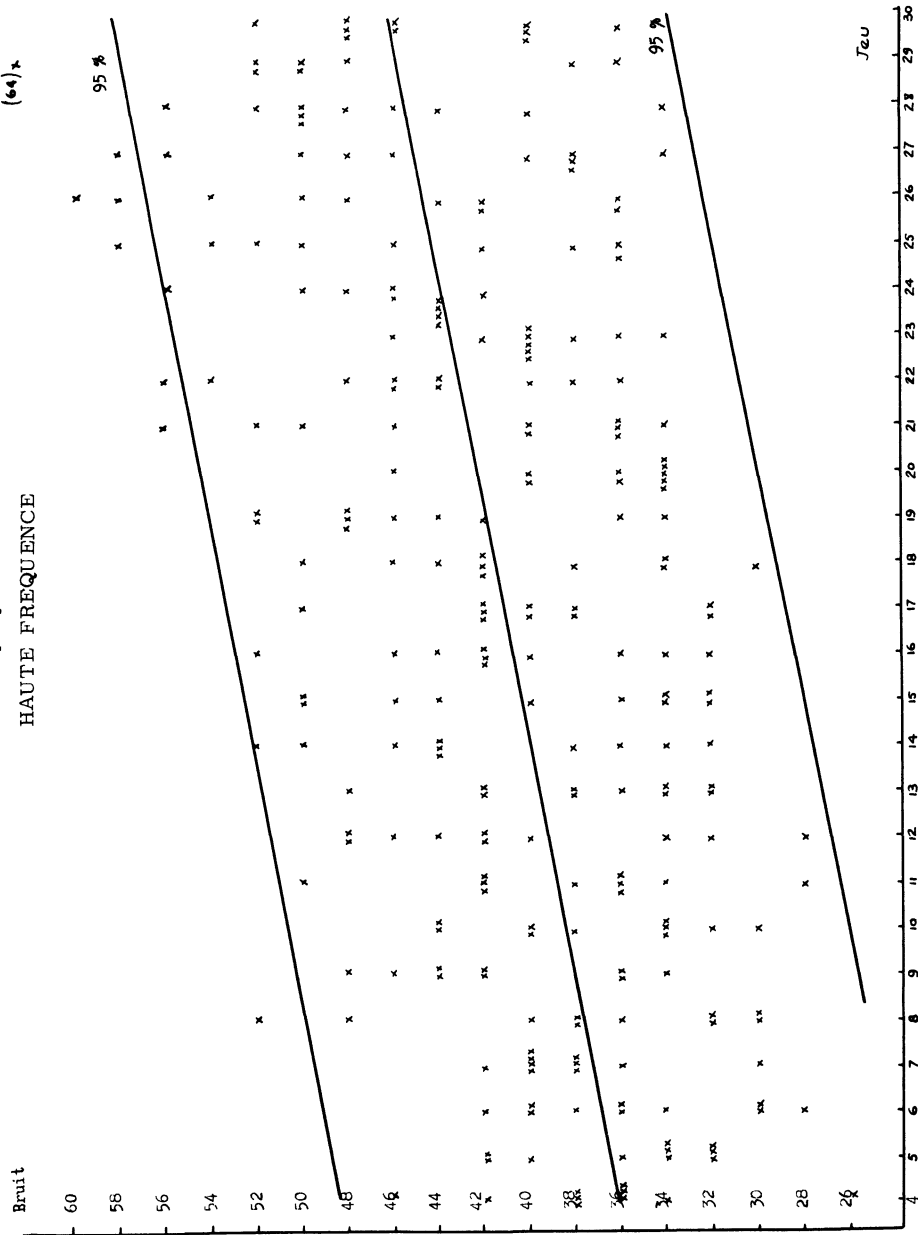
Le sujet a donné lieu à d'autres études statistiques. Les basses et moyennes fréquences sont liées par un coefficient de corrélation de 0,38 ; la moyenne et la haute fréquence par un coefficient de 0,30 ; la basse et haute fréquence par un coefficient de 0,26. Il s'ensuit que pour juger une qualité moyenne, un prélèvement convenablement mesuré en moyenne fréquence est suffisant. Pour juger un roulement particulier, il est par contre utile d'utiliser les 3 bandes de fréquence.

Les précédentes affirmations peuvent se révéler inexactes de temps en temps. Le "risque du client" doit être accepté en connaissance de cause.

Ce sont les méthodes et les moyens de fabrication dans leur résultat : l'objet fabriqué, qui sont mis sous contrôle, non les pièces produites une à une.

La liaison bruit-jeu a été trouvée linéaire, le bruit augmentant avec le jeu, ce qui n'est pas évident en raison de l'erreur de mesure très importante, traduite par une forte dispersion liée. On peut voir par le graphique II que le bruit moyen d'un roulement à jeu augmenté se trouve au-dessus de la limite admise pour les roulements dits silencieux. Un tri de ces roulements est sans signification physique car l'essentiel de la dispersion liée n'est pas entre roulements mais entre mesures.

Graphique n° 2
HAUTE FREQUENCE



CONCLUSION

On a pu voir dans les exemples précédents que dans tous les cas où l'observation est difficile et le jugement subjectif, le phénomène physique est masqué à l'examen direct. Seules des méthodes expérimentales utilisant les lois élémentaires mais très puissantes de la statistique peuvent les faire apparaître. On peut quelquefois éliminer la cause du défaut sans en avoir trouvé son origine. D'une façon générale, il faut se méfier des explications techniques rapides. C'est seulement en se fiant aux résultats chiffrés que l'on aura obtenus dans des conditions valables que l'on pourra progresser.

Il est également dangereux de vouloir faire du contrôle d'atelier sans avoir bien réfléchi sur sa signification. La caractéristique contrôlée n'est pas nécessairement celle qui présente le plus d'intérêt. L'étude motivée par des soucis de qualité peut déborder son cadre et affecter l'économie de l'atelier. L'expérience montre que les solutions apportées peuvent être utiles et participer au développement industriel.

"Suffit-il d'avoir de bons instruments, fruits d'une science raffinée, et de laisser leur emploi aux improvisations de l'empirisme ? N'y-a-t-il pas place pour une recherche scientifique appliquée non plus aux appareils, mais aux opérations elles-mêmes, aux actions et décisions des hommes qui emploient ces appareils ?⁽³⁾

L'appareillage de métrologie se développe très rapidement, mais bien souvent l'appareil est réalisé avant même que le problème de son emploi ait été résolu dans son ensemble. On s'intéresse encore rarement à ce que "donne" un appareil de mesure. On réalise des machines perfectionnées, et on établit en quelques instants des gammes d'opérations sur la foi de quelques mesures mal faites.

Les méthodes expérimentales de la Statistique et l'ensemble des tests fournissent les moyens de résoudre pour l'essentiel les problèmes que posent les mesures dans l'industrie.

(3) Préface de M. GUILBAUD au livre "La stratégie dans les actions humaines" de J.D. WILLIAMS.