

# REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

C. CONSTANT

**La méthodologie Taguchi : introduction à la  
recherche technologique - gestion fonctionnelle  
de la qualité ou gestion « off-line »**

*Revue de statistique appliquée*, tome 37, n° 2 (1989), p. 47-77

[http://www.numdam.org/item?id=RSA\\_1989\\_\\_37\\_2\\_47\\_0](http://www.numdam.org/item?id=RSA_1989__37_2_47_0)

© Société française de statistique, 1989, 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/>

# LA MÉTHODOLOGIE TAGUCHI INTRODUCTION A LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE GESTION FONCTIONNELLE DE LA QUALITÉ OU GESTION "OFF-LINE"

C. CONSTANT

*Ingénieur Qualité méthodologies dans le groupe PSA  
Professeur associé à l'Université de Technologie de Compiègne  
Professeur au CERESTA*

## RESUME

La méthodologie Taguchi permet de garantir la robustesse des fonctions d'un produit en agissant sur les paramètres influents de son processus d'élaboration compte-tenu de ses conditions d'utilisation.

Cet article développe cette méthodologie en insistant sur les étapes essentielles de la quête de la robustesse assurant le meilleur compromis performance/coût d'utilisation donc, la meilleure compétitivité du produit.

Une étude de cas relative à la fabrication du caoutchouc est détaillée à la fin de l'article.

*Mots clés : Robustesse, Fonction Perte, Cible, Tables Orthogonales, Coût d'utilisation.*

## Plan

1. Etude des paramètres.
  - 1.1 L'état d'esprit.
  - 1.2 La formalisation de l'objectif.
  - 1.3 La recherche des paramètres.
  - 1.4 L'utilisation des tables orthogonales et des graphes linéaires.
  - 1.5 Les analyses statistiques de la performance et de la robustesse.
  - 1.6 L'analyse graphique, la décision et la validation.
2. Etude des tolérances.
  - 2.1 Sur les caractéristiques fonctionnelles du produit.
  - 2.2 Sur les caractéristiques du processus.
  - 2.3 La gestion opérationnelle de la qualité.
3. Conclusions.
4. Etude de cas dans l'industrie automobile.

Les méthodes de plans d'expériences ont été mises au point à des fins de recherche scientifique et technologique. Le concept utilisé dans cette méthodologie peut être défini comme la détermination de relations de cause à effet.

Dans le *domaine scientifique* on essaie de trouver la loi unique, l'équation décrivant les relations des causes expliquant les phénomènes que l'on étudie. L'utilisation des modèles mathématiques est importante.

Dans le *domaine technologique* il existe de nombreuses façons d'aborder la fonction d'un produit. Bien souvent, les causes assurant la fonction recherchée sont trop coûteuses, ou bien les causes intervenant dans le processus de fabrication sont si nombreuses, si particulières, qu'il est impossible d'en imaginer les relations, donc une équation. Toute modélisation serait étrangement farfelue.

### *Exemple*

Un processus de moulage de pièces en fonderie, ou l'optimisation des milieux de culture en fermentation sont des cas de mise en équation impossibles. Donc, au niveau de la conception et de l'industrialisation d'un produit nous sommes condamnés à trouver la combinaison du processus qui nous assure la plus grande ROBUSTESSE, c'est à dire le produit le plus fiable en performance et en dispersion, au coût de fabrication le moins élevé. *Et cela sans se soucier des relations entre les causes, mais uniquement en analysant leurs effets.* (N'oublions pas que pour la pensée japonaise, la vérité est "vide" et que seuls les effets, suivant le principe bouddhique du cause-effet, nous sont accessibles).

C'est l'adoption de cette optique de robustesse dans les techniques de gestion fonctionnelle de la qualité qui assurera la compétitivité des entreprises.

## 1. Etude des paramètres

### *1.1. L'état d'esprit "Taguchi"*

La gestion de la qualité doit être abordée dans l'esprit d'une réduction au minimum du coût de la qualité en clientèle, la notion de client s'impliquant à toutes les étapes d'élaboration du produit, de la conception du prototype au service après-vente. (Etapes hautement organisées au Japon.). En fait, rien n'est plus condamnable que de gagner 1 F, si cette somme fait perdre 100 F au client, car globalement il y aurait perte!

Pour cela deux attitudes :

#### *a) Privilégier la satisfaction du client*

Cette satisfaction doit être assurée, absolument, avec le maximum de robustesse, et au moindre coût pour le fournisseur. La réduction des coûts ne s'entend que lorsque la satisfaction du client est assurée.

### *b) Privilégier le préventif*

Ne commençons pas à réfléchir quand tout va mal ! Les américains ont développé de nombreuses méthodologies de “résolution de problèmes” dans les années 1970, pendant que les japonais n’avaient de cesse d’appliquer des outils très en-amont dans la vie du produit, telle la méthodologie Taguchi, des outils d’aide à la conception, pour réduire les coûts engagés.

Valorisons celui qui fait qu’une panne ne se produit pas, et pas seulement celui qui répare en un temps record !

## *1.2. La formalisation de l’objectif*

### *a) La définition*

Définir les fonctions du produit, que l’étude des paramètres doit nous permettre d’assurer.

Cela suppose :

- Une analyse des besoins du client.
- Une traduction adéquate de ces besoins en terme de fonctions.

La méthode Q.F.D (Déploiement des Fonctions Qualité) nous y aide et facilite l’élaboration du cahier des charges fonctionnel (AFNOR X50 - 151) préluce obligatoire d’une démarche Taguchi.

- Une “solution” technique du produit et du processus que l’on va tester.

### *b) La mesure*

Chacune des fonctions principales, ou de contraintes, sera représentée par une mesure que l’on jugera statistiquement la plus représentative.

- grandeur physique continue ou discontinue.
- pourcentage.
- absence/présence.
- classement.
- codage ... etc ...

*La précision* sur la mesure doit être connue pour éviter toute interprétation spéieuse des effets dans l’étape d’analyse. Après la détermination, cette étape représente la *caractérisation des fonctions*.

*c) La cible*

Nous préciserons, enfin, la cible visée pour chaque fonction :

Soit :

- un nominal
- un maximum
- un minimum

*Exemple*

- a') Un pare-chocs pour un véhicule assure principalement la fonction "sécurité" pour le client.
- b') Cette fonction est caractérisée par les mesures suivantes :
- . résistance au choc à - 30°C et 23°C (en Newton).
  - . énergie à la rupture à - 30°C et 23°C (en Joules).
  - . énergie à la force maximum à - 30°C et + 23°C (en Joules).
  - . résistance à la traction (en Mpa).
- c') Toutes ces mesures sont visées au maximum.

**1.3. La recherche des paramètres***a) Le travail en groupe*

Les représentants de tous les services impliqués par l'étude devront répondre à la question suivante : "Quels sont les paramètres pouvant avoir une influence sur les fonctions à assurer ?". Le savoir faire et les échanges constructifs des participants faciliteront cette recherche étant entendu qu'un groupe au travail est une mise en commun d'énergies différentes pour que l'étude aboutisse et non pas un "tir à boulets rouges" pour "démontrer" que cela ne marchera pas !

Le choix de l'animateur sera déterminant sur la qualité de motivation du groupe, donc sur la qualité de l'étude.

*b) La liste des paramètres*

Trois sortes principales de paramètres peuvent être retenues :

- des paramètres de formulation ou de matière  
(ex : Stamyran P83 MF 94 - polypropylène)
- des paramètres du processus  
(ex : vitesse d'injection de la matière dans le moule)

- des paramètres de bruit, d'utilisation, subis par le produit au cours de son utilisation (facteurs externes ou facteurs internes)  
(ex : température ambiante (externe))  
[les facteurs "blocs" seront traités comme des paramètres du processus]  
(ex : deux lignes de fabrication).

### *Remarque*

Le diagramme *cause-effet* d'Ishikawa, ou "arête de poisson" est utile dans cette phase de réflexion ouverte. (CREATIVITE) enrichissante pour l'animateur du groupe.

Les nouveaux outils de gestion de la Qualité (les diagrammes par affinités, relationnel, de l'arbre, matriciel, à flèches), facilitent cette étape dans les cas complexes.

### *c) Le choix des paramètres de l'étude*

Les paramètres dépendants seront, en premier lieu, regroupés. Seuls les paramètres contrôlés, jugés les plus intéressants seront retenus dans les limites de l'étude.

### *Remarques*

Pour cela une note d'"intérêt", de 1 à 5 par exemple, de chacun des membres du groupe sur chaque paramètre de la liste, peut permettre de sélectionner, en accord, les paramètres de l'étude. Les paramètres non retenus seront mentionnés et maintenus constants au cours des essais.

Une analyse multidimensionnelle des données serait également un outil préalable de choix pour cette sélection.

### *d) Le choix des niveaux ou modalités des paramètres retenus*

- Le savoir faire
  - Les normes à respecter
  - La durée des essais
  - La faisabilité
  - Le coût des essais
  - La mise en oeuvre des niveaux
  - L'appréhension d'effets non linéaires
  - La curiosité technologique ... etc
- conditionnent le choix et les nombres des niveaux.

Les études les plus fréquentes portent sur 2, 3, et 4 niveaux par paramètre. Ce choix est extrêmement important car il fixe *les limites de l'étude*.

*e) La question des interactions*

Il est utile pour réduire le nombre d'essais à réaliser, de répondre à la question suivante : "quelles sont les interactions à prendre en compte prioritairement?". Ce sont souvent les interactions entre paramètres de formulations et de processus.

*Remarque*

Si toutes les interactions sont potentiellement intéressantes, il faudra faire un plan d'expérience complet.

*f) Le nombre d'essais*

A ce stade, le nombre d'essais obligatoires à réaliser, avec ou sans répétitions doit être défini.

*g) Le coût des essais*

Le chiffrage du coût des essais, l'investissement représenté par le plan d'expérience est une base d'accord pour mener jusqu'au bout l'étude et pouvoir en attendre toute son efficacité.

*h) La liste des paramètres non retenus*

Les paramètres non retenus seront listés pour s'assurer, au cours des essais, qu'ils seront bien maintenus constants.

**1.4. L'utilisation des tables orthogonales et des graphes linéaires**

Avec l'utilisation des tables orthogonales et des graphes linéaires pour planifier les essais nous entrons dans une phase plus technique qui nous permettra de concevoir des essais statistiquement analysables et non plus de s'interroger après coup, donc vainement, sur des résultats.

*a) Le choix de la table*

Taguchi propose des tables orthogonales où chaque colonne représente les niveaux des effets que l'on désire analyser.

Les plus utilisées sont les tables :

$L_8(2^7), L_{16}(2^{15}), L_{32}(2^{31}), L_{12}(2^{11})$  à 2 niveaux

$L_9(3^4), L_{27}(3^{13})$  à 3 niveaux

$L_{18}(2^1x3^7), L_{36}(2^{11}x3^{12})$  à niveaux différents

ou les tables mixtes à 2 et 4 niveaux facilement batissables. (Voir étude de cas, §4).

*b) L'affectation des colonnes*

Chaque paramètre retenu sera affecté dans une colonne. Les deux seules contraintes dans cette affectation sont :

- les interactions choisies a priori dans la recherche des paramètres.
- la difficulté (opératoire ou financière) de modifier les niveaux d'un paramètre.
- Les graphes linéaires, résumant les relations combinatoires entre les colonnes nous aident pédagogiquement à repérer les interactions et à affecter les paramètres.

(Deux points symbolisent deux paramètres, le trait les joignant symbolise l'interaction entre ces deux paramètres).

Si un paramètre est difficilement modifiable je l'affecterais, si possible, dans le groupe 1 qui ne varie qu'une fois de niveau. Les groupes étant classés par ordre croissant de changements de niveaux si l'on respecte l'ordre établi des essais.

**Exemple**

On désire tester 4 paramètres à 2 niveaux  $A, B, C, D$  et les interactions  $AB$  et  $BC$  :  $A$  est difficilement modifiable et  $D$  est un facteur "bloc". L'étude demande 6 degrés de liberté ; on choisit la table  $L_8$  et le graphe linéaire donné sur la figure 1.

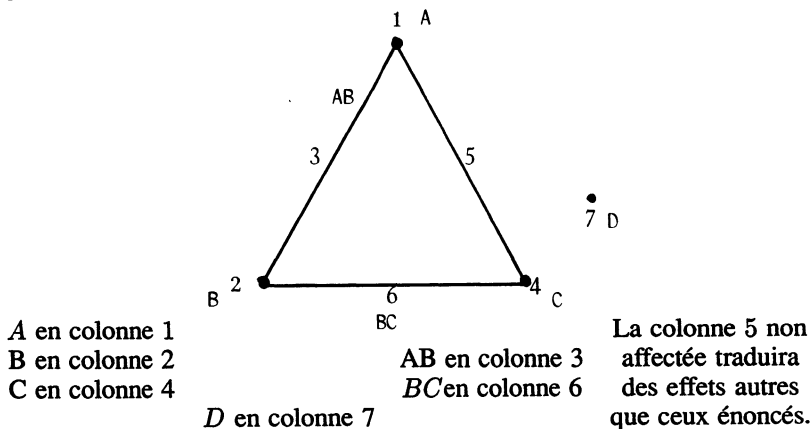


FIGURE 1



c) La prise en compte des facteurs de bruit externes

L'originalité de Taguchi préconise de ne pas faire de répétitions de façon aléatoire, mais de planifier ces répétitions en fonction de paramètres subis par le produit au cours de son utilisation ou facteurs nes. Cette planification est astucieuse à deux titres :

1. Elle nous permettra de tester également l'influence des facteurs externes ainsi que des éventuelles interactions facteurs externes et paramètres du processus.
2. Elle nous permettra de tester les paramètres du processus dans la plus large plage d'utilisation du produit illustrée par les niveaux des facteurs externes, donc de mieux assurer la satisfaction du client.

\* La planification des facteurs de bruit externes

Il suffit à partir du plan orthogonal choisi, comportant des paramètres du processus ou de formulation du produit, de croiser un autre plan orthogonal, comportant des facteurs externes suivant l'exemple ci-dessus, et comme nous le verrons dans l'étude de cas n° 2.

**Exemple de plan croisé**

Exemple de plan croisé :

**Plan Principal**  
 $L_8(2)^7$

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

G	1	2	2	1
F	1	2	1	2
E	1	1	2	2

Plan externe

$y_{11}$	$y_{12}$	$y_{13}$	$y_{14}$
$y_{21}$	$y_{22}$	$y_{23}$	$y_{24}$
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮

**Plan croisé**  $L_8(2)^4 \times L_4(2)^3 = 32$  essais

Bien entendu ce plan croisé multiplie, par 4 le nombre d'essai, mais la prise en compte dans l'analyse des facteurs d'utilisation (profil de mission ou plage d'utilisation) ne vaut-elle pas cela ?

### *Exemple de facteurs externes*

La température ambiante, la propreté, le taux de poussières,... l'hygrométrie, les contraintes subies, les préchauffages, ... l'hétérogénéité des lots de matières premières avant les lancements,... etc

\* La planification des facteurs de bruit internes

Elle est également possible et identique à celle des facteurs externes. C'est la nature des facteurs subis qui diffère, comme l'usure, la corrosion, l'encrassement ... La prise en compte de tels paramètres vaut pour assurer la *fiabilité* des fonctions étudiées.

#### *d) Les alias*

Les *plans fractionnaires orthogonaux* utilisés par Taguchi, s'ils permettent d'analyser un plus grand nombre de paramètres que les plans complets, requièrent toutefois certaines précautions dans l'analyse.

Chaque effet, principal ou interaction, sera confondu avec un ou plusieurs effets alias cumulés. De même, une colonne laissée libre, ne le sera qu'en apparence, car des effets alias non choisis a priori s'y manifestent obligatoirement. Il serait donc aventureux, lorsque l'expérimentation est complexe, de fixer par avance dans quelle colonne se manifesterait le résidu.

Le résidu perturbant également chaque colonne, mon attitude consiste à estimer sagement et a posteriori, la variance résiduelle grâce aux colonnes à faibles inerties (somme de carrés).

### *1.5. Les analyses statistiques*

#### *a) La rigueur des essais*

Le plan choisi doit être respecté absolument en nombre d'essais et en choix des niveaux, et ne supporterait pas des modifications de dernière minute. Les paramètres non pris en compte seront maintenus constants. L'analyse statistique ne sera possible qu'une fois tous les essais réalisés. (N'arrêtons pas au deuxième essai sous prétexte qu'il est satisfaisant, nous perdrons tout le bénéfice du plan ).

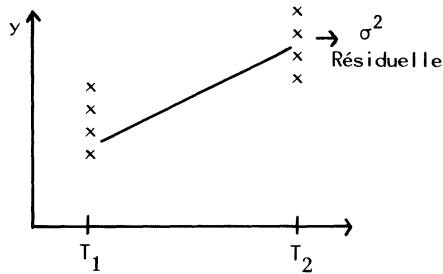
#### *b) L'analyse de variance régulière*

La méthode de l'analyse de variance suppose, pour un maximum d'efficacité deux hypothèses :

- La Normalité de la variable étudiée,
- L'Homoscédasticité ou égalité des variances résiduelles.

Le test de Fisher-Snédecor utilisé porte sur des dispersions de valeurs moyennes et nous permet de mettre en évidence essentiellement deux types d'effets.

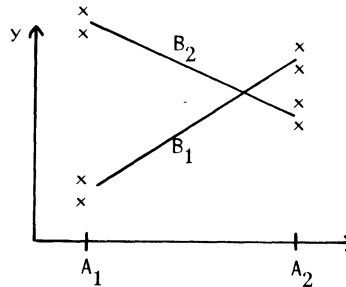
### 1. Effet principal d'un paramètre



$$\sigma_{T_1}^2 \text{ (résiduelle)} \approx \sigma_{T_2}^2 \text{ (résiduelle)}$$

Un tel facteur qui agit sur la tendance nous permettra d'agir sur la performance de la fonction, il sera dit : *facteur signal*.

### 2. Effet d'une interaction



Seule une analyse globale, comme celle des plans d'expérience, où l'on fait varier plusieurs facteurs en même temps permet de mettre en évidence des effets d'interaction.

La méthode du "un facteur à la fois" est dépassée pour un tel effet.

Les interactions nous permettront aussi d'agir sur la performance de la fonction .

### Remarque

Certaines variables étudiées (proportions, classements, notations..) nécessitent des précautions de transformation pour stabiliser la variance et donc pouvoir être analysées par le test de Fisher-Snédecor. (Cf : "Aide-mémoire pratique des

techniques statistiques” - CERESTA) :

$$\begin{aligned} y &= \arcsin \sqrt{x} && \text{pour une variable de type binomial} \\ y &= \sqrt{x} && \text{pour une variable de type "Poisson"} \\ y &= x^a \text{ ou } a^x && \text{pour une variable de type "échelle de notation"} \end{aligned}$$

c) *Le ratio signal sur bruit*

1. *But*

- Analyser la dispersion autour de la cible visée.
- Agir sur les paramètres qui nous garantissent une dispersion minimale autour de cette cible pour assurer la ROBUSTESSE de la fonction.

2. *Pourquoi ?*

La performance moyenne d'une fonction n'est pas suffisante si l'on n'assure pas aussi la *variabilité minimale* quelle que soit la plage d'utilisation du produit.

3. *Comment ?*

Par l'analyse de variance d'une variable transformée prenant en compte la *variance autour de la cible visée*. Cette nouvelle variable est issue, par analogie, du ratio signal sur bruit exprimé en décibels qui traduit, en acoustique, l'effet de l'intensité d'un signal compte tenu du bruit.

Taguchi identifie le *bruit* à la variance résiduelle de la variable étudiée ( $Y$ ) quelle que soit sa nature et nomme ratio signal sur bruit les transformées suivantes :

- Si l'on vise la fixation d'un nominal

$$S/B = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{S^2}$$

(avec  $S^2$  estimation de la variance résiduelle pour chaque essai)

- Si l'on vise un minimum ( $y \rightarrow 0$ ) (cible théorique zéro)

$$S/B = -10 \log \frac{1}{n} \sum (y_i - 0)^2$$

( $n$  = nombre de répétitions)

- Si l'on vise un maximum ( $\frac{1}{y} \rightarrow 0$ ) (cible théorique zéro)

$$S/B = -10 \log \frac{1}{n} \sum \left( \frac{1}{y_i} - 0 \right)^2$$

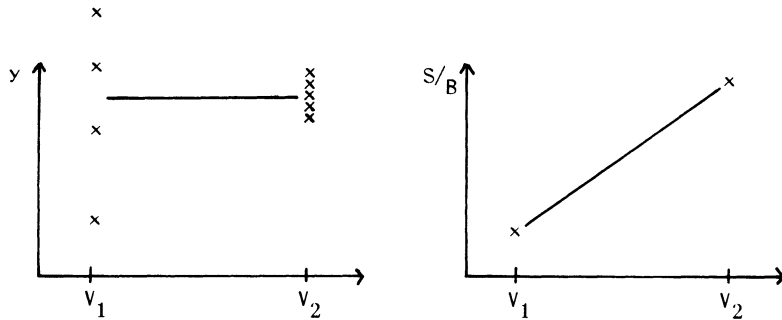
Choisir dans tous les cas le ratio signal sur bruit *maximum* c'est rendre la variance minimale autour de la cible visée et assurer la robustesse de la fonction.

*Remarque*

Le logarithme est là pour amplifier les écarts se rapprochant de la cible théorique visée.

*d) L'analyse de variance du ratio signal sur bruit*

Cette deuxième analyse met en évidence les effets significatifs sur la variabilité par rapport à la cible visée. Un paramètre non significatif sur l'analyse de variance régulière et devenant significatif sur l'analyse de variance du ratio  $S/B$  sera dit : facteur contrôle.

*Exemple*

Un tel facteur (V) sensible au bruit nous permettra d'agir sur la robustesse de la fonction.

*Remarque*

L'analyse de variance du ratio  $S/B$  s'effectue en regroupant les variances résiduelles du plan principal (pooled error) car les répétitions participent à la transformation du ratio  $S/B$ .

**Résumé sur les analyses de variance du plan d'expérience**

Avant l'expérience était analytique (on essayait de voir si un facteur A influait sur Y). Maintenant elle est synthétique; on ne voit pas les effets, ce sont les calculs ou les graphiques qui vont nous montrer globalement s'il y a effet ou pas. Déterminer les paramètres significatifs, c'est la seule façon de gérer la complexité des phénomènes, de la rendre plus intelligible et de "gagner" sur l'aléatoire, l'essentiel étant de réduire les dispersions autour de la cible visée.

## **1.6. L'analyse graphique, la décision et la validation**

### **a) Les graphiques**

– Pour l'interprétation des effets

Les graphiques de tous les effets significatifs sont l'outil indispensable pour faciliter l'interprétation du plan, surtout si l'on a plusieurs fonctions ou plusieurs réponses à analyser sur un même produit.

– Pour les Cercles de Qualité

L'analyse graphique directe à partir du plan orthogonal standard  $L_8$  est une simplification de la démarche Taguchi utilisable dans les cercles de Qualité, comme un huitième outil de la Qualité.

Cette simplification dans la forme est pour nous, entreprises, un enjeu considérable à ne pas manquer, pour "industrialiser" la méthode et gagner.

### **b) La décision**

Compte tenu des analyses, des objectifs de performance, de la robustesse, des coûts, de la faisabilité... nous décidons d'une combinaison optimale des paramètres du processus, valable pour toutes les fonctions.

#### **Remarque**

Les facteurs externes n'entrent pas dans cette combinaison sauf cas particulier de détermination d'une procédure d'essais accélérés.

### **c) La validation**

Un échantillon d'essais, tiré au voisinage des conditions optimales, permettra par un test de Student sur les valeurs moyennes de valider la décision. La confirmation s'opérant évidemment en phase de fabrication où la méthodologie Taguchi aidera à ajuster la production et améliorer la productivité. (Les applications sur le terrain font toujours autorité).

### **Résumé de l'étude des paramètres**

Pour avoir un produit robuste et compétitif :

1. Nous agissons sur les facteurs "signal" pour assurer la performance moyenne visée de chaque fonction.
2. Nous agissons sur les facteurs "contrôle" pour maintenir les variations de chaque fonction au minimum vis à vis des facteurs externes ou facteurs d'erreur.

## 2. Etude des tolérances

*“La qualité est la perte infligée à la société à partir du moment où le produit quitte l’usine”* - Genichi Taguchi.

Le but de cette étude très importante est de réduire le coût total de fabrication et d’utilisation du produit en assurant la variation des caractéristiques fonctionnelles à l’intérieur des spécifications. La robustesse de la fonction sera impérative.

### 2.1. Sur les caractéristiques fonctionnelles du produit

#### a) La définition d’une fonction “Perte”

Partant de l’hypothèse non réfutable que la satisfaction du client est totale pour la valeur nominale et que le coût de non-qualité est dans ce cas nul, Taguchi développe une fonction Perte (approximation de série de Taylor), traduisant par un coût de non-qualité tout écart au nominal.

\* Cible nominale

avec :  $N$  = valeur nominale  
 $y - N$  = écart par rapport à la satisfaction du client  
 $L(y)$  = perte engendrée par l’écart  $(y - N)$

alors 
$$L(y) = K(y - N)^2$$

ou 
$$L(y) = K. [(\bar{y} - N)^2 + S^2]$$

↓ écart hors cible      ↓ écart résiduel(bruit)

*Remarque*

Le coefficient  $K$  est fixé par les conditions aux limites suivantes : soit  $\delta$  l’écart-limite qui entraîne le rebut du produit, soit  $R$  le coût engendré par ce rebut chez le client, on a :

$$R = K.\delta^2 \text{ ou } K = \frac{\text{coût du rebut pour le client}}{\delta^2}$$

Ce coefficient  $K$  dépend des conséquences financières d’un écart à la valeur nominale entraînant le rebut. Il est fondamental pour appliquer le concept de la fonction “Perte”.

\* Cible y minimum

$$L(y) = K. [(\bar{y})^2 + S^2]$$

\* Cible  $y$  maximum

$$L(y) = K \cdot \left[ \frac{1}{\bar{y}^2} \left( 1 + 3 \frac{S^2}{\bar{y}^2} \right) \right]$$

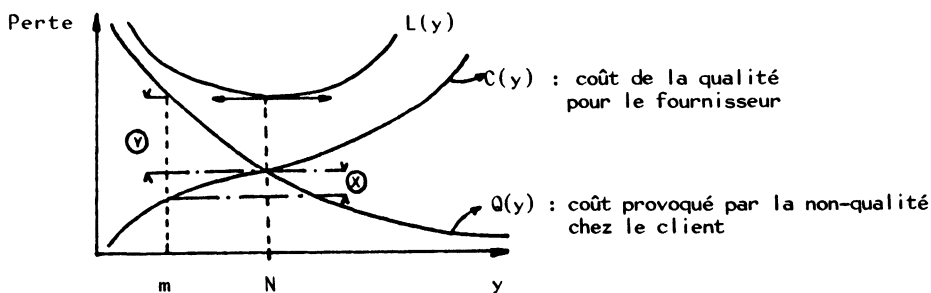
*Remarque importante*

La fonction "Perte", liée au bruit, dépend de la robustesse de la combinaison choisie.

*b) La fixation des limites de tolérance sur les caractéristiques fonctionnelles*

A partir de la conception continue de la non-qualité illustrée par la fonction "Perte", Taguchi fixe les limites de tolérance telles que le coût de non-qualité engendré chez le client soit égal au gain supposé ou effectif du fournisseur.

*Exemple*



On aura donc :

$$\delta_T = \sqrt{\frac{G}{R}} \cdot \delta$$

Tolérance

$G$  = gain du fabricant correspondant à l'écart  $\delta$

Si un fournisseur nous livre une qualité centrée en moyenne  $m$ , le coût de fabrication pour le fournisseur est diminué de  $X$ , et la perte subie par le client est  $Y$ . (Si  $y > X$  globalement il y a perte!).

*Remarque*

Cette étude oblige les bureaux d'étude à fixer les tolérances par le coût de non-qualité qu'elles entraînent chez le client et non pas "a priori" ou de manière standard.



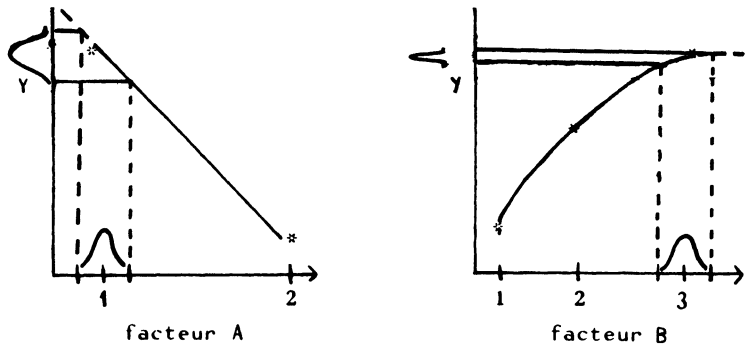
## 2.2. Sur les niveaux des paramètres du processus

Les niveaux des paramètres du processus choisis après l'étude des paramètres sont considérés comme valeurs nominales.

### *Utilisation de la non-linéarité pour déterminer les limites de tolérance des paramètres du processus*

Les spécifications déterminées sur les paramètres du processus seront telles que les caractéristiques fonctionnelles soient respectées dans tous les cas et que leurs variabilités soient minimales.

Observons ces deux graphiques :



Les niveaux  $A_1$  et  $B_3$  sont les valeurs nominales. Les fluctuations de  $A_1$  et  $B_3$  entraînent des fluctuations très différentes sur la caractéristique  $Y$ . Les spécifications sur  $A_1$  et  $B_3$  seront déterminés en fonctions de ces fluctuations. De même, nous fixerons les spécifications sur tous les paramètres du processus, de manière à minimiser la variabilité sur  $y$ , en soulignant tout le bénéfice que l'on peut tirer d'un effet non linéaire. La justification d'investissements (en KF) judicieux en sera facilitée.

Avec la détermination rationnelle des tolérances pour réduire le coût de la non qualité chez le client, s'achève la gestion fonctionnelle de la Qualité.

## 2.3. Sensibilisation à la gestion opérationnelle de la qualité

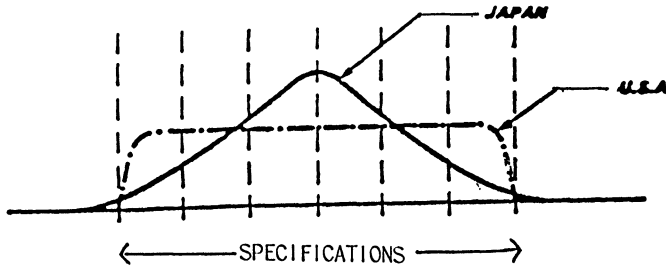
### *a) L'importance du nominal*

L'intervalle de tolérance a souvent été considéré en Occident, de manière uniforme rendant les limites supérieures et inférieures plus importantes que la valeur nominale.

Les résultats de cette conception "pass and fail" ont été :

- Un nombre de rebuts trop important pour la marche vers le zéro défaut.
- Beaucoup de produits loin du nominal !

### Comparaison des méthodes de contrôle de fabrication en Occident et au Japon



- Moins de rebuts au Japon.
- Plus de produits proches du nominal au Japon.

Cela est dû, côté occidental, à l'utilisation des coefficients  $C_{am}$  et  $C_{ap}$ ,<sup>(1)</sup> calculés sur l'intervalle de tolérance et négligeant la valeur nominale de la fonction, pour analyser les "capacités" des moyens et des procédés de fabrication.

#### b) Utilisation du coefficient $C_{pk}$

Le  $C_{pk}$  (sur une caractéristique dimensionnelle) prenant en compte la distance au nominal est nécessaire pour la gestion opérationnelle de la qualité. Il est défini par sa distance aux limites de tolérance :

$$C_{pk} = \text{minimum entre } \frac{T_s - \bar{x}}{3\sigma} \text{ et } \frac{\bar{x} - T_i}{3\sigma}$$

$T_s$  et  $T_i$  = Tolérances supérieure et inférieure.

$\sigma$  = écart type calculé du processus de production.

Le graphique de la fonction perte est donnée à la page suivante.

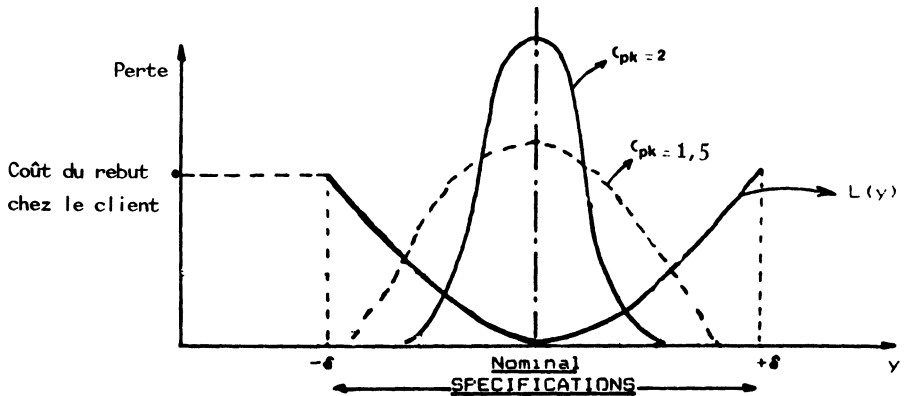
### 3. Conclusions

#### a) Domaines d'application

La méthodologie Taguchi est valorisante, elle demande des idées, des échanges, du savoir-faire et s'applique prioritairement à la conception et au développement des produits. En fabrication elle doit être utilisée comme outil de résolution de problèmes associant le personnel de fabrication aux impératifs

<sup>(1)</sup>  $C_{am}$  et  $C_{ap}$  désignent respectivement le coefficient d'aptitude machine et le coefficient d'aptitude procédé définis par FORD (cf normes AFNOR).

### Graphique de la fonction perte



d'amélioration de la rentabilité. La preuve de son efficacité, par les faits, plutôt que par des théories, convainc le monde de la production. Elle nous permet donc de réduire les coûts engagés dans toutes les phases d'élaboration du produit et de réduire le Prix de Revient Fabrication.

#### b) Les moyens d'application

Les entreprises doivent se donner l'organisation et les moyens suffisants pour multiplier cet outil indispensable.

Des structures-relais :

1. En nommant des spécialistes sachant conseiller et développer la méthodologie.
2. En formant des animateurs compétents sachant activer et utiliser l'énergie des groupes de travail pour donner toute son efficacité à la méthodologie.
3. En initiant tous les membres des groupes de travail aux objectifs et conditions de mise en place de la méthodologie.
4. En évitant des applications isolées, des "feux de paille" sans lendemains, en dehors de toute stratégie de Maîtrise Totale de la Qualité.

#### c) Le plaisir d'appliquer ou la motivation

Beaucoup de groupes de travail ont été motivés par le fait de rendre plus clair un processus complexe, de le rendre prévisible, d'avoir la sensation de "déchiffrer les secrets sombres des choses" sans mathématique, seulement par l'observation des expériences. Cette approche nous éloigne à coup sûr du Taylorisme.

#### d) Les développements futurs

Nous pouvons imaginer la création de systèmes experts pour une utilisation plus large de la méthodologie par simulation, toujours dans le but de réduire la variabilité des fonctions et de réduire les coûts. Les méthodes d'analyse et

d'expression fonctionnelle des besoins sont condamnées à se développer en amont car un produit techniquement au point doit aussi pour être compétitif répondre parfaitement au besoin du client.

**Le Japon ne nous-a-t-il pas, tout simplement, fait découvrir que le client existait ?**

#### 4. Etude de cas : Mise au point du processus de fabrication du caoutchouc pour des garnitures de portes chez Automobiles Citroën

##### a) L'objectif

Garantir sur le modèle les fonctions caractérisées par :

- la fermeture de porte
- l'étanchéité
- l'aspect

Les conséquences négatives sur ces 3 points sont :

- difficultés pour fermer la porte
- infiltration de l'eau de pluie
- aspect "peau de crapaud" des garnitures

résultat : l'insatisfaction du *client*

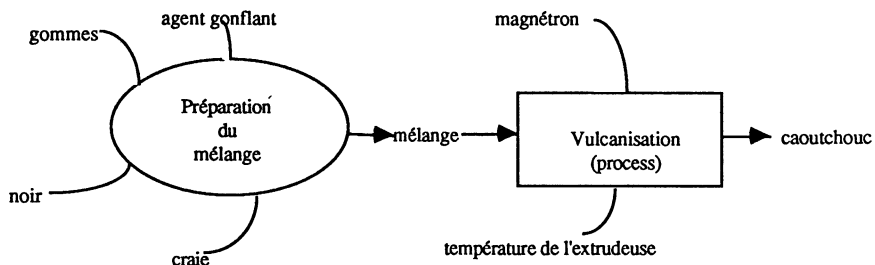
##### b) La mesure de l'objectif

Les critères fonctionnels utilisés sont :

1. la mesure physique de la *densité* (cible : 0,4 - 0,6)
2. le pourcentage de *perte de portance* (cible : < 50 % )
3. une note d'*aspect* de 1 à 5 (cible : 1 ou 2)

##### c) La recherche des paramètres

#### 1. Description de l'opération de fabrication (diagramme cause-effet)



## 2. Paramètres retenus

A = agent gonflant (4 niveaux) 1  
2  
3  
4

B = gommes 1  
2

C = noir 1                      D = craie 1  
2                                      2 (quantités)

E = température 1      F = puissance 1  
extrudeuse 2              magnétron 2

Cette recherche des paramètres est la partie *essentielle* de l'expérimentation. Nous l'avons effectuée en groupe de dix personnes, de tous les services *impliqués* dans le processus de fabrication.

## d) L'expérimentation

Nous avons utilisé une table orthogonale de type  $L_{16}$  nous permettant de tester les 6 paramètres retenus ainsi que les interactions suivantes : F/B, C/F, F/E, B/E, F/D. Deux colonnes restent pour l'estimation de la variance résiduelle. L'affectation des paramètres dans les colonnes de la table se fait à l'aide des *graphes linéaires*, ainsi que la *création* d'une colonne à 4 modalités pour le paramètre A. Les 4 niveaux de la colonne du facteur A, correspondent aux 4 combinaisons des colonnes 5, 11, 14.

Nous remarquons (cf. tableau du haut, p. 68) beaucoup de "mauvais" résultats. Il est parfois difficile de convaincre certaines personnes que l'on va forcément faire de la mauvaise qualité dans le cadre du plan d'expériences.

## Analyse du ratio Signal/Bruit

	S.C	ddl	F		
F	2,29	1	2,29		F(1, 8, 10%)
C	4,125	1	4,12	*	= 3,46
FD	8,81	1	8,81	**	
E	3,88	1	3,88	*	F(3, 8, 5%)
A	85,8	3	28,6	***	= 4,07
RESIDU	8,53	8			

Les facteurs significatifs sur le rapport S/B sont :

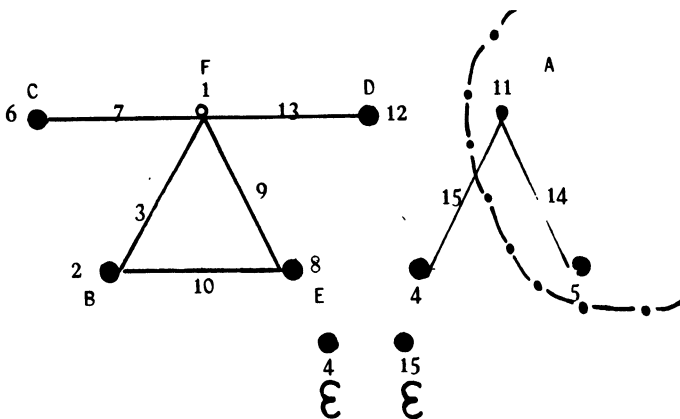
A, F/D, C, E.

Le facteur E apparaît naturellement comme un facteur *contrôle* !

TABLEL<sub>16</sub>

Colonnes	F	B	F/B	$\epsilon$	.	C	C/F	E	F/E	B/E	.	D	F/D	.	$\epsilon$	A	
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	5,11,14	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	3	
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	4	
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	4	
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	3	
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	4	
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	3	
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	3	
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	4	
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	
Groupes	1	2	3			4											

GRAPHIQUE LINEAIRE DU TABLEAU L<sub>16</sub>



Nombres d'essais réalisés : 16  
les essais

les résultats

N°	DENSITE	ASPECT	PERTE DE PORTANCE %(7j à 85°C)
1	0,41	4	-95
2	0,66	3	-81
3	0,70	2	-37
4	0,80	2	-64
5	0,44	4	-93
6	0,50	5	-85
7	0,91	2	-54
8	0,74	2	-39
9	1,05	1	-65
10	0,91	2	-52
11	0,62	3	-85
12	0,47	4	-88
13	0,75	2	-66
14	0,74	3	-51
15	0,36	4	-95
16	0,81	3	-88

### ANALYSE DE LA DENSITE

#### a) Analyse de la variance

Analyse régulière avec regroupement du résidu (pooled error)<sup>(1)</sup>

	S.C	ddl	F		
F	0,0189	1	3,93	*	F(1, 6, 5%)
B	0,0085	1	1,77		= 5,99
FB	0,0105	1	2,18		
C	0,043	1	8,95	**	F(1, 6, 10%)
E	0,0095	1	1,97		= 3,38
FD	0,043	1	8,95	**	
A	0,4354	3	30,2	***	F(3, 6, 5%)
					= 4,76
RESIDU	0,0288	6			

Les facteurs significatifs sur la performance sont :

A , C , F/D , F .

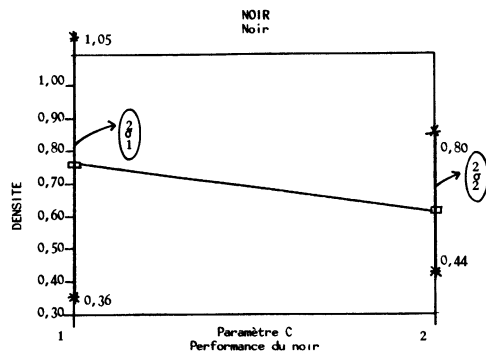
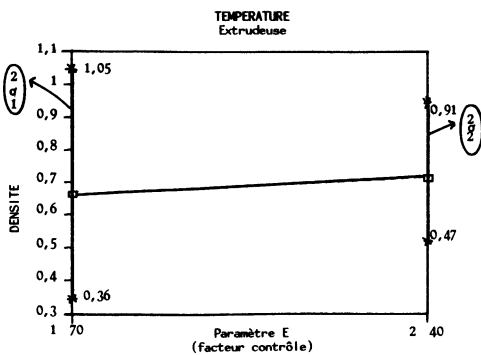
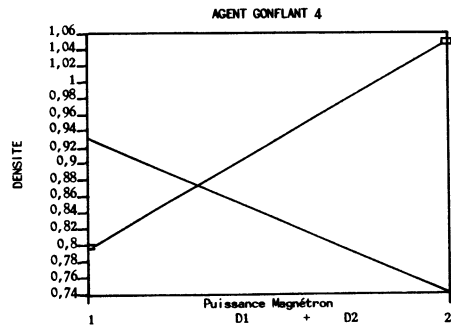
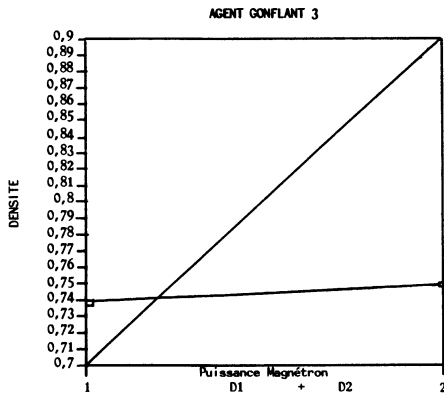
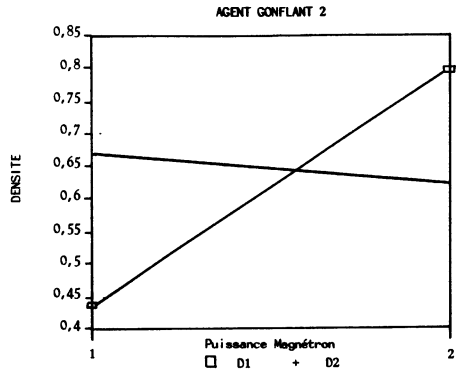
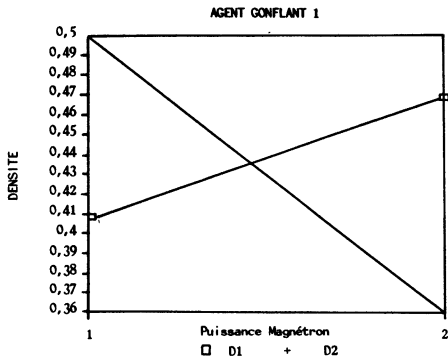
<sup>(1)</sup> i.e. analyse en laissant tomber les facteurs ou les interactions non significatifs dans le modèle initialement prévu, ce qui revient à rajouter les sommes de carrés associés à celles des erreurs.

b) Analyse graphique

Ce complément nécessaire à l'analyse de variance nous permet de vérifier et de visualiser les différents effets significatifs, notamment les interactions.

Exemple

Les graphiques suivants montrent l'interaction F/D quel que soit l'agent gonflant A, puis l'influence du paramètre E (température) et celle de C (noir) sur le rapport Signal/Bruit.





## ANALYSE DE LA PERTE DE PORTANCE

## a) Analyse de la variance

Analyse régulière avec regroupement du résidu

	S.C	ddl	F		
A	5202	3	133	***	F(1, 5, 5%) = 6, 61
D	210,2	1	16,2	**	
E	110,2	1	8,48	*	
F	110,2	1	8,48	*	
BE	144	1	11	*	F(3, 5, 5%) = 5, 41
ε	78,5	5	(1)		

Les facteurs significatifs sont :

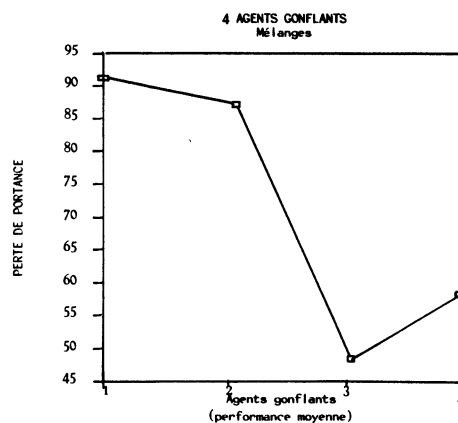
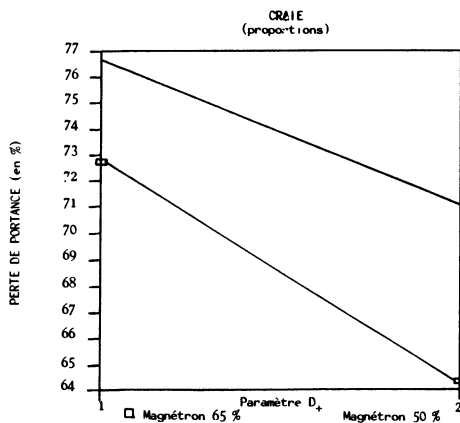
A, D, E, F, B/E

Analyse du ratio signal/bruit

	S.C	ddl	F		
A	90	3	300	***	F(1, 5, 1%) = 16, 3
D	3,9	1	39	**	F(3, 5, 1%) = 12, 1
BE	4,25	1	42	**	
F	3,42	1	34	**	
E	1,42	1	14	--	
ε	0,5	5	(1)		

Les facteurs significatifs sont :

A, D, F, B/E.

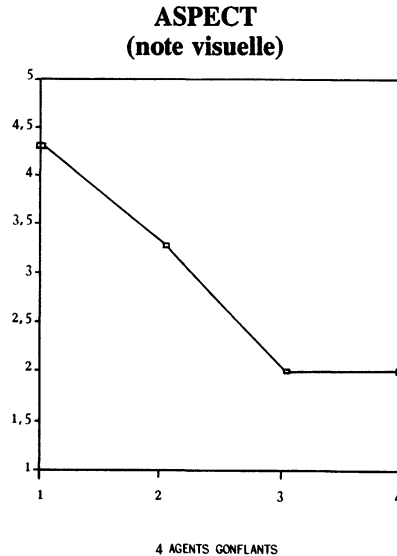


(1) Le résidu regroupé est estimé ici avec 5 d.d.l.. Dans le tableau, seuls apparaissent (à part E dans le second tableau), les effets significatifs.

## ANALYSE DE L'ASPECT

## a) Analyse graphique

Sans passer par un changement de variable pour normaliser la notation visuelle utilisée, l'analyse des graphiques suffit. Nous remarquons immédiatement l'influence des agents gonflants 3 et 4 et une *analogie* entre les effets sur la perte de portance et sur l'aspect.



## Première synthèse

OPTIMISATION  
DE LA DENSITE

A1  
C2  
F1  
E2

F1 et E2 sont choisis  
pour leur robustesse

OPTIMISATION  
DE LA PERTE DE PORTANCE  
ET DE L'ASPECT

A3  
D2  
F1  
E2

le facteur B (gommages)  
n'intervient que sur l'aspect

## Conclusion :

Nous avons "co-incidence" des modalités : C2, D2, F1, E2 sur les trois réponses. Et incompatibilité sur les niveaux d'agent gonflant !! En effet la modalité A1 donnant satisfaction sur la densité est inacceptable sur la perte de portance, et vice-versa pour A3. De plus l'agent gonflant est le paramètre le plus important sur les trois réponses.

*Réflexion au laboratoire :*

*Quel agent peut-il garantir la qualité totale de notre caoutchouc ?*

Le savoir-faire des "gens du labo" a permis de tester les *combinaisons* d'agents gonflants disponibles, pour trouver deux "coupages" satisfaisants (*en maintenant les autres paramètres aux modalités C2, D2, F1, E2, bien entendu...*).

Nous allons les expérimenter, toujours par une planification de type *Taguchi*, dans une deuxième série d'essais...-

**OPTIMISATION DE L'INFLUENCE DE L'AGENT GONFLANT  
ET ROBUSTESSE DU PROCESSUS DE FABRICATION**

*a) L'objectif*

La densité, la perte de portance et l'aspect.

Une quatrième réponse pour la facilité de mise en oeuvre du procédé dans l'atelier est relevée, elle est à caractère mécanique, *mesurée* par un module (Mega Pa), la tenue à cru !

*b) Les paramètres*

Deux coupages d'agents gonflants : 1

2

. Quatre gommages : 1

2

3

4

Les gommages comme nous l'avons vu, n'ont pas d'influence sur la densité et la perte de portance, mais il est intéressant de voir leur effet sur la mise en oeuvre dans l'atelier.

. Deux systèmes de "mélangeage" : 1 Ancien

2 Nouveau

. Deux *blocs* d'essais seront réalisés, puisque nous disposons de *deux lignes de fabrication* : UHF

LCM

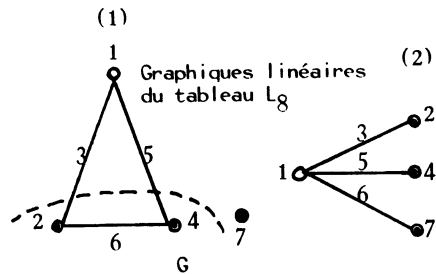
L'expérimentation sera complète à l'intérieur de chaque *bloc*.

c) Le plan des essais

Nous avons utilisé une *table orthogonale*  $L_8$ , en créant une colonne à 4 modalités pour le facteur Gomme en regroupant les colonnes 2,6,4. Le facteur Agent gonflant est affecté en colonne 1. Les Systèmes en colonne 7 et les colonnes 3 et 6 pour l'estimation de la variance résiduelle. Nous avons randomisé l'ordre des essais : *huit essais* ont donc été réalisés par ligne de fabrication en maintenant *constants* les autres paramètres.

TABLE  $L_8$

	A	.	ε	.	ε	.	S	G
Colonnes N°	1	2	3	4	5	6	7	2,4,6
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2	3
4	1	2	2	2	2	1	1	4
5	2	1	2	1	2	1	2	1
6	2	1	2	2	1	2	1	2
7	2	2	1	1	2	2	1	3
8	2	2	1	2	1	1	2	4



LES ESSAIS	LIGNE UHF			LIGNE LCM			tenue à cru
	densité	aspect	perte port.	densité	aspect	perte port.	
1	0,55	2	-37	0,43	1	-50	1,9
2	0,51	2	-66	0,46	1	-22	1,9
3	0,45	2	-57	0,43	1	-36	1,1
4	0,43	2	-16	0,42	1	-56	1,4
5	0,46	2	-60	0,47	1	-18	2,0
6	0,56	2	-46	0,47	1	-25	2,3
7	0,38	2	-72	0,41	1	-38	1,6
8	***	*	**	0,43	1	-33	1,4

\* = Impossible de récupérer un échantillon correct pour la mesure!

## d) Analyse des résultats

## Bloc LCM

## 1. Densité

## – Analyse de variance régulière

	SC	ddl	Variance	FISHER	
Agent	0,0002	1	0,0002	0,888	NS
Gommes	0,0027	3	0,0009	4	NS
Systèmes	0,0004	1	0,0004	2	NS
Résidu	0,0004	2	0,0002		

Aucun facteur significatif

*L'essentiel est, avant tout, de constater que toutes les réponses de densité sont très satisfaisantes. Seules des "mousses" apparaissent, et non plus du "compact" comme lors de la première expérimentation. L'analyse du ratio S/B ne laisse apparaître aucun facteur contrôle sur la densité.*

## 2. Perte de portance

## – Analyse de variance régulière

	SC	ddl	Variance	FISHER	
Agent	312,5	1	312,5	30,48	**
Gommes	454,5	3	151,5	14,78	– NS
Systèmes	450	1	450	43,90	**
Résidu	20,5	2	10,25		

avec  $F(1,2,5\%) = 18,5$  $F(3,2,5\%) = 19,2$ 

Agents et Systèmes SIGNIFICATIFS sur la performance moyenne

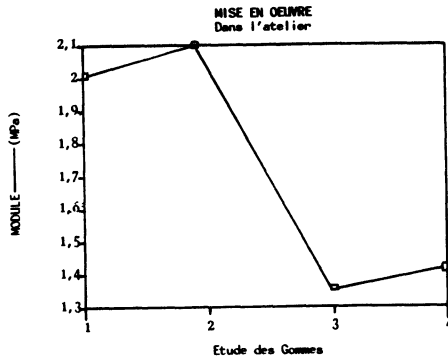
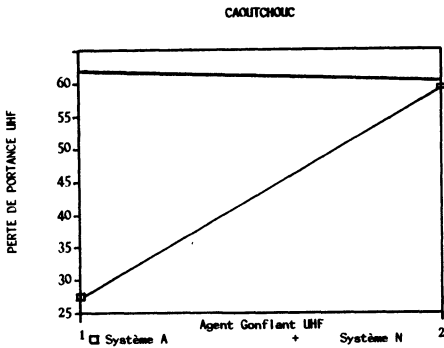
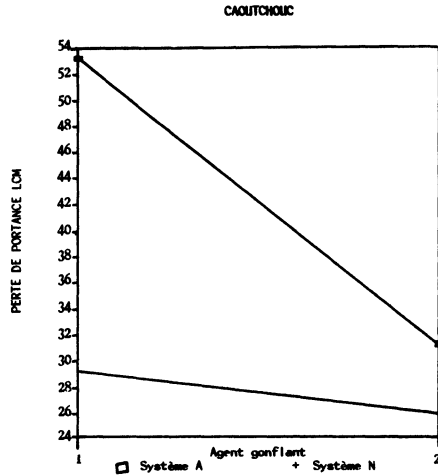
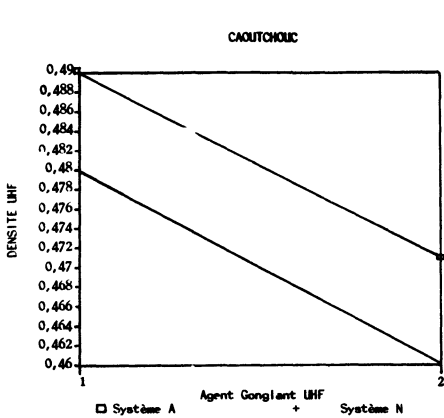
## – Analyse de variance du ratio S/B

	SC	ddl	Variance	FISHER	
Agent	17,6	1	17,6	7,5	– NS
Gommes	31,3	3	10,4	4,4	– NS
Systèmes	28,3	1	28,3	12,0	– NS
Résidu	4,68	2	2,34		

Pas de facteurs contrôle

**Bloc UHF**

Sur les 8 essais, une donnée est manquante. Nous avons donc réalisé une analyse *graphique* de la densité, et de la perte de portance.



**Etude supplémentaire de mise en oeuvre dans l'atelier**

L'étude graphique nous a permis de mesurer l'influence des 4 types de gommés sur la résistance à la rupture de bande pour des problèmes évidents de fabrication. (Les gommés n'ayant d'influence que sur la mise en oeuvre).

## Deuxième synthèse

### 1. Ligne LCM

- Densité

*L'objectif (0,4-0,6) est atteint quel que soit le niveau des facteurs!!*

- Perte de portance

*L'objectif (< 50 % ) est atteint pour la configuration : Agent gonflant 2 - Système N2*

- Mise en oeuvre

Pour éviter des coupures de bande nous choisirons les Gommés 1 ou 2.

### 2. Ligne UHF

- Densité

Idem que sur la ligne LCM

- Perte de portance

Seul le système A avec l'agent gonflant 1 nous garantissent l'*objectif (< 50 % )*.

- Mise en oeuvre

Idem que sur la ligne LCM.

### 3. Conclusion

Deux formules de fabrication seront donc retenues

Ligne LCM : agent 2, gomme 2, système 2.I

Ligne UHF : agent 1, gomme 2, système 1.

Avec évidemment : noir 2, magnétron 1, craie D2 (craie minimale) et température extrudeuse 2 pour les 2 lignes (résultats de notre première expérimentation).

### 4. Vérification

Les formules optimisées ont donné sur la filière série les résultats suivants :

LIGNE LCM  
DENSITE MOYENNE  
0,40

LIGNE UHF  
DENSITE MOYENNE  
0,44

*chiffre en kilofrancis*

Le passage à une densité de 0,45 a permis un gain de 1 350 KF/an sur le mélange tout en assurant la satisfaction du client.

*confirmation de la "formule" optimisée et maîtrise du processus*

NOVEMBRE	LIGNE LCM		
	DENSITE	PERTE DE PORTANCE	ASPECT
12	0,45	-44 %	1
13	0,45	-50 %	1
14	0,45	—	—
19	0,44	-46 %	1
19	0,47	-50 %	1
20	0,46	-47 %	1
9 décembre...	0,45	-	1

Les résultats obtenus l'ont été sans modélisation des causes mais seulement en étudiant les effets. L'investissement représenté par les deux plans d'expérience a été amorti après un mois de maîtrise du processus de fabrication.

### Bibliographie

- BYRNE, D. (1985) : Introduction to design of experiments and Taguchi; *Methods Schoolcraft College*.
- QUINLAN, J. (1985) : Case study : Study to determine factors affecting bonded connector durability; *Quality Congress transactions, Baltimore*.
- "SAUVAGE : LA METHODE" (1986) : Groupe de travail, Qualité Citroën; *document interne, Rennes*.
- TAGUCHI, G., WU, Y. (1980) : Introduction to off-line quality control, *Central Japan Quality Control Association, Nagoya*.