

## Plan d'expérience Taguchi La qualité au moindre coût

**L'instabilité des valeurs des caractéristiques fonctionnelles et/ou dimensionnelles des produits fabriqués industriellement, est le problème le plus fréquent et le plus difficile que cherchent à combattre tous les ingénieurs et techniciens, quels que soient les domaines technologiques.**

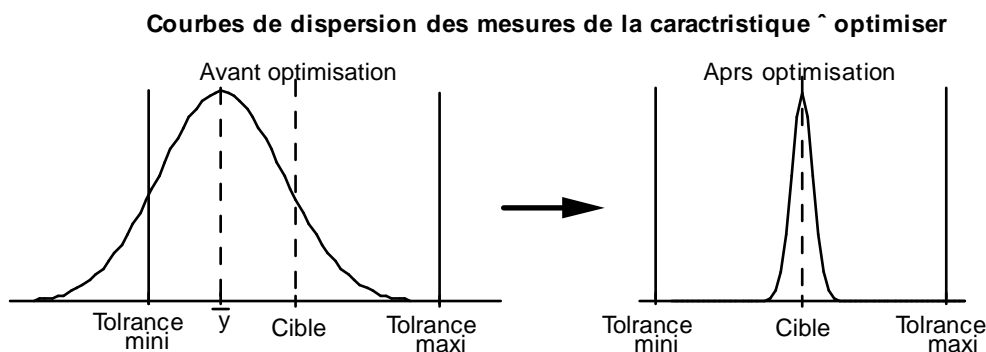
Les causes d'instabilité peuvent être multiples, mal identifiées. Elles sont généralement impossibles à éradiquer : variabilité des caractéristiques chimiques, cristallines, mécaniques, électriques,... des matières premières et des composants utilisés, variabilité des conditions d'environnement (température, hygrométrie, pression atmosphérique,...), variabilité de la tension d'alimentation en énergie électrique, etc.... Ces causes parasites sont dénommées **facteurs bruits**.

L'instabilité d'un processus est, de loin, ce que les ingénieurs et techniciens savent le moins bien combattre, car il est illusoire de chercher à éliminer la plupart des facteurs bruits, sous peine d'accroître considérablement les coûts de production.

Pour optimiser réellement la performance d'un processus de fabrication (ou de fonctionnement d'un système), il faut donc *systématiquement et solidairement*, minimiser :

- la dispersion des valeurs individuelles mesurées, par rapport à leur valeur moyenne  $\bar{y}$  (exprimée par leur écart type),  
*et*
- l'écart entre cette valeur moyenne  $\bar{y}$  et la valeur cible à atteindre,

pour chacune des caractéristiques dimensionnelles, fonctionnelles,... qu'il doit respecter.



Au lieu de chercher à éliminer les causes parasites, ce qui est souvent économiquement inenvisageable, la stratégie consiste à identifier les valeurs des paramètres aisément maîtrisables, dénommés **facteurs contrôlés**, qui réduisent leur impact, sans s'attaquer directement à ces causes.

La recherche des "bonnes valeurs" à donner aux facteurs contrôlés s'effectue à l'aide d'un **plan d'expériences**, afin que le processus à optimiser :

- respecte les caractéristiques dimensionnelles et/ou fonctionnelles désirées,
- soit *robuste*, c'est-à-dire insensible aux facteurs bruit<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Lors d'une expérimentation, il y a deux méthodes pour apprécier objectivement l'instabilité des résultats due aux facteurs bruits :

- prendre en compte, sur une période de fonctionnement suffisamment longue, l'environnement bruit naturel inhérent à tout système,  
ou
- identifier certains facteurs bruits particuliers, *exceptionnellement simulés pendant l'expérimentation*, et utiliser la technique des *Plans produits Taguchi* (non abordée dans cet article).

Un plan d'expériences, **conduit selon l'approche Taguchi**, est une suite d'essais, organisée à l'avance, de manière à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence individuelle des différents facteurs contrôlés sur :

- la moyenne arithmétique des valeurs mesurées de chacune des caractéristiques fonctionnelles et/ou dimensionnelles à optimiser

et

- un indicateur de robustesse, appelé "**ratio Signal/Bruit**", dont la valeur algébrique est d'autant plus grande que la valeur de la caractéristique tend vers la cible visée et que sa variabilité est plus faible.

A partir des mesures des caractéristiques des échantillons régulièrement prélevés pendant chacun des essais du plan d'expériences, on calcule les deux types d'effets de chacun des facteurs contrôlés testés, ce qui permet de répartir ceux-ci dans les quatre catégories suivantes :

| Catgorie | Effet sur la valeur de la caractéristique | Effet sur la variabilité de la caractéristique |
|----------|---|--|
| 1        | oui                                       | oui  |
| 2        | non                                       | oui  |
| 3        | oui                                       | non  |
| 4        | non                                       | non  |

Pour optimiser efficacement une caractéristique, la démarche pratique consiste alors à :

- 1- Choisir les niveaux des facteurs contrôlés des catégories 1 et 2, qui améliorent le ratio Signal/Bruit (pour réduire l'instabilité des performances),  
puis, si c'est nécessaire,
- 2- Choisir parmi les facteurs contrôlés des catégories 3 et 1, les niveaux qui permettent d'ajuster la moyenne sur la cible,  
et enfin,
- 3- Choisir les niveaux des facteurs contrôlés de la catégorie 4 en fonction de critères de productivité (simplification du processus, réduction des coûts,...).

***Cette démarche systématique est simple, claire, et s'avère extrêmement puissante.***

## Exemple de réalisation d'une expérimentation

*Nota* : Dans cet exemple, les formules de calcul ne sont pas explicitées, seuls les résultats finals sont présentés.

### • Définition du problème

Il s'agit d'un capot d'imprimante d'ordinateur. C'est une pièce en polycarbonate, obtenue par injection, dont l'aspect doit être irréprochable et la géométrie très précise.

Les techniciens éprouvaient beaucoup de difficultés à maîtriser cette fabrication.

Le taux de rebuts était de 15 %.

### • Préparation de l'expérimentation

Un "*Groupe de réflexion*", mobilisant toutes les compétences adéquates de l'entreprise sur ce sujet, a préalablement défini puis officialisé :

- Les caractéristiques à optimiser et les protocoles de leurs mesures :

- la "longueur" du capot :  $457,45 \pm 0,25$  mm
- le "cintrage" du capot (c'est-à-dire le défaut de planéité) :  $0 \pm 0,24$  mm

- les défauts d'aspect, appelés " givrures " (à minimiser); ceux-ci ont été appréciés par leur surface en cm<sup>2</sup>, relevée sur chaque pièce.

- Les facteurs contrôlés et leurs valeurs, à tester :

| N <sub>j</sub> | Facteur contr <sup>TM</sup> <sub>j</sub>          | Niveau 1 | Niveau 2 |
|----------------|---|----------|----------|
| A              | Température eau du moule c <sup>TM</sup> t fixe   | 70 °C    | 90 °C    |
| B              | Température eau du moule c <sup>TM</sup> t mobile | 70 °C    | 90 °C    |
| C              | Température boudineuse                            | 280 °C   | 300 °C   |
| D              | Vitesse d'injection                               | 1        | 2.5      |
| E              | Point de commutation                              | 18       | 22       |
| F              | Pression de maintien                              | 60       | 90       |
| G              | Temps de maintien                                 | 10 sec   | 16 sec   |
| H              | Temps de refroidissement                          | 10 sec   | 20 sec   |
| I              | Vitesse de rotation de la vis                     | 5        | 10       |
| J              | Contre pression                                   | 5        | 15       |
| K              | Dcompression                                      | 3        | 8        |

La plus petite matrice d'expérience standard existant pour tester 11 facteurs contrôlés à 2 niveaux est la matrice L<sub>12</sub> ci-dessous :

| N <sub>j</sub><br>essai             | Facteurs contr <sup>TM</sup> <sub>j</sub> s |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    | Rultat<br>de l'essai |
|-------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----------------------|
|                                     | A   | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K  |                      |
| 1                                   | 1   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | R1                   |
| 2                                   | 1   | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2  | R2                   |
| 3                                   | 1   | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2  | R3                   |
| 4                                   | 1   | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2  | R4                   |
| 5                                   | 1   | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1  | R5                   |
| 6                                   | 1   | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1  | R6                   |
| 7                                   | 2   | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1  | R7                   |
| 8                                   | 2   | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2  | R8                   |
| 9                                   | 2   | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1  | R9                   |
| 10                                  | 2   | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2  | R10                  |
| 11                                  | 2   | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2  | R11                  |
| 12                                  | 2   | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 1  | R12                  |
| Moyenne des résultats des 12 essais |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | Rm |                      |

Cette matrice comprend :

- une colonne par facteur, dans celle-ci les niveaux de valeur à tester sont identifiés par les chiffres 1 ou 2 ;
- une ligne pour chacun des 12 essais, indiquant la combinaison des niveaux des facteurs à tester.

#### • Réalisation des essais et mesure des résultats

Chaque essai a été réalisé en respectant rigoureusement les valeurs des niveaux des facteurs contrôlés indiqués par la matrice d'expériences.

A chacun des 12 essais on a injecté 20 pièces.

Les 3 caractéristiques à optimiser ont été mesurées sur 10 pièces (une pièce sur deux, dans l'ordre de leur injection), afin de pouvoir apprécier pendant une durée suffisante l'*instabilité naturelle* du processus, due aux divers facteurs bruits non identifiés qui l'environnent (variabilité des caractéristiques chimiques et/ou physiques des granulés de polycarbonate, variations non maîtrisées des températures de la boudineuse et de l'eau de refroidissement du moule, etc....).

Pour chacun des 12 essais, et pour chacune des 3 caractéristiques, on a calculé la **moyenne** des 10 mesures relatives aux 10 pièces prélevées, leur écart type, puis le **ratio Signal/Bruit** qui en découle.

#### • Exploitation des résultats de l'expérimentation

Nota : Pour alléger la présentation, seuls figurent ci-dessous les résultats relatifs à la caractéristique " longueur " <sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Les lecteurs qui désirent approfondir l'étude de ce cas, peuvent obtenir une disquette (format Mac ou PC) de démonstration du fonctionnement du logiciel KitTag utilisé pour traiter cet exemple.

| N <sub>i</sub> essai | Moyenne | Ecart type | S/N(dB) |
|----------------------|---------|------------|---------|
| 1                    | 456.41  | 0.04       | 80.72   |
| 2                    | 457.73  | 0.02       | 85.61   |
| 3                    | 456.48  | 0.03       | 83.36   |
| 4                    | 456.62  | 0.03       | 83.65   |
| 5                    | 457.81  | 0.04       | 81.39   |
| 6                    | 457.67  | 0.04       | 82.08   |
| 7                    | 456.68  | 0.02       | 88.58   |
| 8                    | 457.72  | 0.04       | 82.33   |
| 9                    | 457.42  | 0.05       | 78.89   |
| 10                   | 456.81  | 0.06       | 77.78   |
| 11                   | 457.49  | 0.05       | 78.72   |
| 12                   | 456.48  | 0.03       | 82.82   |
|                      | 457.11  | Moyennes   | 82.16   |

A partir des résultats des 12 essais, on a ensuite calculé les *effets moyens* individuels des 11 facteurs testés.

| % Contribution S/N(dB) |          | Facteur<br>N <sub>j</sub> | Effet sur la valeur mesure |          |
|------------------------|----------|---------------------------|----------------------------|----------|
| Niveau 1               | Niveau 2 |                           | Niveau 1                   | Niveau 2 |
| 0.78%                  | -0.78%   | A                         | 0.01                       | -0.01    |
| 1.32%                  | -1.32%   | B                         | -0.04                      | 0.04     |
| -0.52%                 | 0.52%    | C                         | -0.08                      | 0.08     |
| -0.47%                 | 0.47%    | D                         | 0.05                       | -0.05    |
| 0.11%                  | -0.11%   | E                         | 0.02                       | -0.02    |
| 0.80%                  | -0.80%   | F                         | -0.53                      | 0.53     |
| -2.46%                 | 2.46%    | G                         | -0.04                      | 0.04     |
| -0.59%                 | 0.59%    | H                         | -0.07                      | 0.07     |
| 0.49%                  | -0.49%   | I                         | 0.01                       | -0.01    |
| -1.52%                 | 1.52%    | J                         | 0.00                       | 0.00     |
| 0.31%                  | -0.31%   | K                         | -0.03                      | 0.03     |

Pour chaque facteur, cet effet est exprimé de 2 façons distinctes :

- **Effet sur la valeur à optimiser** (partie droite du tableau)

Par exemple, le niveau 1 du facteur F (Pression de maintien) provoque une diminution de - 0,53 mm par rapport à la moyenne de 457,11 mm calculée sur l'ensemble des 12 essais. Inversement, le niveau 2 provoque une augmentation de + 0,53 mm.

- **% Contribution S/N (dB)** (partie gauche du tableau)

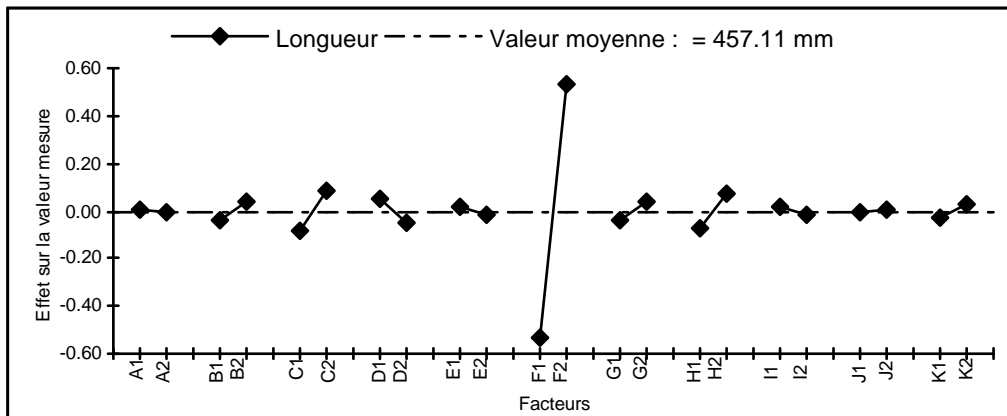
(S/N (dB) signifie : ratio Signal/Bruit, il est exprimé en décibels).

Ce ratio traduit l'effet sur l'instabilité (c'est-à-dire la dispersion) du résultat mesuré. Plus sa valeur algébrique est grande, plus l'instabilité est faible.

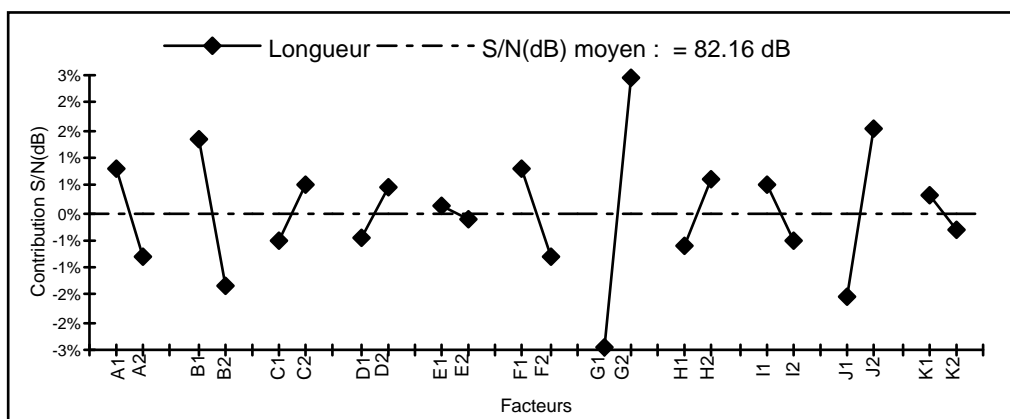
Par exemple, il faut choisir le niveau 2 du facteur G (Temps de maintien) qui améliore le ratio S/N(dB) de + 2,46 % par rapport au ratio moyen 82,16 dB, calculé sur l'ensemble des 12 essais.

Ces résultats sont plus parlants sous forme de graphiques :

- effet sur la valeur mesurée



- effet sur le ratio Signal/Bruit



Dans cet exemple, il est aisé de faire les constatations suivantes :

- Les facteurs G, J et B sont les plus influents sur le ratio S/N(dB) mais n'ont pratiquement pas d'effet sur la longueur. Il faut donc choisir leurs valeurs algébriques les plus grandes, soit les niveaux G2, J2 et B1, pour réduire la dispersion.
- Le facteur F est le seul qui influe très fortement sur la longueur mais, en revanche, son influence est faible sur le ratio S/N(dB). Ce facteur sera donc très commode pour ajuster la longueur de la pièce à la valeur nominale spécifiée, sans dégrader le ratio S/N(dB).

A partir de la connaissance de ces deux types d'effets, il devient facile de rechercher la combinaison des niveaux des 11 facteurs qui s'avère la plus favorable pour *l'ensemble des 3 caractéristiques à optimiser*.

Pour cela, il convient de procéder en 2 étapes :

- 1- Il faut *prioritairement* chercher à réduire l'instabilité des résultats, en choisissant les niveaux facteurs qui apportent les contributions Signal/Bruit les plus élevées (en valeur algébrique).
- 2- Ensuite, car c'est généralement plus facile à réaliser, on cherche à ajuster la valeur de chaque caractéristique sur la cible visée.

A partir des *manettes* ainsi fournies, on recherche le meilleur compromis pour équilibrer les améliorations sur les 3 caractéristiques à optimiser.

Après quelques itérations, la configuration ci-dessous a été retenue.

| Ecart type thorique rsultant:           |   |     | 0.02   | 0.04     | Non calculable |
|---|---|-----|--|----------|----------------|
| <b>Configuration optimale propose</b>   |   |     | Contribution S/N(dB) et effet sur la valeur mesure |          |                |
| N <sub>i</sub>                          | Description Facteur                             | Niv | Longueur   | Cintrage | Givrures       |
| A                                       | Temprature eau du moule c <sup>TMt</sup> fixe   | 2   | -0.78%   | 2.72%    | 20.40%         |
|   |   |     | -0.01  | -0.37    | -1.93          |
| B                                       | Temprature eau du moule c <sup>TMt</sup> mobile | 1   | 1.32%  | 1.07%    | -19.74%        |
|   |   |     | -0.04  | -0.24    | 1.20           |
| C                                       | Temprature boudineuse                           | 1   | -0.52%   | 4.92%    | 17.13%         |
|   |   |     | -0.08  | -0.41    | -1.10          |
| D                                       | Vitesse d'injection                             | 1   | -0.47%   | 2.56%    | 19.06%         |
|   |   |     | 0.05   | 0.48     | -1.85          |
| E                                       | Point de commutation                            | 1   | 0.11%  | 0.70%    | 47.97%         |
|   |   |     | 0.02   | -0.20    | -2.73          |
| F                                       | Pression de maintien                            | 2   | -0.80%   | -5.29%   | 53.30%         |
|   |   |     | 0.53   | -0.11    | -2.37          |
| G                                       | Temps de maintien                               | 2   | 2.46%  | -7.22%   | -13.06%        |
|   |   |     | 0.04   | -0.01    | -0.57          |
| H                                       | Temps de refroidissement                        | 2   | 0.59%  | 1.64%    | 19.77%         |
|   |   |     | 0.07   | 0.15     | -1.19          |
| I                                       | Vitesse de rotation de la vis                   | 1   | 0.49%  | 8.56%    | -3.53%         |
|   |   |     | 0.01   | 0.30     | -0.61          |
| J                                       | Contre pression                                 | 2   | 1.52%  | 0.34%    | 0.80%          |
|   |   |     | 0.00   | 0.27     | 0.61           |
| K                                       | Dcompression                                    | 1   | 0.31%  | 7.61%    | 73.46%         |
|   |   |     | -0.03  | 0.15     | -3.00          |
| <b>Ratio S/N(dB) thorique rsultant</b>  |   |     | 85.64  | 28.60    | 8.70           |
| S/N(dB) moyen                           |   |     | 82.16  | 24.32    | -7.53          |
| <b>Valeur mesure thorique rsultante</b> |   |     | 457.67   | 0.01     | -9.38          |

← % Contribution S/N  
← Effet sur la valeur

Les résultats théoriques prévisionnels qui en découlent sont calculés en supposant que *tous les effets individuels des facteurs s'additionnent normalement* (c'est-à-dire, en considérant qu'il n'y a pas d'interactions<sup>3</sup> significatives entre les 11 facteurs, qui faussent en plus ou en moins l'*additivité* de leurs effets).

La configuration proposée devrait théoriquement permettre d'améliorer significativement et de façon équilibrée les 3 caractéristiques :

- Les valeurs des 3 ratios S/B(dB) seraient améliorées par rapport aux valeurs moyennes respectives. Par exemple pour la "longueur", le ratio S/N(dB) théorique résultant devrait être 85,64 dB par rapport à la valeur moyenne 82,16 dB, constatée pour les 12 essais. Le gain de 3, 48 dB semble modeste, mais en fait il est important car il correspond à une réduction de 50 % de la dispersion (l'écart type résultant serait 0,02 au lieu de 0,04 pour la moyenne des essais).
- La "longueur" théorique résultante (457,67 mm) se situerait trop près de la tolérance supérieure (457,45 + 0,25 = 457,70 mm). Il sera facile de l'ajuster à la valeur cible (457,45 mm) en réduisant légèrement la valeur du niveau 2 du facteur F (qui s'avère très influent sur la "longueur", mais peu sur le ratio S/N).
- Le "cintrage" serait complètement éliminé.
- On obtiendrait une valeur négative pour les "givrures" ! Ce résultat, évidemment irréaliste, signifie que ce défaut serait certainement éliminé.

L'**essai de validation**, qui a ensuite été effectué, a confirmé ces résultats<sup>4</sup>.

### **Les rebuts de fabrication ont ainsi été complètement éliminés.**

<sup>3</sup> La stratégie et les modalités concernant l'étude des interactions ne peut être abordée dans cet article.

<sup>4</sup> Si les résultats réellement obtenus s'étaient avérés très différents, il aurait été nécessaire d'en rechercher les causes possibles, en explorant successivement les trois pistes suivantes :

- des facteurs supposés fixes ont variés inopinément,
- les niveaux de certains facteurs testés ont variés accidentellement au cours de l'expérimentation,
- des interactions, non étudiées lors de l'expérimentation, sont présentes (la stratégie concernant leur étude, ne peut être abordée dans cet article).