

REVUE DE STATISTIQUE APPLIQUÉE

E. JOBLET

E. DE LARMINAT

Méthodologie Taguchi appliquée à une étude de surface de réponse

Revue de statistique appliquée, tome 37, n° 2 (1989), p. 103-116

http://www.numdam.org/item?id=RSA_1989__37_2_103_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/>

MÉTHODOLOGIE TAGUCHI APPLIQUÉE A UNE ÉTUDE DE SURFACE DE RÉPONSE

E. JOBLET
&
E. de LARMINAT

BBN Software France - 80, avenue Marceau 75008 PARIS

RESUME

Cet exemple d'optimisation d'une réaction chimique montre comment le logiciel RS/Discover permet d'appliquer la philosophie TAGUCHI aux études de surface de réponse et généralise la notion de "Statistique de Performance".

ABSTRACT

This example of optimisation of a chemical reaction shows how, through the RS/Discover software, the TAGUCHI philosophy can be applied to a response surface methodology study and how the notion of performance statistic can be extended.

Introduction

Les techniques de planification expérimentale permettent d'obtenir une connaissance approfondie des phénomènes ou procédés étudiés en réalisant des gains économiques grâce à une organisation optimale des expériences à effectuer.

Depuis Fisher, l'expérimentateur a à sa disposition des outils tels que les plans factoriels, qui lui permettent d'organiser ses essais de façon à obtenir des résultats expérimentaux les plus "utiles" possibles, à collecter des données qui vont contenir les informations qu'il recherche.

Genichi Taguchi a fait progresser ces techniques dans différentes directions : il a tout d'abord eu l'idée de s'intéresser non seulement à la réponse (variable à expliquer) mais aussi à sa variabilité. Rien ne sert d'obtenir en phase pilote un rendement de 99% s'il est difficile ou coûteux, en phase de production industrielle, de maintenir le procédé au point de fonctionnement trouvé. Si de petites variations des conditions opératoires et en particulier des "variables d'environnement", en général non contrôlées, induisent des variations de rendement importantes, il vaut sans doute mieux chercher un optimum plus stable même s'il est un peu moins bon.

Par ce type de raisonnement, Taguchi a su toucher les ingénieurs, mettant les techniques de planification expérimentale au service de l'industrie alors qu'elles n'étaient utilisées que par les statisticiens. Cela ne s'est pas fait sans une simplification très poussée de la méthodologie que certains lui reprochent de limiter à un ensemble de "recettes de cuisine".

On peut sans doute aussi mettre à son actif la généralisation des plans factoriels fractionnaires par les fameux "orthogonal arrays" dont certains permettent d'intégrer des variables qualitatives à plus de deux modalités. Là encore, cependant, ses détracteurs diront qu'il les utilise à l'exclusion de tout autre type de plans, même quand ils ne sont pas les plus appropriés.

Sa célébrité et l'intérêt grandissant dont font l'objet ses idées, sont aussi dûs au fait qu'il a su utiliser le langage de la qualité, des financiers et des chefs d'entreprises : pour lui, tout écart autour de la valeur nominale d'une caractéristique quelconque se traduit par une baisse de la qualité et donc par une perte subie non seulement par l'entreprise qui produit mais aussi par la Société toute entière. La fonction de perte (ou "loss function") qu'il aime définir doit être exprimée en unités monétaires !

L'exemple que nous allons développer montre comment le logiciel RS/Discover permet d'appliquer les méthodes de Taguchi à une étude de surface de réponse et généralise la notion de "statistique de performance", une des pierres angulaires de tout l'édifice. Il s'agit de l'optimisation d'un procédé, ici une réaction chimique, c'est-à-dire de la recherche d'un point de fonctionnement optimal où la variabilité de la réponse étudiée est minimale.

1. Présentation du problème

Le procédé étudié permet la fabrication industrielle d'un produit chimique. La synthèse de ce produit est obtenue par un mécanisme chimique complexe qui, à l'échelle industrielle s'effectue en deux étapes : une réaction de condensation et une réaction de cyclisation. Dans la première étape, on introduit différents réactifs en une seule fois en présence d'un solvant. Le mélange réactionnel est soumis à un mode opératoire spécifique à l'issue duquel la réaction de condensation s'effectue. Dans la deuxième étape, les conditions opératoires sont modifiées afin que la cyclisation se produise.

On s'intéresse plus particulièrement au rendement final de la réaction c'est-à-dire à la quantité de produit obtenu après élimination des impuretés. Des études préliminaires ont permis de montrer que l'étape de condensation est prédominante. Parmi tous les paramètres susceptibles d'avoir une influence sur le rendement de la réaction, un plan d'expériences de type screening a permis de sélectionner les facteurs principaux. Grâce aux résultats obtenus, des conditions opératoires permettant d'avoir un rendement acceptable ont été trouvées. Cependant, il s'avère qu'en production, la variabilité des rendements obtenus est très importante. Ceci est en partie dû, semble-t-il, à l'existence de facteurs non contrôlés à l'échelle industrielle.

1.1 Objectifs

A ce niveau de l'étude, l'intérêt est porté plus particulièrement sur la qualité du rendement recherché. A partir des facteurs principaux et de ceux difficilement ou non contrôlables industriellement, on cherche à trouver la région optimale du domaine expérimental où les facteurs non contrôlés ont le moins d'influence afin de minimiser la variabilité du rendement final.

1.2 Choix des facteurs et du domaine expérimental

Trois catégories de facteurs se distinguent pour ce type d'étude.

– Les facteurs contrôlés

Ces facteurs sont totalement maîtrisés tout au long du procédé. Les valeurs qui leur sont imposées ne subissent donc aucune modification.

– Les facteurs difficilement contrôlables

Ces facteurs jouent un rôle important et ne sont pas bien maîtrisés en fabrication. Il y a toujours des fluctuations autour des valeurs imposées. Nous les nommons facteurs de "sensibilité" (sensitivity).

– Les facteurs non contrôlables

Ces facteurs ne sont pas du tout maîtrisés en fabrication; on ne peut donc pas leur imposer une valeur. On admet qu'ils ont peu d'influence sur le procédé mais qu'ils peuvent être source de variabilité. Ils sont considérés comme des facteurs de "bruit" (noise).

Les facteurs suivants ont été retenus :

- le rapport quantité de réactif A/volume de solvant
- la durée de la réaction de condensation
- température de la condensation
- pureté du réactif A
- pureté du réactif B

Les études antérieures ont montré que les trois premiers facteurs sont les facteurs les plus influents sur la formation du produit. Bien que d'autres réactifs interviennent dans le mélange réactionnel initial, leur effet étant de moindre importance, il a été choisi de ne pas faire varier leur concentration. Industriellement, on sait contrôler avec précision ces trois premiers facteurs.

Les réactifs A et B sont des produits dont la pureté varie pour A de 98 à 100% et pour B de 95 à 100% . Ce sont les tolérances acceptées lors de l'achat de ces produits. Ces pourcentages sont donc totalement incontrôlables au niveau industriel et sont considérés comme des facteurs de bruit. On pense qu'ils peuvent agir sur la variabilité du rendement en favorisant la formation de produits secondaires. Aussi souhaite-t-on trouver un point de fonctionnement où le rendement est le moins sensible possible à la présence d'impuretés. Dans cette étude, nous n'avons pas utilisé de facteur de sensibilité.

Les domaines de variation des facteurs contrôlés ont été choisis en tenant compte des résultats des essais préalables. Les limites des facteurs de bruit correspondent aux tolérance annoncées par les fournisseurs.

Avec RS/Discover, la définition des facteurs est la première opération à réaliser. Les informations saisies sont présentées dans le tableau I. RS/Discover utilise les éléments fournis au cours de cette étape pour guider l'utilisateur dans les étapes suivantes.

TABLEAU I
Experiment Factors

Factor	Abbrev	Role	Type	Units	Settings	Précision
1. RAPPORT-AS	R	CONTROLLED	QUANTITATIVE		1 to 1.5	0.01
2. DURÉE	D	CONTROLLED	QUANTITATIVE	HEURES	4 to 6	1.00
3. TEMPÉRATURE	T	CONTROLLED	QUANTITATIVE	DEGRES C	90 to 120	1.00
4. PURETÉ-A	A	NOISE	QUANTITATIVE	%	98 to 100	0.01
5. PURETÉ-B	B	NOISE	QUANTITATIVE	%	95 to 100	0.01

2. Stratégie adoptée

Rappelons qu'une stratégie expérimentale de type Taguchi est constituée de deux matrices permettant d'étudier, en laboratoire, l'effet des facteurs contrôlés sur la réponse ainsi que sur sa variabilité induite par les facteurs de bruit.

La matrice "principale" ("inner array") est construite avec les facteurs contrôlés et les facteurs de sensibilité. On répète chaque expérience de cette matrice dans les conditions définies par une matrice "de bruit" ("outer array") où l'on fait varier les facteurs sensibilité de la matrice principale et les facteurs non contrôlés (facteurs bruit).

Pour ces deux types de matrice, Taguchi propose tout un ensemble de tables orthogonales. L'originalité du logiciel RS/Discover est d'autoriser aussi l'emploi de toutes les autres matrices d'expériences classiques ou D-optimales. En respectant la démarche proposée par Taguchi, on peut en effet appliquer d'autres matrices que les tables orthogonales dans un souci de choisir la stratégie la mieux adaptée au problème étudié.

Dans cette étude, les facteurs influents étant connus, on cherche à prédire les valeurs du rendement et de sa variabilité en tout point du domaine expérimental choisi. C'est la raison pour laquelle on a préféré une stratégie de type RSM (Response Surface Methodology) à une étude de SCREENING.

L'utilisateur de RS/Discover doit fournir les spécifications du plan d'expériences immédiatement après avoir défini son domaine expérimental (cf. tableau II).

Ni les matrices factorielles ni les tables de Taguchi ne sont adaptées à une étude de surface de réponse, la matrice retenue est une matrice de BOX-BEHNKEN. Elle permet de modéliser la réponse (ici les statistiques de performance) sous la forme d'un modèle quadratique. Cette matrice correspond au "inner array"; pour trois facteurs elle comprend 12 points situés aux milieux des arêtes du cube qui délimite le domaine expérimental plus des points au centre dont le nombre dépend des propriétés recherchées (cf. tableau III).

Dans le but de limiter le nombre d'essais à réaliser, la plus petite matrice possible a été retenue pour les matrices de bruit, c'est un plan factoriel 2^2 nécessitant 4 expériences (cf. tableau IV).

TABLEAU II
Experiment Specifications

Parameter	Value
1. Controlled Factors	3
2. Objective	TAGUCHI
3. Max. Blocksize	UNLIMITED
4. Model Type	QUADRATIC
5. Design Type	BOX-BEHNKEN
6. Centerpoints	1
7. Number of Runs	13
8. Outer Array Runs	4
9. Number of Blocks	1
10. Run Order	RANDOM

TABLEAU III
Experiment Design (BOX-BEHNKEN)

Runs	RAPPORT-AS	DURÉE (HEURES)	TEMPÉRATURE (DEGRÉS C)
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0

Le plan complet comprend donc $13 \times 4 = 52$ expériences, un nombre relativement important justifié par la qualité et la quantité des informations qui seront obtenues (cf. figure 1).

TABLEAU IV
Outer array design (FULL-FACTORIAL)

Runs	Pureté-A (%)	Pureté-B (%)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

LES MATRICES D'EXPERIENCES

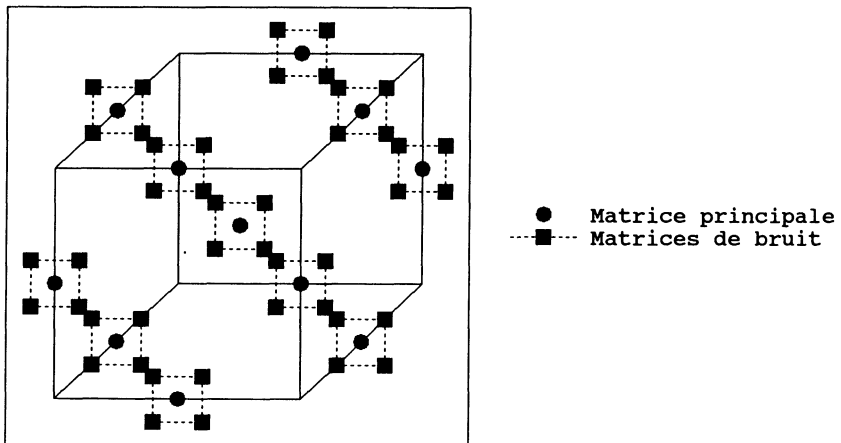


FIGURE 1

3. Choix des statistiques de performance

L'analyse d'un plan d'expériences Taguchi passe par le calcul, pour chaque matrice de bruit, d'un "ratio signal/bruit" appelé aussi "statistique de performance". Ces valeurs sont traitées comme les réponses de la matrice principale et permettent, selon Taguchi, d'optimiser simultanément la réponse et sa variabilité.

L'autre originalité de RS/Discover, est la diversité particulièrement grande des statistiques de performance qu'il propose. Les "ratios signal/bruit" ("smaller is better", "larger is better", "target is best") de Taguchi sont présents et complétés par d'autres plus simples à interpréter. L'utilisateur a même la possibilité de définir ses propres statistiques par des formules mathématiques.

Pour cette étude, quatre statistiques de performance ont été retenues (cf. tableau V).

– MOY REND : la moyenne des rendements.

Le modèle ajusté sur cette grandeur permet d’optimiser le rendement de la réaction.

– LOGS REND : l’opposé du logarithme décimal de l’écart-type des rendements.

Elle est utilisée comme une mesure de la variabilité du rendement et prend des valeurs élevées quand la variabilité est faible.

– EFFET A : l’effet de la pureté du réactif A.

– EFFET B : l’effet de la pureté du réactif B.

Chaque matrice de bruit est un plan factoriel qui permet de calculer l’effet de chacun des facteurs bruit sur le rendement en chaque point de la matrice principale. RS/Discover permet d’utiliser cette statistique de performance, particulièrement simple à interpréter, pour analyser la variabilité.

TABLEAU V
Experiment Performance Statistics

Perf-Stat Name	Abbrev	Source Response	Statistics
1. MOY-REND	MY	RENDEMENT	MEAN
2. LOGS-REND	SY	RENDEMENT	–LOG10(STDEV)
3. EFFET-A	EA	RENDEMENT	EFFECT (A)
4. EFFET-B	EB	RENDEMENT	EFFECT (B)

4. Analyse des résultats expérimentaux

RS/Discover fournit à l’utilisateur une feuille d’expériences (worksheet) qui dans le cas d’un plan Taguchi comporte autant de tableaux qu’il y a d’essais dans la matrice principale. Chaque tableau représente une matrice de bruit où les facteurs figurent en valeurs naturelles et où les essais apparaissent dans un ordre aléatoire.

L’utilisateur saisit la valeur du rendement pour chaque essai des matrices de bruit et RS/Discover calcule automatiquement les statistiques de performance pour chaque point de la matrice principale (cf. tableaux VI et VII).

4.1 Analyse statistique

Dans l’étape d’analyse des résultats, RS/Discover calcule, pour chaque statistique de performance, les coefficients du modèle mathématique par la méthode des moindres carrés. Les résultats obtenus sont exploités ensuite dans un menu “interprétation” qui fournit à l’utilisateur des outils de visualisation graphique

TABLEAU VI
Experiment Inner array Worksheet

	RAPPORT-AS	DURÉE (HEURES)	TEMPÉRATURE (DEGRES C)	MOY-REND	LOGS-REND	EFFET-A	EFFET-B
1	1.25	6	90	20.125	-0.106870	1.95	1.05
2	1.25	4	120	36.150	-0.569572	6.30	1.00
3	1.00	5	90	72.800	-0.330433	3.70	0.20
4	1.25	6	120	57.775	-0.184840	2.45	0.85
5	1.50	5	120	67.725	-0.406763	4.05	1.75
6	1.00	6	105	99.475	0.025508	1.55	0.25
7	1.00	5	120	78.325	-0.365492	3.95	0.35
8	1.50	6	105	11.025	-0.345799	2.55	2.85
9	1.50	4	105	91.025	-0.561313	5.65	2.75
10	1.25	4	90	58.075	-0.539877	5.85	1.35
11	1.50	5	90	44.075	-0.421383	3.85	2.45
12	1.25	5	105	63.375	-0.322178	3.55	0.75
13	1.00	4	105	31.650	-0.548281	6.10	-0.50

TABLEAU VII
Outer Array Worksheet

	PURETÉ-A (%)	PURETÉ-B (%)	RENDEMENT (%)
1	98.00	100.00	28.4
2	100.00	100.00	34.4
3	100.00	95.00	35.0
4	98.00	95.00	28.8
Rapport-AS = 1			
Durée = 4			
Température = 105			

(courbes de niveaux, diagrammes en trois dimensions), et lui permet de faire de la prévision et de l'optimisation.

Le modèle quadratique a été ajusté pour chaque statistique de performance de l'étude en cours. Les valeurs des coefficients pour MOY REND et LOGS REND sont montrés à titre d'exemple dans les tableaux VIII et IX. Dans une étude de surface de réponse on ne cherche en général pas à interpréter les coefficients

individuellement mais on utilise le modèle globalement pour explorer le domaine expérimental.

TABLEAU VIII
Least Squares Coefficients, Response MY

Term	Coeff.	Std. Error	T-value	Signif.
1 I	63.375000	3.554267	17.83	0.0004
2 R	-8.550000	1.256623	-6.80	0.0065
3 D	-3.562500	1.256623	-2.83	0.0659
4 T	5.612500	1.256623	4.47	0.0209
5 R**2	8.809375	2.350927	3.75	0.0332
6 R*D	-36.956250	1.777133	-20.80	0.0002
7 R*T	4.531250	1.777133	2.55	0.0840
8 D**2	-13.890625	2.350927	-5.91	0.0097
9 D*T	14.893750	1.777133	8.38	0.0036
10 T**2	-6.453125	2.350927	-2.74	0.0710

No. Cases = 13 R-sq. = 0.9956 RMS Error = 3.554
Resid. df = 3 R-sq-adj. = 0.9822 Cond. No. = 7.515

TABLEAU IX
Least Squares Coefficients, Response SY

Term	Coeff.	Std. Error	T-value	Signif.
1 I	-0.322178	0.054765	-5.88	0.0098
2 R	-0.064570	0.019362	-3.33	0.0446
3 D	0.200880	0.019362	10.37	0.0019
4 T	-0.016013	0.019362	-0.83	0.4689
5 R**2	-0.033010	0.036224	-0.91	0.4293
6 R*D	-0.089569	0.027382	-3.27	0.0467
7 R*T	0.012420	0.027382	0.45	0.6809
8 D**2	-0.002282	0.036224	-0.06	0.9537
9 D*T	-0.012069	0.027382	-0.44	0.6892
10 T**2	-0.025829	0.036224	-0.71	0.5273

No. Cases = 13 R-sq. = 0.9777 RMS Error = 0.05476
Resid. df = 3 R-sq-adj. = 0.9109 Cond. No. = 7.515

4.2 Analyse graphique

C'est en combinant l'analyse des graphiques isoréponse et le module d'optimisation qu'on peut trouver dans le domaine une ou plusieurs régions d'intérêt.

La figure 2 représente une coupe du domaine expérimental à la température de 105 degrés. Le premier facteur (rapport A/S) varie de 1 à 1.5 sur l'axe des abscisses et le deuxième (durée) varie de 4 à 6 heures en ordonnée. Les deux statistiques, MOY REND et LOGS REND, sont représentées sur le graphique.

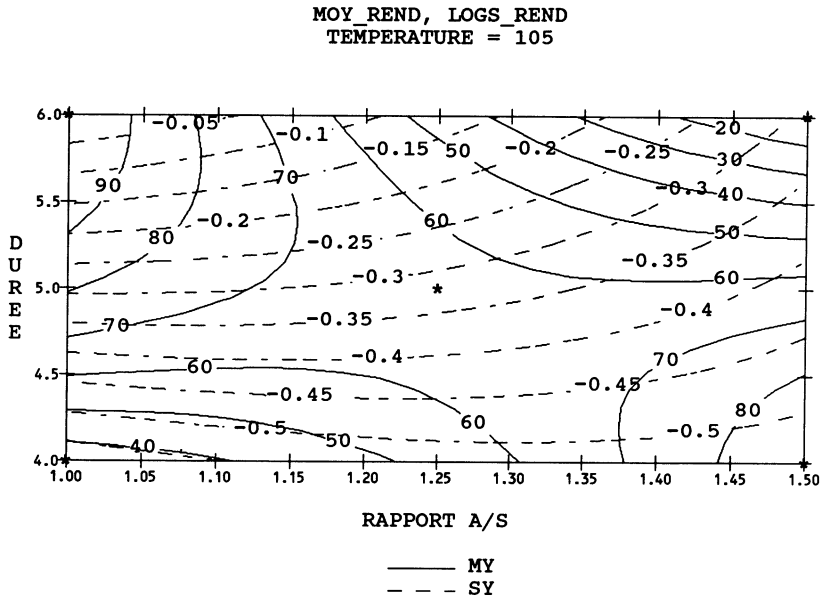


FIGURE 2

On remarque qu'il existe deux zones où le rendement moyen est supérieur à 80%. La première zone correspond à un rapport A/S élevé (R supérieur à 1.4) et une durée faible (D inférieure à 4h30) et l'autre à un rapport A/S faible (R inférieur à 1.08) et une durée élevée (D supérieure à 5h). Ce résultat n'est guère surprenant étant donné la valeur particulièrement importante du terme d'interaction entre ces deux facteurs ($R \times D = 36.9$) par rapport à l'ensemble des coefficients du modèle.

L'examen de l'autre statistique de performance que l'on souhaite aussi maximale nous montre tout d'abord que les deux grandeurs évoluent différemment dans le domaine expérimental. Il faut donc déterminer une région pour laquelle les valeurs de ces deux statistiques de performance se rapprochent le plus possible des objectifs fixés. La figure 2 montre que la seconde zone optimale précédemment définie permet d'obtenir aussi un LOGS REND maximal. Par ailleurs, le graphique met en évidence l'effet important de la durée sur LOGS REND.

La figure 3 représente la même coupe du domaine expérimental. L'effet de A, l'effet de B et le rendement moyen y sont représentés. Il apparaît clairement que

l'effet de A est plus important que l'effet de B qui n'est peut-être pas significatif. Cela permet de conclure que, mise à part l'erreur expérimentale, la variabilité observée est due la teneur en impuretés du réactif A.

EFFET A, EFFET B, MOY_REND
TEMPERATURE = 105

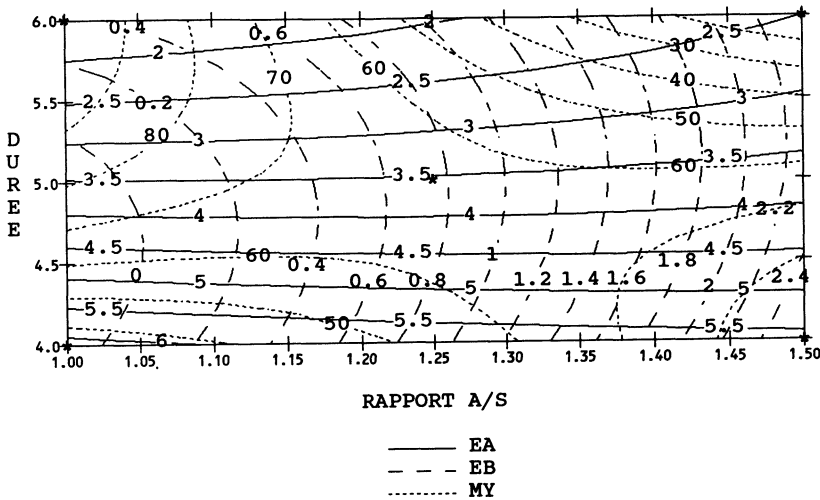


FIGURE 3

4.3 Optimisation

L'étude des courbes de niveaux permet de situer la région du domaine expérimental où il est intéressant de travailler. Pour déterminer les coordonnées du meilleur point de fonctionnement, une optimisation du rendement moyen a été effectuée (cf. tableau X). RS/Discover offre la possibilité d'effectuer une optimisation sous contraintes par un simplex. Dans le cas présent, nous avons choisi un point de départ situé dans la zone d'intérêt ($R = 1.05$, $D = 5h20$, $T = 105^{\circ}C$) et une contrainte portant sur la valeur de l'effet de A ($\text{Effet A} < 3$). Les résultats de l'optimisation indiquent la valeur optimale pour chaque facteur ($R = 1$, $D = 5h36$, $T = 110^{\circ}C$) ainsi que la valeur prévue pour chaque statistique de performance; le rendement moyen ainsi obtenu est égal à 99.5% !

Les valeurs des réponses qui apparaissent dans les tracés de courbes de niveaux et les résultats obtenus à l'issue de l'optimisation sont des valeurs estimées à partir du modèle mathématique. A chaque estimation est associé un intervalle de confiance qui représente la précision de la valeur prédite.

Pour n'importe quel point du domaine expérimental, RS/Discover peut prédire la valeur d'une ou plusieurs réponses et donne les limites de l'intervalle de confiance associé. Le tableau XI montre les estimations des rendements moyens obtenus pour les niveaux 1, 1.25 et 1.5 du facteur rapport A/S (R), les niveaux

TABLEAU X
Optimisation

Factor, Response or Formula	Range	Initial Setting	Optimal Value
Factors			
RAPPORT-AS	1 to 1.5	1.05	1.0001
DURÉE	4 to 6	5.3	5.653
TEMPÉRATURE	90 to 120	105	110.14
Responses			
EFFET-A	< 3		2.2761
EFFET-B			0.19989
MOY-REND	Max		99.548
LOGS-REND			-0.11745
Converged to a tolerance of 0.00885 after 47 steps.			

TABLEAU XI

Predictions and 95% non-simultaneous confidence intervals
for mean responses of MOY REND T = 110

R		D = 4	D = 5	D = 5.6
1.00	Lower	18.030260	72.064762	90.143259
	Predicted	28.128813	80.377767	98.392144
	Upper	38.227367	88.690771	106.641028
1.25	Lower	40.923102	53.749344	51.077110
	Predicted	49.236106	64.528809	60.369436
	Upper	57.549111	75.308275	69.661763
1.50	Lower	77.863594	57.985596	31.716592
	Predicted	87.962147	66.298600	39.965477
	Upper	98.060700	74.611605	48.214362

4, 5, 5.6 de la durée (D) et la température (T) de 110°C. La figure 4 visualise graphiquement les mêmes résultats. L'interaction entre les facteurs rapport A/S et durée y apparaît clairement.

Predictions and 95% non-simultaneous confidence intervals
for mean responses of MOY_REND T = 110

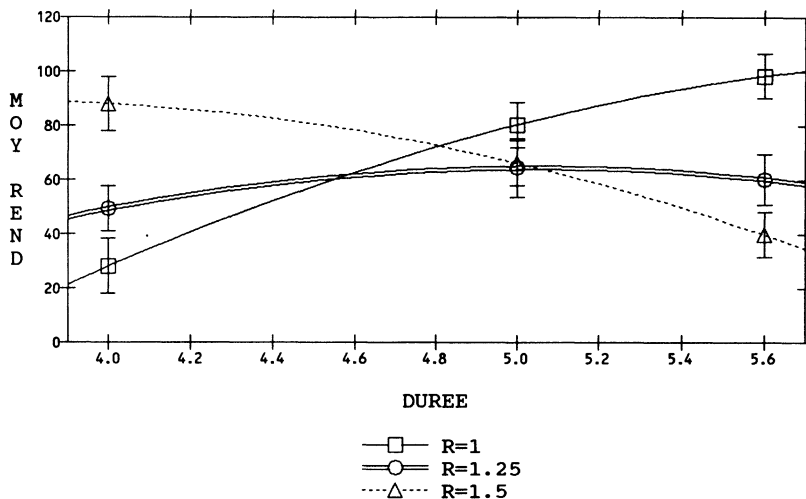


FIGURE 4

Conclusion

Cette étude met en lumière l'idée fondamentale de Taguchi : la variabilité de la production cause de non-qualité et de pertes économiques, doit être limitée autant que faire se peut mais il n'est pas toujours nécessaire de recourir à des solutions onéreuses qui consisteraient à contrôler les facteurs d'environnement que sont ici les puretés des réactifs principaux. La recherche d'une région opératoire où les facteurs de bruit ont le plus petit effet possible sur la réponse étudiée représente une alternative nettement plus intéressante. La possibilité offerte par le logiciel RS/Discover d'appliquer les méthodes de Taguchi à des matrices de surface de réponse et d'utiliser des outils statistiques et graphiques puissants (dont on a ici seulement un aperçu) pour réaliser les analyses, permet d'acquérir une connaissance approfondie du phénomène étudié et de réaliser pleinement cet objectif. Les statistiques de performance originales mises à la disposition de l'utilisateur en complément des classiques ratios signal/bruit de Taguchi autorisent une interprétation plus précise et une compréhension en profondeur des variabilités observées.

Bibliographie

- BOX G.E.P. et BEHNKEN D.W. (1960). – "Some New Three-Level Design for the Study of Quantitative Variables". *Technometrics*, 2 : 455-475.
- BOX G.E.P. et DRAPER NORMAN R. (1987). – *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. New York, Wiley.

- BOX G.E.P., HUNTER W.G. et HUNTER J.S. (1978). – *Statistics for Experimenters*. New York, Wiley.
- BOX G.E.P. (1988). – “Signal-to-Noise Ratios, Performance Criteria and Transformations”. *Technometrics*, 30 : 1-40.
- FEDOROV V.V. (1972). – *Theory of Optimal Experiments*. New York : Academic Press.
- HUNTER J.S. (1985). – “Statistical Design Applied to Product Design”. *Journal of Quality Technology*, 17 : 210-221.
- JONES B.A. (1988). – “A Robust Approach to Taguchi Methods”. Proceedings of the 12th Annual Rocky Mountain Quality Conference, pp. 325-339.
- KACKAR R.N. (1985). – “Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method”. *Journal of Quality Technology*, 17 : 176-188.
- LEON R.V., SHOEMAKER A.C. et KACKAR R.N. (1987). – “Performances Measures Independent of Adjustment”. *Technometrics*, 29 : 253-286.
- PIGNATIELLO J.J. et RAMBERG J.S. (1985). – “Off-Line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method. A Discussion”. *Journal of Quality Technology*, 17 : 198-206.
- TAGUCHI G. (1978). – “Performance Analysis Design”. *International Journal of Production Research*, 16 : 521-530.
- TAGUCHI G. (1985). – “Quality Engineering in Japan”. *Bull. Japan Soc. of Proc. Eng.*, 19 : 237-242.
- TAGUCHI G. (1985). – *Introduction to Quality Engineering : Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization, UNIPUB, Kraus Intern. Public. White Plains, N-Y.
- TAGUCHI G. (1981). – *On-Line Quality Control during Production* Japan Stand. Ass., Tokyo.
- TAGUCHI G. et PHADKE M.S. (1984). – “Quality Engineering throught Design Optimization”. *Conf. Record vol. 3, IEEE Globecom Conference, Atlanta, GA., 1984* : 1106-1113.
- TAGUCHI G. et WU Y. (1985). – “Introduction to Off-Line Quality Control”. Central Japan Quality Control Association.
- TAGUCHI G. (1960). – “Tables of Orthogonal Arrays and Linear Graphs”. *Rep. Stat. Appl. Res. JUSE*, 6, 5 : 176-227.
- TAGUCHI G. (1960). – “Linear Graphs for Orthogonal Arrays and their Applications to Experimental Designs with the Aid of Various Techniques”. *Rep. Stat. Appl. Res. JUSE*, 6, 4 : 134-175.