

Optimisation du poids de fabrication d'une bouteille de verre creux (CC35) via l'approche Taguchi

A. ADIL* et A. MOUTAWAKIL

*Laboratoire de Physique Subatomique et Applications, Université Hassan II-Mohammedia-Casablanca,
Faculté des Sciences Ben M'Sik, B.P. 7955, Casablanca, Maroc*

* Correspondance, courriel : abdelfatahadil@yahoo.fr

Résumé

Dans l'industrie du verre d'emballage, la partie la plus importante des pertes financières, est la résultante des écarts des caractéristiques qualité du produit fabriqué par rapport aux spécifications exigées dans le cahier des charges. Nous avons choisi d'illustrer ce problème à travers un produit de référence portant le nom de code CC35, qui est une bouteille de verre destinée à une marque de boissons gazeuses de renommée mondiale. Dans le procédé de fabrication du verre creux, il y a de nombreux paramètres contrôlables et non contrôlables qui peuvent affecter la caractéristique qualité du produit. Dans cette étude nous nous sommes limité aux facteurs contrôlables qui ont fait l'objet de l'étude expérimentale.

Notre objectif est de proposer des solutions permettant de réduire les pertes économiques et garantir des améliorations du système de production. C'est un travail d'optimisation visant à obtenir la qualité à moindre coût, c'est-à-dire garantir l'efficacité et l'efficience du système de production. Dans ce sens, l'approche des plans d'expérience de Taguchi constitue une manière efficace pour optimiser l'exécution de processus de fabrication via une matrice d'expériences bien organisée. Pour la réalisation expérimentale suivant un plan d'expérience factorielle, 8192 expériences auraient été nécessaires. En utilisant le concept des plans d'expériences de Taguchi, seulement 16 expériences étaient nécessaires pour cette étude d'optimisation.

L'analyse de la variance et le rapport signal/bruit ont été employés pour évaluer la contribution de chacun des paramètres contrôlables dans le processus d'optimisation du procédé de fabrication.

Pour déterminer le poids optimal à atteindre de la bouteille étudiée désignée par le code CC35, treize paramètres de commande ont été choisis et évalués à deux niveaux distincts.

Mots-clés : *optimisation, fonction Perte de Taguchi, méthode Taguchi, indices de capabilité, ANOVA.*

Abstract

Optimisation weight of manufacturing a hollow bottle of glass (CC35) via Taguchi approach

In the industry of glass of packing, the most significant part of the financial losses is the resultant of the variations of the characteristics quality of the product manufactured compared to the required specifications. We chose to illustrate this problem through a referenced product CC35, which is a bottle of glass, intended for an international soda product.

A. ADIL et A. MOUTAWAKIL

In the manufacturing process of hollow glass, there are many controllable and no-controllable parameters which can affect the characteristic quality of the product. These papers are focused on the influence of the controllable parameters of the manufacturing process on the Weight of the product CC35.

Our objective is to propose solutions making it possible to reduce the economic losses and to guarantee improvements of the system of production. It is a work of optimization aiming at obtaining quality at lower cost, i.e. to guarantee the effectiveness and the efficiency of the system of production. In this direction, the approach of the experimental designs of Taguchi constitutes an effective manner to optimize the execution of manufacturing process via an organized experimental matrix. For the experimental realization according to a factorial experimental design, 8192 experiments would have been necessary. By using the concept of the experimental designs of Taguchi, only 16 experiments were necessary for this study of optimization. The analysis of the variance and the report/ratio signal-to-noise were employed to evaluate the contribution of each controllable parameter in the process of optimization of the manufacturing process. To determine the optimal weight to reach studied bottle CC35, thirteen parameters of order selected and were evaluated on two distinct levels.

Keywords : *optimization, Taguchi quality loss function, Taguchi method, indices of capability, ANOVA.*

1. Introduction

Le poids est la caractéristique qualité la plus importante dans le processus de fabrication du produit CC35. La maîtrise du processus de fabrication vise l'atteinte des valeurs assurant la satisfaction du client et la rentabilité pour l'entreprise. Pour cet article, nous avons calculé via la fonction PERTE de TAGUCHI (QLF), une perte moyenne causée par les déviations de la caractéristique « Poids » par rapport à la valeur cible nominale (376gr) de 0,25dh/article fabriqué, ce qui représente une part importante du coût du produit. Chose qui nécessite un engagement dans une démarche d'optimisation des paramètres de réglage du procédé de fabrication.

Le procédé de fabrication utilise des machines très sophistiquées de type IS (Individual Section) et qui implique beaucoup de paramètres affectant la valeur finale du poids de la bouteille fabriquée [1]. Ces paramètres représentent des variables contrôlables à chaque étape du procédé de fabrication. Treize Nous en avons identifié treize que nous avons évalués à deux niveaux maximal et minimal.

Suivant l'approche classique d'expérimentation l'identification des paramètres critiques et la recherche des valeurs optimales permettant d'arriver à la valeur cible de la caractéristique « poids », nous aurions été obligés de réaliser une matrice factorielle comportant 8192 expériences [2], ce qui s'avère non réalisable de point de vue technique et économique. D'autre part, la réalisation expérimentale de la matrice factorielle est très onéreuse de point de vue temps et pratiquement irréalisable. Alors, pour remédier à cette problématique nous avons utilisé les l'approche d'expérimentation Taguchi. Suivant cette approche, pour étudier l'impact de treize paramètres nous étions juste besoin de 16 expériences, chose qui nous permis de faire des économies en terme de temps et un meilleur rapport coût/qualité expérimental.

2. Méthodologie

2-1. Plans d'expériences de Taguchi

En nous basant sur les résultats des séances de brainstorming et l'expertises des opérateurs et responsables du service fabrication combinée aux données bibliographiques, nous sommes parvenus à la

définition des facteurs contrôlables du processus fabrication ayant un effet sur le poids des articles produits que nous avons résumé dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Facteurs contrôlables du processus fabrication ayant un effet sur le poids

Facteur		Niveau du réglage			Désignation
		Minimal		Maximal	
A	Température Feeder	Zone 1	1140 °C	1160 °C	TFZ1
		Zone 2	1120 °C	1140 °C	TFZ2
		Zone 3	1118 °C	1142 °C	TFZ3
B	Le diamètre de l'orifice de la rondelle réfractaire du Feeder	46 (mm)		52 (mm)	DORF
C	Température du chauffage du moule	Moule ébaucheur	420 °C	510 °C	TCME
		Moule finisseur	460 °C	560 °C	TCMF
D	Temps de ventilation du moule	Moule ébaucheur	1/3 Cycle	1/2 Cycle	TpVME
		Moule finisseur	1/3 Cycle	1/2 Cycle	TpVMF
E	Température de recuisson de l'arche	Zone 1	500 °C	520 °C	TRZ1
		Zone 2	460 °C	480 °C	TRZ2
		Zone 3	300 °C	320 °C	TRZ3
		Zone 4	180 °C	200 °C	TRZ4
		Zone 5	60 °C	80 °C	TRZ5

Lors du choix et l'utilisation des tables Taguchi, nous avons suivi les étapes suivantes [3] :

Étape 1 : Choisir le nombre de colonnes minimum $n = \text{nombre facteurs} + \text{nombre d'interactions sélectionnées}$. C'est dans cette étape que l'on choisit de ne pas prendre en compte certaines interactions. En effet, les tables de Taguchi sont des plans réduits ce qui ne permettent pas d'obtenir toutes les interactions. Ce choix est primordial car le fait de prendre en compte une interaction supplémentaire peut induire le choix d'une autre table avec le double d'essais.

Étape 2 : Choisir la modalité des facteurs (m). Si les facteurs ont une évolution non linéaire, on aura intérêt à prendre un nombre de modalités supérieur à 2.

Étape 3 : Choisir parmi les tables comportant le nombre de modalités sélectionnées, celles permettant de respecter le nombre de facteurs, le nombre d'interactions choisies, et la disposition relative des interactions par rapport aux facteurs. Ce choix se fait avec les graphes linéaires. Les sommets des graphes indiquent les facteurs et les arcs indiquent les interactions possibles entre les facteurs.

Le nombre des Facteurs = 13, et chaque facteur a deux niveaux, donc la table qui semble la plus adéquate est la table L16 (2^{15}).

Faute d'informations concernant les interactions possibles entre les paramètres de réglage caractérisant le processus de fabrication du produit CC 35, et le nombre élevé des facteurs mis en jeu, nous avons choisi d'étudier juste les effets de chaque facteur et la recherche de l'optimum de fabrication.

Nous avons affecté les facteurs étudiés chacun a une colonne de la table $L_{16}(2^{15})$ (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Affectation des Facteurs contrôlables du processus fabrication ayant un effet sur le poids par colonne ($L_{16}(2^{15})$)

Facteur		Désignation	Affectation par colonne ($L_{16}(2^{15})$)	
A	Température Feeder	Zone 1	TFZ1	1
		Zone 2	TFZ2	2
		Zone 3	TFZ3	3
B	Le diamètre de l'orifice de la rondelle réfractaire du Feeder	DORF	4	
C	Température du chauffage du moule	Moule ébaucheur	TCME	5
		Moule finisseur	TCMF	6
D	Temps de ventilation du moule	Moule ébaucheur	TpVME	7
		Moule finisseur	TpVMF	8
E	Température de recuisson de l'arche	Zone 1	TRZ1	9
		Zone 2	TRZ2	10
		Zone 3	TRZ3	11
		Zone 4	TRZ4	12
		Zone 5	TRZ5	13

La matrice d'expérimentation issue de la table $L_{16}(2^{15})$ est la suivante (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Matrice expérimentale selon plan Taguchi ($L_{16}(2^{15})$)

Expérience	TFZ1 (°C)	TFZ2 (°C)	TFZ3 (°C)	DORF (mm)	TCME (°C)	TCMF (°C)	TVME (Cycle)	TVMF (Cycle)	TRZ1 (°C)	TRZ2 (°C)	TRZ3 (°C)	TRZ4 (°C)
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
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1

2-2. La méthode Taguchi & la mesure de la robustesse

L'objet de la conception robuste est d'optimiser en même temps les performances du produit et de minimiser la sensibilité aux perturbations.

Ces perturbations (Bruit) induisent des variations de la réponse du système. Ainsi, plusieurs essais réalisés avec les mêmes facteurs (conditions d'entrée) donneront des résultats différents à cause du bruit.

Par conséquent, L'écart-type & la moyenne de la population, sont les deux cibles du processus d'optimisation.

Alors pour réduire la variabilité de ces deux critères, deux voies sont possibles :

- 1- Une première façon de procéder est d'optimiser la moyenne et l'écart type séparément. Cette démarche donne souvent de mauvais résultats car la condition qui minimise la variabilité peut aussi être la condition qui cause un écart important par rapport à la moyenne attendue.
- 2- La deuxième approche consiste à améliorer la moyenne et la variabilité en même temps. Nous avons besoin pour cela d'un indice qui prend en compte la moyenne et l'écart type. Genichi Taguchi a proposé dans ses travaux un indice appelé « ratio signal / bruit » qui répond à ce problème. Cet indice est construit de façon à ce que, plus grande est sa valeur, meilleure est la Qualité.

Vue que nous visons dans cette étude une valeur cible nominale de la caractéristiques étudiée « Poids », alors la formule utilisée pour le calcul de l'indice Ratio SN est de type : « Nominal is the better » et que s'écrit comme suit :

$$SNR = -10 \text{Log}_{10} \frac{Y^2}{S^2} \quad (1)$$

avec :

Y^2 : la valeur moyenne des valeurs mesurées de la caractéristique « poids »

S : écart-type

Dans notre étude nous avons adopté cette deuxième démarche pour mesurer l'effet de niveau de chaque paramètre sur la variabilité des résultats obtenus, et sur la base des conclusions obtenues nous sommes arrivé à déterminer l'optimum expérimental garantissant un meilleur résultat avec moins de perturbation et à moindre coût.

3. Résultats et discussion

3-1. Analyse de la réponse du niveau moyen

La réponse du niveau moyen est donnée par le calcul de la valeur moyenne de l'indice SN (signal/Bruit) (SNR) de chaque niveau de chaque facteur et présentée en forme graphique. La moyenne SNR, notée η_{FL} , de chaque niveau est calculée suivant la *formule (2)* et présentée respectivement dans les **Tableaux 4 et 5**.

$$\eta_{FL} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (\eta_i) \quad (2)$$

où η_i est SNR de i expériences impliquant le facteur **F** au niveau **L**.

Par exemple : le calcul de la valeur moyenne SNR du facteur TRZ1 au niveau (1) est le suivant :

$$\eta_{TRZ_1} = \frac{1}{8} (47,53 + 47,44 + 42,76 + 45,44 + 48,34 + 50,064 + 57,18 + 50,204) = 46,97$$

Tableau 4 : SNR de la caractéristique « Poids »

Expéri ence N°	Niveaux de facteurs																
	TFZ1 (°C)	TFZ2 (°C)	TFZ3 (°C)	TFZ1 (°C)	TFZ2 (°C)	TFZ3 (°C)	DORF (mm)	TCME (°C)	TCMF (°C)	TpVME (Cycle)	TpVMF (Cycle)	TRZ1 (°C)	TRZ2 (°C)	TRZ3 (°C)	TRZ4 (°C)	TRZ5 (°C)	SN
1	1160	1120	1118	1160	1120	1118	46	420	460	1/2	1/2	500	460	300	180	60	47,53
2	1160	1120	1118	1160	1120	1118	46	420	460	1/2	1/3	520	480	320	200	80	47,44
3	1160	1120	1118	1160	1120	1118	52	510	560	1/3	1/2	500	460	300	200	80	42,76
4	1160	1120	1118	1160	1120	1118	52	510	560	1/3	1/3	520	480	320	180	60	45,44
5	1160	1140	1142	1160	1140	1142	46	420	560	1/3	1/2	500	480	320	180	60	48,34
6	1160	1140	1142	1160	1140	1142	46	420	560	1/3	1/3	520	460	300	200	80	50,06
7	1160	1140	1142	1160	1140	1142	52	510	460	1/2	1/2	500	480	320	200	80	57,18
8	1160	1140	1142	1160	1140	1142	52	510	460	1/2	1/3	520	460	300	180	60	50,20
9	1140	1120	1142	1140	1120	1142	46	510	460	1/3	1/2	520	460	320	180	80	38,05
10	1140	1120	1142	1140	1120	1142	46	510	460	1/3	1/3	500	480	300	200	60	50,87
11	1140	1120	1142	1140	1120	1142	52	420	560	1/2	1/2	520	460	320	200	60	39,26
12	1140	1120	1142	1140	1120	1142	52	420	560	1/2	1/3	500	480	300	180	80	50,01
13	1140	1140	1118	1140	1140	1118	46	510	560	1/2	1/2	520	480	300	180	80	52,36
14	1140	1140	1118	1140	1140	1118	46	510	560	1/2	1/3	500	460	320	200	60	50,06
15	1140	1140	1118	1140	1140	1118	52	420	460	1/3	1/2	520	480	300	200	60	46,20
16	1140	1140	1118	1140	1140	1118	52	420	460	1/3	1/3	500	460	320	180	80	48,93

Tableau 5 : SNR du niveau chaque facteur

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 1-Niveau 2	Niveau optimal
TFZ1 (°C)	46,97	48,62	-1,65	2
TFZ2 (°C)	45,17	50,42	-5,25	2
TFZ3 (°C)	47,59	48,00	-0,41	2
DORF (mm)	48,09	47,50	0,59	2
TCME (°C)	47,22	48,37	-1,15	2
TCMF (°C)	48,30	47,29	1,01	1
TpVME (Cycle)	49,26	46,33	2,92	1
TpVMF (Cycle)	46,46	49,13	-2,67	2
TRZ1 (°C)	49,46	46,13	3,33	1
TRZ2 (°C)	45,86	49,73	-3,87	2
TRZ3 (°C)	48,75	46,84	1,91	1
TRZ4 (°C)	47,61	47,98	-0,37	2
TRZ5 (°C)	47,24	48,35	-1,11	2

En général, Une moyenne plus élevée SNR entre les deux niveaux de chaque facteur implique le niveau optimal du facteur. Comme il est montré dans le tableau (**Tableau 5**), le niveau optimal pour le facteur TFZ1 est au niveau élevé (2), (TFZ1) 2. Par contre, le niveau bas (1) représente le niveau optimal pour le

facteur TCMF, (TCMF) 1. La différence absolue entre les valeurs moyennes de SNR des deux niveaux indique l'effet de chaque facteur. Plus la différence est grande, plus est l'influence sur la performance est forte. Le graphique (**Figure 1**), permet de visualiser clairement les effets de chaque facteur sur la performance du système. Plus la pente de la ligne liant les deux niveaux d'un facteur est importante plus l'effet est significatif.

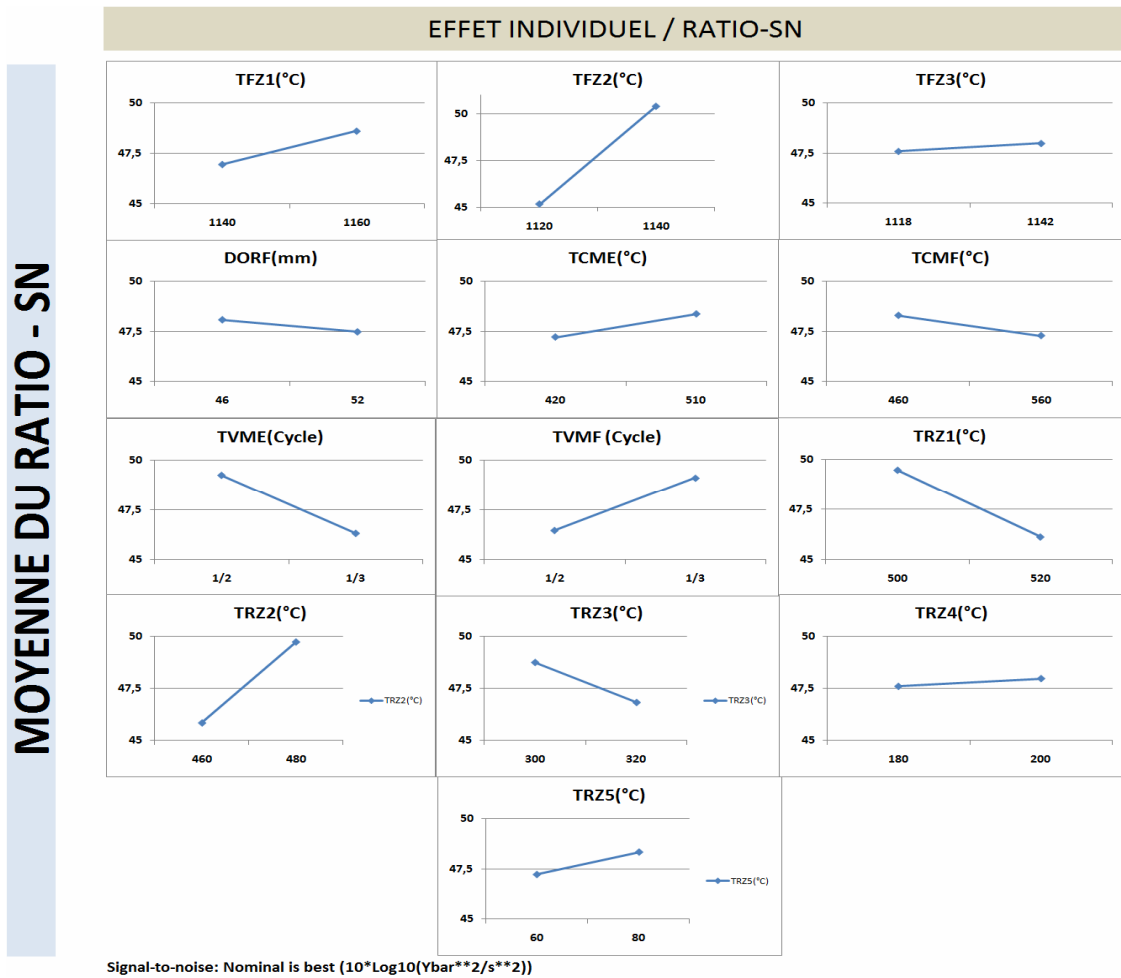


Figure 1 : Graphes des effets des paramètres de contrôle en fonction du Ratio-SN

3-2. Analyse de la Variance (ANOVA)

L'objectif principal de l'analyse de la variance est de déterminer l'influence de chaque paramètre sur la variabilité des résultats et sa contribution par rapport à la variance total de l'ensemble des facteurs mis en jeu.

Lors de cet analyse, plusieurs éléments tel que : degré de liberté, somme des carrés, test de Fisher etc., sont calculés et organisé dans un tableau de format standard.

Ces éléments et leurs interrelations sont définis et leurs formules mathématiques sont présentées dans la table 4. [3-5].

Les résultats des expériences ont été évalués par l'analyse de la variance (ANOVA).

Ce qui suit, les formules utilisées pour le calcul ANOVA.

$$SS = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^N (y_i^2 - CF) \quad (3)$$

SS_T : somme des carrés totale,
 y_i : valeur de chaque résultat,
 \bar{y} : valeur moyenne des résultats,
 CF : facteur de correction.

$$CF = \frac{T^2}{N} \quad (4)$$

T : la somme totale des résultats,
 N : nombre de résultats.

Par exemple, Pour calculer l'effet individuel d'un facteur A sur le résultat mesurée, nous avons utilisé la formule :

$$SS_A = \frac{A_1^2}{N_{A1}} + \frac{A_2^2}{N_{A2}} + \dots + \frac{A_N^2}{N_{AN}} - \frac{T^2}{N} \quad (5)$$

A_i : la somme de résultats (y_i) où le paramètre A_i est présent,
 N_{A_i} : nombre d'expériences où le paramètre A_i est présent.

Pour compléter l'analyse ANOVA, Les équations suivantes sont nécessaires à calculer :

$$V_A = \frac{SS_A}{f_A} \quad (6)$$

V_A : variance,
 f_A : degré de liberté du facteur A.

$$f_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (7)$$

f_A : F ratio,
 V_e : variance de l'erreur.

$$P_A = \frac{SS_A}{SS_T} \quad (8)$$

P_A : influence ou pourcentage de contribution du facteur A.

Les degrés de liberté f sont une partie importante de l'analyse statistique parce qu'ils nous fournissent des informations additionnelles sur le processus. Les degrés de liberté pour la table de Taguchi sont Définis comme suit :

Degré de liberté pour un paramètre A :

$$f_A = (\text{nombre de niveaux du paramètre A}) - 1 \quad (9)$$

Degré de liberté total :

$$f_t = (\text{Nombre d'expériences}) \times (\text{nombre de répétitions}) - 1 \tag{10}$$

Degré de liberté d'erreur de la variance :

$$f_e = f_T - \sum f_i, \text{ avec } i = A, B, \dots \text{ avec } (i = A, B, \dots) \tag{11}$$

Le **Tableau 6** récapitule l'ensemble des formules utilisées lors de l'analyse de la variance.

Tableau 6 : Récapitulatif des formules utilisées pour le calcul ANOVA des résultats expérimentaux

Source de la variation	ddl = f	Somme des Carrés des Écartés (S)	Variance : V	F	P %
Facteur A	$f_A = a - 1$	$SS_A = A^2_1 / N_{A1} + A^2_2 / N_{A2} - FC$	$V_A = SS_A / f_A$	V_A / V_e	$P_A = (SS_A - f_A \times V_e) * 100 / SS_T$
Facteur B	$f_B = b - 1$	$SS_B = B^2_1 / N_{B1} + B^2_2 / N_{B2} - FC$	$V_B = SS_B / f_B$	V_B / V_e	$P_B = (SS_B - f_B \times V_e) * 100 / SS_T$
Erreur	$f_e = f_t - f_A - f_B$	$S_e = S_t - S_A + S_B$	$V_e = S_e / f_e$		$P_e = (S_e + (f_A + f_B) \times V_e) * 100 / SS_T$
Total	$f_t = N - 1$	$SS_T = (\text{somme des carrées de tout les résultats}) - FC$ $SS_T = S_e + SS_A + SS_B$			FC : Facteur de correction $FC = T^2 / n$ T = Somme globale des résultats n = nombre de résultats

L'analyse de la variance a contribué aux résultats suivants (**Tableau 7**):

Tableau 7 : Analyse de la variance de chacun des facteurs de contrôle de la caractéristique Poids [6]

Facteur	f	S	V	F	P %	CF
TFZ1	1	77,52225	77,52225	55,54723032	4,73	F0,05 (1 ; 98) = 3,9201
TFZ2	1	529,1971612	529,1971612	379,1588474	32,30	
TFZ3	1	9,22727041	9,22727041	6,64944944	0,57	
DORF	1	17,181025	17,181025	12,30984993	1,05	
TCME	1	21,74889847	21,74889847	15,58263702	1,33	
TCMF	1	29,44612704	29,44612704	21,09754248	1,20	
TpVME	1	105,0039367	105,0039367	75,23315418	6,41	
TpVMF	1	119,286612	119,286612	85,84043382	7,31	
TRZ1	1	121,619	121,619	87,16752468	7,43	
TRZ2	1	361,9234469	361,9234469	259,3106824	22,09	
TRZ3	1	81,314	81,314	58,29304793	4,97	
TRZ4	1	6,076225	6,076225	4,353489845	0,37	
TRZ5	1	21,5163449	21,5163449	15,4111718	1,31	
ERREUR	98	136,7799332	1,39571314		8,35	
TOTAL	111	1638,511812	14,76136767		100,00	

Le test Fisher montre que tous les facteurs semblent avoir un effet significatif sur le poids du produit CC 35. (*Figure 2*).

Le pourcentage de contribution reflète aussi l'effet de chaque facteur sur le résultat final ; et en fonction de ce pourcentage on peut, avec un risque d'erreur de 8 %, de classer les facteurs en trois catégories :

1. Facteurs à effet très significatif : dans cette classe, on trouve les facteurs : TFZ2, TRZ2, TRZ1, TpVMF et TpVME,

2. Facteurs à effet moyennement significatif : TRZ3, TFZ1, TCME, TRZ5, et TCMF

3. Facteurs à effet peu significatif : DORF, TFZ3 et TRZ4

Le *Tableau 7* et la *Figure 2* montrent que le facteur Température du feeder, constitue le paramètre le plus influent avec un pourcentage d'effet de contribution de l'ordre de 32,30 %, suivi par le facteur (TRZ2) Température de la zone2 de l'arche de cuisson (22,09 %), le facteur (TRZ1) Température de la zone1 de l'arche de cuisson TRZ1(7,43 %), Temps de ventilation du moule finisseur TpVMF (7,31 %), et enfin Temps de ventilation du moule ébaucheur TpVME (6,41 %).

Ces cinq facteurs ont un effet de contribution avoisinant le 80 % de l'effet total de l'ensemble des 13 facteurs mis en jeu. Chose qui nous permet de dire que le champ d'amélioration et d'optimisation de la variabilité du système doit se porter sur ces cinq facteurs.

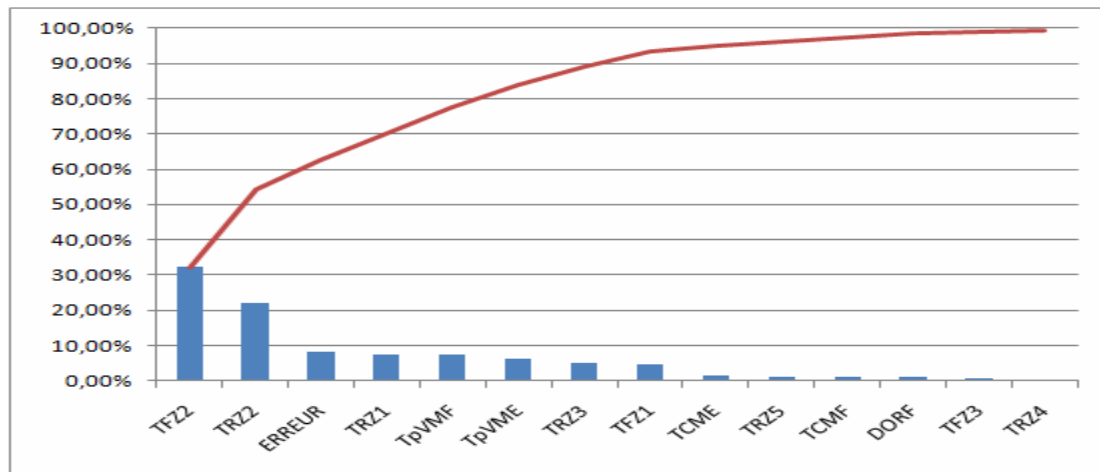


Figure 2 : Pourcentage de contribution des paramètres de contrôle

3-3. L'optimum expérimental

L'exploitation des résultats issus des calculs Ratio SN, nous avons arrivé à déterminer l'optimum expérimental par la détermination des niveaux optimaux de chaque facteur de contrôle de caractéristique « poids » pour l'article CC 35 : (*Tableau 8*).

Tableau 8 : Optimum expérimental

TFZ1 (°C)	TFZ2 (°C)	TFZ3 (°C)	DORF (mm)	TCME (°C)	TCMF (°C)	TpVME (Cycle)
1160	1140	1142	46	510	460	1/2
TpVMF (Cycle)	TRZ1 (°C)	TRZ2 (°C)	TRZ3 (°C)	TRZ4 (°C)	TRZ5 (°C)	
1/3	500	480	300	200	80	

Une fois déterminé, l'optimum de l'expérimentation doit être vérifié et validé. Pour ce faire, nous avons procédé comme suit :

Étudier stabilité du système

Nous avons prélevé 7 échantillons de taille $n=19$, et nous avons suivi l'évolution des valeurs « Poids », les résultats figure dans la carte Xbar-R suivante (Figure 3) [7].

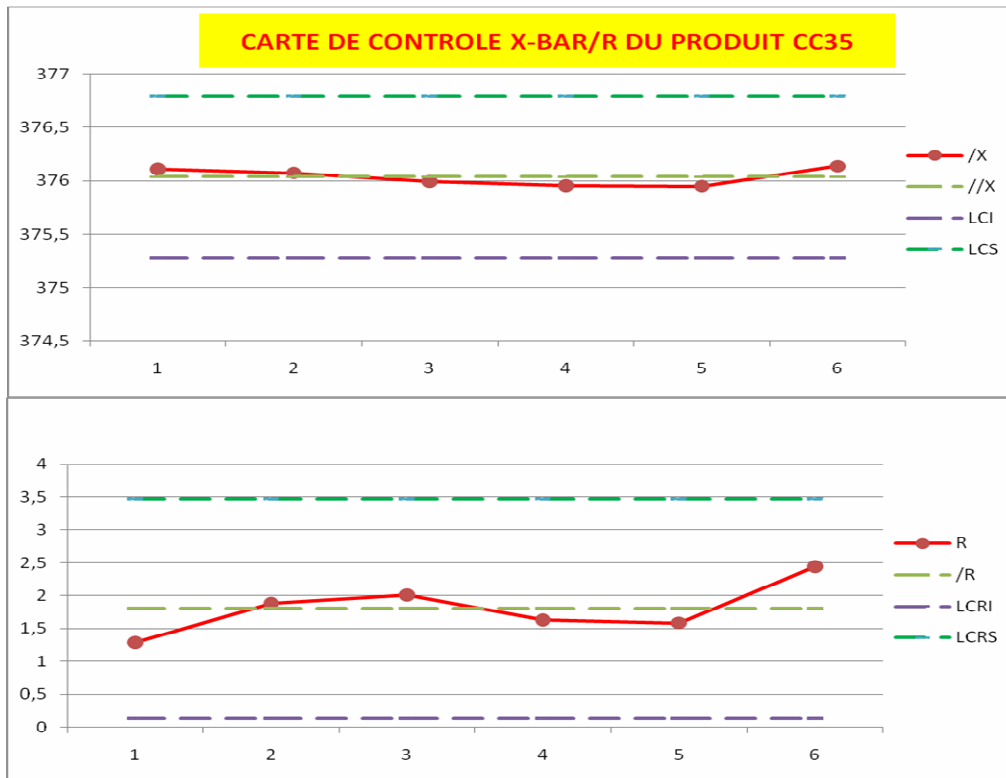


Figure 3 : Carte de contrôle Xbar-R du processus de fabrication du produit CC35

Nous constatons que le processus est stable caractérisé par une répartition autour de la ligne centrale et sous contrôle.

Étudier la capacité du processus de fabrication

Pour le court terme

Toutes les valeurs de C_p , C_{pk} et C_{pm} dépassent 1,5, chose qui montre que le processus de fabrication est capable de produire des articles dont la distribution des valeurs de la caractéristique Poids est centrée sur la valeur cible et ont une dispersion relativement réduite [7,8].

Pour le long terme

De même, les valeurs des indices de capacité P_p et P_{pk} donnent l'impression que le système est capable à produire des produits de qualité souhaitée si les conditions optimales sont maintenues.

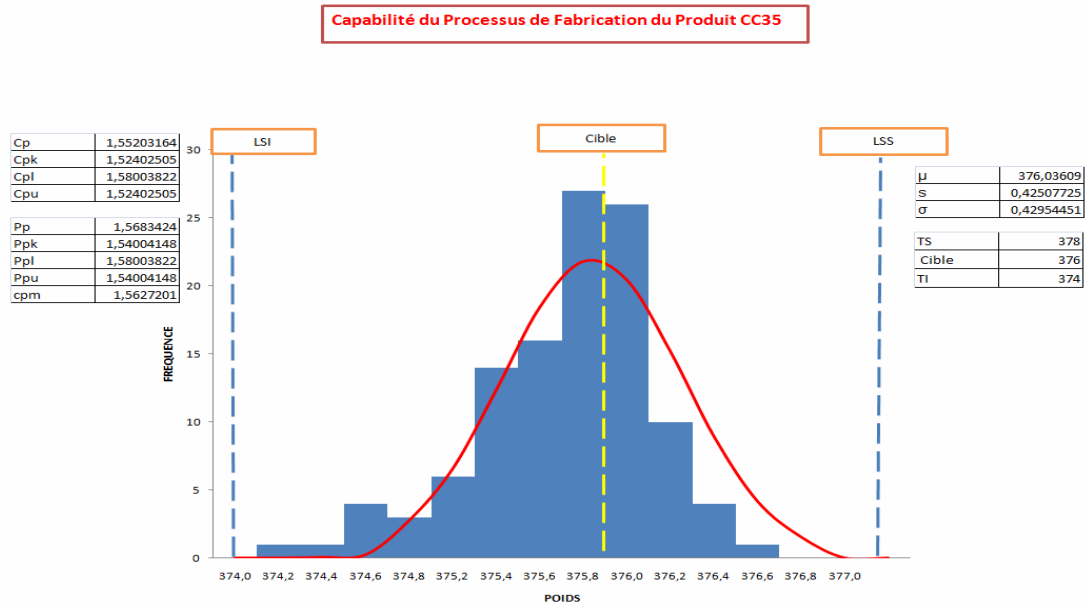


Figure 4 : Capabilité du processus de fabrication du produit CC 35

Calcul de la fonction perte de Taguchi

La nouvelle valeur de la perte financière moyenne (L) générée lors de la fabrication de chaque article CC35 est :

$$L = k(\sigma^2 + (\mu - T)^2) \quad [9,10] \quad (12)$$

$\sigma^2 = \text{variance}$

$\mu = \text{la moyenne}$

$T = \text{la valeur du poids cible}$

$k = 0,125 \text{ dh (dh : dirham Marocain)}$

$\sigma^2 = 0,18$

$\mu = 376,04 \text{ gr}$

$T = 376 \text{ gr donc ;}$

$L = 0,125(0,18 + (376,04 - 376)^2)$

$L = 0,023 \text{ dh /article}$

Sachant qu'avant l'expérimentation la fonction perte de Taguchi était égale à 0,19 dh /article, alors on peut conclure que théoriquement, lors de fabrication de chaque article CC 35, on peut parvenir jusqu'à réduire 87 % du coût de non qualité si les conditions opérationnelles optimales déterminés sont respectées.

Stabilité du processus

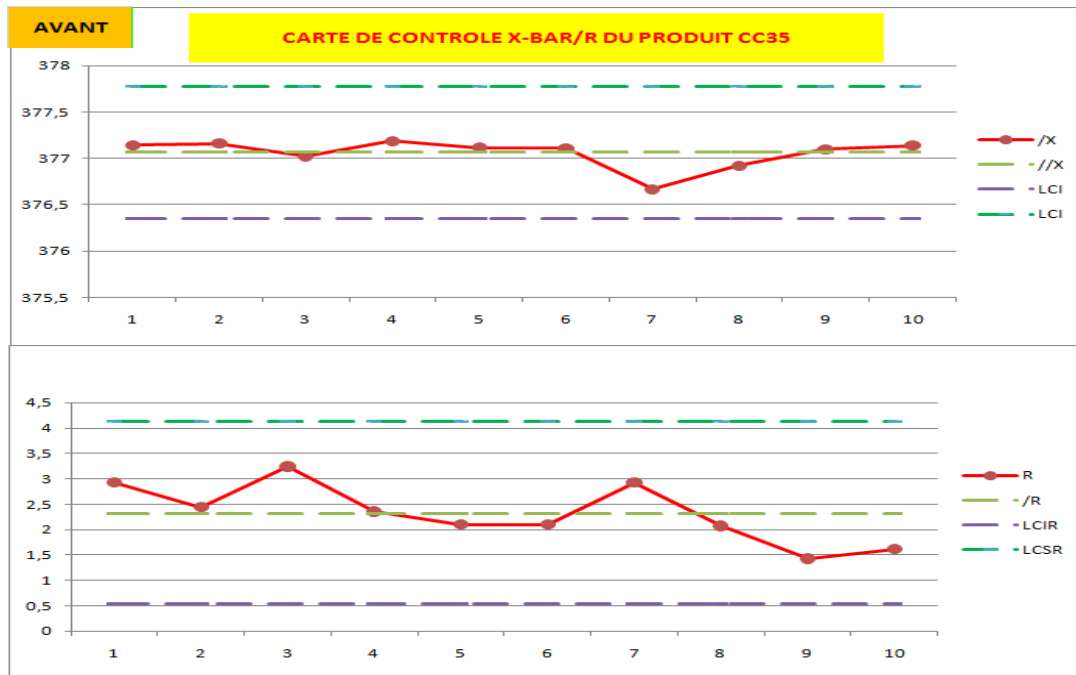


Figure 5 : Carte de contrôle Xbar-R du processus de fabrication avant l'expérimentation

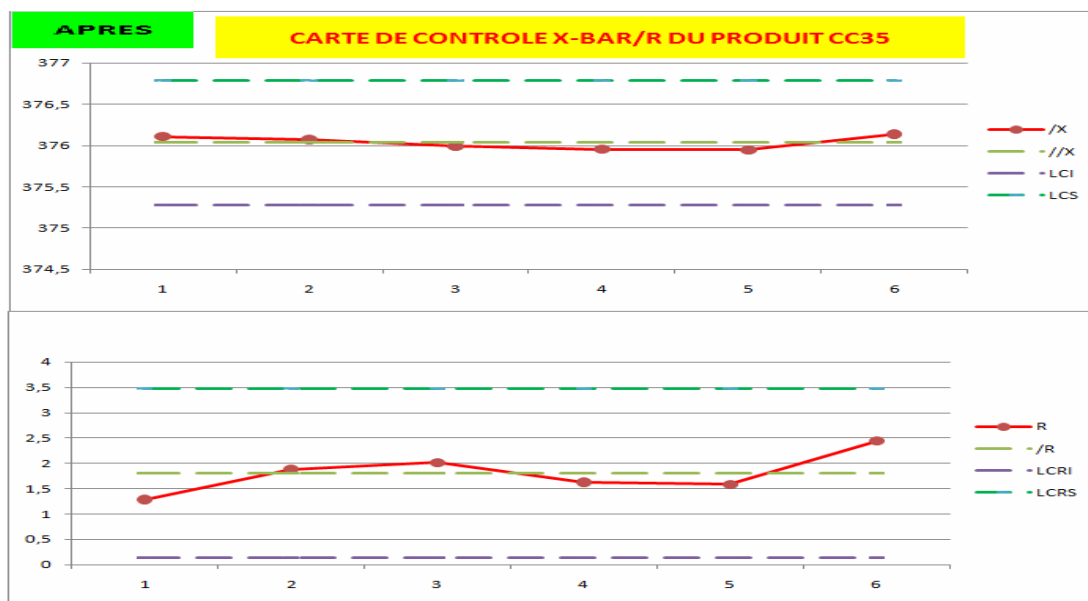


Figure 6 : Carte de contrôle Xbar-R du processus de fabrication après l'expérimentation

Que se soit avant ou après l'expérimentation ; le procédé présente dans les deux cas une remarquable stabilité (*Figures 5 et 6*).

Capabilité du procédé

Bien que qu'il soit statistiquement stable avant l'expérimentation, et avec un indice de capabilité $C_{pk} < 1,33$, le procédé de fabrication a été incapable de fournir des articles dont le poids respecte les spécifications de tolérances. Par contre on constate que cet indice a dépassé nettement la valeur 1,5 chose qui prouve que l'approche d'optimisation est performant (*Figures 7 et 8*).

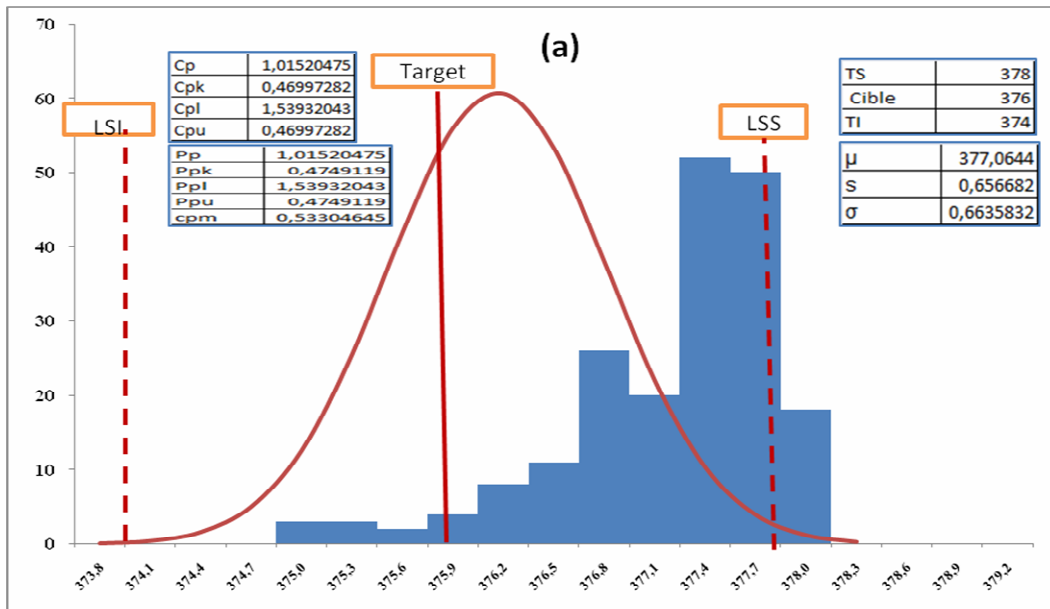


Figure 7 : Capabilité du procédé de fabrication avant l'expérimentation

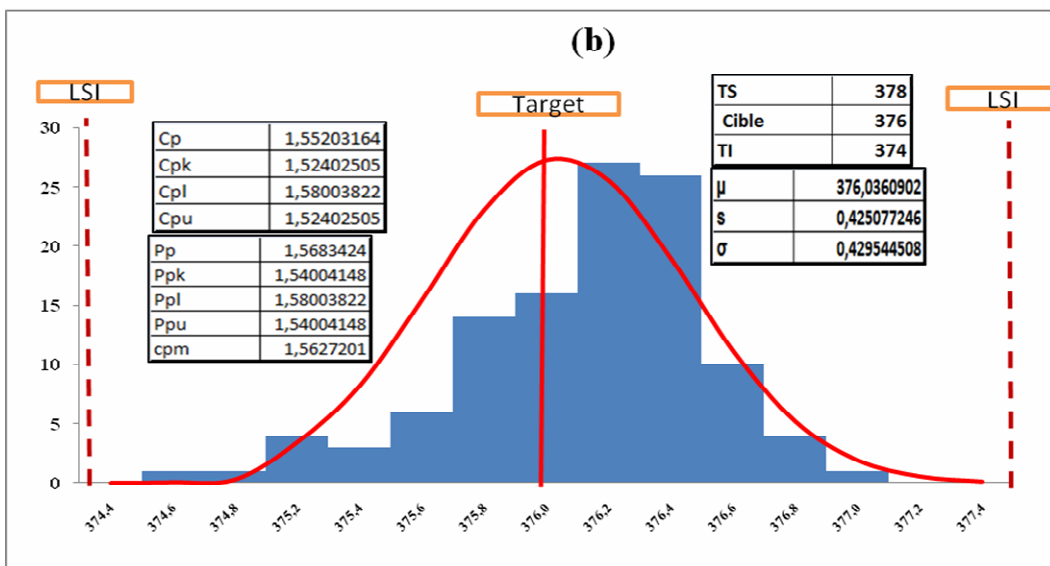


Figure 8 : Capabilité du procédé de fabrication après l'expérimentation

Valeur de la fonction perte de Taguchi (QLF)

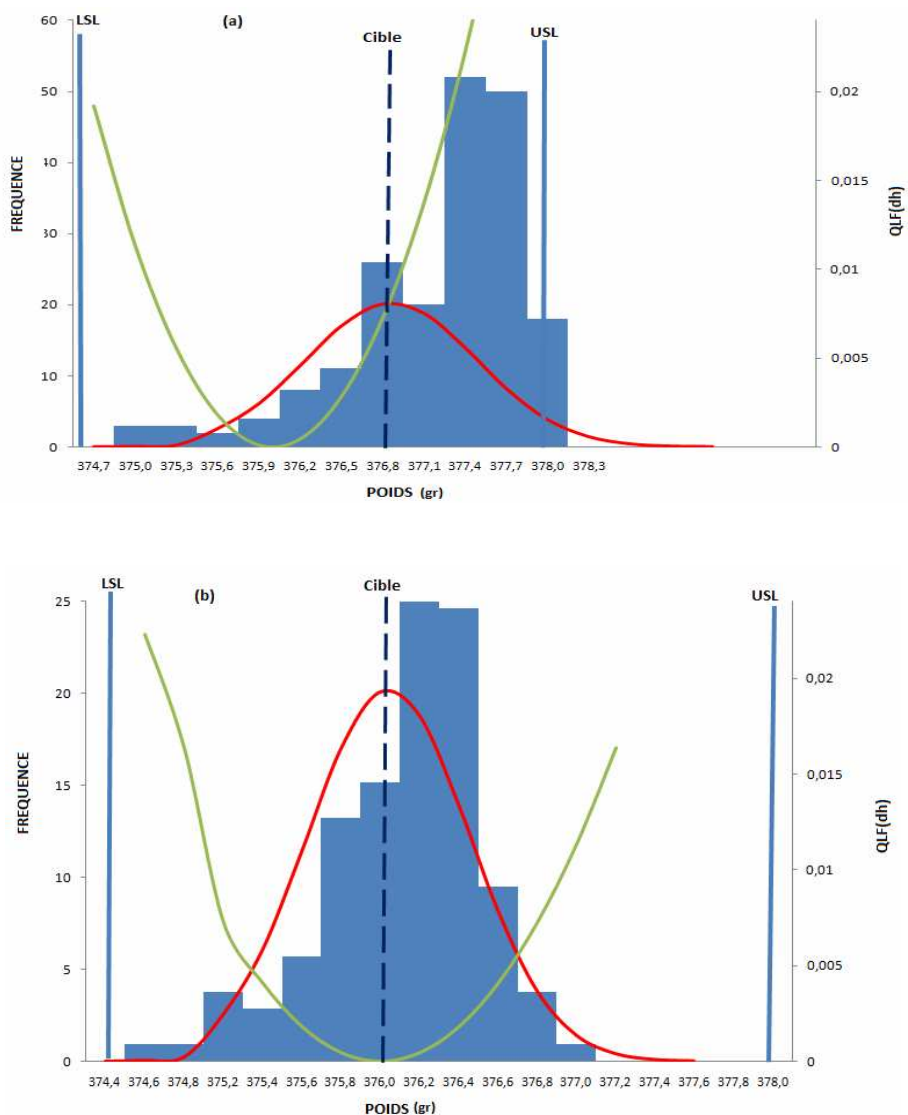


Figure 9 : Evolution de la fonction perte de Taguchi avant (a) & après (b) l'expérimentation

4. Conclusion

Dans cet article nous avons essayé d'étudier les possibilités d'optimisation d'un procédé de fabrication d'une bouteille en verre CC35. Pour ce faire, 13 facteurs contrôlables ont fait l'objet de cette étude et nous nous sommes servi des méthodes statistiques tel que : Plans Taguchi, SPC et les indicateurs de capabilité pour la détermination d'un optimum de réglage du procédé et mesurer l'effet de cet optimisation via le calcul du coût de la non qualité représenté par l'indice : Fonction perte de Taguchi.

Pour conclure l'efficacité de la démarche, nous avons procédé à la comparaison avant et après l'expérimentation des trois éléments caractérisant le processus de fabrication de CC35 de point de vue « caractéristique POIDS », et du point de vue économique, dans ce dernier cas, la maîtrise de paramètres de réglage du processus a réduit les coûts générés par la non qualité accompagnant la fabrication de chaque article du produit CC35, et nous avons constaté qu'il y a possibilité d'éliminer jusqu'au 87 % du coût de la non qualité (Figure.9).

Références

- [1] - E. Le BOURHIS, *GLASS Mechanics and Technology*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2008)
- [2] - D. C. MONTGOMERY, *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. (2005)
- [3] - R. K. RANJIT, *Design of experiments using the Taguchi approach : 16 steps to product and Process improvement*, John Wiley & sons, INC, (2001).
- [4] - R. K. RANJIT, *A Primer on the Taguchi Method*, 2nd edition, Society of Manufacturing Engineers, Mar (2010).
- [5] - Z. Marli KESUMA, M. SI, *Analysis of Variance for Attribute Data in Taguchi's Approach*, Proceeding of the 2nd IMT-GT Regional Conference on Mathematics, Statistics and Applications, University Saints Malaysia, Penang, June 13-15, (2006).
- [6] - B. Gopalsamy MURUGAN, B. MONDAL, Ghosh SUKAMAL, *Taguchi Method and ANOVA: An Approach for Process parameters optimization of hard machine while machining hardened steel*, *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 68, August (2009) PP686-695.
- [7] - N. K. SHARMA, A. Elizabeth CUDNEY, M. Kenneth RAGSDELL, K. PARYANI, *Quality Loss Function — A Common Methodology for Three Cases*, *Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol.1, No. 3, (2007) pp 218-234.
- [8] - M. Jeya CHANDRA, *Statistical Quality Control*, (2001) CRC Press LLC.
- [9] - H. MOHAMED, M. Hisyam LEE, M. SARAHINTU, S. SHAHARUDDIN, and B. SANUGI, *Taguchi's Quality Loss Function Approach in analyzing performance of the Dynamic Source Routing Protocol*, Proceedings of the 5th Asian Mathematical Conference, Malaysia (2009).
- [10] - M. DEMETRESCU, A. PARISAND and C. TARCOLEA, *Uni-and multivariate loss functions and the Taguchi theory*, BSG Proceedings 17. The International Conference "Differential Geometry-Dynamical Systems" (2009).
- [11] - S.TAKESHITA, T. HOSOKAWA, *Achieving Robust Design through Quality Engineering*, Fujitsu. *Sci. Tech. J.*,43(1), January (2007) P105-112.