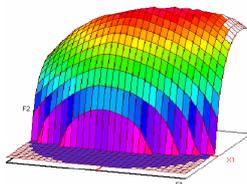




Année Universitaire : 2009-2010



Master Sciences et Techniques CAC Agiq
Chimiométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion
industrielle de la qualité
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et
Techniques

Titre :

**Amélioration du processus de fabrication des semelles
des chaussures de sécurité par injection du
polyuréthane en utilisant la méthodologie des plans
d'expériences**

Présenté par:

ESSAQI Mohamed

Encadré par:

A. EL OTMANIA

M.EL ASRI

ANIMAC

FST Fès

Soutenu Le 21 Juin 2010 devant le jury composé de :

- M_r A. EL OTMANIA
- M_r E.H EL GHADRAOUI
- M_r A. EL HASSANI
- M_r E. H ALILOU
- M_r M. EL ASRI

DÉDICACES

Je dédie ce travail

A mes parents

*En témoignage de ma gratitude pour tant
d'années de sacrifices, de prières et
d'encouragement. Que dieu leur accorde une
longue vie.*

A mon frère et mes sœurs

Pour leurs encouragements et leurs affections.

A mes amis et collègues

*Pour tous les bons moments qu'on a passé
ensemble. Avec mes souhaits d'un avenir plein de
joie et de succès.*

A tous les membres de l'Association

*ALMAWAHIB -FES- pour leurs soutiens et
encouragements durant mon cursus universitaire*

Merci à vous tous.

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, j'aimerais bien adresser mes plus sincères remerciements à **Mr AZMI**, Directeur de l'entreprise ANIMAC pour les efforts qu'il a déployés en ma faveur, ses encouragements et ses conseils fructueux.

Je tiens à remercier mes encadrants **M. Aziz EL ATMANIA et Mr Mohammed EL ASRI** pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce rapport qu'ils m'ont apportés lors des différents suivis, et pour ses orientations, ses disponibilités tout au long de la période de stage et durant la rédaction du rapport.

Hommages respectueux et sincères à **Mr El Mestafa EL HADRAMI** : Responsable du Master CAC Agiq pour les efforts qu'il a consentis en faveur de ma formation, et pour son appréciable aide, ainsi pour la qualité de son enseignement.

J'exprime ma reconnaissance à **Mme Fatima.EZZAKI** pour sa collaboration et partage de connaissance.

Ma gratitude s'adresse aux membres de jury **Mr El Houssine EL GHADRAOUI, Mr Lhadi. LHASSANI, et Mr El Houssine ALILOU** de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je remercie l'ensemble des personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

J'exprime également ma gratitude à l'ensemble du corps enseignant De la formation CAC AGIQ , pour avoir porté un vif intérêt à ma formation, et pour avoir accordé la plus claire de leur temps, leur attention et leur énergie, dans un cadre très agréable de complicité et de respect.

Et finalement, je tiens à porter mes remerciements sincères à l'ensemble du personnel d'ANIMAC pour leur chaleureux accueil et sympathie manifestée à mon égard.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Fiche d'entreprise d'ANIMAC	8
Tableau 2 : pertes dues aux opérateurs et aux réglages.....	12
Tableau 3 : Taux de rejet selon les pointures	13
Tableau 4 : Quantification des pertes dues a la machine	14
Tableau 5: liste des facteurs influents avec niveaux	22
Tableau 6: matrice de criblage	24
Tableau 7 : les facteurs influents sur le taux de rejet	27
Tableau 8 : domaine expérimentale	28
Tableau 9 : Matrice d'expérience et Plan d'expérimentation	29
Tableau 10 : analyse de variance1.....	29
Tableau 11 : analyse de variance 2.....	29
Tableau 12 : Analyse de la variance.....	30
Tableau 14 : des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Epaisseur)	31
Tableau 15: Analyse de la variance.....	32
Tableau 17 : coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Aspect)	33
Tableau 18 : Étude de désirabilité	33
Tableau 19 : Caractéristiques et Coordonnées du maximum.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme d'ANIMAC.....	9
Figure 2 : procédé de fabrication des semelle	10
Figure 3: Diagramme d'ISHIKAWA.....	11
Figure 4 : Indicateur de performance pour une période donnée	12
Figure 5 : Diagramme de Pareto	13
Figure 6: Domaine du facteur.....	15
Figure 7: Espace expérimentale Figure 8: Point expérimental	16
Figure 9 : Domaine d'étude.....	16
Figure 10: Surface de réponse	18
Figure 11 : Plan composite.....	19
Figure 12 : Plan Doehlert	19
Figure 13: Plan Box-Behnken	20
Figure 14: Diagramme Pareto	25
Figure 15 : influence des paramètres sur l'Aspect	25
Figure 16 : Diagramme Pareto	26
Figure 17 : influence des paramètres sur l'épaisseur	27
Figure 18 : Distribution des résidus	31
Figure 19 : Distribution des résidus (Aspect).....	32
Figure 20: Variation de la désirabilité dans le plan : température zone 3, S2.....	34

SOMMAIRE

Introduction Générale	6
1) Présentation de l'Entreprise	7
2) Engagement Qualité ANIMAC	7
3) Innovation Permanente	7
4) Fiche d'Entreprise ANIMAC.....	8
5) Organigramme D'ANIMAC.....	9
6) Le Procédé de Fabrication des Semelles.....	10
7) Présentation du projet	11
8) Diagnostique	11
9) Détection des pointures présentant un taux de rejet élevée.....	13
10) Quantification des pertes dues a la machine en terme de coût.....	14
Chapitre 3 : RAPPEL SUR LES PLANS D'EXPERINECES.	15
1) Introduction	15
2) Matrice d'Hadamard.....	17
3) Notions de surface de réponse	17
Chapitre 1 : OPTIMISATION DU PROCÉDÉ.....	22
I. Plan de Criblage.....	22
II. Plan d'optimisation.....	28
1) Introduction.....	28
2) Domaine expérimental	28
3) Validation statistique du modèle postulé	29
4) Étude de Désirabilité.....	33
CONCLUSION	35
PERSPECTIVES	36
BIBLIOGRAPHIE.....	37

Introduction Générale

Au cours de ces dernières années, les entreprises industrielles ont été confrontées à une concurrence de plus en plus féroce. L'internationalisation de la compétition et la course au développement se sont focalisés sur les prix de vente, qui sont en baisse. Donc l'élimination ou la réduction des sources de pertes, afin de maîtriser les coûts, devient actuellement un enjeu primordial.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail, effectué au sein de l'entreprise ANIMAC. Qui comme toute entreprise ambitieuse, a inscrit parmi ses objectifs, l'amélioration de ses performances, afin d'améliorer son processus de fabrication. En effet, l'objectif de notre projet s'inscrit pleinement dans cette politique. En effet nous nous sommes intéressés à l'optimisation des réglages du procédé de fabrication des semelles par injection du polyuréthane. Nous visions à diminuer le taux de non conforme

Nous allons tout d'abord faire un diagnostic de processus de fabrication. Ensuite nous procédons au criblage des paramètres du procédé. Les résultats de ce plan vont nous renseigner sur les paramètres qui sont, réellement, influents de ceux qui ne le sont pas sur le procédé. Ensuite nous engageons, dans une étude beaucoup plus fine, les paramètres jugés influents par le plan de criblage, dans un plan de surface de réponses.

Chapitre 1 : PRÉSENTATION

1) Présentation de l'Entreprise

Implantée Au Maroc depuis sa création en 1995, l'entreprise ANIMAC filiale de «ANNIC», mieux connue sous la marque de ses productions : MTS More Than Safety, est aujourd'hui l'un des premiers fabricants de chaussures de sécurité chaussures de travail, chaussures professionnelles, bottes de sécurité, bottes de travail.

MTS est présente partout dans le monde grâce à son réseau de distribution international notamment au MAROC. Destinées à tous les secteurs d'activités, les chaussures de sécurité MTS sont conformes à la nouvelle norme EN ISO 20345:2004.

2) Engagement Qualité ANIMAC

Pour chaque chaussure de sécurité produite, ANIMAC engage sa responsabilité. Le respect intégral des normes législatives s'accompagne d'une innovation technologique toujours plus poussée (embout et semelle anti-perforation en Composite), d'une organisation et d'un processus industriel de pointe, fortement automatisé pour une totale sécurité logistique et le contrôle parfait des délais de fabrication.

L'ensemble de la démarche qualité ANIMAC instituée à tous les niveaux de l'entreprise, production et service au client, a valu à ANIMAC l'obtention de la certification NF EN ISO 9001:2000 .

3) Innovation Permanente

Pour ANIMAC la performance passe aussi par la créativité et une recherche esthétique et d'amélioration du confort permanente.

Avec une politique active de lancements de nouveaux produits, un grand nombre de modèles proposés, un large choix de couleurs et de matériaux. Les chaussures de sécurité MTS peuvent répondre à tous types de besoins pour tous types de marchés : BTP, agroalimentaire, métallurgie, électriciens, forestiers....

Pour assurer la fiabilité et la solidité de ses chaussures de sécurité, ANIMAC fait appel à des fournisseurs de renommée internationale : 3M, BASF, Texon International, Dupont de Nemours...

4) Fiche d'Entreprise ANIMAC

Raison sociale	Filial de ANNIC
Date de création	1996
Date de démarrage de la production	1996
Superficie	1584 m ²
Adresse	RTE 110 KM 12 AIN SEBAA
Ville	CASABLANCA
Tél.	0522358811
Fax	0522358812
Secteur d'activité	INDUSTRIE DU CUIR ET DE LA CHAUSSURE
Activité	FABRICATION INDUSTRIELLE DES CHAUSSURES MODERNES
Effectif permanent	160
Chiffre d'affaires	2.000.000 Euro

Tableau 1 : Fiche d'entreprise d'ANIMAC

5) Organigramme D'ANIMAC

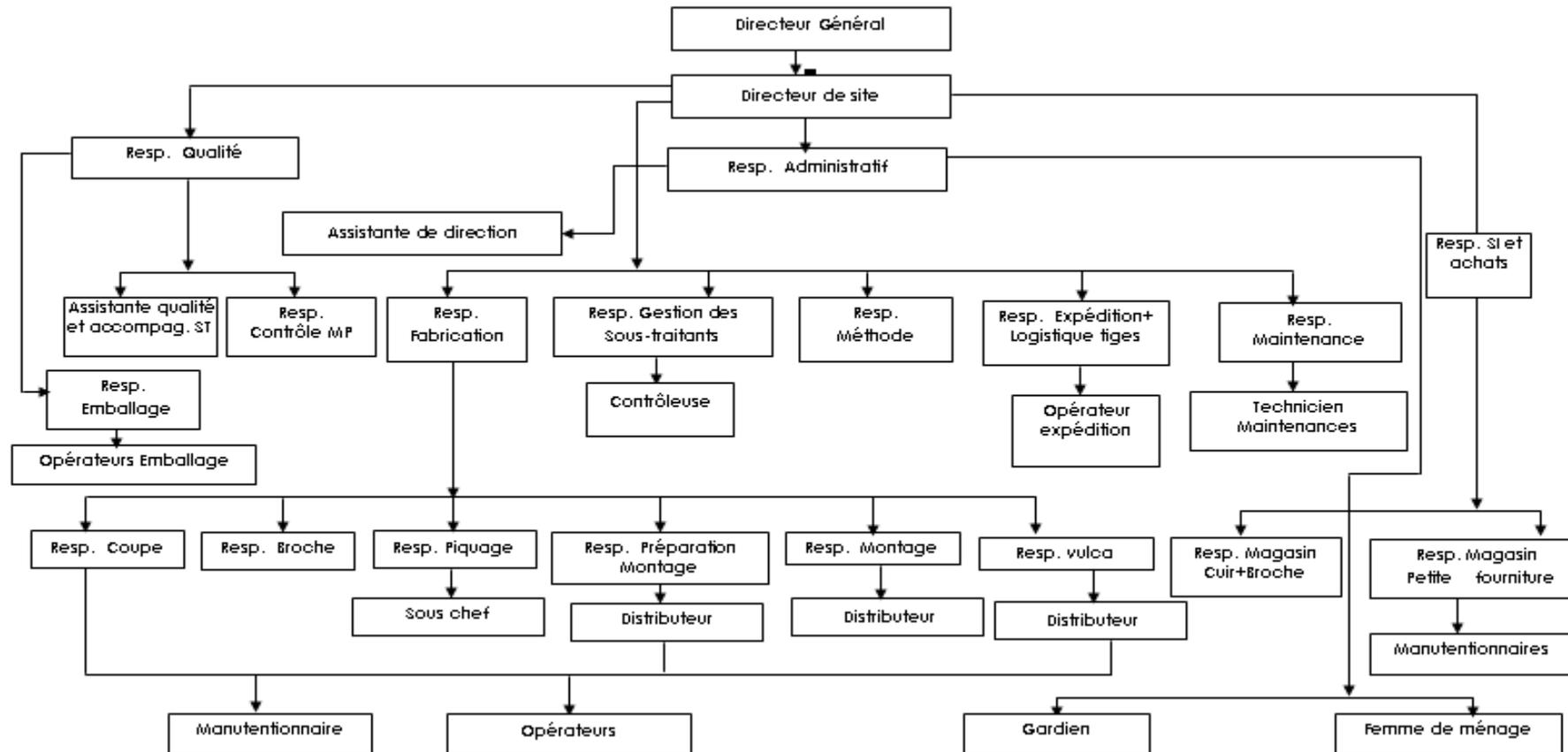


Figure 1 : Organigramme d'ANIMAC

6) Le Procédé de Fabrication des Semelles

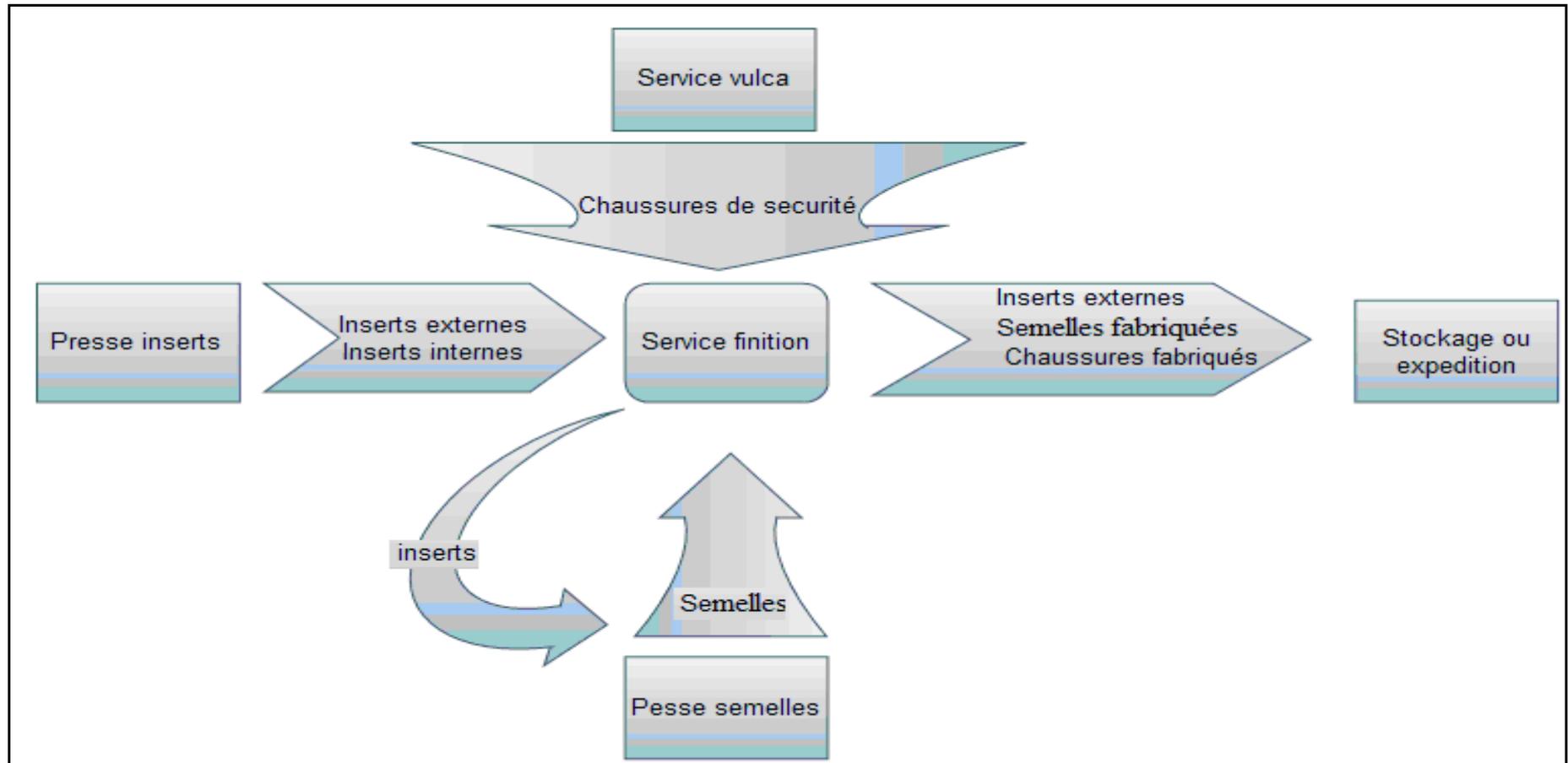


Figure 2 : procédé de fabrication des semelle

7) Présentation du projet

L'objectif de ce projet est de mettre en place des actions d'amélioration sur le procédé de production des semelles de chaussure de sécurité par injection du polyuréthane. Et ce pour réduire le taux de non conforme et augmenter la productivité.

La recherche des outils d'amélioration passe par deux phases :

- d'abord diagnostiquer de processus de fabrication
- Ensuite apporter des actions d'amélioration.

8) Diagnostic

a. Sélection des sources de non-conformité à éliminer ou à réduire

Pour cette étude on a utilisé le diagramme cause effet représenté sur la figure 3 :

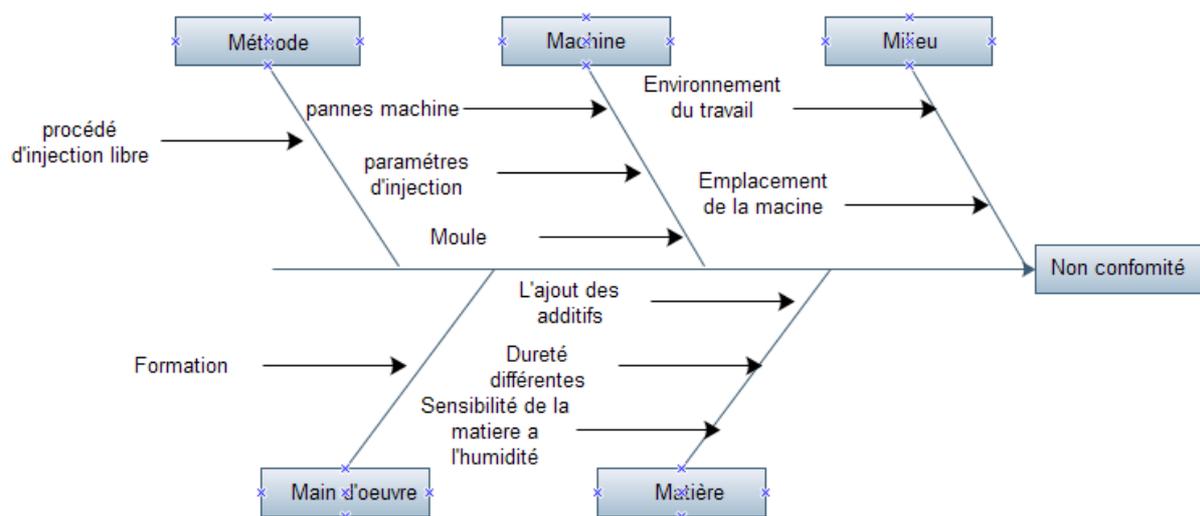


Figure 3: Diagramme d'ISHIKAWA

D'après le diagramme représenté sur la figure 3, on note les cinq sources de non conforme :

- l'emplacement de la machine dans un milieu exposé à l'humidité et à la variation de température,
- la méthode d'injection,
- la main d'œuvre non qualifiée,
- la dureté et la sensibilité à l'humidité de la matière
- les pannes de la machine et les paramètres d'injection non maîtrisés.

Nous avons procédé au calcul des produits non-conforme ensuite nous avons attribué ces pertes aux différents sources. Nous regroupons dans le tableau 2 ci-dessous les résultats de cette étude :

Pertes dues aux opérateurs	pertes dues aux réglages	Autres pertes
8%	91%	1%

Tableau 2 : pertes dues aux opérateurs et aux réglages

Le procédé présente 91% de pertes dues aux réglages (machine). Alors seulement 8% de rejet sont dues à la main d'œuvre et 1% pour les autres causes. Ceci montre que pratiquement tous les rejets sont dus à la machine. D'où l'intérêt de s'attaquer prioritairement aux réglages de la machine.

b. Les pertes dues aux réglages

Dans la figure suivante nous représentons le taux de rejet recensé pendant une période bien déterminé. Nous représentons la cible exprimée par le constructeur et un autre seuil pour voir l'attitude des rejets de l'entreprise.

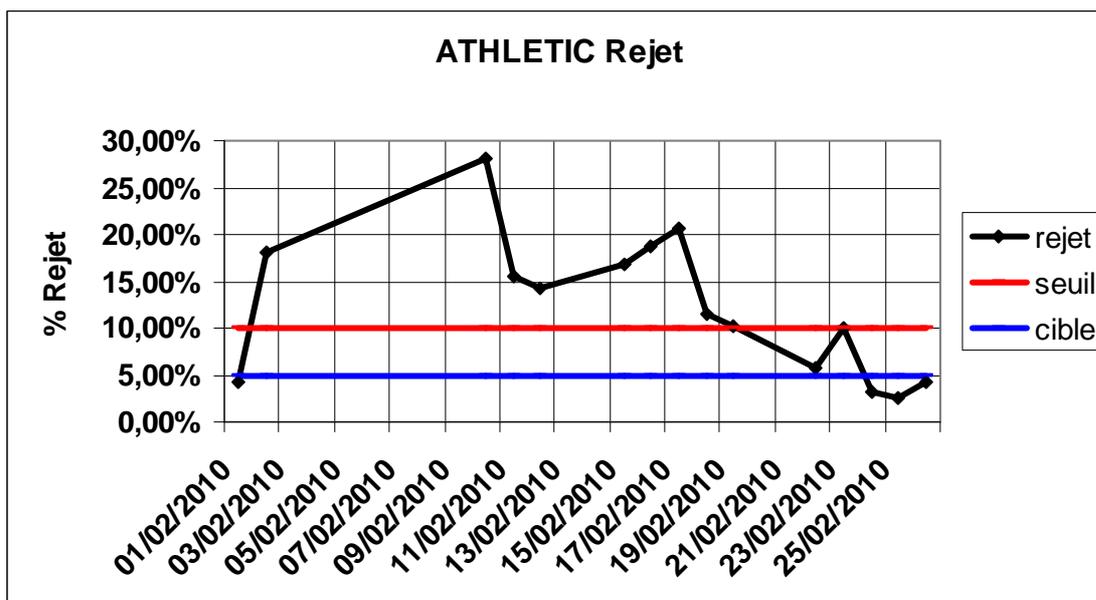


Figure 4: Indicateur de performance pour une période donnée

Comme on peut le constater sur le graphe de la figure 4 l'entreprise, pendant une longue période, les rejets dépassent de loin les exigences de l'entreprise. D'où la nécessité d'intervenir pour optimiser et mettre sous contrôle le procédé.

9) Détection des peintures présentant un taux de rejet élevé

Nous avons mené une étude pour détecter la station qui présente plus de problème et engendre par la suite grand taux de rejet. A ce sujet nous avons fait une analyse Pareto sur les données récoltées au cours une campagne de production.

Les résultats de cette étude est regroupe dans le tableau suivant et sur la figure 5 :

Pointures	Rejet	Total fabriqués	Rejet /rejet total	Rejet/Total fabriqués
47	61	444	32,62%	13,74%
46	20	403	10,70%	5,88%
44	9	392	4,81%	2,67%
38	18	401	9,63%	5,08%
41	32	415	17,11%	9,97%
42	25	408	13,37%	7,69%
43	22	405	11,76%	7,05%

Tableau 3 : Taux de rejet selon les peintures

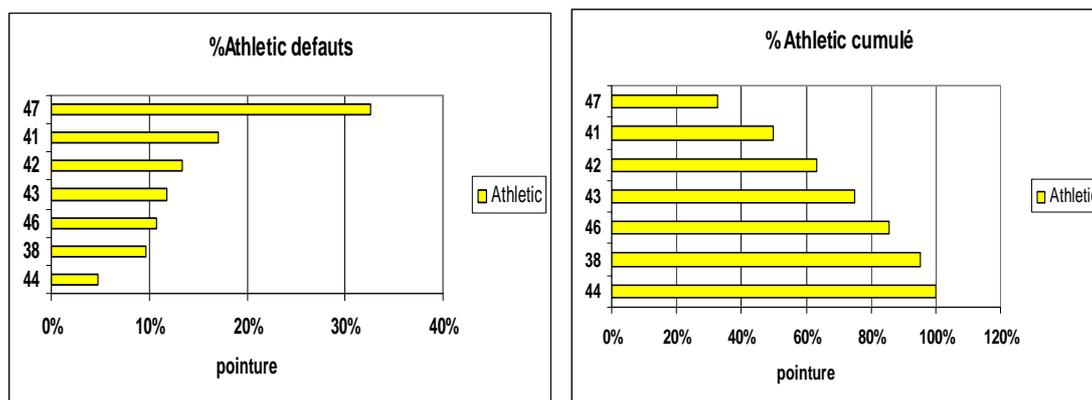


Figure 5 : Diagramme de Pareto

D'après le graphe de la figure 5 on peut conclure qu'environ 40% des problèmes sont causés par la pointure 47. Par conséquent, pour y remédier on devra intervenir sur cette station.

Remarque :

Nous avons calculé au cours de cette campagne de production le taux de non conforme globale sur cette station (pointure 47). Il est en moyenne d'environ 14%.

10) Quantification des pertes dues a la machine en terme de coût

Nous avons essayé de quantifier le coût du non conforme produit par cette station. les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

	Pièces fabriques paire/jour	Pièces Non Conforme paire/jour	Pièces conformes (paire)	Coût de la pièce DH	Coût annuel du non conforme DH/an
Pour tous les stations	441	33	408	33,00	239 580,00
Pour la station étudiée	63	9	54	33,00	65 340,00

Tableau 4 : Quantification des pertes dues a la machine

Chapitre 3 : RAPPEL SUR LES PLANS D'EXPERINECES.

1) Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables :

$$y_i = f(x_i)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur. Les principes fondamentaux de cette science seront indiqués et les principaux plans seront passés en revue.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

Un expérimentateur qui commence une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la *réponse*, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot *facteur*. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure 6). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée *niveau*. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

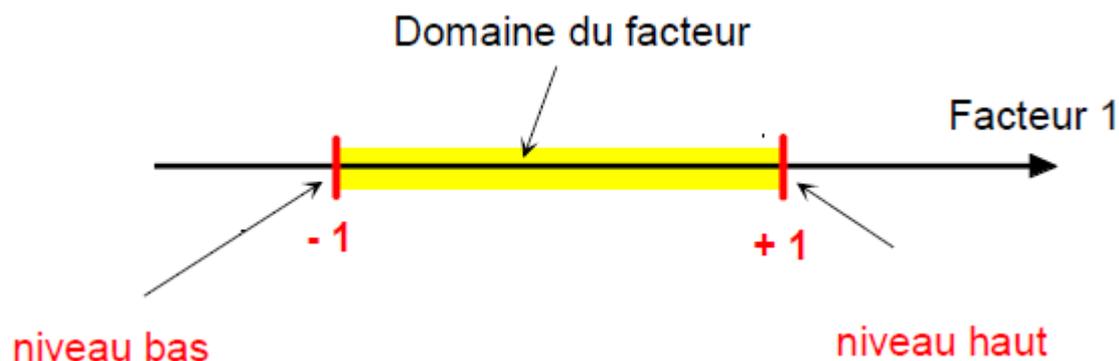


Figure 6: Domaine du facteur

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur. Par convention de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé *l'espace expérimental* (Figure 7).

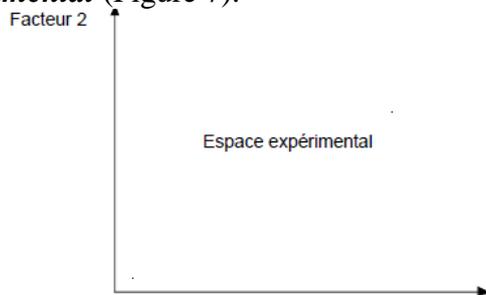


Figure 7: Espace expérimentale

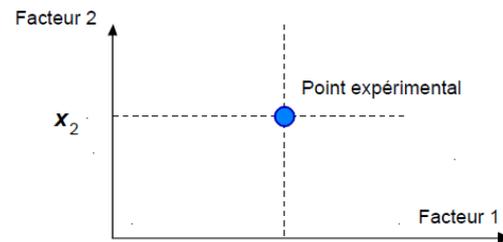


Figure 8: Point expérimental

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure 8). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure 9).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

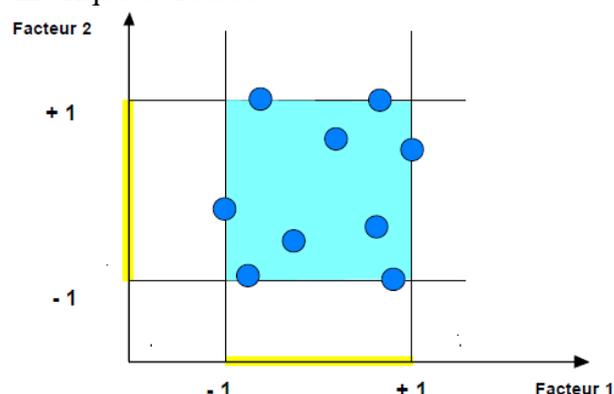


Figure 9 : Domaine d'étude

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

2) Matrice d'Hadamard

Une **matrice de Hadamard**, du nom du mathématicien français Jacques Hadamard, est une matrice carrée dont les coefficients sont tous 1 ou -1 et dont les lignes sont toutes orthogonales entre elles. Le nom retenu pour ces matrices rend hommage au mathématicien français Jacques Hadamard, même si les premiers exemples systématiques sont dus à James Joseph Sylvester.

Pour une matrice H d'ordre n , la propriété d'orthogonalité des colonnes peut également s'écrire sous la forme

$$HH^T = nI_n$$

Où I_n est la matrice identité d'ordre n .

- ❖ Elles se construisent selon un algorithme qui donne la 1ère ligne (ou la 1^{ère} colonne) de la matrice d'expériences, présentée ci-dessous,
- ❖ puis les autres lignes sont générées par permutation circulaire horizontale (ou verticale) de cette ligne.
- ❖ La dernière ligne de la matrice d'Hadamard est toujours une ligne ne comportant que des signes (-).

N = 4 + + -

N = 8 + + + - + - -

N = 12 + + - + + + - - - + -

N = 16 + + + + - + - + + - - + - - -

N = 20 + + - - + + + + - + - + - - - - + + -

N = 24 + + + + + - + - + + - - + + - - - - - - - -

N = 32 - - - - + - + - + + + - + + - - - + + + + - - + + - + - - +

3) Notions de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure 10).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

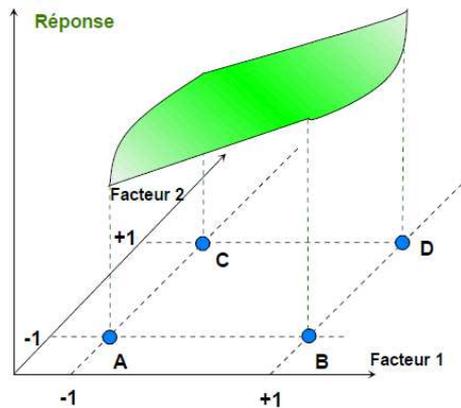


Figure 10: Surface de réponse

Les plans du second degré ou plans pour surfaces de réponse permettent d'établir des modèles mathématiques du second degré. Ils sont utilisés pour les variables continues. Pour deux facteurs, on a

$$y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + e$$

Ces plans sont utiles à chaque fois que l'on se trouve près d'un maximum ou d'un minimum. A la fin des essais, on a un système d'équations dont les coefficients sont obtenus par la méthode des moindres carrés :

$$\hat{a} = (X' X)^{-1} X' y$$

Il existe plusieurs types de plans du second degré dont les principaux sont décrits ci-dessous :

Les plans composites

Un plan composite est constitué de trois parties :

1. Un plan factoriel dont les facteurs prennent deux niveaux.
2. Au moins un point expérimental situé au centre du domaine d'étude.
3. Des *points axiaux*. Ces points expérimentaux sont situés sur les axes de chacun des facteurs.

La Figure 15 représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux d'un plan 11. Le point E est le point central. Les points F, G, H et I sont les points axiaux. Ces quatre derniers points forment ce que l'on appelle *le plan en étoile*. On réalise 9 essais et 6 coefficients doivent être déterminés. Il faut donc résoudre un système de 9 équations à 6 inconnues.

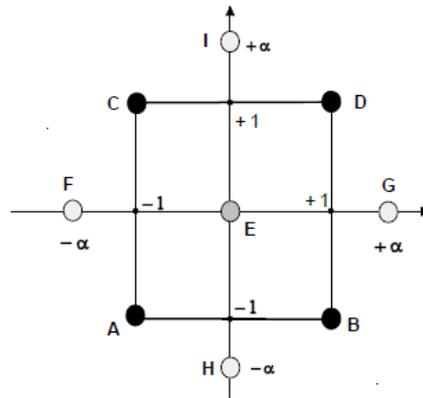


Figure 11 : Plan composite

Les coordonnées des points en étoile dépendent du critère d'optimalité choisi. En général, on retient le critère de presque orthogonalité ou le critère d'isovariance par rotation. Les plans composites prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont insuffisamment expliqués par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondant aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à une acquisition progressive des résultats.

Les plans de Doehlert

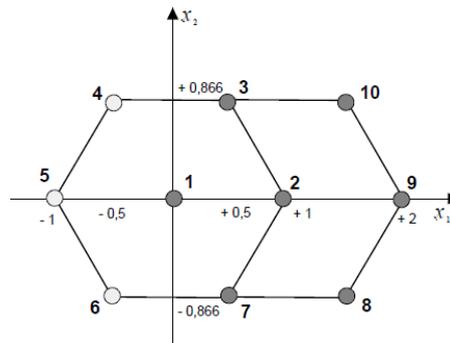


Figure 12 : Plan Doehlert

La caractéristique principale des plans de Doehlert est d'avoir une répartition uniforme des points expérimentaux dans l'espace expérimental. La Figure 12 donne la disposition de ces points pour un plan à deux facteurs (essais 1 à 7). Tous les points sont à la même distance du centre du domaine d'étude et sont situés sur le cercle trigonométrique. Ils forment un hexagone régulier. Identique à celle de départ. La Figure 12 montre qu'avec trois points d'expériences supplémentaires (essais 8, 9 et 10), on peut obtenir un nouveau plan de Doehlert (essais 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1).

Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux sont au milieu des arêtes de chacun des côtés du cube (Figure 13). Ce plan comporte douze essais auxquels on peut ajouter un (ou plusieurs) point

central. La matrice du Tableau 14 indique ces douze essais accompagnés d'un seul point central. Dans la pratique on réalise souvent 3 ou 4 points au centre.

Les plans de Box-Behnken répondent à un critère d'optimisation particulier : l'erreur de prévision des réponses est la même pour tous les points d'une sphère (ou une hyper sphère) centrée à l'origine du domaine expérimental. C'est le critère d'isovariance par rotation. Le plus connu des plans de Box-Behnken est celui qui permet d'étudier trois facteurs.

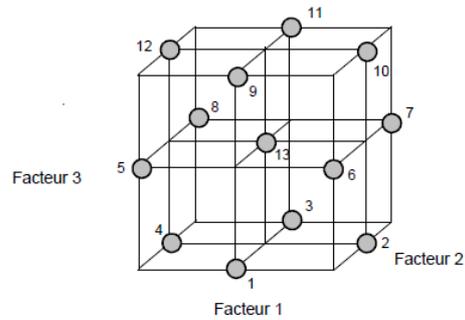


Figure 13: Plan Box-Behnken

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 1 : OPTIMISATION DU PROCÉDÉ

I. Plan de Criblage

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à la maîtrise du réglage du procédé de fabrication des semelles de chaussures de sécurité par injection du polyuréthane. Plus précisément nous souhaitons trouver le réglage qui réduit le taux du non conforme.

A ce sujet nous avons, avec les responsables de l'entreprise, listé les différents paramètres susceptibles d'augmenter le taux du non conforme.

Nous avons gardé pour cette étude 17 paramètres. Nous avons fixé pour chaque paramètre son domaine de variation. Nous regroupons dans le tableau suivant les facteurs ainsi que leurs domaines de variation :

	PARAMETRES	NIVEAU	
X1	pression d'injection (bar)	55	65
X2	vitesse d'injection s1 (mm/s)	5	10
X3	vitesse d'injection s2 (mm/s)	4	10
X4	vitesse de dosage (nbre tour/min)	35	45
X5	Y initial (mm)	545	550
X6	Y final (mm)	300	310
X7	température du moule (°C)	45	55
X8	Température z1 (°C)	140	160
X9	Température z2 (°C)	160	185
10	Température z3 (°C)	160	185
X11	Température z4 (°C)	150	170
X12	% recyclé	20	40
X13	injection volume1 (cm ³)	50	57
X14	injection volume2 (cm ³)	20	25
X15	injection volume 3 (cm ³)	20	25
X16	injection volume 4 (cm ³)	30	35
X17	injection volume 5 (cm ³)	55	60

Tableau 5: liste des facteurs influents avec niveaux

Le nombre de paramètre est assez important. Nous avons choisi de faire un plan de criblage avant toute étude d'optimisation. Notre choix s'est porté sur un plan de PLACKETT ET BURMAN. Ce plan exige, pour cette étude de 17 paramètres, de faire 20 essais.

Nous nous sommes intéressés à deux réponses pour évaluer le taux de non conforme des semelles produites

Y1 (L'aspect) : mesuré par des personnes qualifiées. En effet, les semelles sont notées sur une échelle de 1 à 9. Nous considérons qu'une semelle est conforme si la note est de 5,5 à 9. Elle est considérée non conforme s'elle est notée de 0 à 5.

Y2 (mesure de l'épaisseur de la semelle) : Elle est évaluée à l'aide du pied à coulisse. L'épaisseur doit être entre 0.8mm et 1,5 mm. A l'extérieur de cet intervalle la semelle est considérée non conforme.

On ne peut juger de la conformité de la semelle que si les deux réponses sont satisfaites.

Mesure de l'épaisseur



Nous regroupons dans le tableau 6 le plan d'expérimentation et les résultats des deux réponses après exécution du plan :

N°Exp	prs	s1	s2	V dosage	Yi	Yf	T moule	TZ1	TZ2	TZ3	TZ4	%RECYCLE	V1	V2	V3	V4	V5	Aspect	Epaisseur
2	55	10	10	35	545	310	55	160	185	160	170	20	57	20	20	30	55	1	0,7
4	65	10	4	45	550	300	45	160	185	185	170	20	57	20	25	30	55	8	1
9	65	5	4	35	545	310	55	140	185	185	150	20	57	25	25	35	55	8	1,2
10	55	10	4	35	545	300	55	160	160	185	170	20	50	25	25	35	60	8	1,2
13	65	5	10	35	550	300	45	140	160	185	170	20	57	25	20	30	60	2	1
16	65	10	10	45	545	310	45	160	160	160	150	20	57	25	20	35	60	1	1,2
17	55	10	10	45	550	300	55	140	185	160	150	20	50	25	25	30	60	5	1,4
18	55	5	10	45	550	310	45	160	160	185	150	20	50	20	25	35	55	5	0,9
19	65	5	4	45	550	310	55	140	185	160	170	20	50	20	20	35	60	5	0,9
20	55	5	4	35	545	300	45	140	160	160	150	20	50	20	20	30	55	1	1,8
1	65	10	4	35	550	310	55	160	160	185	150	40	50	20	20	30	60	8	0
3	65	5	10	45	545	300	55	160	185	185	150	40	50	25	20	30	55	5,5	1
5	55	10	10	35	550	310	45	140	185	185	170	40	50	25	20	35	55	5	1,1
6	55	5	10	45	545	310	55	140	160	185	170	40	57	20	25	30	60	6	1,3
7	55	5	4	45	550	300	55	160	160	160	170	40	57	25	20	35	55	1	1,4
8	55	5	4	35	550	310	45	160	185	160	150	40	57	25	25	30	60	8	1,9
11	65	5	10	35	545	300	45	160	185	160	170	40	50	20	25	35	60	1	1,6
12	55	10	4	45	545	300	45	140	185	185	150	40	57	20	20	35	60	8	1,3
14	65	10	4	45	545	310	45	140	160	160	170	40	50	25	25	30	55	1	0,7
15	65	10	10	35	550	300	55	140	160	160	150	40	57	20	25	35	55	2	0,8

Tableau 6: matrice de criblage

1) Analyse des Résultats

Le traitement statistique des données des résultats de ce plan permet de faire Les conclusions suivantes pour chaque réponse.

a. Étude de l'influence des paramètres sur l'aspect

Les résultats du traitement des données relatives au plan de criblage pour la réponse ASPECT son représentés sur les figures 14 et 15 :

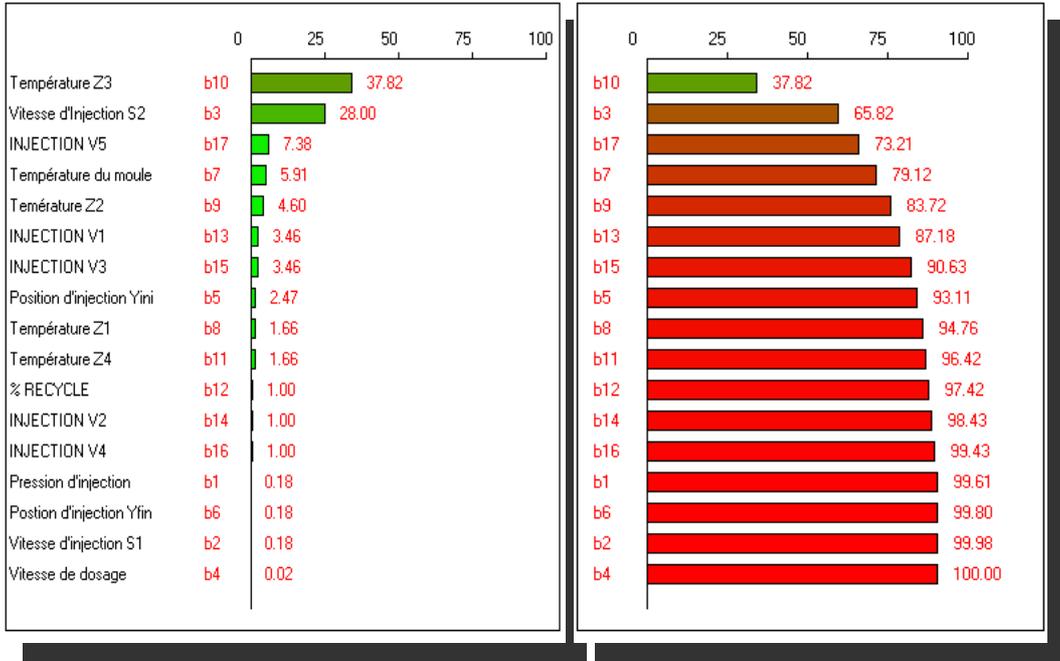


Figure 14: Diagramme Pareto

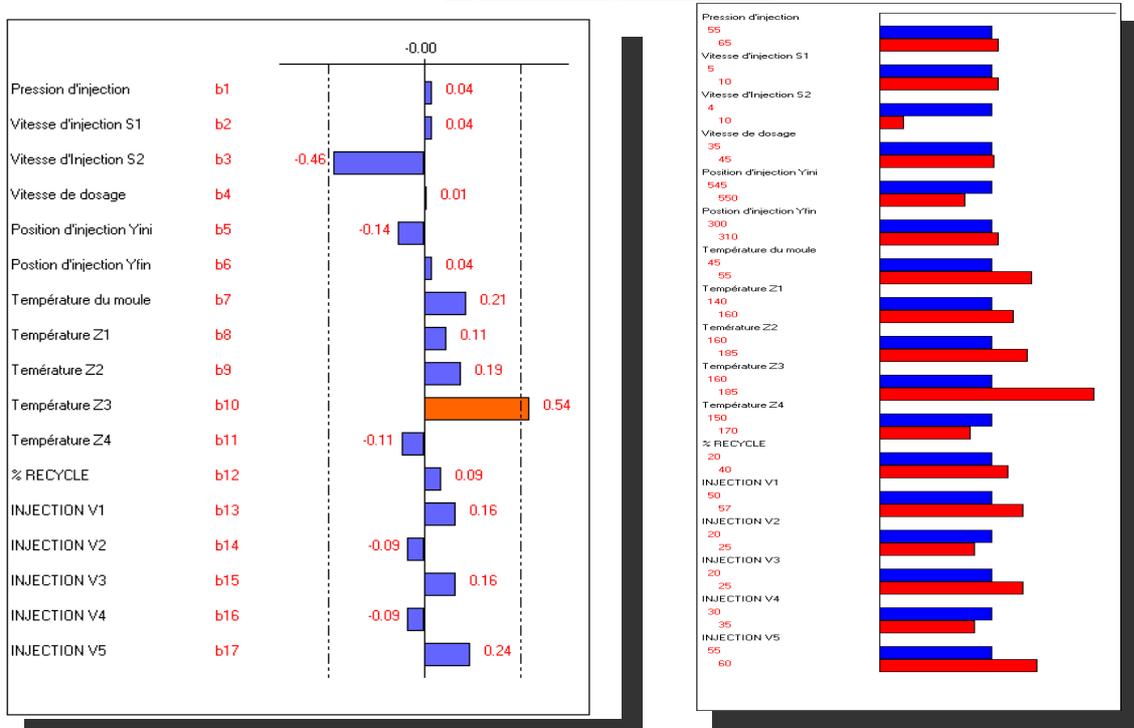


Figure 15 : influence des paramètres sur l'Aspect

L'analyse des résultats de ces deux graphes montre sans ambiguïté que les paramètres influents sur l'aspect des semelles produites sont :

- ❖ Température de la zone 3 ;
- ❖ Vitesse d'injection S2 ;
- ❖ Volume d'injection V5 ;
- ❖ Température du moule ;
- ❖ Température de la zone 2.

Nous constatons que :

- ❖ La température de la zone 3, le volume d'injection 5, la température du moule, la température de la zone 2 augmentent l'aspect des semelles produites.
- ❖ Par contre seule la vitesse d'injection diminue l'aspect.

b- Étude de l'influence des paramètres sur l'Épaisseur

les résultats du traitement des données relatives au plan de criblage pour la réponse EPAISSEUR sont représentés sur les figures 16 et 17 :

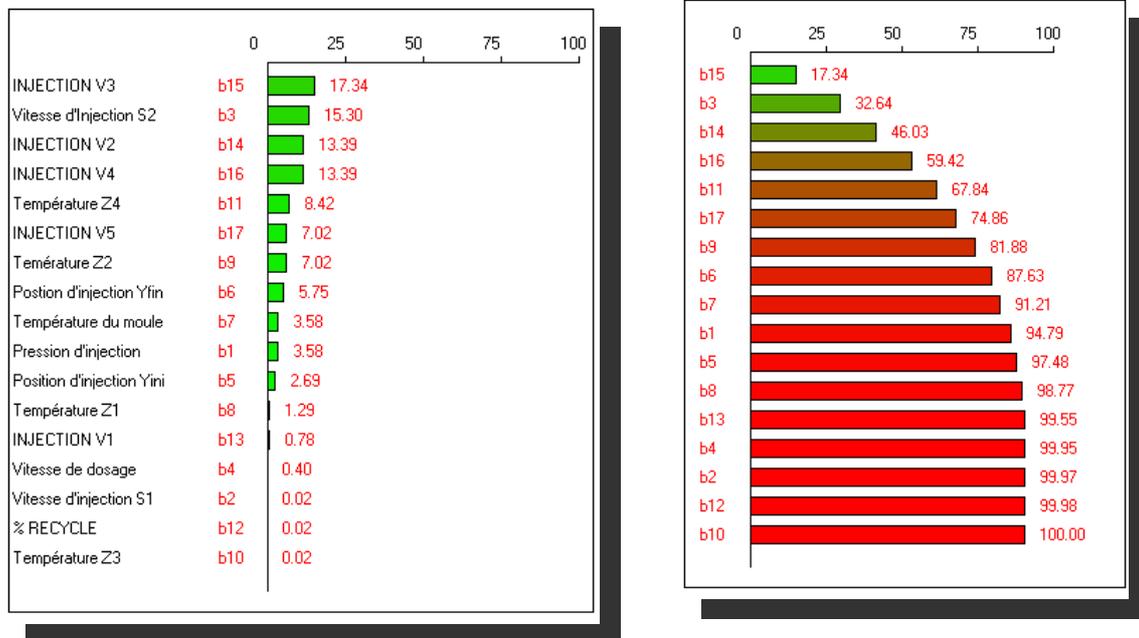


Figure 16 : Diagramme Pareto

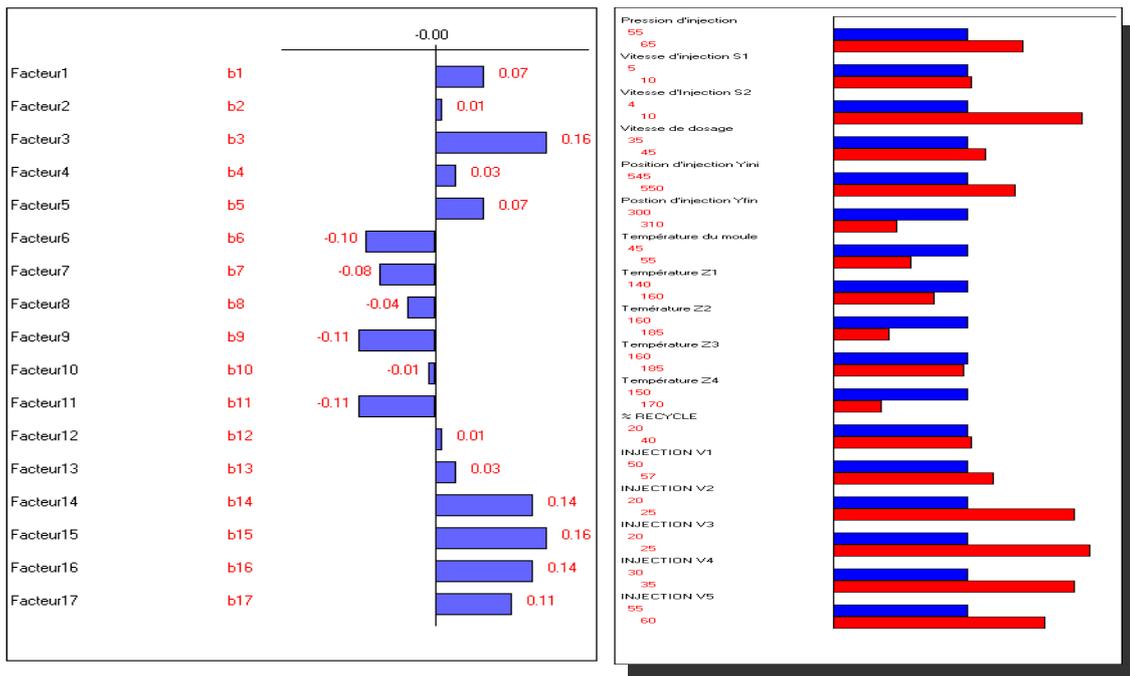


Figure 17 : influence des paramètres sur l'épaisseur

On note clairement, d'après les résultats mentionnés sur les deux graphes 16 et 17 que sept paramètres sur dix-sept influencent l'épaisseur des semelles produites :

- ❖ Volume d'injection V3 ;
- ❖ Vitesse d'injection S2 ;
- ❖ Volume d'injection V2 ;
- ❖ Volume d'injection V4 ;
- ❖ Température de zone 4 ;
- ❖ Volume d'injection V5 ;
- ❖ Température de zone 2 ;

Nous constatons que :

- ❖ Le volume d'injection V3, la vitesse d'injection S2, le volume d'injection V2, le volume d'injection V4, le volume d'injection V5 augmentent l'épaisseur des semelles produites.
- ❖ Et seule la Température de la zone 4 et la température de la zone 2 diminuent l'épaisseur.

Conclusion :

	L'épaisseur		L'aspect	
Les facteurs influents sur le taux de rejet	Volume d'injection 3		Température zone 3	
	Vitesse d'injection S2		Vitesse d'injection S2	
	Volume d'injection V4		Volume d'injection 3	
	Température zone 4		Volume d'injection 5	
	Volume d'injection V5		Température zone 4	
	Température zone 2			

Tableau 7 : les facteurs influents sur le taux de rejet

D'après les résultats de tableau 7 seul un paramètre «vitesse d'injection S2» influence les deux réponses.

On note aussi que la température de la zone 3 influence beaucoup l'aspect, elle augmente l'aspect.

II. Plan d'optimisation

1) Introduction

Suite à l'étude de criblage qui nous a livrée les paramètres influents sur le taux du non conforme. Nous souhaitons dans la suite de ce travail de nous intéresser de près à ces paramètres.

2) Domaine expérimental

Notre choix s'est porté sur les deux facteurs suivants :

- température de zone 3
- vitesse d'injection 2

Nous regroupons dans le tableau 8 ci-dessous le domaine de variation de ces deux paramètres :

	Niveau -1	Niveau 0	Niveau +1
Température Z 3 (U1)	170	175	180
Vitesse d'injection S2 (U2)	4	6	8

Tableau 8 : domaine expérimentale

Nous avons postulé a priori un modèle polynomial de 2nd degré :

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3$$

Nous avons choisi un plan composite centré pour cette étude. Nous regroupons dans le tableau 9 la matrice et le plan d'expérience. Nous avons ajouté les réponses après exécution des essais :

	Rand	Matrice d'expériences		Plan d'expériences		Réponse	
		X1	X2	U1	U2	Épaisseur	Aspect
1	4	-1.0000	-1.0000	170	4	1,3666667	7.40
2	10	1.0000	-1.0000	180	4	1,3666667	7.17
3	9	-1.0000	1.0000	170	8	0,95	7.73
4	8	1.0000	1.0000	180	8	1,22	7.77
5	1	-1.0000	0.0000	170	6	1,175	7.83
6	7	1.0000	0.0000	180	6	1,2166667	7.97
7	6	0.0000	-1.0000	175	4	1,3833333	7.5
8	11	0.0000	1.0000	175	8	1,0333333	7.83
9	5	0.0000	0.0000	175	6	1,2333333	7.80
10	3	0.0000	0.0000	175	6	1,25	7.77
11	2	0.0000	0.0000	175	6	1,2333333	7.93

Tableau 9 : Matrice d'expérience et Plan d'expérimentation

3) Validation statistique du modèle postulé

Le traitement statistique des données de ce plan passe par une procédure de validation avant tout application du modèle postulé :

- ❖ ANOVA 1 ;
- ❖ ANOVA 2 ;
- ❖ Test sur les coefficients ;
- ❖ Coefficient de détermination R^2 et R^2 ajusté ;
- ❖ L'analyse de la normalité et des résidus.

ANOVA 1 : L'analyse de variance à plusieurs facteurs teste leurs effets de sur les moyennes d'une variable quantitative Y.

$$SCE_{TOTAL} = SCE_{MODEL} + SCE_{RESIDU}$$

Source de la variance	Sommes des carrés des écarts	Degrés de liberté	Variance	F	p-value
Régression	SCE_{modele}	DDL_{modele}	$SCE_{modele}/DDL_{modele}$	$S^2_{modele}/S^2_{résidu}$	$F_{exp} > F_{obs}$
Résidus	$SCE_{résidu}$	$DDL_{résidu}$	$SCE_{résidu}/DDL_{résidu}$		
Total	SCE_{total}	DDL_{total}			

Tableau 10 : analyse de variance 1

ANOVA 2 : c'est le test d'adéquation du modèle. La somme des carrés résiduels peut se décomposer en deux parties :

$$SC_{RES} = SC_{modele} + SC_{erreur\ pure}$$

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Validité	SC_{modele}	k-2	$CM_{MA} = SC_{MA}/k-2$	$F = CM_{MA}/CM_{EXP}$	$F < F_{obs}$
Erreur	$SC_{erreur\ pure}$	n-k	$CM_{EXP} = SC_{EXP}/n-k$		

Tableau 11 : analyse de variance 2

Coefficient de détermination R^2 : C'est un **indice de liaison**, pas nécessairement linéaire entre les variables étudiées qui varie Entre 0 et 1. Il mesure **la qualité de l'ajustement** des effets du facteur au travers des moyennes.

$$R^2 = \text{SCE}_{\text{MODELE}} / \text{SCE}_{\text{TOTAL}}$$

3.1 L'Épaisseur :

a. Analyse de la régression

Le tableau suivant donne les résultats de l'analyse de la variance :

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	0.1754	5	0.0351	25.4408	0.231 **
Résidus	0.0069	5	0.0014		
Validité	0.0066	3	0.0022	16.5691	5.7
Erreur	0.0003	2	0.0001		
Total	0.1823	10			

Tableau 12 : Analyse de la variance

ANOVA1 : on a $F_{\text{EXP}} > F_{\text{OBS}}$ c'est à dire $25.4408 > 5,05$ est donc le modèle explique significativement l'épaisseur de la semelle au seuil de signification 95% ;

ANOVA 2 : on a $F_{\text{EXP}} < F_{\text{OBS}}$ c'est à dire $16.5691 < 19,2$ est donc notre modèle est prédictif avec seuil de signification 95% ;

R^2 : le rapport entre SCM/SCT est égal à 0,962. Ce coefficient nous permet de conclure que notre modèle postulé permet d'expliquer 96,2% du phénomène étudié qui est l'Épaisseur . Les 3,8% restants sont dus aux résidus.

R^2 ajusté : qui est égal à 0,924 donne une idée sur l'ajustement du modèle. Dans notre étude, l'ajustement du modèle est de 92,4% ce qui traduit une bonne qualité de l'ajustement de l'estimation des coefficients de l'équation.

b. Distribution des Résidus

La distribution des résidus est illustrée sur la figure suivante :

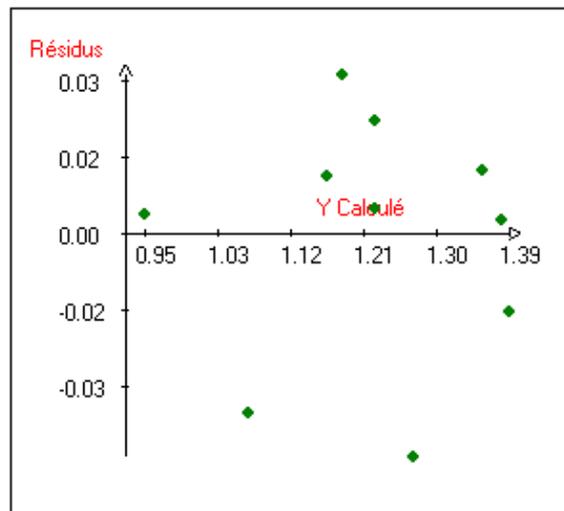


Figure 18 : Distribution des résidus

L'analyse de ce graphique nous permet de conclure que les résidus sont distribués normalement.

Conclusion

Le modèle mathématique associé à l'épaisseur est validé statistiquement.

c. Calcul des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Epaisseur)

Les résultats obtenus sur l'estimation des coefficients du modèle sont :

Nom	Coefficient	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	1.224	0.019	64.27	< 0.01 ***
b1	0.052	0.015	3.41	1.94 *
b2	-0.153	0.015	-10.11	0.0366 ***
b11	-0.006	0.023	-0.24	81.6
b22	-0.001	0.023	-0.02	98.1
b12	0.068	0.019	3.64	1.54 *

Tableau 13 : des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Epaisseur)

L'équation du polynôme postulé est donc :

$$Y = 1.224 + 0,052 X_1 - 0,153 X_2 - 0,006 X_1^2 - 0,001 X_2^2 + 0.068 X_1 X_2.$$

3.2 L'Aspect :

Comme c'était le cas pour le plan de criblage les semelles sont mesurées par des personnes qualifiés sur une échelle de 1 à 9. Et nous traitons par la suite les résultats de ce plan pour cette réponse

a. Analyse de la Régression

Le tableau suivant donne les résultats de l'analyse de la variance :

Source de variation	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport	Signif
Régression	0.2034	0.0678	10.9206	0.841 **
Résidus	0.0372	0.0062		
Validité	0.0228	0.0057	0.7873	62.5
Erreur	0.0145	0.0072		
Total	0.2406			

Tableau 14: Analyse de la variance

ANOVA1 : on a $F_{EXP} > F_{OBS}$ c'est à dire $10,92 > 5,05$ est donc le modèle explique significativement l'aspect de la semelle au seuil de signification 95% ;

ANOVA 2 : on a $F_{EXP} < F_{OBS}$ c'est à dire $0,78 < 19,2$ est donc notre modèle est prédictif avec un seuil de signification 95% ;

R² : le rapport entre SCM/SCT est égal à 0.885. Ce coefficient nous permet de conclure que notre modèle postulé permet d'expliquer 88,5% du phénomène étudié qui est l'Aspect ;

R² ajusté : qui est égal à 0,77 donne une idée sur l'ajustement du modèle. Dans notre étude, l'ajustement du modèle est de 77% ce qui traduit une bonne qualité de l'ajustement de l'estimation des coefficients de l'équation.

b. Distribution des Résidus

La distribution des résidus est illustrée sur la figure suivante :

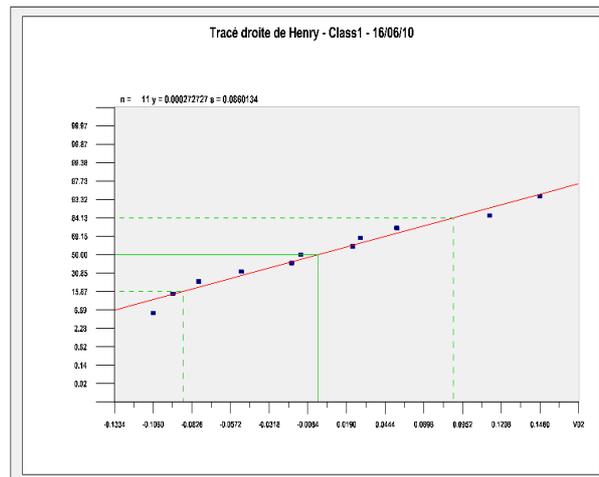


Figure 19 : Distribution des résidus (Aspect)

L'analyse de ce graphe nous permet de conclure que les résidus sont distribués normalement.

Conclusion

Le modèle mathématique associé à l'Aspect est validé statistiquement.

c. Calcul des coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Aspect)

Les résultats obtenus sur l'estimation des coefficients du modèle sont :

Nom	Coefficient	Ecart-Type	t.exp.	Signif. %
b0	7.878	0.060	131.77	< 0.01 ***
b1	-0.008	0.048	-0.18	86.2
b2	0.210	0.048	4.41	0.752 **
b11	-0.046	0.073	-0.63	56.1
b22	-0.281	0.073	-3.84	1.26 *
b12	0.067	0.058	1.16	30.0

Tableau 15 : coefficients du modèle et test d'influence des facteurs (Aspect)

L'équation du polynôme postulé est donc :

$$Y = 7,878 + 0,210 X_2 - 0,008 X_1 - 0,046 X_1^2 + 0,067 X_1 X_2 - 0,281 X_2^2$$

4) Étude de Désirabilité

Le principe de fonction de désirabilité est de résumer les réponses Y1 et Y2 en une fonction à optimiser $D(x) = g(Y1(x), Y2(x))$.

D représente la désirabilité de la solution X.

Cette étude permet de prévoir les coordonnées optimales, et de rechercher graphiquement les zones qui répondent aux critères.

D'abord on commence par la détermination des exigences de l'entreprise pour les 2 réponses :

Réponses	Cible gauche	Cible droite
Épaisseur	1	1,2
Aspect	7,5	8

Tableau 16 : Étude de désirabilité

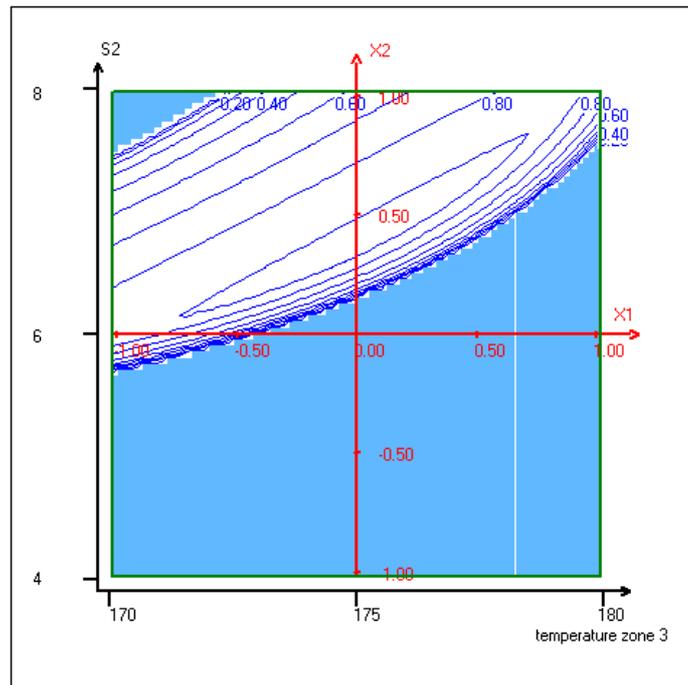


Figure 20: Variation de la désirabilité dans le plan : température zone 3, S2

L'analyse des résultats de l'étude de la désirabilité permet de trouver la zone d'opérabilité capable de satisfaire les consignes sur les deux réponses. En effet le domaine de la zone blanche permet d'avoir une infinité de réglage des deux paramètres qui permettent la production des semelles conformes.

Nous avons ainsi pu mettre au point un modèle mathématique pour les deux réponses validé statistiquement. A ce sujet nous avons effectué deux essais pour évaluer la valeur des deux réponses par le modèle postulé a priori est validé statistiquement. Ensuite nous avons expérimentalement les valeurs des deux réponses après exécution de ces deux essais Les résultats sont regroupés dans le tableau 15.

Variable	Valeur	Facteur	Valeur	Réponse	Nom de la réponse	Valeur	Valeur expérimentale
X1	-0.312998	température zone 3	173	Y1	Epaisseur	1.15	1,2
X2	0.599143	S2	7	Y2	Aspect	7.90	7,91

Tableau 17 : Caractéristiques et Coordonnées du maximum

Nous constatons que les valeurs prédites et les valeurs expérimentales en ces deux points sont pratiquement identiques.

En conclusion les deux modèles peuvent être appliqué avec confiance pour toute prédiction de ces deux réponses.

CONCLUSION

A l'issue de ce stage effectué dans la société ANIMAC nous nous sommes intéressés à la réduction du taux de non conforme du procédé de fabrication des semelles de chaussures de sécurité par injection du polyuréthane. D'abord c'était une occasion de passer cinq mois en plein temps au sein d'une PME, de voir de près l'organisation des équipes de travail dans des ateliers de production et de suivre le procédé de production de la réception de la matière première jusqu'à la livraison du produit fini. Passant par les différentes étapes de production et analyse de contrôle de la qualité. Ensuite, nous avons pu, par ce projet de recherche et développement, s'attaquer à un grand problème que vit l'entreprise marocaine à savoir le taux de rebut ou du non conforme.

A ce sujet nous avons intervenu sur la station qui présente le plus de problème dans ce processus de production.

Nous avons en premier temps hiérarchisé, par une étude de criblage, 17 paramètres de ce procédé selon leur impact sur le taux de non-conforme.

Ensuite les paramètres jugés influents par le plan de criblage ont été étudiés plus finement par un plan de surface de réponse. A l'issue duquel nous avons pu postuler à priori et valider statistiquement deux modèles quadratiques, correspondent à deux réponses. La qualité de la semelle produite et l'épaisseur de la bavure.

Nous avons ensuite vérifié l'utilisation de ces deux modèles. Après utilisation de ces modèles sur deux essais nous avons constaté que les résultats prédites et expérimentale sont identiques.

Nous avons ainsi mis en œuvre une méthode d'optimisation du procédé de production de semelle de chaussure par injection sur la station 47. Cela peut être généralisé sur d'autres stations moyennant de nouvelles études par la méthodologie des plans d'expériences.

PERSPECTIVES

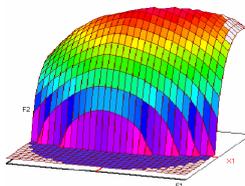
- Utiliser plus que 40 % de recyclé dans la matière utilisé dans la fabrication des inserts et des semelles ;
- Appliquer la méthodologie des plans d'expériences sur les autres modèles de semelles ;
- Réduire le temps d'attente due au retard de la fabrication des inserts ;
- Documenter les réglages et les problèmes rencontre dans la production ainsi que les interventions requises ;

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Cours** du Professeur BENOIT QUEFFELEC (UBO) « **CHIMIOMETRIE** »
- [2] **Cours** du Professeur FATI MA EZZAKI (FST Fès) « **Régression linéaire simple & Variables Aléatoires** »
- [3] **Cours** du Professeur Youssef KANDRI RODI (FST Fès) « **MANAGEMENT ET OUTILS DE LA QUALITE** »
- [4] **La validation des méthodes d'analyse, une approche chimométrique de l'assurance Qualité au laboratoire**, Max FEINBERG, Masson Paris 1996
- [5] © Revue MODULAD, 2006 Jacques GOUPY « **LES PLANS D'EXPERIENCES** »
- [6] **Cours** du Professeur Mohamed EL ASRI (FST Fès) « **LES PLANS D'EXPERINECES** »



Stage effectué à : ANIMAC



Master ST CAC Agiq

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: Mohamed ESSAQI

Année Universitaire : 2009/2010

Titre: Amélioration du processus de fabrication des semelles des chaussures de sécurité par injection du polyuréthane en utilisant la méthodologie des plans d'expériences .

Résumé

A L'issue de ce stage effectué dans la société ANIMAC nous nous sommes intéressés à la réduction du taux de non conforme du procédé de fabrication des semelles de chaussures de sécurité par injection du polyuréthane en utilisant de la méthodologie des plans d'expériences.

Nous nous sommes intéressés à la station qui présente le plus de problème dans ce processus de production (station 47), pour laquelle nous avons mis en oeuvre une méthode d'optimisation.

D'abord nous avons procédé à la classification de 17 paramètres du procédé par ordre d'influence sur le taux de non-conforme. Pour cela nous avons fait appel aux plans de criblage.

En suite nous sommes engagés dans une étude d'optimisation par le plan composite centré. Cette étude nous a permis de mettre au point une infinité de réglage, des paramètres de ce procédé, capable de produire des semelles avec un taux de rebut acceptable.

Mots clés : Plans d'expériences, plan de criblage, plan de surface de surface de réponse, analyse de variance, Désirabilité.