



HAL
open science

Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application à la tenue à l'usure des aciers hydrogénés

Djilali Kaid-Ameur

► **To cite this version:**

Djilali Kaid-Ameur. Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application à la tenue à l'usure des aciers hydrogénés. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03444762

HAL Id: hal-03444762

<https://hal.science/hal-03444762v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

STRATEGIES D'OPTIMISATION PAR LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES ET APPLICATION À LA TENUE À L'USURE DES ACIERS HYDROGÉNÉS

Kaid-Ameur Djilali,^a ,Hebbar Ahmed ^b

^a Centre universitaire de Relizane, Bormadia 48000 –Algeria,(djilalikaidameur@yahoo.fr)

^b Université de Mostaganem-Bp288-Mostaganem 27000-Algeria,(a_hebbar@yahoo.fr)

Abstract:

The work presented in this study focus on the application of the method of design of experiments (EDM) in the study and optimization of the quantification of wear steels (XC48, A60) under the effect of an environmental factor in this case hydrogen. Modelling can be based on mathematical models by (EDM) to analyze more deeply the phenomenon of wear while taking into account various relevant factors governing it [1].

The EDM, introduced is a homogeneous set of tools and methods algebraic statistics to establish and analyze the relationships in the studied variables (responses) and their sources of variation (factors) [2].

This analysis can be qualitative: screening analysis (determining influential factors) or quantitative: Response surface methodology (variation of responses based on influential factors). In all cases, it is intended for the determination of mathematical models approached the responses expressed in terms of factors. These models are derived from the values of series of experiments. Defining this experimental design determines the measurable quality models. The multiple facets of the MPE then serve as the basis for the development of optimization strategy [3].

Key words:

Experimental design Method, Screening Analysis, response surface Methodology, Optimisation, Distributed calculations, wear and hydrogen.

Résumé :

Les travaux présentés dans cette étude portent sur l'application de la méthode des plans d'expériences (MPE) à l'étude et à l'optimisation de la quantification de l'usure des aciers (XC48, A60) sous l'effet d'un facteur d'environnement en l'occurrence l'hydrogène. La modélisation peut s'inspirer des modèles mathématiques établis par la (MPE) afin d'analyser plus profondément le phénomène de l'usure tout en tenant compte des différents facteurs pertinents la régissant [1].

La MPE, introduite est un ensemble homogène d'outils et de méthodes algèbro-statistiques visant à établir et analyser les relations dans les grandeurs étudiées (réponses) et leurs sources de variations (facteurs) [2].

Cette analyse peut être qualitative :étude du « screening » (détermination des facteurs influents) ou quantitative :méthodologie des surfaces de réponses (variation des réponses en fonction des facteurs influents).Dans tous les cas ,elle a pour but la détermination de modèles mathématiques approchés des réponses exprimées en fonction des facteurs .Ces modélisations sont déduites des valeurs obtenues de séries d'expérimentations .La définition de ces plans d'expériences détermine la qualité mesurable

des modèles. Les multiples facettes de la MPE servent alors de fondement au développement de stratégie d'optimisation [3].

Mots clés :

Méthodes des plans d'expériences, Méthodologie des surfaces de réponse, Optimisation, Calculs distribués, usure, hydrogène.

1. INTRODUCTION

Depuis bien longtemps, l'observation et l'expérimentation sont deux outils essentiels de l'avancement des sciences. L'observation permet d'acquérir une première connaissance du des phénomènes de la nature, au sens le plus large et d'en déduire éventuellement des hypothèses, qui doivent ensuite être vérifiées et précisées, ou amendées [4].

L'un des enjeux majeurs de la tribologie est de maîtriser le frottement et l'usure des pièces. En effet, le frottement et l'usure qui se manifestent négativement au bon fonctionnement des ensembles et montages mécaniques et qui engendrent la résistance au déplacement, les pertes par frottement, la dissipation d'énergie, l'élévation de température, le bruit; causant ainsi les effets indésirables comme la perte de cote, la perte de fonction, l'émission de débris, les pollutions de l'environnement, les colmatages des interfaces, l'altération des propriétés mécaniques des composants, la fluctuation des frottements, la dégradation des surfaces et le grippage [5,6,7,8].

Dans le contexte économique actuel, cette compétitivité dépend fortement de la productivité et de la qualité des produits, ce qui se traduit pour les entreprises par des améliorations de la qualité de produits en un temps plus court. Dans un procédé de fabrication mécanique, depuis la mise en forme des métaux jusqu'à l'assemblage final du produit par exemple, cette augmentation de cadence entraîne souvent une accélération de l'usure des pièces ayant pour conséquences des pannes dues au grippage d'un palier ou d'une rotule qui seront d'autant plus lourdes que la cadence de production est plus élevée.

Afin d'augmenter la fiabilité des pièces en frottement et la durée de vie des outils, les ingénieurs proposent souvent des solutions au niveau de l'optimisation de la conception, du choix de matériaux et de traitements de surfaces et de la lubrification. L'enjeu sécuritaire et économique des machines exige souvent une validation préalable par des essais sur banc avant d'intégrer la nouvelle solution dans le système, notamment dans le domaine de transport et de production d'énergie. Le choix d'une méthode d'essais tribologiques représentatifs du système réel devient donc une étape incontournable dans la réussite de l'ensemble du projet.

En ce sens, on a élaboré expérimentalement notre travail afin de déterminer l'évolution de l'usure en fonction des paramètres de services tels que la force de contact entre les deux surfaces, la vitesse de mouvement relatif des deux surfaces, la nature du matériau de la pièce (surface) sous l'effet de quelques éléments environnementaux tels que l'hydrogène ayant des impacts respectifs de fragilisation par l'hydrogène, et la durée de fonctionnement ou de service. Où on tentera d'exprimer cette évolution mathématiquement et qui sera régie par un modèle polynomiale afin de déterminer les conditions optimales qui nous réduisent le plus fortement possible l'usure et de connaître aussi quel paramètre faut-il corriger et ainsi situer exactement les échéances d'entretien et de maintenance des éléments faillibles et liés aux paramètres considères.

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière et à d'autres facteurs. On sait depuis longtemps

que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions comme les guidages, l'étanchéité et la qualité de la fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables et la nécessité de les décrire ne date pas d'hier [9,10].

2 EXPERIMENTATION

2.1 Matériaux des pièces d'essai

2.1.1 Pion frotteur

Acier Rapide Supérieur « ARS » type HS2-9-2 :

C% = 0.95 à 1.05 ; Si%=0.70 ; Mn%=0.4 ; P%= 0.03 ; S%=0.03 ; Cr%= 3.50 à 4.50 ; Mo%= 8.20 à 9.20 ; V%= 1.70 à 2.20 ; W%= 1.50 à 2.10.

(Dureté après trempe 68HRC = 1150 à 1200 daN/mm²)

{Test effectué au laboratoire de la PMO-PMA de sidi bel-abbés-Algérie, le 04 / 03 / 2008}

Les aciers utilisés sont (X₁) : A60 (nouvelle norme E 335 Re=335MPa, Rm=600MPa de dureté Vickers H_v =118) et XC48 (nouvelle nuance C45- R_e=375 à 580 MPa , Rm=710 MPa

A% = 15 et de dureté Vickers H_v =224) [NF EN 10027-1].

2.1 Temps d'essai

Il est choisi égal à une heure après un test « pilote » tenant compte de la condition ou l'usure est théoriquement la plus faible et après que la lecture expérimentale de la perte de masse est significative .

La condition du test est établie à :

X₁ (dureté) = -1.....équivalent à 118 Hv

X₂ (vitesse) = +1.....équivalent à 0.4 m/s

X₃ (charge) = +1.....équivalent à 20 Newtons

X₄ (temps de chargement) = -1.....équivalent à 2 heures

-La vitesse de coulissement (X₂) est sélectionnée sur la machine en coups par minute (C/min) mais elle est convertie en mètre par seconde (m/s) ou $[V(C/min) \times 2L(m)] / 60s$ (L est la longueur de la course parcourue par le pion frotteur entre les deux points « mort » du coulissement) et qui est à 02 niveaux 0.08 et 04 « m/s »

-La charge (X₃) est en newton est à 02 niveaux 5 et 20 newtons

-Le temps de chargement en hydrogène(X₄) est à 03 niveaux (2,4 et 6 heures) qui se fait par électrolyse d'une solution de H₂SO₄ de 10% de concentration.

2.2 Résultats des essais réalisés sur les échantillons « hydrogénés »

(Valeurs expérimentales des pertes de masse (en gramme) des échantillons chargés en hydrogène (H₂)) :

Tableau I : Valeurs expérimentales des pertes de masse

(X ₁)	(X ₂)	(X ₃)	(X ₄)	Y ₁	Y ₂	Y ₃	\bar{Y} g				
118	-	0.08	-	5	-	2	-	0.0062	0.0069	0.0071	0,00673333
118	-	0.08	-	5	-	6	+	0.0080	0.0078	0.0082	0,008
118	-	0.08	-	5	-	4	0	0.0075	0.0071	0.0077	0,00743333
224	+	0.4	+	20	+	2	-	0.0112	0.0118	0.0109	0,0113
224	+	0.4	+	20	+	6	+	0.0113	0.0119	0.0110	0,0114
224	+	0.4	+	20	+	4	0	0.0115	0.0121	0.0111	0,01156667
118	-	0.08	-	20	+	2	-	0.0127	0.0130	0.0122	0,01263333
118	-	0.08	-	20	+	6	+	0.0140	0.0138	0.0135	0,01376667
118	-	0.08	-	20	+	4	0	0.0135	0.0136	0.0130	0,01336667
118	-	0.4	+	5	-	2	-	0.0090	0.0101	0.0104	0,00983333
118	-	0.4	+	5	-	6	+	0.0108	0.0098	0.0101	0,04263333
118	-	0.4	+	5	-	4	0	0.0095	0.0083	0.0090	0,00893333
224	+	0.08	-	5	-	2	-	0.0048	0.0052	0.0061	0,00536667
224	+	0.08	-	5	-	6	+	0.0050	0.0047	0.0049	0,00486667
224	+	0.08	-	5	-	4	0	0.0055	0.0061	0.0058	0,0058
224	+	0.4	+	5	-	2	-	0.0065	0.0060	0.0069	0,00646667
224	+	0.4	+	5	-	6	+	0.0066	0.0069	0.0070	0,00683333
224	+	0.4	+	5	-	4	0	0.0064	0.0071	0.0068	0,00676667
224	+	0.08	-	20	+	2	-	0.0085	0.0090	0.0080	0,0085
224	+	0.08	-	20	+	6	+	0.0093	0.0097	0.0101	0,0097
224	+	0.08	-	20	+	4	0	0.0091	0.0085	0.0088	0,0088
118	-	0.4	+	20	+	2	-	0.0159	0.0151	0.0161	0,0157
118	-	0.4	+	20	+	6	+	0.0170	0.0177	0.0173	0,01733333
118	-	0.4	+	20	+	4	0	0.0161	0.0168	0.0159	0,01626667

Les masses sont pesées en « gramme » à l'aide d'une balance électronique à affichage digital avec une précision de 10^{-4} gramme soit 10^{-1} milligramme

2.3 Calcul de régression suivant l'ordre du tableau de calcul du plan : type ($2^3 3^1$)

En statistiques, la **méthode des surfaces de réponses (MSR)** a pour but d'explorer les relations entre les variables dépendantes et indépendantes impliquées dans une expérience. Elle est due aux travaux de 1951 de George Box et K.B. Wilson. L'idée principale de leur méthode est l'utilisation d'une séquence d'expériences. Box et Wilson suggèrent d'utiliser un modèle à polynôme de second degré, mais concèdent que ce modèle n'est qu'une approximation. Toutefois, ce dernier a l'avantage d'être facile à estimer et à appliquer, même lorsque l'information disponible sur les processus en cours est minime.

-Plan d'expérience du type composé $2^k 3^k$:

Ce type est utilisé lorsqu' on prévoit des effets quadratiques de quelques paramètres parmi les autres comme on peut par exemple dissocier un plan de type 3^5 avec (243 expériences), à un plan composé de $(2^3 \cdot 3^2)$ avec (72 expériences) ou même simplifier à un plan réduit de type 2^{3-1} d'ou le plan composé de $(2^2 \cdot 3^2)$ avec (36 expériences). Avec les coefficients $b_0 = \bar{Y} - 2/3b_{ii}$

X_1	X_2	...	X_n	Réponse : Y
x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	Y_1
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nn}	Y_n

Tableau II : valeurs codées des paramètres expérimentaux

N°	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1 X_2	X_1 X_3	X_1 X_4	X_2 X_3	X_2 X_4	X_3 X_4	X_1 X_2 X_3	X_1 X_2 X_4	X_1 X_3 X_4	X_2 X_3 X_4	X_1 X_2 X_3 X_4	X_4^*	\bar{Y}
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	6,733
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	5,8
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	4,263
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	6,466
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	13,366
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	9,7
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	15,7
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	11,566
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	8,000
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	5,366
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	8,933
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	6,833
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	12,633
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	8,800
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	17,333
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	11,3
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	7,433
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	4,866
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	9,833
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	6,766
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	13,766
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	8,5
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	16,266
24	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	11,4

2.4. Détermination du modèle mathématique décrivant l'usure des échantillons « hydrogénés »

Tableau III : Calcul des coefficients de régressions

N°	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₃	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	X _i *	\bar{Y} (mg)
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1/3	6,733
2	+	-	-	0	-	-	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	5,800
3	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	1/3	4,263
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	1/3	6,466
5	-	-	+	0	+	-	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	13,366
6	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	1/3	9,700
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1/3	15,700
8	+	+	+	0	+	+	0	+	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	11,566
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	1/3	8,000
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1/3	5,366
11	-	+	-	0	-	+	0	-	0	0	+	0	0	0	0	-2/3	8,933
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	1/3	6,833
13	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1/3	12,633
14	+	-	+	0	-	+	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	8,800
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	1/3	17,333
16	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	1/3	11,300
17	-	-	-	0	+	+	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	7,433
18	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	1/3	4,866
19	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	1/3	9,833
20	+	+	-	0	+	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	6,766
21	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	1/3	13,766
22	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1/3	8,500
23	-	+	+	0	-	-	0	+	0	0	-	0	0	0	0	-2/3	16,266
24	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1/3	11,4
Coeff. regressin	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	B ₁ 2	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₁₂₄	b ₁₃₄	b ₂₃₄	b ₁₂₃₄	b ₄₄	Somme \bar{Y}
	-1.53	0.9	2.87	-0.023	0.037	0.4	-0.50	0.49	-1.12	0.53	-0.22	0.38	-0.35	0.33	-0.58	-0.320	231.622

Modèle mathématique se présente en utilisant les méthodes statistiques, sous forme polynomiale, qui est une partie de la série de Taylor : $Y_i = \beta_{ij} X_{ij}$ (X : matrice des données d'entrée, β = matrice des coefficients de régression et Y = matrice des données de sortie)

-Analyse de régression :

Une fois le modèle mathématique obtenu (équation de régression), on procède à l'analyse statistique des résultats afin de vérifier la signification de ces coefficients de régression et l'adéquation du modèle, suivant l'algorithme de BOX-WILSON[11]:

Le modèle mathématique global décrivant l'usure (Y) en fonction des paramètres influents et de leurs interactions:

$$Y(X_i) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 + 2,87X_3 - 0,023X_4 + 0,037X_1X_2 + 0,4X_1X_3 + 0,17X_1X_4 + 0,49X_2X_3 - 1,12X_2X_4 + 0,53X_3X_4 - 0,22X_1X_2X_3 + 0,38X_1X_2X_4 - 0,35X_1X_3X_4 + 0,33X_2X_3X_4 - 0,58X_1X_2X_3X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(1)$$

2.5. Variance de reproductibilité [11]

$$S^2_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}$$

$$S^2_{rep} = [(34,1/24)] = 1,42$$

2.6. Valeurs des distributions des coefficients de régression [11]

$$S^2(B_i) = \frac{S^2_{rep}}{N \cdot m}$$

$$S^2(b_i) = [1,42] / 24 \cdot 3 = 0,0197$$

2.7. Test de « Student » [11]

Le **test de Student**, ou **test t**, est un ensemble de tests d'hypothèse paramétriques où la statistique calculée suit une loi de Student lorsque l'hypothèse nulle est vraie. Un test de Student peut être utilisé notamment pour tester statistiquement l'hypothèse d'égalité de l'espérance de deux variables aléatoires suivant une loi normale et de variance inconnue. Il est aussi très souvent utilisé pour tester la nullité d'un coefficient dans le cadre d'une régression linéaire[12].

$$-t_{(\alpha, fy) = [\alpha=0,05, N(m-1)]} = t_{(\alpha, fy) = t_{[\alpha=0,05, 48]} = 2,0086$$

Coefficient acceptable doit être supérieur ou égal à $|b_i|$:

$$t_{\alpha, f_y} \cdot S^2(b_i) = |b_i| = 2,0086 \cdot 0,0197 = 0,0396$$

-Considérant uniquement les coefficients de régression significatifs, le modèle aura la forme:

$$Y(X_i) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 + 2,87X_3 + 0,4X_1X_3 + 0,17X_1X_4 + 0,49X_2X_3 + 1,12X_2X_4 + 0,53X_3X_4 - 0,22X_1X_2X_3 + 0,38X_1X_2X_4 - 0,35X_1X_3X_4 + 0,33X_2X_3X_4 - 0,58X_1X_2X_3X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(1.1)$$

2.8. Test de Cochran [11]

$$G_{\max} = \frac{S^2(\max)}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = (0,028 / 3,41) = 0,0082$$

Inférieur au facteur de Cochran théorique $G_{th} = 0,1907$ [Tableau 2 Annexe] pour ($m=3$ et $N=24$) ce qui nous laisse dire que les dispersions sont « Homogènes ».

2.9. Test de Fischer [11] :

Le test de Fisher, ou test F, est un test d'hypothèse statistique qui permet de tester l'égalité de deux variances en faisant le rapport des deux variances et en vérifiant que ce rapport ne dépasse pas une certaine valeur théorique que l'on cherche dans la table de Fisher (ou table de Snedecor).

$$F_{\exp} = \frac{S_{rés}^2}{S_{rep}^2}$$

Remarque : pour le test on place au numérateur la plus grande des deux variances.

Si au contraire on place au numérateur la plus petite des deux, le rapport F peut être exprimé en pourcentage. Par exemple un F de 94 % ou 0,94 signifie que les deux variances sont très proches [13].

$$\text{Total des } (\hat{Y} - Y_{moy})^2 = 11922046,3 \text{ mg}^2$$

$$F_{\exp} = \frac{S_{rés}^2}{S_{rep}^2}$$

$$S_{rés}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_{ii} - \bar{Y}_i)^2}{N-L}$$

Où L est le nombre des coefficients significatifs

On rappelle que l'unité de cette somme $(\bar{Y} - \hat{Y})^2$ est en mg^2

(On multiplie par 10^{-6})..pour la conversion de l'unité en gr^2

$$S_{rés}^2 = [11,9220463 / (24-15)] = [11,9220463 / 9] = 1,324$$

Et delà on déduit que le facteur de « Fischer » expérimental (F_{exp}) de la relation :

$$F_{exp} = (1,324 / 1,42) = 0,932$$

F_{th} (facteur de Fischer théorique est « tiré » du Tableau 3 Annexe

F_{th} est le point dont les coordonnées sont $f_1 = N-L$ et $f_2 = N(m-1)$

- $f_1=10$ et $f_2 = 48$ et d'après la table de Fischer $f_2= 48$ est compris entre les valeurs

remarquables de f_2 (40 et 60) qui donne avec $f_1=10$ les 02 valeurs $F_{th} = (1,99 ; 2,08)$, ce qui

nous permet de dire que $F_{exp} < F_{th}$ d'où le modèle mathématique décrit le phénomène

d'une manière adéquate.

3. Graphes et discussions

3.1. Premier cas

Si on maintient les deux paramètres ($X_1; X_2$) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_3, X_4)$) et une surface de réponse (*figure I*):

$$Y(X_3, X_4) = 231,87 + 2,87X_3 + 0,53X_3X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(1.1.1)$$

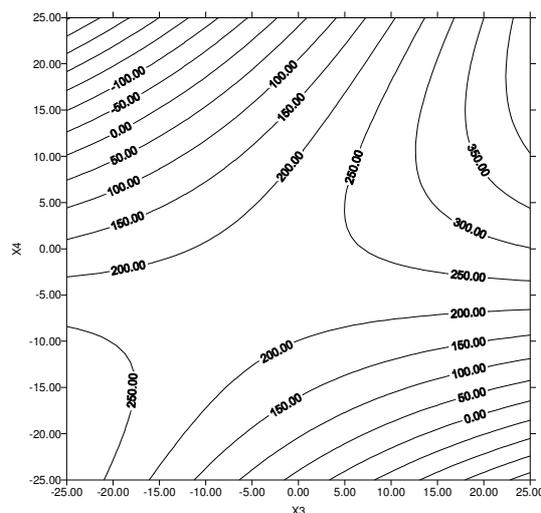


Figure I-1 : Effet de la charge et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

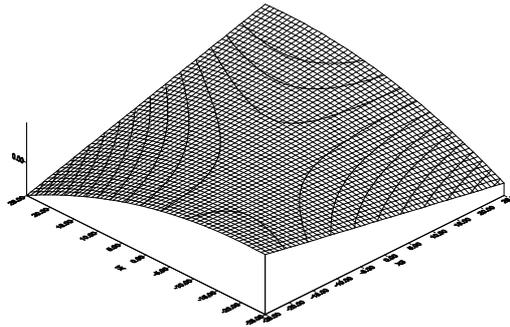


Figure I-2 : Effet de la charge et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

On observe de cette figure qu'avec une augmentation de la charge entre [20 à 6,2] Newtons et avec une variation du temps de chargement de [2 à 3,36] heures, l'usure décroît non linéairement et lentement. Elle croît linéairement et rapidement lorsque le temps de chargement diminue de 6 à 5,52 h avec une augmentation de la charge de 5 à 8N; alors qu'elle croît non linéairement et rapidement pour une variation de 5,52 à 3,76h avec une baisse de charge de 8 à 45,65N.elle décroît non linéairement et lentement quand la charge s'élève de 16,4 à la charge maximale 20N avec une diminution du temps de chargement de 6 à 3,76h, elle croît aussi linéairement et rapidement avec l'augmentation du temps de chargement de 2 à 2.36 heures simultanément avec la diminution de la charge de 20 à 16,4N puis elle croît non linéairement et rapidement à partir de 16,4 allant jusqu'à 7,7N au moment où le temps de chargement passe de 2,36 à 3,8 heures.

L'allure globale du graphe tend vers un point optimum qui est un « minimax » dont les coordonnées sont (10,54 N ; 3,56 h) où vaut 0,2779 g.

3.2. Deuxième cas

Si on maintient les deux paramètres (X_1 ; X_3) constants à leurs valeurs moyennes , le modèle aura la forme ($Y(X_2, X_4)$) et une surface de réponse (figure II):

$$Y(X_2, X_4) = 231,87 + 0,9X_2 - 1,12X_2X_4 - 0,32X_4^2 \dots\dots\dots(1.1.2)$$

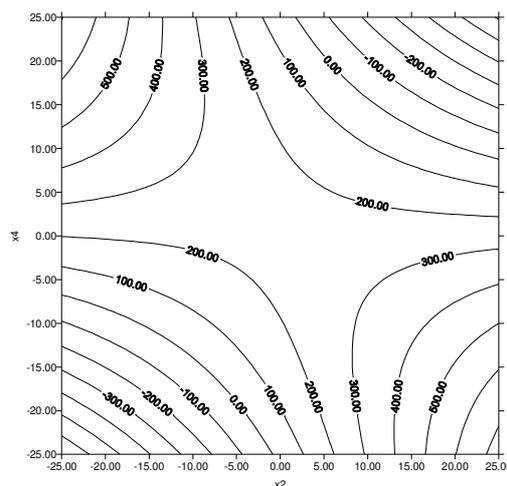


Figure II-1 : Effet de la vitesse et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

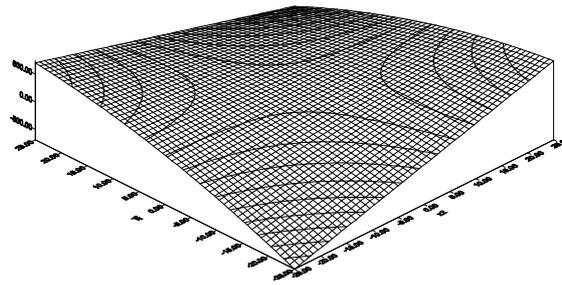


Figure II-2 : Effet de la vitesse et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

La chute de la vitesse de 0,4 à 0,304m/s et l'augmentation du temps de chargement de 2 à 3,84h entraîne une décroissance non linéaire et lente de l'usure de même que lorsque la vitesse augmente de 0,08 à 0,179m/s avec une réduction du temps de chargement de 6 à 4,24h .Tandis que l'usure croit linéairement et rapidement pour une augmentation simultanée de la vitesse entre 0,08 et 0,124m/s et du temps de chargement de 2 à 2,32h ; l'usure continue à croître non linéairement et lentement au de là de la vitesse 0,124 à 0,281m/s avec une augmentation du temps de chargement de 2,32 à 4h ,l'usure croit linéairement et rapidement pour une diminution de la vitesse de 0,4 à 0,352m/s continue mais d'une manière non linéaire et lente quand la vitesse baisse de 0,352 à 0,201m/s avec la diminution du temps de chargement de 5,6 à 4,2h.

Dans ce cas l'usure possède un point optimum qui est un minimax aux coordonnées réelles (0,23 m/s; 4,06 h) ou elle égale la valeur de 0,2257 g.

3.3. Troisième cas

Si on maintient les deux paramètres (X_1 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes , le modèle aura la forme $Y(X_2, X_3)$ et une surface de réponse (*figure III*):

$$Y(X_2, X_3) = 231,87 + 0,9X_2 + 2,87X_3 + 0,49X_2X_3 \dots\dots\dots(1.1.3)$$

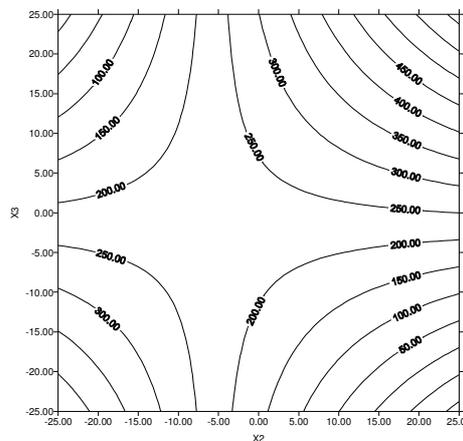


Figure III-1 : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

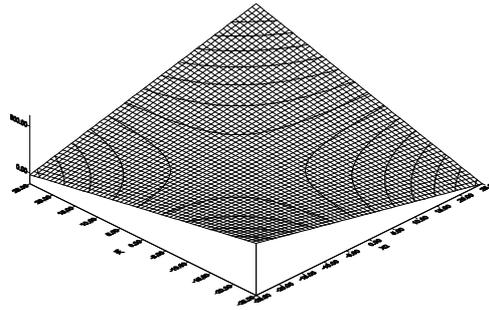


Figure III-2 : Effet de la vitesse et de la charge sur l'usure

De ce graphe on constate que l'usure augmente non linéairement et lentement lorsque la vitesse diminue de 0,4 à 0,22m/s avec une diminution de la charge de 11,6 à 5N, cette esquisse de l'usure se répète quand la vitesse augmente de 0,08 à 0,188m/s et au même moment ou la charge diminue de 20 à 18,2N.

L'usure décroît non linéairement et lentement avec la diminution de la vitesse de 0,4m/s à 0,214m/s et la chute de la charge de 20 à 12,5N, cette configuration se reproduit avec la diminution de la charge entre 11,3 et 5N et une augmentation de la vitesse de 0,08 à 0,192m/s. Cette représentation montre que l'usure possède un point optimum de coordonnées réelles (0,203 m/s ; 11.95 N) qui est un minimax ou sa valeur est de 0,2673 g.

3.4. Quatrième cas

Si on maintient les deux paramètres (X_2 ; X_3) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_4)$) et une surface de réponse (figure IV):

$$Y(X_1, X_4) = 231,87 - 1,53X_1 - 0,5X_1X_4 - 0,32 X_4^2 \dots\dots\dots(1.1.4)$$

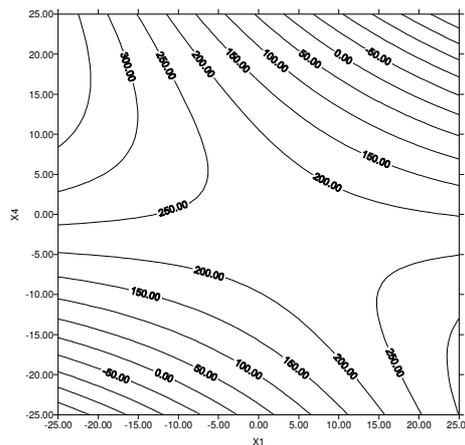


Figure IV-1 : Effet de la dureté et du temps de chargement en hydrogène sur l'usure

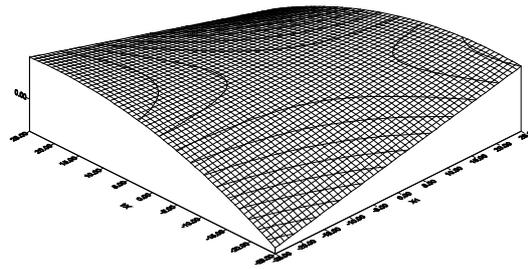


Figure IV-2 : Effet de la dureté et du temps de chargement en hydrogène sur l’usure

Dans ce cas, l’usure présente un point optimum qui est un minimax dont les coordonnées sont (179,26 Hv ; 3,75 h) ou sa valeur est égale à 0,067 g.

L’usure croit linéairement et rapidement avec une augmentation simultanée de la dureté de 118 à 155,1 Hv et du temps de chargement de 2 à 2,6h , en augmentant respectivement la dureté de 155,1 à 204,92 Hv et du temps de chargement de 2,6 jusqu’à 3,6h , l’usure continue à croître mais d’une manière non linéaire et lente ,alors qu’elle décroît non linéairement et lentement avec une augmentation de la charge de 118 à 139,2 Hv avec une diminution de du temps de chargement de 6 à 3,88h , cette décroissance se reproduit aussi de la même façon pour une diminution du temps de chargement de 3,6 à 2h et une baisse de dureté de 224 à 213,4 Hv.

De la valeur maximale de la dureté 224 à 194,32 Hv et une diminution du temps de 6 à 5,3h l’usure croit rapidement et linéairement et continue sa croissance mais non linéairement et lentement pour une diminution simultanée de la dureté de 194,32 à 145,56 Hv et du temps de chargement à partir de 5,4 à 4h.

3.5. Cinquième cas

Si on maintient les deux paramètres (X_2 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes , le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_3)$) et une surface de réponse (*figure V*):

$$Y(X_1, X_3) = 231,87 - 1,53X_1 + 2,87X_3 + 0,4X_1X_3 \dots\dots\dots(1.1.5)$$

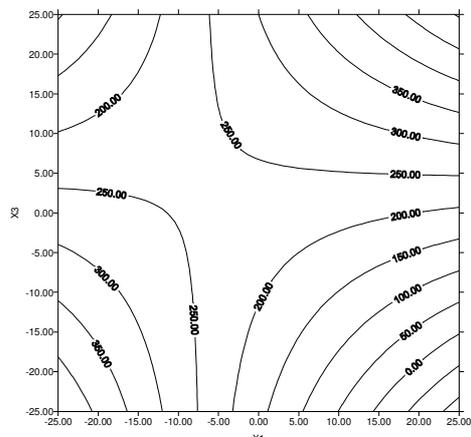


Figure V-1 : Effet de la dureté et de la charge sur l’usure

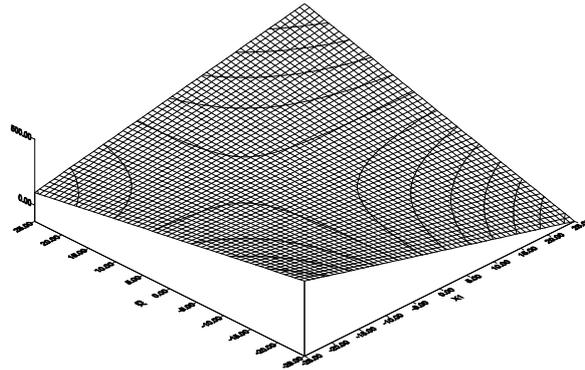


Figure V-2 : Effet de la dureté et de la charge sur l'usure

De ce graphe, on observe une croissance non linéaire et lente de l'usure quand la dureté augmente de la charge de 5 à 12,72 N et la dureté diminue de 224 à 163,58 Hv, l'évolution de l'usure demeure de la même manière lorsque la dureté chute de 144,5 à 118 Hv avec une diminution de la charge de 20 à 15,5 N ; cependant l'usure décroît non et non linéairement et lentement pour une augmentation simultanée et respective de la dureté et de la charge entre [118 ; 155,1] Hv et [5 ; 13,4] N et aussi lorsque la dureté et la charge diminuent respectivement de 224 à 158,28 Hv et de 20 à 14 N. L'usure est égale à 0,8825 g au point optimum de coordonnées (155,79 Hv ; 13,64 N) caractérisant un minimax.

3.6. Sixième cas

Si on maintient les deux paramètres (X_3 ; X_4) constants à leurs valeurs moyennes, le modèle aura la forme ($Y(X_1, X_2)$) et une surface de réponse (figure VI):

$$Y(X_1, X_2) = 231,87 - 1,53X_1 + 0,9X_2 \dots\dots\dots(1.1.6)$$

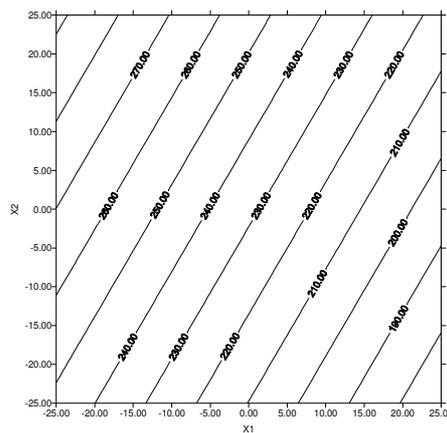


Figure VI-1 : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

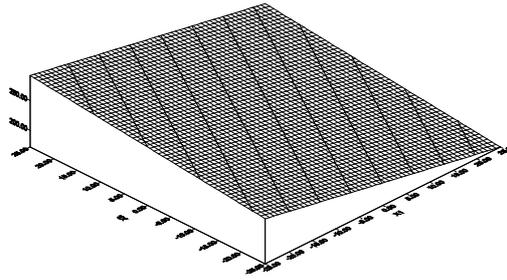


Figure VI-2 : Effet de la dureté et de la vitesse sur l'usure

Dans ce cas, le graphe ne présente aucun optimum et l'usure augmente continuellement et rapidement avec la diminution de la dureté et l'augmentation de la vitesse.

4. CONCLUSION

En s'intéressant à l'effet que peuvent engendrer les paramètres d'environnement (hydrogène et l'eau de mer) sur l'usure des aciers considérés et à l'issue de la recherche bibliographique parmi les différents travaux liés à l'usure des matériaux de construction mécanique et suite aux divers essais (soixante douze « 72 = 24 x 3 lectures ») effectués au volet expérimental de la thèse, on a pu observer que l'usure est et restera un phénomène difficile à quantifier et à maîtriser mais très possible de l'atténuer en apportant quelques régulations optimales sur les paramètres influents sur ce phénomène comme (duretés des pièces en contact , vitesse de service relative entre les pièces en contact, charges appliquées aux surfaces de contact et [la durée de chargement en hydrogène] des surfaces de contact) .

L'étude expérimentale nous a permis d'établir la relation de ces paramètres avec l'usure est l'exprimer par un modèle mathématique résultant d'une méthode statistique de planification des expériences ;

Ce modèle est représenté graphiquement en fixant à chaque cas deux paramètres parmi les quatre considérés à leur valeur moyenne afin de nous permettre la visualisation de l'effet que peuvent appliquer les deux autres paramètres non fixés, cette opération nous a offert six graphes des six cas probables appelés « Surface de réponse » nous permettant d'observer le suivant :

- Dans cinq des six cas observés , l'usure possède un point optimum qui est un « Mini Max » qu'on peut calculer ces coordonnées par des méthodes numériques (méthode de Cramer...)[11].
- Les valeurs réelles des facteurs influant sur l'usure équivalentes aux coordonnées « codées » des « Mini Max » permet de signaler que l'usure est la plus importante au voisinage des valeurs moyennes des différents facteurs
- L'usure est proportionnelle avec la vitesse, la charge et la durée de chargement en hydrogène mais inversement proportionnelle avec la dureté . (c'est à dire que la croissance de l'usure est liée à la croissance de la vitesse , de la charge et de la durée et que la diminution de l'usure est liée à la croissance de la dureté) .
- L'usure diminue considérablement avec la diminution simultanée de la vitesse et de la charge appliquée tout en maintenant une dureté moyenne et la durée de chargement en hydrogène moyenne (voir surface de réponse du sixième cas à la *figure VI*) .

- Le temps de chargement en hydrogène associé à chacun des trois autres paramètres induit à des « minimax » d'usure comme on le remarque aux (deuxième, quatrième et cinquième) cas et cela ne peut que signifier l'effet fragilisant de l'hydrogène sur la surface de contact.
- Le temps de chargement influe moins sur l'usure quand la dureté du matériau est importante comme le prouve la configuration graphique du cinquième modèle réduit où l'usure est la plus faible (0,067 g) au point optimum correspondant.
- l'effet de l'hydrogène sur la tenue à l'usure des aciers est lié beaucoup plus à la dureté de l'acier, donc à sa structure métallurgique s'appauvrit en carbone quand la dureté augmente est cette interaction peut être expliquée par la diminution des lacunes structurelles qui constituent un site d'accueil pour les petits atomes d'hydrogène responsable de la fragilisation superficielle de l'acier conduisant à son mauvais comportement à l'usure.

5. REFERENCES

- [1] Rencher A.C. [2000]. Linear models, in statistics. New York, Wiley, 578 p.
- [2] Riley J. [1994]. Aspects of statistical technique and presentation. *Exper. Agric.* 30(4), 381-394.
- [3] F. Guillon, Modélisation et optimisation par les 63 plans d'expériences d'un moteur à commutations 64 Electroniques, Thèse de Doctorat, Université de Lille, 65 1997 66.
- [4] S. Vivier, Stratégie d'optimisation par la méthode 67 des plans d'expériences et application aux dispositifs 68 électroniques modélisés par éléments finis, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, 69 2002 70.
- [5] Korovchinsky MV. Local contact of elastic bodies with wear of their surface. *Contact Interaction of Solid Bodies and Calculation of Friction Forces and Wear*. Moscow: Nauka; 1971. 130-140.
- [6] Korovchinsky IG, Rajeev PT, Farris TN. Wear in partial lip contact. *J. Tribol.* 2001; 123:848-56.
- [7] Archard JF. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.* 1953; 24:981-8.
- [8] Johnson KL. Mechanics of adhesion. *Tribology International* 1989; 31(8):413-8.
- [9] J. Georges, Frottement usure et lubrification. Ed. 40 Eyrolles. (2000) 405-415 41.
- [10] B. Bhushan, Introduction to Tribology, John Wiley & Sons (2001) 28-30 43.
- [11] A. Hebbar, Méthodes statistiques de planification extrémale des expériences, Polycopié, Université de Mostaganem, (2006) 71-72
- [12] Harold Hotelling (1930, p. 189) dans un article de *British statistics* cité par S.L.ZABELL dans "On Student's 1908 paper "The probable error of the mean"", Special invited paper, *Journal of the American Statistical Association* 103 (2008), pp.1-7