

Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la qualité du lubrifiant sur la vibration des machines tournantes

Wafa KRIKA^{1*}, Azzedine BOUZAOUT¹

¹Laboratoire de recherche LRPCSI - Skikda
Département de Génie mécanique, Faculté des Sciences de la Technologie. Université Mohamed Chérif
Messaadia – Souk-Ahras. BP 1553, 41000 Souk-Ahras, Algérie
wafa2281988@hotmail.com

Résumé - Dans le cadre de la maintenance conditionnelle et le diagnostic, ce travail a pour objectif d'améliorer la disponibilité des machines tournantes lubrifiées d'une manière au d'autre et de suivre l'évolution de la vibration de ces machines à travers l'intégration des problèmes inverses tels que la dégradation de la qualité du lubrifiant. Cette étude a pour but de caractériser l'influence de la qualité (la viscosité) du lubrifiant sur la vibration d'un composant d'une machine tournante. Des essais expérimentaux étaient réalisés dans ce sens sur un dispositif d'engrenage lubrifié avec des lubrifiants de différents grades de viscosité et tourne avec une vitesse de rotation variable, à chaque fois on mesure la variation de la vibration. A la suite de cette expérience, un modèle de vibration en fonction du changement d'état des lubrifiants a été développé, en se basant sur les résultats d'expérience planifiée.

Mots Clés : Machine tournante, lubrifiant, analyse vibratoire, analyse d'huile, modélisation.

Nomenclature

y_i	valeur observée	b_j	les coefficients de régression
\hat{y}	y chapeau ou y estimé (Valeur calculé d'après le modèle)	\bar{y}_i	moyenne
R	coefficient de corrélation	V	vitesse de vibration, mm/s
K_j	la notation codifiée du facteur j	N	vitesse de rotation, tr/mn
b_0	nombre libre de l'équation	<i>Symboles grecs</i>	
		ν	viscosité cinématique, $mm^2 \cdot s^{-1}$

1. Introduction

La surveillance et le diagnostic jouent un rôle essentiel dans la sûreté de fonctionnement et les performances des machines tournantes lubrifiées, il existe heureusement des outils de surveillances puissants tel que l'analyse vibratoire, l'analyse des lubrifiants, la thermographie et l'analyse acoustique, et d'autres entrent dans le cadre de la maintenance préventive conditionnelle [1].

L'analyse vibratoire, vu son efficacité, prend actuellement une place très importante dans le cadre de la mise en place d'une maintenance conditionnelle. Elle permet de suivre l'état de la machine tournante en fonctionnement afin d'éviter les arrêts indésirables. A ce propos plusieurs indicateurs de détection ont été proposés et utilisés comme mesure globale du niveau vibratoire tels que la valeur crête, l'énergie, le RMS, la valeur moyenne, et autres [2, 3].

Bien que souvent utilisé dans l'industrie, l'analyse vibratoire n'est pas la solution optimale pour sécuriser et optimiser le fonctionnement des machines tournantes lubrifiées, de ce fait, on cherche d'autres méthodes de surveillance. L'analyse vibratoire est également très utilisée en complément des autres méthodes, lorsque celles-ci ne suffisent pas à réaliser un diagnostic

et c'est notamment le cas de l'analyse d'huile qui détecte de manière précoce la dégradation d'un lubrifiant par exemple [4, 5].

La lubrification est la première opération de maintenance, et elle est indispensable pour réduire le frottement, les pertes d'énergie, et l'usure des organes en contact. 50-80% du total des défauts trouvés dans les composants des machines tournantes sont liés à un déficient de lubrification, résultant de l'utilisation du lubrifiant inadéquat, le manque ou l'excès de lubrifiant, le vieillissement du lubrifiant et la présence des contaminants solides ou liquides. Du point de vue qualité, une lubrification inadaptée réduit fortement la durée de vie des parties mobiles dans une machine lubrifiée. Le choix de la qualité du lubrifiant doit être particulièrement étudié [6].

Dans ce contexte, notre étude consiste à suivre le niveau global vitesse efficace de la vibration d'un organe mécanique (le cas étudié il s'agit d'un système d'engrenage) lubrifié par des lubrifiants de différents grades de viscosité afin de caractériser les vibrations qui peuvent être produites par la dégradation de cette dernière.

En second lieu nous allons présenter une modélisation mathématique par la méthode de régression linéaire basée sur les résultats d'expérience planifiée pour développer un modèle de caractérisation de la vibration en fonction du changement d'état des lubrifiants et ce pour prédire la dégradation de ces derniers.

5. Travail expérimental

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, et du diagnostic des défauts en particulier dans les machines tournantes, les engrenages ont fait et font encore l'objet de nombreuses études. Une expérience qui suit l'évolution de la vibration d'un système d'engrenage lubrifié avec des lubrifiants de différents grades de viscosité a été réalisée, à chaque fois on suit l'évolution de la vibration.

5.1. Système d'engrenage

Les essais expérimentaux de notre travail sont réalisés sur un dispositif d'engrenage composé essentiellement *Figure 1* d'un pignon, une roue et un bain formé à la partie inférieure des roues dentées pour assurer la lubrification de ces derniers par barbotage.

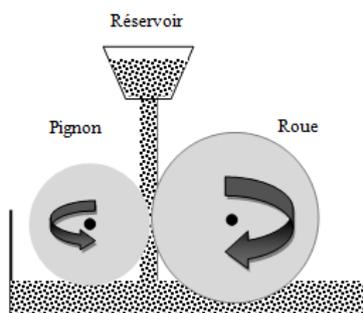


Figure 1 : Système d'engrenage

Le dispositif est entraîné par un moteur électrique *Figure 2* et ce pour pouvoir varier la vitesse de rotation du système. Nous avons pris quatre points de mesure qui ont été choisis sur les quatre paliers de notre système d'engrenage, deux pour le pignon motrice et les deux autres pour la roue réceptrice.

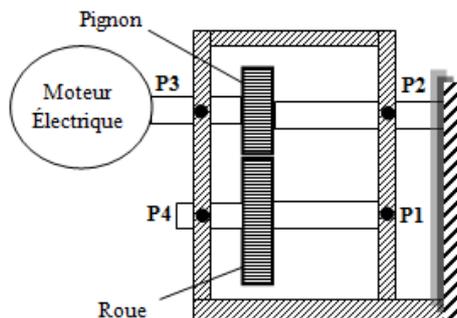


Figure 2 : Dispositif expérimental à engrenage

5.2. Les lubrifiants

Nous avons utilisé pour la lubrification de système d'engrenage des lubrifiants dont leurs viscosités sont données par le *Tableau 1* :

Tableau 1 : Caractéristiques des lubrifiants

Lubrifiant	Viscosité cinématique à 40°C en cSt
Huile ISO 32 (V1)	28.8 à 35.2
Huile ISO 68 (V2)	61.2 à 74.8
Huile SAE 15W40 (V3)	105
Graisse EP2 (V4)	150
Huile NAFTILIA 20W50 (V5)	158

5.3. Vibromètre (Penplus SKF)

Pour mesurer la vibration on a utilisé le Vibromètre (Penplus-SKF), *Figure 3* c'est un instrument portable extrêmement fiable capable de mesurer les vibrations causées par des problèmes de rotation. Il donne le niveau global en valeur efficace (RMS) de l'amplitude de la vitesse de vibration.



Figure 3 : Photographie du vibromètre

5.4. Déroulement de l'essai

Pour chaque lubrifiant et pour les vitesses de rotation (45, 90, 125 et 180) tr/mn, on a mesuré la valeur efficace (RMS) de l'amplitude de la vitesse de vibration et ce sur les quatre points (P1, P2, P3 et P4).

6. Résultats

6.1. Influence de la vitesse de rotation sur l'amplitude de la vitesse de vibration

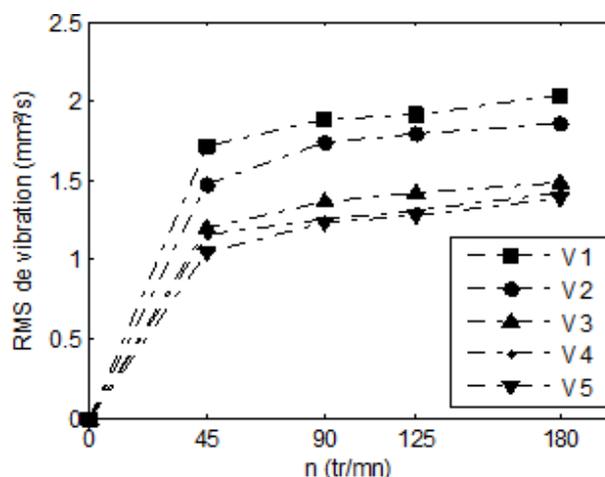


Figure 4 : Evolution de la vitesse de vibration en fonction de la vitesse de rotation

La Figure 4 montre l'évolution des vitesses moyennes mesurées aux points P1, P2, P3, et P4 en fonction de la vitesse de rotation pour les différentes viscosités testées. Une augmentation progressive des valeurs RMS peut être observée au cours de l'augmentation de la vitesse de rotation. Ce comportement est répétitif pour chaque lubrifiant utilisé, cependant, on remarque pour le cas d'utilisation des deux lubrifiants (l'huile SAE 15W40 et la graisse EP2) qui ont les viscosités (105 et 150) Cst une légère stabilisation du niveau vibratoire du système testé pour les différentes vitesses employées (les deux courbes présentent des faibles pentes), c'est à dire que ces viscosités sont considérées idéales pour assurer la lubrification de ce système.

6.2. Influence de la qualité du lubrifiant sur l'amplitude de la vibration

Cette partie de notre étude a été consacrée, à la recherche et la détermination de la relation existante entre la qualité (viscosité) d'un lubrifiant et les vibrations qui peuvent être produites par la dégradation de cette dernière lors du fonctionnement normal du système d'engrenage.

La Figure 5 représente la variation des vitesses moyennes de vibration en fonction des viscosités des lubrifiants pour chaque vitesse de rotation.

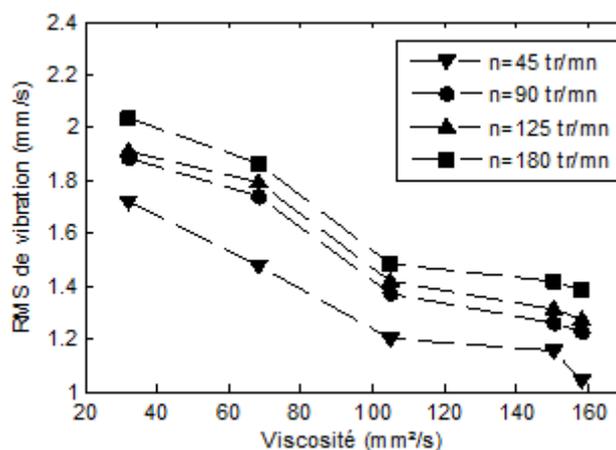


Figure 5 : Variation de la vitesse de vibration en fonction de la viscosité des lubrifiants

On voit clairement que la vibration varie inversement à la viscosité du lubrifiant, c'est-à-dire si la qualité du lubrifiant se dégrade (diminution de la viscosité) le niveau vibratoire de notre système d'engrenage augmente en conséquence. Cette influence traduit l'effet d'amortissement du film d'huile entre les surfaces en contact dont sa réduction entraîne une augmentation du niveau de vibration.

7. Modélisation de la dégradation du lubrifiant

7.1. Méthode de l'analyse de régression et de corrélation

L'analyse de régression cherche à déterminer une relation exprimant le lien entre une variable dite dépendante et une / ou plusieurs variables dite indépendante.

La corrélation se définit comme une relation linéaire entre deux variables et le coefficient de corrélation mesure la plus ou moins grande dépendance entre ces deux variables [7].

7.2. Méthode des moindres carrés

Dans l'analyse de régression et de corrélation, la méthode la plus utilisée est la méthode des «Moindres carrés» (MMC) proposée par Gauss. Le principe de cette méthode consiste à employer (\hat{y}) ou « *y estimé* », par opposition à (y) qui représente le « *y observé* » [8]. On recherche les paramètres a et b . La différence des ordonnées entre un point (x_i, y_i) et le point de la droite ayant même abscisse est :

$$y_i - \hat{y}_i = y_i - ax_i - b \quad (1)$$

On calcule le coefficient de corrélation linéaire par la formule :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

L'ajustement est valide pour $(0.70 < |R| < 1)$.

7.3. Méthode multi-factorielle

Dans le cas général sur un paramètre d'optimisation (y) d'un processus technologique, influent simultanément plusieurs facteurs X_j ($j \in \{1 \div m\}$)

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (3)$$

Ce processus se décrit par ce modèle :

$$y = C \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \dots x_j^{b_j} \dots x_m^{b_m} \quad (4)$$

La détermination de C et b_j se fait soit par la succession des essais uni-factorielle soit par la méthode de planification des expériences.

7.4. Présentation du modèle (Planification des expériences)

La linéarisation de l'équation (4) donne:

$$\ln y = \ln c + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + \dots + b_j \ln x_j + b_m \ln x_m \quad (5)$$

$$\dot{y} = b_0 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 \dot{x}_2 \dots + b_j \dot{x}_j + b_m \dot{x}_m \quad (6)$$

L'équation (6) représente le modèle de régression linéaire multiple, Les coefficients de régression sont notés par b_j .

Le nombre d'expériences à réaliser se détermine d'après la formule :

$$n = p^m \quad (7)$$

Où:

p : Nombre de niveau des facteurs.

m : Nombre de facteurs.

n : Nombre d'essais.

On donne les signes (-) et (+) pour les niveaux bas et haut de chaque facteur respectivement.

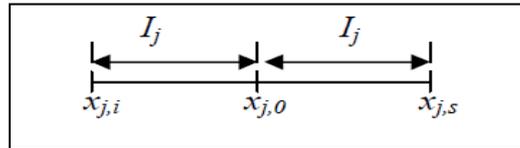


Figure 6: Niveau de base et l'intervalle de variation de chaque facteur

La codification des facteurs est donnée par :

$$K_j = \frac{x_j - x_{j,0}}{I_j} \quad (8)$$

Pour le modèle :

$$K_j = \frac{2(\ln x_j - \ln x_{j,s})}{(\ln x_{j,s} - \ln x_{j,i})} + 1 \quad (9)$$

Il est possible de rassembler tous les éléments de l'expérimentation dans un tableau que l'on nomme matrice des expériences [9].

Pour le calcul des coefficients b_j où ($j = 0 : m$) en fait appel à la MMC ce qui donne :

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_0 y_i \quad (10)$$

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{j,i} y_i \quad ; j \in (1, m) \quad (11)$$

La grandeur Z_0 est une indication codifiée d'une variable fictive qui prend seulement la valeur (+1) et s'utilise pour la détermination du membre libre de l'équation b_0 .

L'équation (5) peut s'écrire également :

$$\dot{y} = b_0 + b_1 k_1 + b_2 k_2 \dots + b_j k_j + b_m k_m \quad (12)$$

On peut mettre la dernière équation sous la forme suivante :

$$\hat{y} = e^{\dot{y}} \quad (13)$$

7.5. Validation du modèle

Soit les paramètres d'entrée (les facteurs) suivants :

- La viscosité x_1 prend les valeurs ($x_{1min} = 32$ et $x_{1max} = 158$) mm²/s
- La vitesse x_2 prend les valeurs ($x_{2min} = 45$ et $x_{2max} = 180$) tr/mn

y_i sont les paramètres de sortie (vibrations mesurées).

Pour deux paramètres d'entrée, on a un modèle de la forme:

$$y = C \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \quad (14)$$

On peut écrit :

$$\ddot{y} = b_0 + b_1 k_1 + b_2 k_2 \quad (15)$$

Dans le *Tableau 2*, sont regroupés les principaux paramètres qui permettent d'établir le modèle de vibration.

Tableau 2 : Résultats expérimentaux des mesures vibratoires

N° essai	Codification des facteurs			Vibration mesurée (\bar{y}_i)	$\hat{y}_i = \ln \bar{y}_i$	Valeurs des facteurs	
	z_0	z_1	z_2			x_1	x_2
1	+1	-1	-1	1.720	0.542	32	45
2	+1	+1	-1	1.045	0.044	158	45
3	+1	-1	+1	2.037	0.711	32	180
4	+1	+1	+1	1.387	0.327	158	180

Le calcul des coefficients donne :

$$b_0 = 0.406$$

$$b_1 = -0.22$$

$$b_2 = 0.113$$

Le calcul des codifications donne :

$$k_1 = 1.252 \ln x_1 - 5.337$$

$$k_2 = 1.443 \ln x_2 - 6.492$$

En remplaçant les valeurs des coefficients de régression et des codifications dans l'équation (15), on obtient:

$$\ddot{y} = 0.847 - 0.275 \ln x_1 + 0.163 \ln x_2$$

Donc l'équation du modèle de vibration sera:

$$\hat{y} = e^{0.847} \cdot x_1^{-0.275} \cdot x_2^{0.163}$$

Si on affecte à la vitesse de vibration V et on remplace x_1 et x_2 par leurs grandeurs respectives, à savoir : la viscosité cinématique ν et la vitesse de rotation N on aura finalement pour le modèle de vibration, l'équation suivante:

$$V = e^{0.847} \cdot \nu^{-0.275} \cdot N^{0.163}$$

Selon l'équation du modèle obtenue, on constate que la vibration varie inversement proportionnelle avec la viscosité par contre, elle est proportionnellement avec la vitesse de rotation.

L'ajustement de ce modèle aux mesures expérimentales obtenues se fait de la façon suivante:

Soit « V_m » la vibration mesurée et « V_c » la vibration calculée par le modèle obtenu. Ainsi le coefficient de corrélation « R » est calculé par la méthode des moindres carrés selon l'équation (2). La comparaison entre les valeurs de vibration obtenues par le modèle et celles mesurées est présentée par les figures suivantes :

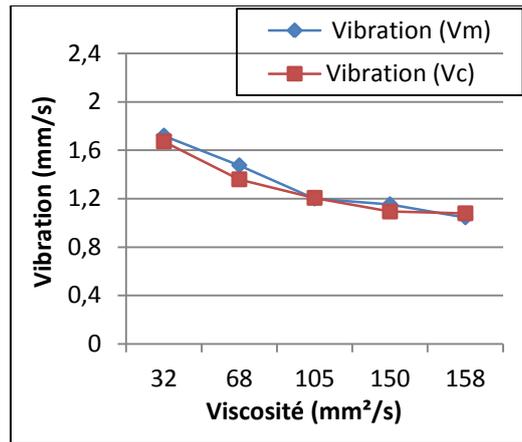


Figure 7 : Modèle de vibration pour $n=45$ tr/mn

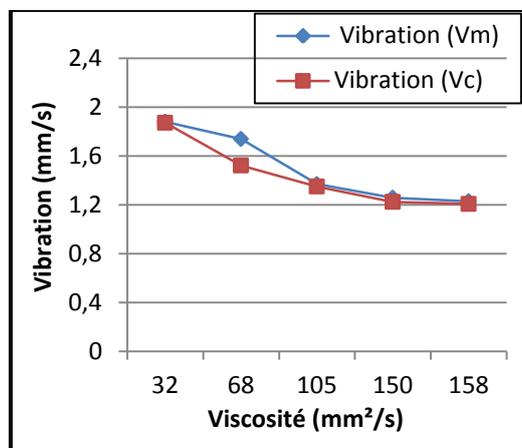


Figure 8 : Modèle de vibration pour $n=90$ tr/mn

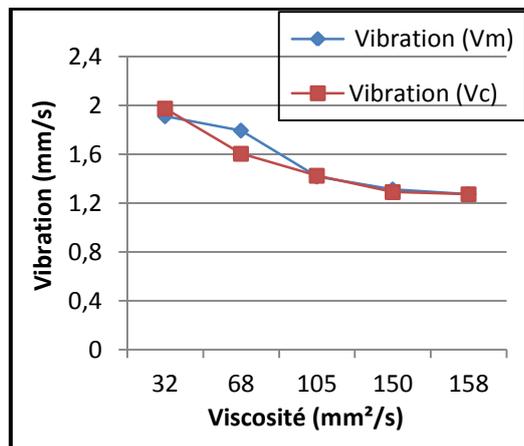


Figure 9 : Modèle de vibration pour $n=125$ tr/mn

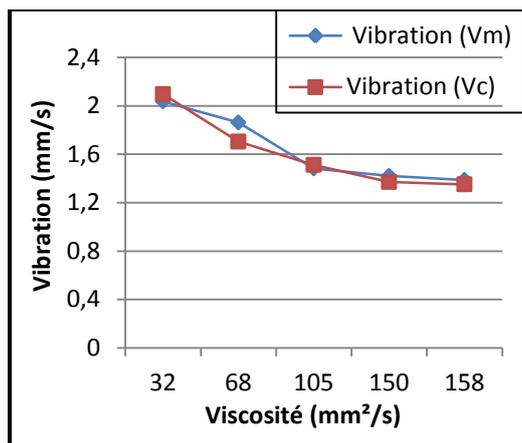


Figure 10 : Modèle de vibration pour $n=180$ tr/mn

Sur le Tableau 3, on a évalué pour chaque cas obtenu le coefficient de corrélation R

Tableau 3 : Résultats expérimentaux des mesures vibratoires

Vitesse de rotation (tr/mn)	45	90	125	180
Coefficient de corrélation	0.981	0.955	0.946	0.962

Le coefficient de corrélation R est plus proche de 1 ce qui donne une approximation satisfaisante de la variation de la vibration en fonction de la viscosité et la vitesse de rotation.

Nous remarquons une bonne corrélation entre les vibrations modélisées et celles mesurées

8. Conclusion

L'objectif principal du travail présenté est de souligner l'importance des lubrifiants dans le fonctionnement des organes des machines tournantes et le choix de la qualité de ces derniers.

D'après les résultats obtenus on peut tirer que la vibration croît proportionnellement à la vitesse de rotation, par contre varie inversement à la viscosité du lubrifiant, c'est-à-dire la dégradation de la qualité du lubrifiant (diminution de la viscosité) entraîne l'augmentation du niveau vibratoire de notre système d'engrenage. Donc, la lubrification des engrenages peu chargés à des vitesses moyennes, et qui sont lubrifiés avec une huile relativement visqueuse, entraîne la séparation des dents par un film suffisamment épais et ce pour supprimer tout contact métal sur métal. Donc, les vibrations dans ce cas seront insignifiantes.

Selon les résultats obtenus à partir du modèle de régression proposé de la vibration en fonction de la viscosité du lubrifiant, on peut conclure qu'il existe une corrélation linéaire étroite (valeurs du coefficient de corrélation $R \geq 0,95$). On constate qu'il exprime clairement la bonne concordance entre la théorie et l'expérimentation.

Références

1. J. Hég, Pratique de la maintenance préventive, Livre, Edition Dunod Paris (2002).
 2. R. Bigret, J. L. Féron, Diagnostic - maintenance – disponibilité des machines tournantes : modèles – mesurages - analyses des vibrations, Livre, Edition Masson Paris (1995).
 3. S. S. Patil, J. A. Gaikwad, Vibration Analysis of Electrical Rotating Machines using FFT. IEEE-31661, 4th ICCCNT 2013, Tiruchengode, India.
 4. A. Lakihal, E. Hadjadj-aoul, Une nouvelle stratégie de diagnostic en maintenance préventive conditionnelle. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 November 2007, Algérie.
 5. G. Jingwei, Z. Peilin, L. Baoyuan, X. Zhengjun, An Integrated Fault Diagnosis Method of Gearboxes Using Oil Analysis and Vibration Analysis. 1-4244-1135-1/07/2007 IEEE, The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI'2007.
 6. R. Serrato, M.M. Maru, L.R. Padovese, Effect of lubricant viscosity grade on mechanical vibration of roller bearings. Tribology International 40 (2007) 1270–1275, Science Direct, 30 March 2007.
 7. Y. Dodge, Premiers pas en statistique, Livre, Edition Springer Verlag, France, 427 p, 2006.
 8. P. Chareille, Y. Pinault, Statistique descriptive, Eds Dunod, Paris, 377 p (1997)
- A. Kamoun, M.M. Chaabouni, H. F. Ayedi. Plans d'expériences et traitements de surface, Technique de l'ingénieur (M 1428).