

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



جامعة باجي مختار – عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Année 2007

## THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT D'ETAT

**Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers  
XC48 et XC18 – Optimisation et caractérisation**

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Par

**Lakhdar LAOUAR**

**DIRECTEUR DE THESE : M. LABAIZ      Professeur      Université Annaba**

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT : A. BOUCHOUCHA      Professeur      Université de Constantine**

**EXAMINATEURS : L. FLAMAND      Professeur      INSA de Lyon France**

**M. ASSAS      M.C      Université de Batna**

**A. HAIAHEM      M.C      Université Annaba**

## Remerciements

Je remercie très vivement Monsieur A. BOUCHOUCHA, Professeur à l'université de Constantine, pour l'insigne honneur qu'il nous fait de présider le Jury de soutenance ; qu'il trouve ici, le témoignage sincère de ma profonde gratitude.

Je remercie très vivement Monsieur M. LABAÏZ, Professeur à l'université de Annaba, directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses orientations ainsi que pour ses conseils.

Mes très vifs remerciements vont également à Monsieur L. FLAMAND, Professeur à l'I.N.S.A de Lyon, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je tiens à remercier très vivement Monsieur M. ASSAS, Maître de conférence à l'université de Batna pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je remercie très vivement Monsieur A. HAIAHEM, Maître de conférence à l'université de Annaba, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur B. BOUSSAID, Maître de conférence au laboratoire LamCos de l'I.N.S.A de Lyon, pour les fructueuses discussions relatives à la tribologie.

Je voudrais aussi remercier Monsieur A. BOUCHELAGHEM, Maître de conférence à l'université de Annaba, pour son aide et ses encouragements.

Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire de Génie de Matériaux, université de Annaba, et particulièrement Monsieur A. BOUDEBANE qui par sa compétence technique m'a permis de réaliser certains travaux.

Je tiens à remercier aussi le personnel technique de l'entreprise MITTAL-STEEL (AMM, ACE, LAF), particulièrement l'ingénieur M. BOUGERROUA pour son aide en informatique et le chef d'atelier C./Edd. SIKIOU qui m'a offert la possibilité de réaliser certains travaux.

Je ne peux présenter ce travail sans exprimer mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de mécanique industrielle (L.M.I.) et à tous les enseignants du département de Génie Mécanique.

## ملخص

إن التطور الحقيقي للصناعة الحديثة يعتمد أساساً على نوعية المنتج بأقل تكلفة ممكنة. و هذا يمكن أن يتحقق بالتحكم في التكنولوجيا و تدعيمها بالبحث العلمي .  
إنطلاقاً من هذه الفكرة تم اعداد هذا البحث، الذي يتناول دراسة طرق انتاج وتشطيب قطع من الفولاذ بالمعالجة الميكانيكية السطحية (TMS) بواسطة التشويه اللدن السطحي (DPS) المتمثل في الصقل، وإعداد طرق معتمدة علي مخطط التجارب للتحكم في طرق التصنيع بفعالية من خلال المعالجة الميكانيكية السطحية .  
ولهذا البحث التوجهات الأساسية التالية :

- دراسة سطح القطع من خلال الخواص الهندسية والفيزيائية وأهميتها في سلوكها أثناء الأستعمال.

- إعتداد طرق تحضير وتشطيب القطع بواسطة المعالجة الميكانيكية السطحية (TMS).

- دراسة وتطبيق وتحديث المعالجة بواسطة أداة معلوماتية (البرمجة).

عدة نماذج تعتمد على مخططات تجارب مختلفة تم أخذها بعين الأعتبار وتم اختيار نموذج من الدرجة الثانية الذي تم تفصيله وباستعمال أداة معلوماتية لتحقيق دقة البحث وتحليل عوامل تأثير الصقل على الخواص الهندسية والفيزيائية للأسطح .

للتحقق من النتائج الإيجابية للمعالجة الميكانيكية السطحية المعتمدة، تم إنجاز عدة إختبارات على عينات تمثل سطح آلات حقيقية.

الدراسات والإختبارات المنجزة سمحت بالتوصل لعدة خلاصات:

- تحسين الخواص الميكانيكية للأسطح المعالجة بفضل التصلد الأنفعالي للطبقة السطحية للمادة الذي رفع من صلادة المادة.

- تحسين حالة السطح بخفض درجة الخشونة بفضل التشويه السطحي.

- الطريقة المتخذة حسب مخطط التجارب المعتمد ساعدت على متابعة وملاحظة التجارب مما أدى إلى التوصل لعوامل مثلى واقعية.

- المواد المعتمدة أستجابت للمعالجة السطحية بشكل جيد وأختلفت النتائج بسبب التباين في الخواص.

- إختبارات التتلم بينت التأثير الإيجابي للمعالجة السطحية التي أدت إلى تقوية عمر القطع مقارنة بالقطع الأخرى الغير معالجة.
- إختبارات حد الإطاقة على العينات المعيارية، أظهرت أن القطع المعالجة بالصقل أفضل عمرا من خلال الكتل من القطع المعالجة بالتجليخ.

نتائج البحث المحصل عليها أدت إلى الإقتراح بإدماج طرق المعالجة الميكانيكية السطحية في عمليات التشطيب أثناء الإنتاج بمساعدة أداة المعلومية والذي يؤدي إلى التحكم الأفضل في طرق التشطيب بهدف تحسين النوعية وتخفيض زمن الإنتاج و الكلفة.

## ABSTRACT

The modern industry real development is based essentially on final product quality with a minimum cost. This can be realized by mastering the technology and its reinforcement by scientific research. In this objective the present work was developed.

The purpose of this research work is to study the process of steel parts finalization by surface mechanical treatment (SMT) by superficial plastic deformation (SPD) called burnishing. This elaboration method is based on statistics and modeling by test plans of their integration in the manufacturing process.

The present work has the following main objectives:

- The study of parts surface, especially their physical and geometrical qualities also their importance while in service ;
- The examination of parts preparation and finalization process by surface mechanical treatment (SMT) ;
- The study, the application and updating the surface mechanical treatments by computer ;

Many models based on experience plans are presented and the second degree model is selected to be used in this work. This model has known a large development, using computer in order to conduct the research works with accuracy and carry out an analysis of effects of burnishing treatment parameters on physical and geometrical qualities of realized surfaces.

To verify the elaborated models, many tests were carried out on work-pieces and samples simulating machines real parts.

Studies and tests have led to the following conclusions:

- Improvement of mechanical characteristics of treated surfaces following the cold-hammer of the material superficial layer producing an increasing hardness.
- Surface aspect improvement by roughness decreasing due to superficial layer leveling.
- The method undertaken according to the model of the adopted tests plan has allowed the control and tests observation leading to parameters optimization according to a realistic approach.
- The considered materials respond suitably to the intended treatments, nevertheless these responses are distinguished according to the intrinsic properties relative to each material.
- The wear tests have revealed the beneficial effect of TMS process by DSP leading to a superficial layer reinforcement assuring a better holding compared to non treated samples.
- Fatigue tests on normalized samples have allowed seeing the improvement of parts holding fatigue of finalized parts by surface mechanical treatment compared to conventional finalization process (rectification).

The obtained results have led to suggest the integration of finishing process by SMT in the design of industrial mechanical products with using computers. This will provide the best control process in order to improve the product, reduce the execution times and minimize the design costs.

## RESUME

Un développement réel de l'industrie moderne repose essentiellement sur la qualité des produits finis, qu'on doit réaliser à un prix de revient minimal possible. Ceci peut être réalisé par la maîtrise de la technologie et son renforcement par la recherche scientifique.

C'est dans cet esprit et pour ce but que ce travail a été développé. Le travail a été consacré à l'étude du procédé de parachèvement des pièces en acier par les traitements mécaniques de surface (TMS) par déformation plastique superficielle (DPS) en l'occurrence le brunissage, à l'élaboration des méthodes basées sur les plans d'expériences pour la maîtrise du procédé en vue de son intégration de manière efficace dans le processus de fabrication.

Notre travail a pour directions principales :

- l'étude des surfaces des pièces, notamment ses qualités physique et géométrique et leurs importances vis-à-vis du comportement en service ;
- l'examen des procédés de préparation et de parachèvement des pièces par TMS ;
- l'étude, l'application et la mise à jour du traitement au moyen de l'outil informatique.

Plusieurs modèles basés sur les plans d'expériences ont été présentés, celui qui est retenu tout au long de ce travail est un modèle de second degré. Ce modèle a connu un développement plus large avec l'usage de l'outil informatique dans le souci de mener de façon plus précise les travaux de recherche, et d'effectuer une analyse des effets des paramètres du traitement par brunissage sur les qualités physiques et géométriques des surfaces réalisées.

Pour vérifier l'apport du traitement envisagé, plusieurs essais ont été réalisés sur éprouvettes et échantillons simulant des pièces réelles de machines.

Les études et les essais réalisés ont permis de formuler plusieurs conclusions :

- amélioration des caractéristiques mécaniques des surfaces traitées suite à l'écrouissage de la couche superficielle des matériaux produisant ainsi l'augmentation de la dureté.
- amélioration de l'aspect de surface par la diminution de la rugosité grâce au nivellement de la couche superficielle.
- la démarche entreprise selon le modèle de plan d'expériences adopté a permis le suivi et l'observation des tests avec aboutissement à l'optimisation des paramètres selon une approche très réaliste.
- les matériaux considérés répondent convenablement aux traitements envisagés, néanmoins ces réponses se distinguent selon les propriétés intrinsèques relatives à chaque matériau.
- les tests d'usure ont révélé l'effet bénéfique du procédé TMS par DPS conduisant au renforcement de la couche superficielle en garantissant une meilleure tenue par comparaison aux échantillons non traités.
- les essais d'endurance sur éprouvettes normalisées ont permis de voir l'amélioration de la tenue en fatigue des pièces finies par traitement mécaniques de surface par rapport au procédé de finition classique (rectification).

Les résultats de recherche ainsi obtenus, nous ont amenés à proposer l'intégration du procédé de parachèvement par TMS dans les gammes de fabrication des produits mécaniques industriels avec l'utilisation de l'outil informatique. Ceci permettra le meilleur contrôle du procédé dans le but d'améliorer le produit, de réduire les temps d'exécution et minimiser le plus possible les coûts de fabrication.

## Nomenclature

A	Allongement [%].
$C_f$	Coefficient de frottement.
f	Avance [mm/tr].
F	Critère de Fischer.
$H_v$	Dureté Vickers [Kgf/mm <sup>2</sup> ].
i	Nombre de passes.
n	Fréquence de rotation [trs/min].
$P_y$	Effort [Kgf].
r	Rayon d'outil [mm].
$R^2$	Coefficient d'ajustement.
$R_a$	Rugosité moyenne arithmétique [ $\mu\text{m}$ ].
$R_e$	Limite élastique [MPa].
$R_m$	Limite de rupture [MPa].
V	Vitesse de brunissage [m/mn].
$\bar{\sigma}$	Contrainte normale [MPa].
$\bar{\sigma}_D$	Limite de fatigue [MPa].
$\sigma_r$	Ecart type des résidus.
TMS	Traitement Mécanique de Surface.
DPS	Déformation Plastique Superficielle.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b><u>CHAPITRE 1 : QUALITES DES SURFACES METALLIQUES</u></b>	
<b>ET LEURS TRAITEMENTS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Propriétés mécaniques des métaux .....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1Elasticité et plasticité.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2 Résistance mécanique.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.3 Rigidité.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.4 Ductilité.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2.5 Ténacité.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.6 Résistance à la fatigue.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.7 Dureté .....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Qualité physico-géométrique.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.1 La surface.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.2 L'état structural et physique.....</b>	<b>7</b>
<b>1.3.3 Topographie.....</b>	<b>8</b>
<b>1.4 Traitements de surface .....</b>	<b>11</b>
<b>1.5 Traitement par déformation plastique.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5.1 Influence des défauts sur les propriétés des cristaux.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5.2 Dislocation.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5.2.1 Définition.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5.2.2 Mécanisme et types de dislocations.....</b>	<b>17</b>
<b>1.5.3 Sources et multiplication des dislocations.....</b>	<b>18</b>
<b>1.6 Ecouissage.....</b>	<b>20</b>
<b>1.7 Conclusion.....</b>	<b>20</b>
<b><u>CHAPITRE 2 : TRAITEMENTS MECANIQUES DE SURFACE</u></b>	
<b>PAR BRUNISSAGE.....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Traitement de finition par pression.....</b>	<b>23</b>

2.2.1 Définition et principe .....	23
2.2.2 Analyse du procédé.....	24
2.2.3 Brunissage par diamant.....	27
2.3 Paramètres de traitement.....	28
2.4 Effets du traitement mécanique.....	28
2.4.1 Amélioration de la qualité de surface.....	28
2.4.2 Rugosité.....	29
2.4.3 Portance relative.....	32
2.4.4 Durcissement de la couche superficielle .....	33
2.4.5 Contraintes résiduelles.....	35
2.4.6 Limite de fatigue.....	37
2.4.7 Résistance à l'usure.....	39
2.5 Temps de traitement.....	40
2.6 Conclusion .....	40

## **CHAPITRE 3 : PLANS D'EXPERIENCES ET MODELISATION.....**

3.1 Introduction.....	43
3.2 Terminologie.....	43
3.3 Les différents types de plans d'expériences.....	46
3.3.1 Plans de criblage.....	47
3.3.2 Plans de modélisation.....	47
3.4 Plans retenus pour la présente étude.....	48
3.5 Plans de Box Behnken.....	49
3.5.1. Introduction .....	49
3.5.2 Construction des plans de Box Behnken .....	49
3.5.3. Nombre d'éléments géométriques des cubes et des hyper cubes .....	49
3.5.4 Plan de Box Behnken pour trois facteurs.....	50
3.5.4.1 Modèle mathématique postulé.....	51
3.5.4.2 Matrice de calcul.....	52
3.5.4.3 Matrice d'information.....	52
3.5.4.4 Matrice de dispersion.....	53
3.5.4.5 Ecart-type des coefficients du modèle prédictif .....	53
3.5.4.6 Erreur de prédiction .....	53
3.5.5 Plan de Box Behnken pour quatre facteurs.....	55

3.5.5.1 Séquentialité des plans de Box-Behnken .....	55
3.5.5.2 Construction du plan.....	56
3.5.6 Evaluation de la qualité du modèle.....	56
3.6 Programmation.....	57
3.6.1 Organigramme.....	57
3.6.2 Description de la procédure de traitement sur PC.....	59
3.6.2.1 Interface et procédure (cas de trois facteurs) .....	59
3.6.2.2 Interface et procédure (cas de quatre ou cinq facteurs) .....	61
3.7 Conclusion.....	62

## **CHAPITRE 4 : EQUIPEMENTS, MATERIAUX ET TECHNIQUES**

EXPERIMENTALES.....	63
4.1 Introduction.....	64
4.2 Equipements utilisés.....	64
4.2.1 Machine outil.....	65
4.2.2 Outils de brunissage.....	65
4.2.3 Appareil de mesure de Rugosité.....	66
4.2.4 Appareil de contrôle de la dureté.....	66
4.2.5 Dispositif et machine d'usure.....	67
4.2.5.1 Définition.....	67
4.2.5.2 Description.....	67
4.2.6 Machine d'essai de fatigue.....	69
4.2.6.1 Description.....	70
4.2.6.2 Sollicitation de l'éprouvette.....	70
4.3 Matériaux et techniques expérimentales.....	71
4.3.1 Première partie: Traitement par plans d'expériences à trois facteurs.....	71
4.3.1.1 Définition des matériaux.....	71
4.3.1.2 Préparation des éprouvettes.....	73
4.3.1.3 Traitement par Brunissage.....	75
4.3.1.3.1 Mode opératoire.....	75
4.3.1.3.2 Régime de travail.....	76
4.3.1.3.3 Effets du traitement .....	80
4.3.2 Deuxième partie: Traitement par plans d'expériences à quatre facteurs..	83
4.3.2.1 Matériau.....	83

4.3.2.2 Préparation des éprouvettes.....	84
4.3.2.3 Traitement par brunissage.....	84
4.3.2.4 Effets du traitement.....	88
4.4 Tests d'usure.....	89
4.4.1 Essai d'usure .....	89
4.4.2 Description et mode opératoire.....	89
4.4.3 Calcul du coefficient de frottement.....	90
4.4.4 Résultats du test.....	91
4.5 Essais de Fatigue.....	93
4.5.1 Préparation par tournage.....	94
4.5.2 Finition par rectification.....	94
4.5.3 Traitement par brunissage.....	95
4.5.4 Essais de fatigue.....	96
4.5.4.1 Essais sur éprouvettes rectifiées.....	96
4.5.4.2 Essais sur éprouvettes traitées par brunissage .....	98
4.6 Conclusion.....	99

## **CHAPITRE 5 : SYNTHESE ET DISCUSSION**

DES RESULTATS.....	101
5.1 Introduction.....	102
5.2 Traitement par trois facteurs.....	102
5.2.1 Effets des paramètres de traitement.....	102
5.2.2 Traitements graphiques (simulations).....	105
5.2.3 Conclusion.....	113
5.3 Traitement par quatre facteurs.....	114
5.3.1 Résultats et Effets du traitement.....	114
5.3.2 Traitements graphiques (simulations).....	114
5.4 Discussion.....	119
5.5 Résultats des tests d'usure.....	120
5.6 Résultats des essais de fatigue.....	121

CONCLUSION GENERALE .....	122
---------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	125
----------------------------------	-----

## INTRODUCTION

Dans les structures mécaniques, les surfaces des organes de machines sont les plus exposées aux attaques extérieures qui sont de natures diverses (frottement, usure, corrosion, fatigue,...), des sollicitations dynamiques (sollicitations de fatigue) qui occasionnent la rupture brutale des pièces en service. Dans la pratique, il a été constaté que la majorité des cas de rupture débute souvent avec un amorçage en surface. Elle est également la partie de la pièce où se produisent les phénomènes de fretting, de grippage et de matage. De plus, les zones superficielles sont souvent les plus sollicitées à cause des concentrations de contraintes imposées par la géométrie d'une pièce mécanique (présence de trous, des entailles et autres discontinuités géométriques).

La qualité de la couche superficielle représente un facteur essentiel pour l'intégrité de la structure mécanique. En effet, la dégradation de la surface de la pièce entraîne l'effondrement de la pièce, ce qui occasionne des avaries voire l'arrêt des ensembles mécaniques (machines, équipements de transport, mécanismes de sécurité,...).

Le comportement des pièces mécaniques est donc lié aux propriétés des couches superficielles. Ces dernières sont caractérisées par les qualités physiques et géométriques ; elles présentent une importance particulière afin de satisfaire à des exigences précises telles que : une bonne tenue à l'usure, une grande résistance à la fatigue, un faible coefficient de frottement et une bonne résistance aux divers types de sollicitations. Ces exigences sont d'une grande importance, leur non respect occasionne des dysfonctionnements dans l'ensemble et peut entraîner des dégradations prématurées. Sachant qu'une bonne tenue des pièces en service est conditionnée par les propriétés (physiques et géométriques) des couches superficielles et que les propriétés micro géométriques (rugosité) ainsi que la dureté superficielle, accommodent de manière décisive le comportement et la durée de vie des organes mécaniques. Ainsi entre le moment où l'on décide de concevoir une structure industrielle ayant une fonction donnée et le moment de sa mise en service, il existe plusieurs étapes que les industriels doivent maîtriser. Une de ces étapes représente le choix du matériau et des procédés de mise en œuvre. Ces derniers sont très variés dans la fabrication mécanique. Ils comprennent plusieurs modes d'obtention d'ébauche, plusieurs procédés de mises en forme et un grand nombre de traitements. Les procédés de mises en forme sont pour une grande part basés sur l'enlèvement de matière avec l'emploi des outils à arrêtes définies ou non définies. Les outils de coupe employés sont de matériaux divers (acier rapide de coupe, carbure divers, carbures revêtus par les procédés PVD, les céramiques, les outils en diamants) permettent d'usiner des métaux et des alliages de plus en plus durs. Les outils à arrêtes non définie (meule par exemple) sont prévus dans l'usinage de finition (rectification) qui est préconisée après les phases de traitements thermiques pour la correction des défauts géométriques et l'amélioration de l'aspect de surface.

Les procédés sans enlèvement de copeaux ou traitements mécaniques de surface (TMS), qui agissent par déformation plastique superficielle (DPS) trouvent leur place comme procédés de finition, assurent aux pièces usinées de bonnes propriétés physique et géométrique avec un indice économique relativement amélioré. Les procédés par DPS sont d'une mise en œuvre relativement simple, moins coûteux et consistent à améliorer les propriétés locales (en surface) du matériau.

C'est dans ce contexte et pour ce but que cette étude est orientée sur les traitements mécaniques de surface (TMS). On tente de donner des propriétés particulières aux couches superficielles des pièces en acier, en leur appliquant le traitement par (DPS) en l'occurrence le brunissage. Bien que les études entreprises jusqu'à ce jour dans le domaine de la déformation plastique des matériaux aient permis des progrès importants du processus, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre afin de répondre aux nouvelles conditions du contexte industriel. Il apparaît, en particulier que la complexité des interactions de nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de déformation, nécessite des expérimentations spécifiques et bien contrôlées pour chaque matériau dans le but de définir les meilleurs paramètres de traitement (régime optimal) relatifs aux réponses exigées.

Les travaux qui font l'objet de cette thèse de doctorat s'inscrivent dans cet objectif. En particulier, l'étude et l'évaluation des capacités du procédé de parachèvement par déformation appliqué sur une variété d'aciers avec l'intégration de l'outil informatique.

Le mémoire comporte les parties suivantes :

Dans le premier chapitre sont présentées une étude bibliographique sur les métaux et leurs propriétés mécaniques, la surface et l'importance de sa topographie, les traitements de surface. On situe le choix du procédé de traitement, ses objectifs ainsi que les mécanismes de déformation plastique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du procédé de traitement mécanique de surface (TMS) par brunissage, la présentation des paramètres de régime de traitement par DPS et leurs effets.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation par les plans d'expériences des paramètres de traitement par brunissage. Sont exposés les différents modèles et leurs intérêts, le développement du modèle selon les plans de BOX-BEHNKEN, la description de la démarche à suivre pendant l'expérimentation avec l'organigramme et le traitement informatique.

Le quatrième chapitre regroupe l'ensemble des appareils, machines et outils utilisés, la description des matériaux étudiés, les techniques expérimentales employées lors de la préparation des pièces (éprouvettes d'essai) et leurs traitements par brunissage ; les tests d'usure sur des pièces traitées et non traitées ainsi que des essais de fatigue.

Dans le cinquième chapitre, sont présentées la synthèse des résultats expérimentaux et leurs discussions. Il est suivi par une conclusion générale.

# CHAPITRE 1

## QUALITES DES SURFACES METALLIQUES ET LEURS TRAITEMENTS

## 1.1 Introduction

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme utilise pour produire des objets. Un matériau, représente une matière de base choisie en raison de ses propriétés particulières et de la mise en oeuvre en vue d'un usage spécifique. Les propriétés particulières des matériaux sont offertes par la nature chimique des différentes matières premières. On distingue ainsi quatre grandes familles de matériaux : métalliques, composites, organiques, minéraux. Les matériaux métalliques sont des métaux ou des alliages de métaux. [1]

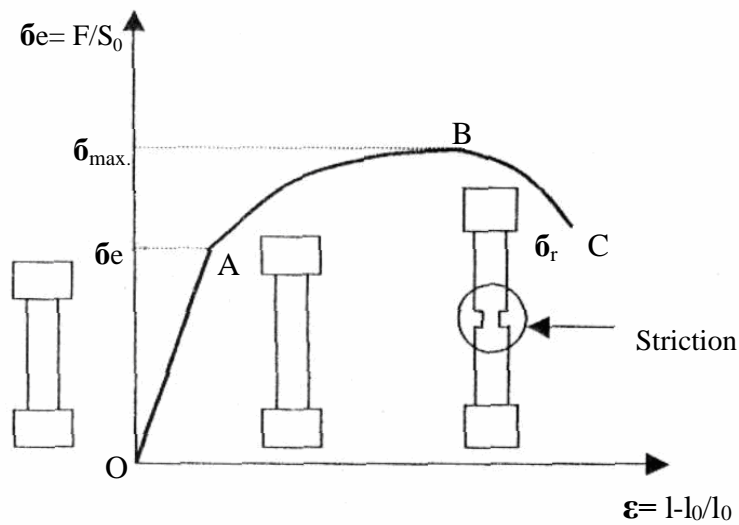
Les métaux présentent tous l'éclat métallique sur une coupe fraîche, dû à la réflexion de la lumière sur le nuage d'électrons libres; à l'exception du mercure, les métaux sont solides à température et à pression normales, en raison de la valeur élevée de l'énergie de la liaison intermétallique ; ils présentent habituellement de bonnes propriétés mécaniques, particulièrement la ductilité et la malléabilité qui tiennent à la souplesse de la liaison métallique.

## 1.2 Propriétés mécaniques des métaux

Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité. Elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints.

### 1.2.1 Elasticité et plasticité

L'une des propriétés principales de l'état métallique est l'aptitude à la déformation sous l'effet d'une contrainte. Selon la valeur de celle-ci, la déformation résultante peut être *élastique*, c'est-à-dire qu'elle se résorbe si la contrainte cesse d'être appliquée, ou *plastique*, dans ce cas le solide conserve une déformation permanente après que la sollicitation mécanique est été supprimée [2]. On caractérise quantitativement la plasticité par l'aptitude d'un métal ou d'un alliage donné à tolérer sans se rompre une déformation plus ou moins importante. Cette propriété, qui tient à la nature de la liaison entre atomes constituant le solide métallique, est spécifique [1]. Les solides métalliques témoignent généralement à la fois d'une notable résistance et d'une capacité importante de déformation. On mesure les différentes phases de déformation et même de rupture de tous les matériaux en utilisant l'essai de traction. Cet essai pratiqué sur des éprouvettes, permet de construire une courbe (contraintes/déformation) (**Figure 1.1**). La courbe nous renseigne sur deux zones principales, c'est-à-dire deux états ou propriétés du matériau et qui sont : une zone de déformation élastique appelée élasticité (OA) et une zone de déformation plastique, appelée plasticité (AB).



**Figure 1.1** Courbe de traction (contrainte/déformation)

L'élasticité est la faculté que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après suppression de l'effort qui la provoque, quand un échantillon de métal est soumis à un effort relativement faible, il ne subit que des déformations élastiques. La position moyenne des atomes n'est que légèrement modifiée.

La plasticité du métal revêt deux aspects principaux :

- malléabilité : possibilité de réduire le métal en feuille plus ou moins mince.
- ductilité : faculté de pouvoir étirer le métal en fils sans le rompre.

### 1.2.2 Résistance mécanique

C'est la capacité d'une structure de résister aux efforts mécaniques extérieurs, le plus souvent cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « $\sigma_r$ » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique. [2], [3].

### 1.2.3 Rigidité

Intervalle de la déformation élastique réversible d'une structure atomique. Cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes. Elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de HOOK est valable. Elle est mesurée suite à un essai de traction. [4], [5]

### 1.2.4 Ductilité

C'est le domaine de déformation permanente irréversible d'une structure, souvent désigné sous le nom de domaine plastique, cette plasticité est due au glissement irréversible entre les plans cristallographiques du matériau, un matériau ductile peut être étiré ou allongé sans se rompre. [4]

### 1.2.5 Ténacité

Elle représente la capacité globale du métal à absorber l'énergie d'une déformation, et caractérise sa résistance à la propagation brutale de la fissure. Cette propriété est quantifiée par la mesure de la résilience. [4], [6]

### 1.2.6 Résistance à la fatigue

Elle caractérise la résistance à une sollicitation cyclique, type traction compression ou autre, elle est caractérisée par la limite d'endurance « $\sigma_D$ » qui est mesurée par les courbes de Wöhler. [7]

### 1.2.7 Dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un autre corps plus dur que lui, ou encore la résistance à une déformation permanente de sa surface. Le pénétrateur provoque à la surface du matériau une déformation permanente sous forme d'empreinte. L'observation des dimensions de l'empreinte fournit une mesure de la dureté. [4]

Plusieurs types d'essais sont couramment utilisés, qui ne diffèrent que par la forme du pénétrateur utilisé. Il est possible de déterminer des mesures de dureté sous très faible charge, au microscope métallographique à l'aide d'un microduromètre. On réalise ainsi une étude très localisée de la surface du métal, par exemple dans une zone de quelques micromètres de côté. Cette méthode est très utilisée au laboratoire où elle a de nombreuses applications, notamment dans le domaine de la diffusion, car elle permet de mettre en évidence des faibles gradients de concentration en éléments.

Les divers types d'essais de dureté sont choisis en fonction de la nature du matériau et de l'échelle d'investigation. Ils ont pour principal avantage d'être très faciles à mettre en œuvre et d'être non destructifs. La dureté est avant tout une propriété de surface contrairement aux autres caractéristiques mécaniques qui affectent toute la masse des matériaux. C'est d'ailleurs pour cette raison que les essais de dureté permettent de caractériser les traitements de surfaces tels que nitruration et cémentation des aciers, et la qualité des revêtements de protection. La dureté est une propriété complexe qu'il est généralement difficile de rattacher aux autres caractéristiques. Mais, quand il s'agit de matériaux qui ont des mécanismes de durcissements voisins, il existe une relation empirique entre la résistance à la traction  $\sigma_m$  et la dureté Brinell HB. Pour les aciers non alliés, par exemple,  $HB = 3 \sigma_m$ . Cela tient au fait qu'un essai de dureté produit de la déformation plastique dans un matériau et, par conséquent, toutes les variables qui affectent la déformation plastique auront une influence sur la dureté.

Aussi la dureté est-elle souvent employée comme moyen rapide de contrôle d'une fabrication puisque, comme la résistance à la traction, elle est sensible à la composition de l'alliage. Au laboratoire, les essais de micro dureté permettent une exploration fine des variations de dureté liées soit à une anisotropie cristalline du matériau (essai Knops), soit à de faibles gradients de concentration en impuretés au voisinage d'un joint de grain ou d'une surface. En outre, lorsqu'un

matériau possède plusieurs phases différentes, la micro dureté permet de les repérer et d'aider à leur identification.

### 1.3 Qualité physico-géométrique

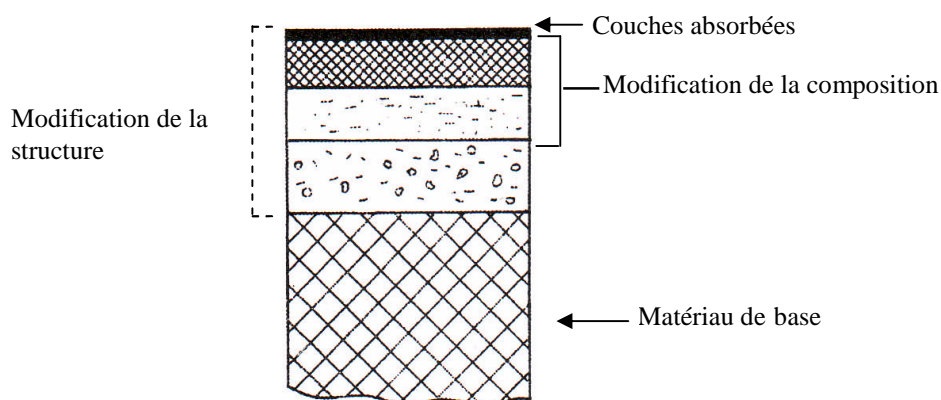
#### 1.3.1 La surface

En tribologie, la surface ne définit pas uniquement la zone de séparation des corps, mais concerne toutes les caractéristiques du contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Par conséquent, on admettra que les paramètres définissant la surface correspondent à l'ensemble des propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, ainsi qu'aux caractéristiques géométriques du contact incluant, par extension, la forme des pièces. [8], [9]

#### 1.3.2 L'état structural et physique

D'une façon générale, les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau (dans la masse), d'une part parce que la symétrie de la structure atomique est rompue (modification des forces de liaison, de la concentration en défauts...), d'autre part parce que l'environnement (atmosphère, contraintes appliquées, température,...) peut modifier considérablement les couches superficielles, en créant des concentrations d'éléments très différentes des valeurs moyennes volumiques.

Après qu'elle ait été « préparée » par (traitements thermiques, usinages...) et placée dans son environnement de travail, une surface est constituée d'une succession de couches représentée schématiquement dans la **figure 1.2**.



**Figure 1.2** Représentation schématique de la surface [8]

Pour une surface métallique, prise comme exemple, peuvent être mises en évidence :

- une couche de molécules adsorbées (liquides, gaz...) constituée le plus souvent d'oxygène, de polluants atmosphériques, de corps gras, et dont l'épaisseur est généralement inférieure à (0,01  $\mu\text{m}$ ) ;
- une « postcouche » qui est le fruit d'interactions entre le matériau et l'environnement (par exemple film réactionnel résultant de l'oxydation), ou de modifications significatives de la composition du matériau de base, lors de son élaboration (par exemple enrichissement superficiel en graphite lors de l'usinage des fontes grises...), l'épaisseur est de 0.01÷0.1  $\mu\text{m}$  ;
- une zone où la structure cristalline est pratiquement totalement transformée (écrouissages intenses,...), et qui résulte de modifications mécaniques, thermiques... dues par exemple aux usinages, polissages... Ces transformations peuvent intéresser une profondeur de 100÷300 $\mu\text{m}$  ;
- la « sous-couche », caractérisée par une structure cristalline partiellement transformée, et qui constitue une zone de transition avant de retrouver les caractéristiques du matériau de base.

La présence de couches adsorbées concerne la quasi totalité des matériaux, qu'ils soient métalliques, céramiques, polymériques.

Les caractéristiques physicochimiques des surfaces, liées à la présence des couches adsorbées et de la post couche (que l'on regroupera souvent sous le vocable de « films superficiels », jouent un rôle fondamental sur le frottement et l'usure.

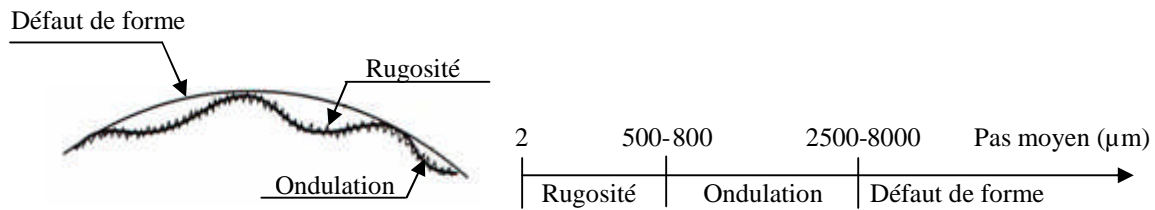
- la seule présence de couches adsorbées peut modifier complètement les propriétés d'interface (abaissement de l'énergie superficielle, des forces d'adhérence), et agir aussi sur les propriétés mécaniques superficielles.
- les couches d'oxydes, dont certaines peuvent se comporter comme de véritables lubrifiants solides, sont à l'origine des différences radicales de comportement des contacts selon que le frottement a lieu à l'air atmosphérique, ou sous ultravide. D'une façon générale, l'influence de l'oxydation est étroitement liée à la nature (composition, structure, morphologie) des couches formées, qui détermine leurs caractéristiques mécaniques et physicochimiques, (ténacité, stabilité...), des propriétés de rétention des lubrifiants...etc.

### 1.3.3 Topographie

#### a) Définition

Ce terme générique regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques d'une surface, qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité, au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact. Les irrégularités d'une surface peuvent être classées en trois niveaux (**figure1.3**). Sont donc concernés tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (opérations de mise en forme, de mise à la côte, traitements thermiques, traitements de surfaces), et en particulier :

- la génération de sillons, aspérités, cavités, porosités...
- la génération de défauts de forme (linéarité, circularité...).



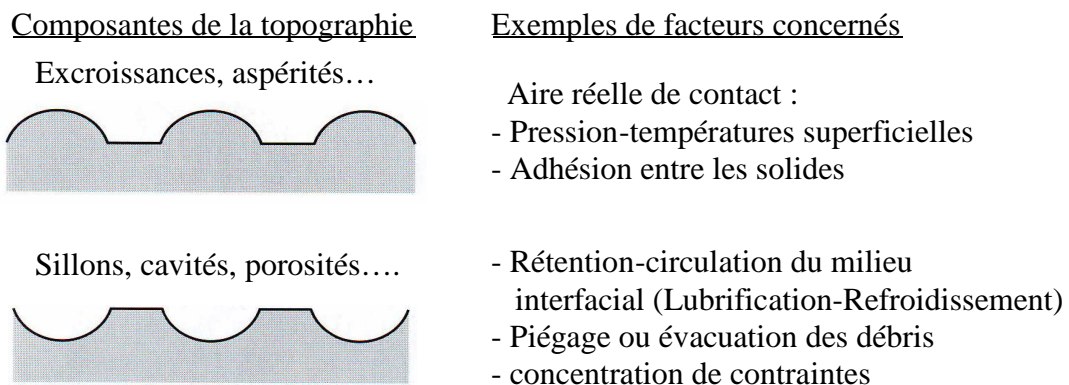
**Figure 1.3** Classement des irrégularités de surface

### b) Importance de la topographie

La rugosité est un paramètre important dont on connaît par ailleurs les effets sur la résistance à la corrosion et le comportement mécanique des matériaux.

La topographie agit sur la plupart des facteurs qui gouvernent le comportement au frottement et à l'usure, et notamment (**figure 1.4**):

- le mode de contact ;
- le comportement du milieu interfacial (troisième corps) ;



**Figure 1.4** Influence de la topographie sur le comportement des surfaces et du milieu interfacial (troisième corps...)

Lorsqu'elle concerne plus particulièrement le domaine des pièces d'outillage destinées à la mise en forme (coupe, déformation, moulage ...), la rugosité constitue aussi un facteur déterminant pour la qualité des produits finis (propriétés d'aspect...). [10]

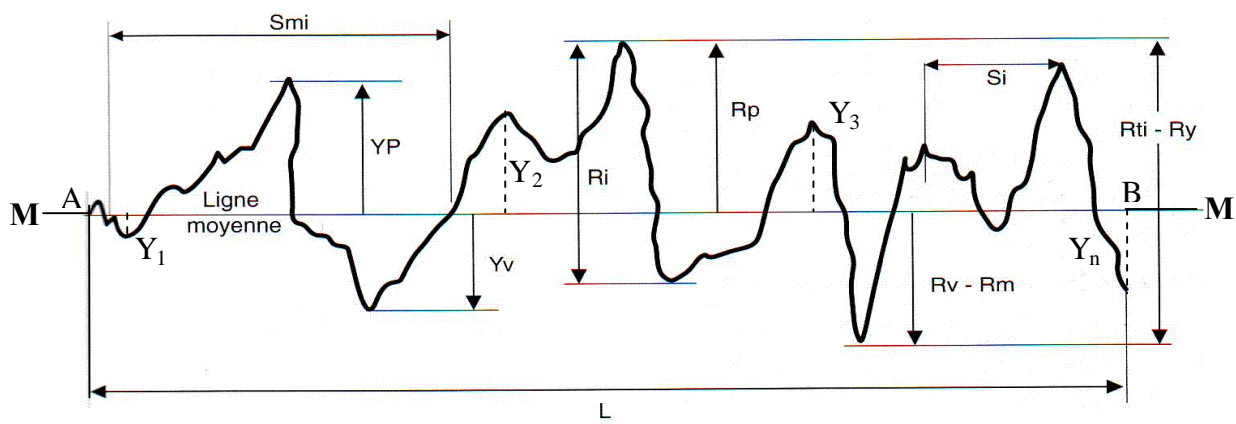
La rugosité intervient de manière prépondérante dans le processus de rodage, auquel est systématiquement liée une diminution des irrégularités de surface ; cette évolution correspond à une élimination des aspérités, se produisant ou bien par cisaillement - déchirement (avec

émission de débris), ou bien par consommation chimique (action des additifs extrême-pression des lubrifiants), ou bien encore par plastification.

La définition de la topographie prend en compte toutes les caractéristiques des irrégularités de surface : dimensionnelles (par exemple hauteur des « pics »), géométriques (par exemple forme, acuité des aspérités ou des cavités), mais aussi la répartition et l'orientation (préférentielle ou aléatoire...). Les caractéristiques topographiques des surfaces sont caractérisées par l'acuité, la forme, l'orientation des rugosités.

### c) Paramètres de rugosité

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés dans la **figure1.5**.



**Figure1.5** Paramètres de rugosité

- MM : Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil
- L : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité
- YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM
- YV : Profondeur d'un creux par rapport à « MM »
- Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM »
- RT :  $R_{ti}$  (ou  $R_y$ ) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ( $R_y = R_p + R_m$ )
- Rtm : Moyenne des  $R_{ti}$  sur la longueur totale d'évaluation
- $R_i$  : Profondeur élémentaire de la rugosité
- R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne  $R_i$  sur la longueur d'évaluation)
- Rmax : Profondeur maximum de la rugosité
- $R_z$  : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des 5  $Y_p$  et 5  $Y_v$  les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs.
- $R_a$  : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.
- Si : Pas de saillies locales du profil

- S<sub>mi</sub> : Pas des irrégularités du profil (moyenne des S<sub>mi</sub> sur la longueur de base)

#### d) Rugosité minimale

Ramenée aux facteurs dimensionnels et de forme, cette notion sous-entend principalement :

- hauteur minimale des rugosités ;
- acuité (rayon de courbure) minimale des pics ;

La première prescription s'adresse en particulier aux contacts travaillant en régime lubrifié, domaine pour lequel la hauteur des aspérités détermine l'épaisseur critique des films lubrifiants.

La seconde prescription quant à elle est quasi universelle puisqu'elle vise, par l'amélioration de la portance (accroissement de la surface réelle de contact), à diminuer les pressions superficielles et les risques de vieillissement ou de dégradation qui lui sont associés.

La diminution de l'acuité des aspérités va notamment dans le sens d'une amélioration de la tenue des films superficiels favorables, et plus particulièrement ceux sensibles aux effets de surcharge localisée (films minces et/ou fragiles à base d'oxydes...).

Pour un grand nombre de situations, la recherche d'une rugosité optimale se substitue à celle d'un perfectionnement du « poli » des surfaces.

L'un des critères de mesure de Rugosité largement employé est la rugosité (R<sub>a</sub>). Elle se représente par les irrégularités relevées comme les écarts de profil effectif par rapport à la ligne de référence définie sur la longueur de base, et calculée par :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_A^B |Y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i|$$

n : nombre de pointes successive du profil ; Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>, ... Y<sub>n</sub> par rapport à la ligne « MM »

## 1.4 Traitements de surface

D'après ce qui vient d'être présenté, la surface d'un solide est une région s'étendant sur quelques distances atomiques qui sépare l'intérieur du matériau du milieu extérieur : en général, le vide ou un gaz. Les propriétés physiques et chimiques, structurales et électroniques des surfaces diffèrent notablement de celles du matériau massif : elles évoluent plus ou moins rapidement vers celles du volume, lorsqu'on s'éloigne de la surface vers l'intérieur du matériau. La tenue mécanique d'une surface est un paramètre très important non seulement lorsque la surface elle-même est soumise à des sollicitations mécaniques (frottement, usure), mais également si l'on considère que la plupart des ruptures (rupture fragile, rupture par fatigue, rupture par corrosion sous contrainte) trouvent leur origine dans des phénomènes superficiels [6]. Les opérations de mise en forme ou de mise à la côte d'une pièce mécanique jouent un rôle déterminant sur la nature des couches superficielles [10]. Ainsi, par exemple, peut-on s'attendre à des variations importantes de la com-

position, de la structure, des contraintes résiduelles..., d'un acier, selon que les moyens de finition utilisent la coupe, la déformation, l'électroérosion...

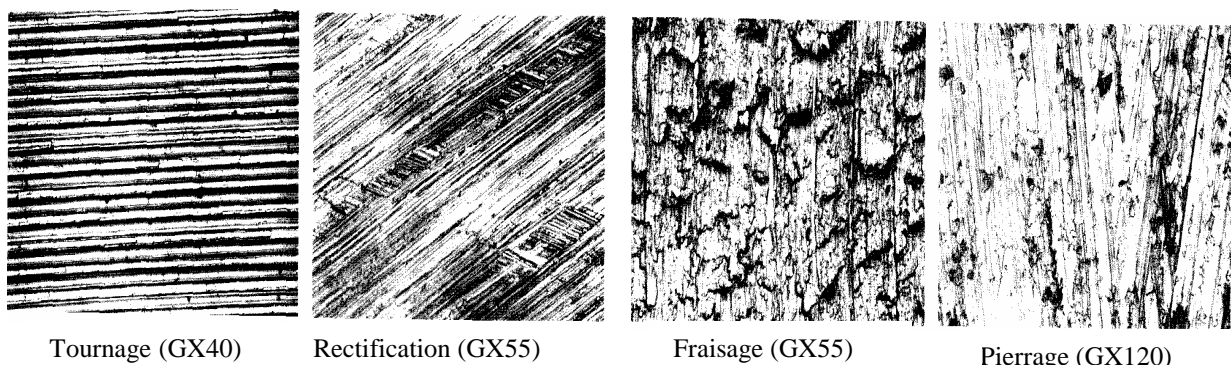
Les Traitement de surface (TRDS) conduisent à des modifications plus ou moins importantes de l'état structural et physique, qui dépendent du procédé, des profondeurs intéressées et pour un même procédé :

- des opérations de « prétraitement » (préparations de surfaces) ;
- des opérations de « post traitement » (modes de finition ou de parachèvement).

L'obtention de bonnes propriétés mécaniques superficielles dépend du choix de l'application des traitements de surface. Néanmoins, les exigences de l'utilisation du matériau sont souvent contradictoires :

- une bonne résistance à l'usure est obtenue par un durcissement superficiel (par carburation, nitruration, trempe superficielle, « chromisation dure », etc.) ;
- une bonne résistance à la propagation des fissures requière par contre une surface suffisamment plastique (dépôt de nickel) et soumise à des contraintes de compression (écrouissage superficiel)
- pour obtenir un frottement facile entre deux surfaces, il est souvent nécessaire d'avoir recours à des procédés de revêtement (sulfuration, placage...) qui attribuent à la surface une plasticité suffisante sans diminuer de manière dommageable la résistance à l'usure.

Les TRDS participent peu ou beaucoup à la modification des caractéristiques topographiques, la variété des procédés et de leurs paramètres de mise en œuvre offre une large gamme de possibilités. En règle générale, l'effet des TRDS ne doit pas être seulement vu par rapport à la rugosité directement induite, mais aussi et surtout par rapport au mode de changement de cette rugosité au cours du frottement, et du rodage. La **figure1.6** illustre les différences de topographie réalisée par quelques modes de finition.



**Figure1.6** Topographiques relatives à quelques modes de finition [11]

Le mode d'obtention de la rugosité, et plus généralement de la topographie, joue un rôle prépondérant surtout lorsque les contacts frottants mettent en jeu des sollicitations mécaniques

importantes. A rugosités (profil, forme...) équivalentes, une préférence sera accordée aux méthodes de finition **agissant par déformation**, plutôt que par coupe [8], [12]. Ces méthodes, à condition qu'elles soient **bien contrôlées**, permettent, selon les matériaux intéressés :

- d'une part d'éviter ou d'éliminer les défauts superficiels (microfissures, bavures, transformations structurales,...) qui peuvent être provoqués par enlèvement de matière ;
- d'autre part de générer des contraintes résiduelles de compression

Parmi les traitements de surface mettant en œuvre d'importantes déformations superficielles, le plus répandu est le traitement mécanique de surface agissant par **déformation plastique superficielle** (usinage sans enlèvement de matière) [13]. Il est en effet prouvé par [14], qu'il provoque la formation, aux environs de la surface, d'une zone dont la cristallisation est bouleversée par **l'érouissage**, et ce sur une profondeur qui peut atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de micromètres. L'existence de cette zone écrouie est très bénéfique pour la tenue du matériau à l'usure et à la propagation des fissures. Le but à atteindre est, dans ce cas, d'augmenter la surface de réaction vraie par création d'une rugosité artificielle et élimination des couches d'oxydes éventuelles. [8]

## 1.5 Traitement par déformation plastique [5]

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne ; ces évolutions de propriétés et de microstructures, appelé **écrouissage**, joue un rôle très important pour les caractéristiques mécaniques du matériau [15], [16]. En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques de nombreux alliages métalliques. [17]

L'écrouissage dépend du matériau et de la quantité de déformations appliquées (température, vitesse et mode de déformation). En particulier, on distingue la déformation à froid ( $T_{def} < T_f/3$ ) et la déformation à chaud ( $T_{def} \geq T_f/3$ ). Les relations entre déformations appliquées et contraintes s'appellent lois d'écrouissage, d'écoulement ou de comportement. Elle dépend étroitement des mécanismes fondamentaux de la déformation plastique en relation avec les évolutions de microstructures à l'intérieur des grains. Au-delà d'une petite déformation élastique réversible ( $\approx 0.1\%$ ), la déformation plastique conduit généralement à une augmentation de la dureté d'un alliage métallique par écrouissage, fonction de la composition de l'alliage et de la quantité de déformation.

Les métaux sont formés de cristaux plus ou moins gros, en général fortement déformés et contenant des impuretés. Les propriétés des cristaux peuvent être classées en deux catégories : d'une part, les propriétés qui sont liées à la structure atomique du cristal et à sa symétrie (tenseur des constantes élastiques), ce sont les propriétés intrinsèques ; d'autre part, celles qui sont liées à la présence de

défauts dans le cristal, ce sont les propriétés extrinsèques (comportement des métaux et des autres cristaux sous l'action d'une contrainte appliquée, propriétés de diffusion dans les solides et de réactions chimiques entre solides, photo conductibilité et luminescence, centres de couleur, conductibilité des isolants et des semi-conducteurs). Les propriétés intrinsèques sont elles-mêmes souvent modifiées par la présence de défauts. Les défauts cristallins sont en général classés selon les dimensions du volume qui les entoure. On évoquera dans ce qui suit, le plus important des défauts qui correspond à la dislocation.

### 1.5.1 Influence des défauts sur les propriétés des cristaux

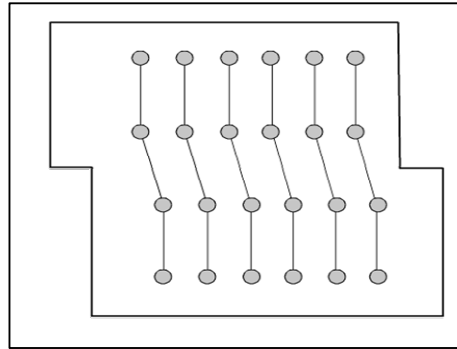
Considérons une baguette parallélépipédique taillée dans un cristal idéal. Fixons la partie inférieure dans une mâchoire et exerçons un effort sur la partie supérieure : le cristal subit une déformation. Relâchons l'effort ; si celui-ci est faible, le cristal reprend sa forme initiale, la déformation qu'il a subie est dite élastique. Si, en revanche, l'effort est supérieur à une certaine valeur limite, le cristal ne reprend pas sa forme initiale, mais conserve une déformation permanente : on constate qu'une partie du cristal a glissé par rapport à l'autre. La trace du glissement reste visible sur le cristal par des lignes appelées lignes de glissement. Le glissement ne peut avoir eu lieu simultanément en tous les points d'un plan cristallin ; il est impensable que toutes les liaisons des atomes contenus dans ce plan se soient rompues puis recollées après que les deux moitiés du cristal ont glissé de part et d'autre du plan : une telle rupture des liaisons aurait entraîné le clivage en deux moitiés indépendantes. Il n'est pas non plus possible qu'il y ait eu une déformation simultanée de toutes les mailles du plan, car les valeurs expérimentales de la limite élastique sont bien inférieures à celle que l'on peut prévoir théoriquement pour une telle opération. Le glissement se propage le long du plan grâce au mouvement d'un défaut linéaire appelé dislocation. [18]

### 1.5.2 Dislocation

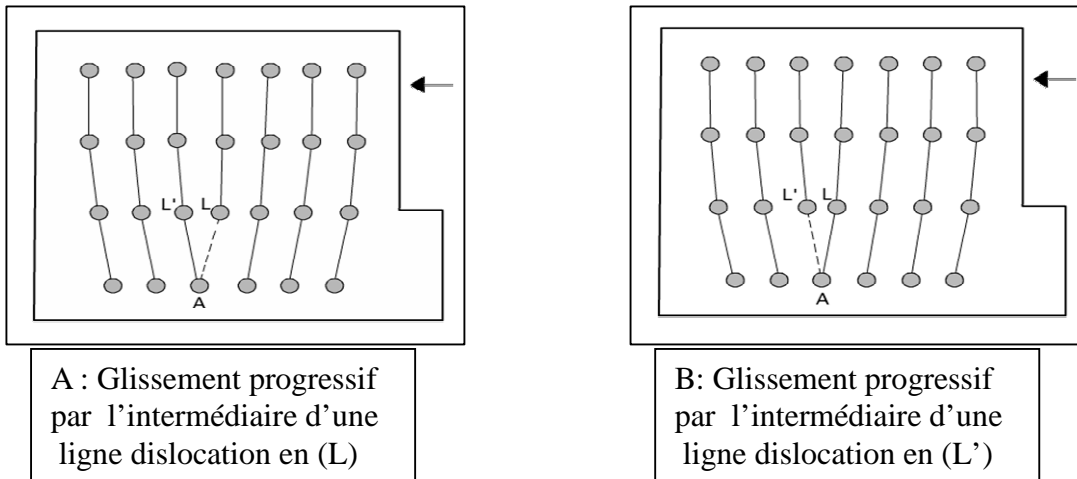
#### 1.5.2.1 Définition

Le concept de dislocation a d'abord été introduit en élasticité des milieux continus par V. Volterra en 1907. Il a été repris en 1934, indépendamment, par Taylor, et Polanyi et adapté aux milieux discontinus pour interpréter les phénomènes de glissement observés lors de la déformation plastique des matériaux (**figure1.7**). Supposons qu'au sein du cristal il existe un plan cristallin incomplet, terminé par une rangée "L" **figure1.8A**. La répartition des liaisons entre les atomes voisins L, L', A est instable. Sous l'action d'un effort extérieur exercé sur le cristal, il se produit un réarrangement des liaisons illustré sur **la figure1.8B [15]**. C'est maintenant le plan voisin qui est incomplet et se termine par la rangée L' ; tout se passe comme si la situation « plan incomplet » avait sauté d'une distance inter atomique. Si l'on continue à exercer un effort sur le cristal, cette situation instable va

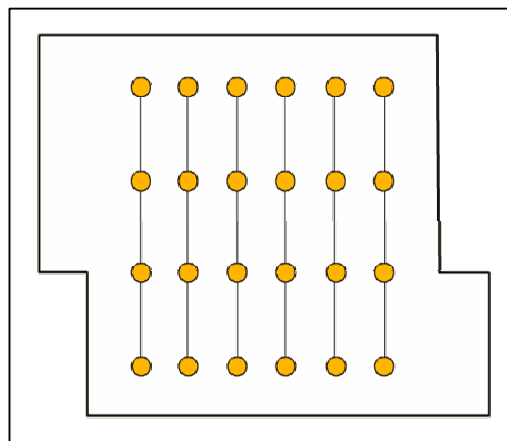
traverser tout le cristal jusqu'à ce qu'elle en atteigne la surface latérale, **figure1.9** : la moitié supérieure du cristal a alors glissé par rapport à la moitié inférieure d'une longueur égale à la distance inter atomique, mais contrairement à l'hypothèse de la **figure1.7**, le glissement a été progressif et le nombre d'atomes en position instable à un instant donné a toujours été très faible. La ligne qui termine le plan incomplet est une dislocation. [19].



**Figure1.7** Glissement simultané de la partie supérieure du cristal par rapport à la partie inférieure



**Figure1.8** Glissement progressif



**Figure1.9** Etat du cristal après la traversé de la ligne de dislocation.

En science des matériaux, une dislocation est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Une dislocation peut être vue simplement comme un "quantum" de déformation élémentaire au sein d'un cristal possédant un champ de contrainte à longue distance.

Elle est caractérisée par :

- la direction de sa ligne ;
- un vecteur appelé « vecteur de Burgers » dont la norme représente l'amplitude de la déformation qu'elle engendre.

Les dislocations ont une importance capitale pour les propriétés physiques des matériaux cristallins :

- en se déplaçant, elles propagent la déformation plastique et permettent ainsi la mise en forme des pièces métalliques.
- les déformations du réseau cristallin qu'elles induisent, facilitent la diffusion des atomes et peuvent ainsi piéger des défauts autour d'elles (nuage de Cottrell).
- elles influencent les propriétés électroniques des semi-conducteurs.

La déformation plastique nécessite un réarrangement important de la matière. La déformation procède par une série de glissements élémentaires le long de plans atomiques, à la manière des feuilles d'une rame de papier qui glissent les unes sur les autres. Ceci est appelé un cisaillement, ainsi la déformation s'effectue par de tels « glissements ». Les métallurgistes avaient remarqué en particulier que les cristaux fragiles se brisaient le long de certains plans en formant des facettes bien particulières, appelées surfaces de clivages, et que l'on observe si facilement dans les minéraux (quartz, diamant...). [20]

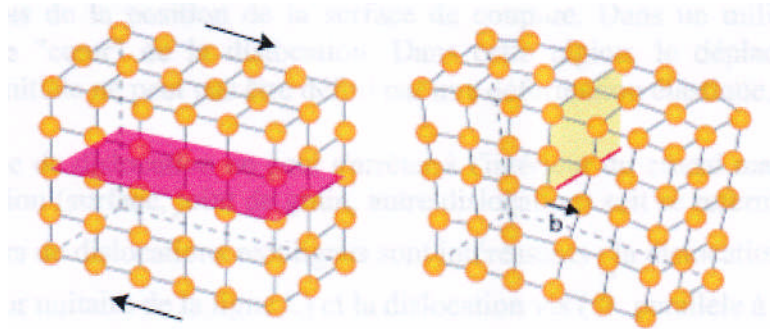
Lorsqu'on déforme un cristal, on peut observer dans certaines conditions de petites marches sur leurs surfaces. Il est facile de comprendre que lorsqu'on fait glisser un plan d'atomes l'un sur l'autre (on parle d'un plan de glissement), on crée un décalage qui forme une marche en surface.



**Figure 1.10** Essai de traction sur un monocristal

### 1.5.2.2 Mécanisme et types de dislocations

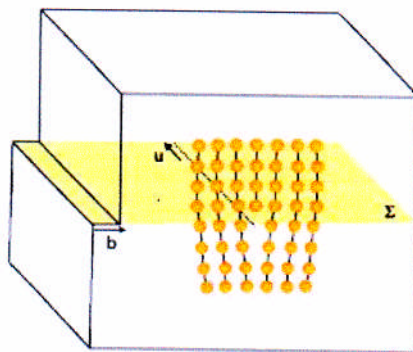
Supposons qu'un cisaillement élémentaire d'une distance inter atomique "b" (**figure 1.11**) se produise uniquement le long d'une partie du plan de cisaillement. La ligne qui sépare la partie qui a été cisailée de l'autre non cisailée, est la ligne de dislocation. Elle apparaît comme la limite d'un demi plan atomique qui courbe fortement les plans voisins.



**Figure1.11** Propagation d'un défaut linéaire

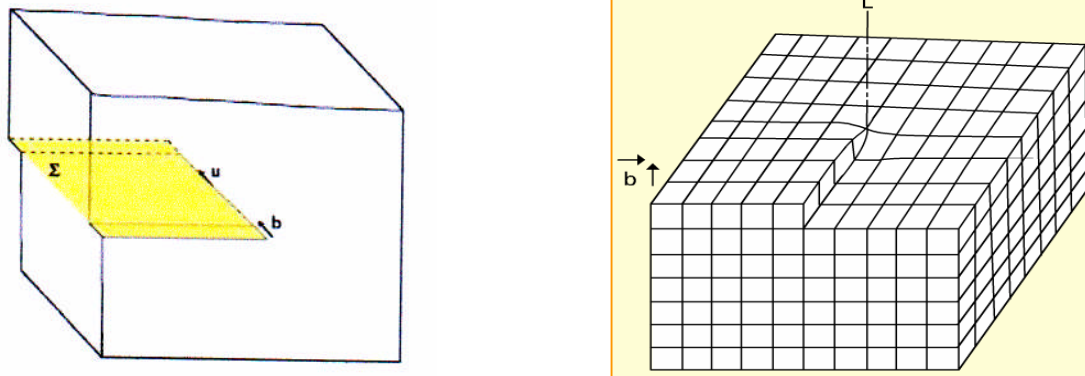
Deux cas particuliers de dislocations rectilignes sont intéressants :

- la dislocation coin où  $\vec{b}$  vecteur de burgers est perpendiculaire à  $\vec{u}$  (**figure1.12**)
  - et la dislocation vis où  $\vec{b}$  de burgers est parallèle à  $\vec{u}$  (**figure1.13**)
- $\vec{u}$  étant le vecteur unitaire de la ligne "L".



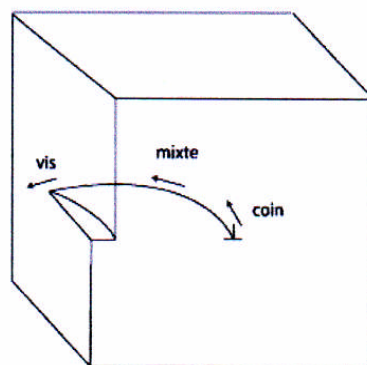
**Figure1.12** Dislocation coin

Dans le cas de la dislocation vis, la ligne de dislocation monte d'un pas égal à "b" à chaque tour d'une trajectoire qui enroule la dislocation. La topologie du champ de contrainte autour de la dislocation est donc celle d'une hélice.



**Figure1.13** Dislocation vis

Dans le cas général, la dislocation a un caractère mixte où le vecteur de burgers  $\vec{b}$  et le vecteur  $\vec{u}$  de la ligne forment un angle quelconque. La ligne de dislocation est courbe, la dislocation présente des portions à caractère mixte (**figure1.14**).

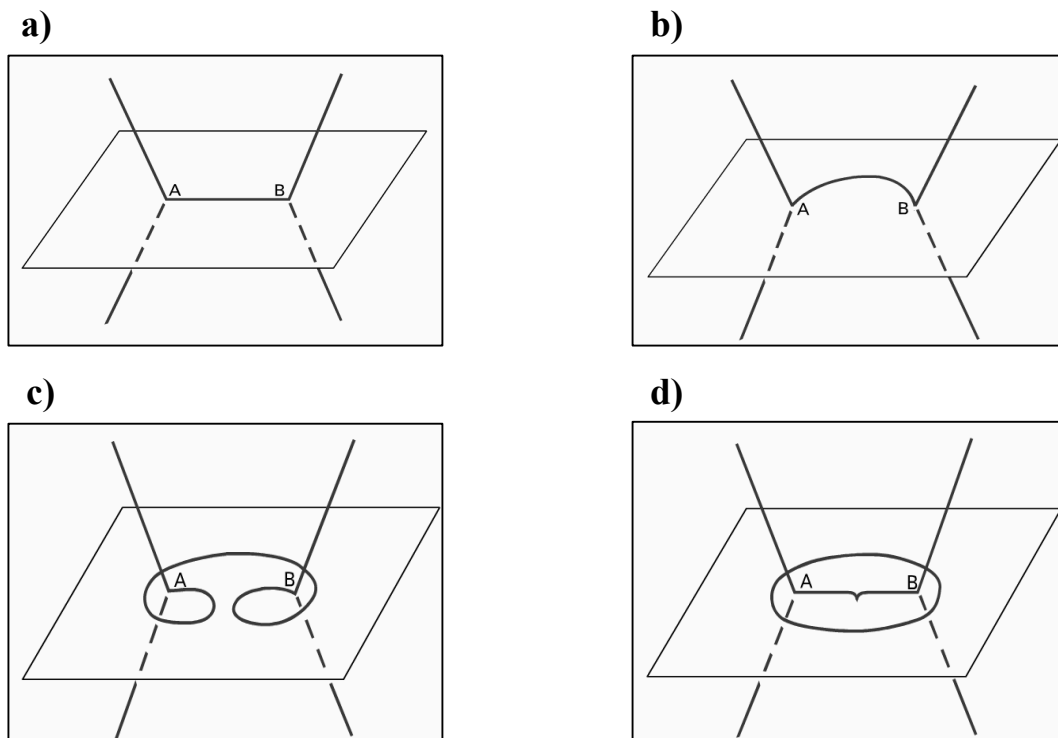


**Figure1.14** Dislocation réelle

### 1.5.3 Sources et multiplication des dislocations

La déformation plastique d'une pièce métallique se fait par le mouvement des dislocations. Le passage d'une dislocation à travers un cristal fait glisser l'une par rapport à l'autre les deux moitiés du cristal séparées par l'aire balayée par la dislocation. Si l'on exerce une déformation plastique importante sur un cristal contenant, au départ, peu de dislocations, on constate néanmoins un glissement global dans le cristal beaucoup plus grand que celui qui correspondrait au mouvement des quelques dislocations que contenait le cristal. Il doit donc y avoir eu création de dislocations. Ces dislocations se multiplient selon le mécanisme imaginé par J. Franck et Read (1950) voir **figure1.15**.

1. Considérons un segment de dislocation contenu dans un plan de glissement facile et limité par deux nœuds "A" et "B" de dislocations bloquées (par des défauts ponctuels, des précipités ou d'autres dislocations normales au plan de mouvement) **figure1.15a**.
2. les parties épinglées restent fixes, les parties mobiles s'étendent autour de l'épingleage **Figure1.15b**.
3. lorsque les parties mobiles se rejoignent, cela forme une boucle de dislocation qui bouge, s'étend librement tandis que la partie épinglée recommence le cycle **figure1.15c et d**.



**Figure1.15** Source de frank et Read symétrique

Or, les dislocations se gênent mutuellement, si elle sont dans le même plan de glissement, elles s'attirent ou se repoussent, et si elles sont dans des plans orthogonaux, elles s'épinglent mutuellement (phénomène des « arbres de la forêt »). Donc plus il y a de dislocations, plus il y'a de déformations possibles, mais moins les dislocations sont mobiles car elles se gênent. Le niveau élevé de la contrainte permet aussi de contourner les obstacles et donc de continuer la déformation plastique. La déviation d'une partie de la dislocation, c.-à-d. le mouvement sur un plan de glissement incliné par rapport au plan de glissement principal, provoque des croisements entre les dislocations de différents plans de glissement. La réticulation des dislocations à travers les plans de glissement qui en résulte, renforce la microstructure cellulaire. Vers la fin de ce stade, l'ancrage des dislocations se perfectionne de plus en plus et le métal se fragilise.

Un matériau ductile se déforme facilement s'il contient beaucoup de dislocations mobiles, le cas du fer doux. Si l'on bloque le mouvement des dislocations, par exemple en introduisant des impuretés qui se logent préférentiellement le long des dislocations, la limite élastique sera notablement augmentée. C'est le cas des aciers dans lesquels le carbone forme des précipités de cémentite. La perte de mobilité des dislocations entraîne un durcissement de la couche superficielle, ce qui constitue l'érouissage [20] et [18]

## 1.6 Erouissage

L'érouissage des matériaux cristallins s'explique par l'immobilisation progressive des dislocations et va jusqu'à leur blocage complet. En effet, pour qu'il y ait déformation plastique, il faut des dislocations. L'érouissage d'un métal correspond aux modifications qu'il subit lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques permanentes. Suivant les métaux considérés les propriétés mécaniques peuvent évoluer vers une augmentation de la résistance (cas des aciers alliés) jusqu'à un certain point (seuil de rupture) ou à l'inverse vers sa diminution (cas des aciers peu alliés). [20], [8] .

L'érouissage ne se produit que sur les matériaux ductiles et dans le domaine plastique. L'érouissage entraîne une augmentation de la limite d'élasticité et de la dureté, il est caractérisé par un coefficient d'érouissage ou de consolidation "n".

## 1.7 Conclusion

La très grande diversité des méthodes de traitement des surfaces rend délicat le choix d'un traitement donné dans un but déterminé. Les paramètres qui entrent en considération sont les mécanismes exacts de l'action de l'environnement sur le métal à traiter (diffusion, électrochimie, propriétés mécaniques et physiques), le but recherché par le traitement en fonction de ces mécanismes, la pondération entre les exigences souvent contradictoires de protection dans des environnements variables.

Le choix du mode d'obtention des surfaces des pièces est essentiellement basé sur les propriétés mécaniques et topographiques. Malgré les avantages des modes d'obtention des pièces par enlèvement de matière et des TRDS, le traitement mécanique notamment le traitement par déformation plastique superficielle (DPS) s'avère très intéressant lors des opérations de parachèvement en raison de la plastification qu'il permet d'offrir à la surface. Ce traitement opère sans enlèvement de matière, il s'appuie sur les propriétés elasto-plastique des métaux. Il s'applique sur les métaux ductiles en produisant dans le métal des dislocations qui ont pour conséquence l'érouissage de la surface. Ce dernier dépend du matériau et de l'intensité de déformation appliquée, et a pour conséquences :

- la consolidation de la couche superficielle du matériau;
- l'amélioration de la tenue des surfaces contre la propagation des fissures ;
- l'accroissement de la contrainte élastique et la dureté.

D'autre part, la plastification ainsi obtenue offre à la surface la topographie nécessaire pouvant répondre à certaines exigences techniques (critères d'aspect, portance,..) et d'environnement (protection contre les attaques extérieures,...).

La caractérisation des propriétés mécaniques peut être obtenues par les essais de dureté (essais non destructifs et rapides), en particulier et pour une étude très localisée de la surface du métal, l'essai de dureté Vickers « Hv » est très utilisé au laboratoire de recherches, il s'effectue à l'aide d'un micro-duromètre.

La topographie de la surface peut être quantifiée par la mesure de la rugosité « Ra », paramètre le plus souvent requis par les bureaux d'études.

Enfin, le procédé de traitement de surface par déformation plastique superficielle auquel nous avons opté dans ce travail concerne le traitement de parachèvement par brunissage, et sera développé dans le prochain chapitre.

# Chapitre 2

## TRAITEMENTS MECANIKES DE SURFACE PAR BRUNISSAGE

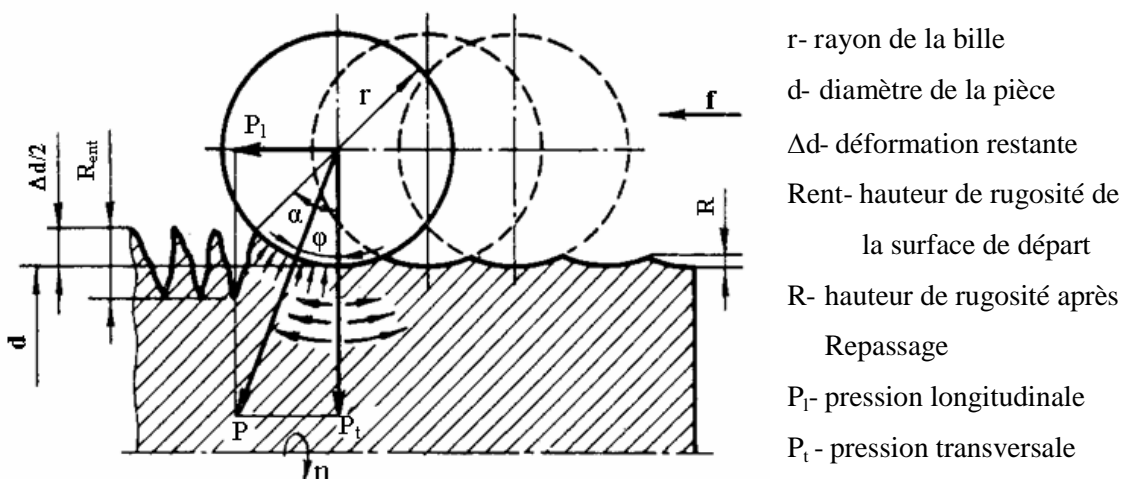
## 2.1 Introduction

Les traitements mécaniques de surface (TMS) sont des traitements à l'aide desquels les couches superficielles sont déformées plastiquement par une action mécanique, projection de particules (grenailage, sablage,...), déformation par pression (brunissage, galetage,...). L'action mécanique permet de modifier et d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques d'un métal (rugosité, forme, contraintes, dureté). Les traitements mécaniques sont applicables à tous les métaux déformables quel que soit leur traitement initial [21]. Leur réactivité dépend de leurs propriétés mécaniques (allongement, dureté,...). Comme il a été évoqué dans le chapitre précédent, les propriétés mécaniques usuelles des métaux se rattachent aux notions courantes d'élasticité et de plasticité. La déformation plastique apparaît lorsque les contraintes dépassent les limites élastiques, cette déformation est liée au déplacement des atomes à l'intérieure des grains à de grandes distances atomiques qui provoque des modifications de forme permanentes. Ainsi après la suppression de la charge, le corps ne rétablit plus sa forme, sa structure et ses propriétés [9], il acquière en contrepartie en surface, de nouvelles propriétés mécaniques et topographiques [22]. D'après ses travaux, Y.G. SHNEIDER [23], stipule que dans les conditions d'exploitation normale du point de vu résistance à l'usure, la résistance propre des reliefs de la surface contribue de 25÷30 %, leurs micro-géométrie optimales et régulières contribuent de 70÷75 %.

## 2.2 Traitement de finition par pression

### 2.2.1 Définition et principe

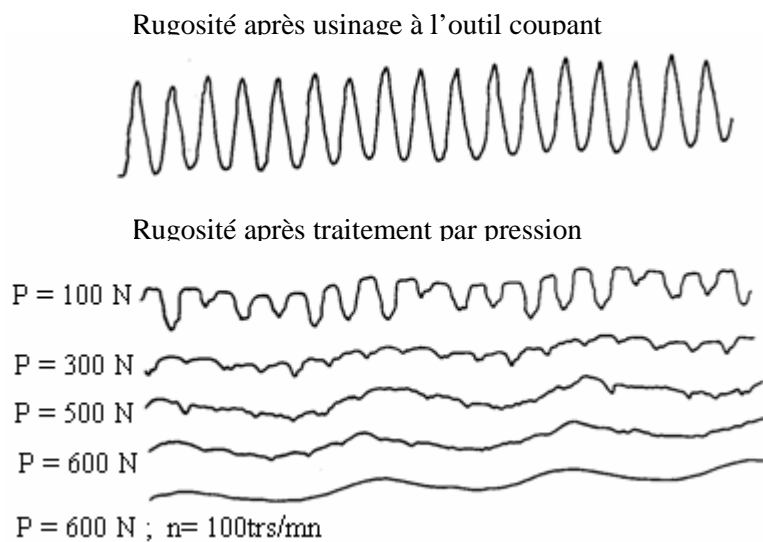
Le traitement de finition par pression est un procédé de traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe est basé sur les propriétés des matériaux et leur aptitude à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle. Sous la pression des métaux durs, des alliages durs ou diamant, de l'outil (bille, galet, pointe sphérique), les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en formant un nouveau microrelief avec plus de régularité (figure 2.1).



**Figure 2.1** Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille [23]

La couche superficielle s'écoule sous l'influence de la force de pression développée par la bille, par conséquent les parties en saillies se déplacent vers les creux, la hauteur des irrégularités d'entrée «  $R_{ent}$  » diminue. Le métal à partir des creux est pressé vers le haut, un nouveau relief apparaît avec des hauteurs «  $R$  » accompagné de pas qui sont conditionnés par les régimes de traitement.

Sur la **figure 2.2**, sont représentés les profilogrammes des surfaces de pièces (acier A50) usinées à l'outil et par déformation par bille et galet avec des efforts de pression progressifs.



**Figure 2.2** Évolution de la rugosité de départ de la surface sous l'effet de l'effort de déformation acier A50 [23]

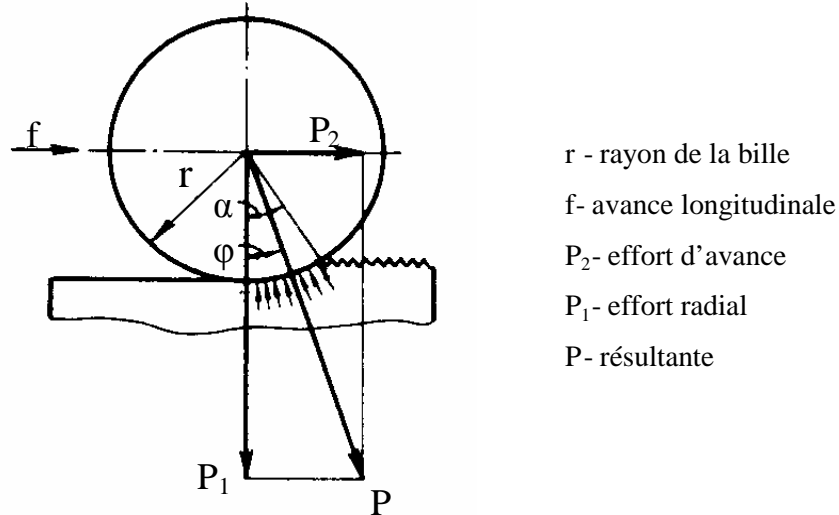
### 2.2.2 Analyse du procédé

L'analyse de différents schémas des procédés de traitement par DPS tels que (galetage, brunissage à la bille, à la broche,...) a montré que dans tous les cas, l'état des contraintes au niveau des volumes élémentaires est caractérisé par une compression multidirectionnelle. Les valeurs des contraintes normales «  $\sigma$  » et tangentielles «  $\tau$  » qui apparaissent lors de la déformation et le déplacement du métal de la zone de contact, ont une grande influence sur les principaux indices de qualité et en premier lieu sur les valeurs des paramètres et caractéristiques de la micro-géométrie. Ainsi, le problème réside dans la détermination des valeurs et des directions des contraintes principales au moyen de la théorie d'élasticité et de plasticité. Ce problème tel qu'il est présenté, lié à la déformation élasto-plastique de ces microreliefs irréguliers des surfaces obtenues au moyen des différentes méthodes de finition par pression, n'est pas encore résolu.

Dans ce qui suit, est présentée une approche à la résolution de ce problème d'après [23], les résultats de cette approche conformes aux données expérimentales, satisfont les exigences de la pratique et permettent de présenter quelques solutions liées à la formation des micro-géométries de

surface répondant aux besoins d'exploitation, par exemples : coefficient de réflexion élevé, étanchéité, fluidité de déplacement, et autres.

Sur la **figure 2.3**, est présenté le schéma d'action réciproque de l'élément déformant (cas de la bille) avec la surface, en cours de traitement.



**Figure 2.3** Schéma de l'action réciproque de l'élément déformant avec la surface traitée [23]

Sur la bille agissent les forces P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>, la force P<sub>1</sub> représente l'effort de pression normal sur la surface à traiter, l'effort P<sub>2</sub> assure le déplacement de la bille par rapport à la surface à traiter dans le sens de l'avance « f ». La **figure 2.3** présente une coupe selon la ligne de contact (bille-surface). Comme la dureté de la bille (trempée) est toujours considérablement élevée à celle du matériau à traiter, sa déformation est négligée. Devant de faibles valeurs de P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>, on constate seulement une déformation élastique qui ne peut être considérée relativement à la déformation plastique. Les efforts agissant sur la surface de contact « F » de la sphère (bille) avec l'ébauche) peuvent être considérés continus mais non uniformément réparties. Alors, les contraintes engendrées ne sont pas identiques dans les limites (bords) de la surface de contact définies par l'angle de contact « α ».

Les projections de la résultante « P » dans les directions des efforts P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub> sont données par les expressions :

$$P_1 = \int_0^{\alpha} \sigma \cos \alpha \, dF \quad (2.1)$$

$$P_2 = \int_0^{\alpha} \sigma \sin \alpha \, dF \quad (2.2)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_0^\alpha \sigma \sin \alpha \, dF}{\int_0^\alpha \sigma \cos \alpha \, dF} \quad (2.3)$$

Dans ces expressions, l'intégration de l'élément  $dF$  s'exprime en fonction de la dimension de la bille «  $r$  » et l'angle élémentaire «  $d\alpha$  ». Seulement, l'intégration des expressions (2.1) et (2.2) est impossible car le caractère de distribution «  $\bar{\sigma}$  » est inconnu dans les limites de la surface de contact «  $F$  ». Les difficultés particulières dans la détermination du caractère de distribution «  $\bar{\sigma}$  » sont conditionnées par la complexité du processus de déformation plastique des microreliefs de la surface et en tenant compte de leur durcissement. Toutefois, Il est possible de tirer certaines conclusions pour des solutions pratiques.

De l'expression (2.3), on peut en déduire que, pour un angle de contact «  $\alpha$  » réduit caractérisant plusieurs cas de traitement de finition par déformation, la grandeur  $\frac{P_2}{P_1}$  est faible (  $\sin(\alpha) \rightarrow 0$  et  $\cos(\alpha) \rightarrow 1$ ). Du même schéma de la **figure 2.3**, on peut en déduire que la résultante «  $P$  » est déviée de la direction d'action de l'effort «  $P_1$  » suivant un angle «  $\varphi$  » avec

$$\text{tg} (\varphi) = \frac{P_2}{P_1} \quad (2.4)$$

La résultante «  $P$  » passe par le centre de la bille dans les limites de l'angle «  $\alpha$  »,  $\varphi \in [0, \alpha]$ .

Dans le cas extrême, lorsque «  $\varphi$  » est proche de «  $0$  », de l'expression (2.4) nous obtenons ( $P_2 \approx 0$ ), ce qui correspond au schéma de traitement avec avance transversale, c'est le cas du traitement de renforcement par galet ou par bille. L'absence dans ce cas des déformations par glissement suivant l'axe de direction, participe à la création des meilleures conditions de déformations plastiques permettant d'atteindre un degré supérieur de polissage ( glaçage de la surface). Exemples : cas du calibrage des gorges des arbres étagés, des surfaces sphériques (logements de billes), des surfaces coniques de goujons, goupilles,...).

Dans l'autre cas extrême où ( $\varphi \rightarrow \alpha$ ), le rapport  $\frac{P_2}{P_1}$  est significatif. Pour atteindre un niveau élevé

de polissage lors du traitement avec avance longitudinale, il est nécessaire d'avoir un rapport  $\frac{P_2}{P_1}$

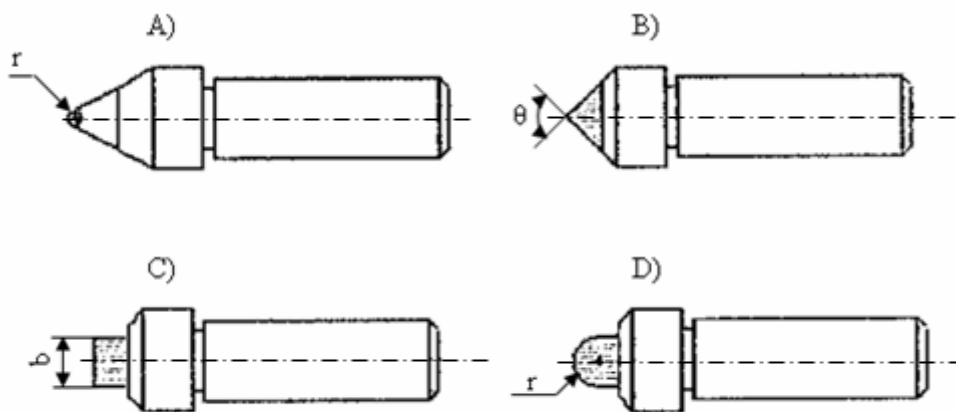
minimal. Cette condition s'obtient par une bille de grand diamètre ou galet de rayon de sphère important et avec de faibles avances.

La rugosité des surfaces obtenue par ces traitements (en particulier par brunissage à la bille et au galet) diffère de celle réalisée par usinage (à l'outil ou à l'abrasif). La rugosité transversale, mesurée dans la direction perpendiculaire à la direction du traitement (sens de l'avance) est nettement inférieure à celle obtenue par usinage. Les principaux facteurs qui déterminent la rugosité transversale sont liés à la forme géométrique et la dimension des éléments déformant, ainsi que la valeur de l'avance.

Lors de la déformation, les couches internes du métal s'opposent à la déformation des couches externes et les soumettent à des contraintes de compression qui renforcent les couches déformées du métal. Après plastification et déchargement du métal, la surface se trouve en compression. La contrainte de compression est maximale au centre de l'empreinte puis décroît sur les bords de celle-ci. Ce type d'empreinte est multiplié par l'action du mouvement d'avance de l'outil.

### 2.2.3 Brunissage par diamant

La grande dureté et le faible rayon de la partie active du diamant offrent la possibilité de traiter les pièces métalliques dures ayant même subies une trempe (dureté HRC de 50 à 60 ), et sur les métaux plastiquement déformables ( pour les aciers :  $R < 130 \text{ daN/mm}^2$ ,  $A > 6\%$  ) [24], [25]. La forme de la partie active de l'outil la plus souvent utilisée est sphérique (bille de rayon 0.8 à 5 mm), mais dans certains cas, elle peut être cylindrique, conique (**figure 2.4**) et parfois torique.



**Figure 2.4** Différentes formes de brunissoirs  
A) sphérique ; B) conique ;  
C) cylindrique plate ; D) cylindrique bombé

Les sommets des aspérités réalisées après traitement sont arrondis. Cette forme augmente considérablement la surface portante, la fiabilité de l'ajustement et diminue la concentration des contraintes [26].

## 2.3 Paramètres de traitement

Généralement, on procède à une opération de traitement mécanique de surface en vue d'améliorer les aptitudes en service des pièces mécaniques, tant sur le plan résistance pendant le fonctionnement (tenue à la fatigue, résistance à l'usure, résistance à la corrosion, .....), que sur la qualité de l'état de finition des couches superficielles du produit [27], [10], [28]. L'efficacité du traitement dépend de plusieurs paramètres [29], en l'occurrence :

- La force appliquée,
- La géométrie et les dimensions de l'outil,
- La rugosité de la surface antérieure,
- La nature du matériau à traiter,
- Les caractéristiques mécaniques de l'outil (dureté et le module du Young ),
- L'avance par rapport à la pièce,
- La géométrie et les dimensions de la pièce,
- Le nombre d'outils,
- Les contraintes résiduelles antérieures.

## 2.4 Effets du traitement mécanique

D'après plusieurs travaux [30], [31], [32], [33], [34], les paramètres mentionnés précédemment ont une influence sur l'état de la couche réalisée par le traitement. Les effets de brunissage se traduisent par une amélioration de certaines caractéristiques telles que :

- La qualité de l'état de surface obtenue,
- Le durcissement de la couche superficielle (pour les matériaux écrouissables),
- Les contraintes résiduelles,
- La limite de fatigue,
- La résistance à l'usure....

### 2.4.1 Amélioration de la qualité de surface

L'amélioration de la qualité de surface s'obtient en réduisant la rugosité de la couche superficielle. La surface présente des saillies qui s'aplatissent sous l'effet de la pression de repassage de l'outil. Au moyen de ce procédé de traitement, on s'efforce d'améliorer la qualité de la surface au niveau macro et micro géométrique : les irrégularités ou défauts macro géométriques définis par les tolérances dimensionnelles, de forme et de position, et les défauts micro géométriques représentés par la rugosité, la portance relative et le nombre de pics par cm [35].

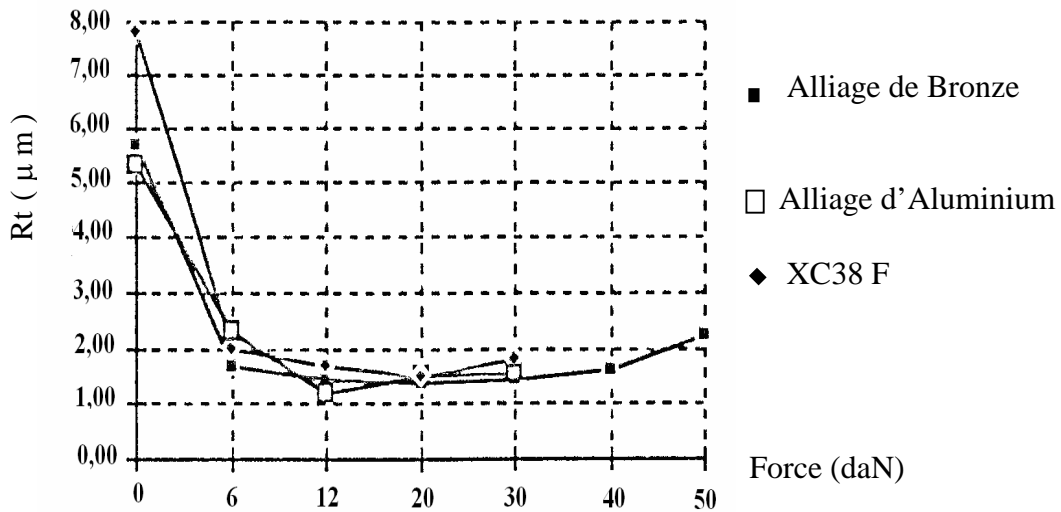
La tolérance finale, obtenue par ce procédé, est conditionnée par l'usinage de préparation [36], [37]. Par ce procédé, les rugosités « Ra » peuvent atteindre des valeurs de l'ordre 0.15  $\mu\text{m}$  [38],

avec une qualité dimensionnelle variant entre la 6<sup>ème</sup> et la 8<sup>ème</sup> classe de précision. La précision sur les côtes des pièces traitées par ce procédé est généralement améliorée. On peut atteindre des tolérances de l'ordre de 0.02 mm alors que pour l'ébauche, elle est de 0.1 à 0.15 mm [36,38, 39].

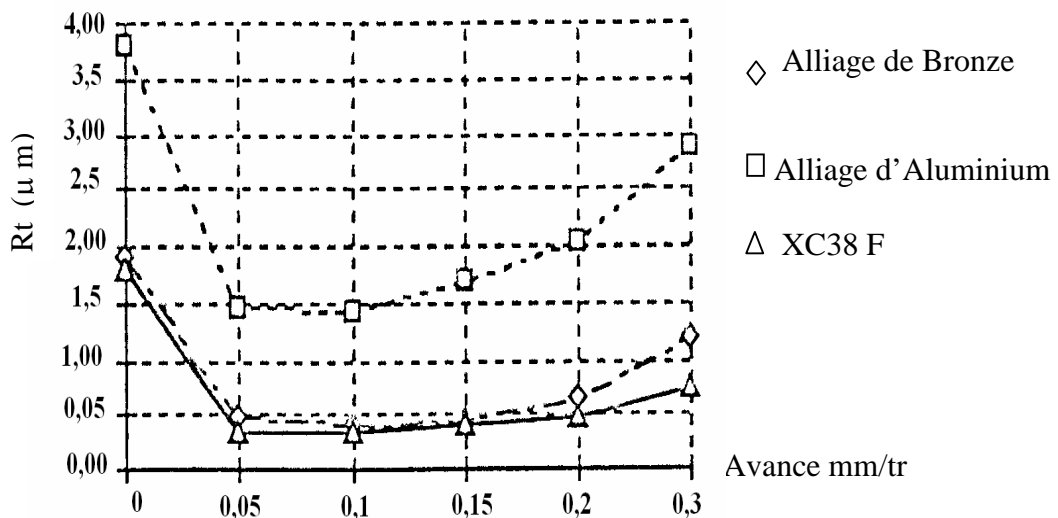
D'après M.Lemercier [38], le procédé de parachèvement par DPS ne se distingue pas des autres procédés d'usinages classiques (rodage, pierrage, honning..).

### 2.4.2 Rugosité

Une étude expérimentale faite sur des pièces cylindriques en aciers XC 38F [40], montre que la rugosité obtenue par le procédé de brunissage à la bille est nettement améliorée par rapport au tournage de finition (Cf. **figure 2.5** et **figure 2.6**), cela est aussi confirmé par les travaux [41], [42], [43], [44].

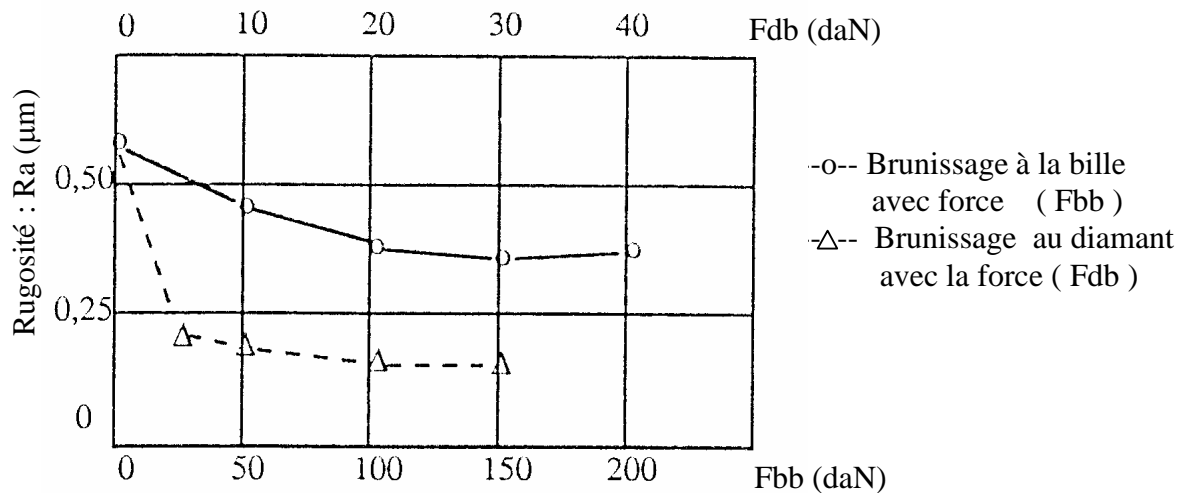


**Figure 2.5** Effet de l'effort appliqué sur la rugosité



**Figure 2.6** Effet de l'avance sur la rugosité

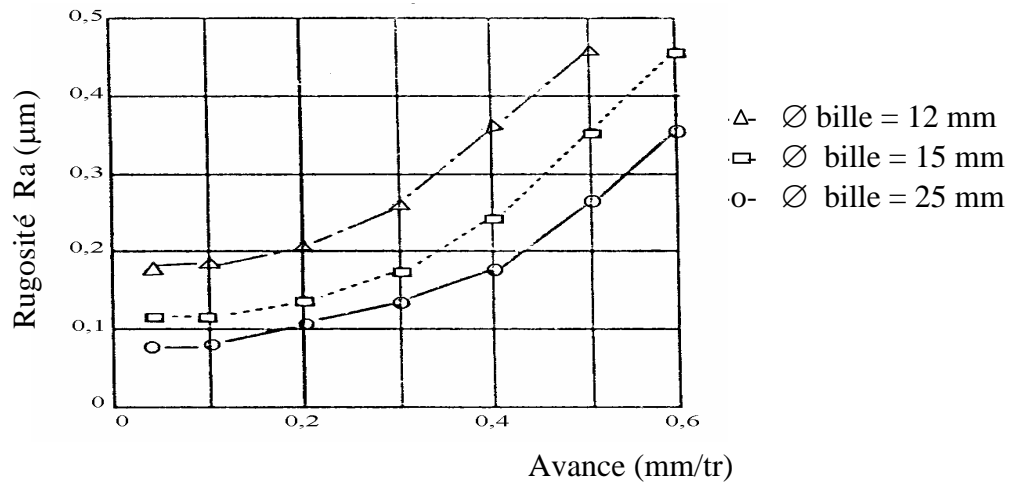
D'après D. Papshev et A1 [45], le brunissage au diamant comme le brunissage à la bille d'un acier traité R 18 ( Z75WKCVD 18-4-1-1 ) améliore l'état de surface. Avec une même rugosité initiale, la valeur de la rugosité obtenue par le brunissage à la bille est de l'ordre de  $Ra = 0.35 \mu\text{m}$ , soit le double de la valeur de la rugosité obtenue par le brunissage au diamant, dont la valeur de l'ordre de  $0.16 \mu\text{m}$  (**figure 2.7**). La valeur optimale de la force, pour le brunissage au diamant de ce type de matériau, est de l'ordre de 30 daN, alors que pour le brunissage à la bille cette force est nettement supérieure, elle est de l'ordre 150 daN.



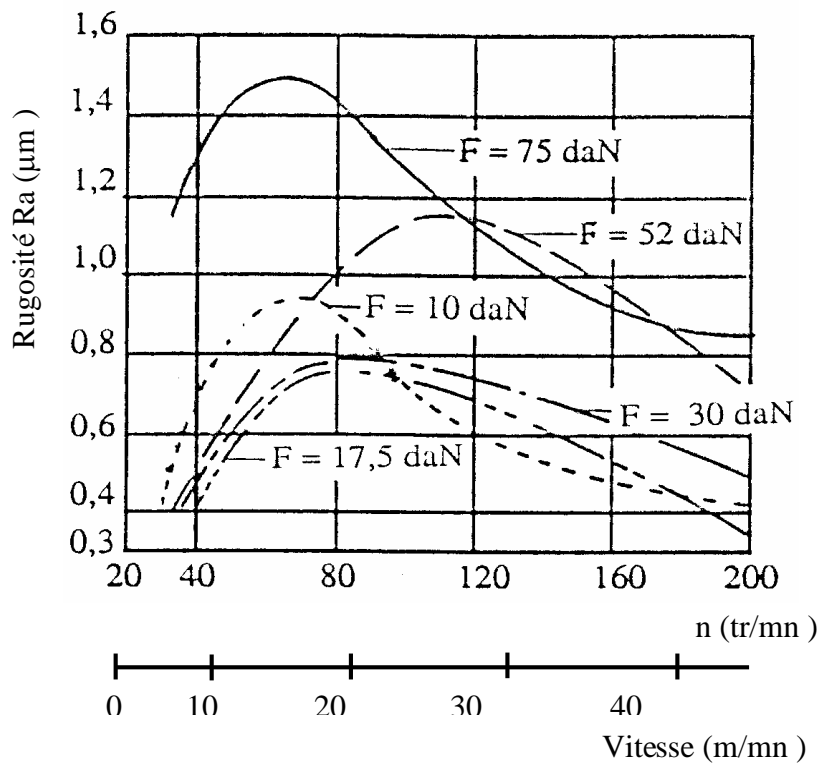
**Figure 2.7** Influence de l'effort de brunissage à la bille et de brunissage au diamant sur la rugosité pour un acier traité R 18 (rayon de l'outil 2 mm ) [45].

Le paramètre de rugosité a été aussi examiné dans les travaux [46], [37], [47]; Où il est montré que :

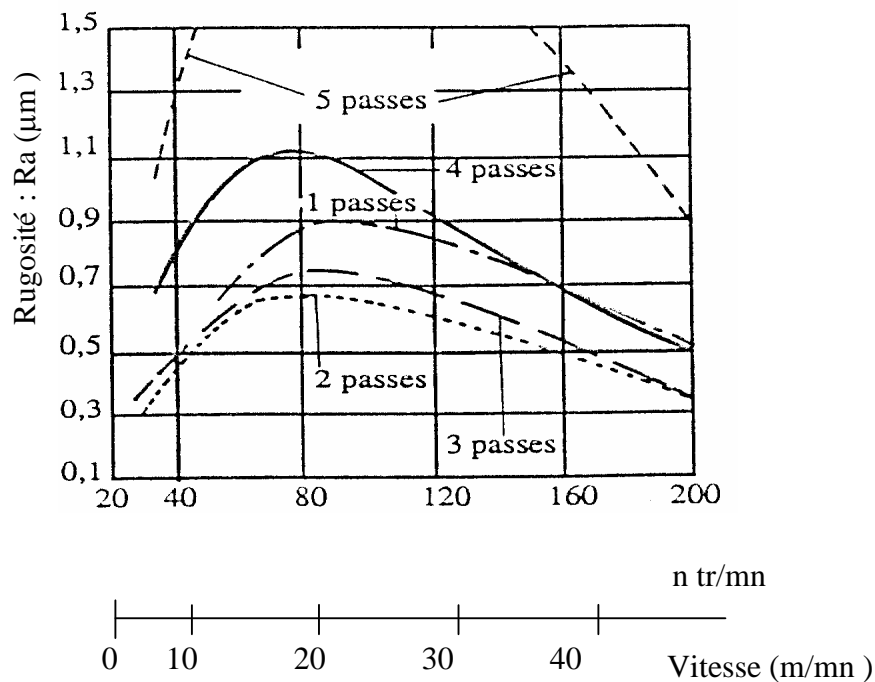
- Les avances trop importantes ne donnent pas un bon état de surface. En général, une avance modérée de l'ordre de  $0.1 \div 0.2 \text{ mm/tr}$  donne de meilleurs résultats. Le diamètre de la bille de 25 mm améliore l'état de surface des pièces traitées par ce procédé (**figure 2.8**).
- L'effort de brunissage influence aussi la rugosité obtenue (**figure 2.9**). La gamme des forces permettant de fournir un état de surface de qualité est de l'ordre de 17.5 à 30 daN , [46]
- Un nombre de 2 à 3 passes assure un meilleur profil de rugosité. En dehors de cet intervalle, l'état de surface se détériore davantage (**figure 2.10**).
- L'état de surface initial influe sur la rugosité obtenue par le traitement. Cet effet n'apparaît qu'à partir d'une rugosité initiale ( $Ra$ ) de  $3 \mu\text{m}$  [37], [36].



**Figure 2.8** Influence de l'avance sur la rugosité obtenue par brunissage à la bille Avec différents diamètres [37].



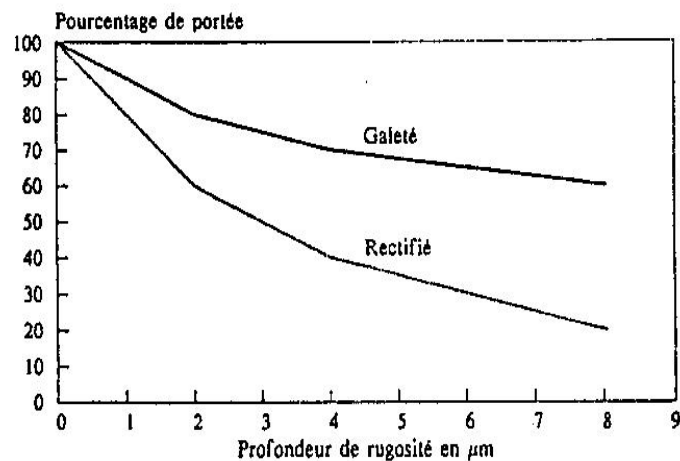
**Figure 2.9** Influence de l'effort de brunissage et la fréquence de rotation sur la rugosité « Ra » [46]



**Figure 2.10** Influence du nombre de passes et la fréquence de rotation sur la rugosité [46].

### 2.4.3 Portance relative

La portance relative (TP%) est un critère important, qui intervient dans l'étude de l'usure des surfaces pendant le service. Il englobe l'ensemble des critères définissant l'état de surface ( Ra, Rt, Rp ). M. Lemerrier [48] ainsi que D.D.Papchev [45] confirment une amélioration importante du pourcentage de portée. Le pourcentage de la capacité portante est plus important dans le cas d'une surface traitée par brunissage à la bille ou au galet que dans le cas d'une surface rectifiée, ce qui est montré dans la **figure 2.11**.

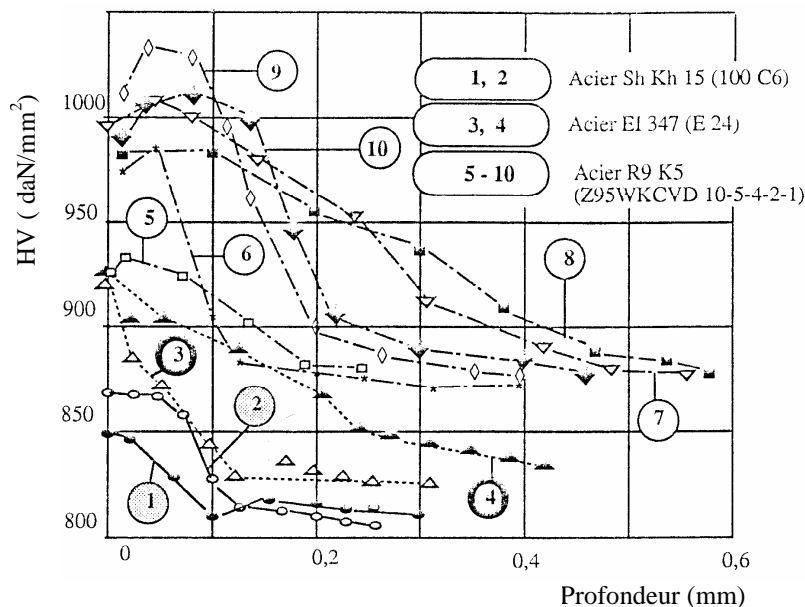


**Figure 2.11** Pourcentage de portance obtenue par galetage et rectification [48]

#### 2.4.4 Durcissement de la couche superficielle

Les résultats présentés par M.Lemercier [38], et les essais au CETIM [35] obtenus sur un acier à 0,45% de Carbone, mettent en évidence une augmentation de la dureté des couches déformées, de l'ordre de 35% en surface. Selon les travaux [49], cette amélioration, en dureté, est légèrement supérieure pour un matériau, dont la composition chimique est de 0,35-0,43% C, 1,15 % Cr et 1,08-1,42% Mn.

Conformément aux travaux de D.D Papshev [45] (figure 2.12) et N.G. Gerasimova [41], le brunissage au diamant provoque plus de durcissement de la couche superficielle. Ce résultat à été aussi confirmé par TORBILO V. M. [25], ODINTSOV L. G. [50], [22]. Ce phénomène est favorisé par l'intensité de déformation, la nature du diamant brunisseur ainsi que sa localisation au sein d'un volume réduit. [51].

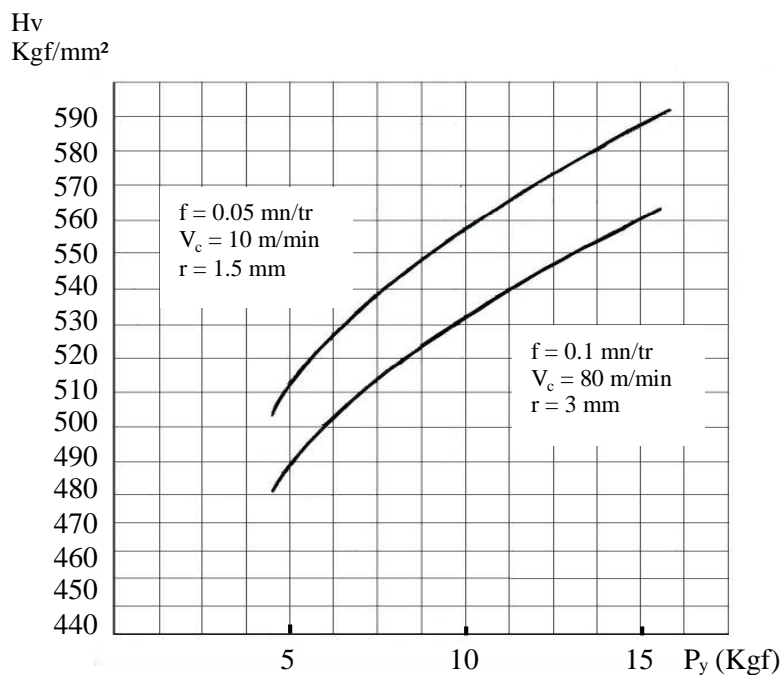


**Figure 2.12** Distribution de la dureté à travers les couches de matériaux [45]

- Brunissage à la bille (1) : F= 20 daN, (4) : 30 , (5) : 50 , (7) :150 , (8) : 200
- Brunissage au diamant avec r=2mm (2,6) : F= 5 daN, (3) : 10 , (9) : 20 , (10) : 30

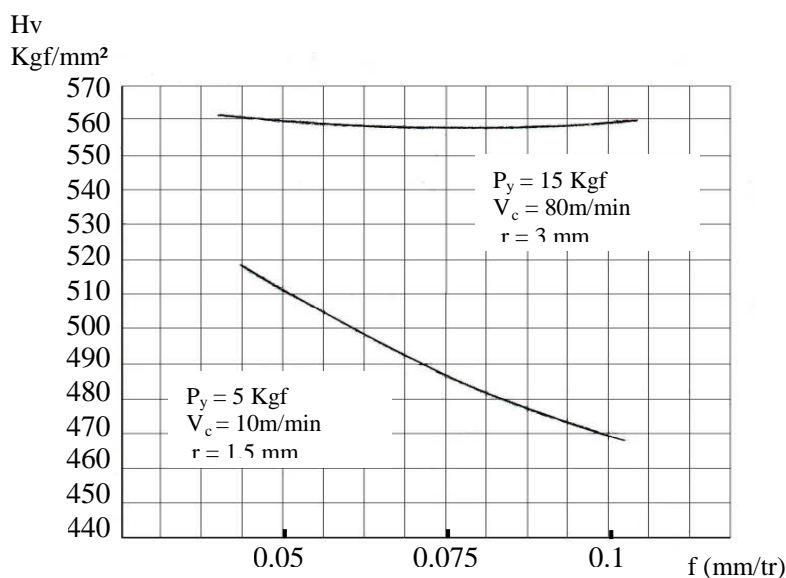
La profondeur de la couche durcie varie selon l'intensité du durcissement de la couche traitée des pièces. Elle peut atteindre plusieurs dizaines de mm. Elle est généralement plus importante dans le cas du brunissage au rouleau avec de grands efforts (galetage) [52].

Dans Leurs investigations sur plusieurs matériaux, M.H.El-Axir, M.M. El-Khabeery [34] ont montré que les paramètres de brunissage ont une influence significative sur la microdureté de la surface traitée. Les travaux [53], par brunissage au diamant sur l'acier CK60K+N (Cf figure 2.13), ont révélé que la dureté superficielle augmente avec la force de brunissage. Le durcissement est favorisé par le rayon de pointe le plus faible, qui en prenant contact avec une petite portion de surface assure une déformation plus importante.



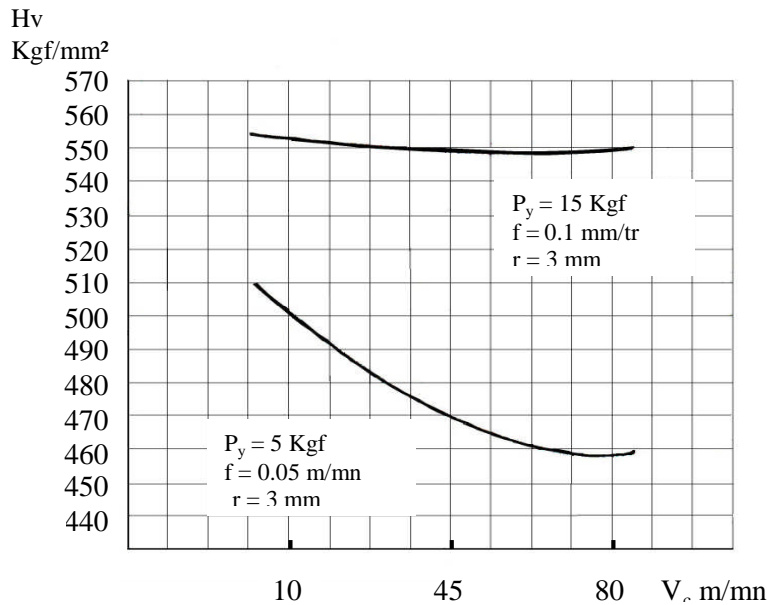
**Figure 2.13** Influence de la force de brunissage "Py" sur la dureté superficielle «Hv », acier CK60K+N [53]

Les mêmes essais ont par ailleurs montré que les vitesses d'avances élevées n'accordent pas l'amélioration de la dureté superficielle (**figure 2.14**).



**Figure 2.14** Influence de l'avance "f" sur la dureté superficielle «Hv » acier CK60K+N [53]

Il en est de même lorsque les vitesses de brunissage augmentent (**figure 2.15**), la vitesse de brunissage n'influe pas tellement sur le durcissement de la couche superficielle.



**Figure 2.15** Influence de la vitesse de coupe «  $V_c$  » Sur la dureté superficielle «  $H_v$  », acier CK60K+N [53]

### 2.4.5 Contraintes résiduelles

Tout procédé de fabrication et de mise en forme (forgeage, usinage, traitement thermique,...), introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles. Ces contraintes vont s'ajouter à la sollicitation de service en modifiant la répartition des contraintes, notamment dans les couches superficielles, où s'amorcent généralement les fissures de fatigue. La contrainte réelle (totale) à laquelle sera soumise la pièce sera caractérisée par le tenseur total :

$$\bar{\sigma}_T = \bar{\sigma}_S \pm \bar{\sigma}_R$$

avec

$\bar{\sigma}_T$ . Contrainte totale

$\bar{\sigma}_S$ . Contrainte de service

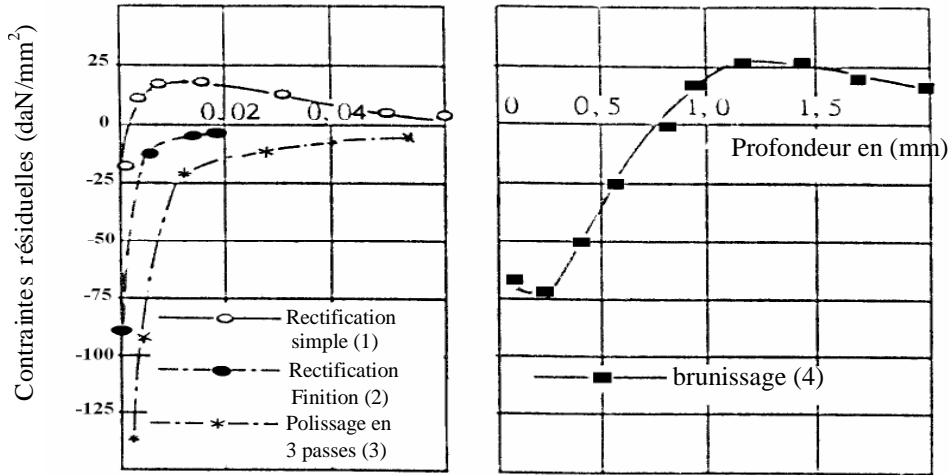
$\bar{\sigma}_R$ . Contrainte résiduelle induite par le procédé

Il a été montré dans plusieurs travaux [54, 55, 56] que les contraintes résiduelles de compression prennent naissance en surface suite à l'écrasement du métal. Ces contraintes s'opposent à la contrainte de service, le matériau sera alors déchargé du fait qu'il est soumis à une contrainte totale tel que :  $\bar{\sigma}_T = \bar{\sigma}_S - \bar{\sigma}_R < \bar{\sigma}_S$

Par conséquent l'état de compression des couches superficielles retarde l'initiation et/ou la propagation des fissures éventuelles [55]. Ainsi, on observe une augmentation de la résistance des pièces en service.

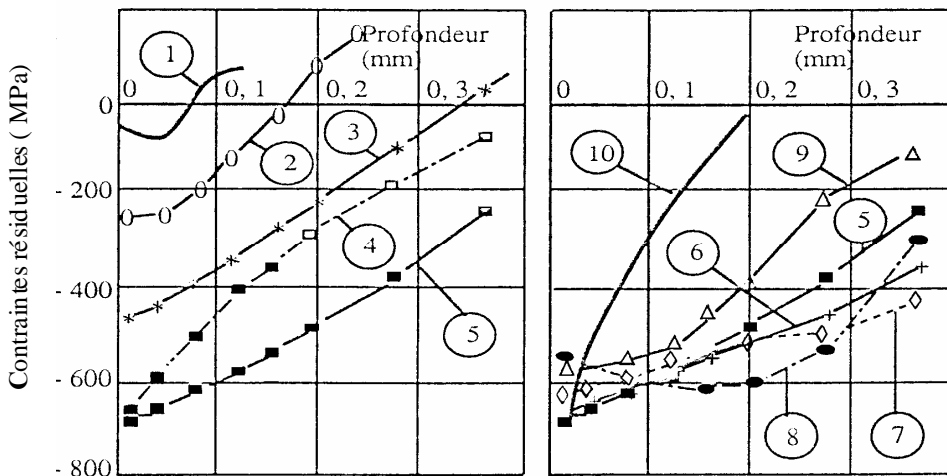
Dans les travaux [57], concernant l'influence de certains procédés d'usinage : La rectification d'ébauche (1), La rectification de finition (2), le polissage en 3 passes (3) et le brunissage (4), sur les contraintes résiduelles obtenues (Cf. **figure 2.16**). L'apparition des contraintes résiduelles de

compression est remarquée sur une faible profondeur pour les usinages (2) et (3) sur une couche qui ne dépasse pas 0,07 mm, alors que pour le cas du brunissage (4), les contraintes résiduelles de compression sont observées jusqu'à une profondeur d'environ 0.7 mm.



**Figure 2.16** Contraintes résiduelles obtenues sur pièces en (100 C6) trempées [57].

Généralement les contraintes résiduelles, obtenues par le brunissage, dépendent du matériau traité. Le maximum des contraintes résiduelles obtenu sur les pièces traitées en VT9 est en surface. Ce maximum est proportionnel à la force appliquée et au nombre de passes (Cf. **figure 2.17**) [35, 59]. La réduction du rayon de la bille favorise l'amélioration de ce paramètre.



**Figure 2.17** Contraintes résiduelles sur pièces en VT9 [41]

Polissage : (1) ; Grenailage : (10)

Brunissage : (2 à 5) ; F = 100, 200, 300 et 400 N

rayon de bille r = 2 mm , i = 1

(6, 7) : F=400 N , r = 2,5 et 3 mm , i = 1

(8) : F=400 N , r = 3 mm , i = 3 ;

(9) : F=300 N , r = 3 mm , i = 1

#### 2.4.6 Limite de fatigue

Les contraintes résiduelles ont une influence particulièrement favorable sur l'endurance du matériau, dans des zones menacées de symptômes de fatigue. Le procédé de brunissage est donc très utilisé, pour renforcer la résistance à la fatigue des pièces qui supportent, des concentrations de contraintes telles que les gorges de manetons de vilebrequin, roues dentées, filets de boulonnerie, arbre entaillé, etc... [58, 38, 59].

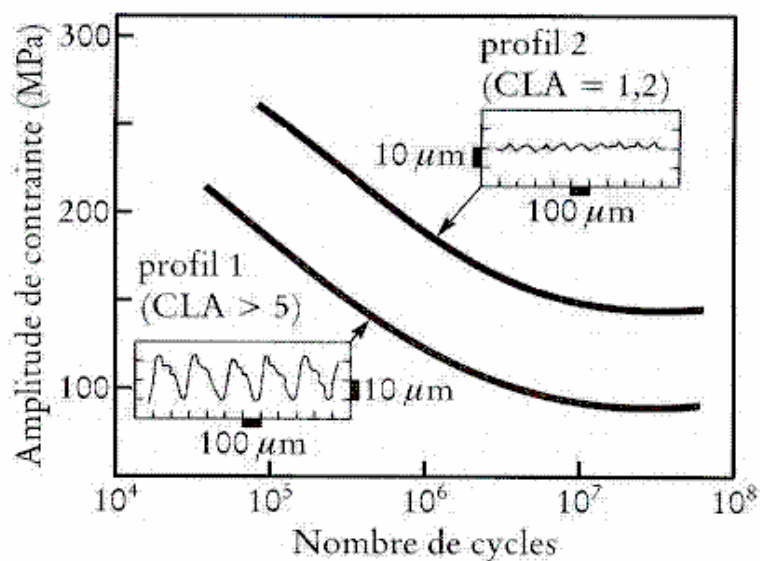
Il est montré que l'augmentation de l'effort de brunissage au rouleau entraîne une variation du maximum des contraintes résiduelles " $\sigma_R$ " de la traction à la compression [60]. La contrainte maximale " $\sigma_{Rmax}$ " pour un acier St37 a été localisée à une profondeur de 100 à 150  $\mu\text{m}$ . Ce résultat a été obtenu pour une vitesse de 380 tr/mn puisque les effets mécaniques, métallurgiques sont les meilleurs.

D'autres travaux [53] ont montré que les contraintes induites par le brunissage avec une bille en diamant appliquée sur de l'acier trempé sont qualitativement de compression à l'issue desquelles la limite d'endurance en flexion rotative s'est amélioré de plus de 20%.

Les travaux de J. Broichhausen et W. Calles [61] ont montré que la tenue à la fatigue des pièces est affectée par la naissance des fissures. Les zones où il y'a changement de sections dans lesquelles apparaissent les concentrations, telles que les gorges circulaires sur les pièces, sont améliorées par le traitement de galetage de renforcement [62] [56] au point de vue résistance sous les charges alternées.

Des essais en fatigue sur des gorges de vilebrequins de moteurs, montrent une amélioration très importante de la résistance à la fatigue. [59].

Un écrouissage superficiel et donc une augmentation de la dureté avec une rugosité particulière qui élimine ainsi les défauts de surface tels que les stries d'usinage ; ce qui contribue à l'amélioration de la limite de fatigue [63]. Puisque les fissures de fatigue s'amorcent à la surface du matériau, il en découle que l'état de cette surface exerce une influence importante sur la courbe d'endurance. La **figure 2.18**, illustre graphiquement l'influence de l'état de surface sur l'endurance d'un acier ; on remarque qu'un fini plus rugueux entraîne une diminution de la durée de vie de celui-ci dans le régime d'endurance limitée, ainsi qu'une baisse de sa limite d'endurance (les irrégularités de surface se comportent en effet ici comme des micro entailles favorisant un amorçage prématuré des fissures) [5].



**Figure 2.18** Influence du fini de surface sur l'endurance d'un acier au carbone

Il a été aussi montré que la présence des contraintes résiduelles de compression, à la suite du traitement, améliore également la résistance en fatigue corrosion comme indiqué dans le **tableau 2.1 [56]**. Trois éprouvettes ont été testées, dans l'eau douce et à l'air libre afin de déterminer leurs limites d'endurance, l'acier des éprouvettes a une limite d'élasticité de 410 MPa. Il apparaît que pour l'éprouvette lisse, le gain relatif à la limite de fatigue est de 50% dans l'eau douce, alors qu'il n'est que de 11.5 % à l'air ambiant. Le gain est moins important pour les autres éprouvettes en raison de leurs irrégularités géométriques, mais il est tout de même appréciable.

**Tableau2.1** Amélioration de la fatigue-corrosion par le procédé de galetage [56].

Eprouvette	Milieu	Limite de fatigue (Mpa)		Gains (%)
		Sans galetage	Avec galetage	
Lisse	Air	260	290	11.5
	Eau douce	100	150	50
Avec trou	Air	177	238	34.5
	Eau douce	132	158	20
Avec gorge	Air	180	280	55
	Eau douce	130	200	54

Cela est aussi affirmée par M.Lemercier [38] avec une amélioration de 300% de la résistance à la fatigue de vilebrequin en fonte sphéroïdale galetés, et aussi par les travaux [58] pour le traitement des pièces en alliage de titane (VT9), présenté dans le **tableau 2.2**.

**Tableau 2.2** Influence du type de traitement sur la limite à la fatigue des éprouvettes en alliage de titane (VT9) [58]

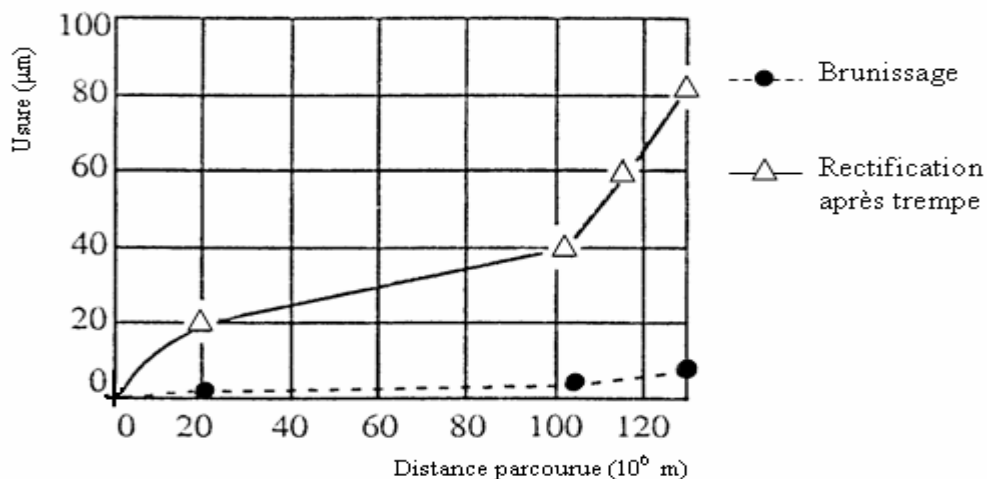
Type de traitement	Limite de fatigue (MPa)	Gain (%)
Polissage	440	100
Polissage + Entaille	330	75
Brunissage	500	114
Brunissage + Entaille	380	86
Entaille +* Brunissage	380	86
Grenaillage	484	110
Grenaillage + Entaille	380	86
Grenaillage + Entaille	400	90
Polissage + Entaille	270	61
Polissage + Entaille ( * )	300	69

Toutes les éprouvettes sont testées à 20°C, sauf (\*) à 400 °C.

#### 2.4.7 Résistance à l'usure

Pour rendre compte à l'usure, il est intéressant de connaître dans quelles proportions est rempli l'espace compris entre deux surfaces définies par les points supérieurs et inférieurs du profil de rugosité. La résistance à l'usure augmente avec le degré de remplissage des couches superficielles. Les travaux de A.M. et A.D. Suleiman [64], ont montré que les pièces traitées par brunissage acquièrent une forte amélioration de leur tenue à l'usure.

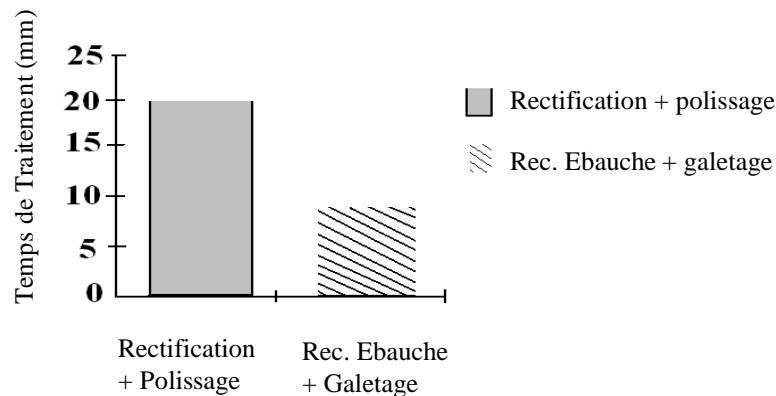
Généralement elle est de 47 % à 26 % pour le brunissage à la bille et au diamant comparativement aux pièces rectifiées. Les surfaces Traitées se comportent d'un point de vue fonctionnel et usure comme des machines déjà rodées (Cf. **figure 2.19**) [38].



**Figure 2.19** Effet du brunissage sur la tenue d'un axe de boîte de vitesse, matériau CC45 [38]

## 2.5 Temps de traitement

La facilité d'emploi du procédé permet d'assurer la réalisation des surfaces dans des délais plus courts que les procédés d'usinage classiques comme la rectification, le polissage, le honing, ...etc, ce qui est montré dans la **figure 2.20 [48]**. Ce procédé peut être aussi employé sur les machines outils ordinaires tel que le tour universel, ce qui rend possible l'association d'un outil de coupe par enlèvement de matière à l'outil de brunissage sur la même machine et pour la même opération. Ceci permet d'éviter les erreurs de reprise des pièces, de réduire les temps morts (montage et démontage de la pièce) et d'assurer le galetage des surfaces en phase avec l'usinage d'ébauche sans provoquer les erreurs de positionnement qui peuvent compromettre les résultats du traitement.



**Figure 2.20** Comparaison du temps après galetage et polissage

## 2.6 Conclusion

A la suite de cette analyse bibliographique sur le procédé du traitement mécanique des surfaces par déformation plastique superficielle et en l'occurrence le brunissage, nous avons observé un changement des qualités mécaniques et géométrique : amélioration de la qualité de la surface, écrouissage du matériau et introduction des contraintes résiduelles.

- La qualité de la surface peut être corrigée par ce procédé. En effet, La rugosité, la qualité dimensionnelle, le pourcentage de portance sont nettement améliorés, relativement à d'autres procédés d'usinage classique. Néanmoins, la qualité micro géométrique de la couche superficielle dépend du procédé d'usinage antérieur (procédé d'ébauche).

- Le brunissage réalise un écrouissage de la couche superficielle de la pièce et diminue d'une manière très remarquable sa rugosité. L'écrouissage de la couche superficielle est proportionnel à la

force de pression appliquée. Le brunissage au diamant provoque un maximum de dureté pour une force normale plus faible que celle du brunissage à la bille. Cette dureté se manifeste au niveau de la couche superficielle (0.1mm) pour le brunissage au diamant, alors que pour le brunissage à la bille elle s'étend à une profondeur plus importante.

- La contrainte résiduelle produite se situe à quelque dixième de millimètre sous la surface. La création d'une telle contrainte résiduelle s'explique par la déformation produite en surface, les couches internes du matériau qui ne sont pas déformées empêchent l'allongement de la couche la plus déformée et mettent celle-ci en compression. Le maximum de contraintes résiduelles est proportionnel à l'effort de pression. Le brunissage donne un maximum de contrainte résiduelle de compression sur une profondeur de 0.1mm. L'introduction des contraintes résiduelles de compression permet de placer les couches superficielles des pièces dans des conditions de travail les plus favorables, ce qui améliore leur tenue en fatigue.

- La résistance à l'usure des pièces par frottement pendant le fonctionnement est améliorée grâce à l'amélioration de la portance relative. L'augmentation de la surface portante permet de diminuer le jeu dans les éléments de machines, particulièrement durant la période de rodage et de favoriser l'optimisation de la durée de vie des pièces dans les mécanismes pendant le service ; ce qui aide à la résolution des problèmes d'étanchéité.

- Le temps de traitement par ce procédé est relativement plus court comparativement aux autres usinages classiques de finition.

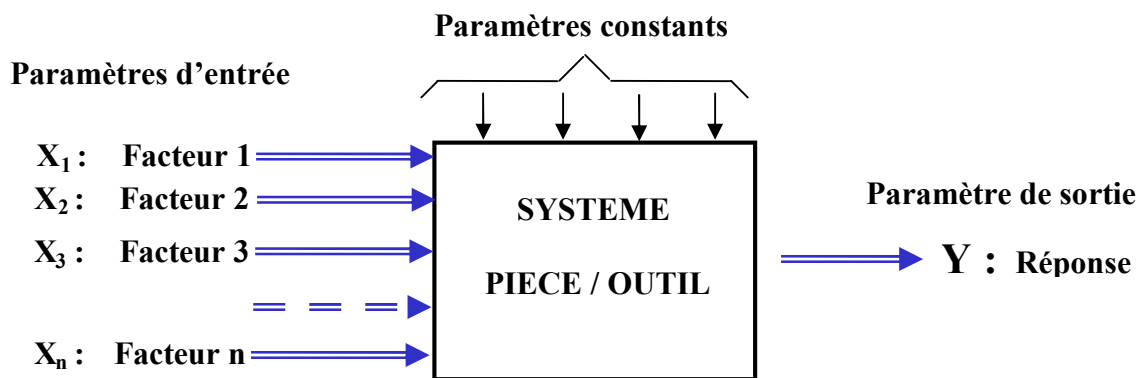
Enfin, les qualités physiques et géométriques (réponses désirées) sont obtenues en fonction des conditions de l'opération, du matériau traité ainsi que des paramètres de traitement. L'obtention du maximum d'effet est conditionnée par l'optimisation de ces paramètres (effort de pression appliqué, rayon d'outil, vitesse d'avance, nombre de passes). Nous retenons le procédé de brunissage au diamant au vue des avantages qu'il présente, pour lequel nous tentons de rechercher les paramètres de régime donnant les meilleures réponses : Rugosité "Ra", et dureté superficielle "Hv". Ceci représente notre préoccupation que l'on se propose de développer dans cette thèse.

# Chapitre 3

## PLANS D'EXPERIENCES ET MODELISATION

### 3.1 Introduction

La conduite d'une expérimentation obéit à une démarche précise. Cette démarche est facilitée par l'application de la méthode des plans d'expériences. Les plans d'expériences servent à optimiser l'organisation des essais. Cette organisation permet d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences, ce qui aide à gagner du temps et à économiser la matière première. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. Cette méthode des plans d'expériences est basée sur des règles mathématiques strictes et elle exige une démarche rigoureuse. Les plans d'expériences présentent beaucoup d'avantages comme la possibilité d'utiliser un grand nombre de facteurs, évaluer des représentations graphiques des réponses obtenues à la sortie en fonction des paramètres d'entrée **figure3.1** et d'utiliser un modèle mathématique répondant aux objectifs à atteindre suivant le besoin. [65], [66], [67]



**Figure3.1** Schéma de l'expérimentation

Cette science de l'organisation des essais et de la modélisation des résultats expérimentaux nécessite une terminologie adaptée.

### 3.2 Terminologie [68]

#### a) Réponse

Les grandeurs qui sont mesurés à chaque expérience sont appelées réponses.

Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir là où les bonnes réponses.

#### b) Surface de réponse

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne, a priori, une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique a priori ou le modèle postulé. La forme la plus générale de ce modèle est:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_k) \dots\dots\dots (3.1)$$

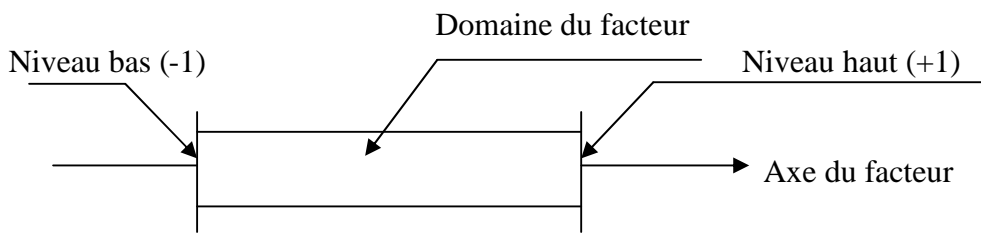
Où

**Y** est la grandeur de la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation :

Les **X<sub>i</sub>** représentent les niveaux des différents facteurs.

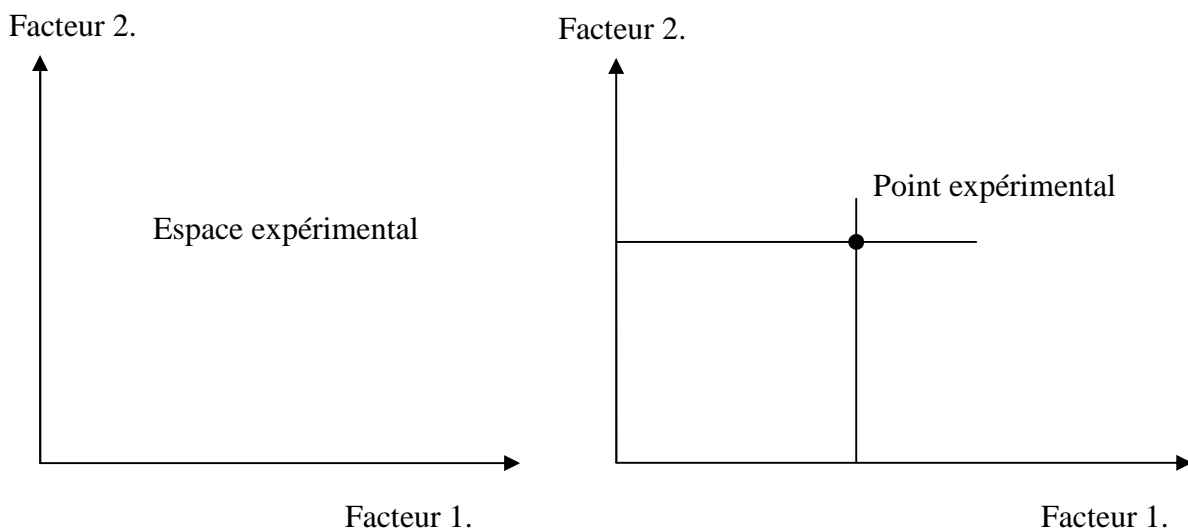
**c) Facteur**

Les variables que l'on désire étudier sont appelés facteurs. En général un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans d'expériences, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note le plus souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que l'on note le plus souvent par +1). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, constitue le domaine du facteur (Cf. **figure 3.2**). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.



**Figure 3.2** le niveau bas du facteur est noté par -1, et le niveau haut par +1, le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre -1 et +1 [68].

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues ou discontinues [69]. Un facteur est représenté par un axe orienté (Cf. **figure 3.3**). Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle.

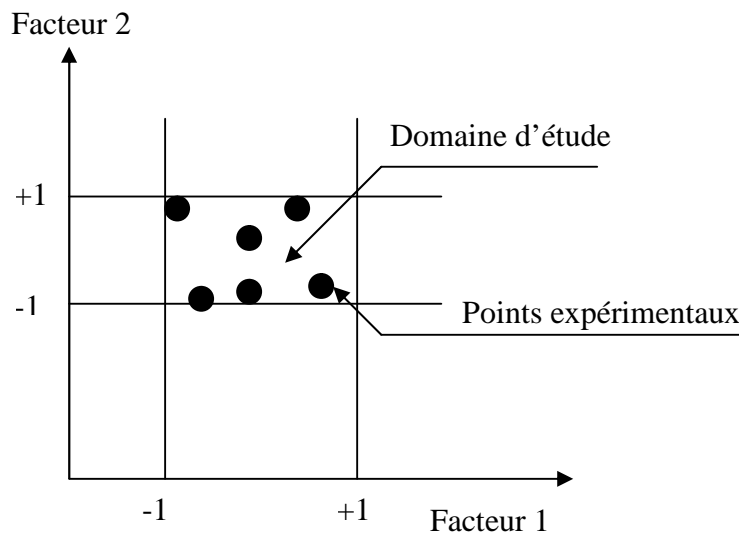


Chaque facteur est représenté par un axe

Les niveaux des facteurs définissent les points expérimentaux.

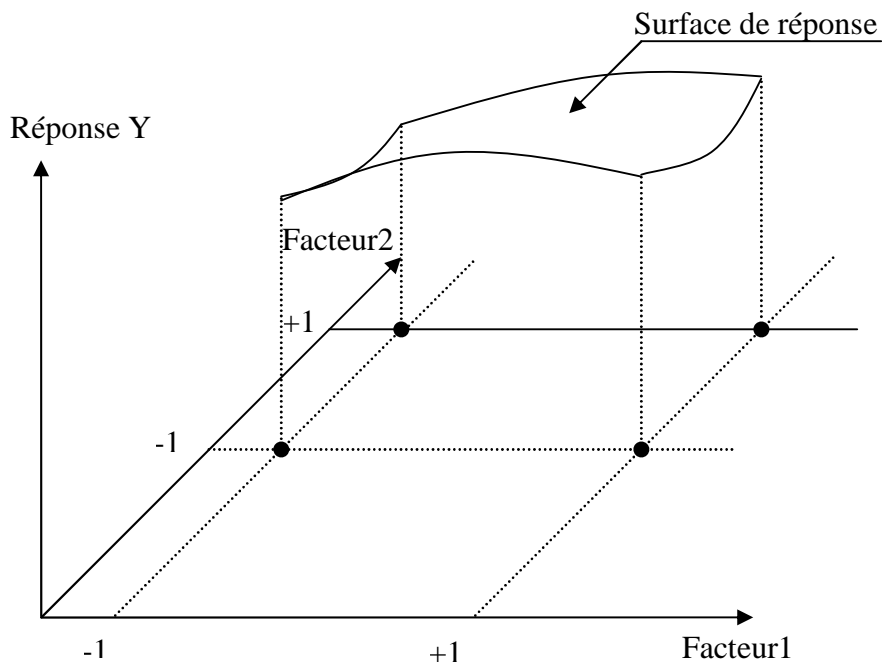
**Figure 3.3** Espace expérimental

L'ensemble de plusieurs points expérimentaux constitue un plan d'expérience. La réunion des domaines de variation de chaque facteur définit le domaine d'étude (Cf. **figure 3.4**).



**Figure3.4** Domaine d'étude

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 définissent la surface de réponse. La représentation géométrique des résultats d'un plan de deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une dimension pour la réponse, deux pour les facteurs (Cf. **figure3. 5**) [70].



**Figure3.5** Domaine d'étude et surface de réponse d'un plan d'expérience à deux facteurs.

#### d) Coordonnées centrées réduites

L'étude à l'aide des plans d'expérience est réalisée au moyen de nouvelles variables. Il est donc nécessaire de procéder à un changement de variables. Lorsqu'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur +1 au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- On change l'unité de mesure
- On déplace l'origine de mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables appelées variables centrées réduites ;

- Centrées pour indiquer le changement d'origine,
- Réduites pour signaler la nouvelle unité.

Le passage des variables d'origine « A » aux variables centrées réduites « X », est donné par la formule suivante ( $A_0$  est la valeur centrale de l'intervalle [-1 ; +1], exprimé en unité courante) ;

$$X = A - A_0 / \text{Pas} \dots \dots \dots (3.2)$$

La formule (3.2) permet également de passer des variables centrées réduites aux variables d'origines.

L'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quel que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs et leurs unités. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité. [71]

#### e) Matrice d'expériences

La matrice d'expérience (**tableau 3.1**) définit les essais à réaliser. Le terme essai est l'équivalent de points d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expériences.

**Tableau 3.1** Matrice d'expérience

N° essai	Facteur 1	Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1
3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1

### 3.3 Les différents types de plans d'expériences [68, 72]

Les plans d'expériences peuvent être classés en catégories. Ces dernières correspondent aux usages les plus fréquents des plans d'expériences.

### **3.3.1 Plans de criblage [68]**

Ces plans permettent de découvrir les facteurs les plus influents sur une réponse donnée. On ne cherche pas vraiment à obtenir une relation précise entre les variations des facteurs et celles de la réponse.

#### **-Plan "un facteur à la fois"**

Ce type de plan peut se révéler très utile lorsqu'il y'a beaucoup de facteurs et que le phénomène est compliqué. On n'obtient aucune interaction, seuls les effets principaux sont connus.

#### **-Plans factoriels fractionnaires**

Ce type de plan permet d'étudier beaucoup de facteurs et, si l'on sait bien les interpréter on peut détecter les interactions entre les facteurs. Ces plans portent par fois des noms différents, plan de Plakett et Burman, table de Taguchi, plans de pesées, etc. Ils sont parmi les plans les plus utilisés. [73]

#### **-Plans sursaturés**

Ce sont des plans qui prennent en compte un grand nombre de facteurs et qui ne demandent que quelques essais. Par exemple, on peut étudier 66 facteurs en 12 essais. Il faut penser à ces plans s'il y a beaucoup de facteurs et que peu d'entre eux sont influents. L'interprétation de tels plans n'est pas aisée.

#### **-Plans factoriels complets**

Les plans complets sont gourmands en essais dès que l'on dépasse trois facteurs. Ils peuvent servir à faire du criblage mais aussi à faire de la modélisation. On les utilise surtout pour 2, 3, 4 facteurs.

### **3.3.2 Plans de modélisation [68]**

#### **-Plans factoriels complets**

Ces plans peuvent être utilisés pour la modélisation, mais comme il n'y a que deux niveaux par facteurs, on ne peut qu'employer des modèles du premier degré avec interaction. L'intérêt de ces plans est de faciliter le développement séquentiel d'une étude. On commence par le plan factoriel et on poursuit l'expérimentation par un plan en étoile. On aboutit ainsi à un plan composite qui est interprétable à l'aide du modèle du second degré. Le plan en étoile n'est réalisé que si cela est nécessaire. Dans ce cas l'expérimentateur peut éviter de réaliser des essais si le modèle du premier degré est suffisant.

#### **-Plans non conventionnels [74]**

Le plan non conventionnel représente tout plan qui s'écarte des plans classiques pour une raison ou une autre. Par exemple, un plan factoriel classique a ses points expérimentaux aux sommets du domaine d'étude. Il se peut qu'au cours de l'expérimentation les niveaux prévus n'ont pas été respectés et que les points d'expériences soient décalés par rapport aux sommets. Le plan réalisé est alors un plan non conventionnel. Un autre cas de plan non conventionnel concerne le nombre de

points d'expériences. Un plan classique possède un nombre précis d'essais à réaliser. Pour certaines raisons, il se peut qu'il y ait soit plus, soit moins d'essais effectivement réalisés. L'ensemble des essais réels est alors un plan non conventionnel. Il y'a donc plan non conventionnel dès que le nombre des points expérimentaux ou que leur emplacements ne sont plus conformes au plan classique.

A la limite une expérimentation conduite sans précaution et pour laquelle les points d'expérience sont situés n'importe où dans le domaine expérimental pourrait être considéré comme un plan non conventionnel.

### **-Plans D-optimaux**

Ces plans sont fort utiles car ils permettent de tenir compte de nombreuses contraintes. Ils assurent malgré tout une bonne précision sur les coefficients du modèle prédictif. Ces derniers types de plan donnent accès à des modèles mathématiques du second degré. On les regroupe sous la dénomination de plan pour surface de réponses. Il possède des avantages et des inconvénients qu'il faut les connaître pour choisir la stratégie qui s'adapte le mieux aux problèmes posés.

### **-Plan de Box-Behnken**

Ces plans permettent de modéliser les réponses avec un modèle du second degré tout en respectant certains critères d'optimalité. C'est le plan qui nous paraît le plus adapté pour l'expérimentation qui sera développée dans les paragraphes suivants.

### **- Plans de mélanges**

Les plans de mélange sont des plans particuliers adaptés aux facteurs dépendants. Ils sont surtout utilisés pour étudier l'influence des proportions des constitutions des produits sur une réponse donnée. Les pourcentages des constituants sont les facteurs que l'on prend en compte. Or, le pourcentage de tous les constituants est de 100 %. Si l'on modifie la proportion d'un constituant, il faut modifier au moins le pourcentage d'un autre constituant. Cette contrainte a des conséquences importantes sur les représentations géométriques et matricielles de ces plans. Elle a également des répercussions sur la modélisation des résultats. La méthode des plans d'expériences s'applique encore dans ce cas, mais la recherche des meilleurs emplacements des points expérimentaux entraîne des développements théoriques particuliers [68].

## **3.4 Plans retenus pour la présente étude**

Notre choix s'est porté sur les plans de modélisation du second degré, mais là aussi il fallait répondre à la question suivante : Quel plan va-t-on retenir ?

Comme les plans d'expériences sont basés essentiellement sur les essais, alors il restait à trouver un plan qui devait satisfaire les conditions et les critères suivants :

Sachant qu'on réalise les essais sur une machine où on est contraint d'adapter l'expérience sur sa chaîne cinématique, vu qu'elle ne nous permet pas une continuité dans les paramètres de régime (telles que les vitesses d'avance), par ailleurs les paramètres d'entrée se présentent de manière discontinus (rayon d'outil, nombre de passes) donc le plan qu'il fallait retenir ne devait pas contenir un grand nombre de niveaux et enfin Pour des raisons pratiques, il fallait que le plan retenu ne comprenne pas un grand nombre d'essais.

En tenant compte de ces exigences et des propriétés de chaque plan cité précédemment, on découvre d'après [68, 75, 72], que le meilleur plan et qui sera retenu tout au long de cette étude et le plan **de Box Behnken**.

### **3.5 Plans de Box Behnken [68]**

#### **3.5.1. Introduction**

Box et Behnken ont proposé en 1960 ces plans qui permettent d'établir des modèles du second degré. En effet, tous les facteurs ont trois niveaux : -1 ; 0 ; +1. Ces plans sont faciles à mettre en œuvre et possèdent la propriété de séquentialité. On peut entreprendre l'étude des "k" premiers facteurs en se réservant la possibilité d'en ajouter sans perdre les résultats des essais déjà effectués.

#### **3.5.2 Construction des plans de Box Behnken**

Le plan de Box Behnken pour trois facteurs est construit sur un cube, les suivants, qui prennent en compte plus de trois facteurs, sont construits sur des hyper cubes à 4 et 5 dimensions. Lorsque les dimensions dépassent trois, nous parlerons de n cube, n étant le nombre de dimensions. Par exemple l'hyper cube à 4 dimensions sera un 4-cube et l'hyper cube à cinq dimensions sera un 5-cube. On place les points expérimentaux non pas aux sommets du cube de l'hyper cube mais aux milieux des arêtes, au centre des faces (carrées) ou au centre des cubes. Cette disposition a pour conséquence de placer tous les points expérimentaux à égale distance du centre du domaine d'étude, donc sur une sphère dans un espace à trois dimensions et sur une hyper sphère lorsqu'il y en a plus de trois. On ajoute des points au centre du domaine d'étude pour réduire l'erreur de prévision en ce point [76].

#### **3.5.3. Nombre d'éléments géométriques des cubes et des hyper cubes**

Le cube possède :

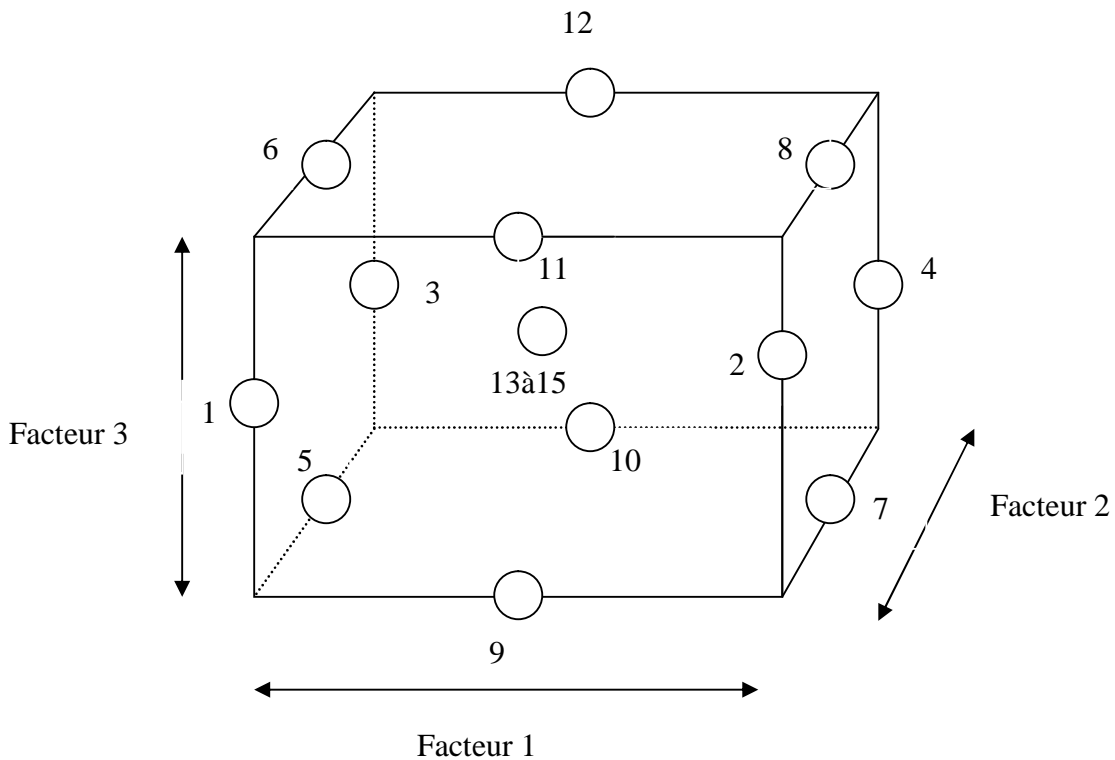
- 8sommets (dimension zéro)
- 12 arêtes qui sont des segments (dimension un)
- 6 faces qui sont des carrés (dimension deux)
- 1 cube qui est le cube lui-même (dimension trois).

Tous comme le cube, le hyper cube possède des éléments géométriques qui vont de zéro à n dimension.

### 3.5.4 Plan de Box Behnken pour trois facteurs

C'est le premier plan de Box Behnken. Les points expérimentaux de ce plan sont situés aux milieux des arêtes du cube (Cf. **figure 3.6**). Le cube possède 12 arêtes. On a l'habitude d'ajouter les points d'expérience au centre du domaine d'étude, en général trois. Le plan de Box Behnken pour trois facteurs a donc :

12+3essais, soit 15 essais, c'est le plan classique indiqué par Box et Behnken.



**Figure 3.6** Illustration du plan de Box Behnken pour trois facteurs [68]

Les points situés au centre d'une arête ont pour coordonnées ; 0 ;  $\pm 1$  ;  $\pm 1$ . La construction du plan suit le principe suivant : deux facteurs décrivent un carré (4essais d'un plan  $2^2$ ) et les coordonnées correspondantes du troisième facteur valent zéro (**tableau 3.2**).

**Tableau 3.2** tableau de Box Behnken pour trois facteurs [68].

Essai №	Facteur № 1	Facteur № 2	Facteur № 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

### -Propriétés du plan de Box Behnken pour trois facteurs

Avant de réaliser les essais, il est possible de connaître un certain nombre de propriétés du plan d'expérience :

- l'erreur sur les coefficients du modèle à une constante près ;
- l'erreur sur les réponses prédites ;
- la fonction de variance indiquant la répartition de l'erreur de prédiction dans le domaine d'étude.

Les propriétés qui vont être établies ne sont valables que pour le modèle mathématique postulé choisi au paragraphe suivant. Si, pour certaines raisons, on est amené à changer le modèle, on doit établir les nouvelles propriétés de ce plan.

#### 3.5.4.1 Modèle mathématique postulé [68]

Le modèle mathématique postulé, que l'on utilise, en générale, avec le plan de Box Behnken est un modèle du second degré avec les interactions d'ordre deux :

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{23} X_2 X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2 + e$$

où

**e:** erreur de prédiction

Ce modèle comporte 10 coefficients. Il faut donc au minimum 10 équations pour les estimer. Le plan classique de Box-Behnken pour trois facteurs comporte 15 points expérimentaux donnant chacun une équation.

### 3.5.4.2 Matrice de calcul

La matrice de calcul  $X$  est une matrice (15,10) puisqu'il y a 15 expériences et 10 coefficients. Cette matrice est construite à partir du plan d'expérience (**tableau 3.2**) et du modèle postulé.

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & +1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & +1 & +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 \\ +1 & -1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & +1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & +1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & +1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & -1 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & +1 & +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Au moyen de cette matrice, il est possible de calculer les coefficients «  $\hat{a}$  » en utilisant la formule suivante :

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

où

$y$ - grandeur de réponses mesurées lors de l'expérimentation

### 3.5.4.3 Matrice d'information

La matrice d'information ( $X^t X$ ) est obtenue à partir de la matrice de calcul. C'est une matrice (10.10)

$$X^t X = \begin{bmatrix} 15 & & & & & & & & 8 & 8 & 8 \\ & 8 & & & & & & & & & \\ & & 8 & & & & & & & & \\ & & & 8 & & & & & & & \\ & & & & 4 & & & & & & \\ & & & & & 4 & & & & & \\ & & & & & & 4 & & & & \\ 8 & & & & & & & 8 & 4 & 4 & \\ 8 & & & & & & & 4 & 8 & 4 & \\ 8 & & & & & & & 4 & 4 & 8 & \end{bmatrix}$$

Tous les éléments qui ne sont pas écrits dans cette matrice sont des zéros.

#### 3.5.4.4 Matrice de dispersion :

La matrice de dispersion est l'inverse de la matrice d'information. C'est également une matrice (10.10).

$$(X^t X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.333 & & & & & & -0.167 & -0.167 & -0.167 \\ & 0.125 & & & & & & & \\ & & 0.125 & & & & & & \\ & & & 0.125 & & & & & \\ & & & & 0.250 & & & & \\ & & & & & 0.250 & & & \\ & & & & & & 0.250 & & \\ -0.167 & & & & & & & 0.271 & 0.021 & 0.021 \\ -0.167 & & & & & & & 0.021 & 0.271 & 0.021 \\ -0.167 & & & & & & & 0.021 & 0.021 & 0.271 \end{bmatrix}$$

#### 3.5.4.5 Ecart-type des coefficients du modèle prédictif

La variance de chacun des coefficients du modèle postulé est donnée par la formule :

$$\text{Diag } V(\hat{a}) = \sigma_r^2 \text{Diag } (X^t X)^{-1}$$

Nous possédons déjà des éléments diagonaux de la matrice de dispersion. Nous devons les identifier aux éléments diagonaux de la matrice des variances des coefficients. En prenant les racines carrées de ces relations on obtient les écarts-types des coefficients :

$$\begin{aligned} \sigma(\hat{a}_0) &= 0,577 \sigma_r & \sigma(\hat{a}_{13}) &= 0,50 \sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_1) &= 0,354 \sigma_r & \sigma(\hat{a}_{23}) &= 0,50 \sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_2) &= 0,354 \sigma_r & \sigma(\hat{a}_{11}) &= 0,52 \sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_3) &= 0,354 \sigma_r & \sigma(\hat{a}_{22}) &= 0,52 \sigma_r \\ \sigma(\hat{a}_{12}) &= 0,50 \sigma_r & \sigma(\hat{a}_{33}) &= 0,52 \sigma_r \end{aligned}$$

On remarque que les rapports des écarts-types des coefficients à l'écart-type des résidus sont tous inférieurs à l'unité. Si les tests statistiques montrent que le modèle est bien ajusté, on peut dire alors que les écarts-types des coefficients sont inférieurs à l'écart-type de l'erreur expérimentale.

#### 3.5.4.6 Erreur de prédiction [68]

L'erreur de prédiction « e » est estimée par l'expression  $V(\hat{y}_p) = \sigma_r^2 x_p^t (X^t X)^{-1} x_p$

où

- $x_p^t (X^t X)^{-1} x_p$  est la fonction de variance de prédiction au point « p »

-  $\sigma_r^2$  est la variance des résidus ( $\sigma_r^2 = V(\text{résidus})$ ).

$$- V(\text{résidus}) = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{ddl}$$

$y_i$ : sont les réponses mesurées

$\hat{y}_i$ : sont les réponses prédites

ddl : degré de liberté

La somme des carrés des résidus est obtenue avec 15 réponses mesurées et 15 réponses prédites. Les réponses mesurées sont indépendantes, les réponses prédites dépendent de 10 coefficients calculés avec les réponses mesurées. Il y a donc  $15-10=5$  ddl.

La fonction de variance de prédiction au point « p » est donnée par la formule

$$d^2(\hat{y}_p) = x_p^t (X^t X)^{-1} x_p$$

Dans laquelle nous connaissons  $(X^t X)^{-1}$  est le vecteur modélisé du point p,  $x_p$  est la matrice vecteur du point expérimental « p ».

$$x_p^t = [1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_1 x_2 \quad x_1 x_3 \quad x_2 x_3 \quad x_1^2 \quad x_2^2 \quad x_3^2]$$

On en déduit la fonction de variance des réponses prédites dans tout le domaine d'étude

$$d^2(\hat{y}_p) = 0.333 - 0.208(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) + 0.292(x_1^2 x_2^2 + x_1^2 x_3^2 + x_2^2 + x_3^2) + 0.271(x_1^4 + x_2^4 + x_3^4)$$

Cette relation permet de calculer la fonction de variance de prédiction dans le domaine d'étude à trois dimensions. L'erreur de prédiction en un point donné est donc exprimée par :

$$e = (d^2(\hat{y}_p) \cdot \sigma_r^2)^{1/2}$$

L'erreur de prédiction dépend des trois variables  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$ . Dans le domaine d'étude, on peut faire des coupes dans ce volume à trois dimensions. Par exemple, pour les plans centraux,  $X_1 = 0$  ou  $X_2 = 0$  ou  $X_3 = 0$ , on aura la même fonction de variance puisque la relation est symétrique par rapport aux trois facteurs. Calculons cette fonction pour  $X_3 = 0$

$$d^2(\hat{y}_p) = 0.333 - 0.208(x_1^2 + x_2^2) + 0.292(x_1^2 x_2^2) + 0.271(x_1^4 + x_2^4)$$

La fonction d'erreur de prédiction correspondante est :

$$d(\hat{y}_p)=[0.333 - 0.208 (x_1^2 + x_2^2) + 0.292 (x_1^2 x_2^2) + 0.271 (x_1^4 + x_2^4)]^{1/2}$$

### 3.5.5 Plan de Box Behnken pour quatre facteurs

#### 3.5.5.1 Séquentialité des plans de Box-Behnken

Si l'on a quatre à étudier, on peut commencer par trois facteurs par le plan de **Box-Behnken** à trois facteurs [68]. Ces trois facteurs seront étudiés en 15 essais. Il faut simplement avoir la précaution de fixer les facteurs 4 zéro pendant ces quinze premiers essais. Si l'on veut ensuite étudier le facteur 4, il faut réaliser 12 essais au centre.

Les essais supplémentaires sont les essais 13 à 24 des **tableaux 3.3 et 3.4**.

**Tableau 3.3** Plan détaillé de **Box-Behnken** pour quatre facteurs

Essai n°	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
1	-1	-1	0	0
2	+1	-1	0	0
3	-1	+1	0	0
4	+1	+1	0	0
5	0	-1	-1	0
6	0	+1	-1	0
7	0	-1	+1	0
8	0	+1	+1	0
9	-1	0	-1	0
10	+1	0	-1	0
11	-1	0	+1	0
12	+1	0	+1	0
13	-1	0	0	-1
14	+1	0	0	-1
15	-1	0	0	+1
16	+1	0	0	+1
17	0	-1	0	-1
18	0	+1	0	-1
19	0	-1	0	+1
20	0	+1	0	+1
21	0	0	-1	-1
22	0	0	+1	-1
23	0	0	-1	+1
24	0	0	+1	+1
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0

**Tableau 3.4** Plan de Box-Behnken condensé pour quatre facteurs

Essai N°	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
1 à 4	±1	±1	0	0
5 à 8	0	±1	±1	0
9 à 12	±1	0	±1	0
13 à 16	±1	0	0	±1
17 à 20	0	±1	0	±1
21 à 24	0	0	±1	±1
25 à 27	0	0	0	0

### 3.5.5.2 Construction du plan

Le plan classique de Box Behnken pour quatre facteurs comporte donc 24+3 essais, soit 27 essais [68]. Les points expérimentaux sont situés au centre des 24 faces carrées et ont pour coordonnées 0 ; ±1 ; ±1. La construction du plan est la suivante deux facteurs décrivent un carré (4 essais d'un plan 2<sup>2</sup>), le troisième et le quatrième facteur ont leurs coordonnées égales à zéro. On ajoute 3 points d'expériences au centre du domaine d'étude pour réduire l'erreur de prédiction.

Le modèle mathématique postulé est :

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_{12} X_1 X_2 + a_{13} X_1 X_3 + a_{14} X_1 X_4 + a_{23} X_2 X_3 + a_{24} X_2 X_4 + a_{34} X_3 X_4 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2 + a_{44} X_4^2 + e$$

La procédure de calcul est la même que celle décrite pour trois facteurs, seulement le volume des matrices de calcul qui diffère.

### 3.5.6 Evaluation de la qualité du modèle

L'objectif est de vérifier si le modèle mathématique obtenu par l'expérimentation correspond à un modèle statistique, c'est-à-dire à un modèle bien ajusté et ne contenant plus que la partie explicative et aléatoire. La qualité du modèle est évaluée au moyen de deux critères :

- le test de Fisher (F), c'est le rapport de la variance d'ajustement sur la variance de l'erreur expérimentale [77], exprimé par :

$$F_{cal} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 / v_1}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 / v_2}$$

- L'écart d'ajustement est la différence entre la moyenne des réponses mesurées et la réponse prédite exprimé par :

$$\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$$

- La somme des carrés des écarts d'ajustement est obtenue avec 13 moyennes indépendantes et avec les réponses prédites qui dépendent de 10 coefficients, alors  $v_1=13-10=3$  degrés de liberté (cas de trois facteurs) ;  $v_1=25-15=10$  degrés de liberté (cas de quatre facteurs).

- L'écart expérimental est la différence entre une réponse mesurée et la moyenne des réponses mesurées au même point expérimental  $\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2$ , le nombre de degrés de liberté des écarts expérimentaux est déterminé comme suit : s'il y'a "n" déterminations pour un essai, il y a "n-1" degrés de liberté, alors  $v_2=3-1=2$  degrés de liberté dans les deux cas (3 et 4 facteurs).

La valeur de fischer calculée est comparée avec celle du tableau à  $v_1, v_2$  au niveau de signification donné. Si  $F_{cal} < F_{tab}$  le test est bon [78].

- le test du  $R^2$ , exprimé par l'expression :

$$R^2 = \frac{\hat{y}'\hat{y} - \hat{y}'\bar{y}}{y'y - \bar{y}'\bar{y}}$$

Où

$\hat{y}'\hat{y}$  est la somme des carrés des réponses prédites

$y'y$  est la somme des carrés des réponses mesurées

$\hat{y}'\bar{y}$  est la somme des carrés de la moyenne

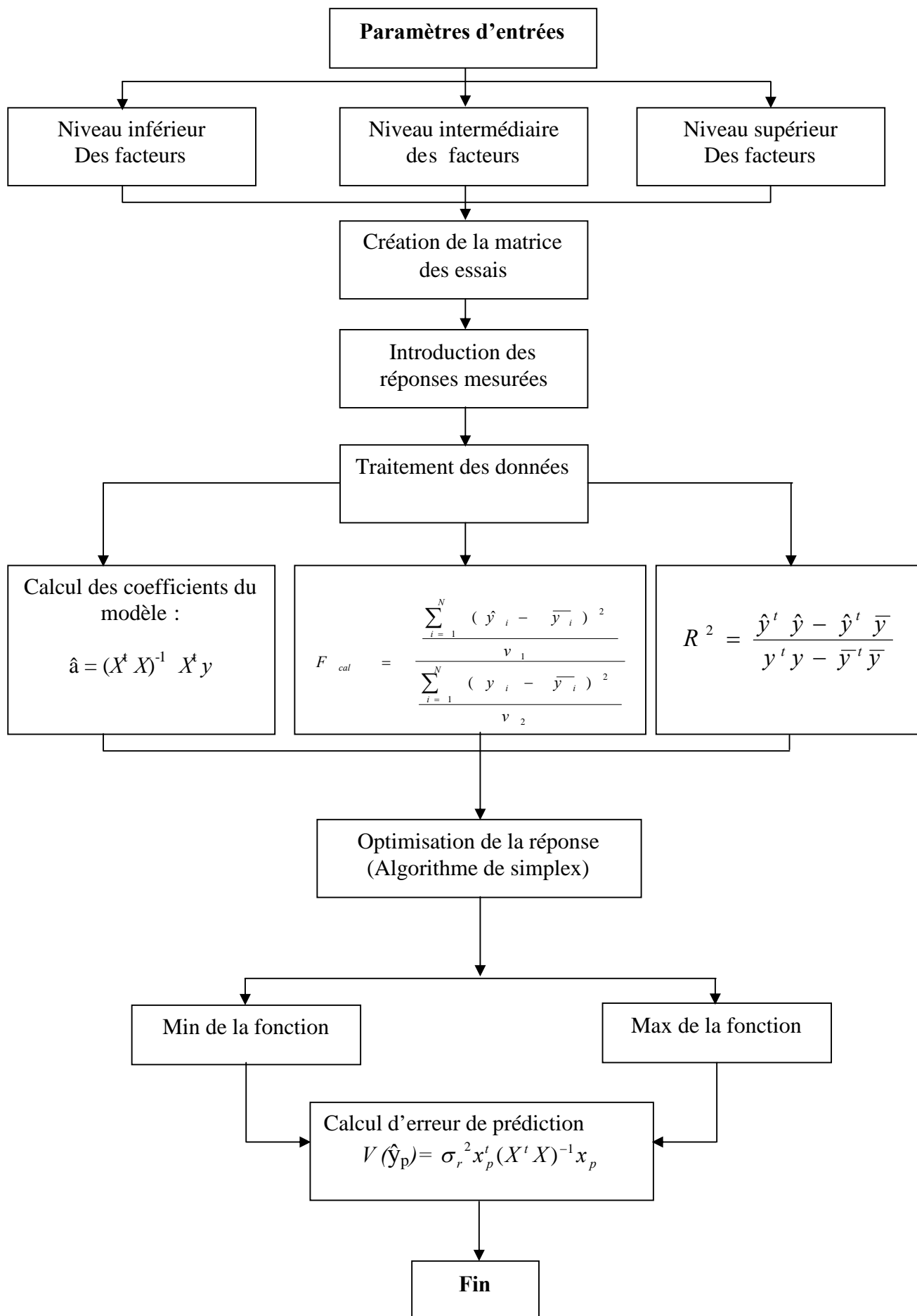
La valeur du  $R^2$  exprime la qualité d'ajustement du modèle et doit être proche de 0.98 [80], [69].

### 3.6 Programmation

En utilisant les fonctionnalités de MALAB6.5 [80, 81], nous avons développé un programme spécifique permettant d'effectuer le traitement mathématique du modèle adopté selon le plan de Box-behnken. Le programme dont l'organigramme est présenté ci dessous, offre la possibilité de gérer l'expérimentation, permet d'aboutir au modèle postulé avec l'optimisation des facteurs donnant la meilleure réponse désirée.

#### 3.6.1 Organigramme

L'organigramme descriptif de la démarche est représenté dans la page suivante.

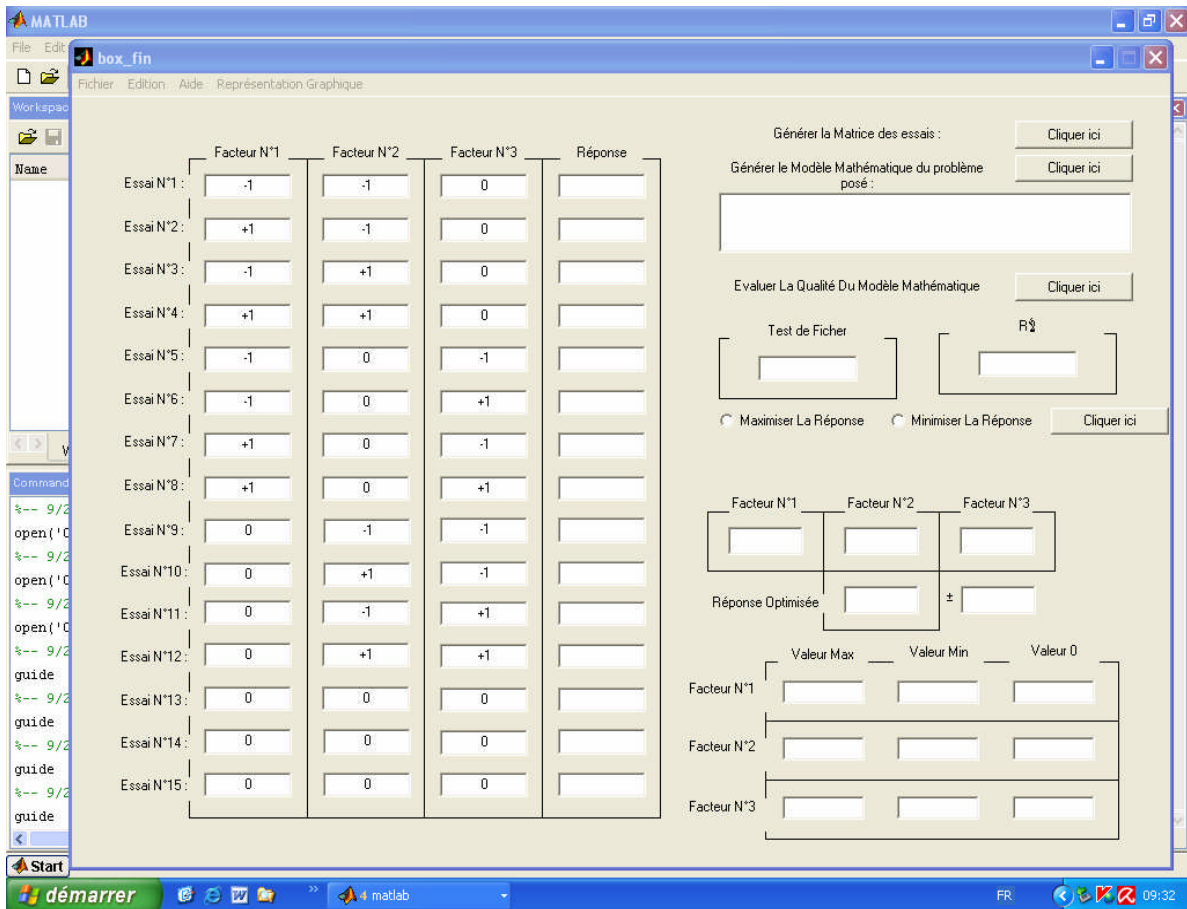


L'optimisation de la réponse est réalisée par la recherche du (min. ou max.) de la fonction «  $\hat{Y}$  » selon le cas considéré, en utilisant la technique du Simplex intégrée dans le langage MATLAB6.5.

### 3.6.2 Description de la procédure de traitement sur PC

#### 3.6.2.1 Interface et procédure (cas de trois facteurs)

L'exécution s'effectue par le fichier Box\_fin dans la ligne de commande de MATLAB. La fenêtre d'interface apparaît (Cf. **figure3.7**).



**Figure 3.7** Interface du programme pour trois facteurs

Les étapes d'utilisation du programme sont les suivantes (Cf. **figure3.8**) :

- 1- Introduction des valeurs des différents niveaux de facteurs dans les champs, zone (1)
- 2- Cliquez sur le bouton « générer la matrice des essais », zone (2)
- 3- A partir des informations de la matrice passer à la réalisation des essais tel qu'il est montré dans la zone (3)
- 4- Introduction les valeurs des réponses mesurées pour chaque essai, zone (4)
- 5- pour obtenir le modèle mathématique cliquez sur le bouton « Générer le Modèle Mathématique Du Problème Posé », zone (5)

- 6- Pour vérifier la validité du modèle mathématique, cliquez sur le bouton « Vérifier La Qualité du Modèle Mathématique », zone (6), les résultats seront visualisés dans la zone (7).
- 7- Pour l'optimisation de la réponse désirée, choisir (Min ou Max) de la fonction et cliquer sur le bouton, zone (8). Les valeurs optimales des facteurs ainsi que la réponse optimale apparaîtrons dans les champs, zone (9).
- 8- Pour l'obtention des graphes choisir dans le menu « Représentation graphique », fixer les paramètres et valider. Les graphes sont générés en 3D avec les surfaces de réponse.

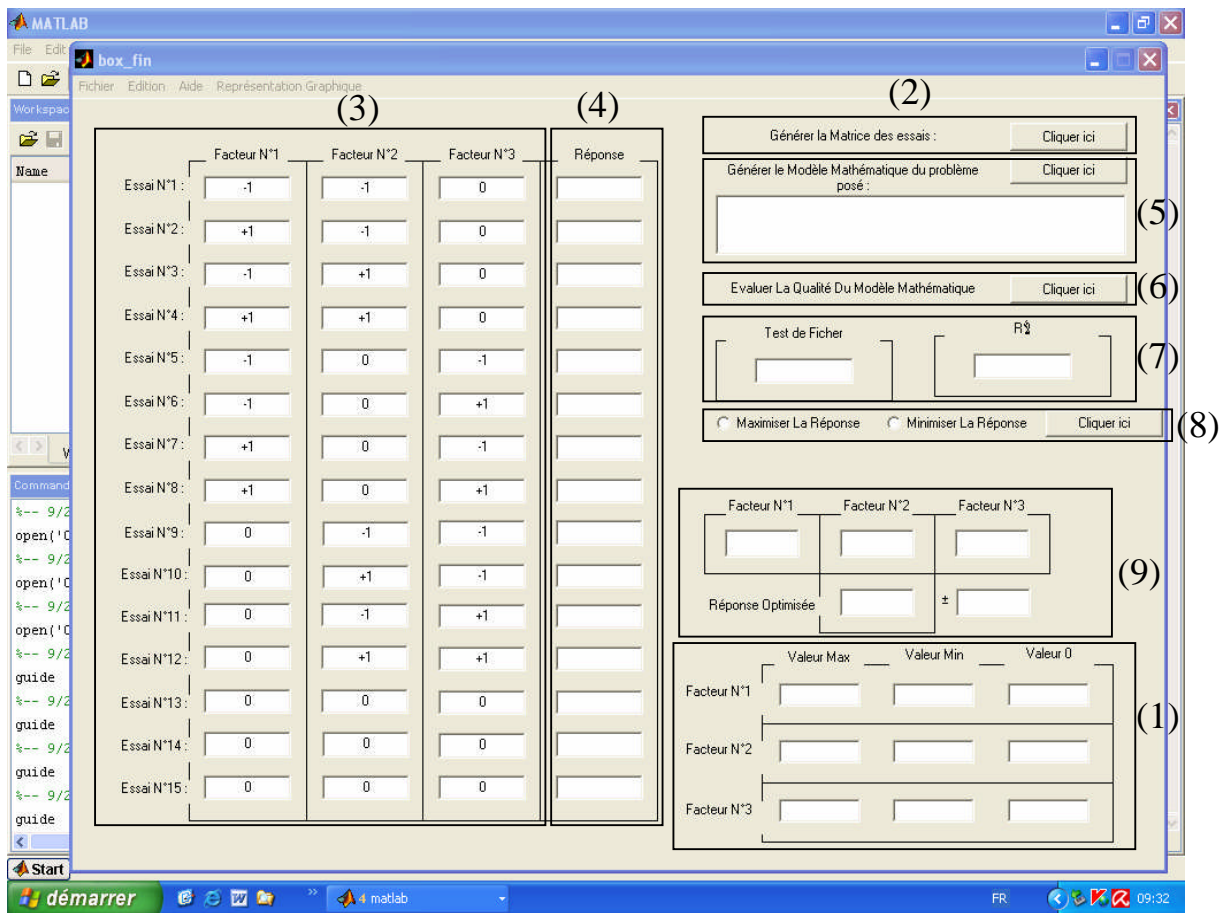
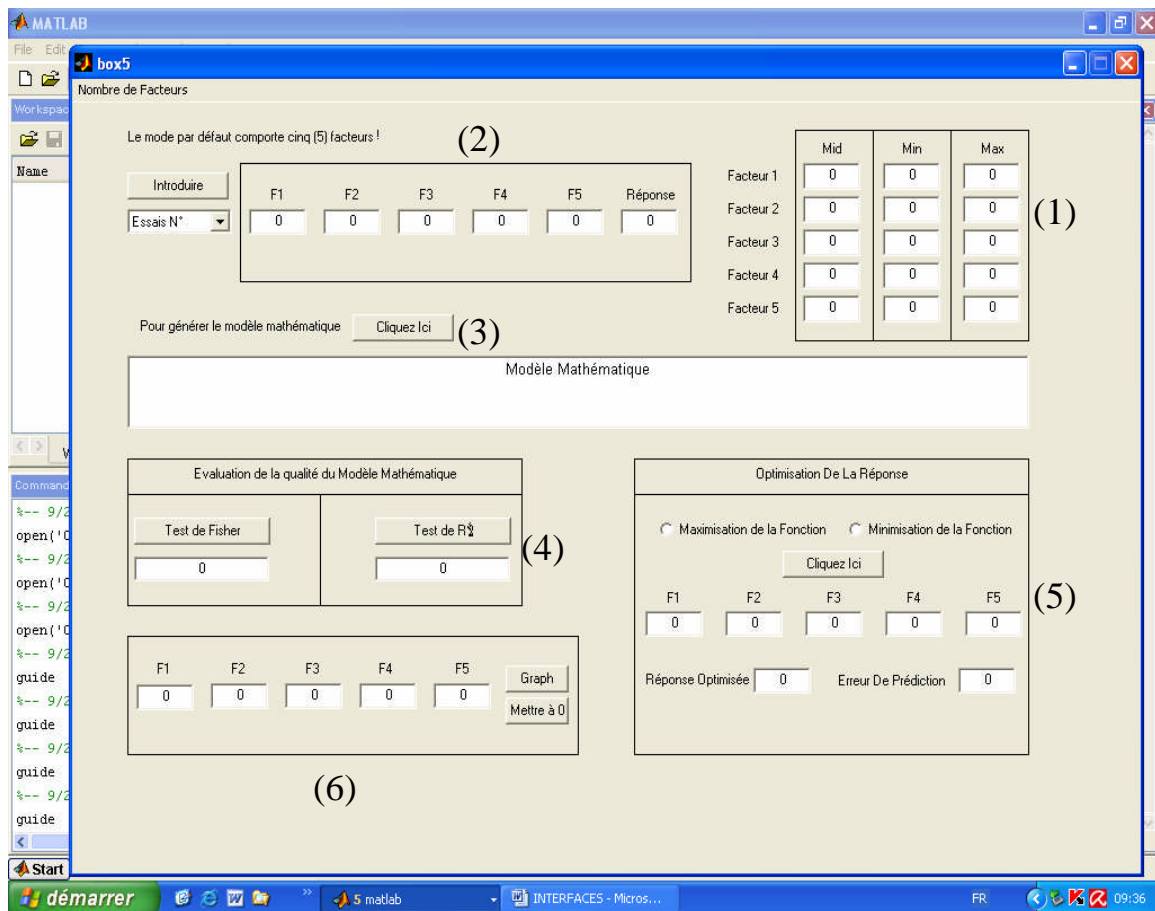


Figure3.8 Zones et leurs fonctionnalités

### 3.6.2.2 Interface et procédure (cas de quatre ou cinq facteurs)

L'interface est différente de la précédente en raison du volume important des champs (**figure3.9**).



**Figure3.9** Zones et leurs fonctionnalités

La procédure d'utilisation est la suivante :

- 1- Choisir le nombre de facteurs à étudier dans le menu « Nombre de Facteurs ».
- 2- Introduction des valeurs des différents niveaux de facteurs zone (1), la matrice des essais est générée automatiquement (zone 2).
- 3- A partir des informations de la matrice passer à la réalisation des essais tel qu'il est montré dans la (zone 2).
- 4- Introduction les valeurs des réponses mesurées pour chaque essai en utilisant simultanément le bouton « Introduire ».
- 5- pour obtenir le modèle mathématique cliquez sur le bouton « Générer le Modèle Mathématique » (zone 3).
- 6- Pour vérifier la validité du modèle mathématique, cliquez sur le bouton « Evaluation de la qualité du modèle mathématique » (zone 4), les résultats seront visualisés dans les champs « Test de Fisher » et « Test de  $R^2$  ».

- 7- Pour l'optimisation de la réponse désirée choisir (Max ou Min) de la fonction et cliquer sur le bouton, les valeurs des paramètres apparaîtront dans les champs (zone5).
- 8- Pour l'obtention des graphes, fixer deux facteurs et à l'aide du bouton « Graph » (zone6) générer les graphiques correspondants aux deux autres facteurs à évaluer. Les graphes sont conçus en 3D avec les surfaces de réponse.

### **3.7 Conclusion**

La diversité des plans d'expériences rend difficile le choix d'un modèle approprié dans un but déterminé. Par ailleurs, Il existe plusieurs contraintes lors de la réalisation de l'expérimentation. Il y a des contraintes de matériel, certains essais ne pourront pas être réalisés parce que certains niveaux ne pourront pas être atteints, il y a des contraintes sur les matières premières qui sont en quantités limitées, ce qui restreint le nombre des essais. Il y a aussi des contraintes budgétaires qui limitent les moyens à mettre en œuvre et le nombre des expériences. La méthode des plans d'expériences basée sur les plans de BOX BEHNKEN, retenue dans cette étude est suffisamment souple pour se plier à toutes ces contraintes.

Les plans de Box Behnken présentent la possibilité d'étudier beaucoup de facteurs et trois niveaux pour chaque facteur avec le minimum d'essai, et d'utiliser un modèle mathématique du second degré, ce qui permet de voir au mieux l'effet de chaque facteur ainsi que l'effet de l'interaction entre les facteurs sur la réponse. Ce plan aide à l'organisation et le traitement des essais en respectant certaines conditions réelles de l'expérimentation.

Le programme élaboré dans ce chapitre prend en charge plusieurs facteurs avec trois niveaux chacun. Selon le nombre de facteurs considérés (2, 3, 4 et même 5) on peut choisir l'interface qui convient. Au moyen de ce programme, on assurera la gestion et le suivi les opérations de traitement mécanique par brunissage qui seront réalisées dans le chapitre suivant. Il nous permettra de générer les modèles mathématiques en évaluant l'interaction des différents facteurs (paramètres de traitement), ainsi que leur optimisation afin d'obtenir la meilleure réponse désirée.

# Chapitre 4

Equipements, Matériaux et  
Techniques expérimentales

## 4.1 Introduction

Ce chapitre est composé de trois parties : la première partie est consacrée au traitement mécanique par Déformation Plastique Superficielle (DPS) en l'occurrence le brunissage par l'outil à pointe sphérique en diamant appliquée sur les aciers de différentes nuances XC18, XC48 fournis par l'entreprise sidérurgique MITTAL-STEEL Annaba. Au moyen de cette technique, on réalise le parachèvement des pièces cylindriques en vue d'améliorer la dureté et la rugosité de leurs couches superficielles. Nous emploierons pour l'organisation des essais la démarche imposée par la méthode des plans d'expérience de Box-Behnken comme exposé dans le chapitre précédent. Deux réponses ont été choisies :

- La dureté superficielle « Hv »
- La rugosité des surfaces « Ra »

Ces réponses constituent une conséquence directe de l'application de la déformation plastique, ce qui va nous aider à l'interprétation des résultats obtenus. On effectue des essais pour trois et quatre facteurs à trois niveaux chacun tout en prenant le soin de choisir la machine et fixer les niveaux les plus favorables. On relève les valeurs des réponses mesurées à la sortie, chacune suivant le régime de travail appliqué. Pour le suivi de l'expérimentation et l'interprétation des résultats, on utilisera les interfaces et les programmes adéquats développées dans le chapitre 3.

Dans la deuxième partie, on réalise les tests d'usure adhésive sur des échantillons traités et non traités afin d'observer l'apport du traitement mécanique employé.

Dans la troisième partie, une série d'éprouvettes normalisées traitées par le procédé de finition de rectification et une autre série d'éprouvettes traitées par le procédé de parachèvement de brunissage, sont soumises aux essais par flexion rotative. L'objectif ciblé par ces essais est de comparer les effets de ces deux traitements sur la tenue en fatigue.

Les expériences ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique Industrielle (LMI), département de Génie Mécanique (Université BADJI-Mokhtar Annaba).

## 4.2 Equipements utilisés

Nous présentons dans ce paragraphe, l'ensemble des matériels et outils mis en oeuvre pour la réalisation des expériences et cela dans le souci de caractériser le comportement des matériaux étudiés. Cela va consister en une présentation des différents équipements et appareils utilisés qui ont servi aux opérations de traitement mécaniques, la mesure de la rugosité, la mesure de la dureté, l'étude de l'usure et de la fatigue.

### 4.2.1 Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer les essais est un tour à chariotier et à fileter, modèle 1A616 de puissance sur la broche égale à 4,6 kW (**figure4.1**). La gamme des nombres de tours disponible sur la machine est : 9 ; 11.2 ; 18 ; 28 ; 45 ; 56 ; 71 ; 90 ; 112 ; 140 ; 180 ; 224 ; 280 ; 355 ; 450 ; 560 ; 710 ; 900 ; 1120 ; 1400 ; 1800 (tr/min).



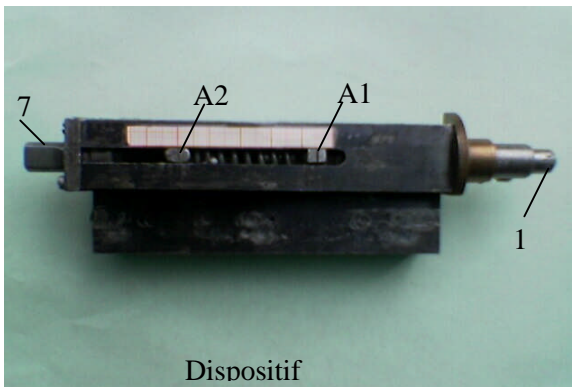
Gamme des avances

1	2	3	4	
0.037	0.045	0.054	0.065	I
0.074	0.091	0.11	0.124	II
0.148	0.18	0.22	0.26	III
0.295	0.36	0.44	0.52	IV

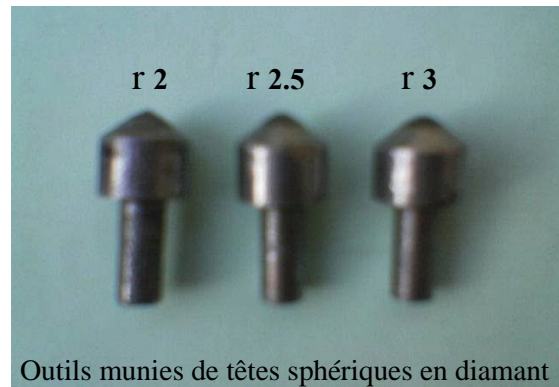
**Figure4.1** Tour parallèle 1A616

### 4.2.2 Outils de brunissage

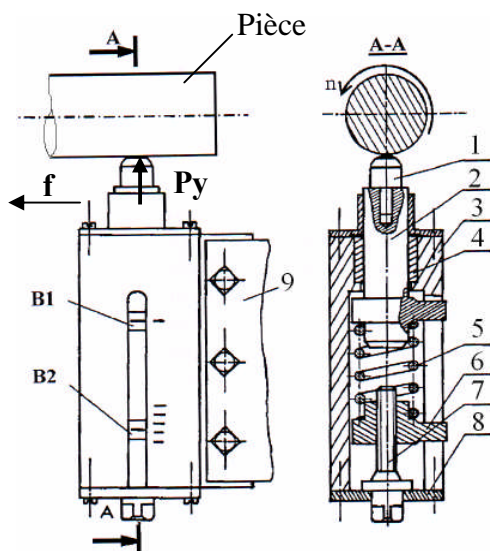
Le dispositif avec les outils (brunissoir en diamant) qui ont été utilisé lors du traitement mécanique sont montrés dans la **figure 4.2**.



Dispositif



Outils munies de têtes sphériques en diamant



- 1- Outil à pointe en diamant sphérique de rayon « r »
- 2- Mandrin support
- 3- Corps
- 4- Manchon guide
- 5- Ressort
- 6- Butée mobile
- 7- Vis de réglage de l'effort « Py »
- 8- Plateau
- 9- Tourelle porte outil du tour
- A1 et A2- Indicateurs de réglage de l'effort.

**Figure4.2** Outils de brunissage

Le dispositif a été conçu pour réaliser les opérations de brunissage à la bille ou au rouleau (galet) sur un tour parallèle. Il présente l'avantage d'une simplicité de son montage sur la tourelle du tour. Le mouvement de pénétration est obtenu par l'action de la pointe en diamant du brunissoir sous l'effet d'un effort réglable. La déformation est obtenue par la rotation de la pièce et l'avance de l'outil qui est communiqué par l'intermédiaire du chariot longitudinal. L'effort « Py » étalonné sur le dispositif est réglé à l'aide du vernier de la machine outil.

#### 4.2.3 Appareil de mesure de Rugosité

La mesure de la rugosité a été réalisée au moyen d'un Rugosimètre électronique suffisamment sensible qui est montré dans la **figure4.3**.



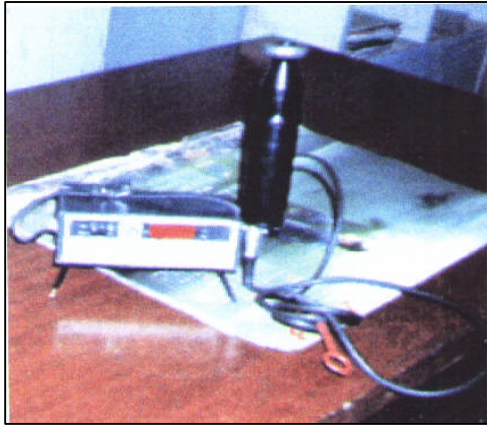
#### Caractéristiques techniques:

- Paramètres de mesures de Ra et Rz
- Plage de mesure 0.05÷10 µm pour Ra  
0.1÷50 µm pour Rz
- Longueur de mesure 6mm
- Calibre  $\lambda_1=0.25$  mm pour Ra 0.05÷0.25 µm  
 $\lambda_2=0.8$  mm pour Ra 0.32÷2.5 µm  
 $\lambda_3=2.5$  mm pour Ra 2.5÷10 µm
- Précision ±15 %
- Rayon de la sonde 10.0÷2.5 µm
- force de mesure 0.016 N
- Poids 200 gr.

**Figure 4.3** Mesure de la rugosité Ra

#### 4.2.4 Appareil de contrôle de la dureté

La mesure de la dureté superficielle « Hv » a été réalisée au moyen d'appareil modèle « Micro-dur » au laboratoire de contrôle qualité des ateliers de fabrication AMM de l'entreprise MITTAL-STEEL Annaba. C'est un appareil électronique (**figure4.4**) doté d'une pointe fine permettant l'exploration des duretés à une échelle réduite, sur une surfaces plane et même sur un génératrice de surface cylindrique.



Caractéristiques techniques:

- Paramètres de mesures de Hv et HRC
- Pyramide en diamant 136°
- Charge : 50 gr. pour acier non traité  
30 gr. pour acier traité
  
- Précision :  $\pm 3$  %

**Figure 4.4** Microduromètre électronique « Micro-dur »

#### 4.2.5 Dispositif et machine d'usure

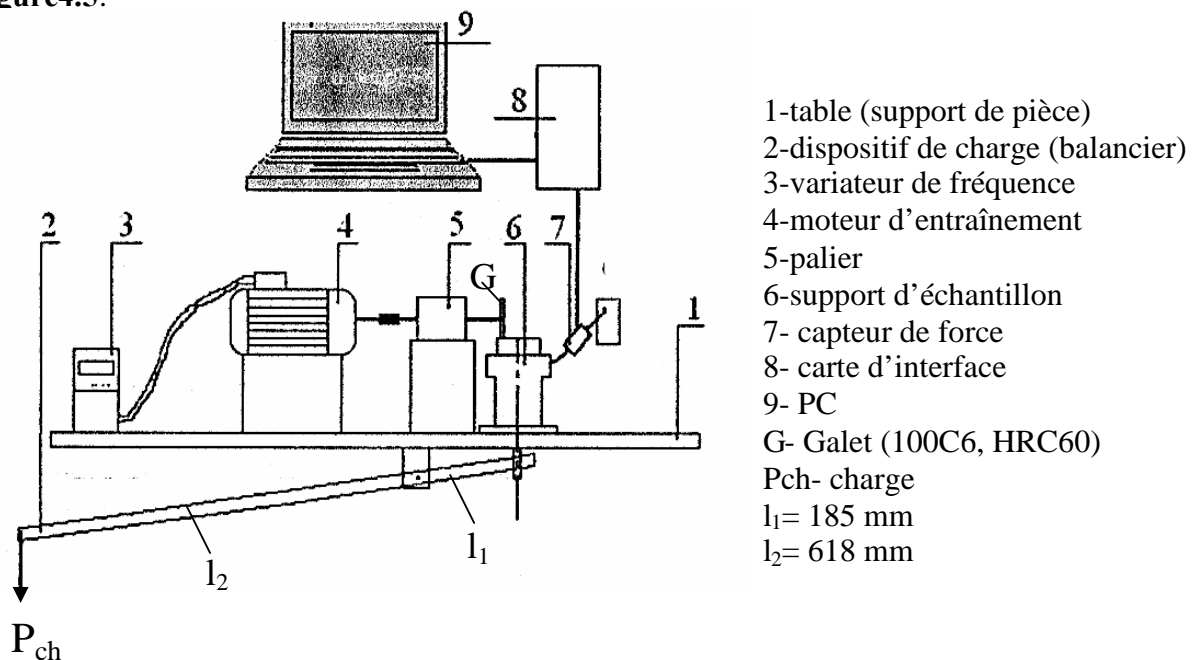
Pour réaliser les tests d'usure, nous avons conçu et réalisé un appareil d'essai de type tribomètre de laboratoire.

##### 4.2.5.1 Définition

Le tribomètre est un dispositif d'essais utilisé pour caractériser le comportement d'un couple de matériaux dans des conditions données lors d'un déplacement relatif.

##### 5.2.5.2 Description

L'appareil de frottement (le tribomètre réalisé) peut être à première vue considérée comme dérivée à la fois des machines twin-disque et pion-disque. Il simule les opérations reproduisant la complexité des mécanismes de détérioration des outils. Ainsi, il permet de considérer l'action synergique des facteurs thermique, mécanique et tribologique et d'étudier séparément les phénomènes de dégradation, tels que l'usure. Le schéma cinématique de la machine est présenté sur la **figure 4.5**.



**Figure 4.5** - Tribomètre modèle pion sur disque

Caractéristiques techniques :

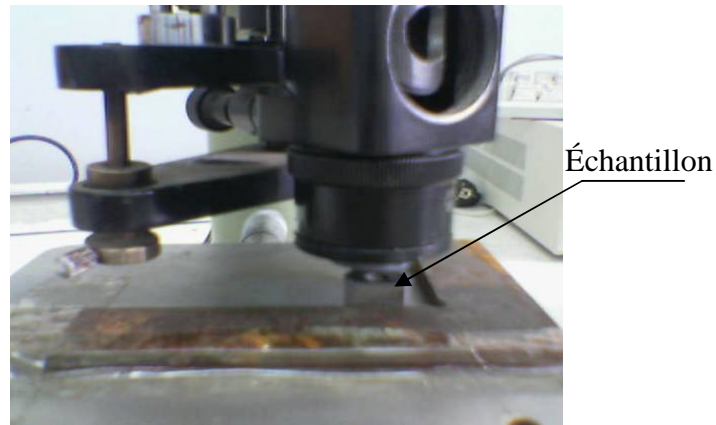
Dimensions LxBxH	1000x600x90 (mm)
Poids	120 Kg
Alimentation électrique	380 V, 50Hz
Moteur	Vitesse de rotation 2895 tr/min Puissance 3 Kw
Dispositif de charge	Charge maximale Pch = 12 Kg pour une force normale 400 N
Dimensions des couples de pièces	Diamètre du Galet de 35 ÷ 140 mm. Diamètre support de pièce Ø40 Course verticale de 10 ÷ 70 mm.
Variateur de vitesse	Plage fréquence de 0÷50 Hz
Capteur de force	Alimentation ±12 V Effort en traction 100N max.
Liaison au PC	Carte interface (liaison par RS232)

La mesure de l'effort tangentiel, est réalisée instantanément au moyen du capteur de force, de la carte d'interface et d'un logiciel approprié. L'évolution de l'effort tangentielle est suivie directement à l'aide du PC (**Figure4.6**).



**Figure4.6** Tribomètre et liaison avec PC

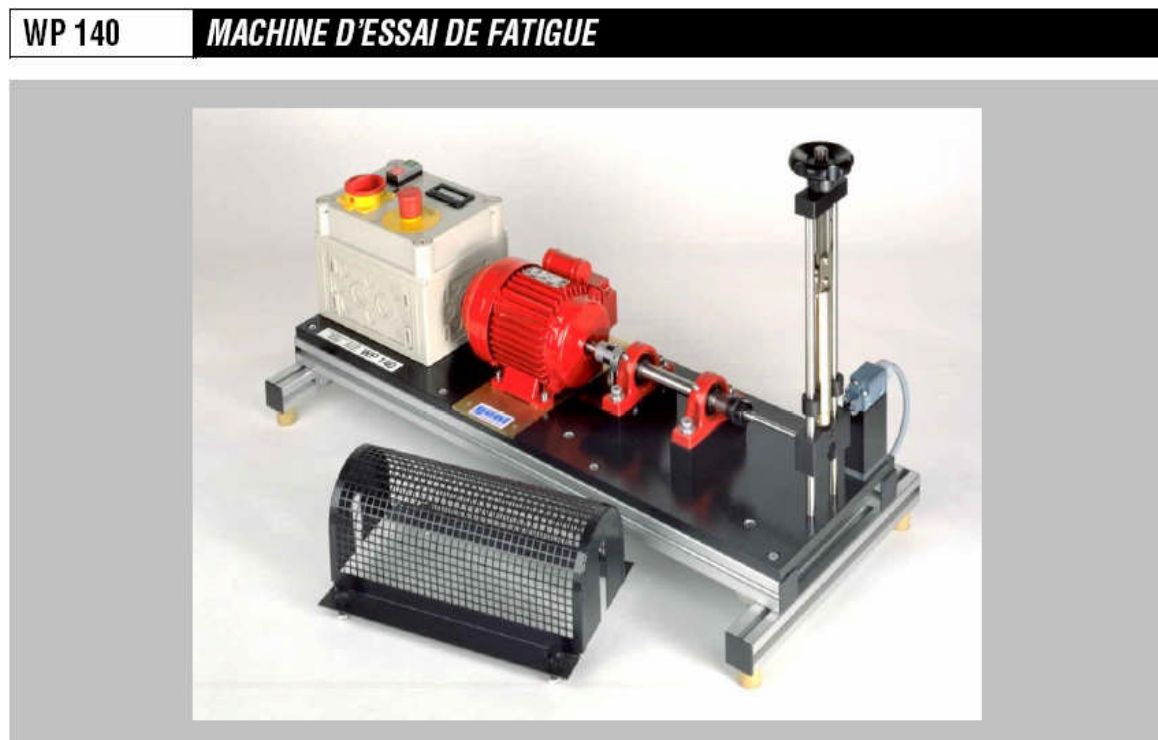
La mesure de l'usure sur l'échantillon est réalisée au moyen d'un microscope optique représenté dans la **figure4.7**.



**Figure 4.7** L'échantillon pendant les mesures de l'usure « $\Delta h$  »

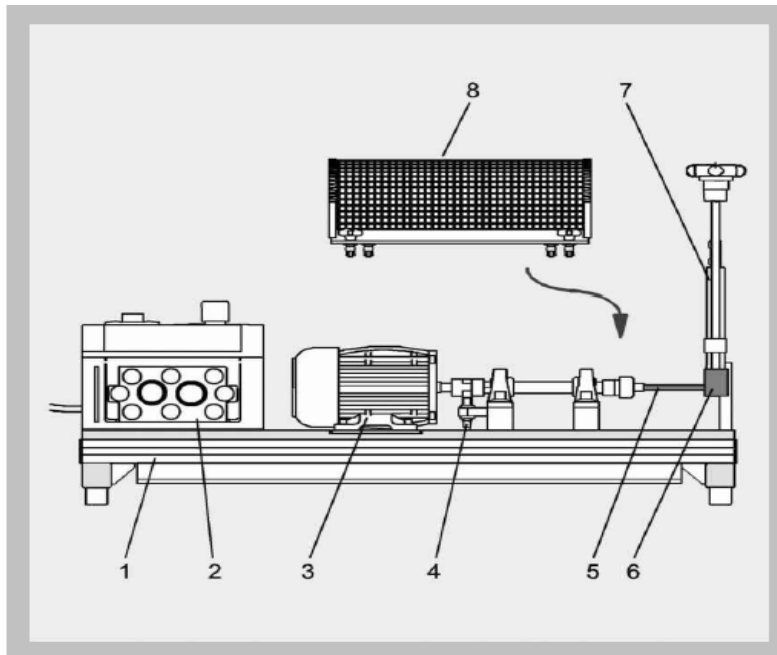
#### 4.2.6 Machine d'essai de fatigue

Pour la réalisation des essais de fatigue, nous avons employé la machine du laboratoire « essai des matériaux » du département de Génie mécanique. La construction de la machine et son fonctionnement sont présentés sur la **figure4.8** et la **figure 4.9**.



**Figure4.8** Machine d'essai de fatigue [82]

#### 4.2.6.1 Description



- (1) -table de la machine
- (2) -coffret de commande
- (3) -moteur d'entraînement
- (4) -broche porte éprouvette
- (5) -l'éprouvette
- (6) -palier libre
- (7) -dispositif de charge
- (8) -capot de protection

#### Caractéristiques techniques

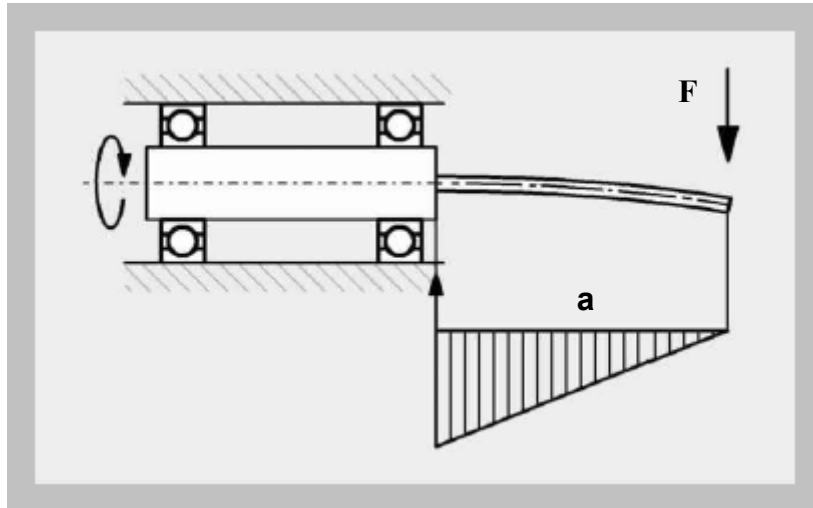
- Vitesse de rotation du moteur: 2800t/min
- Puissance du moteur: 0.37kW
- Charge:  $0 \pm 300N$
- Compteur de cycles de charge électronique, 8 digits, numérique
- commutable sur affichage de la vitesse de rotation

**Figure 4.9** Schéma et caractéristiques techniques [82]

Cet appareil de table représente une machine d'essai de fatigue de flexion rotative. Une éprouvette métallique rotative, encastrée d'un côté est chargée par une force unique à l'aide d'une balance à ressort. Une contrainte en flexion est ainsi produite à l'intérieur de l'échantillon cylindrique. Son amplitude peut être réglée en continu à l'aide d'une vis filetée et d'une roue à main. Le nombre de cycles d'effort est enregistré par un compteur électronique et visualisé par un afficheur numérique. La machine est câblée avec un PC et à l'aide d'un logiciel approprié on peut suivre l'opération d'essai de fatigue et aboutir au traçage des courbes de fatigues (**Diagramme Wöhler**).

#### 4.2.6.2 Sollicitation de l'éprouvette

La sollicitation de l'éprouvette correspond à une poutre en flexion encastrée soumise à une force unique "F" (**figure4.10**). On génère ainsi dans l'éprouvette un moment de flexion " $M_b$ ". Comme le moment de flexion est fixe dans l'espace et que l'éprouvette est en rotation, Celle-ci est soumise à une contrainte de flexion alternée de forme sinusoïdale). La contrainte de flexion la plus élevée intervient à l'épaulement de l'éprouvette. La machine d'essai de flexion rotative permet uniquement de déterminer la résistance aux Efforts alternés " $\sigma_w$ ". Elle représente la limite d'endurance " $\sigma_D$ " ou limite de fatigue pour les efforts répétés.



**Figure4.10** l'éprouvette pendant l'essai de fatigue

Le moment de flexion est :

$$M_b = F \cdot a$$

Compte tenu du module d'inertie de l'éprouvette

$$W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{32}$$

L'amplitude de tension peut être calculée.

$$\sigma_a = \frac{M_b}{W_b} = \frac{32 \cdot a}{\pi \cdot d^3} \cdot F = \frac{32 \cdot 100,5 \text{ mm}}{\pi \cdot 8^3 \text{ mm}^3} \cdot F$$

$$\sigma_a = 2.0 F (1 / \text{mm}^2)$$

La résistance aux efforts alternés " $\sigma_w$ " est celle pour laquelle le matériau ne présente pas de défaillance même après  $N=10 \cdot 10^6$  cycles de charge (acier), on peut alors considérer qu'une défaillance suite à la fatigue du matériau n'interviendra plus, la durée de vie est infinie.

### 4.3 Matériaux et techniques expérimentales

Ce paragraphe est composé de deux parties, Dans la première partie, nous présentons le traitement par brunissage des pièces d'aciers de nuances XC18 et XC48 en considérant trois facteurs (la force de brunissage, l'avance et rayon de la bille). Dans la seconde partie, nous mettons en jeu un quatrième facteur (nombre de passes). Les réponses envisagées sont la rugosité de la surface « Ra » et la dureté superficielle « Hv ».

#### 4.3.1 Première partie: Traitement par plans d'expériences à trois facteurs

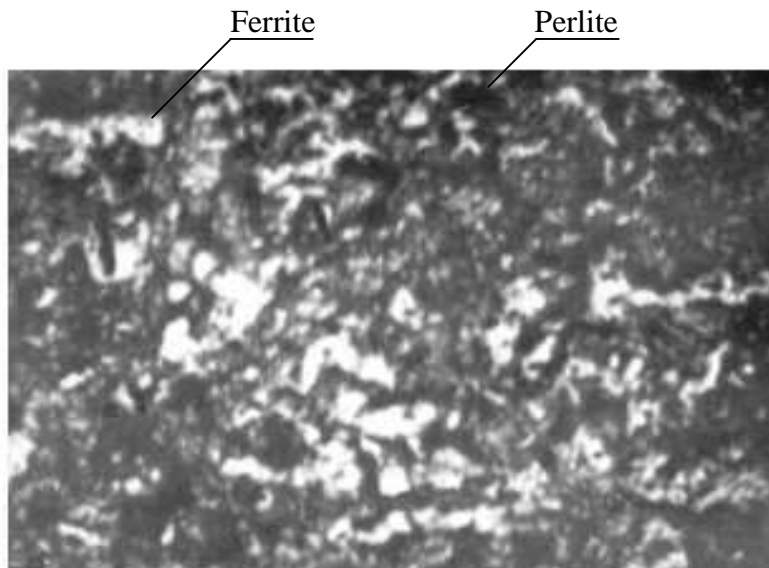
##### 4.3.1.1 Définition des matériaux

Les matériaux choisis répondent au principe de la déformation plastique. Les analyses et les essais de traction réalisée dans le laboratoire MITTAL-STEEL ont permis d'observer leurs compositions

chimiques et leurs caractéristiques mécaniques, qui sont présentées dans le **tableau 4.1** et le **tableau 4.2**. Les microstructures respectives sont données sur la **figure4.11** et **figure4.12**.

**Tableau4.1** Acier XC18

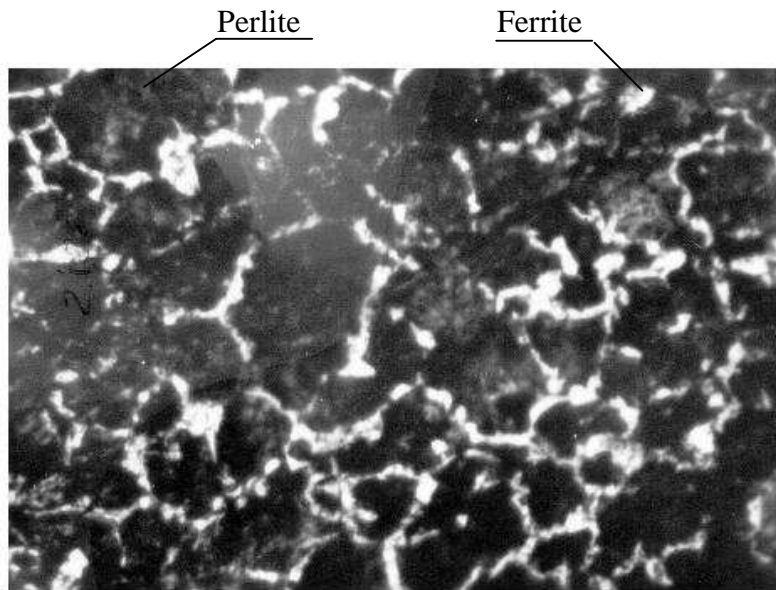
Composition chimique		Caracteristiques mécaniques
C %	0.18	
Mn %	0.6	Re $\approx$ 240 MPa
Si %	0.18	
P %	0.035	Rm $\approx$ 430 MPa
S %	0.035	
		A >17 %



**Figure4.11** Microstrure du matériau XC18 GX600

**Tableau4.2**Acier XC48

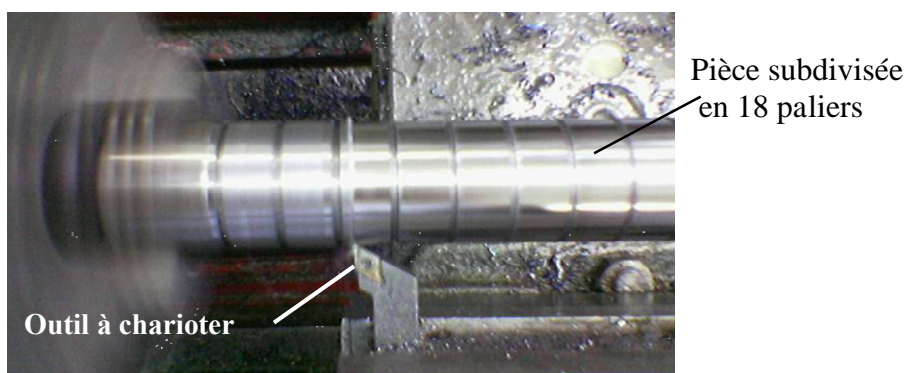
Composition chimique		Caractéristiques Mécaniques
C %	0.45÷0.49	
Mn %	0.85	Re $\approx$ 310 MPa
Si %	0.22	
P %	0.024	Rm $\approx$ 520÷640 MPa
S %	0.023	
Cu %	0.128	A >17 %
Cr %	0.134	



**Figure4.12** Microstrure du matériau XC48. GX600

#### 4.3.1.2 Préparation des éprouvettes

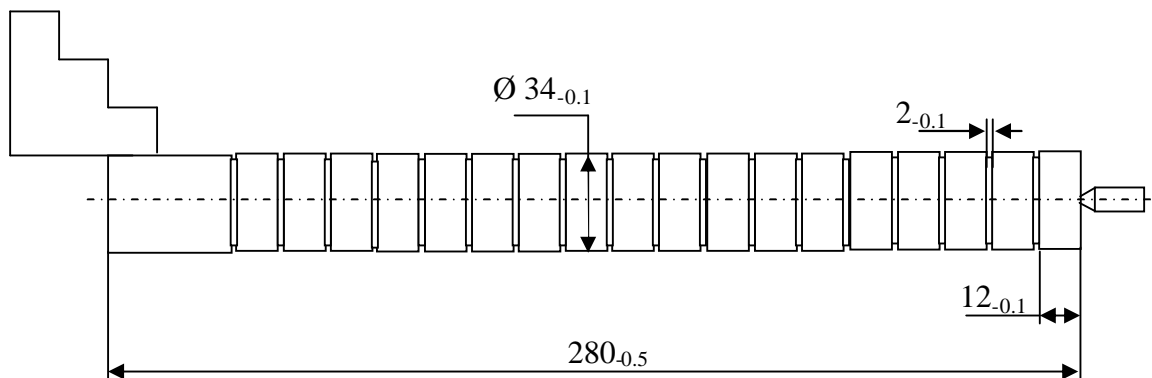
Deux éprouvettes découpées distinctement de deux barreaux de diamètre ( $\varnothing 40$ ) sont préparées par tournage en 18 paliers avec un outil à charioter à plaquette de nuance P10 (d'après ISO) (**figure4.13**). Les régimes de coupe adoptés lors de l'opération de tournage de finition sont ( $n=1120$  trs/min ;  $f = 0.054$  mm/tr ;  $p= 0.5$  mm) [83] .



**Figure4.13** Préparation par tournage

Le montage de la pièce est mixte selon la **figure 4.14** et est suffisamment rigide [83].

$$L^{0.75} / D = 280^{0.75} / 34 = 1.9 < 2$$



**Figure4.14** Montage de la pièce

Les mesures de la rugosité « Ra » et de la dureté superficielle « Hv » après l'opération de tournage, ont été effectuées aux moyens des appareils, **figure4.3** et **figure4.4**.

Les valeurs sont consignées dans les **tableau4.3**, **tableau4.4** et **tableau4.5**.

**Tableau4.3** Rugosité « Ra en  $\mu\text{m}$  » après tournage, XC18

N° Palier	1 <sup>ère</sup> Mesure	2 <sup>ème</sup> Mesure	3 <sup>ème</sup> Mesure	Moyenne	Moy. Gén.
1	3,02	2,80	2,50	2,77	2,00 $\mu\text{m}$
2	2,94	2,64	2,60	2,73	
3	2,42	2,51	2,27	2,40	
4	2,01	2,42	2,42	2,28	
5	2,90	2,61	2,29	2,60	
6	2,59	2,99	2,17	2,25	
7	2,53	2,16	2,61	2,43	
8	2,08	1,96	1,56	1,87	
9	2,02	2,24	2,46	2,24	
10	2,46	2,46	2,03	2,32	
11	1,99	1,96	1,90	1,95	
12	1,72	1,89	1,67	1,76	
13	1,78	1,54	1,38	1,57	
14	1,43	1,77	1,11	1,44	
15	1,05	1,09	1,31	1,15	
16	1,78	1,13	1,59	1,50	
17	0,99	0,79	0,87	0,88	

**Tableau4.4** Rugosité « Ra en  $\mu\text{m}$ », après tournage, XC48

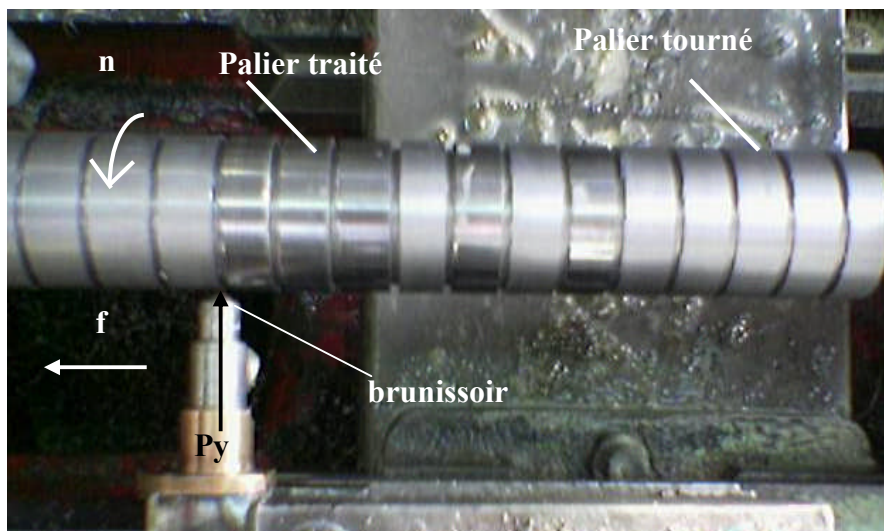
N°Palier	1 <sup>ère</sup> Mesure	2 <sup>ème</sup> Mesure	3 <sup>ème</sup> Mesure	Moyenne	Moy.Gén.
1	2,69	2,34	2,47	2,50	2,30 $\mu\text{m}$
2	2,21	2,47	2,65	2,44	
3	2,49	2,44	2,08	2,34	
4	1,86	2,51	2,09	2,15	
5	2,30	1,94	2,33	2,19	
6	2,33	2,38	2,19	2,30	
7	2,35	2,21	2,30	2,29	
8	2,36	2,34	2,22	2,31	
9	2,34	2,40	2,17	2,30	
10	1,96	2,39	2,27	2,21	
11	2,08	2,05	2,21	2,11	
12	2,08	2,59	2,65	2,44	
13	2,10	2,11	2,20	2,14	
14	2,00	2,49	2,37	2,28	
15	2,20	2,05	2,49	2,25	
16	2,63	2,61	2,05	2,43	
17	2,44	2,64	2,46	2,51	

**Tableau4.5** Valeurs moyennes de Rugosité et de dureté superficielle

Matériaux	Rugosité Ra ( $\mu\text{m}$ )	Dureté superficielle Hv (Kgf/mm <sup>2</sup> )
XC48	2.3	315
XC18	2.0	180

### 4.3.1.3 Traitement par Brunissage

#### 4.3.1.3.1 Mode opératoire



**Figure4.15** Traitement par déformation plastique superficielle  
a- montage sur le tour ; b- opération de brunissage

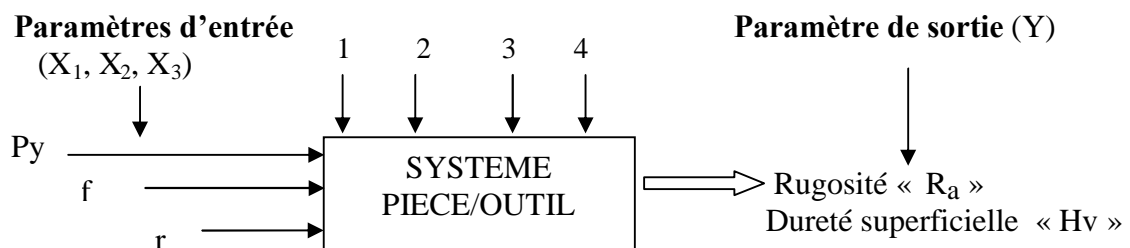
Lors de l'opération de brunissage, la pièce est maintenue dans le même montage que lors de l'opération de tournage. L'opération est réalisée avec une lubrification abondante.

#### 4.3.1.3.2 Régime de travail

Le régime de l'opération dépend principalement de la dureté du matériau et de la rigidité du système, dans le cas des matériaux en question, il est recommandé par [16] d'utiliser le régime suivant :

- effort de brunissage :  $P_y = 5 \div 20$  (Kgf)
- avance :  $f = 0.04 \div 0.1$  (mm/tr)
- Le rayon de la partie active de l'outil (brunissoir) est  $r = 2 ; 2.5 ; 3$  (mm).
- vitesse de travail :  $n = 560$  (tr/min)

Le régime retenu est présenté dans le **tableau 4.6**. Pour mettre en évidence toute la gamme du régime et observer l'effet des paramètres ( $P_y$ ,  $f$  et  $r$ ), nous avons opéré par la méthode de planification des expériences [68] selon le schéma ci-dessous.



**Figure 4.16** Schéma des essais à trois facteurs variables

Le modèle mathématique postulé  $Y = f(P_y, f, r)$  est obtenu sous forme:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{12} X_1 \cdot X_2 + a_{13} X_1 \cdot X_3 + a_{23} X_2 \cdot X_3 + a_{11} X_1^2 + a_{22} X_2^2 + a_{33} X_3^2 + e$$

Facteurs constants:

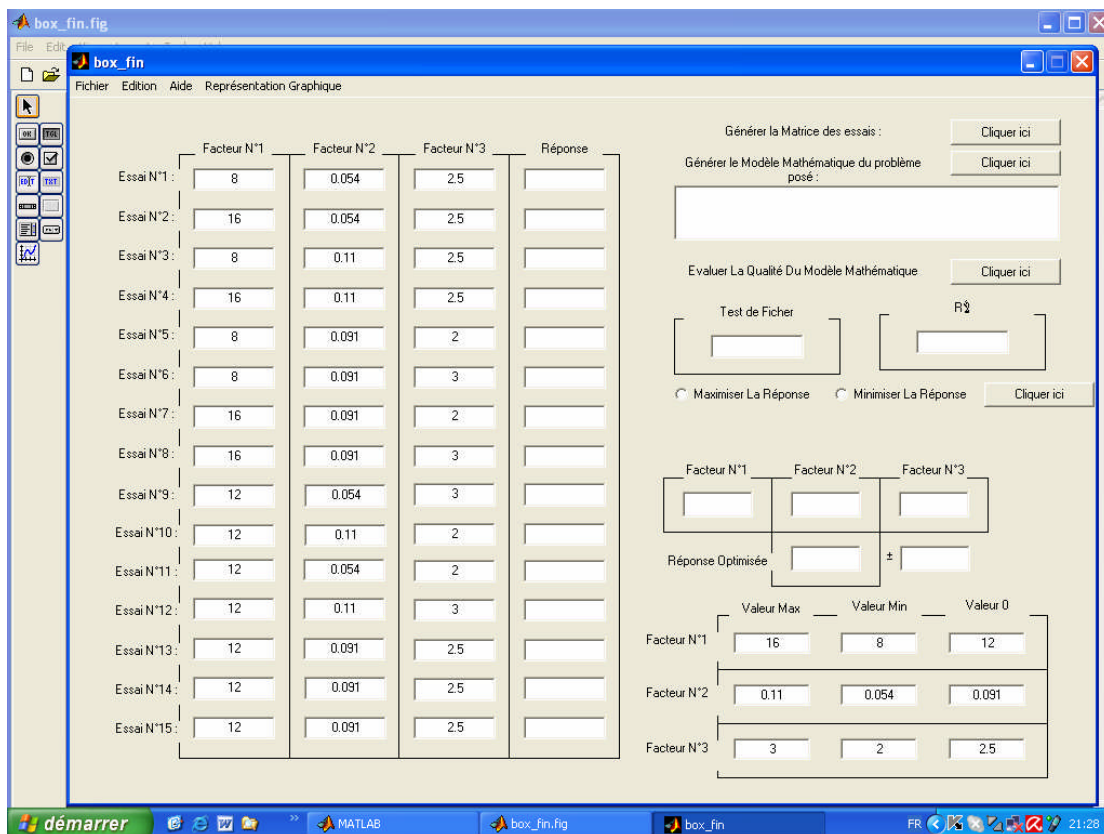
- 1- Lubrification (débit  $Q_x$  ; fréquence de rotation  $n$  ; caractéristiques de lubrifiant ; viscosité  $\mu, \dots$ ).
- 2 - Rigidité du système (MODOP).
- 3- Caractéristiques géométriques des matériaux en contact.
- 4- Milieu ambiant (Température, pression, Humidité).

Le modèle de planification d'expérience adopté prend en compte trois niveaux et trois facteurs selon la matrice suivante :

**Tableau4.6** Matrice de travail

Paramètres du régime	Codes	Niveaux de variation		
		Min(-1)	Moy (0)	Max(+1)
Py (Kgf)	X <sub>1</sub>	8	12	16
f (mm/trs)	X <sub>2</sub>	0.054	0.091	0.11
r (mm)	X <sub>3</sub>	2	2.5	3

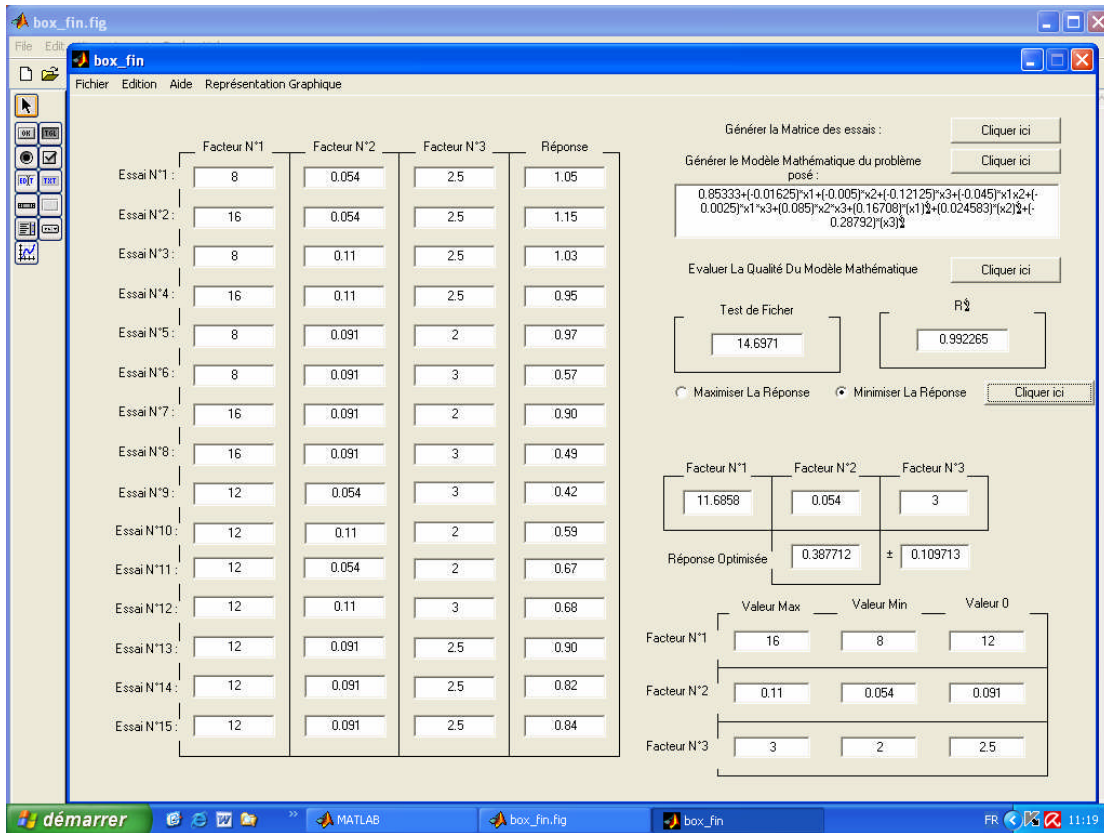
L'opération de traitement par brunissage est réalisée en suivant la démarche décrite dans le chapitre 3. Après injection des valeurs réelles des niveaux, le programme établit la feuille de travail (**figure4.17**) qui permet la réalisation des essais.



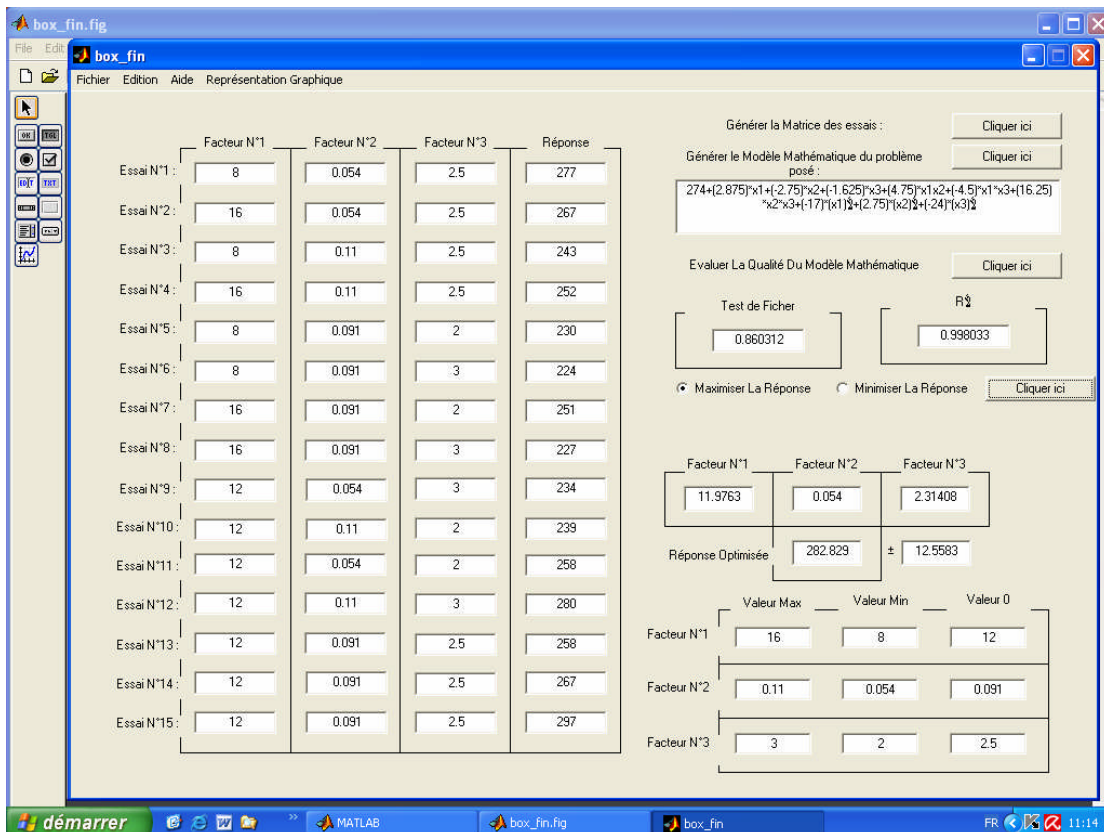
**Figure4.17** Feuille de travail

Après les essais et la mesure des réponses désirée « Ra » et « Hv », les valeurs moyennes sont introduites (voir interface) selon la méthode présentée dans le chapitre précédent. Le programme se charge du traitement mathématique (transformation en matrices de substitution, calculs des paramètres statistiques, établissement des équations du modèle mathématique, calcul de la réponse optimale et de l'erreur de prédiction), les résultats sont présentés respectivement pour chaque

matériau sur la **figure4.18** et la **figure4.19** pour l'acier XC18, la **figure4.20** et la **figure4.21** pour l'acier XC48.



**Figure 4.18** Réponses et modèle mathématique de la rugosité « Ra », XC18



**Figure 4.19** Réponses et modèle mathématique de la dureté « Hv », XC18

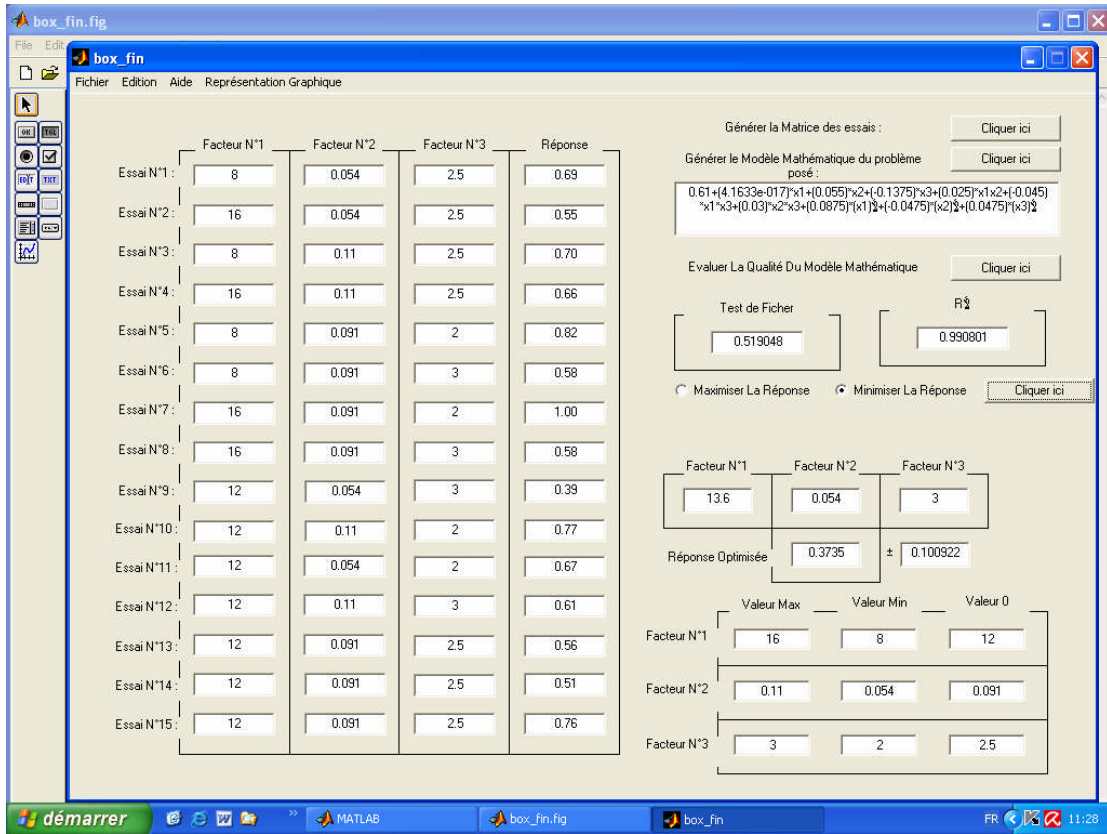


Figure 4.20 Réponses et modèle mathématique de la rugosité « Ra » Matériau XC48

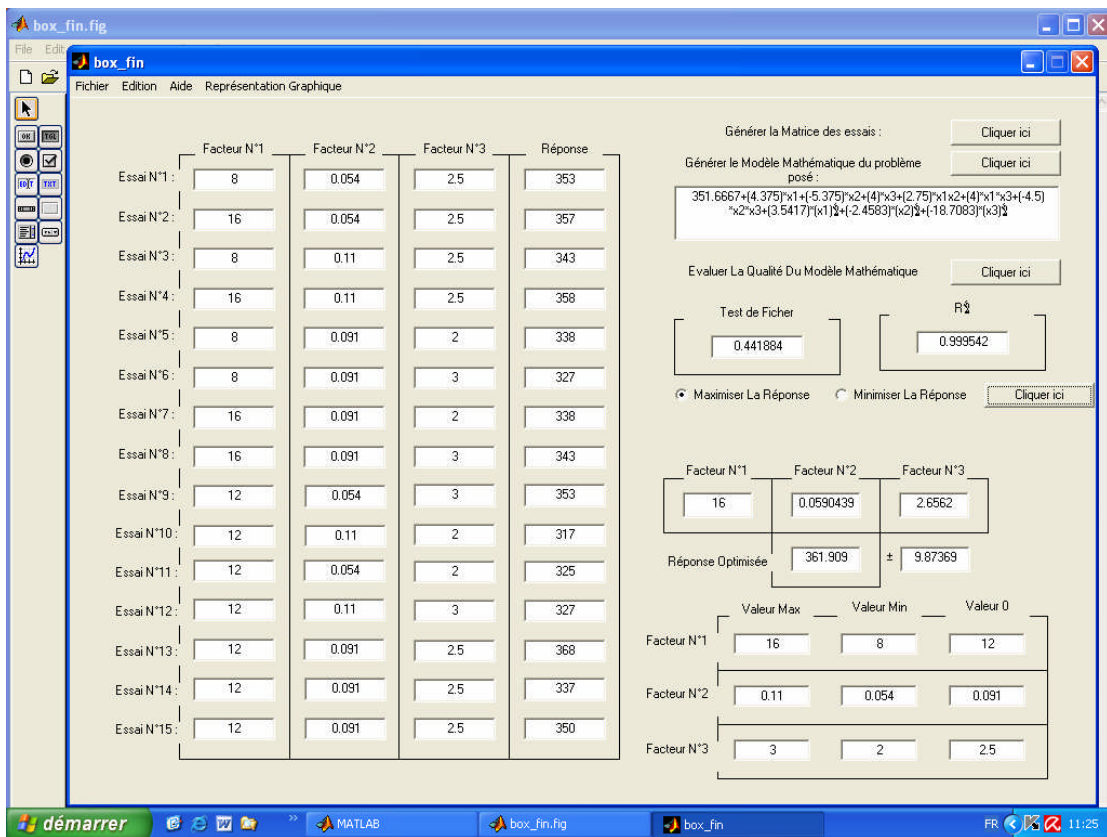


Figure 4.21 Réponses et modèle mathématique de la dureté « Hv », XC48

Les équations ainsi obtenues à partir du modèle pour les réponses mentionnées ont pour expressions finales :

### **Matériau XC18**

Réponse relative à la Rugosité « Ra » :

$$\mathbf{Ra} = 0,85333 - 0,01625X_1 - 0,005X_2 - 0,12125X_3 - 0,045X_1 \cdot X_2 - 0,0025X_1 \cdot X_3 + 0,085X_2 \cdot X_3 + 0,16708X_1^2 + 0,024583X_2^2 - 0,28792X_3^2$$

$$\mathbf{Ra}_{\text{optimale}} = 0,38 \pm 0,10 \mu\text{m} \quad \text{avec } P_y = 11,7 \text{ Kgf} ; f = 0,054 \text{ mm/tr} ; r = 3 \text{ mm}$$

Réponse relative à la dureté superficielle « Hv » :

$$\mathbf{H_v} = 274 + 2,875X_1 - 2,75X_2 - 1,625X_3 + 4,75X_1 X_2 - 4,5X_1 X_3 + 16,25X_2 X_3 - 17X_1^2 + 2,75X_2^2 - 24X_3^2$$

$$\mathbf{Hv}_{\text{optimale}} = 282,8 \pm 12,5 \text{ Kgf/mm}^2 \quad \text{avec } P_y = 12 \text{ Kgf} ; f = 0,054 \text{ mm/tr} ; r = 2,31 \text{ mm}$$

### **Matériau XC48**

Réponse relative à la Rugosité « Ra » :

$$\mathbf{Ra} = 0,61 - 0,0225X_1 + 0,055X_2 - 0,1375X_3 + 0,025X_1 \cdot X_2 - 0,045X_1 \cdot X_3 + 0,03X_2 \cdot X_3 + 0,0875X_1^2 - 0,0475X_2^2 + 0,048X_3^2$$

$$\mathbf{Ra}_{\text{optimale}} = 0,37 \pm 0,1 \mu\text{m} \quad \text{avec } P_y = 13,6 \text{ Kgf} ; f = 0,054 \text{ mm/tr} ; r = 3 \text{ mm}$$

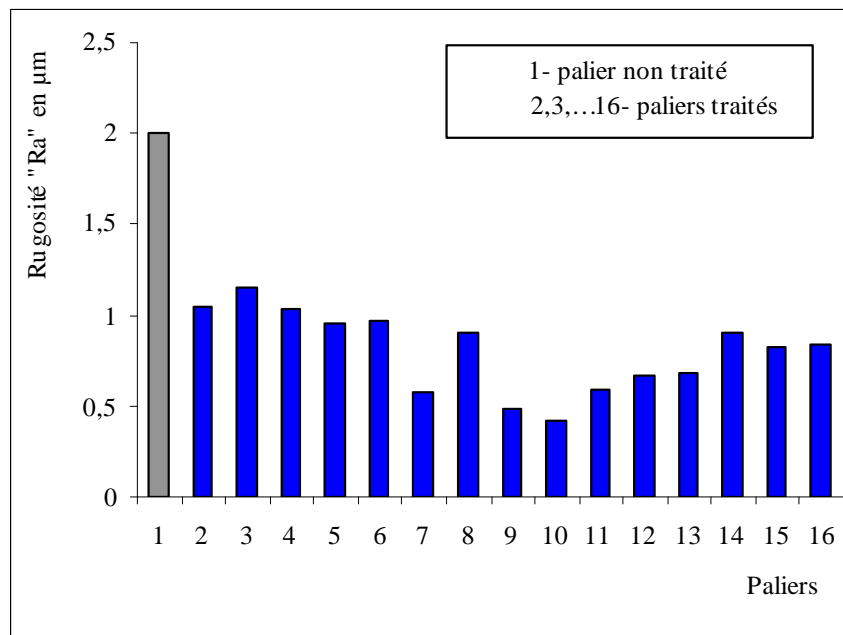
Réponse relative à la dureté superficielle « Hv » :

$$\mathbf{H_v} = 351,67 + 4,375X_1 - 5,375X_2 + 4 \cdot X_3 + 2,75X_1 \cdot X_2 + 4X_1 \cdot X_3 - 4,5X_2 \cdot X_3 + 3,5417X_1^2 - 2,4583X_2^2 - 18,7083X_3^2$$

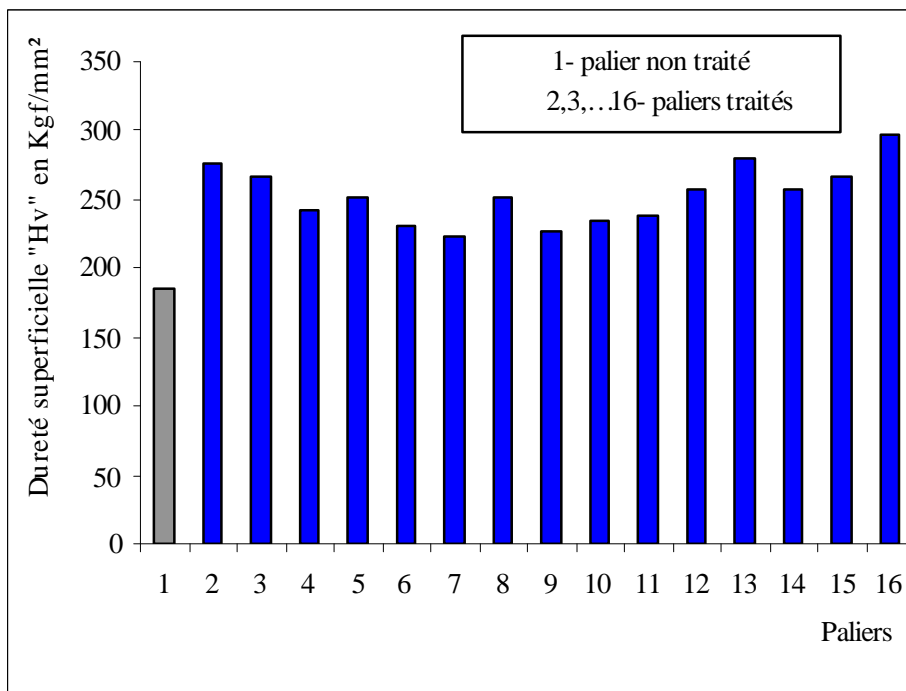
$$\mathbf{Hv}_{\text{optimale}} = 361,9 \pm 9,9 \text{ Kgf/mm}^2 \quad \text{avec } P_y = 16 \text{ Kgf} ; f = 0,059 \text{ mm/tr} ; r = 2,66 \text{ mm}$$

#### **4.3.1.3.3 Effets du traitement**

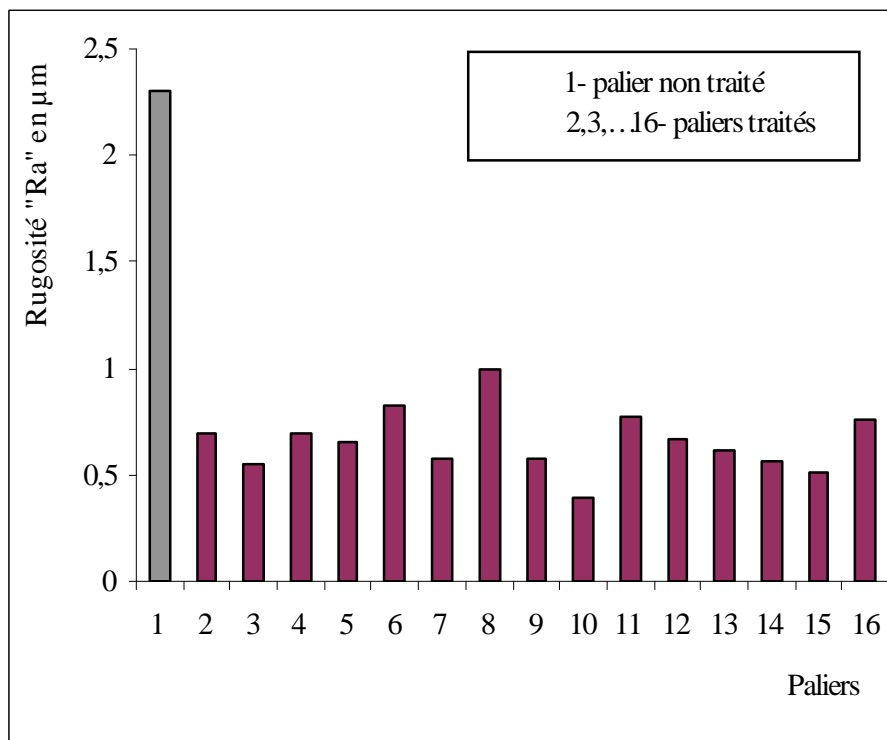
La plastification produite par le brunissage au diamant a pour conséquence l'amélioration de l'état de surface par diminution de « Ra » et l'écrouissage qui en découle permet de l'élévation de la dureté superficielle « Hv ». L'influence des paramètres de traitement correspondante à chaque palier est montrée dans les **figure4.22**, **figure4.23**, **figure4.24** et **figure4.25**.



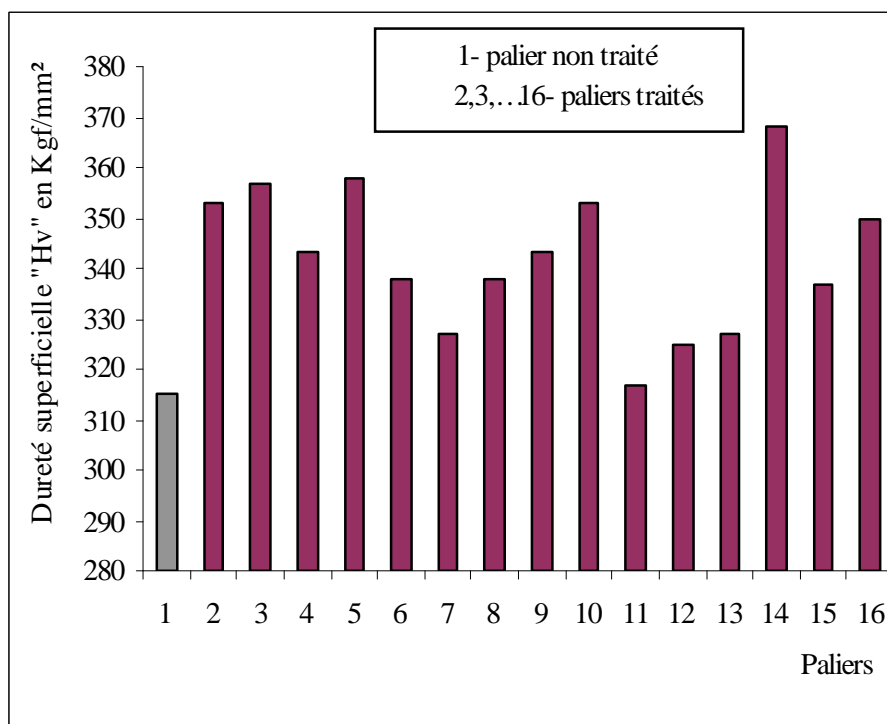
**Figure4.22** Variation de la Rugosité « Ra » suite au brunissage, matériau XC18.



**Figure4.23** Variation de la dureté superficielle « Hv » suite au brunissage, matériau XC18.



**Figure 4.24** Variation de la Rugosité « Ra » suite au brunissage, matériau XC48.



**Figure4.25** Variation de la dureté superficielle « Hv » suite au brunissage, matériau XC48.

### 4.3.2 Deuxième partie: Traitement par plans d'expériences à quatre facteurs

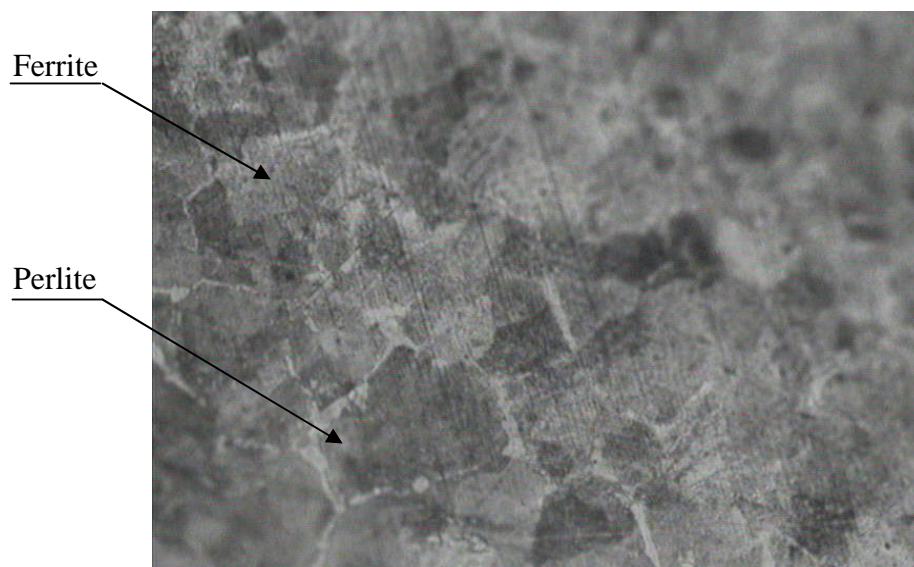
Dans cette partie nous considérons l'influence de quatre facteurs : la force de brunissage, l'avance, le rayon de la bille et le nombre de passes.

#### 4.3.2.1 Matériau

Le matériau qu'on se propose d'étudier est sous forme de barreau d'acier ( $\varnothing 16$ ) livré par l'entreprise FERROVIAL Annaba. Les analyses réalisées au Laboratoire centrale de MITTAL STEEL et au Laboratoire du département de Métallurgie ont permis de fournir la composition chimique, et la micro-structure du matériau. Ce qui correspond à l'acier XC48.

**Tableau4.7a** Composition chimique

<i>Eléments Chimiques</i> %	C	Mn	Si	S	P	Cu	C <sub>r</sub>	Mo
	0.47÷0.53	0.66	0.27	0.015	0.018	0.165	0.184	0.038



**Figure4.26** micro structure du matériau XC48 GX 600

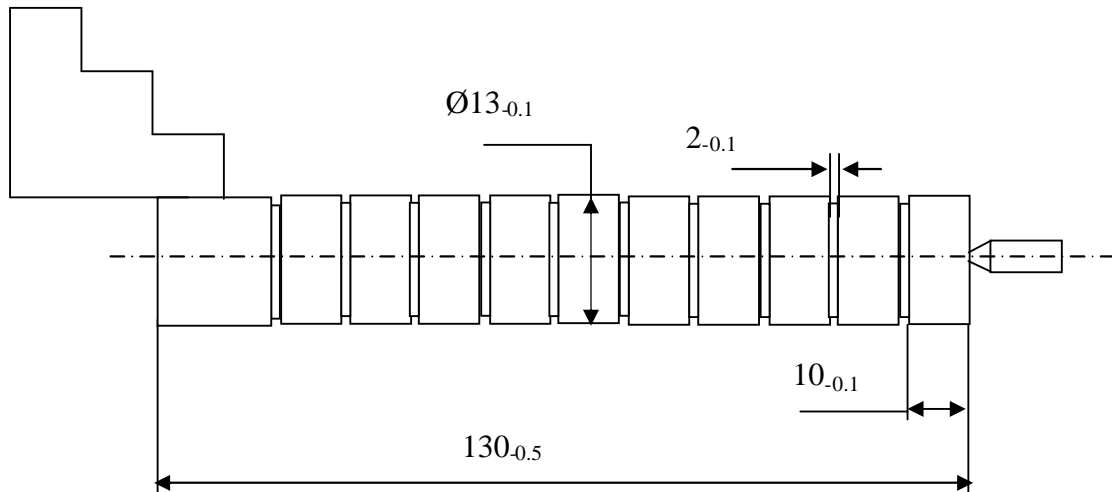
Les essais mécaniques effectués au niveau du Laboratoire du LFR MITTAL STEEL ont permis de déterminer les caractéristiques du matériau qui sont consignées dans le **tableau 4.7b**.

**Tableau 4.7b** Caractéristiques mécaniques

Limite élastique « Re »	Contrainte de rupture « Rm »	Allongement « A »
318 MPa	550÷680 MPa	A > 17%

### 4.3.2.2 Préparation des éprouvettes

Trois éprouvettes découpées du même barreau sont préparées par tournage et subdivisées en 10 paliers chacune (**Figure4.27**) en raison de la méthode de planification d'expériences (Box-behnken) qui exige 27 essais (4 facteurs à 3 niveaux). Lors de la préparation par tournage, on emploie les mêmes régimes de coupe (**voir § 4.3.1.2**).



**Figure4.27** Epreuve préparée sur tour.

Le montage de la pièce est mixte et semi rigide [83]

$$L^{0.75} / D = 130^{0.75} / 13 = 2.96 < 3$$

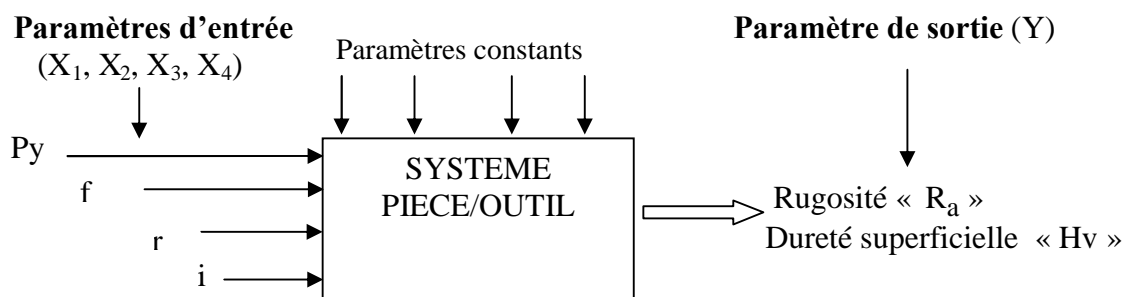
Les valeurs moyennes de rugosité « Ra » et de dureté superficielle « Hv » mesurées après l'opération de tournage sont respectivement :

$$Ra=1.56 \mu\text{m} ; Hv=308\text{Kgf/mm}^2$$

### 4.3.2.3 Traitement par brunissage

La procédure de traitement par brunissage est pratiquement la même que celle réalisée précédemment, sauf que dans ce cas l'exécution des 27 essais exigent le démontage fréquent des pièces, ce qui a demandé beaucoup de soins afin de préserver des conditions stables lors de l'expérimentation.

Le régime retenu est présenté dans le **tableau4.8**. Pour mettre en évidence l'effet des paramètres ( $P_y$ ,  $f$ ,  $r$  et  $i$ ), nous avons opéré selon le schéma ci-dessous.



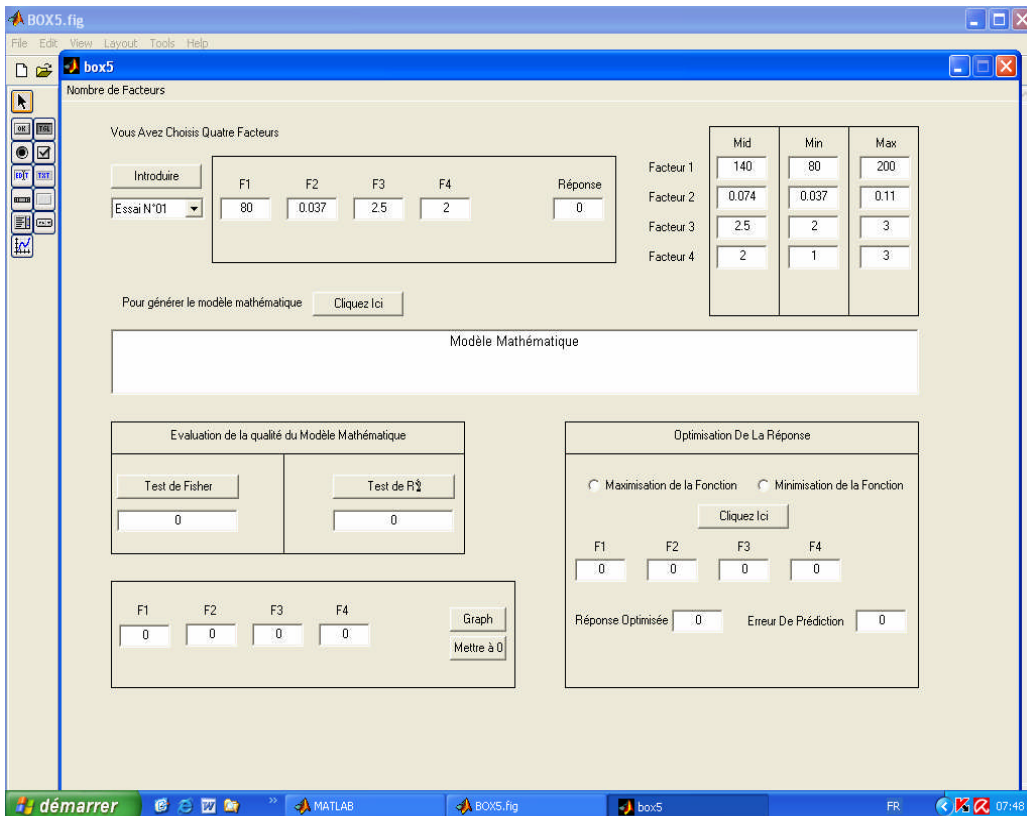
**Figure4.28** Schéma des essais

Le modèle de planification d'expérience adopté prend en compte trois niveaux et quatre facteurs selon la matrice suivante (**tableau4.8**).

**Tableau4.8** Matrice de travail

Paramètres du régime	Codes	Niveaux de variation		
		Min(-1)	Moy (0)	Max(+1)
Py (Kgf)	X <sub>1</sub>	8	14	20
f (mm/trs)	X <sub>2</sub>	0.037	0.074	0.11
r (mm)	X <sub>3</sub>	2	2.5	3
i (passes)	X <sub>4</sub>	1	2	3

L'opération de traitement par brunissage est réalisée en suivant la démarche fournie par le programme selon l'interface de la **figure4.29**.



**Figure4.29** Feuille de travail

Les pièces réalisées par brunissages sont représentées sur la **figure4.30**.

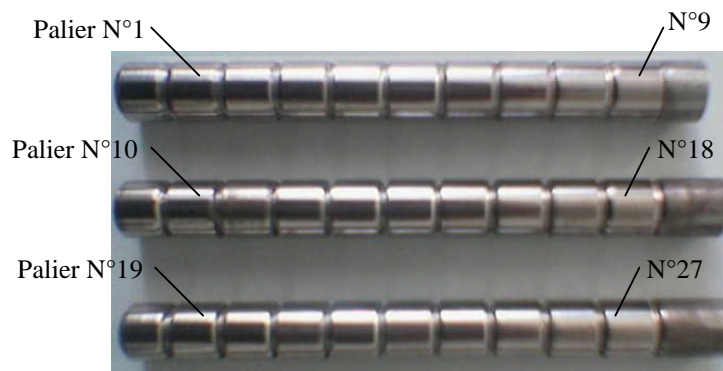
Les valeurs de la rugosité «Ra »et de la dureté superficielle « Hv » mesurées après le traitement sont regroupées dans le **tableau4.9** et le **tableau4.10**.

**Tableau4.9** Rugosité « Ra » en  $\mu\text{m}$

Essai N°	1 <sup>ère</sup> Mesure	2 <sup>ème</sup> Mesure	3 <sup>ème</sup> Mesure	moyenne
1	0.73	0.72	0.75	0.73
2	0.61	0.56	0.63	0.60
3	0.62	0.81	0.72	0.72
4	0.72	0.93	0.73	0.79
5	0.37	0.40	0.42	0.40
6	0.43	0.39	0.35	0.39
7	0.25	0.24	0.31	0.34
8	0.49	0.49	0.42	0.47
9	0.52	0.42	0.53	0.49
10	0.64	0.59	0.62	0.62
11	0.85	1.08	0.79	0.96
12	1.16	1.08	1.15	1.13
13	0.46	0.48	0.44	0.46
14	0.49	0.58	0.62	0.56
15	0.62	0.65	0.47	0.58
16	0.51	0.47	0.50	0.49
17	0.83	0.88	0.87	0.86
18	0.82	0.85	0.71	0.79
19	0.42	0.44	0.43	0.43
20	0.58	0.44	0.57	0.53
21	0.47	0.61	0.60	0.56
22	0.74	0.77	0.69	0.73
23	0.64	0.65	0.69	0.66
24	0.82	0.60	0.74	0.74
25	0.42	0.35	0.43	0.41
26	0.39	0.49	0.53	0.47
27	0.58	0.49	0.51	0.52

**Tableau4.10** Dureté superficielle « Hv » en  $(\text{kgf}/\text{mm}^2)$

Essai N°	1 <sup>ère</sup> Mesure	2 <sup>ème</sup> Mesure	3 <sup>ème</sup> Mesure	moyenne
1	340	340	345	342
2	335	320	325	327
3	355	375	355	362
4	340	355	360	352
5	390	370	370	377
6	350	355	350	352
7	360	370	360	353
8	365	355	345	356
9	330	350	330	330
10	390	360	385	388
11	370	330	475	365
12	350	390	400	383
13	360	350	370	353
14	340	370	385	362
15	370	330	370	373
16	385	360	370	380
17	360	380	370	363
18	365	385	380	370
19	355	360	360	373
20	365	360	355	363
21	375	355	375	367
22	350	375	340	343
23	380	370	390	387
24	350	340	340	348
25	370	390	390	387
26	370	370	370	370
27	375	390	385	383



**Figure4.30** Pièces traitées par brunissage

Les valeurs des réponses « Ra » et « Hv » sont injectées dans le champ correspondant (Réponse). Les traitements mathématiques (transformation en matrices de substitution, calculs des paramètres statistiques, établissement des équations du modèle mathématique, calcul de la réponse optimale et de l'erreur de prédiction), permet de fournir les résultats correspondant à chaque réponse sur la **figure4.31** et la **figure4.32**.

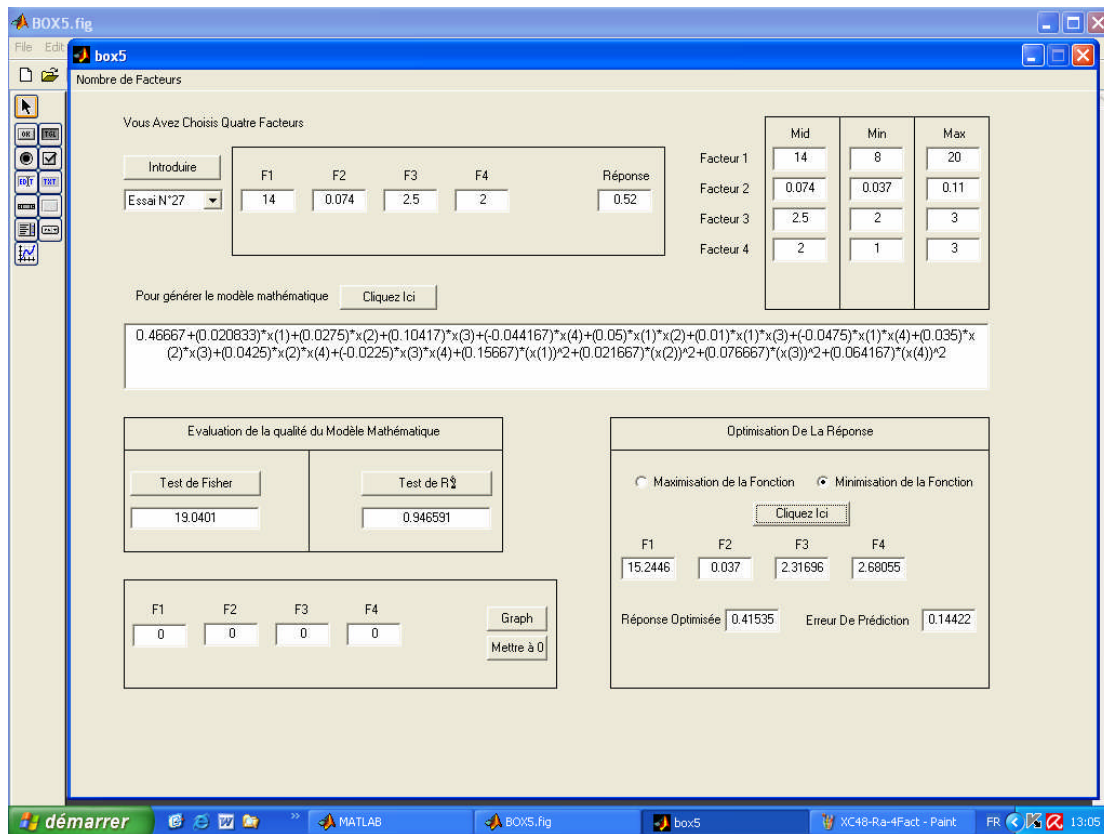


Figure 4.31 Réponses et modèle mathématique correspondant à la rugosité « Ra »

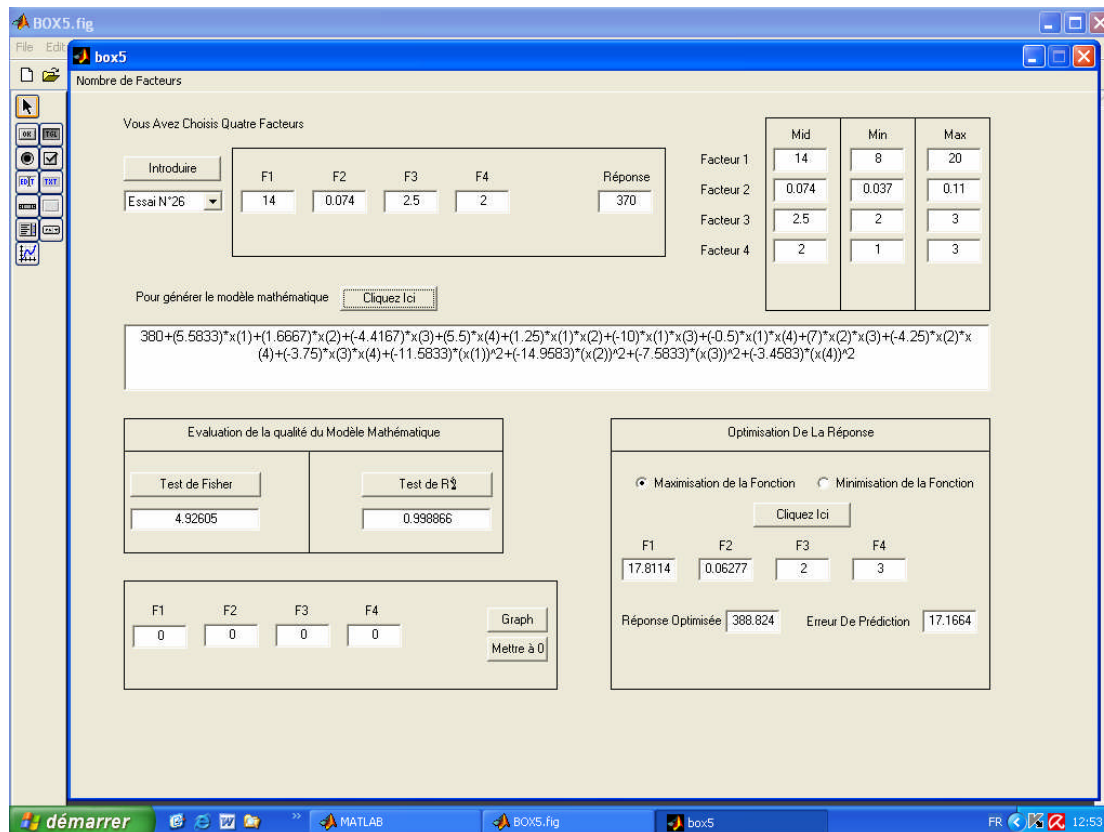


Figure 4.32 Réponses et modèle mathématique correspondant à la dureté superficielle « Hv ».

Les équations du modèle ainsi obtenues pour les réponses considérées ont pour expressions finales :

**Réponse relative à la rugosité « Ra » :**

$$Ra = 0,467 + 0,02X_1 + 0,0027X_2 + 0,104X_3 - 0,044X_4 + 0,05X_1X_2 + 0,01X_1X_3 - 0,047X_1X_4 + 0,042X_2X_4 - 0,022X_3X_4 + 0,157X_1^2 + 0,022X_2^2 + 0,077X_3^2 + 0,064X_4^2$$

$Ra_{optimale} = 0,42 \pm 0,14\mu m$  avec  $P_y = 15,3 \text{ Kgf}$  ;  $f = 0,037 \text{ mm/tr}$  ;  $r = 2,32 \text{ mm}$  ;  $i = 2,68$

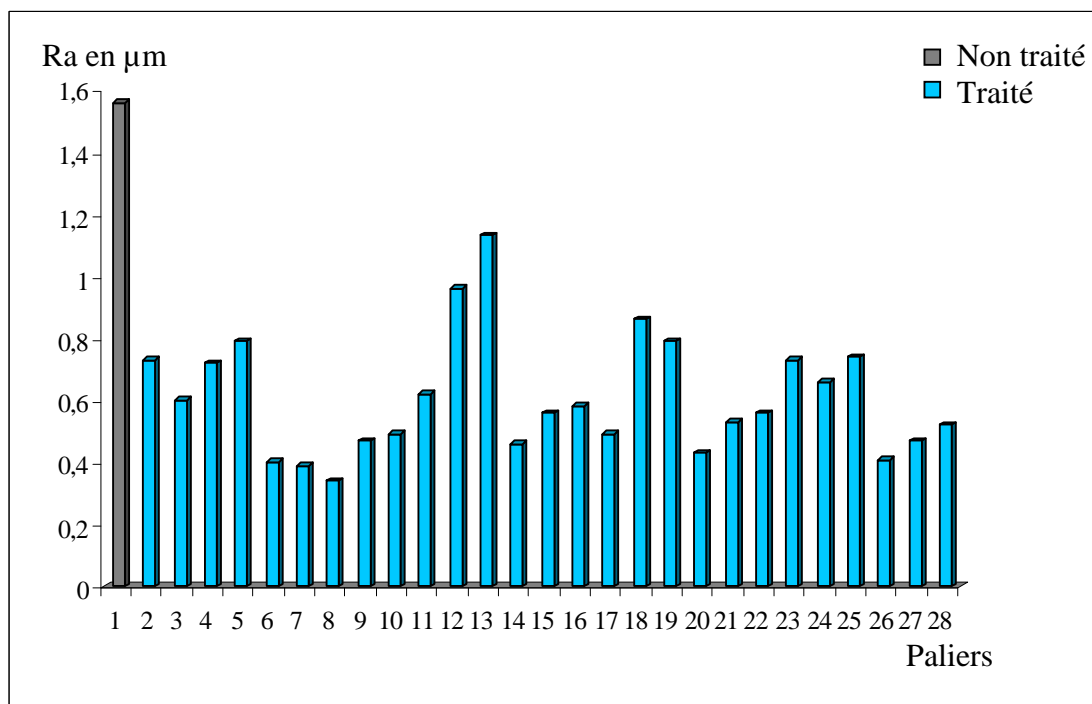
**Réponse relative à la dureté superficielle « Hv » :**

$$H_v = 380 + 5,583X_1 + 1,667X_2 - 4,417X_3 + 5,5X_4 + 1,25X_1X_2 - 10X_1X_3 - 0,5X_1X_4 + 7X_2X_3 - 4,25X_2X_4 - 3,75X_3X_4 - 11,583X_1^2 - 14,958X_2^2 - 7,583X_3^2 - 3,458X_4^2$$

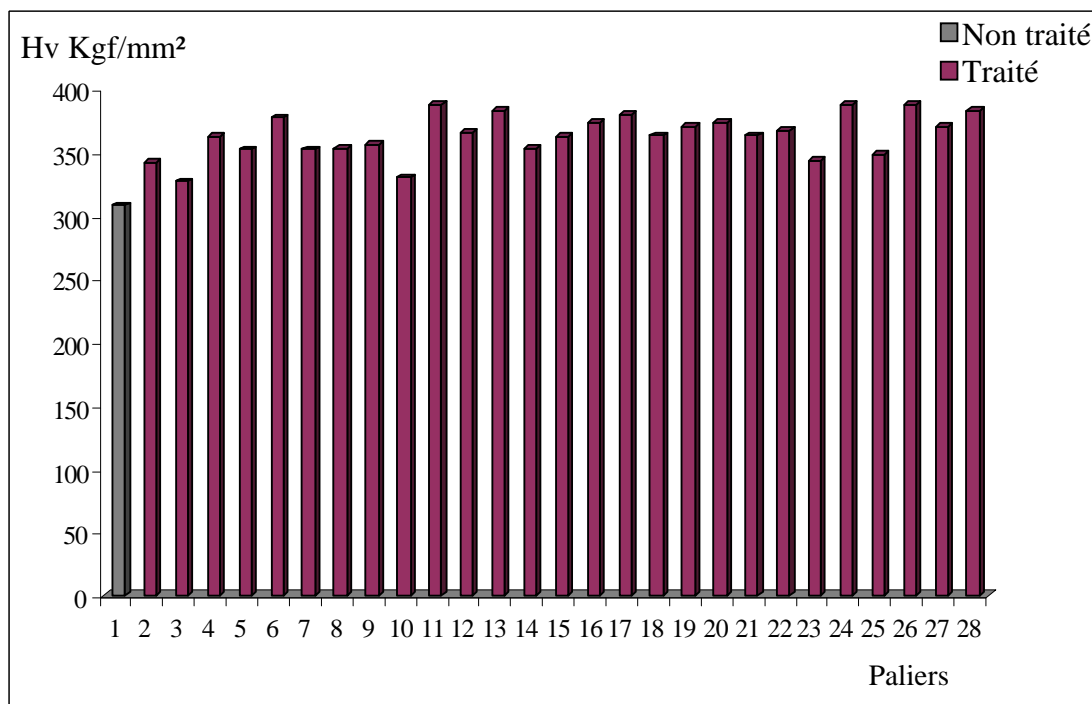
$Hv_{optimale} = 388,8 \pm 17,2 \text{ Kgf/mm}^2$  avec  $P_y = 17,8 \text{ Kgf}$  ;  $f = 0,063 \text{ mm/tr}$  ;  $r = 2 \text{ mm}$  ;  $i = 3$

**4.3.2.4 Effets du traitement**

Les effets des paramètres de traitement relativement à chaque palier sont montrés dans les figure4.33, figure4.34.



**Figure4.33** Variation de la Rugosité « Ra » suite au brunissage



**Figure4.34** Variation de la dureté superficielle « Hv » suite au brunissage

De ces résultats, nous constatons que l'effet de brunissage au diamant est toujours conséquent tant sur la rugosité « Ra » que sur la dureté « Hv ».

## 4.4 Tests d'usure

Dans cette partie, on se propose de réaliser des tests d'usure sur les échantillons d'acier XC48, afin d'examiner les effets du traitement par brunissage au diamant sur leurs tenues à l'usure. On procède ainsi par une étude comparative en effectuant les tests sur des échantillons non traités (tournées) et sur des échantillons traités par brunissage.

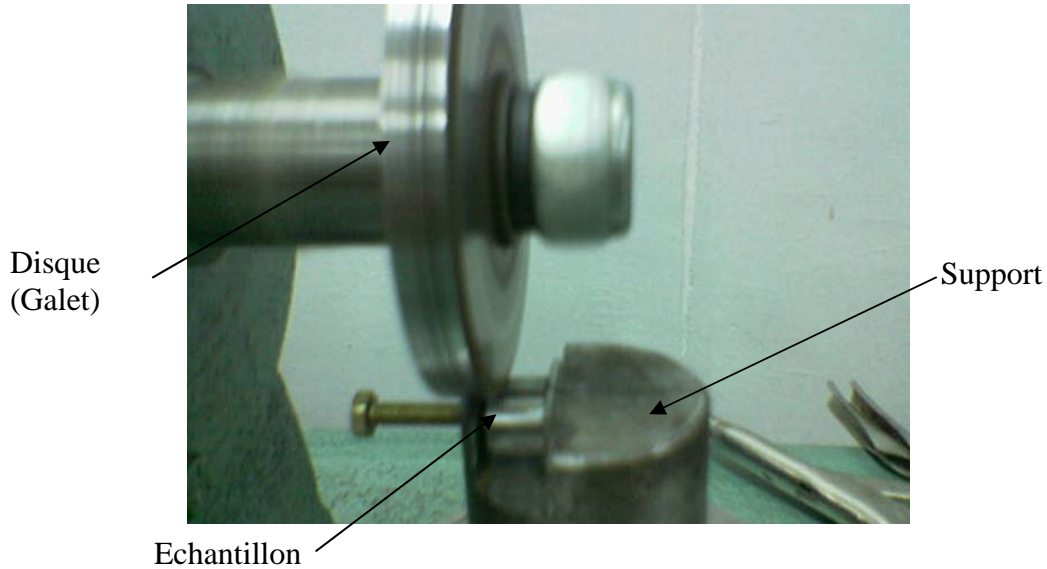
### 4.4.1 Essai d'usure

Les tests d'usure sont effectués au moyen de l'appareil « tribomètre » (cf § 4.2.5), sur deux échantillons, le premier à l'état tourné, et le second traité par brunissage avec le régime ( $P_y = 18$  kgf,  $f = 0.054$  mm/tr,  $r = 2$  mm,  $i = 3$  passes) optimal fourni par le modèle mathématique postulé, permettant d'offrir une dureté superficielle « Hv » Maximale (cf § 4.3.2.3). Dans les deux cas les échantillons sont soumis à une force normale « $F_N$ » produite par une charge « $P_{ch}$ » et à une vitesse de rotation fixe.

### 4.4.2 Description et mode opératoire

Le galet est entraîné à la vitesse constantes  $n=950$  tr/min. On mesure la force tangentielle générée dans le couple (Echantillon - Disque) sous une charge  $P_{ch}=10$  N pendant 20 min. Cette démarche

permet d'établir, l'évolution du coefficient de frottement  $Cf=f(t)$  et celle de l'usure  $h=f(t)$  . Le montage du test est présenté sur la figure ci-dessous :



**Figure4.35** Echantillon pendant le test d'usure

#### 4.4.3 Calcul du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement " $Cf$ " est défini comme le rapport de la force tangentielle " $Ft$ " sur la force normale " $F_N$ ".

$$Cf = \frac{Ft}{F_N} \quad (1)$$

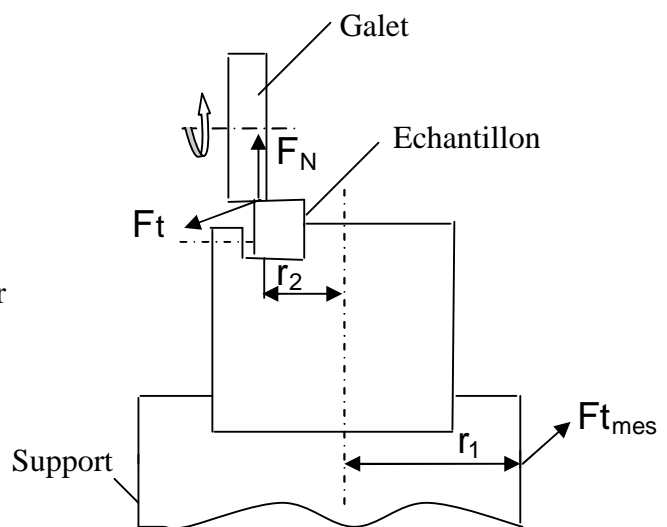
$F_N$  : force normale

$Ft$  : force tangentielle au point de contact (Galet-Echantillon)

$Ft_{mes}$  : force tangentielle mesurée par le capteur

$r_1$ : la distance entre le capteur et l'axe de l'échantillon ( $r_1= 42$  mm)

$r_2$ : la distance entre l'axe de l'échantillon et le point de contact ( $r_2= 18.5$  mm)



**Figure 4.36** Mesure de l'effort tangentiel du Couple (galet / échantillon)

$$\sum M / O = 0 \Rightarrow Ft_{mes} \times r_1 = Ft \times r_2 \quad (2)$$

$$\Rightarrow Ft = Ft_{mes} \times \frac{r_1}{r_2}$$

D'après la formule (1) :

$$Cf = Ft_{mes} \cdot \frac{r_1}{r_2} \cdot \frac{1}{F_N} \quad (3)$$

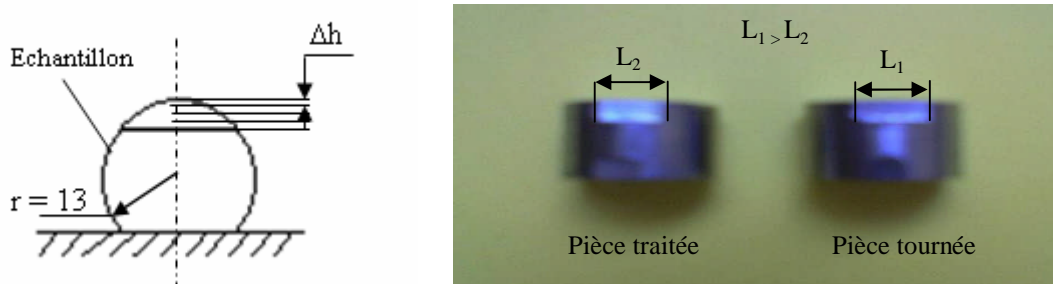
avec

$$F_N = P_{ch} \cdot \frac{l_2}{l_1} \quad (4)$$

Avec  $l_1 = 185$  mm et  $l_2 = 618$  mm (cf § 4.2.5)

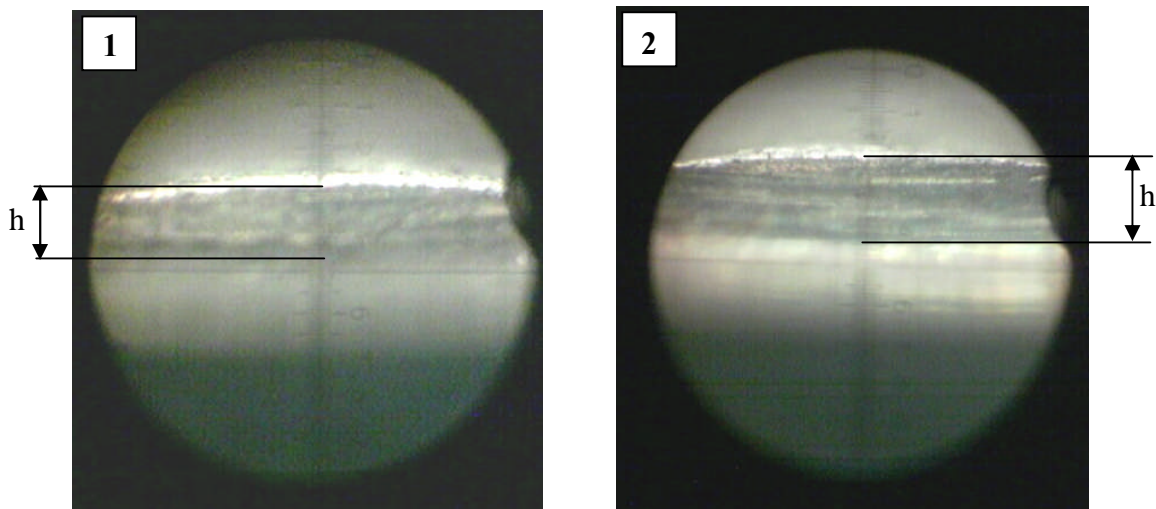
#### 4.4.4 Résultats du test

L'usure " $\Delta h$ " est mesurée à l'aide du microscope optique présenté au paragraphe § 4.2.5.



**Figure 4.37** les échantillons après les tests d'usure

Les observations au microscope ont permis de dégager les figures ci-dessous :



**Figure 4.38** Observation des échantillons après usure (G X50)  
1- Echantillon traité ; 2- Echantillon non traité

Les valeurs de l'effort tangentielle " Ft ", du coefficient de frottement " Cf " ainsi que celles de l'évolution de l'usure " h " sont consignées dans les tableaux ci-dessous :

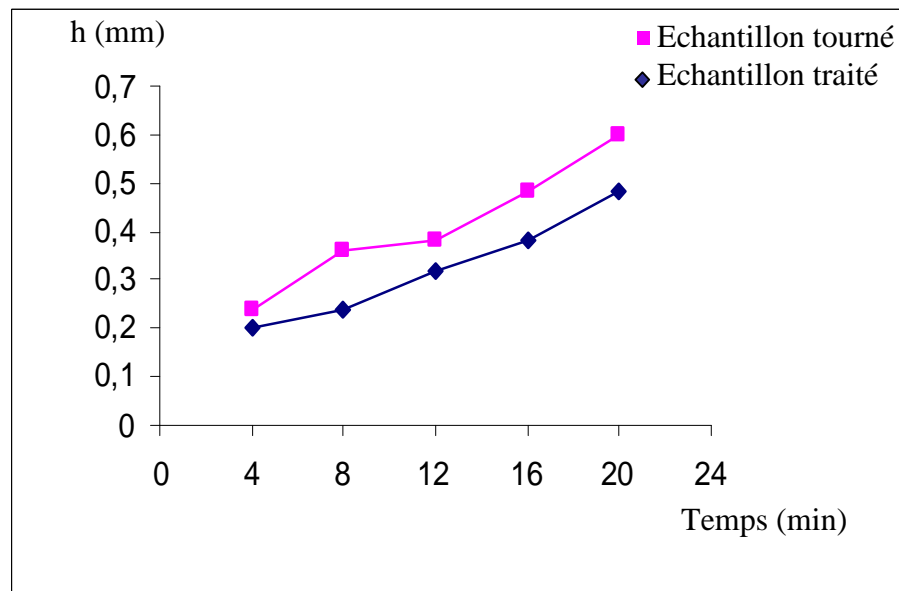
**Tableau 4.11** Echantillon tourné et traité par brunissage

Temps (min)	4	8	12	16	20
Ft <sub>mes</sub> (u)	204	177	164	143	132
Ft <sub>mes</sub> .0.02	4.08	3.54	3.28	2.86	2.64
Ft (N)	9.30	8.07	7.48	6.52	6.01
h (mm)	0.20	0.24	0.32	0.38	0.48
Cf	0.28	0.24	0.22	0.20	0.18

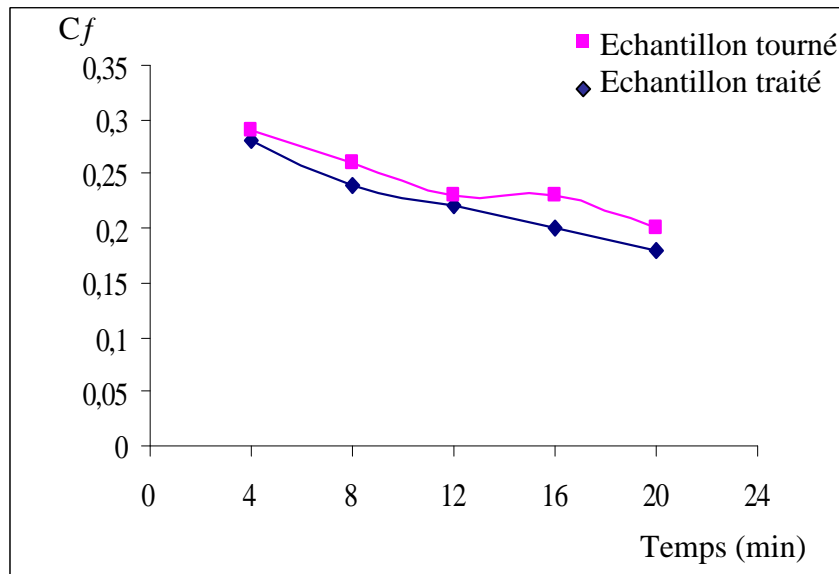
**Tableau 4.12** Echantillon tournée (non traité)

Temps (min)	4	8	12	16	20
Ft <sub>mes</sub> (u)	213	189	169	170	143
Ft <sub>mes</sub> .0.02	4.26	3.78	3.38	3.4	2.86
Ft (N)	9.71	8.61	7.70	7.75	6.52
h (mm)	0.24	0.36	0.38	0.48	0.60
Cf	0.29	0.26	0.23	0.23	0.20

L'évolution de l'usure " h " et du coefficient de frottement " Cf " sont illustrés sur la **figures4.39** et la **figure4.40**.



**Figure 4.39** Evolution de l'usure " h " en fonction du temps.

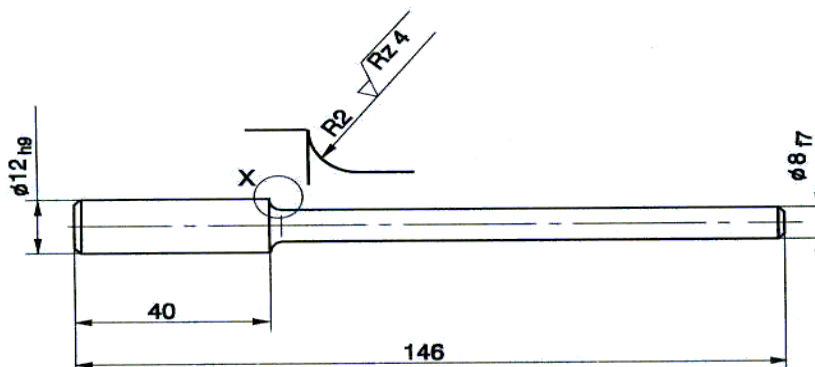


**Figure 4.40** Evolution du coefficient de frottement " Cf " en fonction du temps.

Pour l'échantillon traité par brunissage on remarque deux paliers d'usure, le premier apparaît dans les 8 premières minutes où l'usure relative se manifeste lentement avec  $\Delta h = 0.04$  mm, par contre pour la pièce non traitée elle est de 0.12 mm, soit 3 fois supérieure. Dans le second palier l'usure s'accroît davantage en atteignant 0.48 mm pour la pièce traitée et de 0.60 mm pour la pièce non traitée. Ce qui peut s'expliquer par l'effet de durcissement et l'amélioration de la topographie de la couche superficielle, obtenus par le traitement.

#### 4.5 Essais de Fatigue

Pour le matériau utilisé précédemment pour les échantillons d'usure, on réalise des essais de fatigue sur deux séries d'éprouvettes distinctement parachevées par deux procédés de finition (rectification à la meule et brunissage au diamant). Les éprouvettes sont préparées selon les recommandations (GUNT) [82], voir dessin :



**Figure 4.41** Epreuve d'essai de fatigue

Les éprouvettes sont en premier lieu préparées par tournage, puis finies par les procédés envisagés.

#### 4.5.1 Préparation par tournage

Les éprouvettes sont préalablement préparées par tournage à partir de barreaux de dimension ( $\varnothing 16 \times 155$ ) en suivant le même contrat de phase et selon les conditions suivants :

Machine outil : tour à charioter et fileter 16D20

Outil à charioter et dresser à plaquette amovible en carbure (P10)

Montage mixte

Régime de coupe :

- Opération d'ébauche :  $n = 630$  tr/min ;  $f = 0,67$  mm/tr ;  $a = 0,75$  mm
- Opération de finition :  $n = 1250$  tr/min ;  $f = 0,34$  mm/tr ;  $a = 0,5$  mm

#### 4.5.2 Finition par rectification

Machine outil : rectifieuse cylindrique universelle SA6/1U

Rectification en enfilade  $\varnothing 8$  f7

Outil : meule cylindrique 600x125x300, désignation 38A36J8VG

Montage mixte

Régime de rectification :  $n_{\text{meule}} = 3000$  tr/min ;  $n_{\text{pièce}} = 100$  tr/min ;  $f_l = 0.02$  mm/tr

Les valeurs de rugosité (Ra) et de dureté superficielle (Hv) des éprouvettes de la première série sont consignées dans les tableaux suivants :

**Tableau 4.13** Rugosités (Ra) après tournage

Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4	
Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )
4,05	3,23	3,71	3,33	3,36	3,28	2,54	3,04
3,14		3,40		3,21		3,31	
2,52		2,89		3,29		3,27	

**Tableau 4.14** Rugosité (Ra) après rectification

Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4	
Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu\text{m}$ )
0,92	0,71	0,93	0,74	1,05	0,85	0,87	0,83
0,63		0,80		0,85		0,90	
0,60		0,50		0,67		0,72	

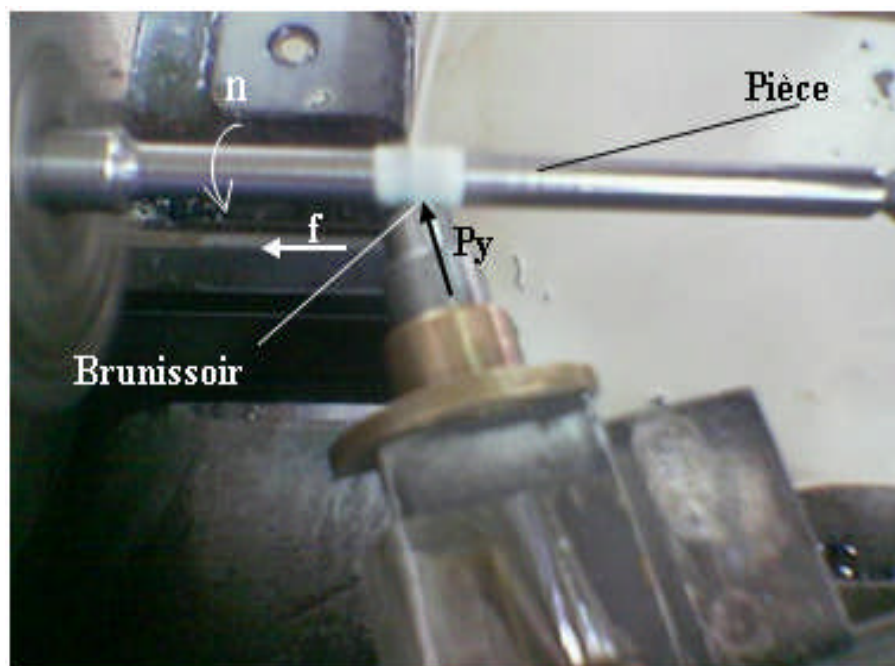
La dureté moyenne des éprouvettes tournées est de :  $Hv = 230 \div 290 \text{ kgf/mm}^2$

**Tableau 4.15 valeurs moyennes de dureté Hv après rectification**

Mesure de dureté VICKERS (Hv moyenne)				
Pièces	P1	P2	P3	P4
Dureté Hv ( $\text{kgf/mm}^2$ )	280	285	295	270

#### 4.5.3 Traitement par brunissage :

L'opération est réalisée sur le tour selon le montage présenté dans la **figure4.42** ci-dessous :



**Figure4.42** finition par brunissage au diamant

Le régime de brunissage adopté relève des résultats favorisant les duretés (Hv) les plus élevées obtenus par les travaux précédents (cf § 4.3.2.3)

L'effort de pression :  $Py = 18 \text{ Kgf}$

L'avance de brunissage :  $f = 0,054 \text{ mm/tr}$

Le rayon du brunissoir :  $r = 2 \text{ mm}$

Nombre de passes : 3

Le travail est accompagné d'un arrosage abondant dans la zone de déformation.

Les valeurs de rugosité enregistrées sur les éprouvettes lors du tournage et du brunissage sont consignées sur les tableaux suivants :

**Tableau 4.16** Rugosité (Ra) après tournage

Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4	
Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )
4,11	3,57	4,27	4,79	3,72	3,55	2,80	2,69
3,97		5,05		3,80		2,46	
2,63		5,07		3,14		2,81	

**Tableau 4.17** Rugosité (Ra) suite au brunissage

Pièce 1		Pièce 2		Pièce 3		Pièce 4	
Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )	Ra ( $\mu m$ )	Ra <sub>moy</sub> ( $\mu m$ )
0,66	0,64	0,87	0,94	0,49	0,79	0,84	0,82
0,61		1,06		1,02		0,80	
0,66		0,90		0,86		0,84	

Les valeurs moyennes de la dureté Hv enregistrées sur les éprouvettes traitées par brunissage sont consignées sur le tableau ci-dessous:

**Tableau 4.18** Duretés moyennes Hv suite au brunissage

Pièces	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
Dureté Hv (kgf/mm <sup>2</sup> )	370	350	335	340

#### 4.5.4 Essais de fatigue

Les essais de fatigue sont réalisés au laboratoire du département de mécanique, sur la machine (**cf §4.2.6**). En raison du nombre limité des éprouvettes, nous avons adopté la méthode itérative.

##### 4.5.4.1 Essais sur éprouvettes rectifiées

Le premier essai a été réalisé avec une valeur de contrainte  $\sigma_a < 30\%$  de la contrainte de rupture " $\bar{\sigma}_m$ ".

Essai n°=1

$$\bar{\sigma}_m = 570 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_a = \frac{32 \cdot a \cdot F}{\pi d^3} \Rightarrow F = \frac{\sigma_a \cdot \pi \cdot d^3}{32 \cdot a} = \frac{400 \cdot \pi \cdot 8^3}{32 \cdot 100,5} = 200 \text{ N}$$

Essai n°= 2

$$\bar{\sigma}_a = 320 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow F = 160 \text{ N}$$

Essai n°= 3

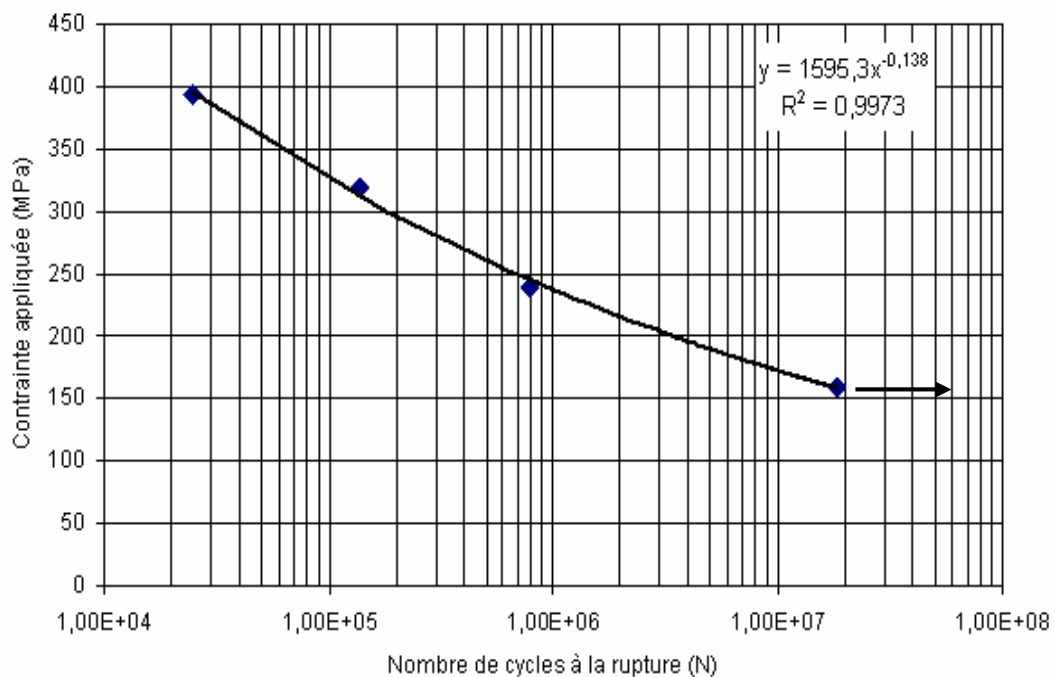
$$\bar{\sigma}_a = 240 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow F = 120N$$

Essai n°= 4

$$\bar{\sigma}_a = 160 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow F = 80N$$

**Tableau4.19** Résultats d'essais de fatigue des éprouvettes rectifiées

N° pièce	Charge en (N)	Contrainte $\bar{\sigma}_a$ en (N/mm <sup>2</sup> )	Nombre de cycles (N)	Durée de l'essai
P1	200	394	24798	08 min
P2	160	318	139183	47 min
P3	120	239	780540	4h : 24 min
P4	80	160	1840048	11 h : 35 min (non rompue)

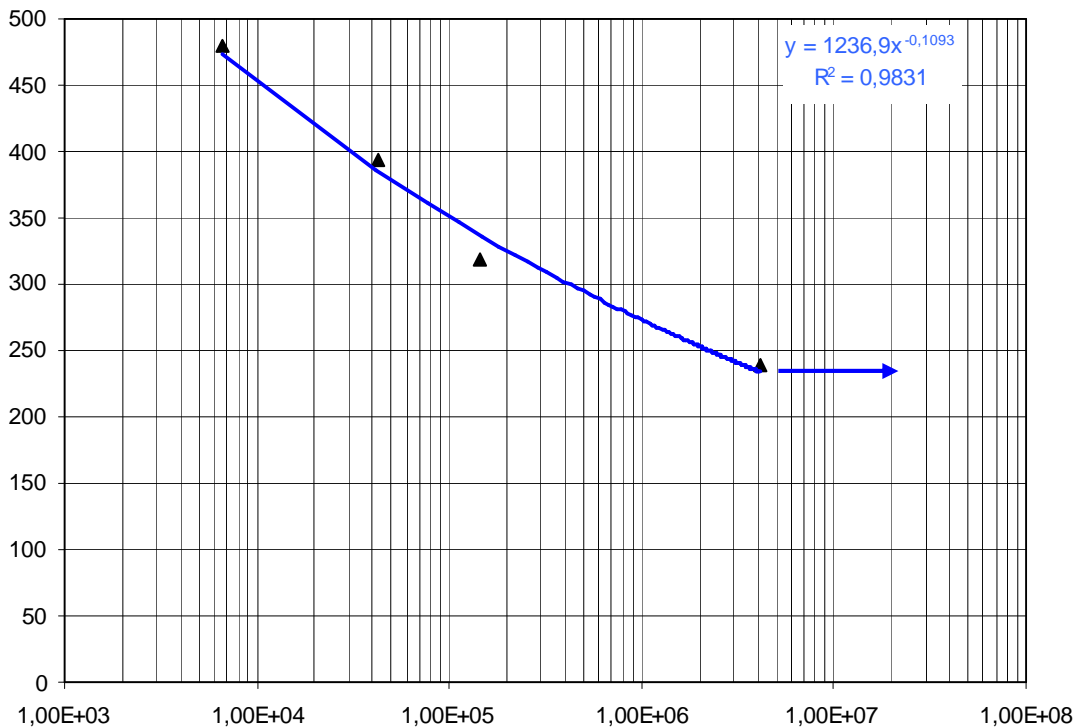


**Figure4.43** Courbe de WÖHLER, éprouvettes rectifiées

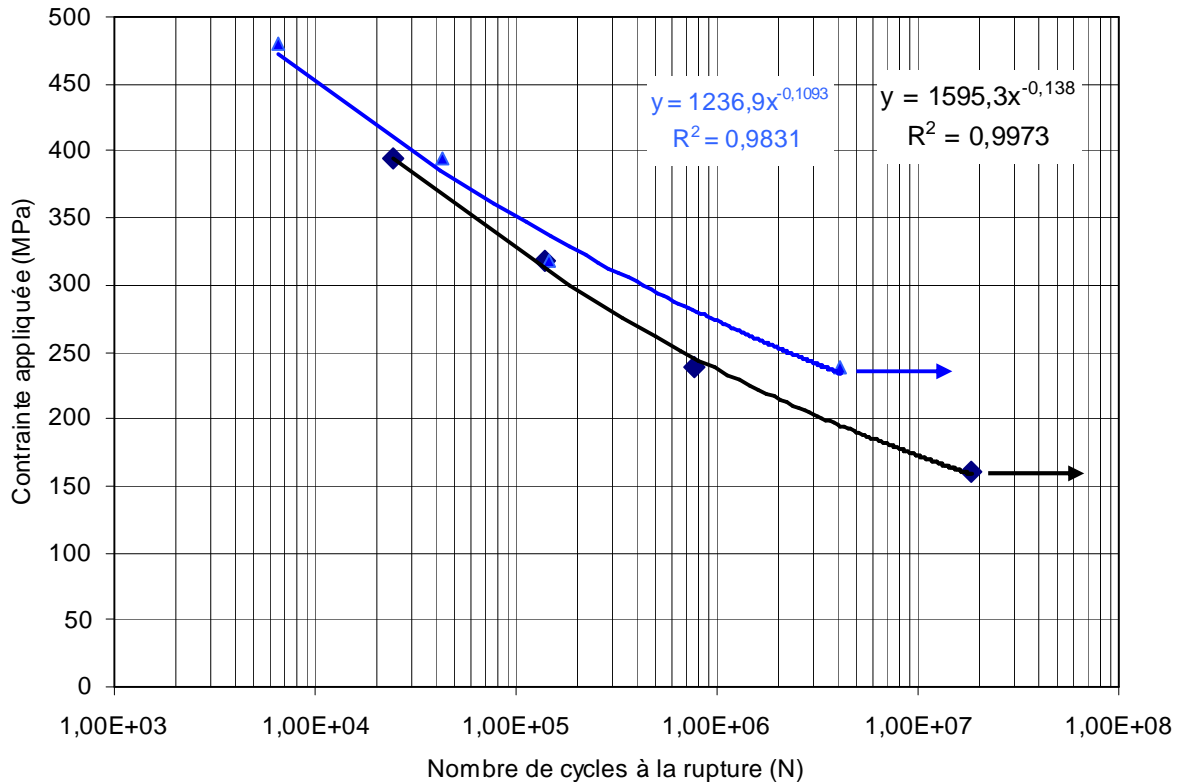
#### 4.5.4.2 Essais sur éprouvettes traitées par brunissage

**Tableau4.20** Résultats d'essais de fatigue des éprouvettes traitées par brunissage

N° pièce	Charge en N	Contrainte $\bar{\sigma}_a$ en N/mm <sup>2</sup>	Nombre de cycles (N)	Durée de l'essai
P1	240	480	6601	02 min 35 s
P2	200	394	42500	15 min 17 s
P3	160	318	146385	49 min 39 s
P4	120	239	4139646	23h : 30 min (non rompue)



**Figure4.44** Courbe de WÖHLER, éprouvettes traitées par brunissage



**Figure 4.45** Courbes de WÖHLER, éprouvettes traitées et rectifiées

## 4.6 Conclusion

Au vu des résultats obtenus pour les matériaux considérés, on peut faire les conclusions suivantes :

Le modèle de box behnken répond convenablement à ce type de traitement de surface (brunissage par diamant) pour les facteurs considérés. Les résultats sont considérés statistiquement valables selon le critère d'ajustement du  $R^2$  qui tend vers 0.98 et le critère de Fisher  $F_{cal}$  qui est toujours inférieur à  $F_{tab}$ ,  $F_{tab}=19.2$  (cas de trois facteurs :  $v_1=3$ ,  $v_2=2$ ) et  $F_{tab}=19.4$  (cas de quatre facteurs :  $v_1=10$ ,  $v_2=2$ ), au niveau de signification 5% [78].

L'accroissement du rayon de la sphère de diamant, offre la meilleure rugosité « Ra ». Tandis que l'élévation de l'avance altère la surface et augmente la rugosité surtout avec l'utilisation des faibles rayons. Les meilleures rugosités s'obtiennent avec les efforts modérés au voisinage de (11.7 Kgf pour l'acier XC18; 13.6 Kgf et 15.3 Kgf pour l'acier XC48, ce qui montre que les matériaux possèdent des réponses différentes en raison de leurs caractéristiques distinctes.

L'augmentation de l'effort de brunissage assure une élévation de la dureté superficielle « Hv », Le maximum d'effet dépend du matériau traité 12 Kgf pour l'acier XC18, 16 Kgf et 17.8 Kgf pour

l'acier XC48. L'accroissement du nombre de passes permet l'augmentation de la dureté superficielle en raison de l'écaillage intensif.

Les tests d'usure sous chargement révèlent que l'échantillon traité par le brunissage au diamant avec le régime optimal préconisé par le modèle mathématique, admet plus de résistance à l'usure (gain de 20 %) que l'échantillon non traité.

Le traitement par brunissage a permis de relever la contrainte de fatigue «  $\bar{\sigma}_D$  » jusqu'à 240 MPa alors que pour les pièces finies par rectification «  $\bar{\sigma}_D$  » elle est de 150 MPa. Parmi les deux modes de finition utilisés, le procédé de brunissage semble être le plus avantageux vis à vis de l'endurance à la flexion alternée qui a été imposée durant les essais.

# Chapitre 5

## SYNTHESE ET DISCUSSION DES RESULTATS

## 5.1 Introduction

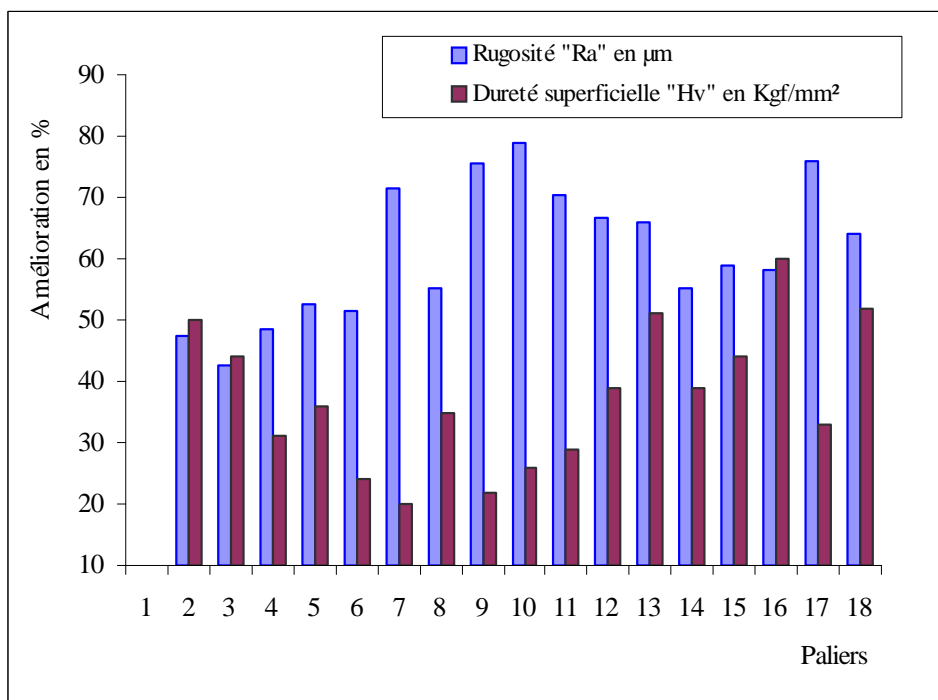
L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du traitement mécanique de surface par déformation plastique de la couche superficielle. Au moyen du modèle mathématique et la démarche informatique, il est possible de quantifier les effets des paramètres de traitement. Ce chapitre est divisé en quatre parties :

- résultats du traitement par brunissage, cas de trois facteurs
- résultats du traitement par brunissage, cas de quatre facteurs
- résultats des tests d'usure
- résultats des essais de fatigue

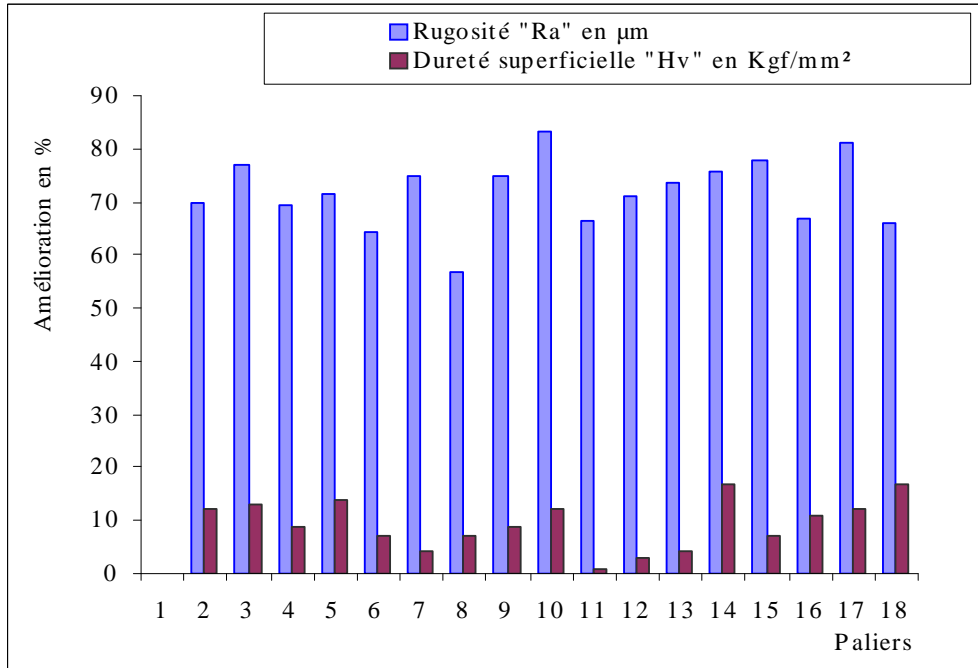
## 5.2 Traitement par trois facteurs

### 5.2.1 Effets des paramètres de traitement

Les courbes exprimant les taux d'amélioration de la rugosité et de la dureté superficielle, relatives pour chaque palier sont illustrées sur les **figure5.1** et **figure5.2**.



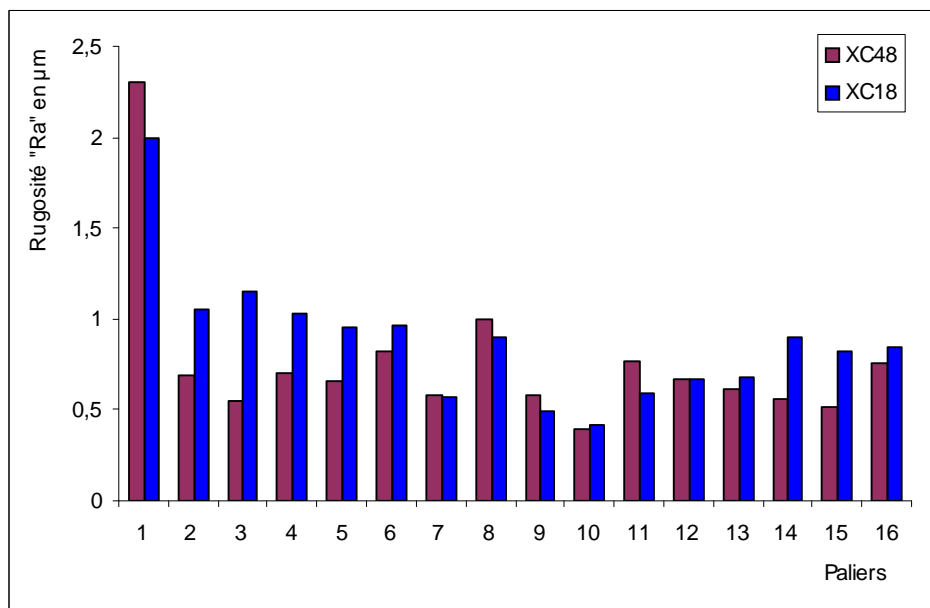
**Figure5.1** Rugosité et dureté superficielle relatives aux régimes Appliqués  
- Palier 17- Test régime optimal pour « Ra »;  
- Palier 18- Test régime optimal pour « Hv »,  
Matériau XC18.



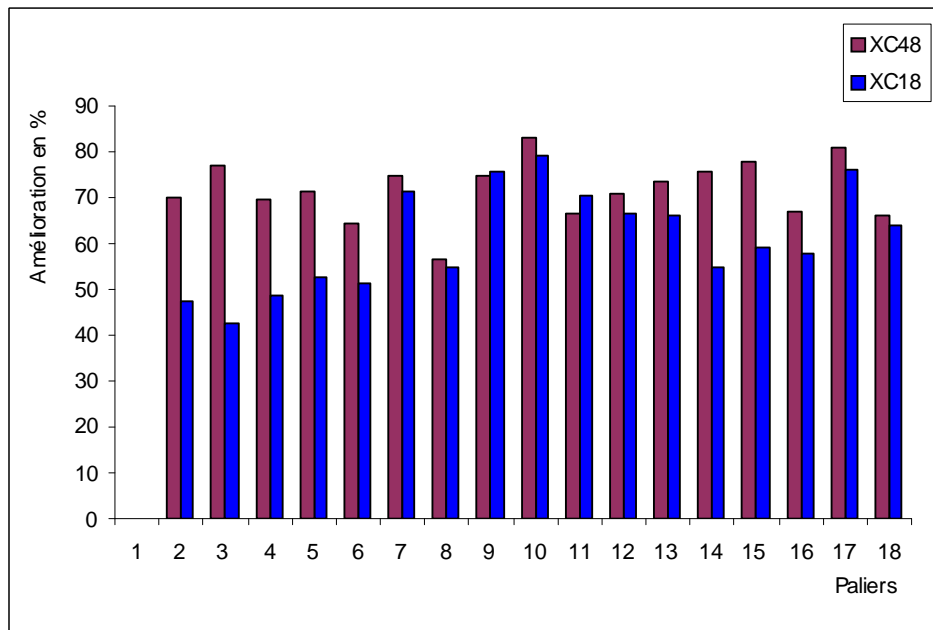
**Figure 5.2** Rugosité et dureté superficielle relatives aux régimes appliqués  
 - Palier 17- Test régime optimal pour « Ra » ;  
 - Palier 18- Test régime optimal pour « Hv » ;  
 Matériau XC48

Il apparaît lors de l'analyse de ces résultats que les réponses des matériaux vis-à-vis de la rugosité et de la dureté superficielle sont manifestement différentes. Ceci montre que les paramètres de traitement qui offrent une amélioration du nivellement de la couche superficielle ne produisent pas forcément la meilleure dureté. Ces résultats confirment certains travaux [53, 84].

Les réponses vis-à-vis de la rugosité dépendent de manière directe des propriétés des matériaux traités. Ceci est illustré sur les **figure 5.3** et **figure 5.4**.



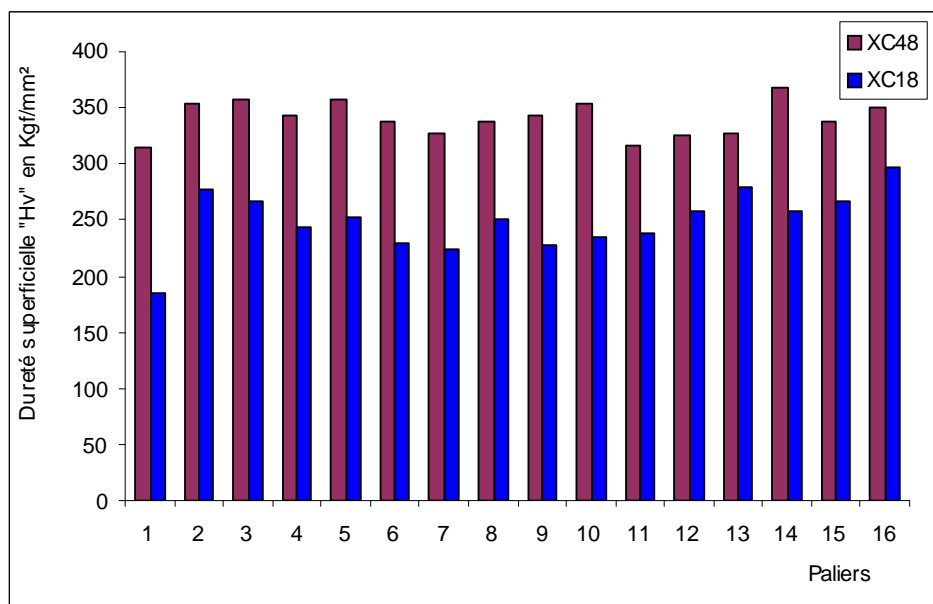
**Figure 5.3** Réponses comparatives vis-à-vis de la rugosité « Ra »



**Figure5.4** Influence du matériau sur la rugosité « Ra ».

En effet, l'analyse de ces résultats, montre que les matériaux ne réagissent pas de la même manière vis-à-vis de l'aspect de surface (**figure5.3**). Ceci peut s'expliquer par les caractéristiques mécaniques qui sont différentes en raison des différences dans les structures cristallines (le matériau XC18 contient beaucoup plus de ferrite) grains moins durs et ductiles provoquant le phénomène d'indentation [85], qui rend délicat l'aplanissement uniforme de la couche superficielle. Ce phénomène admet plus d'influence pour les efforts de déformation élevés ou lorsque les rayons d'outil sont faibles. L'amélioration de l'aspect de surface est beaucoup plus importante pour l'acier XC48 pour la plus part des combinaisons des paramètres de traitement et peut atteindre 83% (**figure5.4**).

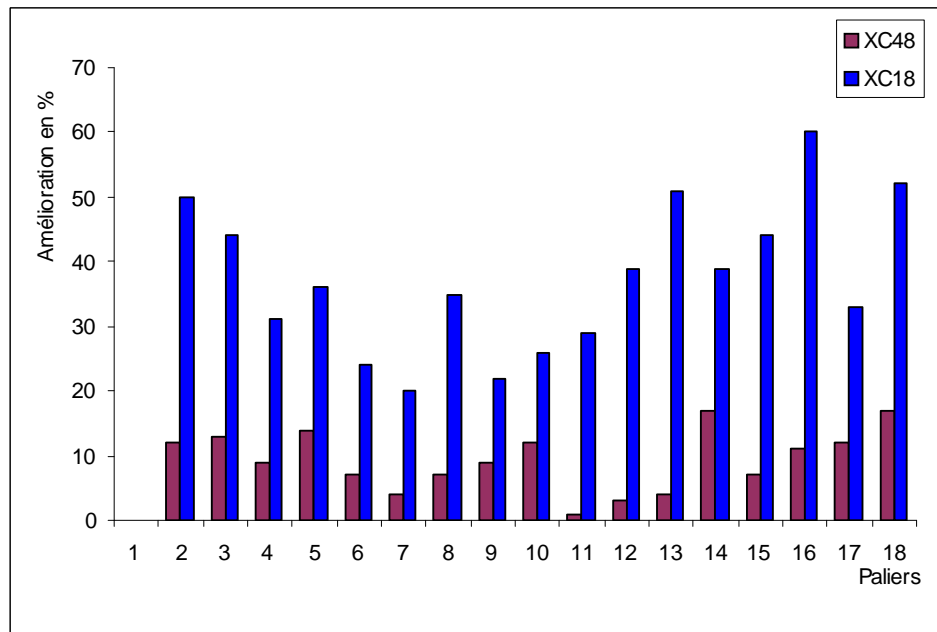
D'autre part, nous constatons que la dureté de la couche superficielle obtenue après brunissage dépend aussi des propriétés des matériaux. Dans la **figure5.5** et la **figure5.6** sont confrontés les effets des paramètres de traitement sur la dureté superficielles « Hv ».



**Figure5.5** Réponses comparatives vis-à-vis de la dureté superficielle « Hv ».

Les duretés superficielles « Hv » obtenues pour l'acier XC48 sont relativement plus fortes pour toutes les combinaisons des paramètres de traitement, ce qui s'explique par la dureté de départ qui est plus importante. Celle-ci dépend des caractéristiques mécaniques et de sa structure cristalline riche en perlite (grains durs). Ces derniers, après leur déformation se consolident davantage et offrent une dureté plus importante (pouvant atteindre 368 Kgf/mm<sup>2</sup>). L'effet de la dureté initiale de la couche superficielle est donc un facteur dominant.

Les taux d'amélioration de dureté relative à chaque matériau sont confrontés dans la **figure5.6**.



**Figure5.6** Influence du matériau sur la dureté superficielle « Hv ».

Par ailleurs, nous constatons, d'après ces résultats que les effets des paramètres de traitement sont beaucoup plus significatifs pour l'acier XC18. Ceci peut s'expliquer par la ductilité plus importante de ce matériau, qui favorise la déformation en offrant plus d'écroutissage qui améliore de façon plus importante la dureté pouvant atteindre 60%.

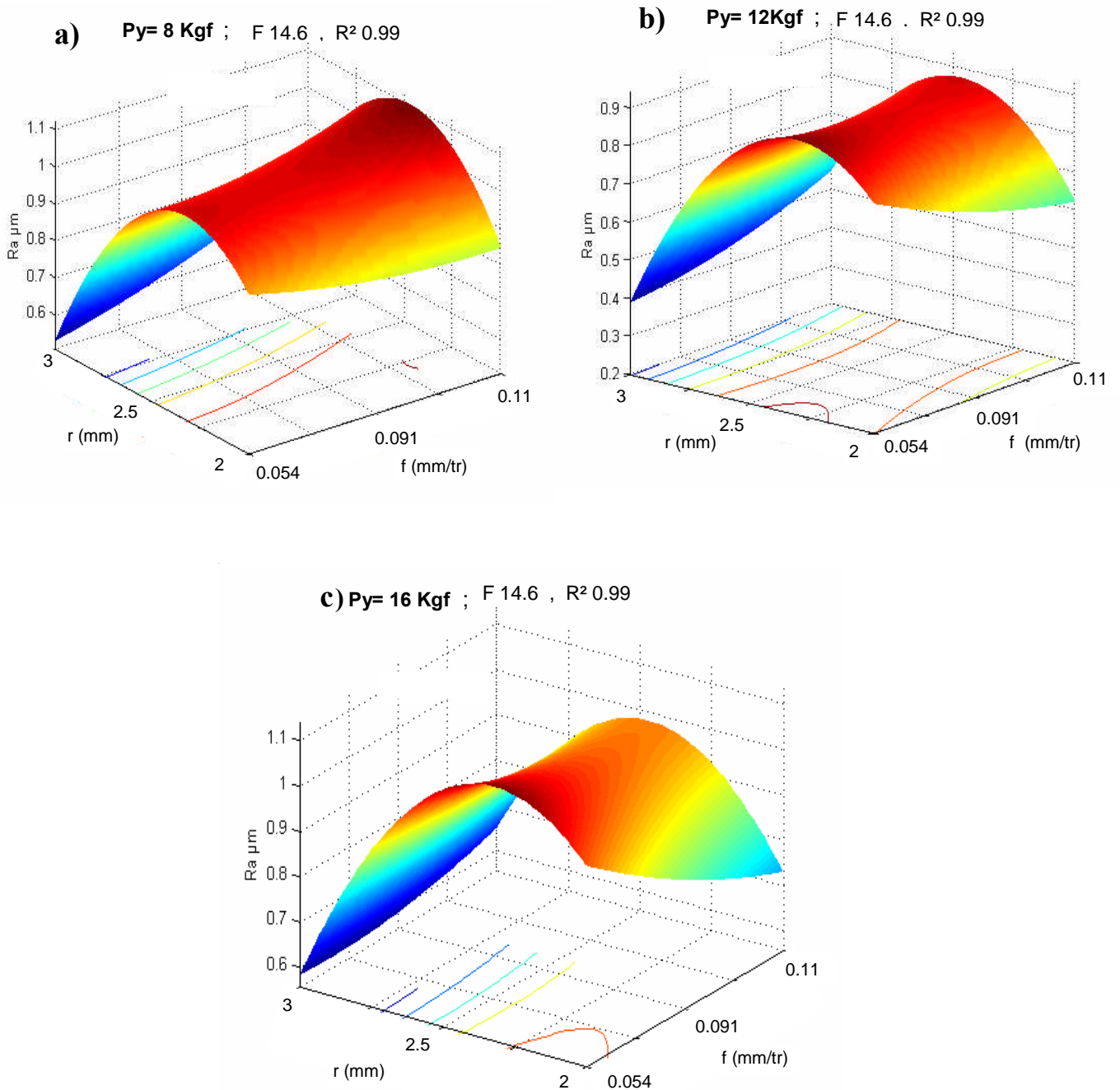
Les caractéristiques mécaniques (dureté, ductilité,..) représentent des paramètres important dont dépendent les résultats de la déformation plastique, montrées dans plusieurs travaux [34, 30, 22].

### 5.2.2 Traitements graphiques (simulations)

Nous constatons selon les résultats précédents que le maximum d'effets apportés aux deux réponses considérées « Ra » et « Hv », est obtenu par des régimes de traitement distincts. La répartition des valeurs de rugosité et de dureté superficielle simulée sur ordinateur selon les modèles mathématiques obtenus (relatifs à chaque réponse), permet de voir l'influence des paramètres de traitement de façon plus exhaustive.

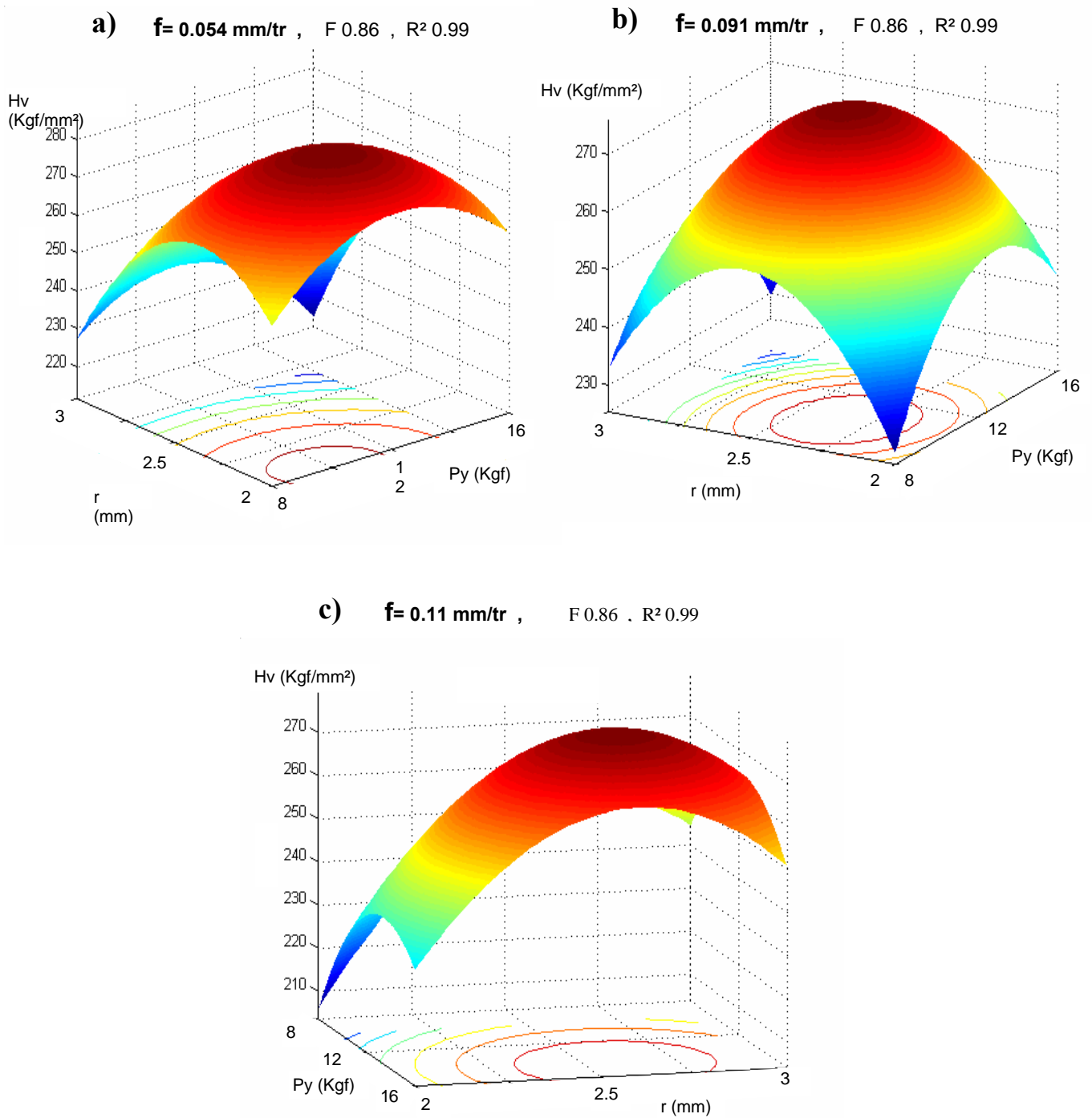
### A) Matériau XC18

Les traitements graphiques montrant respectivement l'influence des paramètres de traitement sur la rugosité « Ra » et la dureté superficielle « Hv » sont présentés sur la **figure5.7** et la **figure5.8**.



**Figure5.7** Influence de l'avance « f », de l'effort de pression « Py » et du rayon « r » d'outil sur la rugosité « Ra », matériau XC18.

a- avec l'effort fixé à Py= 8 Kgf ; b- avec l'effort fixé à Py= 12 Kgf ;  
c- avec l'effort fixé à Py= 16 Kgf



**Figure 5.8** Influence de l'avance «  $f$  », de l'effort de pression «  $Py$  » et du rayon «  $r$  » de d'outil sur la dureté superficielle «  $Hv$  », matériau XC18.

**a-** avec l'avance fixée à  $f = 0.054 \text{ mm/tr}$  ; **b-** avec l'avance fixée à  $f = 0.091 \text{ mm/tr}$  ;

**c-** avec l'avance fixée à  $f = 0.11 \text{ mm/tr}$

## 1) Effets sur la rugosité « Ra »

- En fixant l'effort de déformation « Py » à 8 Kgf (**figure5.7 a**) on constate que :

- l'état de surface s'améliore et peut atteindre « Ra < 0,6 µm » pour des avances régressives combinées avec le rayon d'outil le plus important.
- la combinaison du rayon moyen et des avances importantes, provoque à l'inverse des rugosités plus importantes allant jusqu'à « Ra 1,10 µm ».

- En fixant l'effort de déformation « Py » à 12 Kgf (**figure5.7 b**) on remarque que :

- la rugosité est limitée à « Ra 0,90 µm » pour le diapason d'avances utilisé.
- la diminution du rayon d'outil provoque l'augmentation de la rugosité.
- la rugosité diminue et atteint la valeur « Ra 0,39 µm » pour le rayon le plus élevé et lors de la diminution de l'avance.

- En fixant l'effort de déformation « Py » à 16 Kgf (**figure5.7 c**) on enregistre que :

- l'augmentation de l'effort de déformation provoque l'augmentation de la rugosité.
- le rayon moyen combiné à toutes les valeurs d'avance permet des rugosités « Ra » dépassant 0,90 µm.
- la combinaison des valeurs importantes de rayon et les faibles valeurs d'avance permet des rugosités « Ra » plus faibles atteignant 0,55 µm.

## 2) Effets sur la dureté superficielle « Hv »

- En fixant l'avance « f » à 0.054 mm/tr (**figure5.8 a**) on constate que :

- le rayon moyen et l'accroissement de l'effort de déformation favorisent l'augmentation de la dureté superficielle.
- le rayon le plus important ainsi que les efforts les plus faibles ou même les plus importants offre un accroissement de dureté superficielle non significatif.
- le rayon moyen combiné à des valeurs d'effort tournant autour de 12 kgf permet une amélioration de la dureté superficielle appréciable allant jusqu'à Hv 267 Kgf/mm<sup>2</sup>.

- En fixant l'avance « f » à 0.091mm/tr (**figure5.8 b**) on constate que :

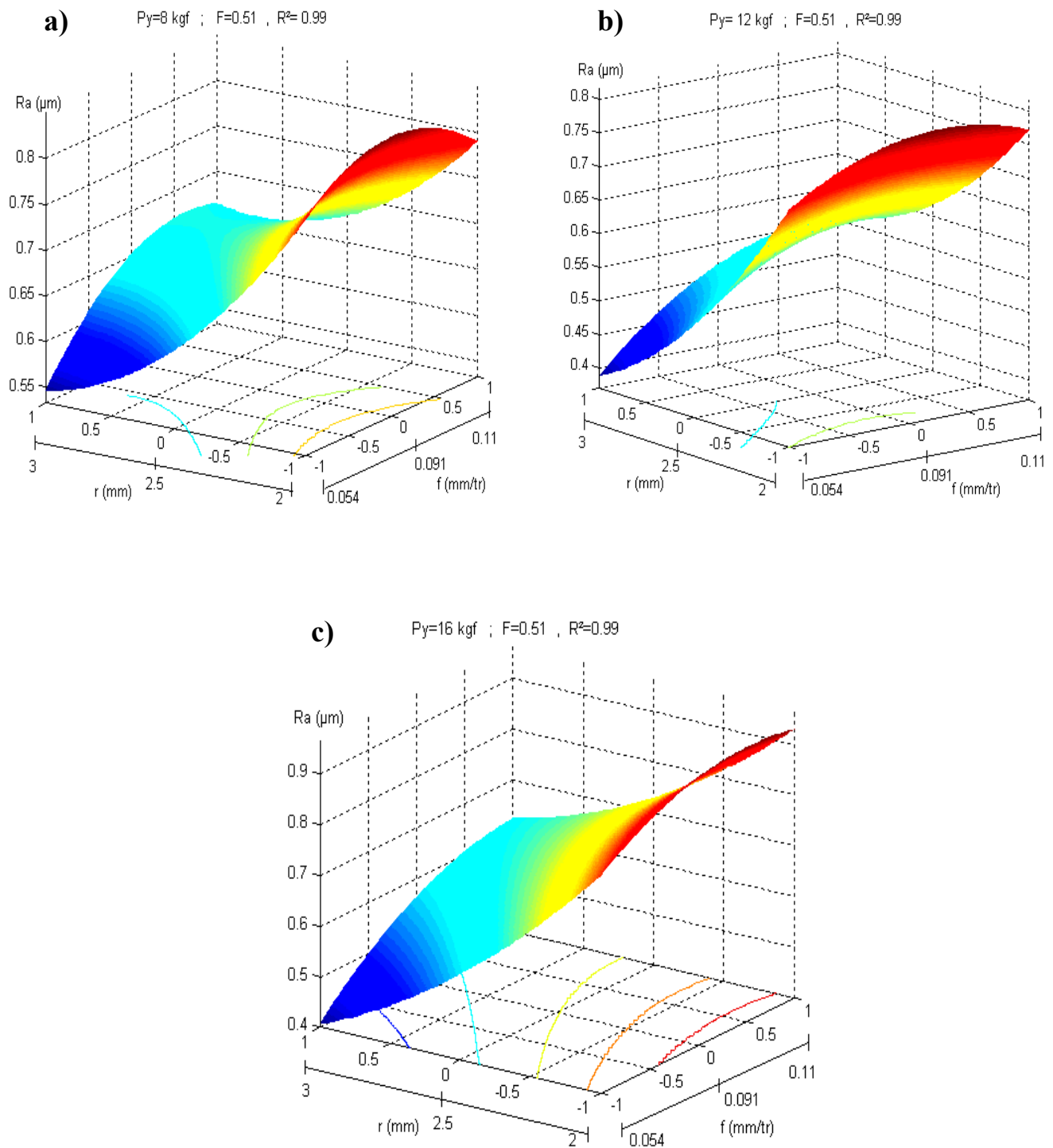
- les efforts qu'ils soient les plus forts ou plus faibles combinés aux grandes valeurs de rayon favorisent une augmentation de la dureté par rapport au cas précédent mais reste non appréciable.
- de même les valeurs du rayon les plus faibles liées aux fortes ou même aux faibles valeurs d'effort ne permettent pas d'atteindre des valeurs de dureté superficielle importantes.
- les valeurs moyennes de rayon ainsi que les valeurs moyennes de l'effort offrent une amélioration assez importante de la dureté superficielle « Hv » allant jusqu'à 265 Kgf/mm<sup>2</sup>.

- En fixant l'avance « f » à 0.11 mm/tr (**figure5.8 c**) on constate que :

- les valeurs de dureté les plus faibles sont obtenues avec les faibles valeurs de l'effort combinées au rayon d'outil le plus faible.
- le rayon d'outil le plus important lié aux valeurs de l'effort les plus élevées permettent une amélioration plus importante de la dureté superficielle par rapport aux cas précédents allant jusqu'à Hv 250 Kgf/mm<sup>2</sup>.
- les valeurs moyennes de l'effort ainsi que le rayon d'outil moyen « r 2.5 mm » permettent une amélioration notable de la dureté superficielle « Hv » allant jusqu'à 270 Kgf /mm<sup>2</sup>.

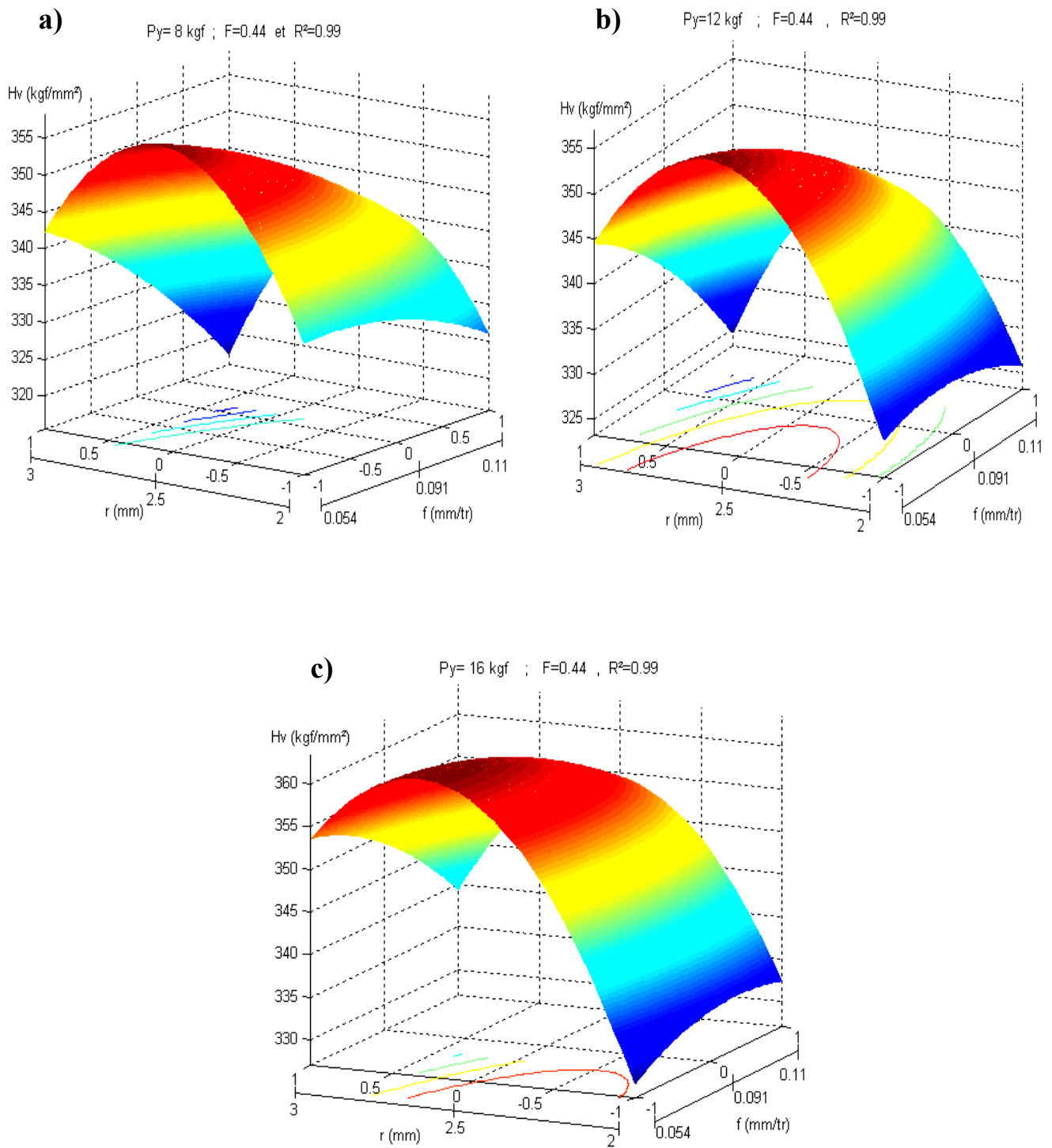
## **B) Matériau XC48**

Les traitements graphiques montrant respectivement l'influence des paramètres de traitement sur la rugosité « Ra » et la dureté superficielle « Hv » sont présentés sur la **figure5.9** et la **figure5.10**.



**Figure 5.9** Influence de l'avance «  $f$  », de l'effort de pression «  $P_y$  » et du rayon «  $r$  » d'outil sur la rugosité «  $R_a$  », matériau XC48.

a- avec l'effort fixé à  $P_y=8 \text{ Kgf}$  ; b- avec l'effort fixé à  $P_y=12 \text{ Kgf}$  ;  
 c- avec l'effort fixé à  $P_y=16 \text{ Kgf}$



**Figure 5.10** Influence de l'avance « f », de l'effort de pression «  $P_y$  » et du rayon « r » d'outil sur la dureté superficielle «  $H_v$  » matériau XC48.

- a-** avec l'avance fixée à  $f = 0.054 \text{ mm/tr}$  ; **b-** avec l'avance fixée à  $f = 0.091 \text{ mm/tr}$  ;  
**c-** avec l'avance fixée à  $f = 0.11 \text{ mm/tr}$

## 1) Effets sur la rugosité « Ra »

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 8 \text{ Kgf}$  (**figure5.9 a**) on constate que :

- l'état de surface s'améliore pour les avances régressives combinées avec le rayon d'outil le plus important et peut atteindre  $R_a \approx 0,56 \mu\text{m}$ .
- l'augmentation des avances, provoque à l'inverse des rugosités plus importantes allant jusqu'à  $R_a \approx 0,8 \mu\text{m}$ , surtout pour de faibles rayons d'outil.

Ces résultats s'accordent avec ceux des travaux [46, 23].

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 12 \text{ Kgf}$  (**figure5.9 b**) on remarque que :

- la rugosité  $R_a$  est inférieure à  $0,8 \mu\text{m}$  pour le diapason utilisé des avances.
- la diminution du rayon d'outil occasionne l'augmentation de la rugosité.
- la rugosité diminue et atteint la valeur  $R_a \approx 0,38 \mu\text{m}$  pour le rayon le plus élevé et lors de la diminution de l'avance.

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 16 \text{ Kgf}$  (**figure5.9 c**) on enregistre que :

- l'augmentation excessive de l'effort de déformation provoque l'augmentation de la rugosité.
- la diminution du rayon d'outil combiné à toutes les valeurs d'avance permet des rugosités  $R_a$  dépassant  $0,90 \mu\text{m}$ .
- la combinaison des valeurs importantes de rayon et les faibles valeurs d'avance permet des rugosités  $R_a$  plus faibles atteignant  $0,4 \mu\text{m}$ .

## 2) Effets sur la dureté superficielle « Hv »

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 8 \text{ Kgf}$  (**figure5.10 a**) on constate que :

- le rayon moyen et la diminution de la vitesse d'avance favorisent l'augmentation de la dureté superficielle  $H_v$  pouvant dépasser  $350 \text{ kgf/mm}^2$ .
- le rayon le plus faible combiné aux vitesses d'avances faibles ou même les plus importantes offre une dureté superficielle  $H_v$  relativement faible inférieure à  $330 \text{ kgf/mm}^2$ .
- le rayon d'outil le plus élevé combiné aux valeurs d'avance les plus importantes engendre les faibles duretés  $H_v$  inférieures à  $320 \text{ kgf/mm}^2$ .

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 12 \text{ Kgf}$  (**figure5.10 b**) on enregistre que :

- les plus fortes ou les plus faibles avances combinées à la valeur faible de rayon d'outil jouent en défaveur de la dureté  $H_v$  restant autour de  $325 \text{ kgf/mm}^2$ .
- de même la valeur du rayon d'outil la plus grande combinée aux plus fortes valeurs d'avance ne permet pas d'atteindre des valeurs de dureté superficielle importantes  $H_v \approx 325 \text{ kgf/mm}^2$ .

- les valeurs moyennes de rayon ainsi que les faibles valeurs d'avance offrent une amélioration assez importante de la dureté superficielle  $H_v$  allant jusqu'à 355 Kgf/mm<sup>2</sup>.

- En fixant l'effort de déformation  $P_y = 16$  Kgf (**figure 5.10c**) on constate que :

- les valeurs de dureté les plus faibles sont obtenues avec les faibles valeurs de rayon d'outil combinées aux avances faibles, l'accroissement de l'avance permet de relever légèrement la dureté  $H_v$  jusqu'à 335 kgf/mm<sup>2</sup>.

- le rayon d'outil le plus grand combiné aux avances régressives permet de relever la dureté  $H_v$  jusqu'à 355 kgf/mm<sup>2</sup>.

- les valeurs moyennes de rayon d'outil avec les faibles avances permettent une amélioration notable de la dureté superficielle  $H_v$  pouvant atteindre 360 kgf /mm<sup>2</sup>.

### 5.2.3 Conclusion

Selon les observations relevées lors de la simulation graphique nous remarquons que les zones rouges représentent les zones de valeurs élevées, les zones bleues celles des faibles valeurs. Les régimes offrant les valeurs de rugosité appréciables sont représentés par les zones bleues (**figure 5.7**) et (**figure 5.9**). Le régime optimal de traitement par brunissage fourni par le programme de calcul correspondant aux valeurs des paramètres, ( $P_y = 11.7$  Kgf ;  $f = 0.054$  mm/tr ;  $r = 3$  mm) permet d'offrir une réponse  $R_a = 0.39$   $\mu\text{m}$  avec une erreur de  $\pm 0.1$   $\mu\text{m}$ ) pour l'acier XC18, et ( $P_y = 13.6$  Kgf ;  $f = 0.054$  mm/tr ;  $r = 3$  mm) permet d'offrir une réponse  $R_a = 0.37$   $\mu\text{m}$  avec une erreur de  $\pm 0.1$   $\mu\text{m}$ ) pour l'acier XC48.

Les régimes présentant les valeurs de dureté superficielle substantielles sont exposés par les zones rouges (**figure 5.8**) et (**figure 5.10**). Le régime optimal fourni par le programme, ( $P_y = 12$  Kgf ;  $f = 0.054$  mm/tr ;  $r = 2.31$  mm) offre une réponse  $H_v = 282$  Kgf/mm<sup>2</sup> avec une erreur de  $\pm 12.6$  Kgf/mm<sup>2</sup>) pour l'acier XC18, et ( $P_y = 16$  Kgf ;  $f = 0.059$  mm/tr ;  $r = 2.66$  mm) offre une réponse  $H_v = 362$  Kgf/mm<sup>2</sup> avec une erreur de  $\pm 9.9$  Kgf/mm<sup>2</sup>) pour l'acier XC48.

Ces régimes ont été testés sur le palier 17 et 18 de chaque pièce, respectivement pour la rugosité la dureté. Les valeurs mesurées sont regroupées sur le **tableau 5.1**.

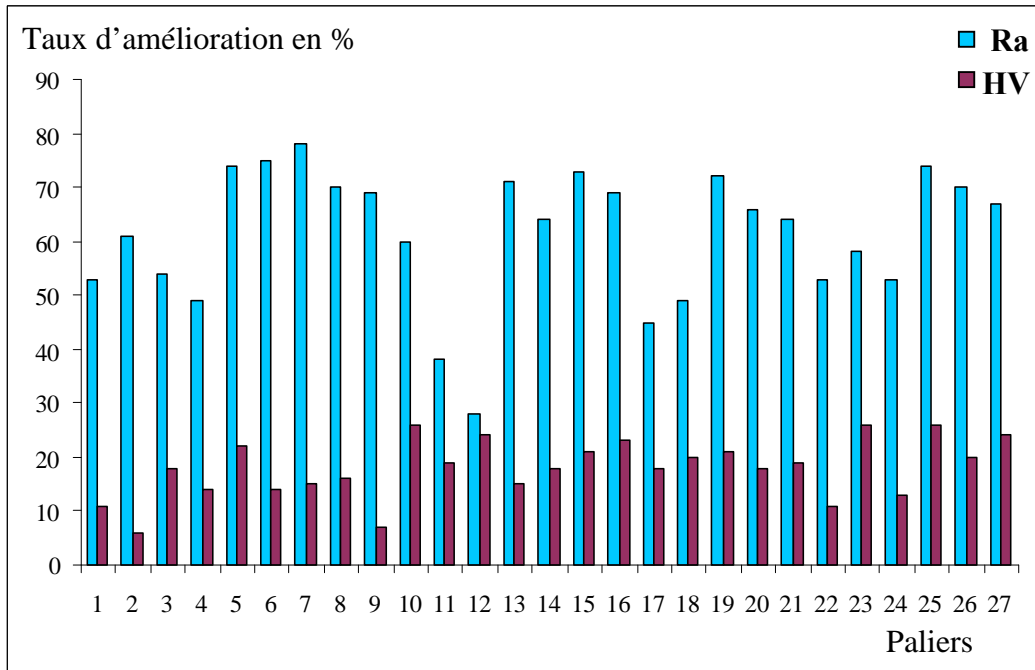
**Tableau 5.1** Tableau comparatif (réponses prédites, réponses réelles)

Matériau	Régimes Optimaux (réglés sur machine)			Réponses	
	$P_y$ Kgf	$f$ mm/tr	$r$ mm	Réponses prédites	Réponses réelles
XC18	12	0.054	3	$R_a = 0.39 \pm 0.10$ $\mu\text{m}$	$R_a = 0.48$ $\mu\text{m}$
	12	0.054	2.5	$H_v = 282 \pm 12.2$ Kgf/mm <sup>2</sup>	$H_v = 281$ Kgf/mm <sup>2</sup>
XC48	14	0.054	3	$R_a = 0.37 \pm 0.10$ $\mu\text{m}$	$R_a = 0.44$ $\mu\text{m}$
	16	0.054	2.5	$H_v = 361 \pm 9.9$ Kgf/mm <sup>2</sup>	$H_v = 369$ Kgf/mm <sup>2</sup>

## 5.3 Traitement par quatre facteurs

### 5.3.1 Résultats et effets du traitement

Les courbes exprimant les taux de variation de rugosité « Ra » et de dureté superficielle « Hv » sont illustrées sur la **figure5.11**.



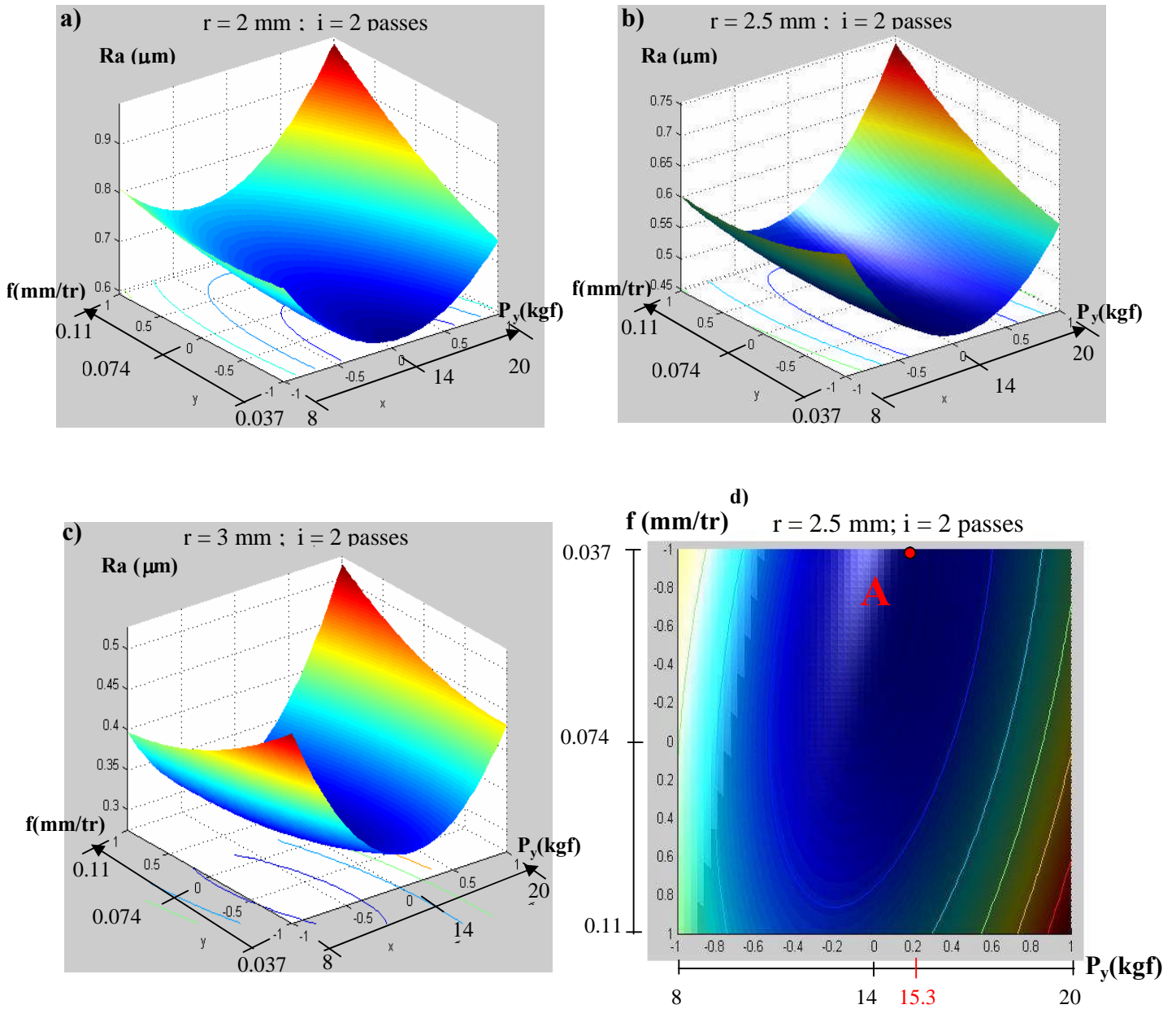
**Figure5.11** Taux de variation de la rugosité « Ra » et de la dureté superficielle « Hv » sous l'effet du brunissage (Matériau XC48, cas de 4 Facteurs)

Lors de l'analyse de ces résultats, nous remarquons une nette amélioration des réponses du matériau (XC48) vis-à-vis de la rugosité et de la dureté superficielle par rapport au cas précédent (cas de 3 facteurs), avec une amélioration pouvant atteindre 78 % pour la rugosité et 26% pour la dureté superficielle. Ceci s'explique par l'introduction du quatrième facteur (nombre de passes) qui par son influence et ses interactions avec les autres paramètres permet plus de plastification et plus d'érouissage. Ces résultats sont en accord avec plusieurs travaux [86, 29, 47, 32, 87, 88] montrant l'importance du nombre de passes.

### 5.3.2 Traitements graphiques (simulations)

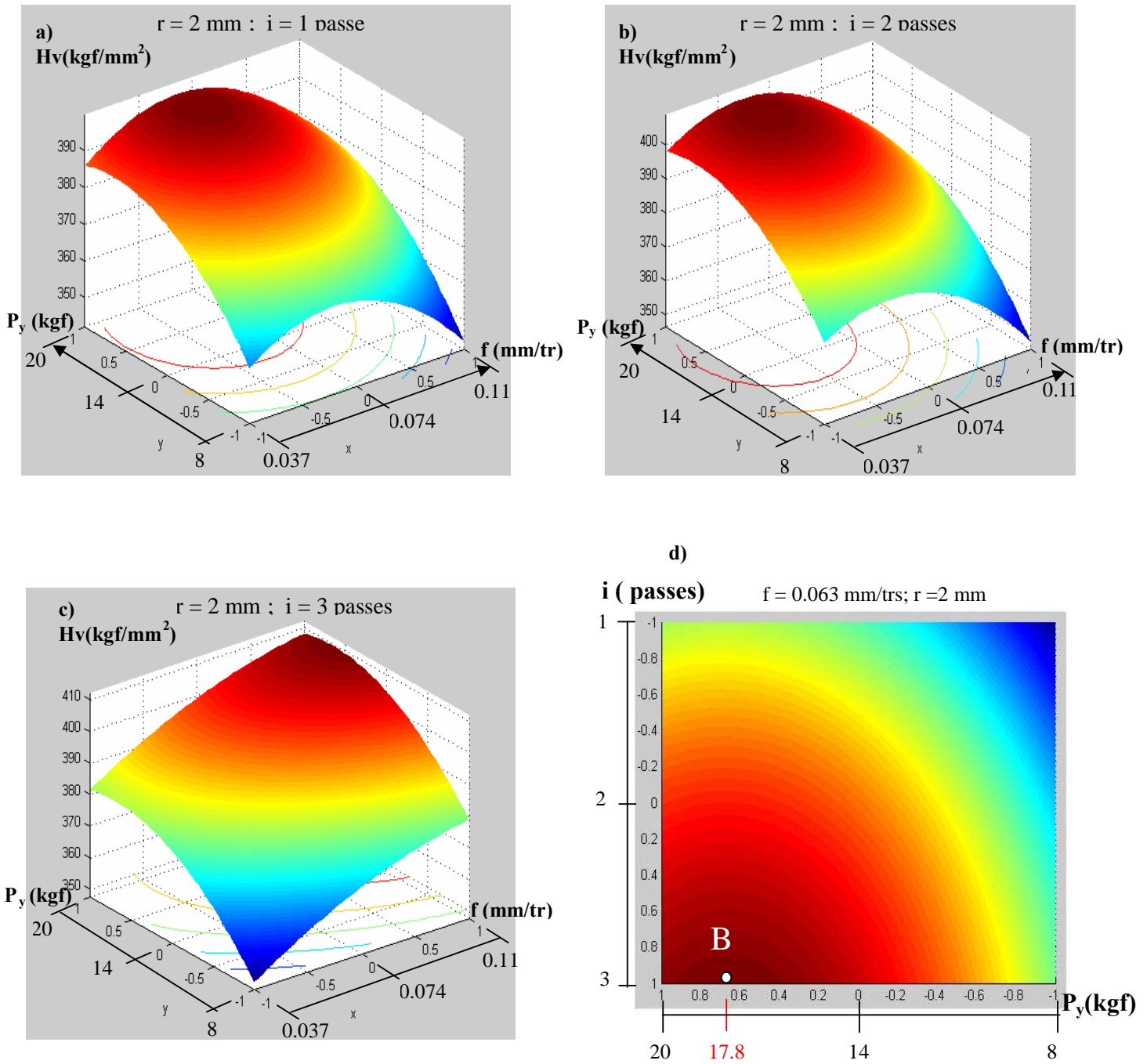
Les résultats du traitement graphique par le programme pour les deux réponses envisagées ( "Ra" et "Hv" ) selon le modèle mathématique obtenu sont donnés dans les **figures5.12** et **figure5.13**.

**A) Cas de la rugosité « Ra »**



**Figure 5.12** Influence de l'effort de pression «  $P_y$  », de l'avance «  $f$  », du rayon «  $r$  » d'outil et du nombre de passes «  $i$  » sur la rugosité «  $R_a$  »,  
a-  $r = 2 \text{ mm}, i = 2$ ; b-  $r = 2.5 \text{ mm}, i = 2$ ; c-  $r = 3 \text{ mm}, i = 2$  ; d- courbes d'isoréponses

**B) Cas de la dureté « Hv »**



**Figure 5.13** Influence de l'effort de pression «  $P_y$  », de l'avance «  $f$  », du rayon «  $r$  » d'outil et du nombre de passes «  $i$  » sur la dureté « Hv »,  
 a-  $r = 2 \text{ mm}, i = 1$  ; b-  $r = 2 \text{ mm}, i = 2$  ; c-  $r = 2 \text{ mm}, i = 3$  ; d- courbes d'isoréponses

Les effets sur chaque réponse sont exposés dans ce qui suit :

### **1) Influence sur la rugosité « Ra »**

On observe dans la **figure 5.12 a**, que les faibles valeurs d'avance permettent des rugosités de  $0.60\div 0.72\ \mu\text{m}$ , les efforts moyens et les faibles avances permettent les rugosités les plus faibles. Les efforts importants combinés avec les plus grandes avances occasionnent les rugosités les plus fortes dépassant  $0.9\ \mu\text{m}$ . Les grandes valeurs d'avance ont la plus importante influence. Ces résultats réaffirment les travaux [87, 41].

Dans la **figure 5.12 b**, on remarque que pour les valeurs d'avance les plus faibles la marge de rugosité est moins importante que le cas précédent, elle est de  $0.42\div 0.52\ \mu\text{m}$ . La combinaison des efforts les plus élevés et les avances importantes compromet la rugosité pouvant atteindre  $0.75\ \mu\text{m}$ . Les valeurs moyennes de l'effort et des valeurs basses des avances améliorent la rugosité. Ces résultats témoignent les travaux [23].

On remarque dans la **figure 5.12 c**, que les efforts les plus élevés combinés avec les plus grandes avances, offrent des rugosités plus faibles que les cas précédents. Les efforts moyens combinés avec les faibles valeurs d'avance offrent des rugosités les plus faibles plus pouvant être inférieures à  $0.3\ \mu\text{m}$ .

La rugosité peut être appréciée au moyen courbes d'isoreponses tracées dans le plan  $r=2.5\text{mm}$ ;  $i=2$  passes, représentées dans La **figure 5.12 d**, Le point « A » caractérise la valeur de la rugosité minimale, prédite par le modèle, et qui a pour valeur  $Ra = 0.42\pm 0.14\ \mu\text{m}$ .

### **2) Influence sur la dureté superficielle « Hv »**

Dans la **figure 5.13 a**, on constate que les avances les plus faibles ou les plus fortes ne permettent pas une élévation importante de la dureté. On observe aussi que les faibles efforts ne permettent non plus l'amélioration de la dureté superficielle ; par contre l'accroissement de l'effort et surtout avec les valeurs moyennes de l'avance offre une augmentation appréciable de la dureté pouvant atteindre  $Hv\ 390\ \text{Kgf/mm}^2$ .

Pour le nombre de passes ( $i = 2$ ) **figure 5.13 b**, on remarque que l'allure du graphe est similaire au cas précédent avec une amélioration plus importante de la dureté dépassant  $Hv\ 400\ \text{Kgf/mm}^2$ . On observe également que les faibles avances améliorent légèrement la dureté même sous les faibles efforts de traitement.

Lorsque le nombre de passes est plus important ( $i = 3$ ) **figure 5.13 c**, on enregistre une grande amélioration de la dureté superficielle pouvant dépasser  $Hv\ 410\ \text{Kgf/mm}^2$ . Ce résultat est obtenu sous les efforts les plus importants combinés avec les avances proche du niveau moyen. De plus, on remarque que la diminution de l'avance offre une amélioration de la dureté lorsque l'effort de traitement augmente. Ces résultats confirment les travaux [47, 87].

La dureté peut être estimée au moyen des courbes d'isoréponses tracées dans le plan  $f=0.063$  mm/trs ;  $r=2$  mm, représentées dans la **figure5.13 d**, où le point « B » indique la valeur de la dureté superficielle maximale, prédite par le modèle, et qui a pour valeur  $Hv\ 389 \pm 17.2$  Kgf/mm<sup>2</sup>.

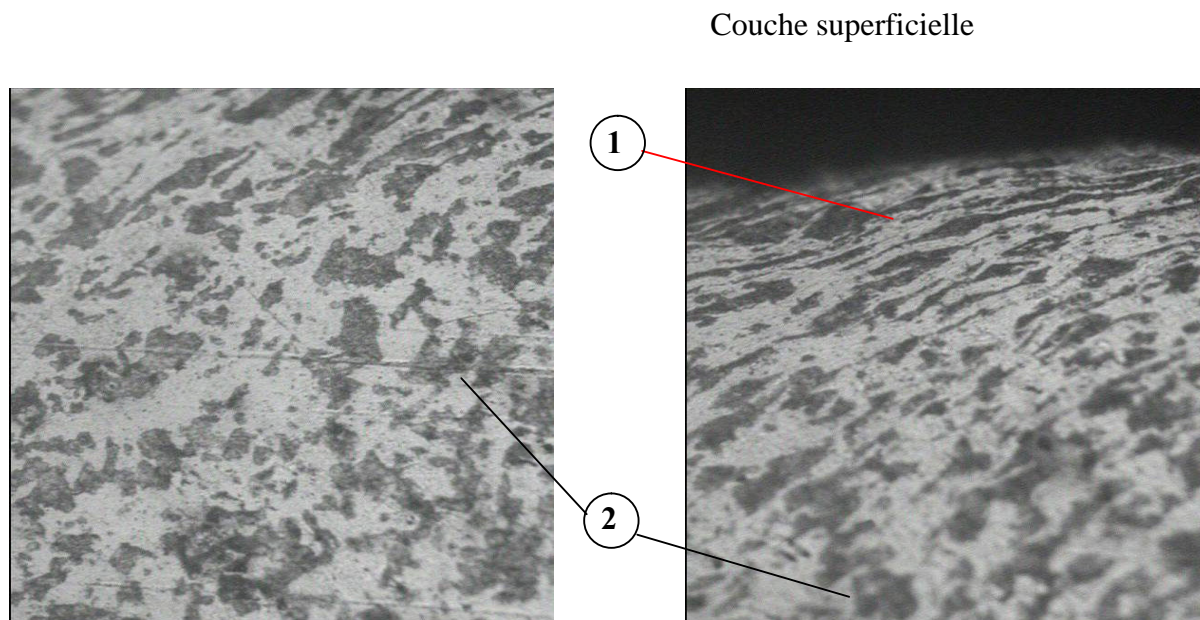
Les tests relatifs à la rugosité « Ra » et à la dureté « Hv », réalisés sur des échantillons avec les régimes optimaux fournis par le programme sont regroupés dans le **tableau5.2**.

**Tableau5.2** Tableau comparatif (réponses prédites, réponses réelles)

Régimes Optimaux (réglés sur machine)				Réponses	
Py Kgf	f mm/tr	r mm	i passes	Réponses prédites	Réponses réelles
15	0.037	2.5	2	Ra= $0.42 \pm 0.14$ $\mu$ m	Ra=0.35 $\mu$ m
18	0.054	2	3	Hv = $389 \pm 17.2$ Kgf/mm <sup>2</sup>	Hv=380 Kgf/mm <sup>2</sup>

Selon ces résultats, les réponses réelles sont en accord avec celles prédites par le modèle mathématique. Ceci confirme que les régimes optimaux permettent de garantir les réponses les plus favorables.

La microstructure observée sur une coupe transversale de l'échantillon traité avec le régime optimale relatif à la dureté Hv, révèle l'état des grains au cœur et à la surface de la couche écrouie (**figure5.14**).



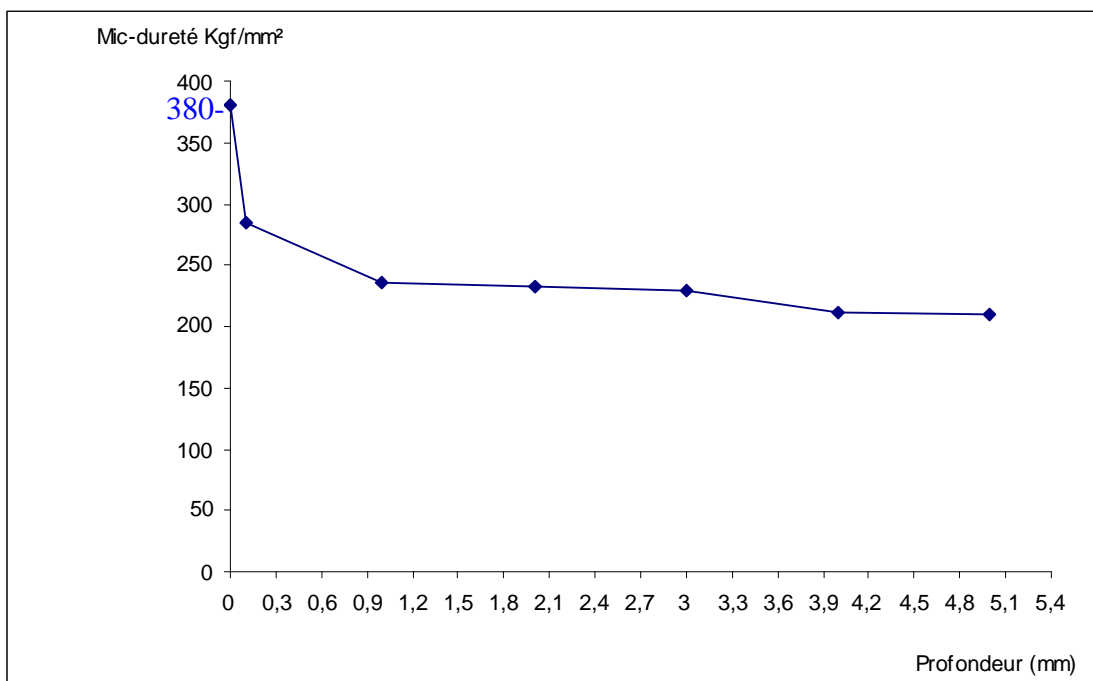
**Figure5.14** Observation sur la section transversale GX150  
1-Grains à la surface (zone écrouie) ; 2- Grains au coeur

La mesure de la micro dureté sur la section transversale est consignée sur le **tableau 5.3**.

**Tableau 5.3** Dureté « Hv » sur la section transversale

Espace de mesure (mm)	Dureté Hv (Kgf/mm <sup>2</sup> )
0.1	285
1	235
2	233
3	230
4	211
5	210

L'évolution de la micro-dureté de la surface vers le coeur est illustrée sur la **figure5.15** ci-dessous :



**Figure5.15** Evolution de la micro-dureté « Hv » sur la section transversale charge 0.5 Kg (Vickers ZHV10).

Nous constatons que la micro-dureté est maximale sur la couche superficielle (380 Kgf/mm<sup>2</sup>), elle est de 285 Kgf/mm<sup>2</sup> à la profondeur de 100µm, puis elle évolue de façon régressive vers le centre en se stabilisant à la valeur de 235 à 210 Kgf/mm<sup>2</sup> à partir de 0.9 mm.

## 5.4 Discussion

Les expériences menées au moyen de la méthode des plans d'expériences de BOX-BEHNKEN nous ont permis d'observer :

- les régimes donnant les plus faibles valeurs de rugosité « Ra » sont caractérisés par les efforts modérés de déformation « Py », les avances « f » les plus basses associant des valeurs de rayon « r »

de la partie active du brunissoir les plus grandes. En effet, l'importance du rayon du brunissoir occasionne l'augmentation de l'aire de contact outil – pièce, ce qui permet de mieux aplatir les aspérités, ceci est en accord avec les travaux [23, 45]. L'augmentation de l'avance est déconseillée, ce qui a pour effet l'accroissement du pas des sillons tel le cas d'un usinage par outil coupant entraînant une dégradation de l'aspect de surface. Ce qui est montré dans les travaux [46, 37, 42].

- L'amélioration de l'état physique caractérisé par la dureté superficielle « Hv » est le résultat de l'écaillage des couches superficielles par suite de leur plastification. Le brunissage par la pointe en diamant de faible rayon garantit une forte pénétration dans la couche superficielle du matériau, aussi sa combinaison avec les faibles avances contribue à l'amélioration de la dureté superficielle. Ceci confirme les travaux [45, 84, 29].

- L'accroissement de l'effort de déformation offre une augmentation notable de la dureté superficielle, par contre l'augmentation des valeurs d'avance et du rayon du brunissoir jouent en défaveur de la dureté superficielle. Par conséquent, Les régimes assurant les duretés superficielles les plus importantes sont relatifs aux valeurs d'avance les plus basses combinées avec les efforts de déformation élevés et aux rayons d'outil moins importants. Ce qui est aussi montré dans les travaux [86, 32].

- Par ailleurs, le nombre de passes offre plus de plastification à la couche superficielle, entraîne une élévation de la dureté superficielle et améliore la topographie de la surface. Ce qui est montré dans les travaux [47], néanmoins, s'il est trop important, il risque de compromettre la qualité de la surface.

- Le régime qui offre le maximum de dureté n'est pas forcément celui qui permet d'obtenir le minimum de rugosité et inversement. Le maximum d'effet résulte d'un régime optimal à chaque caractéristique spécifique recherchée. Toutefois l'obtention d'une meilleure rugosité après déformation dépend de l'état initial de la surface résultant d'un usinage à l'outil coupant [36, 37].

En outre, le modèle établi a permis l'optimisation des paramètres du régime de traitement qu'on a pris le soin de les vérifier avec des essais réels. Les résultats sont considérés statistiquement acceptables au vu du critère d'ajustement  $R^2$  qui est proche 0.98 et le critère de Fisher  $F_{cal}$  qui est toujours inférieur à  $F_{tab.}$ , d'après les recommandations de [68, 78].

## 5.5 Résultats des tests d'usure

Les tests d'usure simulant un contact sec sous chargement comme les cas exposés dans les études [89], ont montré qu'en effet, le traitement par le brunissage au diamant offre à la couche superficielle la capacité de mieux résister à la dégradation par frottement. Ceci grâce à la réalisation d'un profil à rugosité plus faible qui se comporte mieux pendant la phase de rodage et améliore la tenue en service des pièces mécaniques, ce qui confirme les travaux de [48, 62, 64].

D'autre part, l'écroissage produit par le brunissage consolide la couche superficielle en présentant un allongement des grains de la structure. Ce nouvel aspect des grains contribue à la diminution du frottement et offre une meilleure tenue lors du contact. Ceci a permis une amélioration globale de la tenue à l'usure de 20% par rapport à la surface tournée.

## **5.6 Résultats des essais de fatigue**

Les résultats acquis lors des essais de fatigue montrent en premier lieu que le traitement par brunissage engendre un effet irréprochable sur la résistance à la fatigue, ce qui est en accord avec les travaux [53, 56]. Le brunissage au diamant permet une augmentation de l'endurance d'environ 53% relativement à l'usinage par rectification pour le matériau considéré. Cette amélioration est la conséquence de plusieurs effets :

- amélioration de l'aspect de surface grâce à la diminution des aspérités où les creux qui représentent les sièges de concentration des contraintes et de naissance de fissures sont remplis grâce au nivellement de la surface. Ces résultats ont été montrés dans plusieurs travaux [5].
- l'écroissage des couches superficielles produit, améliore leur microdureté et les consolide en leur offrant une bonne résistance aux sollicitations de service. Ce qui est présenté dans les travaux [30, 63, 7, 90].
- introduction dans le métal des contraintes résiduelles de compression qui le renforce en améliorant ses performances en service. Les recherches présentées dans [33] ont permis de fournir des informations relatives à ces questions.

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude nous a permis de répondre à certaines de nos préoccupations relatives aux procédés de parachèvement par déformation plastique superficielle qui sont restés écartés dans nos entreprises industrielles malgré les résultats intéressants qu'ils permettent d'offrir. Dans ce travail, nos efforts ont été concentré sur plusieurs essais et tests sur échantillons en acier afin d'éclaircir certaines questions se rapportant au phénomène de la déformation plastique superficielle, et ce qu'elle engendre comme effets sur le comportement des pièces en service dans les structures mécaniques. Notre étude a été orientée sur le mode de traitement par brunissage au diamant. Ce dernier met en œuvre une déformation plastique des couches superficielles. Il en résulte de cette plastification que les crêtes des aspérités soient aplaties en remplissant les creux des sillons, ce qui est montré dans les bibliographies et confirmé lors des essais menés dans cette étude. Le nivellement des aspérités d'usinage réalisé par le passage de l'outil améliore l'état micro géométrique des couches superficielles et assure un poli de surface avec une amélioration de la rugosité comparable à celle fournie par le procédé de finition en usinage classique (rectification). Le procédé de brunissage provoque l'écroutissage des couches superficielles qui les consolide en augmentant de manière appréciable leur dureté.

Le brunissage est par conséquent un procédé de parachèvement des pièces, il permet de répondre à certaines exigences techniques imposées lors de la fabrication et la conception des structures mécaniques. Néanmoins, l'influence de la déformation plastique dépend des propriétés du matériau, de la valeur de la contrainte appliquée et de plusieurs paramètres mis en jeu. Les expériences menées dans cette étude ont montré que les matériaux considérés répondent convenablement à la déformation plastique mise en jeu par la modification des propriétés géométriques et mécaniques de leurs couches superficielles. Les effets desquels dépendent l'aspect de surface et la dureté de la couche superficielle sont intimement liés au régime de travail.

Notre souci et préoccupation, ont été alors concentrés au développement des méthodes scientifiques permettant l'emploi rationnel du traitement par brunissage au diamant en mettant en jeu plusieurs facteurs. La réalisation des essais basée sur les plans d'expériences de BOX-BEHNKEN, nous a permis d'observer l'influence des paramètres considérés ( $P_y$ ,  $f$ ,  $r$ ,  $i$ ) sur le comportement des matériaux vis-à-vis des réponses ( $R_a$ ,  $H_v$ ). Cette méthode répond convenablement à ce type d'expérience pour les facteurs considérés, a permis avec un minimum d'essais d'avoir des renseignements sur certains comportements (aspect de la surface écrouie, répétitivité de l'aspect de surface sur certains paliers,...) et même de voir l'interaction des paramètres d'entrée entre eux. Le modèle mathématique établi, permet non seulement de mettre en relief les effets des paramètres de traitement mais aussi de tenir compte des conditions réelles de travail (état de la machine, du

système MODOP ainsi que de certains facteurs imprévisibles). La méthode entreprise selon ces plans d'expériences de modélisation permet la maîtrise de l'opération de traitement (opération importante de finition). D'autre part, l'optimisation des paramètres du régime de traitement à partir du modèle mathématique établi a pour conséquence, une diminution du temps de travail ce qui améliore la productivité et diminue les coûts de fabrication.

- Le procédé de brunissage a donné des résultats intéressants (une diminution de rugosité de 79 à 83%, et une augmentation de la dureté de 17 à 60%). Toutefois, la réussite du traitement par brunissage dépend de l'état initial de la surface. En effet, l'obtention d'une meilleure rugosité après déformation est liée à l'opération antérieure (préparation à l'outil coupant), ce qui a demandé beaucoup de soins lors de la préparation en tournage (usage d'un régime bien étudié).

Les résultats du traitement ont été ensuite vérifiés par des tests sur des pièces simulant des comportements en service dans les structures mécaniques, tels que : les tests d'usure et les essais de fatigue sous sollicitations cycliques. Les tests d'usure ont nécessité la conception d'un tribomètre dont l'étude et la réalisation ont connu une investigation dans le domaine de la tribologie.

Les tests d'usure menés sur des échantillons traités et non traités ont permis de constater que le traitement offre des résultats très bénéfiques sur la tenue des pièces en frottement. En effet, nous avons remarqué que l'échantillon traité par brunissage au diamant se comporte mieux à l'usure en phase de rodage, puis avec un gain de 20% par rapport à l'échantillon n'ayant pas subi le traitement. Les essais de fatigue sous sollicitations cycliques (flexion rotative) ont permis de voir également que le traitement par brunissage au diamant est plus efficace que le procédé de rectification au vu des résultats obtenus (augmentation de la limite d'endurance «  $\sigma_D$  » de 53 %). La rectification bien qu'elle soit un procédé de finition très apprécié et efficace pour l'amélioration du fini de surface, mais en introduisant des contraintes résiduelles de traction, rend défavorable la tenue des pièces en service

En conclusion, on peut dire que les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont permis de mieux comprendre et apprécier les phénomènes physiques mis en jeu lors du traitement mécanique des surfaces des aciers et les effets intéressants qu'il permet d'engendrer. Ceci permet d'apporter de nouvelles réflexions sur l'intégration de cette technique et son développement dans les entreprises nationales.

Ce travail de recherche intéresse toute les entreprises de fabrication mécanique, du fait qu'il présente des informations utiles à la gestion, et au suivi des opérations de parachèvement ( phase importante) dans le processus de fabrication. Les résultats obtenus peuvent être exploités par les entreprises de fabrication mécanique. La procédure développée dans ce travail peut être aisément employée pour déterminer le régime optimal de traitement sur une éprouvette d'un lot de pièces donné, ce qui permet le lancement du traitement pour l'ensemble du lot. Par ailleurs, pour résoudre

certains problèmes relatifs à la matière première, il sera possible de substituer certains matériaux (non disponibles ou coûteux) par des matériaux de caractéristiques modérées traités par TMS.

## **PERSPECTIVES**

Les résultats de ce travail constituent une base de travail et de prospection plus exhaustive dans le domaine des traitements mécaniques de surface et ouvrent les perspectives suivantes :

- \* Elargir l'étude pour d'autres réponses telles que les profondeurs d'écaillage, les contraintes résiduelles.
- \* Poursuivre l'étude et l'application des traitements mécanique par DPS sur d'autres nuances de matériaux, en faisant intervenir les effets de leurs propriétés (caractéristiques mécaniques, microstructures,...) et d'établir les lois qui régissent un nombre plus important de facteurs.
- \* Développer les méthodes scientifiques permettant l'étude de la corrélation qui existe entre les opérations de préparation des ébauches et les procédés de parachèvement par TMS (envisager le problème de l'héritage technologique)
- \* Réfléchir sur la mise en place d'un système de suivi de l'opération de parachèvement usant des informations des modèles fournis par le programme (raccordé avec la partie commande de la machine outil : exemple MOCN).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] G. LEMASSON, L. BLAIN, Matériaux de construction mécanique et électrique, Dunod 1976.
- [2] L.SEDOV, mécanique des milieux continus, IZDATELVSTVO « Hayka » 1973, Traduction française, Editions Mir 1975.
- [3] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir 1975.
- [4] G FRADE ; Métallographie essais mécaniques ; 1970.
- [5] J-P Baillon , J-M Dorlot, DES MATERIAUX, Presses Internationales polytechnique, Ecole polytechnique de Montréal , 2000.
- [6] KAPSA et CARTIEN, techniques de l'ingénieur- traité mécanique, 1986
- [7] C. BATHIAS, J. P. BAILON, La fatigue du matériaux et des structures pour les presses de l'université de Montréal, Edition MALOINE, Paris 1980.
- [8] ALEXANDRE N. OVCEYENKO, MAKSIMILIAN. M. GAJEK, VLADIMIR I. CEREBRYAKOV, Formation de l'état de surface des pièces par procédés technologiques, Politecnika OPOLOSKA, NAKLAD, Opole.2001.
- [9] A. PINEAU, A. ZAOUÏ, D. FRANCOIS ; « Comportement mécanique des matériaux », Hermès 1991.
- [10] ERCHOV. A. A. SERGUEEV. U. A. KHMELNIKIR. V. L., L'efficacité et perspectives d'utilisation de l'usinage fini, augmentation de la résistance à l'usure de la construction des machines dans l'industrie de l'énergie M. NIIE-INFORMATION- ENERGOMAC1986, 34 p.
- [11] M.Cartier ; HEF Groupe ; Guide d'emploi des traitements de surfaces appliqués aux problèmes de frottement ; Editions TEC et DOC, 2001.
- [12] L.CATEX, Les traitements de surface et la durée de vie, mécanique matériaux électricité, Revue du GAMI N° 440, Septembre 1991.
- [13] L. Wagner, Mechanical surface treatments on Ti , Al 8 Mg Alloy, Mat. Sces and Engng A263, pp210-216, 1999.
- [14] V. PLECHAKOV, Traitement des pièces par déformation plastique superficielle, Moscou INTC 1993.
- [15] A.AUTHIER ; Cristaux ; 1990.
- [16] D.D. PALCHEV, Traitement de finition et de durcissement par déformations Plastiques superficielles, Moscou 1978
- [17] PARFIANOVITCH. V. S., Les instructions sur la projection des processus du traitement de finition par repassage des surfaces MINSK POLIMIA, 1983, 78 p.
- [18] F.R.NABARR; DOVER PUBL; Dislocations in crystals, New York 1987

- [19] J.J.R ; Théorie élémentaire des dislocations 1970
- [20] Web [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).
- [21] F. clocke, J. Lierman, Roller burnishing of hard turned surface, *Int. J Mach. Tools Manufact* 38 (5-6) (1998) 61-65.
- [22] ODINTSOV. L. G., Le durcissement et l'usinage de finition des pièces mécanique par déformation plastique des couches superficielles. *M. MACHINOSTROENIE* 1987, 311 p.
- [23] Y.G. SCHNEIDER, Technologie de traitement de finition sous pression, Guide de mémoire, Polytechnique édition, 12-1998.
- [24] ERMAKOV. U. M, EPCHOV. A. A., Les perspectives de l'utilisation du repassage par pression d'un outil diamanté : M : HIMACH, 1984, 64 p.
- [25] TORBILO. V.M., Le repassage par pression diamanté *M. MACHINOSTROENIE*1981, 104 p.
- [26] JASSIMOV. M. M., La surveillance de la qualité de la pièce mécanique sous traitement de la couche superficielle par D.P.S, Librairie « Hayk.a », KAZAKHISTAN CCP,1986, 207 p.
- [27] A.BENAMAR, J.LU, G.CHALENT : « Traitement de surface par galetage d'un acier inoxydable austénitique », *Revue de Traitement Mécanique*, Septembre 1992, p.37-45.
- [28] M, H El Axir, An investigation into roller burnishing, *int. J. Mach. Tools Manufact* 40 (2003) 1603-1617.
- [29] M. M Khabeery, M. H. El-Axir, Experimental techniques of studing the effects of milling roller burnishing parameter on surface integrity, *Mach. Tools Manufact.* 41 (2001) 1705-1719.
- [30] V.M Braslavski , A.A Baraz, Deformation strengthening of machinery parts, *Vestn, Mch* 63(7)(1983) 61-65 [Translated from Russian into English in *Soviet Engineering Research*, vol. 3, (7), 46-50].
- [31] N. H. Loh, S.C. Tam, S, Miyazawa, surface hardening by ball burnishing, *Proc. Eng.*23 (1990) 413-417.
- [32] A. M.Hassen. Effect of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non ferrous metals, *J. Mater. Process.Technol.* (1997) 385-391.
- [33] M. Fattouh M.M.E.L. Khabeery, Residual stress distribution in burnishing solution treated and aged 7075 Al alloy, *Int, J. Mach. Tools Manufact.* 29 (1) (1989) 153-160.
- [34] M. H, El-Axir, M.M.E.L. Khabeery, Influence of orthogonal Burnishing parameters on surface characteristics for various materials, *J. Mater Process Technol.* 132 (2003), 82-89.
- [35] A.BENAMAR, J.LU, F.FLAVENOT et G.CHALANT, Galetage d'un acier Inoxydable, *CETIM information N°124*, Octobre 1991, pp. 49-54.
- [36] A. CHEVALIER, J. BOHAN, Guide au technicien en fabrication mécanique, Hachette Technique, Paris, 1979, pp. 228-229.

- [37] R.RAJEKARIAH, S . VAIDYANATHAN, Increasing the wear-resistance of steel components by ball burnishing, Indian institute of technology, Mardas ( India), Wear 34, January 1975, pp. 183-188
- [38] M. LEMERCIER, Le galetage fin de surface, 42ème conférence du CT.DEC, Bulletin d'information N°41 du centre Technique de l'industrie de décolletage, Octobre 1976.
- [39] D. PAPSHEV, V. DMITRIEV, S.BUCKATY, Selection of surface hardening regime in Accordance with admissible deformation, Polytechnical Institute Kuibyshev, USSR and aviation technicological Institute, ribinsk, USSR, pp. 95-103.
- [40] A.BENAMAR, G GRIDINE, Amélioration de la qualité de l'état de surface par le Galetage, ENSET D'Oran, Janvier 1986
- [41] N.G.GERASIMOVA and Al, Improving surface layer proprieties by diamond burnishing, STANKIL Instrument, Vol 47, Issue 9, 1976, pp.23-25.
- [42] X. Yu, L. Wang, Effect of varius parameters on he surface roughness of an aluminium alloy burnished of the spherical surfaced polycrystalline diamond tool, Int. Mach. Tools Manuf. 39,1999, 459-469.
- [43] M. Némat, A. C Lyons, An investigation of the surface topography of ball burnished mild steel and Aluminium, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 16(7) (2000) 469-473.
- [44] AZEREVITCH. G. M., KIRSANOVA BELOVA. E, AKIMOV BI., jumelage du processus de coupe et de la déformation plastique de la couche superficielle sur le tour automatisé : VESTNIK MACHINOSTROENIE, 1985, N°1 de (64÷49) p.
- [45] D.D. PAPSHEV and Al, Finishing and strengthening parts made of hardened steel by burnishing and by ball burnishing, Vestnik Mashinostoeniya, Russian engineering Journal, vol. N°57, Issue 3, 1977, pp. 47-50
- [46] K.C.LUDEMA, W.A.GLASER, S.K.K.RHEE, Some investigation into the performance characteristics of cold worked machined surface, International conference on wear of materials, Dearborn, Michigan, April 1979, pp. 228-249
- [47] A. M.Hassen, H.F. Al-Jalil,A-A. Ebied, Burnishing force, number of ball passes of the optimum surface finish of brass components, J. Mater. Process, Technol. 83 (1- 3), 1998, 176-179.
- [48] M. LEMERCIER, emploi rationnel du galetage fin de surfaces, Techniques industrielles N°92, fev. 1978, pp 69-79.
- [49] V.A. DEE, L. D. LINKIN, Hardness and residual stresses in cylindrical components after Hardfacing , Kurk Polytechnic, Welding production, Vol 23, N°7, July 1976, pp. 42-46
- [50] ODINTSOV. R. G., Le traitement de finition des pièces mécaniques par l'outil diamanté et par vibration M. MACHINOSTROENIE 1985, 57 p.

- [51] Hongyun Luo, jianing Liu, Lijiang Wang, Quenpeng Zhong, Study of the mechanism of the burnishing process with cylindrical polycrystalline diamond tools, journal of materials processing technology 180 (2006)9-16
- [52] I.V.KURRYAVTSEV, Selection of parameters in the hardening of shafts by roller-Burnishing, design Testing and reliability of machines, vestnik Mashnostroeniya, Vol. 63, ISSUE 4 1983 PP. 8-10.
- [53] H. HAMADACHE, Comportement des caractéristiques mécaniques de l'acier CK60K+N sous l'influence du brunissage, Thèse de magister ; Université de Annaba , Avril 1987.
- [54] H. GUECHICHI, Prévion de contraintes résiduelles dues au grenailage, thèse de doctorat d'ingénieur, ENSAM Paris , 1986.
- [55] P.A DAWSON, Effet sur la tenue en fatigue des contraintes résiduelles induites par grenailage,Edit. chez H.P Lieurad, Fatigue des structures industrielles, Editions I.I.T.T., Mars1989.
- [56] S. Braham, Modélisation du galetage des Vilebrequins. Evolution des contraintes résiduelles sous chargement cyclique, Thèse de Doctorat, Palaiseau, Octobre 1991.
- [57] F.P. SMAGLENKO, B.A GRYAZNOV, S.S.GORODETSKII, influence of machining methods on the residual stress distribution and fatigue strength of steel ShKh15 Specimens, Strength Materials, Vol.9, N°2, February 1977, pp. 145-150.
- [58] K.F.MITRYAEV, Yu.A.SEYAPIN, Improving the fatigue resistance of components made from Titanium Alloys by plastic surface deformation, Vestnik Mashinostroeniya, Vol.64, Issue 4, 1984, pp. 23-25.
- [59] J.F.FLAVENOT, Effets des contraintes résiduelles sur la tenue à la fatigue, Recueil de données technologique sur la fatigue, CETIM-Senlis, 1980, pp. 264-300.
- [60] A. H. EL AXIR, An investigation into roller burnishing, Int. Journal of machine tools& manufact. N°40 PP1603-1617, 2000.
- [61] J.BROICHHAUSSEN,W. Calles, Effect of residual stress on the fatigue behaviour, Crak origin and growth velocity of cold-worked Ti-6Al-4V, Leichtmetall, DGM Informations gesellschaft mbH, Germany, 1987, pp. 729-734.
- [62] A.C.E. MENDAR, La technique du galetage, métaux, déformation N° 47, avril 1978.
- [63] P. I. Kudryavstsev, Surface work-hardening delays fatigue development Russ. Eng. J. LII (1) (1983) 61-65.
- [64] A.M. Hassan, A.D. Suleiman. Improvement in the wear resistance of brass components by ball burnishing process, J. Mater. Process. Technol, 96(1-3) (1999) 73-80.
- [65] E.S. Bojonov, I. Voutchkov, Méthodes statistiques pour la modélisation, technica, Sofia, 1978.

- [66] SADO G., SADO M.-C., Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, AFNOR technique, 1991.
- [67] ATKINSON A.C., Recent developments in the methods of optimum and related experimental designs, *Inst. Stat. Rev.*, vol. 56, p.99-115, 1988.
- [68] Jaques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Dunod Paris 1999.
- [69] DANIELIE P., Statistique théorique et appliquée, De Boeck & Larcier, Bruxelles, 508 pages, 1988.
- [70] G.E.P. BOX, N.R. DRAPER, Empirical Model-Building and Response Surface John Wiley and Sons, New-York, 669p, 1987.
- [71] J. GOUPY, La Méthode des Plans d'Expériences, Dunod, Paris, 303p, 1988
- [72] J. GOUPY, Techniques de l'Ingénieur Cahier des Plans d'Expériences, Techniques del'ingénieur, Traité « Analyse et caractérisation », 26p, 1996.
- [73] Jacques Alexis, Pratique industrielle de la méthode Taguchi, les plans d'expériences, Afnor 1995.
- [74] Goupy j, Plans d'Expériences non conventionnels. Théorie et applications (ou comment sauver un plan raté), *Analysis*, Vol. 23, p. 152-158, 1995.
- [75] Goupy j., Etude comparative de divers plans d'expériences, *Revue de statistique appliquée*, vol. 38, n° 4, p.5-44, 1990.
- [76] Goupy j., Erreur de dérive et choix de l'ordre des essais d'un plan d'expériences factorie, *Revue de statistique appliquée*, vol.37, n°1 p.5-22,1989
- [77] STAHL L., WOLD S., Analysis of variance (MANOVA), *Chem. Intel. Lab. Syst.*, vol. 6, n°4, p.259-272, November, 1989.
- [78] MURRAY R. SPIEGEL , Probabilités et Statistiques , Séries Schaum, Paris, 1983
- [79] N. DRAPER, SMITH. H, Applied Regresssion Analysis, Second Edition, John Wiley and Sons, New-York, 708p, 1981
- [80] André Casadevall, Introduction à MATLAB, Paris 2004.
- [81] Aide en ligne, MATLAB 6.5.
- [82] Gunt HAMBURG, Manuel d'instruction pour expériences de fatigue sur éprouvette, G.U.N.T-Gerätebeau GmbH, Allemagne, 2004.
- [83] R. Dietrich, D. Garsaudn Précis de méthodes d'usinage » Editions Fernand Nathan 1981.
- [84] H.HAMADACHE, L.LAOUAR, K.CHAOUI, Behavior of the superficial layers of steel RB40 under the effect of the ball and roller burnishing, Second Symposium on Heat Treatment of Metals & Alloys, 4-6 Dec. 2004, CAIRO EGYPT
- [85] H. A. Francis, phenomenological analysis of plastic spherical indentation, *ASME J. Appl. Mech.* 34, 1976, 153-159.

- [86] A. M Hassan, An investigation into the characteristics of burnished cast Al- Cu alloy, Int. J. Mch. Tools Manufact. 37- 6, 1997, 813-821.
- [87] H. HAMADACHE , K. CHAOUI, Mechanical properties improvements of Rb40 steel though Bal burnishing process, Séminaire Int. De Mécanique ENSET Oran, Avril 2002.
- [88] H.Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, Journal of materials Processing Technology 180-2006, 130-136.
- [89] G. ZAMBELLI, L. Vincent, Matériaux et contact, Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne, 1998.
- [90] J.L. ENGERAND, Fatigue et vieillissement des structures, ENSICA, 1985.