

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Construction Mécanique

Influence des Paramètres de Coupe sur les Caractéristiques Tribologiques des Surfaces Usinées

Par

LAZAR Abdelhakim

Devant le jury composé de

| | | |
|-----------|----------------------------------|------------|
| N. BACHA | Professeur, U. de Blida | Président |
| M. OUALI | Professeur, U. de Blida | Examineur |
| K. CHAOUI | Professeur, U. de Annaba | Examineur |
| M. GACEB | Chargé de Cours, U. de Boumerdès | Rapporteur |

Juin 2006

REMERCIEMENT

Mes remerciements tout d'abord au Dr. GACEB Mohamed, mon promoteur, pour son aide précieuse et ses conseils très utiles qu'il m'a prodigués et son encouragement durant toute la période d'achèvement de ce travail.

Mes remerciements vont aussi aux professeurs BACHA Nasser, OUALI Mohamed et CHAOUI Kemmel qui ont consenti à examiner mon travail

A tous mes collègues de l'institut de mécanique, à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près et à ma famille merci beaucoup.

RESUME

Il est bien établi que la performance des pièces conjuguées travaillant aux frottements, dépend principalement de l'état de leurs surfaces actives. L'état des surfaces actives dépend cependant de plusieurs facteurs.

Le procédé d'obtention constitue un facteur principal contrôlant l'état de ces surfaces. Dans cette étude nous nous proposons d'examiner les surfaces obtenues par le tournage de l'acier A33 à l'aide d'outils en ARS.

Il est donc intéressant d'examiner comment les conditions de coupe affectent l'état de surface. Pour ce faire nous avons considéré l'influence de trois paramètres de coupe ainsi que celle de la lubrification.

Deux paramètres de surface, la rugosité moyenne et la dureté, ont été utilisés pour caractériser l'état des surfaces obtenues.

Des essais d'usure aux frottements ont ensuite été conduits dans des conditions variées pour voir comment l'état de surface influe sur la performance des pièces travaillant au frottement.

Les résultats expérimentaux nous ont permis de dégager des conclusions concernant l'interaction procédé d'usinage, état de surface et caractéristiques tribologique des surfaces actives obtenues par tournage.

ABSTRACT

It is well established that the performance of the matting parts, depends mainly on the status of their active surfaces. The state active surface however, depends on several factors.

The process to obtain is a major factor controlling the status of those surfaces. In this study we propose to review surfaces obtained on the lathe on steel A33 with ARS tools.

So it is worth examining how the cutting conditions affect the state of the surface. For this purpose we have considered three cutting parameters and lubrication.

Two parameters, the average roughness and hardness, were used to characterize the state of surfaces.

Tests of friction wear were then conducted in various conditions to see how the state surface affects the performance of the pieces working to friction.

The experimental results allowed us to draw some conclusions concerning the interaction of the machining process, the state of the surfaces and the tribological Characteristics of the matting parts obtained by turning operation.

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX.

GRAPHES :

- Figure 1.1 Les quatre couches d'une surface.
- Figure 1.2 Présentation du plan de cisaillement dd' .
- Figure 1.3 Allure de la zone de cisaillement.
- Figure 1.4 Présentation des trois zones de dégagement de calories.
- Figure 1.5 Présentation de l'action du copeau sur la pièce.
- Figure 1.6 Différents types de formation de copeau en usinage.
- Figure 1.7 Schéma présentant l'origine des rugosités.
- Figure 1.8 Présentation des efforts exercés par l'outil sur la pièce.
- Figure 1.9 Formation de l'arête rapportée.
- Figure 1.10 Etat micro géométrique des surfaces usinées.
- Figure 1.11 Présentation d'une pièce montée sur un tour.
- Figure 1.12 Forme d'erreurs macro géométriques.
- Figure 1.13 Représentation schématisée des formes des divers défauts.
- Figure 2.1 Schéma de principe de l'appareil de mesure de erreurs superficielles.
- Figure 2.2 Rugosimètre à empreinte.
- Figure 2.3 Schéma du principe de contrôle interférentiel.
- Figure 2.4 Profil réel d'une surface.
- Figure 2.5 Première présentation d'une ligne extérieur de référence.
- Figure 2.6 Deuxième présentation d'une ligne extérieur de référence.
- Figure 2.7 Présentation de la ligne moyenne.
- Figure 2.8 Présentation graduelle d'un profil.
- Figure 2.9 Présentation des mouvements conjugués pendant la coupe.

- Figure 2.10 Présentation d'une éprouvette d'essai d'usure.
- Figure 2.11 Présentation du principe d'essai d'usure.
- Figure 3.1 Rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour un matériau A33, outil en ARS, $a=0,09\text{mm/tr}$, $p=0,5\text{mm}$, travail lubrifié.
- Figure 3.2 Schéma des pics laissés par l'outil de coupe.
- Figure 3.3 Rugosité en fonction de l'avance pour un matériau A33, outil en ARS, $V=56,29\text{m/min}$, $p=0,5\text{mm}$, travail lubrifié.
- Figure 3.4 Rugosité en fonction de la profondeur de passe pour un matériau A33, outil en ARS, $V=56,29\text{m/min}$, $a=0,09\text{mm/tr}$, travail lubrifié.
- Figure 3.5 Rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour différentes valeurs de l'avance, matériau A33, outil en ARS, $p=0,5\text{mm}$, travail lubrifié.
- Figure 3.6 Rugosité en fonction de la vitesse de coupe, travail lubrifié et à sec, matériau A33, outil en ARS, $a=0,09\text{mm/tr}$, $p=0,5\text{mm}$.
- Figure 3.7 Micro dureté superficielle en fonction de la vitesse de coupe, matériau A33.
- Figure 3.8 Micro dureté superficielle en fonction de l'avance, matériau A33, outil en ARS, $V=56,29\text{m/min}$, $p=0,5\text{mm}$, travail lubrifié.
- Figure 3.9 Micro dureté superficielle en fonction de la profondeur de passe, matériau A33, outil en ARS, $a=0,09\text{mm/tr}$, $V=56,29\text{m/min}$.
- Figure 3.10 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail à sec, $P=10\text{N}$.
- Figure 3.11 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail avec lubrification.
- Figure 3.12 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail à sec, $V=560\text{tr/min}$.
- Figure 3.13 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail lubrifié, $V=560\text{tr/min}$.
- Figure 3.14 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail à sec, $P=10\text{N}$.
- Figure 3.15 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail lubrifié, $P=10\text{N}$.
- Figure 3.16 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail à sec $V=560\text{tr/min}$.

Figure 3.17 Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail lubrifié, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

Figure 3.18 Rugosité en fonction du temps : influence de l'usure sur les états de surfaces travail à sec, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

Figure 3.19 Variation du diamètre en fonction du temps, travail à sec $V=560\text{tr}/\text{min}$.

TABLEAUX :

Tableau 3.1 Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail à sec, $P=10\text{N}$.

Tableau 3.2 Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail lubrifié, $P=10\text{N}$

Tableau 3.3 Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail à sec, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

Tableau 3.4 Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail lubrifié, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

Tableau 3.5 Coefficient de frottement (f) entre A33 et bronze, travail lubrifié, $P=10\text{N}$.

Tableau 3.6 Coefficient de frottement (f) entre A33 et bronze, travail à sec, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

Tableau 3.7 coefficient de frottement (f) entre A33 et bronze, travail lubrifié, $V=560\text{tr}/\text{min}$.

TABLE DES MATIERES

RESUME

REMERCIEMENTS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION | 11 |
| 1. GENESE ET NATURE D'UNE SURFACE | 13 |
| Vue d'ensemble | 13 |
| Analyse des différentes couches d'une surface | 13 |
| La couche accessible | 13 |
| 1.2.1.1 Définition | 13 |
| 1.2.1.2 Défauts intrinsèques de la couche accessible dus à l'élaboration de pièce .. | 14 |
| 1.2.1.2.1 Les inclusions | 14 |
| 1.2.1.2.2 Trous et porosités | 14 |
| 1.2.1.2.3 Ségrégation | 14 |
| La couche écrouie | 15 |
| La couche amorphe | 17 |
| La couche adsorbée | 18 |
| Origine des rugosités d'une surface | 18 |
| Aspects géométriques | 23 |
| Défauts de forme où macro géométriques | 23 |
| Défauts de surfaces où micro géométriques | 25 |
| 2. METHODES EXPERIMENTALES | 27 |
| 2.1 Méthodes d'examen d'une surface | 27 |
| 2.1.1 Les contrôles de micro géométrie et macro géométrie | 27 |
| 2.1.2 Méthode optique caractérisant le degré de poli d'une surface | 27 |
| 2.1.3 Méthodes des empreintes | 28 |
| 2.1.4 Méthodes optiques | 28 |
| 2.1.5 Méthodes interférentielles | 28 |
| 2.1.6 Méthodes des appareils mécaniques de contrôle des coupes de profil | 29 |
| 2.2 Choix des paramètres à considérer | 30 |
| 2.2.1 Définition des grandeurs caractéristiques de la macro géométrie | 30 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2 | Choix du paramètre de rugosité | 32 |
| 2.2.3 | Choix des paramètres de coupe | 34 |
| 2.2.3.1 | Principe de coupe | 34 |
| 2.2.3.2 | Les conditions de coupe choisies | 34 |
| 2.2.3.2.1 | La vitesse de coupe | 34 |
| 2.2.3.2.2 | La profondeur de passe | 35 |
| 2.2.3.2.3 | L'avance | 35 |
| 2.3 | Essais expérimentaux | 35 |
| 2.3.1 | Essais d'usinage | 35 |
| 2.3.2 | Essais de dureté | 36 |
| 2.3.3 | Essais d'usure | 36 |
| 3. | RESULTATS ET DISCUSSION | 38 |
| 3.1 | Résultats des essais de coupe | 38 |
| 3.1.1 | Influence de la vitesse sur la rugosité des surfaces | 38 |
| 3.1.2 | Influence de l'avance sur la rugosité des surfaces | 39 |
| 3.1.3 | Influence de la passe de profondeur sur la rugosité des surfaces | 40 |
| 3.1.4 | Influence de la vitesse de coupe pour différentes valeurs de l'avance | 42 |
| 3.1.5 | Influence de la lubrification sur la rugosité des surfaces | 43 |
| 3.2 | Résultats des essais de dureté | 44 |
| 3.2.1 | Influence de la vitesse de coupe sur l'écrouissage superficiel | 44 |
| 3.2.2 | Influence de l'avance sur l'écrouissage superficiel | 45 |
| 3.2.3 | Influence de la profondeur de passe sur l'écrouissage superficiel | 45 |
| 3.3 | Résultats des essais d'usure | 46 |
| 3.3.1 | Frottement entre deux pièces de même nuance | 47 |
| 3.3.1.1 | Influence de la vitesse sur le frottement (travail à sec) | 47 |
| 3.3.1.2 | Influence de la vitesse sur le frottement (travail lubrifié) | 48 |
| 3.3.1.3 | Influence de la charge sur le frottement (travail à sec) | 50 |
| 3.3.1.4 | Influence de la charge sur le frottement (travail lubrifié) | 51 |
| 3.3.1.5 | Influence de la charge sur le coefficient de frottement | 52 |
| 3.3.2 | Frottement entre deux pièces de nuances différentes | 53 |
| 3.3.2.1 | Influence de la vitesse sur le frottement (travail à sec) | 53 |
| 3.3.2.2 | Influence de la vitesse sur le frottement (travail lubrifié) | 54 |
| 3.3.2.3 | Influence de la charge sur le frottement (travail à sec) | 56 |
| 3.3.2.4 | Influence de la charge sur le frottement (travail lubrifié) | 57 |

| | |
|------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Influence de l'usure sur l'état de surface | 59 |
| 3.5 Influence de l'usure sur le diamètre | 61 |
| 3.6 Application des résultats | 62 |
| 3.6.1 Rectification des vilebrequins | 62 |
| 3.6.2 Alésage des blocs moteurs | 63 |
| 3.6.3 Rabotage des culasses | 63 |
| CONCLUSION | 65 |
| REFERENCES | 66 |
| LISTE DES SYMBOLES | 69 |

L'usinage offre une structure de surface qui est l'aboutissement :

- d'une construction cristalline plus ou moins imparfaite. [1]
- D'un arrangement de grains, conditionné par l'élaboration, la composition chimique, l'histoire thermique.

Cette structure est elle-même une donnée dont vont dépendre :

- L'aptitude du métal à former avec le métal antagoniste des composées inter cristallin. [1]
- L'aisance avec laquelle il se recouvrira d'une couche de gaz adsorbé. [1]
- La solidité du manteau de molécules grasses dont il pourra s'envelopper. [1]

Les surfaces en usinage seront plus ou moins adéquates selon la façon dont elles auront été usinées, la qualité de l'affûtage des outils, le grain de la meule, les vitesses de coupe, les avances adoptées, la profondeur de passe, la méthode de polissage. [2]

Ces états de surfaces ont une influence considérable sur la performance des pièces travaillant aux frottements et sur leurs caractéristiques tribologiques en particulier. Donc les frottements ne forment pas une branche distincte de la mécanique, mais plutôt une coupe, un cliage à travers tous ces éléments. Que serait notre existence si les frottements n'existaient pas ? Nous ne pourrions pas marcher; nous n'aurions aucun moyen de transport, ni automobile, ni chemin de fer pas la moindre charrette, et rien ne s'opposerait à la force centrifuge. L'étude du frottement, de l'usure est une partie essentielle de toute étude de surface. De plus les états des surfaces dépendent d'un certain nombre de paramètres de coupe [2] qui contribuent à la formation de ces surfaces. Parmi les plus importants de ces paramètres et qui vont être considérés dans notre étude sont les conditions de coupe.

Toute tentative donc d'expliquer l'influence de l'état de surface sur les caractéristiques tribologiques [3] des pièces usinées nécessite, en premier lieu une bonne compréhension des phénomènes physiques et chimiques qui ont lieu lors d'une opération de coupe et les différentes contributions des différents paramètres à la formation de la surface usinée.

Dans ce but et afin d'atteindre un contrôle efficace des surfaces recherchées pour une application particulière, on se propose de conduire une étude systématique qui fait l'objet de ce projet de Magister.

CHAPITRE 1

GENESE ET NATURE D'UNE SURFACE

1.1 Vue d'ensemble :

La surface d'un métal est toujours, et de loin, l'endroit le plus abîmé de l'ensemble d'une pièce. Elle est tellement méconnaissable qu'il est impossible de définir le métal par sa surface. Réciproquement la nature seule d'un métal est impuissante à rendre compte d'un état de la surface et à la décrire de façon valable à priori.

On peut dire schématiquement qu'elle est une zone à part, séparant la masse de l'ambient, zone elle-même divisée en quatre couches qui sont, de l'intérieur vers l'extérieur [1,3] (Figure 1.1).

- 1) Une zone en cours d'écrouissage ou accessible aux efforts de frottements.
- 2) Une zone intrinsèquement écrouie.
- 3) Une couche amorphe.
- 4) Une couche adsorbée.

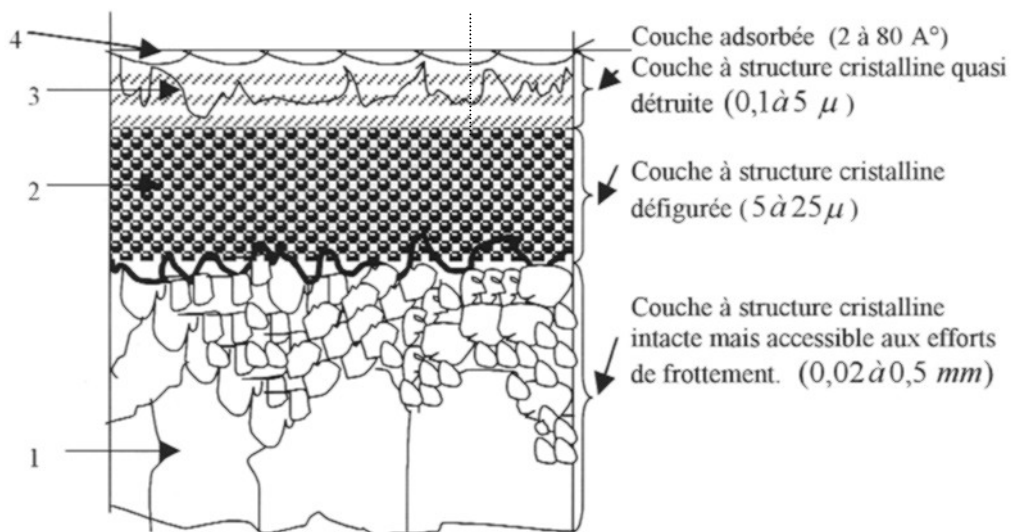


Figure 1.1: Les quatre couches d'une surface

1.2 Analyse des différentes couches d'une surface

1.2.1 La couche accessible

1.2.1.1 Définition

Nous avons donné le nom de « couche accessible » à la zone du matériau qui n'a pas été lésée par les opérations d'usinage et est restée en dehors de tout phénomène

chimique. Sa structure cristalline et sa macrostructure sont semblables à celles du cœur de la pièce, toutefois elles vont évoluer puisque les contraintes dues au frottement et les phénomènes thermiques qu'elles créent atteindront cette zone.

Il est raisonnable de noter que :

- Dans cette couche les défauts de la pièce à cœur influencent sur le frottement.
- L'influence des sollicitations de surface y aura un aspect assourdi et rythmé, se manifestant par toutes les formes possibles du vieillissement.

Cette zone joue un rôle important si la surface de la pièce a été rationnellement conçue.

1.2.1.2 Défauts intrinsèques de la couche accessible dus à l'élaboration de pièce :

1.2.1.2.1 Les inclusions :

L'importance des inclusions dans un métal du point de vue frottement vient surtout du fait que la coulée, le laminage et le forgeage [4], peuvent les aligner en files.

Ces files d'inclusions semblent être à l'origine d'une erreur encore récemment commise qui est la tentative d'établir un parallèle entre la bonne tenue d'un métal au frottement et sa facilité d'usinage.

L'aisance avec laquelle on façonne un métal peut être due à des files d'inclusions qui rendent le copeau fragile en le faisant s'émietter devant l'outil. L'usinage est en effet plus aisé, alors qu'au point de vue frottement le métal peut être tout à fait médiocre.

1.2.1.2.2 Trous et porosités :

Lorsqu'un trou ou une porosité se trouve, après usinage, à cheval sur une surface de frottement, sous forme de cratère, il est bien évident qu'il devienne un élément du comportement de cette surface :

- D'une part les bords de cratère [5], sous l'effet de sollicitations normales peuvent créer sur l'arête des surpressions considérables.
- D'autre part, le cratère ainsi ouvert peut lors des différentes phases d'élaboration de la pièce se remplir de copeaux, de grains d'émeri et d'autres matières peu recommandées.

1.2.1.2.3 Ségrégation :

On constate souvent un alignement de la macrostructure du métal dont les lignes sont des dendrites de ségrégation.

Si la distribution des éléments chimiques apparaît uniforme sur une large échelle, on dit que la ségrégation est de type microscopique, si le gradient de concentration n'est apparent qu'à l'échelle du prélèvement, on dit que la ségrégation est macroscopique. N.B d'autres défauts sont provoqués par le traitement thermique, mais ils ne sont pas le but de notre étude.

1.2.2 La couche écrouie :

C'est la zone superficielle qui a gardé le souvenir de l'atteinte par l'outil. Sa structure cristalline a été plus ou moins déformée.

Un outil ABC (Figure 1.2) coupant un métal dans le sens de la flèche, enlève un copeau sur lequel il exerce une pression P. Il y a décohé sion du métal donc les couches vont glisser comme un jeu de carte à partir d'un plan de cisaillement dd' faisant avec la surface de la pièce un angle ϕ qui dépend de la nature du métal et de l'angle d'attaque de l'outil.

La zone du cisaillement est plus large de part et d'autre du plan moyen au voisinage de l'arrête de l'outil, et elle va en se rétrécissant lorsqu'on se dirige vers l'extérieur de la pièce usinée, c'est cette convergence de la zone qui provoque le couple donnant le bouclage du copeau

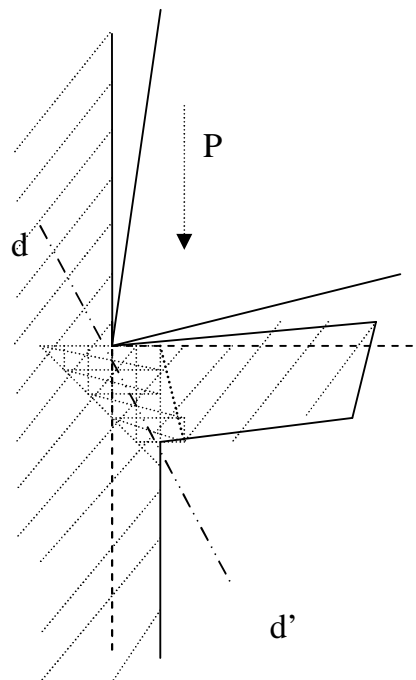
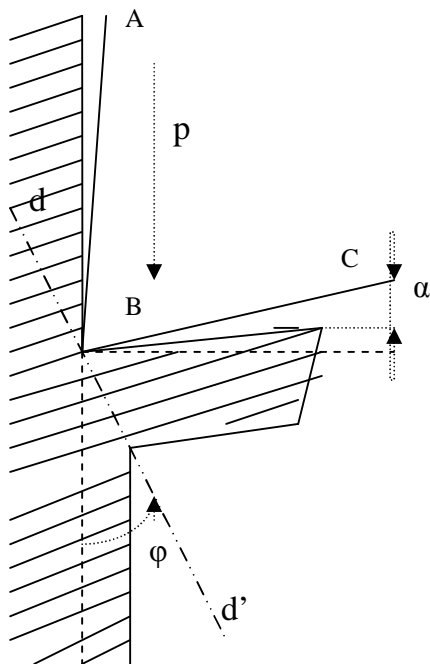


Figure 1.2 : présentation du plan de cisaillement

Figure 1.3: allure de la zone de cisaillement

L'effort fourni pour déformer le copeau en faisant glisser les uns sur les autres les différents plans comme des cartes à jouer, est négligeable devant l'effort qui est dépensé dans la zone de cisaillement et devant le frottement de glissement [5] du copeau sur la surface avant.

Il y aura trois zones principales d'échauffement correspondant à trois zones de création d'énergie (voir figure 1.4) [6].

- Zone 1: zone de cisaillement qui entoure le plan de cisaillement.
- Zone 2: zone de frottement du copeau sur la surface de coupe.
- Zone 3: zone du broutement de la face de dépouille sur la surface usinée.

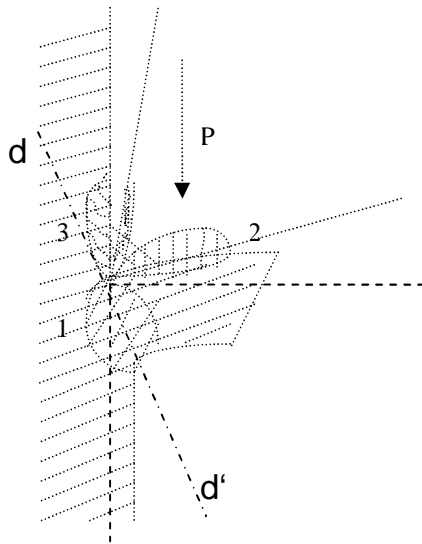


Figure 1.4: Présentation des trois zones d'échauffement

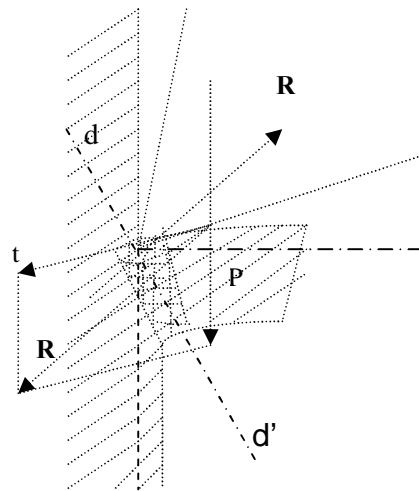


Figure 1.5: Présentation de l'action du copeau sur la pièce

On voit que les trois zones convergent vers l'arête de l'outil qui du point de vue des futurs frottements, exige des soins particuliers durant l'usinage.

Il n'existe bien entendu pas de plan de cisaillement comme celui représenté en théorie par la (figure I.3). En pratique, il s'agit d'une zone de cisaillement qui peut exister aussi bien en dessous qu'au dessus de ce plan. La région perturbée par le passage de ce faisceau de contraintes peut être plus profonde que le centre des cratères de la surface usinée. D'ailleurs, l'écroûissage de la pièce en cours d'usinage peut être prévu si l'on établit le schéma des forces mises en jeu comme dans la (figure I.5) L'appui de l'outil sur le copeau et la force de frottement provoquée par la remontée du copeau vers la face de dégagement ont une résultante \mathbf{R} . En écrivant l'équilibre statique des forces s'exerçant sur le copeau, il est clair qu'il reçoit de la pièce une force de même valeur. On admet que cette dernière est en sus légèrement décalée, créant ainsi le couple d'enroulement du copeau sur lui-même. C'est la mise en jeu de ces forces qui provoque l'écroûissage. Leur intensité donne le taux de cet écroûissage et le premier impératif d'un usinage de surface frottante est de chercher à les amoindrir l'une et l'autre

Lorsque le copeau glisse sur la surface de dégagement de l'outil, il y a

un frottement intense. Comme tous les frottements, celui-ci crée des élévations de températures micro localisées qui peuvent entraîner des fusions et des microsoudures [7]. Ceci peut aboutir au collage d'une certaine quantité de matériau sur l'outil. C'est ce qu'on appelle la fausse arête qui, en croissant va complètement changer les caractéristiques de l'usinage, la cote de la pièce finie et l'état de surface. Lorsque cette fausse arête aura trop grandi, elle sera soumise à des efforts tels qu'elle sera arrachée d'un bloc, ôtée de l'outil et on reviendra aux caractéristiques de coupe précédentes. Le cycle entre la formation d'une fausse arête et son élimination provoque des irrégularités de surface semblables à des vagues. On peut donc conclure que les contraintes normales qui s'exercent sur les plans de cisaillement sont en relation avec le frottement du copeau sur la face de dégagement de l'outil. Lorsque l'angle de dégagement du copeau croît, la force de coupe nécessaire à l'usinage et exercée sur la pièce par l'outil décroît, mais lorsque cet angle croît, les possibilités de conduire à travers l'outil de la chaleur vers l'évacuation décroissent et la rigidité de l'outil décroît.

On considère que dans des conditions ordinaires d'usinage, environ un tiers de l'énergie est dépensée dans la pièce. Elle est équivalente à un certain taux d'écrouissage que l'on peut réduire par lubrification avec des savons, des lubrifiants solides ou liquides.

1.2.3 La couche amorphe :

Ces dernières années des recherches ont admis l'hypothèse d'une couche amorphe recouvrant comme un manteau la surface d'un métal. Sous l'action simultanée de compression et de cisaillement importants, on peut provoquer un concassage de la structure granulaire [7] et aboutir à des éléments dont les dimensions n'excèdent pas quelques microns. Une telle couche peut être générée lors des opérations de définition de la surface telle que la rectification, la finition, le polissage etc. Celles-ci agissent en effet de la façon schématique suivante:

Des grains plus ou moins abrasifs ont une action mécanique. Ils laisseront la surface et raseront les aspérités les plus élevées [8]. Le frottement crée des phénomènes de fusion micro localisée entre les grains abrasifs et le métal usiné [9]. On en voit une preuve dans le fait qu'un métal se polit d'autant mieux que les grains abrasifs ont un point de fusion plus élevé que le leur et non pas lorsqu'ils sont plus durs

Enfin un fort écrouissage provient d'une part des efforts exercés par les grains abrasifs et d'autre part de la pression du plateau de la machine.

1.2.4 La couche adsorbée :

Puisque les atomes dans leurs arrangements échangent des valences, il est normal que ceux qui juxtaposent la surface extérieure aient une ou plusieurs valences non saturées. L'ensemble de ces valences forme un champ de force qui peut s'exercer jusqu'à plusieurs angströms de la surface. Les molécules ambiantes vont être attirées par ce champ de force donnant le phénomène de l'adsorption.

1.3 Origines des rugosités d'une surface :

Principe physique de la coupe

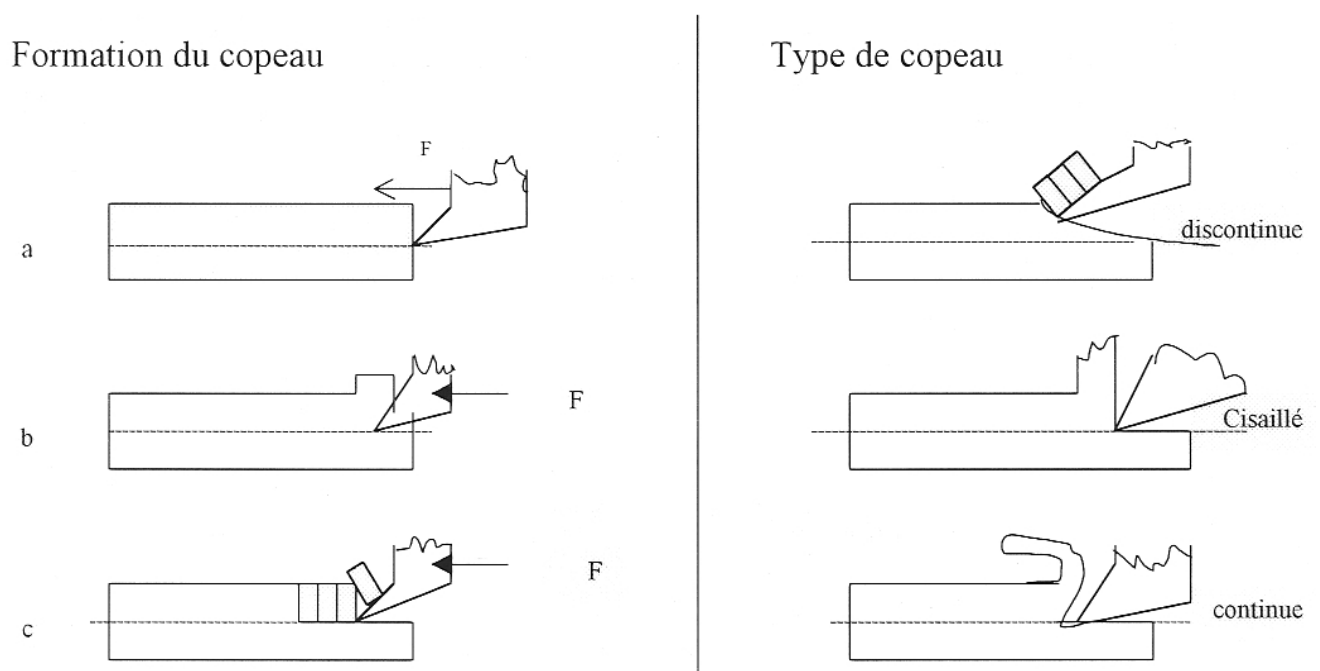


Figure 1.6: différents types de formation de copeau en usinage.

Le métal enlevé de l'ébauche s'appelle le copeau. La coupe est un processus physique complexe qui s'accompagne de déformation élastique et plastique [10] et donne lieu à un frottement important (c à d génération de la chaleur) à la formation d'une arête rapportée, à l'usure de l'outil, et au broutement parfois de la couche superficielle de la pièce.

Dans le système machine/outil/pièce/montage (M.O.P.M) [11,10] sous l'action de l'effort de coupe F , l'outil pénètre progressivement dans le métal, le comprime par sa surface d'attaque et produit des déformations élastiques et plastiques [4]. Ensuite à mesure que l'outil s'enfonce dans la matière, les contraintes dans les couches enlevées augmentent et lorsqu'elles atteignent des valeurs correspondant à la charge de rupture du métal, il provoque le glissement

du premier élément du copeau. Une fois le premier élément du copeau est détaché, l'outil comprime par sa surface d'attaque la couche voisine en formant ainsi un deuxième élément qui se détache du métal de base et ainsi de suite [12].

L'usinage des métaux donne lieu à quatre types essentiels de copeau (figure 1.6) :

- Le copeau discontinu : s'obtient lors de l'usinage des métaux à faible vitesse de coupe. Il est composé d'éléments séparés, déformés et pratiquement pas liés du tout entre eux.
- Le copeau cisailé : s'obtient lors de l'usinage des aciers à vitesse de coupe moyenne, la surface inférieure du copeau adjacente à la surface d'attaque est lisse, alors que la surface supérieure porte des rides.
- Le copeau continu : s'obtient lors de l'usinage des aciers à très grandes vitesses, le copeau s'écoule en forme de ruban long sans entaille.
- Le copeau fragmenté : Il est constitué d'éléments isolés de formes variées et qui ne sont pas liés entre eux. Il subit une faible déformation plastique, mais la charge supportée dans ces conditions par le système (M.O.P.M) est irrégulière. Le copeau fragmenté laisse une surface rugueuse couverte de creux. La forte pression de l'outil en pénétrant dans le métal et la déformation plastique ainsi que la rugosité de cette surface est à l'origine de l'adhérence qui s'établit entre l'outil et la couche déformée. Cette couche mince est appelée couche freinée. Plus la surface d'attaque de l'outil est rugueuse plus l'épaisseur de cette couche freinée sur laquelle glisse le métal transformé en copeau est grande. Ce qui augmente le frottement entre cette couche et le copeau, d'où des déformations supplémentaires et la charge supportée par le système est irrégulière [13].

Dans certaines conditions on observe à la surface d'attaque dans le voisinage de l'arête tranchante l'apparition d'une accumulation de particules qu'on appelle arête rapportée. Cette arête a la forme d'un amas de métal usiné très déformé et adhérent à l'outil. La dureté de l'arête rapportée peut être deux à trois fois supérieure à celle du métal usiné et peut donc produire la coupe du métal en se déplaçant avec l'outil. L'arête rapportée influe sur la déformation de la couche enlevée, sur l'usure de l'outil, sur les efforts appliqués à l'outil et sur la qualité de la surface usinée.

Les rugosités d'une surface usinée dépendent de très nombreux facteurs dont:

- La nature du matériau et ses caractéristiques physico-chimiques [7,14].
- La machine utilisée pour l'usinage et en particulier sa géométrie [15], sa stabilité vibrationnelle [16] et sa rigidité [17].
- Les conditions de coupe [18].

-Les outils, plus particulièrement leur géométrie d'affûtage, l'état de surface du tranchant [14,19] et leur usure.

L'étude scientifique de facteurs aussi nombreux et aussi variés est extrêmement difficile. Pour toucher le problème on se place dans des conditions où un seul facteur intervient.

La superposition et la juxtaposition des valeurs et des lois obtenues permettront de contrôler le problème réel. Les interactions mutuelles des facteurs entre eux modifieront certainement les règles obtenues pour chacun d'eux pris séparément. Néanmoins dans un premier lieu, nous pouvons imaginer une machine géométriquement et mécaniquement parfaite [15], un outil également parfait et inusable, et examiner ce que la cinématique de la machine [15] entraîne comme conséquence.

Prenez l'exemple du tournage idéal et considérons le cas où :

L'outil est animé d'une vitesse de translation rigoureusement constante, la pièce a une vitesse de rotation également constante, la forme de l'arête tranchante de l'outil est parfaitement définie, il n'y a aucune vibration, aucune déformation ne se produit sous l'effet des forces mises en jeu, le métal usiné est parfaitement homogène et isotrope.

L'avance de l'outil par tour est " a " et est en mm.

Ces mouvements relatifs de l'outil et de la pièce engendrent sur la pièce des ondulations [20] régulières de pas " a " et de profondeur " h " (figure 1.7) donc

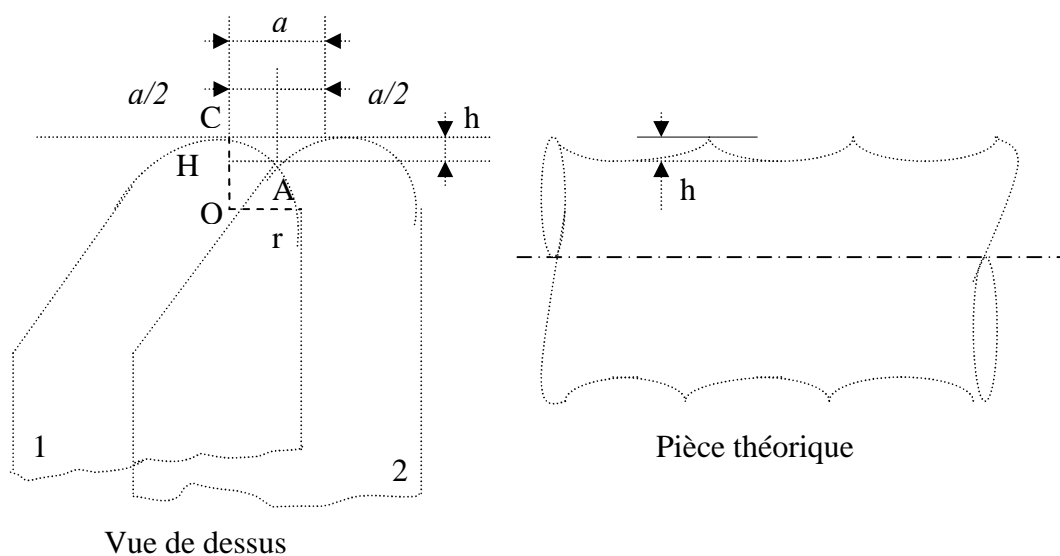


Figure 1.7: schéma présentant l'origine des rugosités.

Les indices (1) et (2) désignent les positions successives de l'outil après un tour de pièce.

$$h = HC = OC - OH = r - (OA^2 - HA^2)^{1/2} \quad \text{ou} \quad h = r - r(1 - a^2/4r^2)^{1/2} \quad (1.1)$$

a avance par tour

OC = r rayon de l'arête tranchante.

HC = h profondeur d'onde engendrée sur la pièce.

Puisque a/r est petit, on fait un développement limite et on aura :

$$h = r - r \left(1 - \frac{1}{2} \frac{a^2}{4r^2} - \frac{1}{8} \frac{a^4}{16r^4} \right) = \frac{1}{2} \frac{a^2}{4r} + \frac{1}{8} \frac{a^4}{16r^3} \dots \quad (1.2)$$

Connaissant r et a, h est donc bien définie. Or, par expérience les rugosités d'une surface usinée avec un outil tranchant sont plus grandes que h.

Les raisons de cet écart sont sans doute dues :

1. A l'usure de l'outil.
2. Au fait que l'outil arrache du métal sur la pièce.
3. A la modification de la structure des couches superficielles [21] du métal de la pièce au cours de l'usinage.
4. A la formation d'une arête rapportée sur l'outil.
5. Aux vibrations d'amplitudes souvent non visibles, de l'ensemble pièce/machine/outil [22].

Dans les cas 1, 2, 3 sous l'effet des efforts exercés par l'outil sur la pièce (figure 1.8), et sous l'effet du mouvement relatif : pièce outil, le métal est non seulement coupé ou arraché, mais aussi comprimé. De ce fait une certaine épaisseur "ε" du métal qui était comprise dans la profondeur de passe n'est pas enlevée mais elle est refoulée vers l'axe sous l'effet des déformations élastiques et plastiques [23].

La pièce est superficiellement durcie du fait de l'écrouissage dû aux déformations plastiques, et ce durcissement irrégulier accélère l'usure de l'outil et après quelques temps de travail, des stries parallèles apparaissent sur le flanc de l'outil.

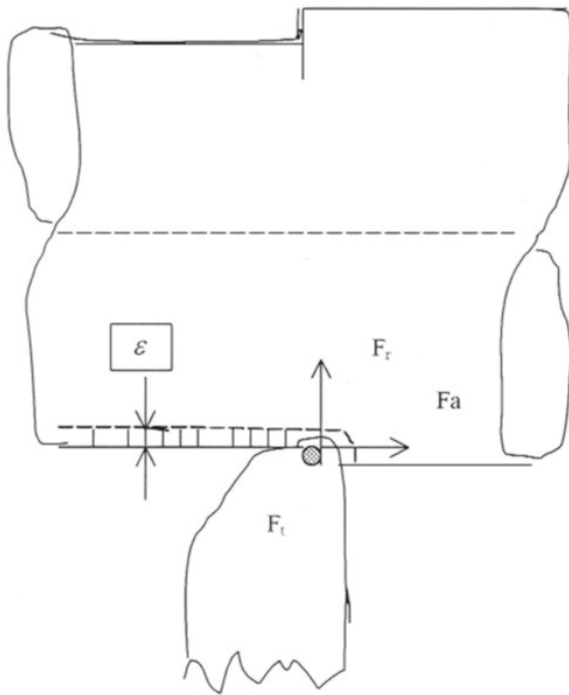


Figure. 1.8: Présentation des efforts exercés par l'outil sur la pièce.

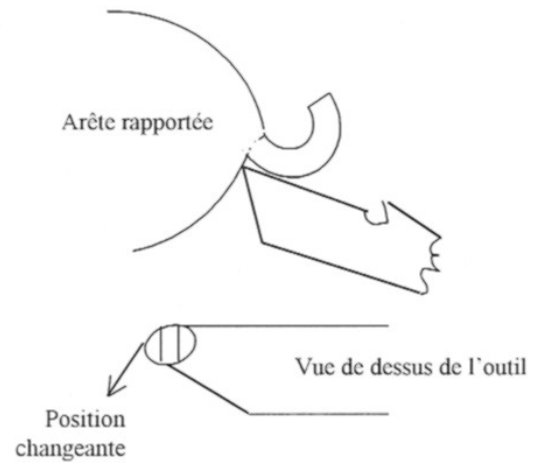


Figure. 1.9: Formation de l'arête rapportée

4^{ème} cas: Une partie du métal du copeau adhère à l'outil, et représente une véritable couche et forme une arête tranchante rapportée (figure 1.9) qui arrache plus qu'elle ne coupe. Cette arête se détériore et se reforme périodiquement [24]. Ce phénomène se produit surtout pour de faibles vitesses de coupes.

5^{ème} cas: Les vibrations qui peuvent se produire sont aussi responsables des ondulations [25] de la surface usinée :

Toutes ces remarques sont valables pour tous les outils et d'une certaine façon pour les meules où chaque grain abrasif est un outil. Mais ici la multiplicité des grains, donc des outils, a une usure et une rapidité éliminatoire qui donnent pour la surface usinée un résultat qui correspond à une suite de compensations statiques, ce qui explique le meilleur état micro géométrique des surfaces rectifiées (figure 1.10).

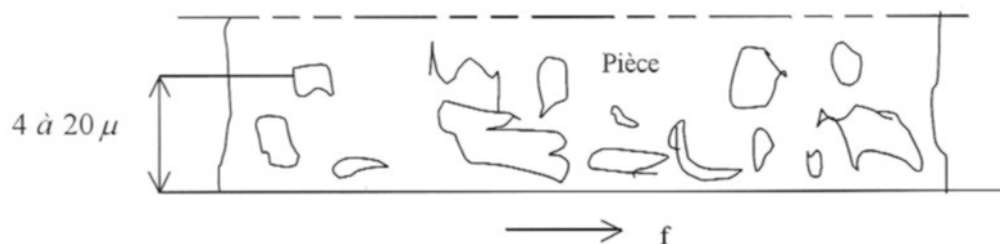


Figure 1.10: Etat micro géométrique des surfaces usinées

1.4 Aspects géométriques :

On distingue des défauts de formes ou défauts macro géométriques et des défauts de surfaces ou micro géométriques.

1.4.1 Défauts de forme ou macro géométriques :

Soit une pièce homogène montée sur un tour parfait à tout point de vue. L'arête tranchante de l'outil conserve une trajectoire parfaitement parallèle à l'axe géométrique des points.

Sous l'effort radial résultant F_r , il faut que la pièce fléchisse et que cette flexion reste élastique. A un instant donné l'outil est à une distance x de l'extrémité gauche de la pièce.

L'inertie de la section droite de la pièce [26], à gauche de l'outil est I , à droite de l'outil elle est plus petite que I c'est-à-dire $I_t = KI$ avec $K < 1$. Du fait de la déformation de la pièce et du déplacement parallèle de l'outil à l'axe des points, l'épaisseur du copeau relevée ne reste pas constante, elle décroît à partir de l'extrémité de la pièce vers le milieu de celle-ci, donc K n'est pas constant. Supposons que cette flexion est négligeable par rapport à la profondeur de passe et que K le rapport d'inertie avant, et après tournage quant on mesure les rayons aux extrémités est donné par:

K = Rapport des inerties avant et après tournage .

L = Longueur de la pièce .

R_1 = Rayon de courbure de la génératrice de la pièce avant usinage.

r_1 = Rayon de courbure de la génératrice de la pièce après usinage.

F = Force de pénétration.

ρ = rayon de la pièce après usinage.

La pièce usinée a une forme de tonneau (Voir Figure. 1.11) avec un rayon:

$$\rho = r_1 + \frac{F x}{6LE\pi R_1^4 / 4} \left[K(x-L)^3 + (1-K) \left(3Lx^2 + \frac{2x^4}{L} - 5x^3 \right) + KL^2(L-x) \right] - \frac{F(L-x)L^3}{6LE\pi R_1^4 / 4} \quad (1.3)$$

Ce calcul permet uniquement de mettre en évidence une origine des erreurs de forme. De la même manière, dans une rectification entre pointes, l'inclinaison relative de l'axe de la pièce et des glissières de la table conduit à une forme longitudinale en hyperboloïde et non en cylindre.

Les erreurs macro géométriques sur les sections droites mesurées par deux touches opposées sont indiquées dans la figure 1.12.

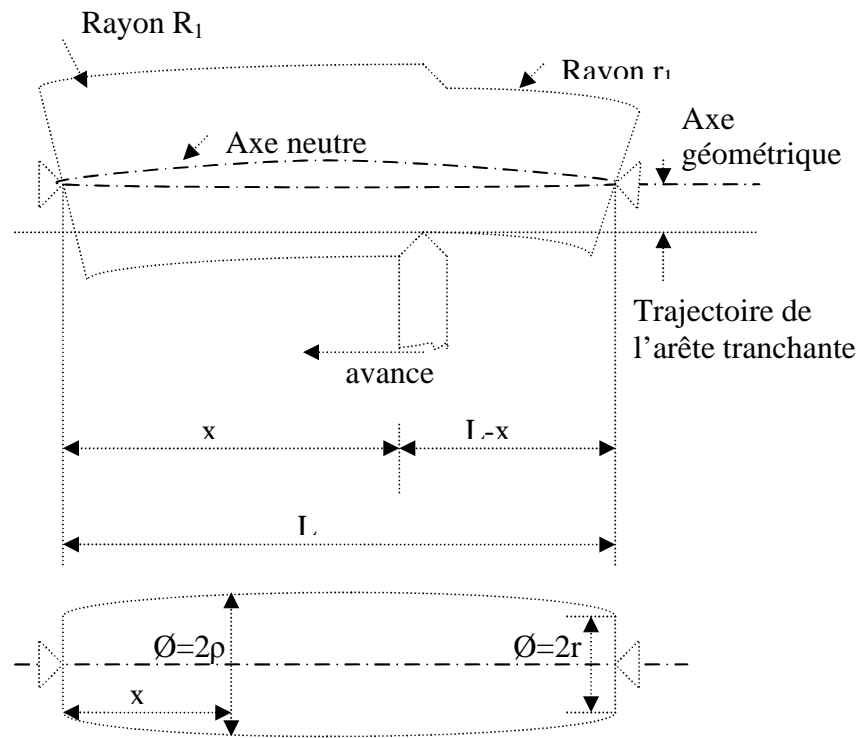


Figure 1.11 : Présentation d'une pièce montée sur un tour [27]

Les nombres impairs de lobes proviennent d'un usinage entre deux surfaces, les sections obtenues sont de diamètres constants. On peut vérifier ceci sur vé. En ce qui concerne les surfaces planes, les déformations macro géométriques ou de forme correspondent au remplacement du plan idéal par une surface gauche concave ou convexe, ou partie concave et partie convexe ou une topographie quelconque.

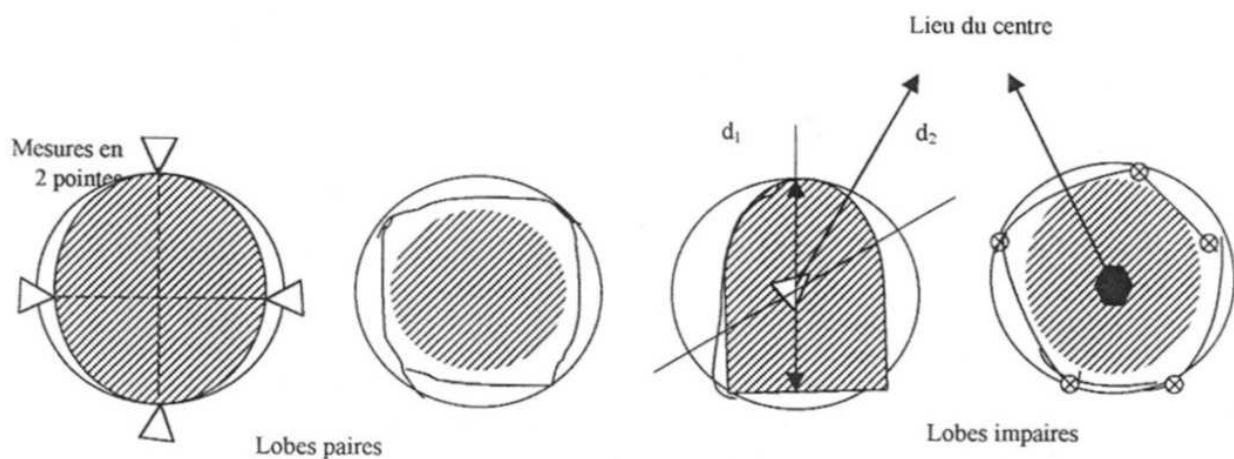


Figure 1.12: forme d'erreurs macro géométriques

1.4.2 Défauts micro géométriques ou défauts de surface :

Ces défauts s'inscrivent sur les défauts macro géométriques sous forme d'ondulation et de rugosité. La distinction entre les deux types de défauts est une caractéristique qui ne provient pas de la surface examinée, mais de l'observateur ou de l'appareil d'observation utilisé.

Ces distinctions résultent de la structure même de nos sens et du fait que tout naturellement, si nous n'y prenons garde, nous regroupons selon le même ordre et dans le prolongement de ces perceptions sensorielles immédiates les observations plus précises que nous demandons aux instruments.

Ainsi, à l'œil nu on voit un défaut global de forme. De même un toucher avec toute la largeur du pouce fournit la perception assez nette d'une ondulation de la forme, à qui s'ajoute une sensation mal définie de rugosité (voir figure 1.13).

Si on imagine un être ou appareil doté des mêmes sens que l'homme mais tels qu'ils soient tous de même sensibilité. Et si de plus cet être est très petit par rapport à tous les défauts, il n'y aura plus pour lui ni rugosités, ni erreurs micro géométriques [28], mais il constatera uniquement des variations de forme, des suites de surfaces lisses.

Dans les appareils servant à obtenir des « relevés de profil » ou à reconstituer le double toucher, le patin correspond au pouce, le palpeur correspond à l'ongle, son déplacement par rapport au patin permet d'enregistrer des rugosités.

Mais il est évident que si le pouce (le patin) est plus ou moins large et appuyé, si l'ongle (le palpeur) est plus ou moins fin et appuyé, indépendamment même de la destruction des aspérités que cela peut produire, les sensations (les enregistrements) d'ondulation et de rugosités seront plus ou moins distinctes (figure 1.13).

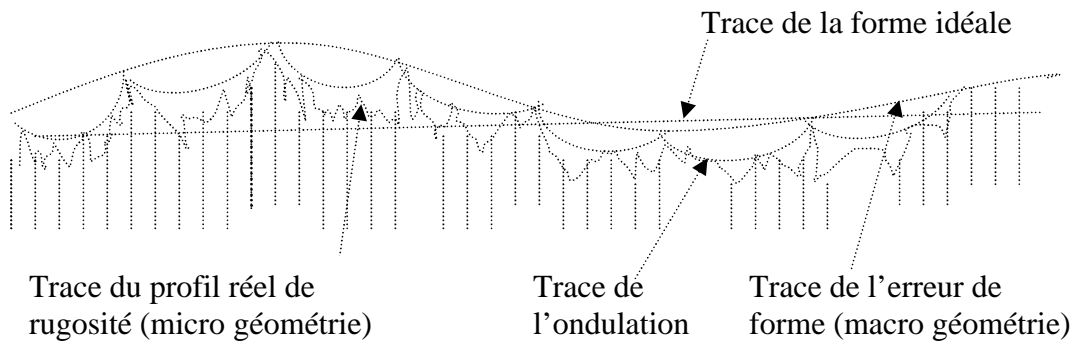


Figure 1.13: présentation schématisée des formes des divers défauts

CHAPITRE 2

METHODES EXPERIMENTALES

2.1 Méthodes d'examen d'une surface

L'examen de la géométrie ou erreur de forme se fait avec les instruments de mesure directs classiques tels que le pied à coulisse, les calibres, le micromètre et au moyen de comparateurs mécanique, pneumatique, électronique, optique et encore avec des niveaux.

2.1.1 Les contrôles de micro géométrie et macro géométrie

Les mesures des erreurs superficielles (ondulations) et rugosité se font avec des appareils spéciaux, très divers. C'est uniquement de ce contrôle qu'il va être question ici [29].

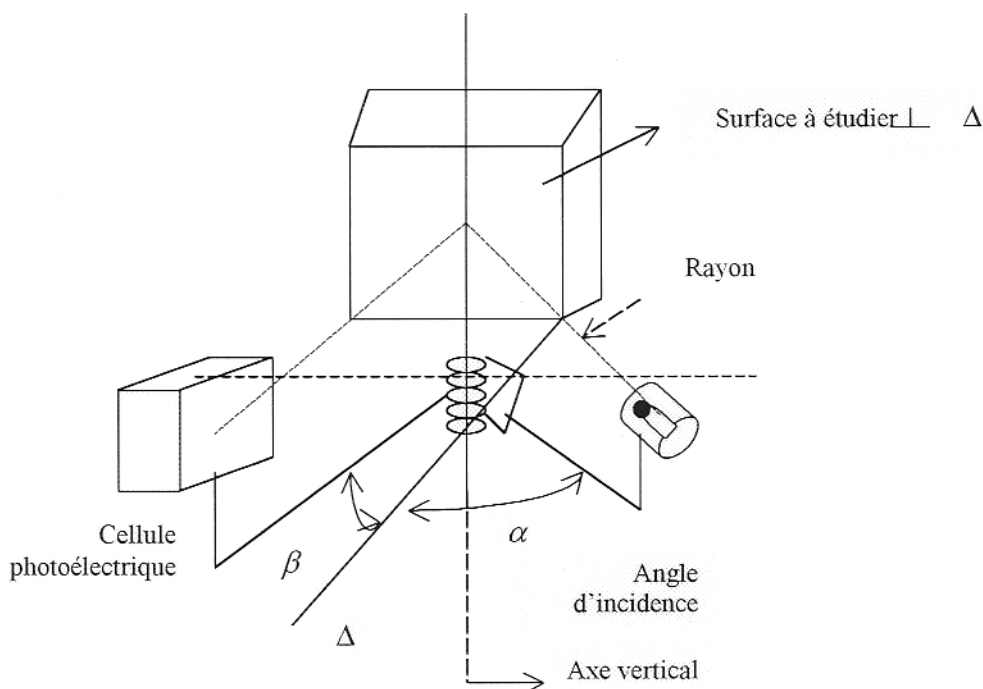


Figure 2.1 : Schéma de principe de l'appareil de mesure des erreurs superficielles

2.1.2 Méthode Optique caractérisant le degré de poli d'une surface

Cette méthode consiste à mesurer le flux diffusé [1,29]. par la surface à étudier qui est placée de façon que l'angle d'incidence soit par exemple ' α '. A l'aide de la cellule photoélectrique, et pour α constant, on mesure le flux diffusé suivant diverses directions en faisant varier l'angle β (figure 2.1).

On peut refaire ces mesures pour de nouvelles valeurs de l'angle d'incidence α .

2.1.3 Méthode des empreintes

Le rugomètre à empreinte permet de relever sur une feuille d'aluminium polie et recuite, l'empreinte de la surface à étudier [1,29]. Le procédé donne toute amplification naturelle des creux égale à R/L (voir figure 2.2).

L'examen de l'empreinte obtenue peut se faire au microscope sur un agrandissement photographique.

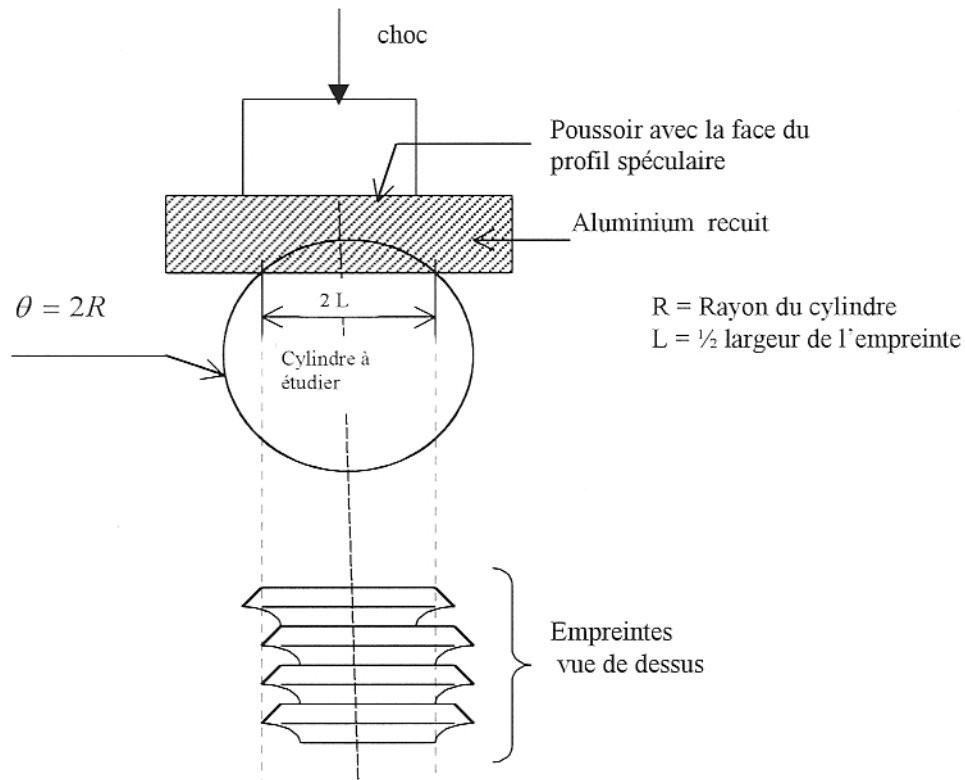


Figure 2.2 : Rugomètre à empreinte

Le procédé permet à la fois un examen global d'une portion de surface et le relevé d'un profil, il est précis.

2.1.4 Méthodes optiques

Ces Méthodes permettent de faire un examen d'ensemble de la surface et de relever une «coupe» de profil [1,29].

2.1.5 Méthode interférentielle [1,29]

Cette méthode est destinée aux pièces de haute précision à surfaces planes.

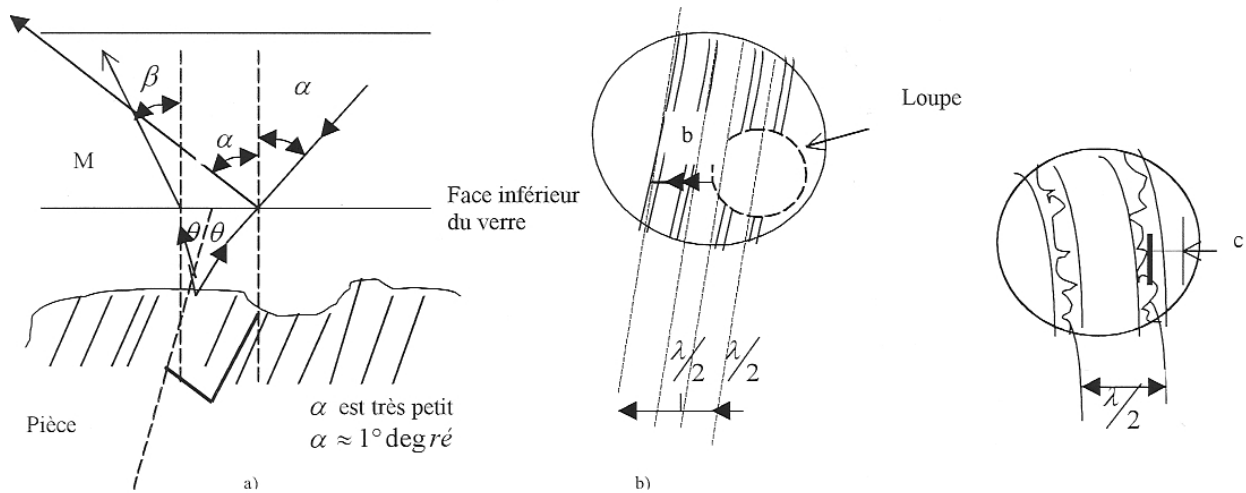


Figure 2.3 : Schéma de principe du contrôle interférentiel

Si sur une telle surface (figure 2.3) on place une plaque de verre bien régulière, un rayon de lumière monochromatique est en partie réfléchi par la face inférieure de la plaque de verre et en partie par la face de la pièce sur laquelle repose la plaque. Entre les deux surfaces il y a un vide atmosphérique et après réflexion, il y'a déphasage entre la lumière réfléchie par la plaque et celle réfléchie par la surface de la pièce. Ce déphasage dépend de l'épaisseur du vide.

Quand la différence de marche est égale à une demi longueur d'onde λ , il y'a interférence et une frange sombre apparaît. Ces franges correspondent aux irrégularités de la surface par rapport à la plaque. Leur interprétation détermine le profil de la surface. La précision de cette méthode est considérable.

2.1.6 Méthodes des appareils mécaniques de contrôle des coupes de profil

Ces appareils comportent un patin ou sabot qui sert à contrôler les ondulations au moyen d'une courbe enveloppe du profil réel et d'un palpeur qui permet de définir une rugosité par rapport à ces ondulations [1,29].

Ces appareils sont de plus en plus utilisés dans les sections de métrologie industrielle. Il est nécessaire de développer les notions générales concernant ces appareils [29].

Un patin de forme sphérique, cylindrique ou plane se déplace en s'appuyant sur la surface. Il est guidé de diverses façons sur une droite de référence Δ . Si la surface du patin BAC (figure 2.4) est sphérique, on peut définir le lieu $E\omega$ du centre du patin.

Ce lieu dépend du rayon R du patin. Une translation de ce lieu E_{ω} d'amplitude égale à ωA et perpendiculaire à Δ donne la courbe obtenue qui est l'enveloppe du profil réel en certain point (Figure 2.4).

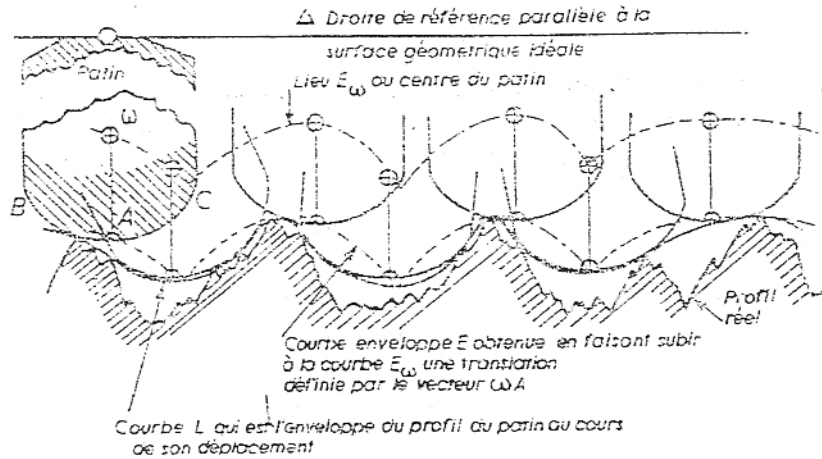


Figure. 2.4 : Profil réel d'une surface

La courbe L enveloppe le profil réel de la surface. Cette courbe dépend du déplacement du patin, ωA qui est très difficile à contrôler, et de l'inclinaison du patin, et elle est relative au patin.

La rugosité du profil réel est enregistrée par le palpeur qui contrôle le profil réel au-dessous de la courbe enveloppe. Il comporte à son extrémité un diamant de l'ordre de 2 à 60 μ de rayon.

Les notions d'ondulation et de rugosité [29] sont liées au procédé mécanique de mesure. Si la distance entre palpeur et patin diminue jusqu'à ne plus avoir que le rayon du palpeur, les ondulations et rugosités seraient confondues.

Les appareils électromécaniques transforment en courant électrique les déplacements relatifs du palpeur par rapport au patin ou à son bras. Une étude complémentaire plus détaillée précise le fonctionnement de ces appareils, leur fidélité est très bonne.

2.2 Choix des paramètres à considérer

2.2.1 Définition des grandeurs caractéristiques de la micro géométrie d'une surface

- Référentiel de rugosité [29]

Il s'agit en fait de grandeurs caractéristiques d'une coupe de profil de la surface, et dans ce qui suit on considère que le phénomène étudié est plan, et seul le cas de patin unique sera examiné.

Pour définir le profil [P] d'une surface, il faut rapporter celui-ci à une ligne de référence. Une première solution consiste à adopter une ligne extérieure au profil et indépendante (figure 2.5).

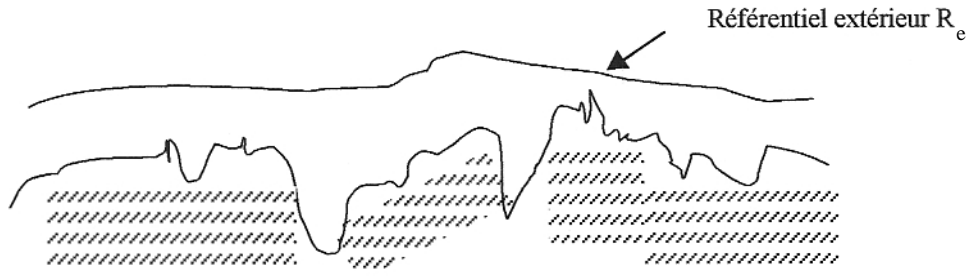


Figure 2.5 : Première présentation d'une ligne extérieure de référence

Une deuxième solution consiste à adopter comme référentiel une ligne s'appuyant sur des plus hautes aspérités du profil, ce référentiel n'est plus totalement indépendant du profil [P] et s'applique dans le système E ou système de la ligne enveloppe (figure 2.6).

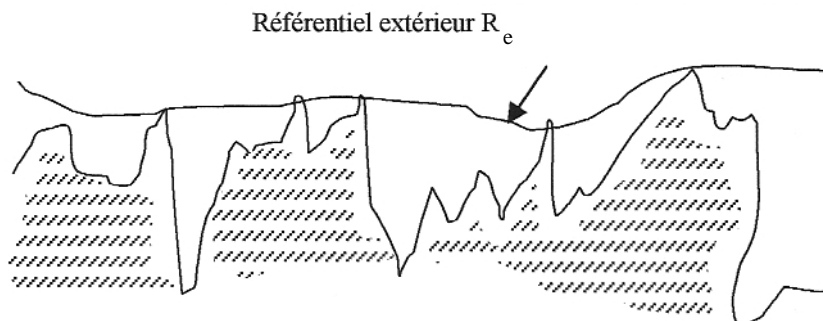


Figure 2.6 : Deuxième présentation d'une ligne extérieure de référence

Une troisième solution consiste à adopter un référentiel R_e lié au profil [P] par une loi quelconque, par exemple la somme des surfaces comprises entre R_e et [P], au-dessus de R_e est égale à la somme des surfaces comprises entre R_e et [P] au-dessous de R_e . C'est le système M ou de la ligne moyenne (figure 2.7).

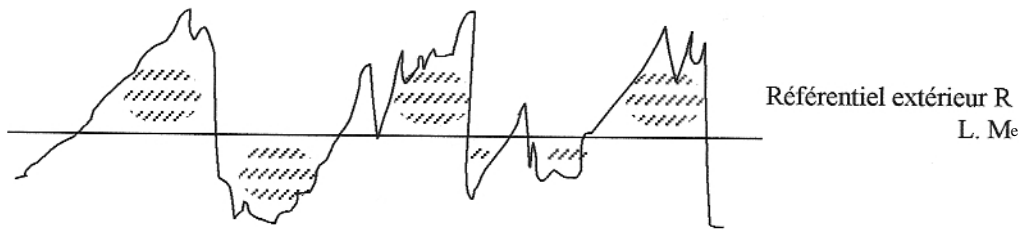


Figure 2.7: Présentation de la ligne moyenne.

De ces trois solutions, la plus logique est la première mais, l'instinct sensoriel conduit à distinguer les notions de rugosités et d'ondulation, qui permettront de considérer également la deuxième et troisième solution.

Cependant la troisième solution suppose connu le profil par une étude préalable, elle ne semble donc pas pouvoir être logiquement retenue comme base des définitions

La deuxième conception est donc adoptée mais combinée indirectement ou directement à la première qui servira à définir un repère absolu. Pour cela le référentiel de rugosité sera une couche enveloppe du profil, courbe obtenue au moyen d'un patin P, le déplacement de celui-ci peut être contrôlé par rapport à un axe A des abscisses qui sera le référentiel du patin ou des ondulations.

2.2.2 Choix du paramètre de rugosité

Du profil défini [P] d'une surface, on peut déterminer les paramètres de mesures suivants: [28,29]

- la longueur d'exploration
- la profondeur moyenne de rugosité
- la profondeur moyenne de rugosité sur la longueur d'exploration
- la ligne moyenne
- la rugosité moyenne arithmétique (R_a)
- la rugosité moyenne quadratique (R_q)
- la profondeur max de rugosité (R_m)
- la hauteur des irrégularités (R_z)
- La rugosité maximale (R_{max})

Parmi tous ces paramètres de mesures, par la suite de notre étude nous ne considérons que la rugosité arithmétique moyenne (R_a), car les courbes de tous ces paramètres ont une même allure et, il y'a une irrégularité des pics et des profondeurs d'un profil d'état de surface. [28]

Cette rugosité est définie comme suit:

$1P_1 = y_1, 2P_2 = y_2, 3P_3 = y_3, \dots, 10P_{10} = y_{10}$, en général $NP_N = y_N$.

les longueurs $M_1P_1, M_2P_2, \dots, M_{10}P_{10}$ en général M_NP_N , seront indiqués en terme général z_1, z_2, \dots, z_{10} tels que:

$M_1P_1 = |z_1|, \dots, M_jP_j = |z_j|, \dots, M_NP_N = |z_N|$.

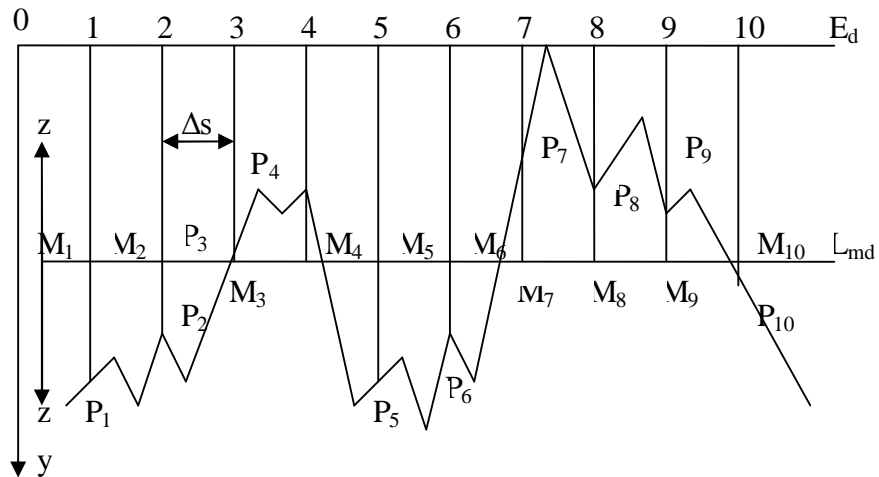


Figure 2.8 : Présentation graduelle d'un profil.

On appelle rugosité moyenne arithmétique R_a le paramètre donné par la relation

$$R_a = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} |z_j|}{N} \quad (2.1)$$

pour la longueur de base $1s$ ou 1 .

Dans ce cas aussi il se peut que plusieurs valeurs de (z) aient la même grandeur et soit p_i le nombre de valeurs z_j d'égal grandeur donc il n'y aura que k valeurs numériques distinctes.

$$R_a = \frac{\sum_{j=1}^{j=N} |z_j|}{N} = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j \cdot |z_j|}{N} \quad (2.2)$$

Remarque: $|z| = |y - R_a|$

Et si le nombre de points de mesure couvrait toute la longueur L , R_a serait donné par:

$$R_a = \frac{1}{l_s} \int_0^{l_s} |z| ds \quad (2.3)$$

2.2.3 Choix des paramètres de coupe

2.2.3.1 Principe de coupe [30]

Pour engendrer une surface durant l'usinage, il faut appliquer à l'outil et à la pièce deux mouvements conjugués.

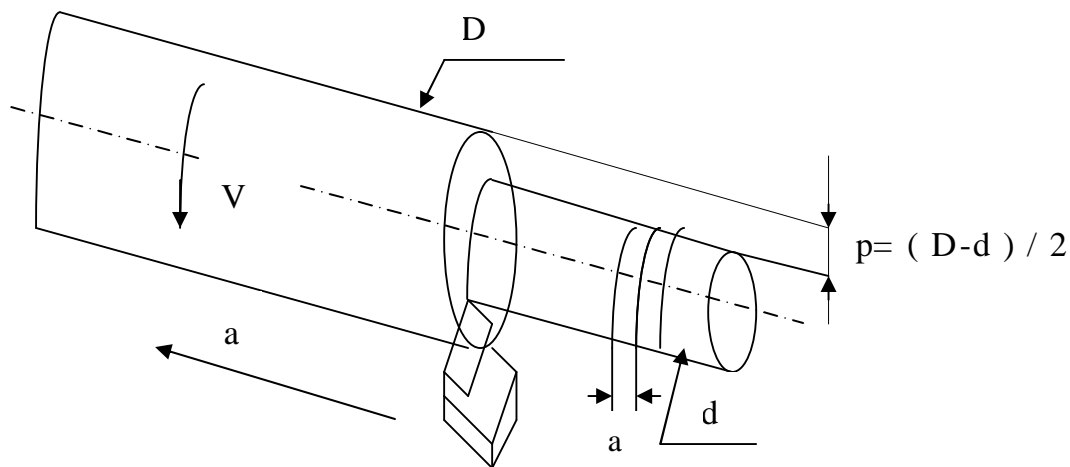


Figure 2.9 : Présentation des mouvements conjugués pendant la coupe

Le mouvement de coupe qui est le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil nécessaire pour couper le métal dans la direction de coupe (rotation de la pièce)

Le mouvement d'avance qui est le déplacement relatif de l'outil par rapport à la pièce dans le sens longitudinal pour engendrer la surface (Translation de l'outil)

La profondeur de passe étant donnée au préalable pour un mouvement d'avance donnant le réglage de la position de l'outil de coupe.

2.2.3.2 Conditions de coupe choisies

Trois principaux facteurs ont été utilisés pour caractériser les conditions de coupe.

2.2.3.2.1 la vitesse de coupe "V"

La vitesse de coupe qui caractérise le mouvement de coupe est une vitesse

instantanée du point considéré de l'arête par rapport à la pièce. Dans le cas du mouvement circulaire, la vitesse de coupe est une fonction de la vitesse de rotation "n" et du diamètre "d" de l'ébauche en rotation. Pour le tournage il faut prendre le diamètre du cercle qui se trouve sur le point de l'arête de coupe le plus éloigné de l'axe de rotation.

Si on adopte une vitesse très grande, l'outil s'use très vite, on dit que l'outil est grillé. Et Si on adopte une vitesse très faible, l'outil est également usé très vite et le temps mis pour l'exécution de la pièce est exagéré. Il existe une vitesse intermédiaire pour laquelle l'usure de l'outil est minimale appelée «vitesse de moindre usure» et qui dépend aussi de la matière à usinée.

$$V = \pi d n / 1000 \text{ [m/min]}. \quad (2.4).$$

où d est en mm.

2.2.3.2.2 La profondeur de passe "p"

La profondeur de passe est la valeur de la couche de métal enlevée entre la surface à usiner et la surface usinée. Elle est déterminée par la nature du métal à usiner et par l'épaisseur à enlever afin d'aboutir à la dimension voulue.

En tournage la profondeur de passe est généralement de 2 à 8mm en ébauche, de 1mm en demi finition et de 0,5 en finition.

2.2.3.2.3 L'avance par tour "a"

C'est la valeur du déplacement de l'arête tranchante pendant que la pièce fait un tour. L'avance est dictée par la profondeur de passe et l'état de surface désiré. Pour la finition l'avance est toujours faible, elle est déterminée aussi par la matière à usiner et la nature de l'outil.

2.3 Essais expérimentaux

2.3.1 Essais d'usinage

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour semi-automatique ((DZFG 200×500)). Des éprouvettes en A33 de 300mm de longueur et 30mm de diamètre ont été préparées sous forme de quatre sections comme indiquées sur la figure 2.10. L'outil de coupe utilisé est en acier rapide supérieur. Ces essais d'usinage sont faits par étape sous l'ordre suivant:

Essais 1 : Variation de la vitesse de coupe en usinage à sec, puis lubrifié.

Essais 2 : Variation de l'avance en usinage à sec puis lubrifié.

Essais 3 : Variation de la profondeur de passe en usinage à sec puis lubrifié.

Essais 4 : Variation de la vitesse de coupe à différentes valeurs d'avance

Essais 5 : Variation de la vitesse de coupe en usinage à sec.

Après chaque passe d'usinage et pour chaque paramètre de coupe considéré, on mesure la rugosité de la surface à l'aide d'un rugomètre modèle ((MITUTOYO corporation SURFTEST 201, code N : 178-921D, série N : 900876)).

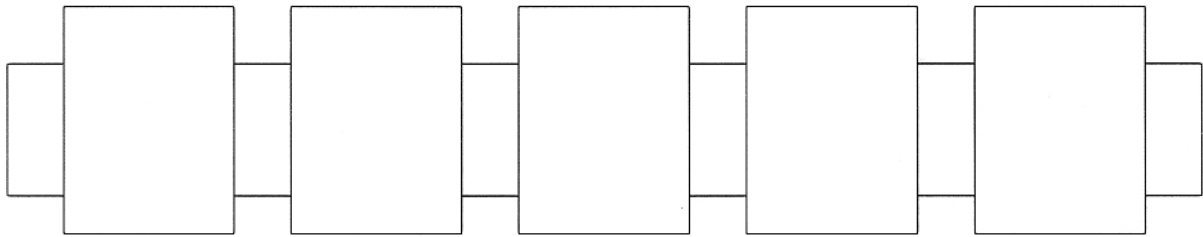


Figure 2.10 : Présentation d'une éprouvette d'essai

2.3.2 Essais de dureté

La dureté d'un métal est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps plus dur. Pour des conditions expérimentales données, la dureté d'un métal **A** est d'autant plus grande que sa pénétration par un corps **B** est faible, le symbole de la dureté est **H** (HARDNESS) [31].

On distingue principalement trois types d'essais de dureté : l'essai Brinell, l'essai Rockwell, et l'essai Vickers.

Pour la suite de notre travail on a opté pour l'essai Vickers qui consiste à imprimer dans le métal étudié un pénétrateur de diamant en forme de pyramide à base carrée, d'angle au sommet de 136° , sous l'action d'une charge F_p . La dureté du matériau est en fonction de la grandeur de l'empreinte laissée par le pénétrateur.

On mesure la diagonale de l'empreinte (d_e) à l'aide d'un profil gramme optique sur l'appareil, puis on calcule l'aire de la pyramide à base carrée (S).

$$S = \frac{d_e^2}{2 \sin\left(\frac{136}{2}\right)} \quad \text{et} \quad H_v = \frac{F_p}{S} = 2F_p \sin\left(\frac{136}{2}\right) \frac{1}{d_e^2} \quad (2.4)$$

Les valeurs de H_v sont tirées des catalogues $H_v(d_e)$.

2.3.3 Essai d'usure et mesure

Les essais d'usure sont faits à l'aide d'un tour semi-automatique. On prépare tout d'abord des éprouvettes usinées avec un outil en **ARS** avec des conditions de coupes normales qui dépendent des dimensions des éprouvettes et de la matière à usiner.

On prépare ensuite des bagues de diamètre intérieur légèrement supérieur aux diamètres des éprouvettes et de nuances différentes.

L'éprouvette est fixée sur le tour, la bague est montée sur l'éprouvette, pour chaque essai on applique des charges sur la bague tandis que la pièce tourne dans la broche du tour (fig.2.11).

Après chaque essai qui dure environ une heure, l'éprouvette est enlevée du tour, puis on mesure la rugosité à l'aide du rugomètre et on mesure aussi le nouveau diamètre de l'éprouvette.

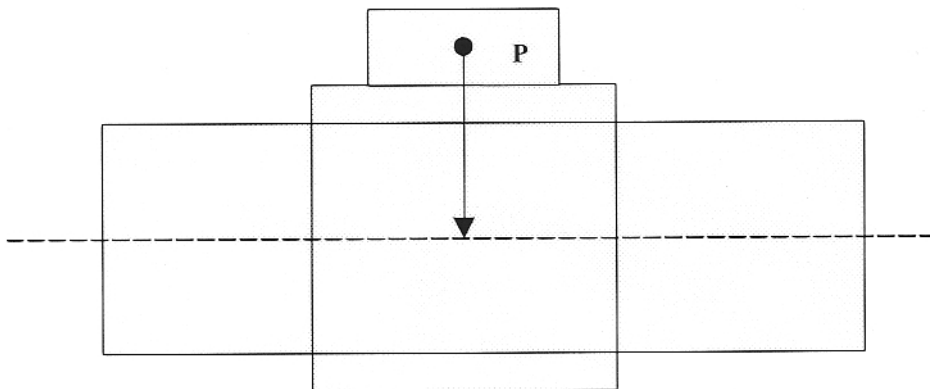


Figure 2.11 : Présentation du Principe d'essai d'usure

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats des essais de coupe.

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des essais expérimentaux faits dans le cadre de ce mémoire afin de valider les hypothèses faites dans notre analyse de l'état de surface.

3.1.1 Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité des surfaces

Les essais effectués dans ce sens consistent à usiner une pièce cylindrique avec plusieurs vitesses de coupe, puis mesurer pour chaque vitesse de coupe considérée la rugosité de la surface. D'après la figure 3.1 On remarque que pour de petites valeurs de la vitesse de coupe, la rugosité augmente rapidement pour arriver à un maximum, puis elle décroît brusquement et, dès qu'elle dépasse 50 m/min elle se stabilise à une valeur égale environ 5 μ m

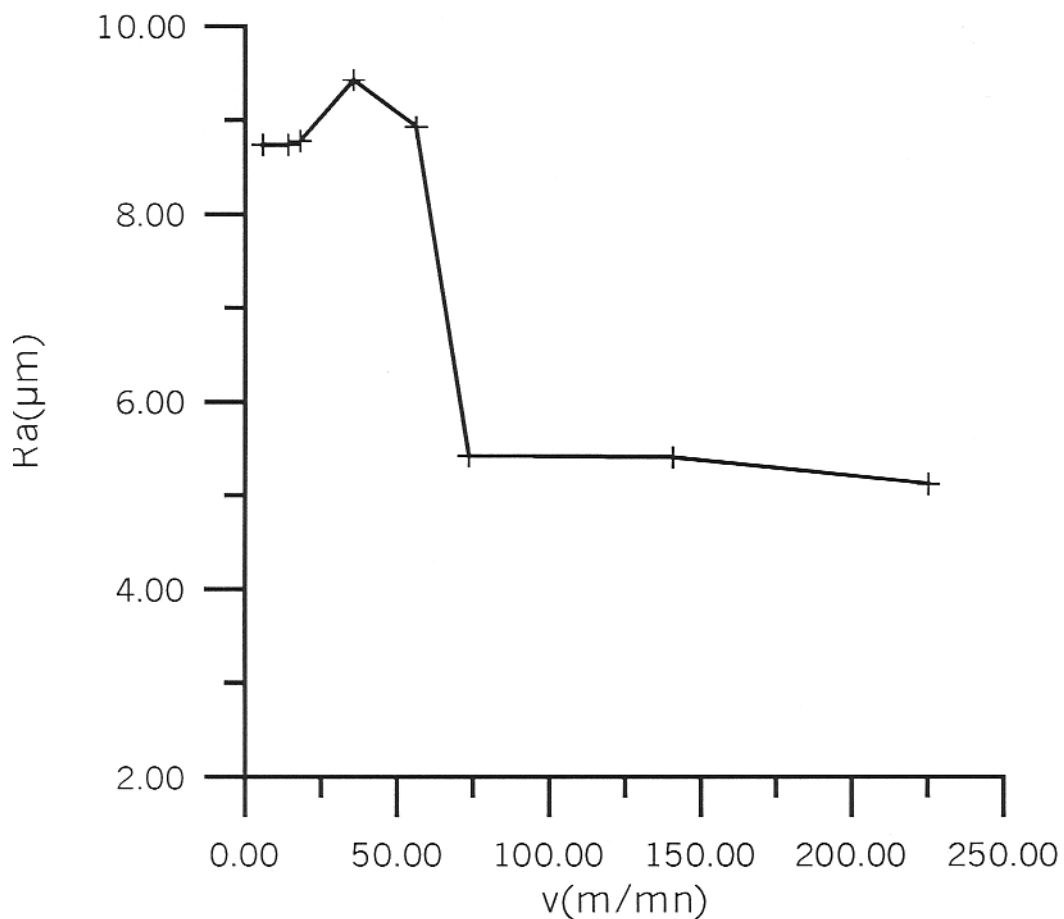


Figure 3.1: Variation de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe pour un matériau A33 Outil en ARS : a = 0.09 mm/tr : p = 0,5mm : travail lubrifié

Cette variation de la rugosité est due au fait que lorsque le copeau glisse sur la face de dégagement de l'outil, il y a un frottement intense. Comme tous les frottements celui-ci crée des élévations de température micro localisées [32], des fusions [33] et des microsoudures, [33] ceci peut aboutir au collage d'une certaine quantité de matériau sur l'outil juste au dessus de la face de coupe, c'est ce qu'on appelle la fausse arête qui, en croissant va complètement changer les caractéristiques de l'usinage. La cote de la pièce usinée et l'état de surface sont changés. Lorsque cette fausse arête aura grandi, elle sera soumise à des efforts tels qu'elle sera arrachée d'un bloc ôté de l'outil, et on reviendra aux caractéristiques de coupes précédentes.

Ce cycle de formation d'une fausse arête et son élimination provoque des irrégularités de surfaces [34] semblables à des vagues. Le même phénomène se présente si l'on change l'avance.

3.1.2 Influence de l'avance sur la rugosité des surfaces.

Au mouvement de coupe, vient s'ajouter un autre mouvement relatif entre l'outil et la pièce, le mouvement d'avance, nécessaire à la génération de la surface de la pièce. Cet essai consiste pour une même vitesse de coupe à usiner une pièce avec plusieurs valeurs d'avance, et mesurer pour chaque avance considérée, la rugosité de la surface.

La courbe de la figure 3.3 a l'allure d'une parabole. Plus l'avance augmente plus la rugosité augmente jusqu'à un stade où cette dernière atteint un seuil qu'elle ne peut dépasser. Ce qui se passe en réalité c'est que plus l'avance augmente plus les aspérités (pics) s'éloignent l'un de l'autre, et il arrive un certain stade où on aperçoit à l'œil nu une forme de filet, puis une forme de vis sans fin, puis à une vitesse d'avance maximum, on aperçoit un tracé sur la pièce (figure 3.2).

Donc on peut conclure que l'amélioration des états des surfaces peut se faire en jouant sur le facteur avance, plus l'avance est petite, plus la rugosité est meilleure.

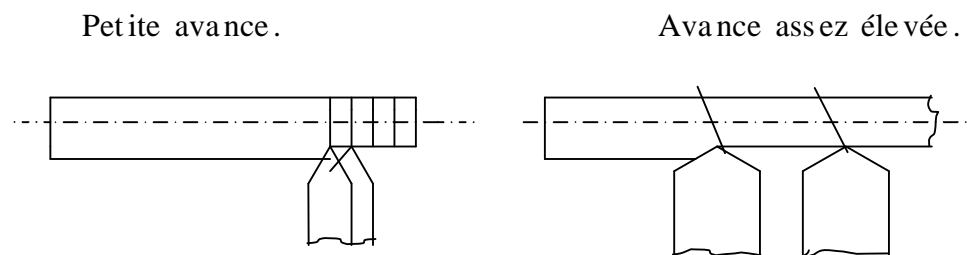


Figure 3.2: Schéma des pics laissés par l'outil de coupe

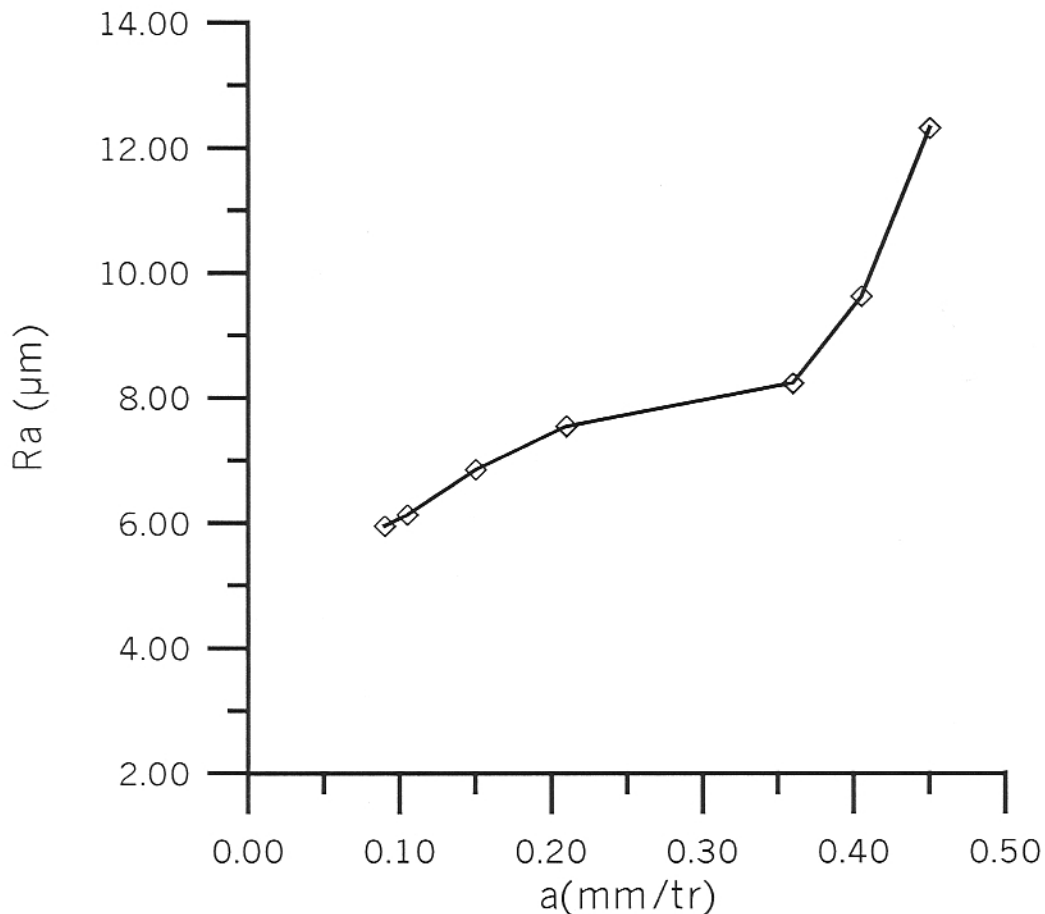


Figure 3.3: Variation de la rugosité en fonction de l'avance pour un matériau A33. Outil en ARS $V = 56.29$ m/min ; $p = 0,5$ mm; travail lubrifié.

3.1.3 Influence de la profondeur de passe sur la rugosité des surfaces.

La distance entre la surface de la pièce et la surface engendrée est appelée «profondeur de passe». Afin d'arriver à la dimension finale de la pièce, on doit souvent effectuer plusieurs passes. La profondeur de passe est définie comme la couche de matière de la pièce qui doit être enlevée par un passage unique de l'outil. Pour une même vitesse de coupe et une même avance, on usine la pièce avec plusieurs valeurs de la profondeur de passe, et pour chaque profondeur de passe on mesure la rugosité de la surface. La courbe de la rugosité en fonction de la profondeur de passe (figure 3.4), a l'allure d'une droite, au fur et à mesure que l'on augmente la profondeur de passe les états de surface vont en se dégradant.

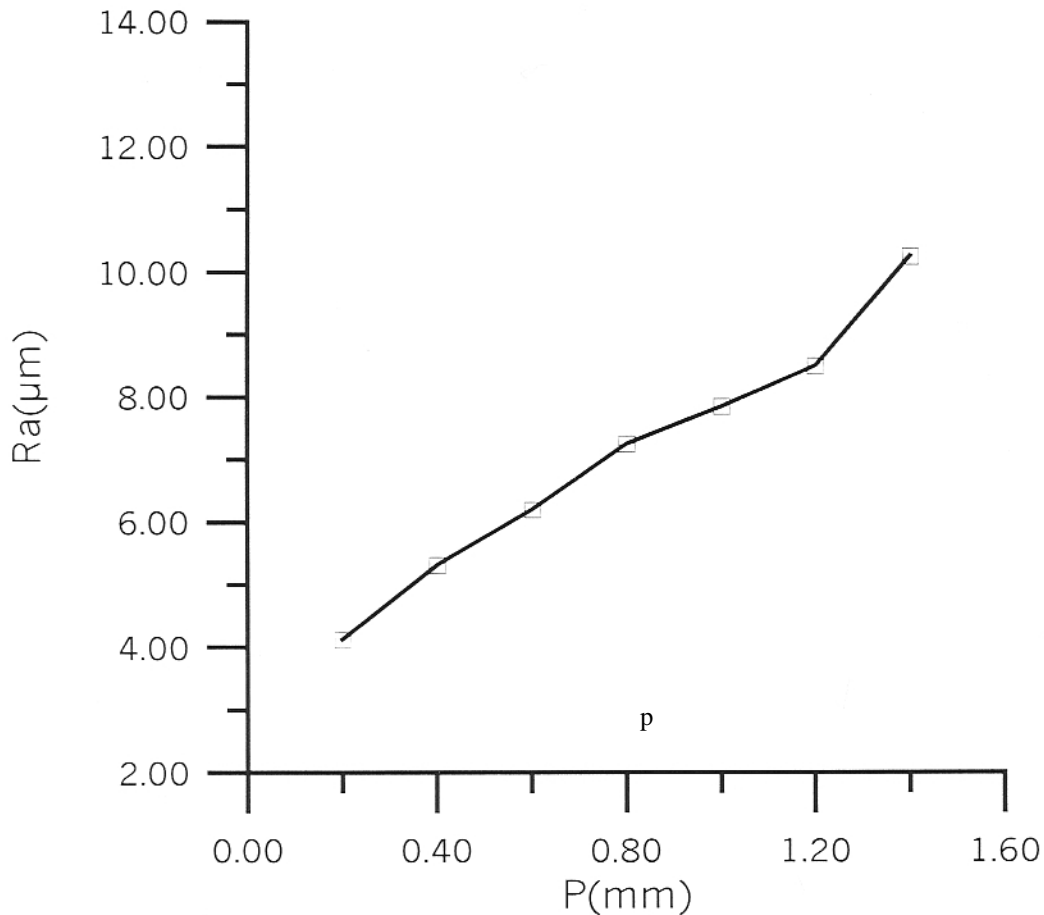


Figure 3.4: Variation de la rugosité en fonction de la profondeur de passe matériau A33, outil en ARS, $V=56,29\text{ m/min}$, $a=0,09\text{ mm/tr}$, travail lubrifié.

Ceci est supposé dû à l'évolution des déformations plastiques avec l'épaisseur du copeau enlevé c'est-à-dire la pénétration de l'outil de coupe dans le matériau usiné, et il peut y avoir: formation du copeau adhérent, broutement, vibration de la machine outil dû à l'augmentation des efforts de coupe et le phénomène de déformation plastique lors de l'enlèvement de la matière durant l'usinage [35].

L'augmentation des efforts de coupe crée un important dégagement de chaleur, qui risque de détruire l'arête de coupe de l'outil, ce qui conduit à la dégradation de la surface. Par contre l'allure de cette courbe est complètement différente dans le cas de l'usinage avec des outils en carbure métallique. Les carbures métalliques ont une bonne résistance à la chaleur, donc à une température élevée. Pour élever la température on augmente la profondeur de passe, jusqu'à ce que la matière se rapproche de sa température de fusion et devient moins résistante aux efforts de coupe. Les carbures métalliques gardent le même comportement physique ce

qui facilite la coupe et, diminue la rugosité de la surface usinée.

Donc on peut conclure dans le cas d'usinage avec outil en ARS que, la profondeur de passe influe sur l'état de surface, et son influence dépend de l'outil de coupe.

3.1.4 Influence de la vitesse de coupe pour différentes valeurs de l'avance.

Dans cet essai nous avons fixé la passe de profondeur, et pour quelques avances nous avons fait varier la vitesse de coupe. Puis nous avons mesuré la rugosité de la surface.

La courbe de la figure 3.5 montre que pour différentes avances l'allure de la courbe de variation de la rugosité avec la vitesse de coupe est similaire

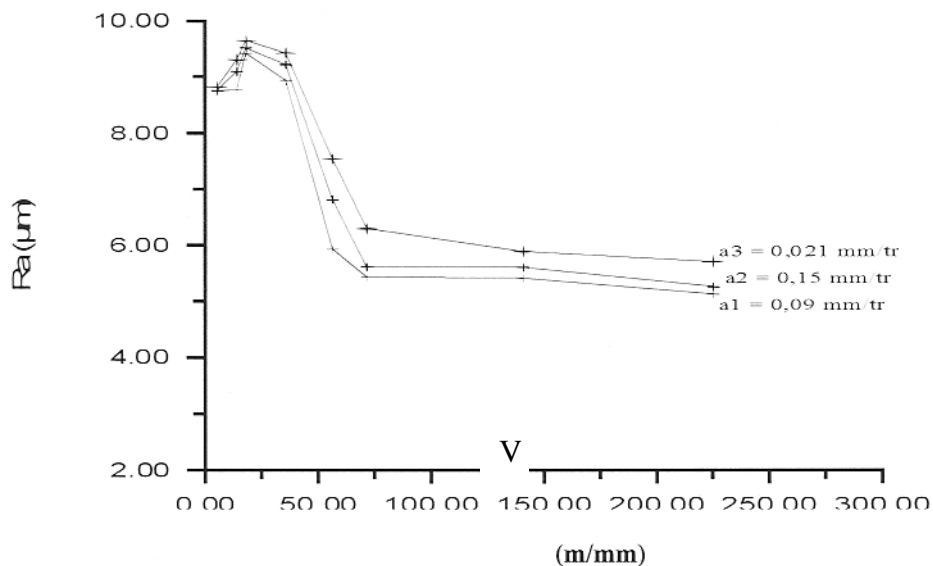


Figure 3.5: Variation de Ra en fonction de la vitesse de coupe pour différentes valeurs d'avance, matériau : A33, outil en ARS, $p = 0,5 \text{ mm}$ travail lubrifié.

Ce qui veut dire qu'on peut prévoir que si on augmente la vitesse de coupe pour différentes avances, on a une augmentation brusque de la rugosité jusqu'à une valeur maximale, suivie d'une diminution rapide et la courbe se stabilise enfin. L'usinage donne un bon état de surface pour des avances encore plus petites, car le domaine des vitesses n'est pas critique, d'où toutes les courbes prévues à des vitesses supérieures à $60 \text{ m}/\text{min}$, sont placées en dessous des courbes du graphe de la figure ci-dessus.

3.1.5 Influence de la lubrification sur la rugosité.

Pour diminuer le frottement quelle qu'en soit l'origine on interpose entre les pièces une couche séparatrice formée d'une substance appelée: le lubrifiant [36]. Cette matière visqueuse a une influence importante sur la rugosité des surfaces usinées et sur l'usinage même.

Les deux courbes de la figure 3.6 montrent la différence entre les rugosités obtenues durant l'usinage à sec et l'usinage avec lubrification.

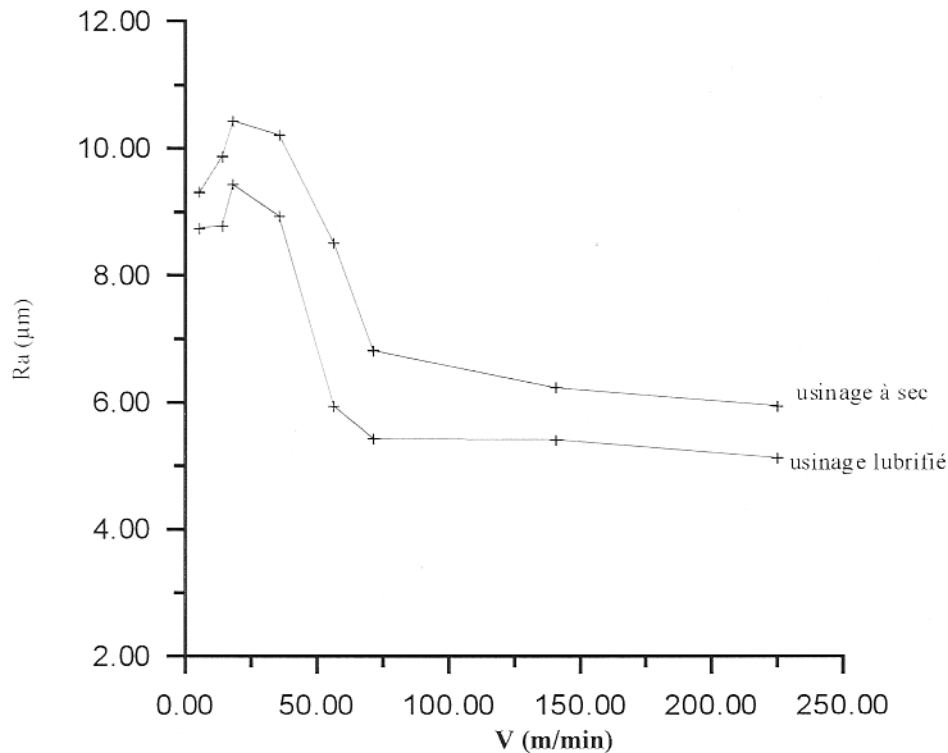


Figure 3.6 Variation de Ra en fonction de la vitesse de coupe, travail lubrifié et à sec matériau A33, outil en ARS, $a = 0,09$ mm/tr, $p = 0,5$ mm

Ces deux courbes ont une même allure seulement, pour de même valeur de l'avance, de la profondeur de passe, de la matière à usiner et de l'outil de coupe, on remarque un net décalage vertical des deux courbes dû à la lubrification au cours de l'usinage. Donc toutes les rugosités pour les vitesses choisies pour des travaux avec lubrification sont nettement inférieures à celles en usinage à sec.

L'usinage lubrifié favorise l'obtention d'un bon état de surface car le lubrifiant diminue les frottements entre outil et copeau et, diminue l'augmentation de la zone de déformation ou enlèvement du métal. Avec la lubrification la déformation se fait dans des conditions thermiques plus basses que celles à sec. Alors, on assiste à un écrouissage supplémentaire des couches superficielles du matériau usiné.

Ceci est bien justifié par le fait que la lubrification facilite aussi le glissement du copeau et diminue les efforts fournis pour la coupe, ce qui entraîne une réduction de la déformation plastique [37] du matériau à l'avant de l'outil et provoque moins d'irrégularités de la surface. Donc on peut dire que la lubrification améliore l'état de la surface.

3.2 Résultats des essais de dureté:

3.2.1 Influence de la vitesse de coupe sur l'écrouissage superficiel.

La figure 3.7 montre qu'à une profondeur de un millimètre de la surface usinée, la micro dureté pour différentes vitesses de coupe choisies, montre tout de suite que l'écrouissage évolue et augmente pour de petites vitesses de coupe afin d'atteindre un maximum de micro dureté, puis celle-ci diminue au fur et à mesure que la vitesse augmente, l'écrouissage devient sensiblement constant pour les grandes vitesses de coupes.

C'est la zone superficielle qui a gardé le souvenir de toutes les atteintes par l'outil en faisant varier la vitesse de coupe, sa structure cristalline en a été plus ou moins défigurée.

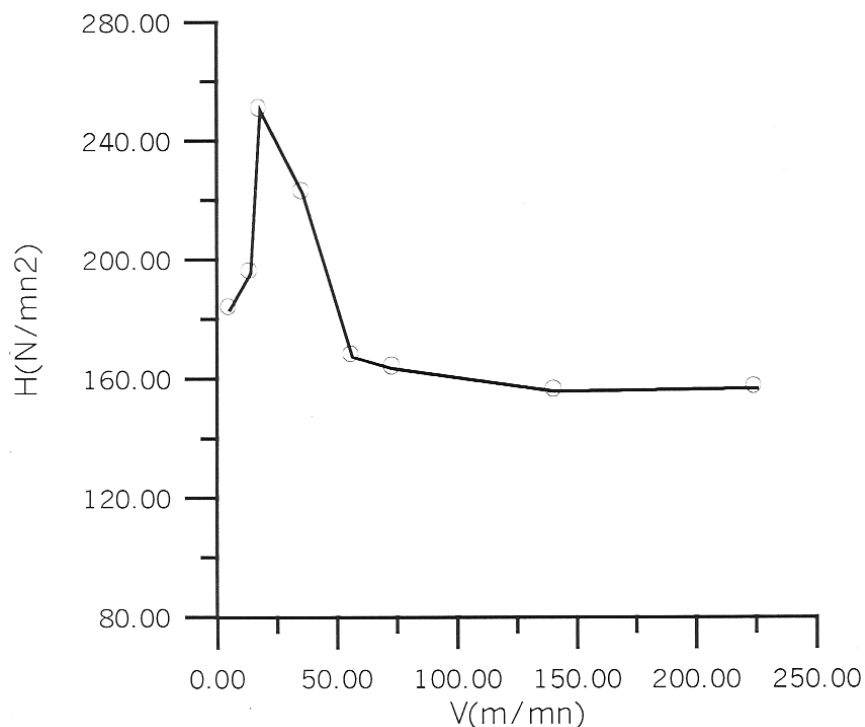


Figure 3.7: Variation de la micro dureté superficielle en fonction de la vitesse de coupe pour le matériau A33.

3.2.2 Influence de l'avance sur l'écrouissage superficiel.

L'influence de l'avance sur l'écrouissage superficiel est beaucoup plus simple

à analyser et à définir, on obtient une courbe ayant une forme de parabole (figure 3.8). La rugosité croît pratiquement dans tous les cas avec l'avance. L'écroûissage augmente dans le même sens que l'avance, et la déformation devient difficile à cause de la concentration des contraintes [38] de cisaillement dans la zone de coupe

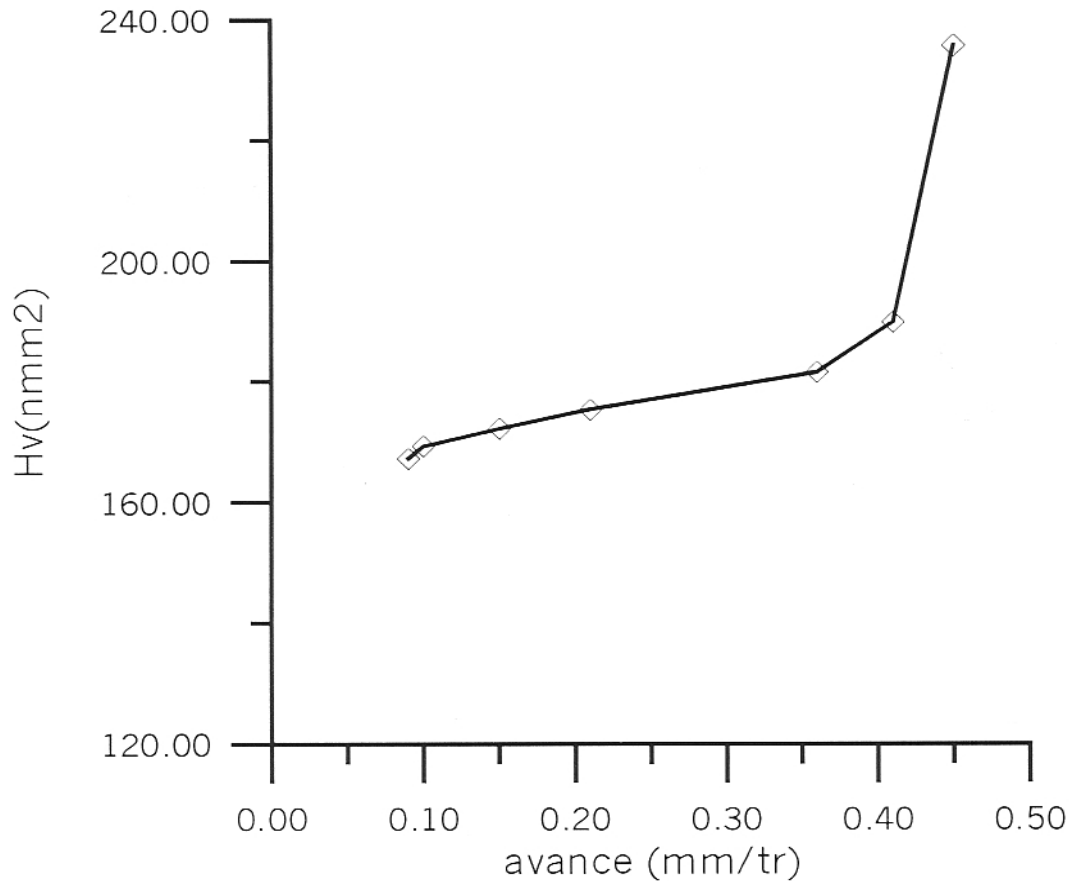


Figure 3.8: Variation de la micro dureté superficielle en fonction de l'avance: matériau A33, outil en ARS, $V=56,29$ m/min, $p=0,5$ mm, travail lubrifié.

3.2.3 Influence de la profondeur de passe sur l'écroûissage superficiel.

Quant à la profondeur de passe, son influence sur l'écroûissage superficiel est strictement croissante (figure 3.9). Plus la profondeur de passe augmente et plus la section du copeau augmente, donc les efforts de déformation croient.

On en déduit que les opérations d'usinage provoquent un écrouissage superficiel du matériau usiné, c'est-à-dire que la déformation plastique du matériau dans la zone de coupe provoque l'écroûissage superficiel. Alors ceci provoque la micro dureté de la couche superficielle par rapport à l'état initial du matériau

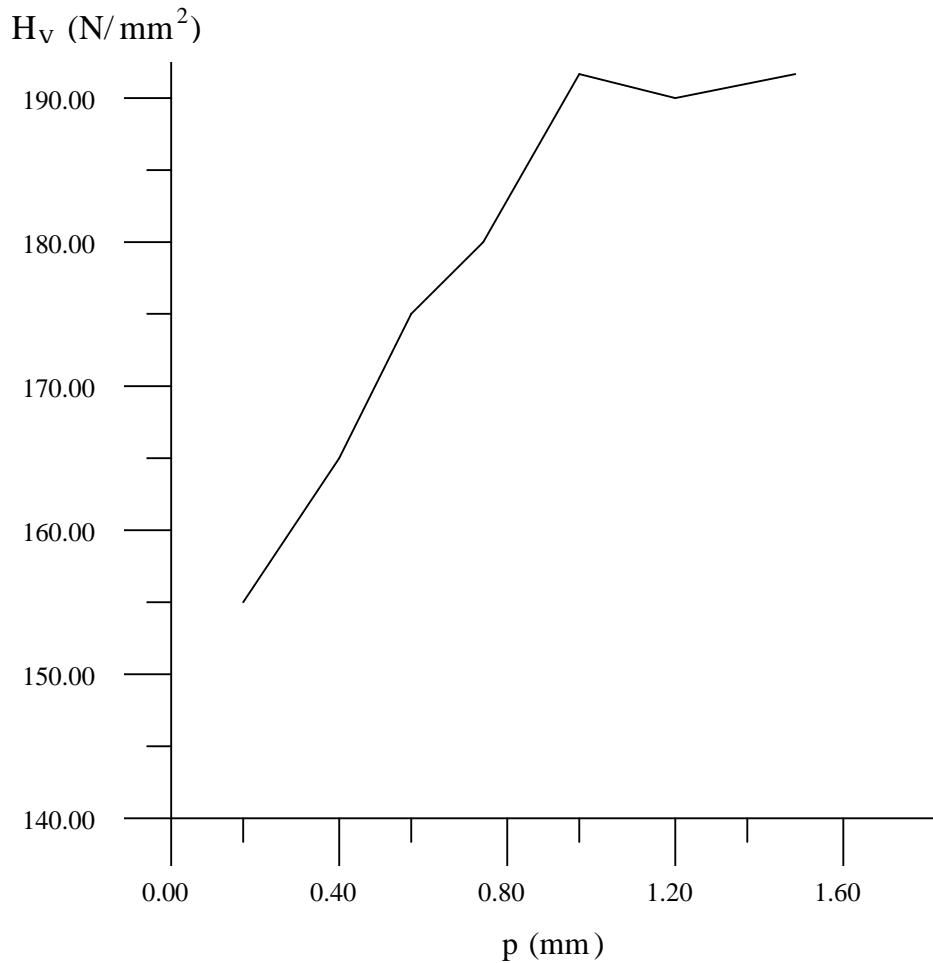


Figure 3.9: Variation de la micro dureté superficielle en fonction de la profondeur de passe matériau A33, outil en ARS, $a=0.09\text{m.mm/tr}$, $V=56.29\text{ m/min}$.

3.3 Résultats des essais d'usure.

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficile à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagne de transformations physiques et chimiques des surfaces, donc il est intéressant d'étudier l'influence de la vitesse et de la charge sur l'usure entre deux pièces de même nuance, et entre deux pièces de nuances différentes.

3.3.1 Frottement entre deux pièces de même nuance.

3.3.1.1 Influence de la vitesse sur le frottement (travail à sec).

La figure 3.10 ci-dessous représente l'évolution de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses différentes en fonctionnement à sec. En ce qui concerne les courbes correspondantes aux vitesses 560 et 900 tr/min, on remarque que la rugosité croît jusqu'à un maximum pour les quinze premières minutes, puis elle décroît graduellement et tend à se stabiliser vers la fin de l'expérience. Nous verrons par la suite ce qui se passera si l'on continue l'expérience. Sur cette courte durée de l'expérience il apparaît que la rugosité de l'alésage a une influence sur l'amélioration de la rugosité du cylindre dû au frottement des deux pièces.

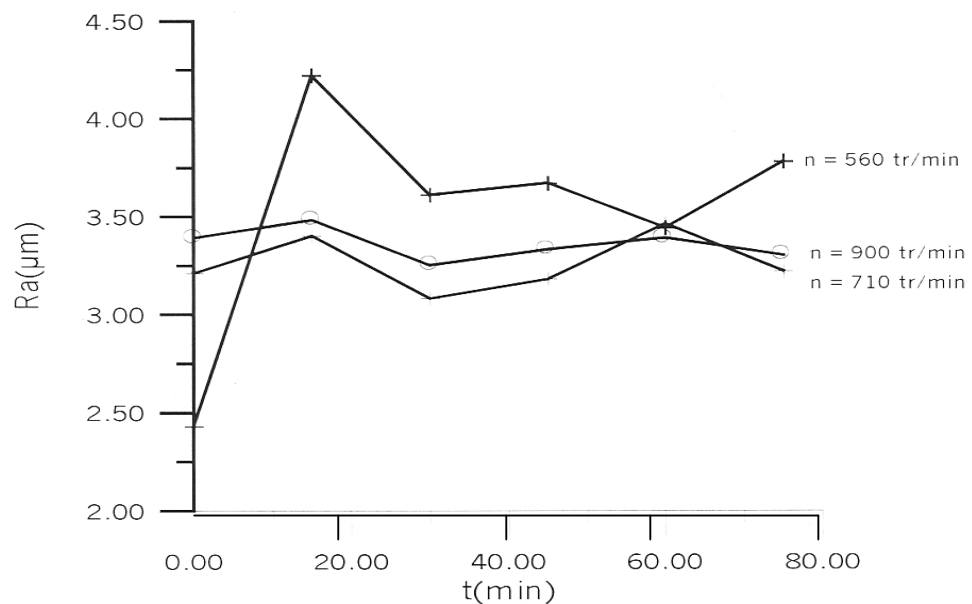


Figure 3.10: Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation différentes du cylindre, travail à sec, $P=10N$

Dans une première étape on remarque une formation rapide de l'arête rapportée pour chaque pic qui joue le rôle d'outil de coupe, puis une destruction de cette arête. Dans la deuxième étape, il y a rapprochement des rugosités des deux surfaces, et le phénomène d'influence commence. Les hauteurs des pics diminuent ce qui entraîne une augmentation de la surface de contact des deux pièces, c'est-à-dire la stabilité de la rugosité. C'est la période la plus longue, qui correspond à la durée de vie de la surface. La troisième étape n'est pas mentionnée sur le graphe mais nous la verrons plus tard. Mais pour une vitesse de 710 tr/min on remarque que la phase de cette expérience donne des résultats tout à fait différents que ceux donnés par la

vitesse 560 tr/min, car la rugosité augmente rapidement dans les quinze premières minutes. Par la suite de l'expérience la variation de la rugosité est faible, mais le phénomène d'influence est le même et pour une grande vitesse la variation de la rugosité commence à disparaître

Tableau 3.1: Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, Travail à sec, P=10N.

| | Coefficient de frottement (f) | | |
|------------------|-------------------------------|------|------|
| Vitesse (tr/min) | 560 | 710 | 900 |
| Temps (min) | | | |
| 0 | 0,37 | 0,16 | 0,13 |
| 75 | 0,19 | 0,14 | 0,11 |

3.3.1.2 Influence de la vitesse sur le frottement (travail lubrifié):

Les trois courbes de la figure 3.11 diffèrent par rapport à ceux de la figure 3.10, seulement la stabilité de la variation de la rugosité est plus avancée et ceci est dû à la lubrification qui diminue les efforts de frottement, les contacts mécaniques ainsi que la température.

La courbe correspondante à la vitesse 560 tr/min, montre que la rugosité de l'alésage a amélioré la rugosité de la pièce cylindrique en croissance et décroissance, ayant l'allure d'une sinusoïde amortie, par contre pour les vitesses 900 et 710 tr/min, la rugosité est un peu plus stable dans la majorité des étapes d'usure. Ceci est dû à la bonne lubrification. Le glissement d'une pièce par rapport à l'autre fait entrer les aspérités dans le domaine plastique, et il faut s'attendre à une influence de la vitesse sur le frottement (tableau 3.2).

Un bourrelet frontal se forme et une sollicitation tangentielle apparaît entre le cylindre et l'alésage et la vitesse va intervenir dans l'effort tangentiel résistant et opposé au mouvement du cylindre. Et il apparaît deux autres causes d'intervention du facteur vitesse sur le frottement :

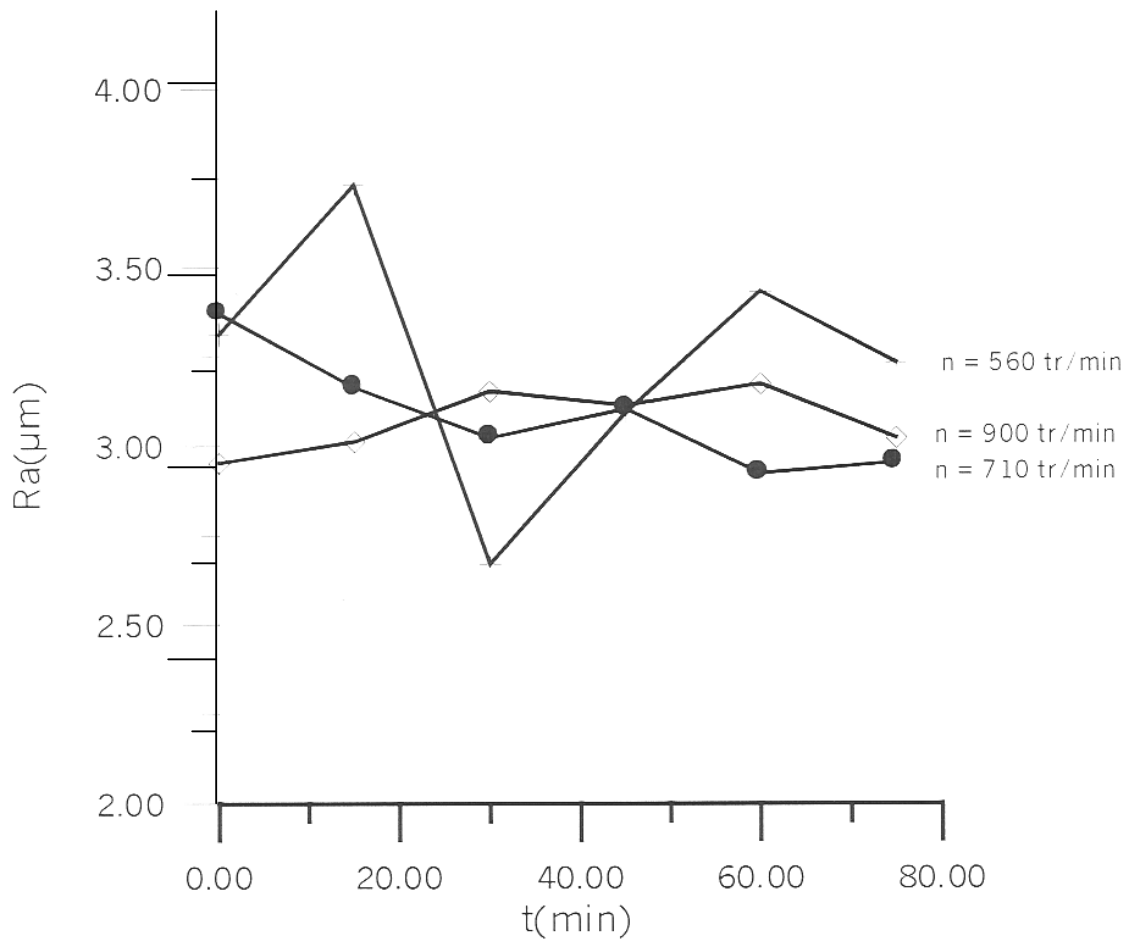


Figure 3.1 1: Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail lubrifié, $p=10\text{N}$.

Tableau 3.2: Coefficient de frottement (f), entre A33 et A33, Travail lubrifié, $P=10\text{N}$

| | | Coefficient de frottement (f) | | |
|-------------|----|-----------------------------------|------|------|
| | | Vitesse tr/min | 560 | 710 |
| Temps (min) | 0 | 0,22 | 0,29 | 0,23 |
| | 75 | 0,20 | 0,21 | 0,19 |

1/ La forme et l'espace des aspérités : L'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs en un point, donne à la surface si le passage précédent a dénudé, la structure cristalline en ce point, cet intervalle de temps décide du fait que la zone dénudée pourra ou non reconstruire son manteau protecteur.

2/ Le maintien d'une température normale: La vitesse règle le cylindre contre les échauffements et les refroidissements successifs que provoque la friction [39] en un point donné.

Ces variables vont décider à leur tour de l'apparition de l'ampleur de phénomènes convexes tels que la trempe, la diffusion...etc

3.3.1.3 Influence de la charge sur le frottement (travail à sec).

La figure 3.12 montre que ces trois courbes ont à peu près une même allure à quelques différences près pour un temps dépassant les soixante premières minutes. La courbe correspondante à la charge 60N montre que la rugosité augmente rapidement dans les quinze dernières minutes. Ceci prouve que le phénomène d'usure cesse à cause de l'augmentation de la température qui influe négativement sur la résistance de la matière. Sachant que lorsque la température augmente l'acier se dilate et sa résistance diminue et, puisqu'il y a une forte pression entre les deux pièces, le phénomène d'usure demande une grande résistance de la matière [40].

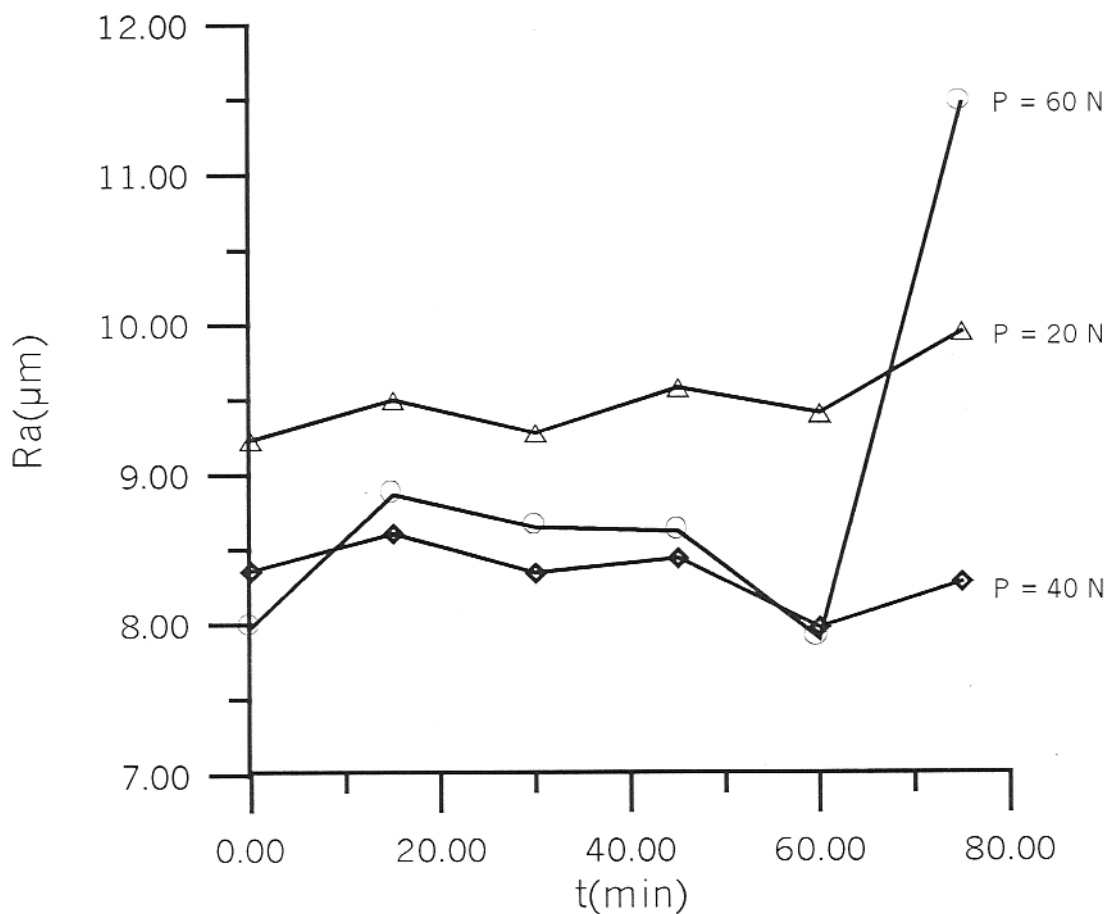


Figure 3.12: Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail à sec, $V=560$ tr/min.

Ci cette demande s'approche de la résistance de la matière, alors la couche superficielle commence à se détruire. Pour justifier ce commentaire, nous avons fait la même expérience avec une bonne lubrification et nous avons retrouvé le même résultat.

Tableau 3.3: Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail à sec. $V=560$ tr/min

| | | Coefficient de frottement (f) | | |
|-------|------------|-------------------------------|------|------|
| | | 20 N | 40 N | 60 N |
| Temps | Charge (N) | | | |
| | 0 | 0,20 | 0,21 | 0,24 |
| | 75 | 0,14 | 0,20 | 0,40 |

3.3.1.4 Influence de la charge sur le frottement (travail lubrifié).

La figure 3.13 qui représente la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes avec lubrification continue montre, que la variation de la rugosité pour la courbe correspondante à la charge 20 N, se fait à double rôle, ceci est dû à la rugosité de l'alésage qui augmente la profondeur des vallées sur le cylindre à l'aide de ces pics bien pointus, et d'un autre côté elle diminue les hauteurs des pics du cylindre. Pour la courbe correspondante à la charge 60 N, la rugosité diminue dans les quarante cinq premières minutes puis elle augmente pendant le reste de l'expérience, ce qui explique la diminution des hauteurs des pics du cylindre, puis la rugosité du cylindre s'améliore.

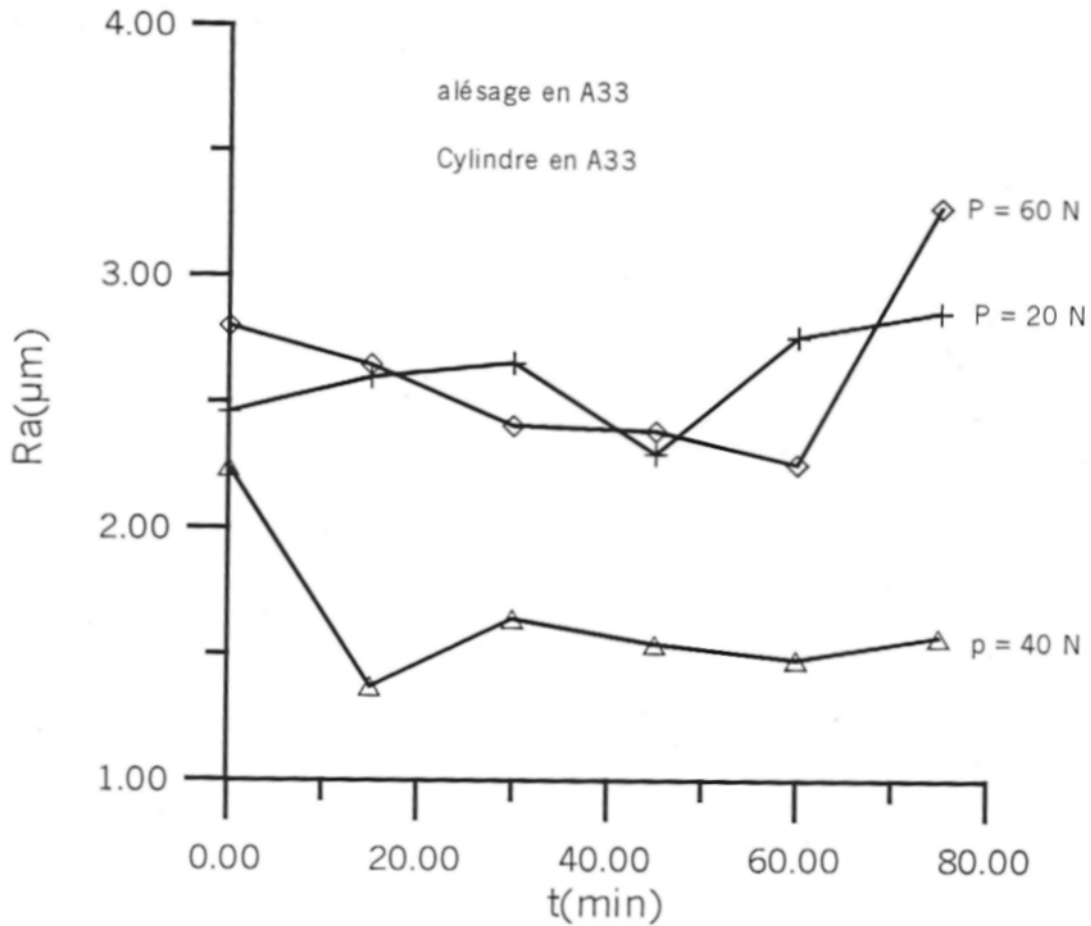


Figure 3.13: Variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail lubrifié, $V=560$ tr/min.

Tableau 3.4: Coefficient de frottement (f) entre A33 et A33, travail lubrifié, $V=560$ tr/min.

| | Coefficient de frottement (f) | | |
|--------------------------|-----------------------------------|------|------|
| Charge (N) \ Temps (min) | 20 | 40 | 60 |
| 0 | 0,15 | 0,13 | 0,80 |
| 75 | 0,14 | 0,11 | 0,20 |

3.3.1.5 Influence de la charge sur le coefficient de frottement.

Dans le cas du frottement à sec (tableau 3.1; 3.3; et 3.6) on aperçoit que le

coefficient de frottement pour des charges de 20 et 40 N diminue un peu. Il est fort possible que la force de frottement entre les deux surfaces a diminué à cause du taillage des aspérités, ce qui augmente les surfaces de contact des deux pièces. Par contre pour la charge 60 N le coefficient de frottement a augmenté à la fin de l'expérience, c'est dû à la forte pression entre les deux pièces qui provoquent un grand dégagement de chaleur ce qui augmente la force de frottement. Dans le cas du fonctionnement lubrifié (tableaux 3.2; 3.4; 3.5; et 3.7), les coefficients de frottement diminuent dans tous les cas, ce qui montre que le lubrifiant diminue la température et facilite le mouvement entre les deux pièces [39].

3.3.2. Frottement entre deux pièces de nuances différentes.

3.3.2.1. Influence de la vitesse sur le frottement (travail à sec).

Il est évident que l'acier est plus résistant que le bronze [41] ce qui entraîne l'usure plus rapide de l'alésage en bronze que le cylindre en acier. Les grains de bronze vont se noyer dans les vallées formées par les aspérités de l'acier et occupent tous les creux, ce qui entraîne la diminution de la rugosité. Ceci est clair sur la courbe correspondante à la vitesse 560 tr/min de la figure 3.14, qui montre deux étapes, la première correspond au taillage des aspérités du bronze et la deuxième celle du remplissage des creux du cylindre par ces grains de bronze.

Dans le cas de la vitesse 710 tr/min le travail semble normal, la courbe est presque constante pendant toute la durée de l'expérience, ce qui prouve que l'état de surface du bronze influe peu sur celui de l'acier, car les efforts tangentiels résistants au cisaillement sont plus importants que les efforts de coupe donnés par cette vitesse.

La courbe correspondante à la vitesse 900 tr/min est en contradiction totale avec les autres courbes. Il apparaît que l'augmentation et la diminution de la rugosité du cylindre est causée par le micro soudage des particules du bronze avec les aspérités de l'acier dû à l'élévation de température dans un premier temps, puis cisaillement de ces particules de bronze provoqué par le frottement continu des deux pièces.

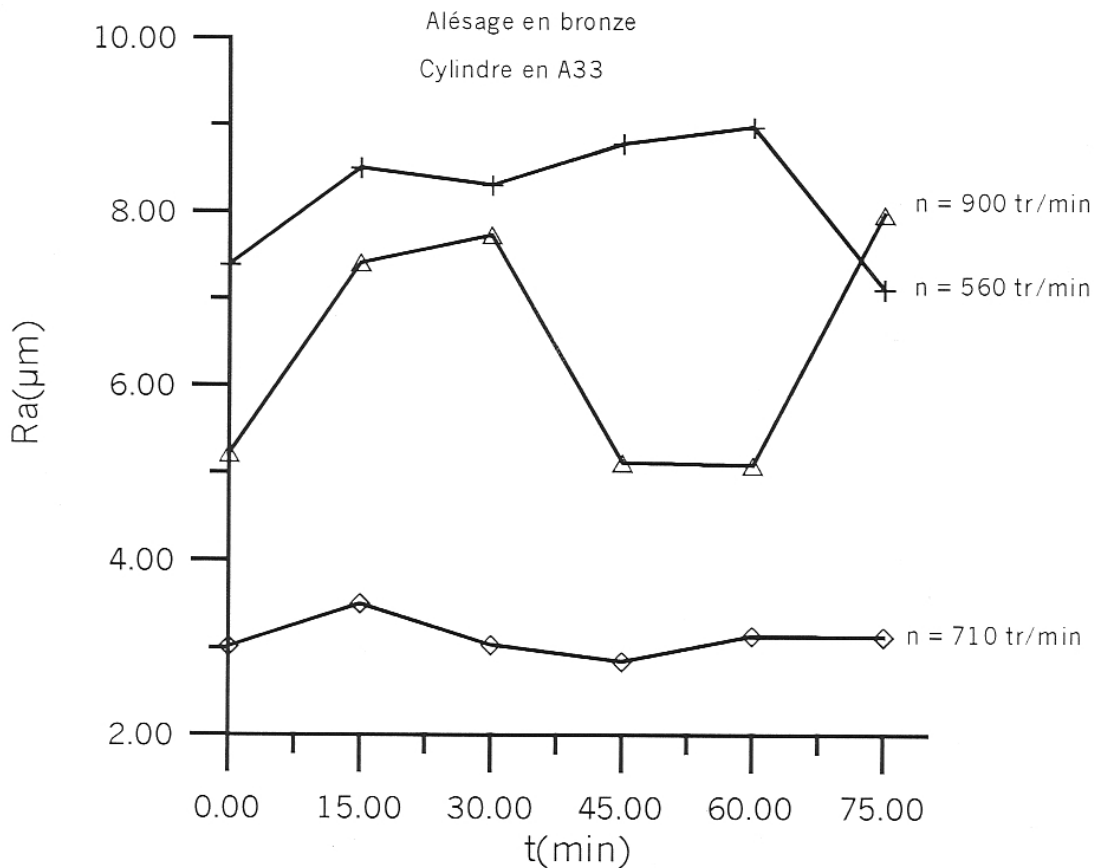


Figure 3.14: Courbe d'évolution de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses différentes, travail à sec, $P=10\text{N}$

D'ailleurs la différence entre les courbes de la figure 3.14 pour la vitesse 900 tr/min, et celle de la figure 3.15 pour la même vitesse, explique bien le phénomène de micro soudure qui est presque totalement supprimé par la bonne lubrification. La courbe de la rugosité apparaît plus stable dans le cas du fonctionnement lubrifié

3.3.2.2 Influence de la vitesse sur le frottement (travail lubrifié)

Le lubrifiant joue un rôle très important, on remarque que les trois courbes sont à peu près horizontales ayant l'allure d'une droite, le lubrifiant intervient surtout pour les grandes vitesses où il diminue la température, donc il élimine le phénomène de micro soudage des particules de bronze sur les aspérités de l'acier. Donc on voit une stabilité totale de cette courbe.

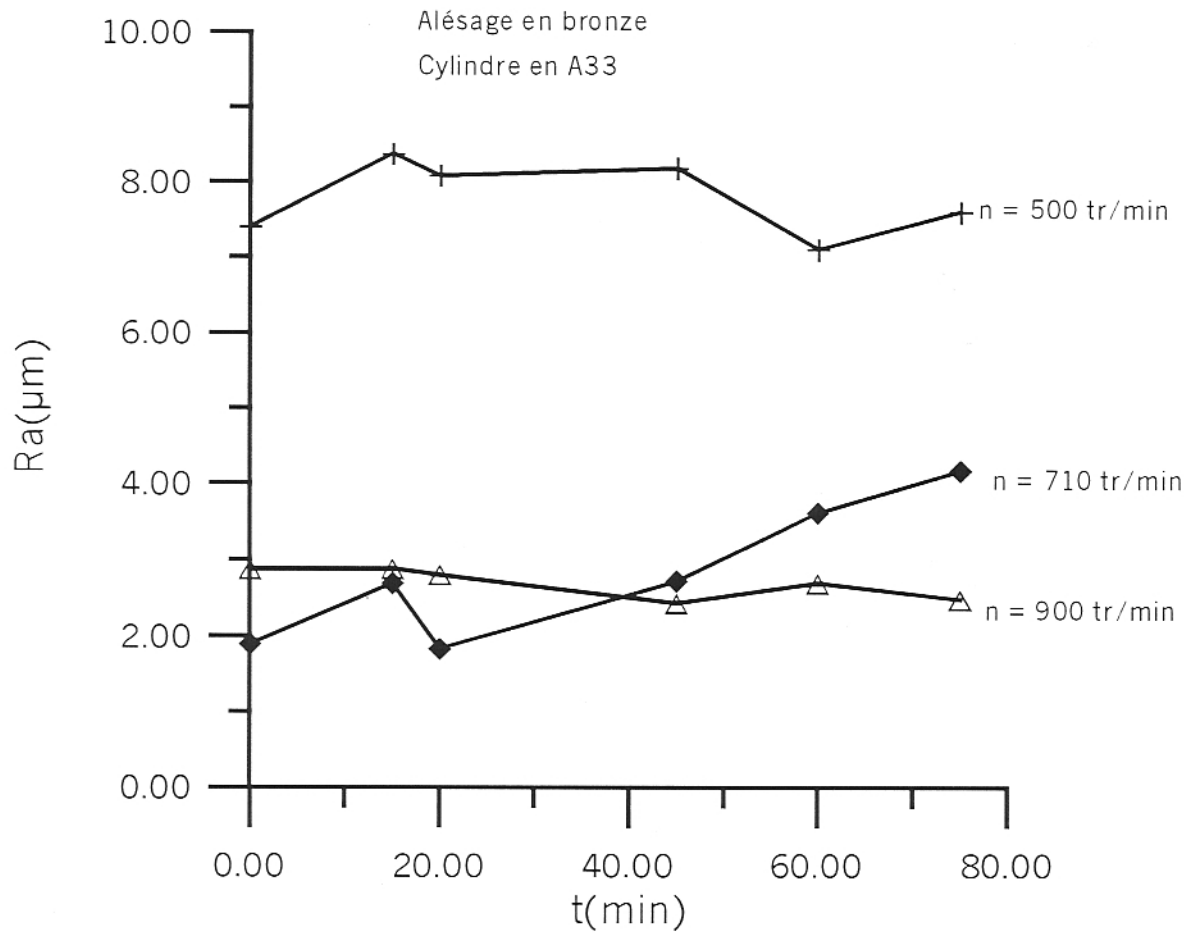


Figure 3.15: Courbe de la rugosité en fonction du temps pour trois vitesses de rotation du cylindre différentes, travail lubrifié, $P=10N$.

Tableau 3.5: Coefficient de frottement (f) entre A33 et le bronze, travail lubrifié, $P=10N$.

| | | Coefficient de frottement (f). | | |
|---------------------|-------------|------------------------------------|------|------|
| Vitesse (tr/min) | Temps (min) | 560 | 710 | 900 |
| | | 0 | 0,35 | 0,40 |
| | 75 | 0,27 | 0,46 | 0,50 |

3.3.2.3 Influence de la charge sur le frottement (travail à sec).

Pour une vitesse constante et des charges variables, une remarque surgit rapidement (figure 3.16). Pour de faibles charges l'allure de la courbe est à peu près rectiligne la rugosité varie peu, et plus on augmente la charge plus la rugosité varie et donne une allure de sinusoïde. Plus on augmente la charge plus les efforts tangentiels des aspérités du bronze sont importants et les efforts de coupe faibles sur la pièce tournante, ce qui produit la cassure uniquement des pointes des aspérités de la pièce, et ceci après usure de la majorité des aspérités du bronze.

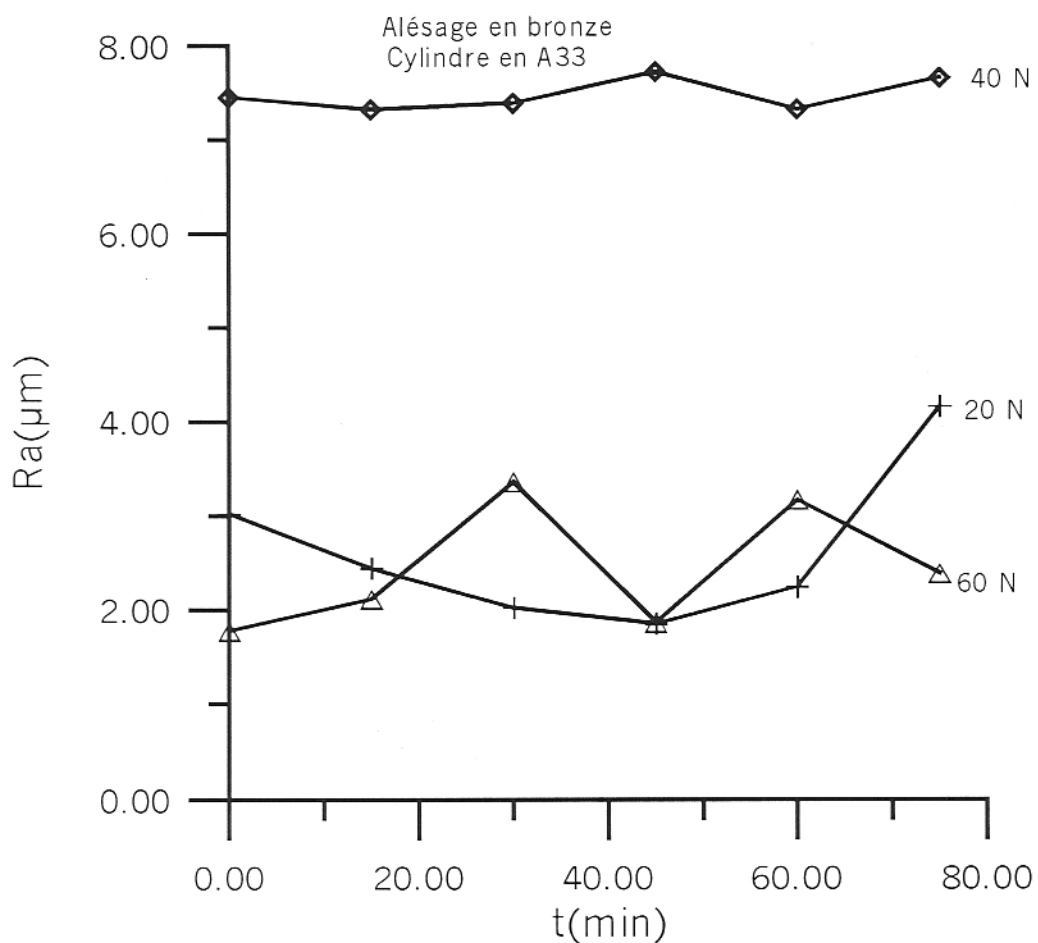


Figure 3.16 : courbe de variation de la rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail à sec $V=560$ tr/min.

Tableau 3.6: Coefficient de frottement (f), entre A33 et le bronze, travail à sec, $V=560$ tr/min.

| | | Coefficient de frottement (f) | | |
|------------|-------------|-------------------------------|------|------|
| Charge (N) | Temps (min) | 20 | 40 | 60 |
| | | 0 | 0,53 | 0,61 |
| 75 | | 0,36 | 0,52 | 0,20 |

3.3.2.4 Influence de la charge sur le frottement (travail lubrifié).

On remarque le même phénomène que pour le fonctionnement à sec seulement pour de faibles charges, on aperçoit une stabilité meilleure de la courbe et ceci est dû à la bonne lubrification pendant l'usure d'un côté et de faible rugosité du cylindre d'un autre côté (figure 3.17).

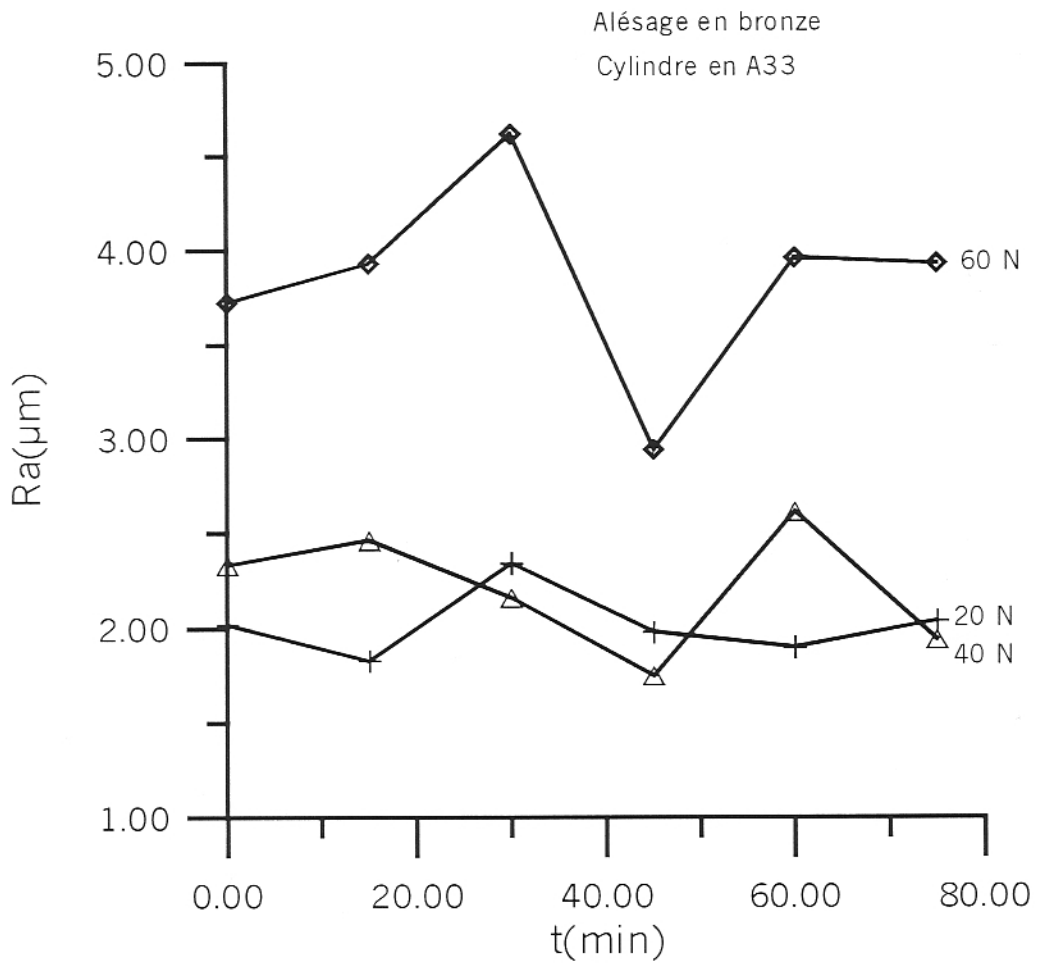


Figure 3.17: Courbe de rugosité en fonction du temps pour trois charges différentes, travail lubrifié, $V=560$ tr/min.

Tableau 3.7: Coefficient de frottement, entre A33 et le bronze, travail lubrifié, $V=560$ tr/min.

| | | Coefficient de frottement (f). | | |
|-------------|--|--------------------------------|------|------|
| Charge (N) | | 20 | 40 | 60 |
| Temps (min) | | | | |
| 0 | | 0,12 | 0,11 | 0,30 |
| 75 | | 0,10 | 0,10 | 0,28 |

3.4 Influence de l'usure sur l'état de surface.

Lorsqu'on met en service une pièce mécanique subissant des frottements, on constate schématiquement trois étapes d'usure (figure 3.18):

La première étape est l'étape qu'on peut nommer ((rodage)) qui correspond à la première phase de l'opération de frottement, car dans cette phase il y a déchiquetage et rasage des aspérités des surfaces jusqu'à ce qu'il apparaisse une augmentation des surfaces de contact, et une répartition suffisante de la charge. Alors l'usure se fait rapidement, mais à vitesse régulièrement décroissante, ou à basse vitesse qui ne compromet pas le fonctionnement mais oblige à prendre de grandes précautions comme suit:

- Surveiller l'échauffement.
- Limiter la charge à une faible valeur.
- Usure à petite vitesse.
- Lubrifiant parfaitement propre et abondamment renouvelable.

Cette première étape a été déjà vue auparavant et qui correspond aux trente premières minutes au maximum de l'opération de frottement.

La deuxième étape est l'étape nommée ((marche normale)), elle représente la durée de vie de cet état de surface. Pendant cette étape l'usure est faible ou tout au moins constante. Ceci est dû au fait que les surfaces de contact sont augmentées de telle manière que la charge appliquée exerce une pression sur une bonne partie de la surface de contact avec le cylindre, tout en gardant un maximum de poches d'huile ou bien vallées entre deux pics. Par ailleurs si les surfaces augmentent, le frottement diminue entre les deux pièces et à l'aide de ces poches d'huiles il y a maintien du lubrifiant entre les deux pièces, la durée de cet état devient importante.

La troisième étape, appelée ((vieillesse et mort)) de l'organisme se caractérise par une reprise de l'usure mais avec une accélération croissante et par des incidents de plus en plus fréquents et de plus en plus graves jusqu'à la fin de la vie de la pièce.

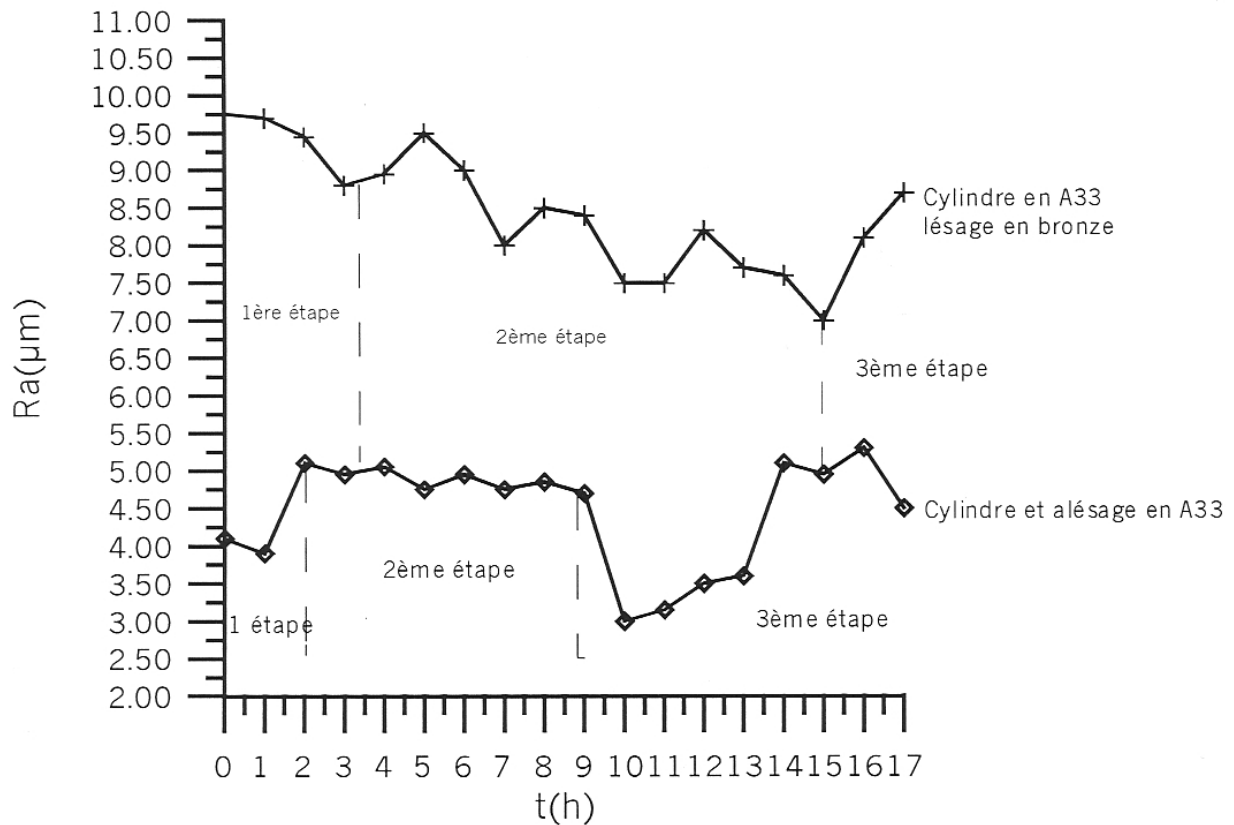


Figure 3.18: Rugosité en fonction du temps : influence de l'usure sur l'état de surface, travail à sec, $V=560$ tr/min.

Dans le mécanisme d'usure il y a tout un ensemble de phénomènes de vieillissement aboutissant à la destruction des états de surfaces, où l'on peut distinguer six grandes familles :

- L'accommodement des aspérités superficielles.
- La formation, rupture et arrachement des soudures.
- Les consommations chimiques.
- L'abrasion par les copeaux et débris.
- La corrosion.
- L'écrouissage.

Dans le cas d'usure entre deux matériaux de même nuance, la première étape est plus rapide que si les deux matériaux sont différents.

Comparaison des deux courbes de la figure 3.18.

La première étape se fait à la première demi heure dans le cas d'usure entre deux pièces de même nuance et elle se fait au cours des quatre premières heures dans le cas d'usure entre deux pièces de nuance différentes A33 et le bronze. La deuxième

étape se fait entre la deuxième et la neuvième heure dans le cas d'usure entre deux pièces de même nuance A33, et elle se fait entre la quatrième et la quinzième heure dans le cas d'usure entre des pièces de nuances différentes A33 et le bronze. La troisième étape commence juste après la deuxième pour chaque courbe mais les intervalles de temps de chaque étape pour les deux courbes sont différents.

Dans le cas de l'usure entre deux pièces de nuances différentes, la deuxième étape n'est pas très évidente mais elle existe et ceci est dû à la différence de résistance entre les deux matériaux.

3.5 Influence de l'usure sur le diamètre.

Les trois étapes citées ci dessus peuvent être aussi éclaircies par les courbes de la figure 3.19.

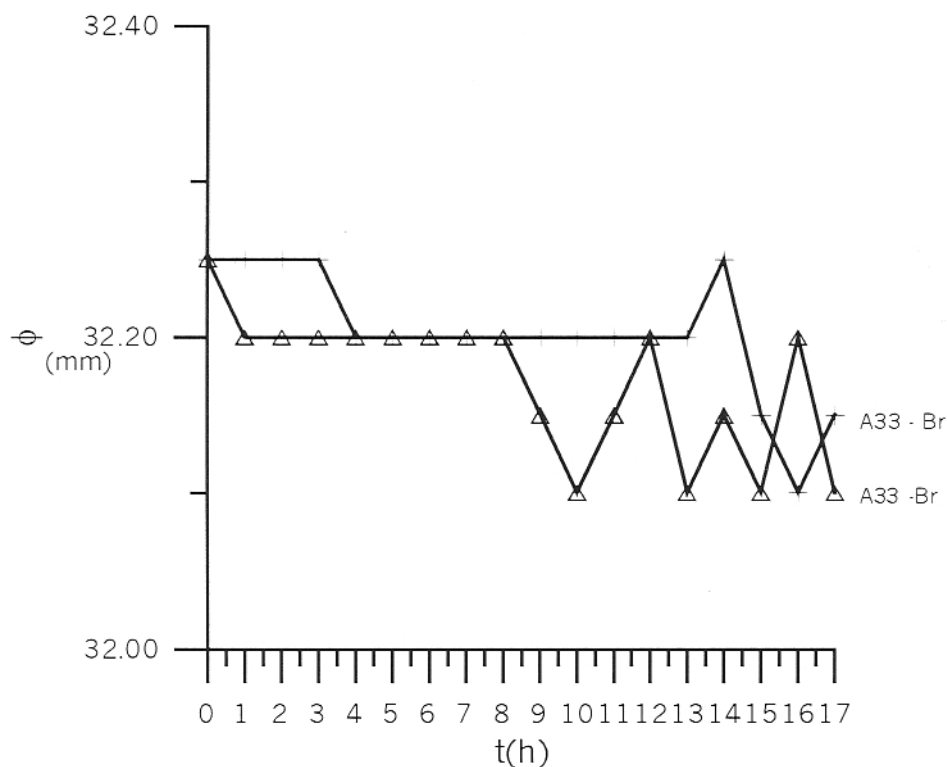


Figure 3.19: courbe de variation du diamètre en fonction du temps, travail à sec, $V=560$ tr/min.

On remarque que plus l'usure augmente plus le diamètre diminue et lorsque l'usure ralentit le diamètre commence à se stabiliser. A la troisième étape qui correspond au vieillissement de la surface, on remarque une instabilité de la courbe, tantôt le diamètre augmente et tantôt il diminue. Ceci est dû aux différents phénomènes qui se passent pendant le frottement continu au cours de cette étape. L'augmentation du diamètre dans cette étape est dû au broutement [42] de la surface qui donne des épluches ayant la forme de copeau, la diminution du diamètre correspond à l'état matheux de la surface.

Cette étape est à éviter car elle conduit au gommage des deux pièces frottantes c'est-à-dire collage total par soudure complète des deux pièces.

3.6 Application des résultats.

Plusieurs de nos entreprises souffrent jusqu'à présent de nombreux et différents problèmes de frottement et d'usure des pièces travaillant à de grandes et petites vitesses.

En contact avec quelques entreprises privées telles que PEUGEOT, RENAULT de réparation d'automobiles et d'engins, nous avons pu recenser quelques problèmes des plus courants qui sont posés tels que:

- Rectification des vilebrequins
- Alésage des blocs moteurs
- Rabotage des culasses...etc.

3.6.1 Rectification des vilebrequins :

Après une certaine durée de vie de ces pièces qui varie suivant les différents types de voiture et suivant l'entretien et le régime de fonctionnement de celles-ci, ces pièces sont assujetties à subir une rectification d'une cote à une autre. On a remarqué que la durée de vie de ces pièces après rectification est très courte par rapport à la cote d'origine.

Si l'on revient à notre expérience on remarque que ce genre de problèmes est dû au fait qu'une fois que l'état de surface est arrivé à la période de vieillissement où les poches d'huiles ont disparu complètement, l'entreprise passe à l'opération de rectification directement, mais cette opération n'est pas conçue pour la rénovation des ces poches d'huile. Elle est conçue uniquement pour le taillage des

aspérités. C'est à cause de cette opération déconseillée que la durée de vie entre deux rectifications des pièces est très courte.

La recommandation qu'on a pu donner à ces entreprises c'est de commencer par une opération d'usinage avec outil de coupe puis faire une légère rectification avec la pierre abrasive de façon à rénover les poches d'huile.

Cette recommandation peut exiger un saut de cote de rectification mais elle est plus intéressante.

3.6.2 Alésage des blocs moteurs.

L'usure des alésages des blocs moteurs est aussi un problème que rencontre souvent les mécaniciens. Ceci est dû principalement au défaut de fabrication des segments dont l'arête sur la périphérie de ces segments est très vive et devient un outil de coupe. Celle-ci à de grandes vitesses détériore rapidement l'état de surface de l'alésage avant que cette arête ne prenne son régime de fonctionnement normal.

Ce qui est recommandé pour ce genre de problème c'est de faire un rodage plus lent arrivant jusqu'à plus de deux cent heures de fonctionnement, et à de faible charge ou à vide, afin que les forces d'interaction entre les deux pièces soient aussi faibles que possible et l'usure soit ralentie.

3.6.3 Rabotage des culasses :

Ce problème est dû à la déformation macro géométrique de la pièce et qui est associée à l'augmentation de température. La recommandation que l'on a pu donner c'est le rabotage jusqu'à l'obtention d'une surface plane et rectiligne. L'état de surface n'est pas trop exigé puisque qu'il y a comme pièce intermédiaire entre bloc et culasse un joint d'étanchéité.

Un autre problème de frottement et d'usure des pièces travaillant cette fois-ci à de petites vitesses, se trouve surtout dans les machines d'injection de Zamak, d'aluminium ou de plastic. Les frottements entre les pistons et le cylindre provoquent souvent la rupture des segments qui sont presque introuvables dans le marché Algérien. Ce type de problème dans de telles machines est dû aux cavités abandonnées par le fabricant lors de l'usinage du cylindre. La recommandation qu'on a pu donner c'est de rapprocher l'état de

surface à l'état de vieillissement en supprimant au maximum les cavités formées au cours de l'usinage avec outil de coupe. Donc contrairement à ce qui a été recommandé pour les vilebrequins est exigé pour ces types de machines.

Car si ces cavités sont importantes et leur profondeur est grande elles accumulent la matière fondue et lorsqu'on actionne ces pièces à une basse température, il y a rupture des segments due aux contraintes qui surgissent lors de la solidification de la matière à basse température.

CONCLUSIONS

Cette étude a montré sans équivoque que l'état de surface représenté par la rugosité et la dureté superficielle ont une influence notable sur les caractéristiques tribologiques des surfaces usinées, notamment sur leur coefficient de frottement et l'évolution de leur rugosité en service.

A l'issue de cette étude, les conclusions suivantes ont été dégagées :

La rugosité d'une surface est proportionnelle à l'avance, mais inversement proportionnelle à la vitesse de coupe par contre la profondeur de passe a une influence sur l'état de surface qui dépend de l'outil de coupe et sa géométrie. La lubrification a aussi un rôle important dans l'amélioration de la rugosité. Elle diminue les frottements et augmente la zone de déformation plastique. Donc le régime de coupe influe progressivement sur l'écaillage superficiel.

Par notre étude de l'influence des paramètres tribologiques sur l'état de surface nous avons pu conclure que l'usure augmente avec le temps de travail, et surtout lorsque la vitesse du mouvement relatif d'une pièce en contact avec une autre pièce que ça soit homogène ou hétérogène est lente. Le frottement et l'usure progressent lorsque deux solides en contact et en mouvement sont soumis à des charges importantes.

L'effort de frottement augmente lorsque la rugosité de l'un des deux solides de matériau différent en contact est importante, ainsi la surface plus résistante influe sur la rugosité d'une surface moins résistante.

Il reste donc de nombreuses études scientifiques et techniques à faire dans un domaine dont l'importance technologique est grande. Pour de telles études un programme de coopération entre les établissements d'enseignement technique, les écoles d'ingénieurs, l'université d'une part, l'industrie d'autre part, aurait certainement de fécondes conséquences, et pourrait répondre aux questions cités ci-dessus.

REFERENCES

1. Caubet, J.J., ((Théorie et pratique industrielle du frottement)), Edition DUNOD, Paris, 1964.
2. Geminard, L. et Gros la farge, F., ((Matériaux, élaboration des pièces, lubrification logique des fonctions techniques)). Ed : DUNOD. 1966.
3. Jean-marie George, ((Frottement, usure et lubrification ; la tribologie au sciences des surfaces)), Ed : EYROLLES, 2000.
4. Champier, G., ((Déformation plastique des métaux et alliages)), Paris Masson, 1968.
5. Taylor, F.W., ((On the Art of Cutting Metals)), TASME, vol.28, 1907.
6. Rasolofondrai, B; Dron. J.P; Pavana; Couet, C., ((Suivi de l'endommagement des composants mécaniques d'une machine tournante par les méthodes paramétriques, application aux presses d'emboutissage)). Ed : V.B.Garches, 2006.
7. Hansjorg, Mathieu; Erich; Rogmaun et Gras René., ((Traité des matériaux, TOM 4, Analyse et technologie des surfaces; couches minces et tribologie)), Presse polytechnique et universités Romandes, 2003.
8. Williams J.E and Rollason, E.R; ((Metallurgical and practical machining parameters affecting b-u-e formation in metal cutting)), J. of the institute of metals, vol. 98, 1970, p p: 144-153.
9. Communication de M, FERT; Professeur à la faculté des sciences de Toulouse. Journée des états de surfaces organisée par l'ISMCM mai 1962.
10. Boothroyd, G., et Dieter, G.E., ((Fundamentals of Machining and machine tools)), 2^e Edition, Marcel Decker inc, New York, 1989.
11. Trent, E.M; ((Metal cutting)), Butterworth 1977.
12. Magagir, Kerry.H., ((Estimation des paramètres de surface en micro onde active, inter comparaison avec les données de terrain)), Ed : MONTREAL, AUPELF-UREF, CANADA, 1998.
13. Levy-Leblond, Jean marc. ((La pierre de touche)), Paris Gallimard 1996.
14. Moraru, G.F., ((Etude de comportement du système «Pièce-Outil-Machine» en régime de coupe vibratoire)), Thèse de doctorat, ENSAM, 2002.
15. Kalhori, V.,((Modelling and simulation of mechanical cutting)), LULEA university of technology, Sweden, 2001.
16. Tripler Paul., ((Physics for Scientists and Engineers)). Ed: W.H.Freeman, 1998.

17. Mirski, F., ((Dynamique de la machine outil)), thèse de docteur ingénieur, faculté des sciences, université de paris 1970.
18. Bourdim, A., ((Etude et modélisation des vibrations de broutage en cours d'usinage)), Thèse de doctorat, Université d'Oran, 1999.
19. Pantale, O., ((Modélisation et simulation tridimensionnelles de la coupe des métaux)), Thèse de Doctorat, Université de bordeaux I, 1996.
20. Quatin, Jean christophe., ((Application de la rugosimétrie tridimensionnelle à l'étude des surfaces)) thèse de doctorat en sciences et génie des matériaux, ENSMP, 1986.
21. Beaulieu. N; Leclerc. G; Moisan. Y., ((Détermination de la rugosité de surface par des méthodes accessibles)), Ed : Canadian aeronautics and space institute, OTTAWA, CANADA 1975.
22. Ernst, H and Martellotti, M., ((Metal cutting. The formation and function of the b-u-e)), Mech. Eng. Ang. 1935, pp: 487-498.
23. Dekelbab, K., ((Modélisation et simulation du comportement dynamique de l'ensemble Pièce, Outil, Machine en usinage par outil coupant)), Thèse de doctorat de L'ENSAM, Paris, France, 1995.
24. Benmohammed, B., ((Modélisation et simulation du comportement statique et dynamique des machines-outils)), Université de Batna, Rapport annuel 2003.
25. Merchant, E., ((Mechanics of the Metal Cutting Process)), Journal of Applied Physics, 1945.
26. J.W.Holl. ((the Ineption of Cavitation on Isolated Surface Irregularities)) Transaction of ASME, Journal of basic Engineering, N° 59 Hyd, 12, 1958.
27. Christian pages, ((Comportement de revêtement céramique sur outil en tournage à sec de finition)), thèse de doctorat d'état Ecole centrale de LYON le 14/11/2003.
28. Ludovic Lahousse., ((Contribution à la construction de machines de grande précision géométrique ; le concept d'information dans l'amélioration des performances des machines)). Thèse de doctorat, 2005.
29. Tobias, S.A., ((Machine Tool Vibration)), London, 1965.
30. Pruvo, F., ((Conception et calcul des machines outils)) volume 2, les brochures, études cinématiques et statiques, presses polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 1995.
31. Tabor. D., ((The Hardness of Metals Monographs of the physics and chemistry of material. OXFORD, 1951.
32. Belanger. G., ((Frottement et usure à sec en relation avec les propriétés physiques et

- chimiques des couches superficielles et sous-jacentes. [I.F.P., (10), 1958].
33. Tiliouine. B., ((Dynamique des structures)) Tome 1 aspects vibratoires, GECOTEC, ISBN 9961-891-00-7, 2000, pp 20-29.
 34. O'Reilly. T.B., ((The Effect of variable time Delay on stability in Orthogonal cutting)), These de master, Pennsylvania State University, 1999.
 35. Rahman. M. et Ito. Y., ((Detection of the Onset of the Chatter Vibration)), Journal of Sound and Vibration, London, 1986.
 36. Séminaire du 11/01/2001. ANDRE MIKELIC professeur ((modélisation de l'étalement d'une goutte visqueuse sur une surface rugueuse.)) Université Claude Bernard LYON.
 37. Bowden, F.P, and Tabor, D., ((The Friction and Lubrication of solids)), Clarendon press LONDON 1950.
 38. Cayere (abbé), ((Recherche sur la rugosité du chariotage, métrologie des états de surface, machines modernes)), Avril 1958.
 39. Gaylord. E.B, et SHU. H., ((Coefficient of static friction under statically and dynamically applied Loads)). Wear. 4.5. 401.
 40. Séminaire Claude STOLZ. Directeur de recherche ((Approche thermodynamique des interfaces mobiles, application à la mécanique de l'usure.)), jeudi 4/07/2002.
 41. J.Ostrovoir; Grasaudj Blou; D.Maugis et coutel., ((Frottement et usure du couple bronze acier en présence de lubrifiant tensioactif)). Short communication wear, volume 28, 1974.

Liste des symboles

| | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| a | Avance par tour de l'outil. |
| D | Diamètre avant usinage de la pièce. |
| d | Diamètre après une passe de profondeur. |
| d_e | Diagonale de l'empreinte de mesure de dureté. |
| F | Force de pénétration. |
| F | Coefficient de frottement. |
| F_a | Effort axial. |
| F_p | Force de pression pour l'essai de dureté. |
| F_r | Effort radial.. |
| h | Profondeur d'ondulation engendrée sur la pièce. |
| H_v | Dureté vickers. |
| I | Inertie de la section droite de la pièce à gauche de l'outil. |
| I_t | Inertie de la section droite de la pièce à droite de l'outil. |
| K | Rapport d'inertie avant et après tournage. |
| L | Longueur de la pièce. |
| l | Longueur de la ligne enveloppe. |
| l_s | Longueur de base. |
| n | Vitesse en tour par minute. |
| P | Force d'appui de l'outil sur le copeau. |
| p | Profondeur de passe. |
| R | Résultante entre force d'appuis de l'outil et la force de frottement. |
| R | Rayon du patin. |
| r | Rayon de l'arête tranchante. |
| r_1 | Rayon de courbure de la génératrice de la pièce après usinage. |
| R_a | Rugosité arithmétique. |
| R_e | Référentiel extérieur du profil. |
| R_f | Résultante de forces d'appuis et de frottement. |
| R_m | Profondeur max de rugosité. |
| R_q | Rugosité moyenne quadratique. |
| R_z | Hauteur des irrégularités. |
| R_{max} | Rugosité maximale. |
| R_1 | Rayon de courbure de la génératrice de la pièce avant usinage. |

| | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| S | Aire de la pyramide à base carrée |
| t | Force de frottement provoquée par la montée du copeau. |
| V | Vitesse de coupe. |
| α | Angle d'incidence. |
| α_1 | Angle de dégagement du copeau. |
| β | Angle engendrant le flux diffusé. |
| φ | Angle formé par le plan de cisaillement et la direction du déplacement de l'outil. |
| ρ | Rayon de la pièce après usinage. |
| λ | Longueur d'onde. |
| Δ_s | Unité de longueur de base. |