

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE 8 MAI 45 GUELMA

Mémoire de Magistère



Département : **Génie Mécanique**
Spécialité : **Productique**

Présenté par : ROUABHIA Rachida ep ESSALHI

Etude fiabiliste de l'usure des outils de coupe pour l'usinage des axes de moyeux sur tour à décolleter à CN

Sous la direction du : **Dr. AMIRAT.A**

Devant le jury

Président de Jury	Pr L. BOULANOUAR	Université Badji Mokhtar Annaba
Examineur	Pr N. OUELAA	Université 8 Mai 45 Guelma
Examineur	Dr M.A YALLESE	Université 8 Mai 45 Guelma
Directeur de Thèse	Dr A. AMIRAT	Université Badji Mokhtar Annaba



SOMMAIRE

ملخص.....	IV
Résumé.....	V
Abstract.....	VI
Remerciements.....	VII
Liste des Figures.....	VIII,IX,X,XI
Liste des Tableaux.....	XII

Chapitre 1 : Introduction Générale

1.1. Contexte de l'étude	1
1.2. Problématique.....	3
1.3 Organisation du mémoire.....	5

Chapitre 2 : Etude bibliographique

"Domaines de la coupe des métaux"

2.1. Introduction.....	7
2.2 Matériel dans un procédé de fabrication.....	7
2.2.1. Machine outil à commande numérique.....	7
2.2.2. Outils de coupe.....	11
2.2.2.1. Type d'outils	11
2.2.2.2. Performances des outils de coupe.....	12
2.2.3. Les dispositifs d'usinage.....	15
2.3. Main d'œuvre.....	19
2.4. Matière dans un procédé de fabrication.....	20
2.5. Méthode dans un procédé de fabrication.....	23
2.5.1. Les nouvelles stratégies de fabrication.....	23
2.6. Défaillances dans un procédé de fabrication.....	24
2.6.1. Endommagement des outils de coupe.....	24
2.6.2. Durée de vie d'un outil de coupe.....	24
2.6.3. Usure des outils de coupe.....	25
2.6.4. Diagramme causes/Effets.....	27
Rétrospective du chapitre.....	29

Chapitre 3 : Approche fiabiliste à la conception

3.1. Généralités.....	30
3.2. La fiabilité.....	31
3.2.1. Définition de la fiabilité.....	31
3.2.2. Méthodes de fiabilité en mécanique.....	31
3.2.3. Principales méthodes d'évaluation de la fiabilité mécanique.....	31
3.2.4. Intérêt des méthodes fiabilistes.....	32
3.3. Procédure d'analyse de la fiabilité.....	32

3.3.1. Modèle mécanique.....	32
3.3.2. Probabilité de défaillance.....	34
3.3.3. Calcul de la probabilité de défaillance.....	34
3.3.4. Exemple élémentaire Résistance R - Sollicitation S.....	35
3.3.4.1. Méthodes par indice de fiabilité.....	36
3.3.5. Produits de l'analyse fiabiliste.....	38
Conclusion.....	39

Chapitre 4 : Etude expérimentale

4. Etude expérimentale.....	40
4.1. Analyse du procédé de production de l'axe de la roue.....	40
4.1.1. Milieu.....	40
4.1.2. Matériel.....	41
4.1.3. Méthode.....	52
4.1.4. Matière.....	62
4.1.5. Main d'œuvre.....	64
4.2. Etude de l'usure des outils de coupe dans les condition réelles.....	67
4.2.1. Influence de la nuance des outils de coupe sur l'usure VB.....	67
4.2.2. Influence de la profondeur de passe sur l'usure VB.....	70
4.2.3. Influence de la dureté du matériau à usiner sur l'usure VB.....	71
4.2.4. Influence de la dispersion de la nuance de brut sur l'usure VB.....	72
4.2.5. Influence de la main d'œuvre sur l'usure VB.....	75
4.3. Etude de l'usure des outils de coupe au sein du laboratoire.....	77
4.3.1. Planification des expériences.....	77
4.3.1.1. Méthode unifactorielle.....	77
4.3.1.2. Méthode multifactorielle.....	77
4.3.2. Equipements et moyens utilisés.....	79
4.3.2.1. Machine outil utilisée.....	79
4.3.2.2. Matière usinée.....	80
4.3.2.3. Porte plaquette utilisé.....	80
4.3.2.4. Plaquettes utilisées.....	81
4.3.2.5. Microscope pour la mesure de l'usure VB.....	81
4.3.2.6. Rugosimetre pour la mesure de la rugosité.....	82
4.4. Procédure expérimentale.....	82
4.4.1. Banc d'essais pour un plan 2^3	83
4.4.2. Résultats de la méthode factorielle.....	83
Rétrospective.....	86

Chapitre 5 : Etude fiabiliste

5. Etude fiabiliste : Cas de l'usure des outils.....	87
5.1 Modèle Géométrique.....	87
5.2 Modèle mécanique.....	87
5.3 Modèles Probabilistes.....	89
5.4 Fonction d'Etat Limite.....	91

5.5 Calcul de l'indice de Fiabilité β :	91
5.5.1 Analyse Physique et Sensibilité des variables	91
5.5.2 Analyse Fiabiliste	93
5.5.3 Analyse de Distribution des modèles mécaniques	93
5.5.3 Etude Paramétrique Fiabiliste	97
5.5.3.1 : Etude fiabiliste de l'effet du diamètre de la pièce brute	98
5.5.3.2 : Etude fiabiliste de la matière de l'outil à usiner	100
5.5.3.3 : Etude fiabiliste de la matière à usiner	102
5.5.3.4 Etude de l'importance des variables de calcul	105
Conclusion du chapitre 5	107
Conclusion générale	108
Références Bibliographiques	109,110,111,112

ملخص

هذا العمل هو دراسة لسلسلة التصنيع لعمود دوران عجلة كرسى متحرك. الهدف من ذلك هو تحديد أسباب القرقة المسموعة في مجمع عمود دوران- جسم سرعة عجلة-مدرج كريات في أكثر من 25% من الحالات و ذلك أثناء التجارب ما قبل إرسال المنتج. لنقتدر أن هذه القرقة تأتي من أسلوب تصنيع أبعاد حوامل المدرجات. بالرغم من أن الكرسى المتحرك صالح للاستعمال غير أن مدة صلاحيته قصيرة. الأمر الذي يتطلب استبدال سرعة العجلة بعد فترة استعمال قصيرة مقارنة مع ما قد خطط سابقا. إذ يصبح هذا مكلفا بالنسبة للمستخدمين التي غالبا ما تكون الموارد المالية محدودة.

اتجهت دراستنا في جزءها الأول إلى العوامل التالية (الوسط, المعدات, المنهجية, المادة المشغلة و اليد العاملة) التي تشارك في سلسلة التصنيع مع العلم أن تشغيل عمود دوران العجلة يتم على مخرطة ذات تحكم عددي و قد تم إجراء تحليل لتحديد العوامل المتغيرة من عدمها وذلك باستعمال مخطط (أسباب/أثار) المعروف بمخطط ايشيكاوا و قد اظهر هذا الأخير في حالة التصنيع أن بلى أداة التشغيل هي العامل الرئيسي لضمان الجودة و الدقة في التصنيع إذ يظل المتغير المنهجي.

أما بالنسبة للجزء الثاني, يدخل النهج الاحتمالي لتحديد مدى موثوقية نظام الإنتاج إذ نقوم بتحديد مؤشر الموثوقية الذي نتحصل عليه على أساس حالة محدودة تعبر عن قانون سير صلاحية أداة التشغيل. نتحصل على هذا القانون عن طريق تجارب قياس بلى أداة التشغيل في ظروف واقعية في ورشة الإنتاج. تعتبر 9 منحنيات بيانية وفقا للمادة المشغلة, مادة أداة التشغيل, ظروف التشغيل و اليد العاملة. الحساب الموثوق منجز عن طريق برمجيات فيميكا سوفت الذي يدمج مع أوجه عدم التيقن لعوامل الحساب باستعمال توزيعات احتمالية.

و قد أعرب الحساب الموثوق عن وجود الحد الذي يحدد الفرق بين بلى أداة التشغيل و البلى المسموح. و بهذا نحصل على أدوات قرار لتحديد عدد دقيق للقطع المشغلة قبل تغيير الأداة ولتصحيح الخطأ في تحديد مدة تغيير الأداة القائم على المراجعة العينية واختيار عناصر القطع. بهذه الطريقة نستطيع الحصول على عدد مجمع سرعات العجلات قابل للاستعمال 100% أي صفر قطعة فاسدة.

Résumé

Le présent travail est une étude d'un processus de fabrication de l'axe de la roue du moyeu du fauteuil roulant. L'objectif est de déterminer les causes de bruitage dans l'assemblage, axe, roulement et corps de moyeu. Pendant l'essai à vide et en tournant la roue, un bruit de click est détecté dans plus de 25% des cas, entre chaque changement d'outil. On estime que ce bruit provient du procédé d'usinage des cotes des portées de roulements. Même si l'ensemble du fauteuil est fonctionnel, la durée de vie est bien réduite; ce qui nécessite le remplacement du moyeu complet après une période de service bien courte par rapport à celle prévue initialement. Ceci revient cher pour les utilisateurs dont les moyens financiers sont souvent limités.

L'étude est d'abord orientée vers les 5M (le **Milieu**, le **Matériel**, la **Méthode**, la **Matière** et la **Main d'œuvre**) qui participent dans le processus de fabrication. L'axe de la roue est usiné sur un tour à décolleter à commande numérique. Une analyse a été faite pour déterminer les variants et les invariants du système de fabrication, en adoptant le diagramme causes/effets connu sous le nom du diagramme **d'Ishikawa**. Ce dernier a bien montré, dans le cas de l'usinage que l'**usure** de l'outil est le facteur principal assurant la qualité et la précision d'usinage et reste le variant systématique.

La deuxième partie introduit une approche probabiliste pour déterminer la fiabilité du système de production. Elle consiste à déterminer l'indice de fiabilité β , qui est obtenu sur la base d'un état limite et qui exprime la loi du comportement de la durée de vie de l'outil. Cette loi est obtenue expérimentalement à travers des mesures de l'usure de l'outil dans les conditions réelles de l'atelier de production. 9 cas de figures ont été considérés selon la matière à usiner, la matière de l'outil, les conditions de coupe et la main d'œuvre. Le calcul fiabiliste est réalisé sous le Logiciel de fiabilité **PHIMECA Soft** qui intègre les incertitudes des paramètres de calcul, en utilisant des distributions probabilistes. Le calcul considère un scénario de défaillance exprimé, par un état limite qui donne la différence entre l'usure de l'outil et l'usure admissible **[VB]**. Il en résulte des outils de décision qui permettent de déterminer le nombre de pièces exactes à obtenir avant changement de l'outil. Cette façon de faire vient palier l'aléa dans le changement de l'outil, basé sur les observations à l'œil nu et aussi sur le choix des régimes de coupe. Par cette méthode, le nombre d'assemblages de moyeu admis à l'exploitation est **de 100%** c'est à dire une production avec un **zéro rebut**.

Mots - clés : Diagramme d'Ishikawa, fabrication mécanique, usure des outils de coupe MOCN, fiabilité.

Abstract

This work deals with the manufacturing process of a moving armchair wheel shaft. The aim is to find out the causes of sound effects when assembling the shaft to the hub through bearings. In fact, in free testing a click sound came out when rotating the shaft in more than 25% cases between tool changes. It is thought that this is due to the production system. Even, when it works perfectly, the lifetime of the shaft is reduced generating excessive costs too high to cope particularly by the users.

The first part is oriented towards the 5M (**M**edium, **M**achine, **M**ethod, **M**ateriel, and **M**an) in a production process. The wheel shaft is machined on a numerically controlled lathe. An analysis has been made in order to sort out the variant and non variant elements of the system using the Ishikawa diagram of causes and effects. This diagram allowed showing that tool wear is the main factor ensuring the quality and the dimensional precision of the machined surface and still the systematic variant.

The second part introduces a probabilistic approach to determining the reliability of the production system. It consists in computing the reliability index β which is obtained on the basis of a state limit function that expresses a behavior model of the lifetime of the cutting tool. This model is obtained experimentally throughout measurements of tool wear in reel workshop conditions. 9 cases of figures have been adopted according to the materiel to be machined, the cutting tool materiel, the cutting conditions parameters and operators. Reliability computation is achieved using the reliability software PHIMECA Soft which considers the uncertainties in the parameters using static's density distributions. A state limit function defined by the difference between the instantaneous wear and the allowable wear [VB]. This led to decision tools that permitted to define the exact number of workpieces before changing the cutting tool. This approach comes to overcome the underestimate of tool replacement based on eye observations of surface finish and the choice of the cutting conditions. The number of assembled hubs accepted to exploitation reached 100% with the proposed approach, i.e zero rejects.

Keys - Words: Ishikawa diagram, manufacture, tool wear, NCMT, reliability

Remerciements

Au terme de cette thèse de MAGISTÈRE effectuée au Laboratoire de Mécanique et Structure, département de Mécanique de l'Université du 8 Mai 45 de Guelma, je tiens à remercier en premier lieu mon encadreur Dr AMIRAT Abdelaziz pour avoir accepté de diriger ce travail avec beaucoup de rigueur et d'implication, je le remercie pour la confiance qu'il a mis en moi, pour sa modestie, sa simplicité, son assistance et sa disponibilité.

Je remercie aussi tout le personnel du laboratoire de mécanique des matériaux et maintenance industrielle de l'université Badji Mokhtar-Annaba pour toute l'aide qu'ils m'ont fournie.

Je tiens également à remercier tout particulièrement les membres de jury à savoir: Monsieur BOULANOVAR Lakhdar, Professeur à l'université Badji Mokhtar-Annaba, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de soutenance.

Monsieur OUELAA Nouredine, professeur à l'université du 8 Mai 45 –Guelma, Monsieur YALLESE Med Athmane Maître de conférence à l'Université du 8 Mai 45 – Guelma, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je remercie vivement, Monsieur YALLESE Med Athmane pour son aide précieuse durant les phases des essais effectués au laboratoire de mécanique.

Je remercie également tous les membres de la direction de l'entreprise CYCMA de Guelma, en particulier Messieurs le PDG BENSILIM Rachid, le directeur technique GOUASMIA Nouredine et le chef de département technique LOUNIS Med sans oublier le personnel de la section tournage numérique.

Je remercie beaucoup et chaleureusement mon époux Nassim pour son aide, durant toute la période de mes études universitaires, je tiens à lui témoigner ma profonde reconnaissance pour m'avoir soutenu et encourager.

Je remercie chaleureusement mon petit oncle Anis.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous mes collègues de travail (Ingénieurs), toutes mes connaissances et tous ceux qui n'ont pas manqué de me soutenir avec leur encouragement et souhaits de succès et spécialement mes amies Samira et Hadia.

Enfin mes profonds remerciements sont adressés à toute ma famille, et ma belle famille, en particulier mon frère Salah.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1: Diagramme en arrêtes du processus d'usinage de l'axe de roue.....	1
Figure 1.2 : Vue éclatée du moyeu de la roue d'un fauteuil roulant produit par l'entreprise CYCMA Guelma.....	4

Chapitre 2

Figure 2.1: Intérêt de la commande numérique pour la fabrication de séries de pièces.....	8
Figure 2.2: Interactions entre la machine-outil et les aspects technologiques de la coupe [5].....	9
Figure 2.3: Formes variées de plaquettes. [8].....	11
Figure 2.4: Plaquette en carbure revêtue, multicouches d'après [CALD'98][22].....	13
Figure 2.5: Résistance à l'abrasion.....	14
Figure 2.6: Différentes matières pour outils.....	14
Figure 2.7: Classification des différents matériaux d'outils selon leur dureté et ténacité.....	15
Figure 2.8: Serrage au moyen d'un étau sur une Fraiseuse à commande numérique	16
Figure 2.9: Serrage dans un étau avec face de référence contre le mors fixe.....	17
Figure 2.10: Serrage d'une pièce par l'extérieur avec les mors durs.....	18
Figure 2.11: Répartition des coûts d'usinage.....	23
Figure 2.12: Relation entre durée de vie et résistance à la rupture de l'acier de la pièce usinée [38].....	25
Figure 2.13: Evolution de l'effort de coupe et de la rugosité de surface en fonction de la durée de vie de l'outil [37].....	26
Figure 2.14: Evolution de l'usure en dépouille des quatre matériaux en fonction du temps.....	27
Figure 2.15 : Diagramme d'ISHIKAWA (causes et effets).....	28

Chapitre 3

Figure 3.1: Evolution de la connaissance dans l'histoire.....	30
Figure 3.2. Modèle mécanique résistance – sollicitation.....	33
Figure 3.3: niveaux de l'approximation mécanique [51, 52,53].....	33
Figure 3.4: Probabilité de défaillance - représentation système [54].....	34
Figure 3.5: Probabilité de défaillance d'un système.....	34
Figure 3.6: Exemple élémentaire résistance – sollicitation.....	35
Figure 3.7: méthodes d'approximation FORM/SORM, indice d'Hasofer – Lind.....	37
Figure 3.8: sur les principaux indices de fiabilité.....	37
Figure 3.9: Calcul de l'indice de fiabilité.....	38
Figure 3.10: Produits de l'analyse fiabiliste.....	39

Chapitre 4

Figure 4.1: Section de tournage numérique.....	40
Figure 4.2: Tour numérique (TORNOS BECHLER).....	41
Figure 4.3: Ravitailleur.....	43
Figure 4.4: Schéma cinématique.....	44
Figure 4.5: Porte outil T MAX U (droit).....	45
Figure 4.6: Porte outil T MAX U (gauche).....	45
Figure 4.7: Outil de tronçonnage.....	45
Figure 4.8: Porte outil de tronçonnage.....	45
Figure 4.9: Trois nuances de plaquettes sandvik.....	46
Figure 4.10: Photo d'usure en dépouille.....	46
Figure 4.11: Axe de la roue avec les deux outils de chariotage(gauche et droit).....	46
Figure 4.12: Nuance du GC415.....	47
Figure 4.13: Nuance du P25(GC425).....	47
Figure 4.14: Toolmakers microscope séries 176 (MITUTOYO).....	48
Figure 4.15: Schématisation de l'axe de roue avec les trois outils de coupe.....	48
Figure 4.16a: Photos d'usure en dépouille (sur site).....	49
Figure 4.16b: Photos d'usure en dépouille (sur site).....	50
Figure 4.16c: Usure en cratère (sur site).....	51
Figure 4.16d: Effondrement du bec de l'outil (sur site).....	52
Figure 4.17: Gabarit de control G1	52
Figure 4.18: Gabarit de control G2	53
Figure 4.19: Dessin de l'axe de la roue en 2D et 3D.....	54
Figure 4.20: Chariotage du coté droit de l'axe dans un seul sens (droit).....	56
Figure 4.21a: Chariotage du coté gauche de l'axe dans le sens droit.....	56
Figure 4.21b: Chariotage du coté gauche de l'axe dans le sens gauche.....	58
Figure 4.22: Mise à la longueur de l'axe.....	59
Figure 4.23: Procédure de la fabrication de l'axe de la roue pour fauteuil roulant.....	58
Figure 4.24: Dessin d'ensemble du moyeu complet.....	60
Figure 4.25: Variants et invariants du système.....	66
Figure 4.26: Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté droit).....	67
Figure 4.27: Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté gauche).....	67
Figure 4.28: Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø18 (coté droit).....	68
Figure 4.29: Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø18(coté gauche).....	68
Figure 4.30: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du C45 Ø16 (Coté droit).....	69
Figure 4.31: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du C45 Ø16 (Coté gauche).....	69
Figure 4.32: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 et Ø18 (coté droit).....	70
Figure 4.33: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 et Ø18 (coté gauche).....	70

Figure 4.34: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K et du C45 Ø16 (coté droit)	71
Figure 4.35: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K et du C45 Ø16 (coté gauche).....	71
Figure 4.36: Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage Du 9SMn28KØ16 et Ø18 et du C45Ø16 (coté droit)	72
Figure 4.37: Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et Ø18 et du C45Ø16 (coté gauche)	72
Figure 4.38: Evolution de l'usure du P25 pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45. Ø16 (coté droit).....	73
Figure 4.39: Evolution de l'usure du P25 pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45.Ø16 (coté gauche)	73
Figure 4.40: Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 et Ø18 et du C45 Ø16 (coté droit).....	74
Figure 4.41: Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 et Ø18 et du C45 Ø16 (coté gauche)	74
Figure 4.42: Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du C45 Ø16 (coté droit).....	75
Figure 4.43: Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du C45 Ø16 (coté gauche).....	75
Figure 4.44: Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté droit).....	76
Figure 4.45: Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté gauche)	76
Figure 4.46: Schéma structural du processus de coupe.....	77
Figure 4.47: Tour parallèle SN40.....	79
Figure 4.48: Eprouvettes destinées pour la réalisation des essais d'usure pour un plan de 2 ³	80
Figure 4.49: Porte outil de coupe utilisé.....	80
Figure 4.50: Outil de coupe utilisé monté sur le porte outil	80
Figure 4.51: Plaquette sandvik VBMT 16-04-04-53 en (P25, S1P et GC415).....	81
Figure 4.52: Microscope pour la mesure de l'usure.....	81
Figure 4.53: Microscope d'acquisition d'image de l'usure	81
Figure 4.54: Mesure de la rugosité avec le rugosimètre portable mitutoyo.....	82
Figure 4.55: L'outil GC415 usinant le 9SMn28K Ø 80mm.....	82
Figure 4.56: Un outil GC415 usinant le 9SMn28KØ80mm.....	84
Figure 4.57: Copeaux longs.....	84
Figure 4.58: Apparition de l'arête rapportée.....	84
Figure 4.59: Disparition de l'arête rapportée.....	84
Figure 4.60 Effondrement du bec de l'outil.....	84
Figure 4.61: Copeaux courts.....	85
Figure 4.62: un outil en GC4515 usinant le 9SMn28KØ80mm	85
Figure 4.63: Photo d'usure frontale (au Laboratoire).....	85

Chapitre 5

Figure 5.1 Usure en dépouille d'une plaquette en GC415.....	87
Figure 5.2 : Fenêtre de saisie de PHIMECA Soft des modèles mécaniques, probabilistes et des états limites.....	88
Figure 5.3 : Exemple de modèles probabilistes pour le calcul de fiabilité de l'usure des outils.....	90
Figure 5.4 : Exemple de saisie de l'état limite.....	91
Figure 5.5 : Exemple d'analyse de sensibilité de variables.....	92
Figure 5.6 : Exemple de résultats d'analyse de fiabilité sous PHIMECA soft	93
Figure 5.7 a) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques.....	94
Figure 5.7 b) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques.....	95
Figure 5.7 c) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques	96
Figure 5.8 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et l'effet de la profondeur de passe. a) S1P, b) P25 et c) GC415	98, 99
Figure 5.9 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre De pièce et effet de la nuance et du revêtement des outils. d) 9SMn28KØ16,e) 9SMn28KØ18 et f) C45 Ø16.....	100,101
Figure 5.10 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et effet de la matière à usiner. g) S1P, h) P25 et i) GC415.....	102,103
Figure 5.11 : Erreurs en pourcentage.....	104
Figure 5.12 : Comparatif entre le nombre de pièces admises dans la réalité et le résultat de PHIMECA soft.....	104
Figure 5.13: Importance des variables de calcul dans un système d'usure d'outil.....	106

Listes des tableaux

Chapitre 4

Tableau 4.1 la géométrie de l'outil.....	47
Tableau 4.2 : régime de coupe et temps technologique de chaque palier.....	53
Tableau 4.3 Programme pour l'usinage du coté droit de l'axe.....	54,55
Tableau 4.4 Programme pour l'usinage du coté gauche de l'axe.....	56,57
Tableau 4.5 Programme pour le tronçonnage de l'axe.....	58
Tableau 4.6 Abaque pour le choix du régime de coupe.....	61
Tableau 4.7 Fiche matière pour l'usinage de l'axe (18-1056).....	62
Tableau 4.8 Gamme d'usinage de l'axe (18-1056).....	62
Tableau 4.9 Pourcentages d'éléments constitutants l'acier de décolletage 9SMn28K	63
Tableau 4.10 Pourcentages d'éléments constitutants l'acier de construction C45	63
Tableau 4.11 les invariants et les variants du système et leur influence.....	65
Tableau 4.12 Réalisation des essais d'après la méthode multifactorielle.....	78
Tableau 4.13 Plan d'expérience des essais de l'usure sur des éprouvettes en acier de décolletage 9SMn28K avec un outil de coupe GC415 pour un plan 2 ³	79
(Valeurs codifiées des facteurs)	
Tableau 4.14 : Plan d'expériences des essais de l'usure sur des éprouvettes en acier de décolletage 9SMn28K avec le matériau de coupe GC415 pour un plan 2 ³ (Valeurs naturelles des facteurs)	83

Chapitre 5

Tableau 5.1 : Modèles mécaniques pour le calcul de la fiabilité.....	87
Tableau 5.2 : Paramètres de calcul avec leur distribution statistique.....	90
Tableau 5.3 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outils : influence du diamètre de l'ébauche.....	99
Tableau 5.4 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outils : influence de la matière de l'outil de coupe.....	101
Tableau 5.5 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outils : influence de la matière à usiner.....	103
Tableau 5.6: Comparatif entre le nombre de pièces admises dans la réalité et le résultat de PHIMECA soft.....	104
Tableau 5.7: Profondeurs de passe calculées par le système.....	105

CHAPITRE I

1. Introduction générale

1.1. Contexte de l'étude

Le terme usinage désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des cotes et des tolérances fixées à l'avance à partir d'un brut.

Ces moyens déterminent le procédé de fabrication dans lequel participent les **5M** : le **M**ilieu, le **M**atériel, la **M**éthode, la **M**ain d'œuvre et, la **M**atière, figure 1.1

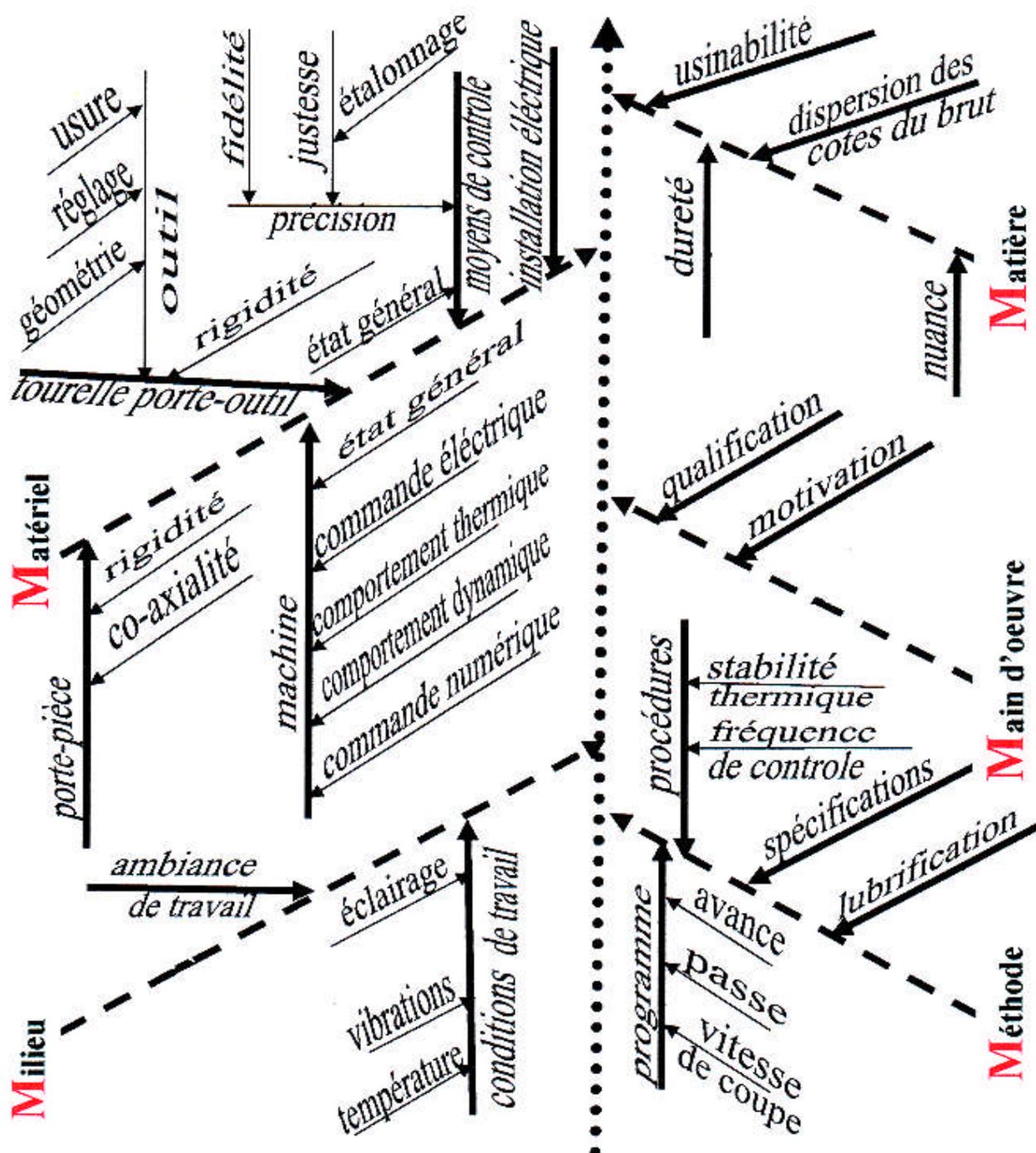


Figure 1.1: Diagramme en arrêtes du processus d'usinage de l'axe de la roue

Pour respecter les cotes et les tolérances fixées à l'avance, il faut que le procédé soit bien réglé : Cependant, même si ce dernier est initialement bien réglé, il définit de lui-même en fonction de la variation des 5M et leurs interaction, son centrage (μ) et sa dispersion (σ) c'est-à-dire sa dispersion qui reflète sa façon réelle de travailler.

Cependant, il importe de bien préciser, qu'une machine outil n'est qu'un intermédiaire entre l'outil de coupe et la pièce à usiner. La machine en effet imprime à l'outil les mouvements nécessaires à son utilisation; ces mouvements sont soit des translations, soit des rotations, soit une combinaison des deux. Ils sont plus ou moins rapides suivant la nature du métal constituant la pièce à usiner, la forme de cette pièce et de l'outil de coupe. La machine doit fournir la puissance nécessaire à l'exécution de l'usinage. C'est ce qui est défini par les régimes de coupe.

Les études effectuées sur les machines outils ont été longtemps laissées à l'appréciation du personnel d'exécution. Les améliorations qu'il a été reconnu nécessaire d'apporter à la conception et à la fabrication des machines outils ont entraîné un recours de plus en plus accentué à des méthodes autres que la mécanique, en même temps qu'à des études scientifiques et techniques.

Les résultats de ces recherches sont une conception parfois révolutionnaire de la forme des machines et de l'emploi de l'hydraulique, de l'électrotechnique et surtout de l'électronique; notamment dans les transmissions et les contrôles. Les centres d'usinage par exemple sont des machines de plus en plus fiables et performantes. Par contre les outils ont fait l'objet d'études plus poussées que les machines elles mêmes; car il est beaucoup plus facile de les apporter dans des laboratoires pour qu'ils soient soumis à des essais. En examinant le problème de l'outillage, on voit qu'il est relativement facile d'étudier les formes des outils, leur résistance et l'influence des facteurs physiques tels que les échauffements, les vibrations et les flexions. Toutes les observations effectuées par les utilisateurs d'outils ont permis d'arriver à des résultats d'ordre pratique extrêmement intéressants. Mais les exigences incessantes de l'usinage ne peuvent plus dispenser de compléter ces observations par des études théoriques et des essais de laboratoires.

Par ailleurs, la loi du marché implique un système de plus en plus concurrentiel et trop exigeant du point de vue coût et qualité. Ceci retombe sur les producteurs qui aujourd'hui ne peuvent plus se dispenser de l'offre et de la demande, car l'intérêt de toute entreprise est la marge bénéficiaire. Cette dernière est calculée sur la base du prix de vente suivant la loi ci-dessous :

Marge bénéficiaire = Prix de vente – Coût de revient

Donc si une entreprise doit augmenter sa marge bénéficiaire, elle doit agir sur les coûts de revient; et tout l'art se situe dans la réduction de ces derniers au niveau de la production.

Cependant, eu égard aux aléas et aux incertitudes des systèmes de production, il est difficile voir même impossible de contrôler les coûts de production d'une manière consistante. Le recours aux méthodes probabilistes qui semblent être les seules à pouvoir intégrer de manière efficace ces incertitudes en tenant compte des valeurs moyennes des paramètres de calcul et de leur distribution.

Mais ces approches jusqu'à il y a 10 ans étaient pratiquement très onéreuses et peu utilisées à cause de la non disponibilité des moyens de calcul. Aujourd'hui avec l'évolution des outils informatiques et des codes de calcul de fiabilité, l'approche probabiliste est de plus en plus utilisée.

Le présent travail rentre dans le contexte défini ci-dessus. Il présente l'aspect général sur trois formes.

1-D'abord il introduit une analyse d'un système de fabrication autour des 5M. Elle consiste à déterminer les invariants et les variants au niveau d'un poste de travail qui vont permettre de cerner les paramètres influents la production.

2-Puis eu égard à l'importance des outils de coupe dans le système 5M, une étude de l'usure des outils est menée dans les conditions réelles d'atelier, afin de déterminer sa durée de vie pour une meilleure estimation des coûts de fabrication des pièces. Cette étude est rehaussée par une comparaison avec les résultats expérimentaux de laboratoire en appliquant la méthode de planification d'expérience.

Le but dans ce cas est de comparer la durée de vie de l'outil sur site avec celle du laboratoire.

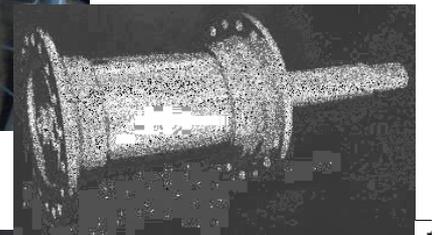
3-Enfin, une étude fiabiliste est menée sous un code de calcul de fiabilité, afin d'intégrer les incertitudes et les paramètres aléatoires pour une meilleure appréciation du coût de revient des pièces à usiner. L'application est orientée vers l'usure des outils de coupe qui constituent le facteur le plus variant dans le système 5M.

1.2 Problématique

Pour mener ce travail, l'axe de la roue du fauteuil roulant produit au niveau de l'entreprise CYCMA de Guelma a fait l'objet de cette étude, Figure.1.2.

Un problème se pose lors de l'assemblage de la roue. En effet, pendant l'essai à vide et en tournant la roue un bruit de click est détecté au niveau de la zone axe, corps de moyeu et roulement. Ce bruit provient probablement du procédé d'usinage des cotes de roulement. Même si l'ensemble du fauteuil est fonctionnel, la durée de vie est bien réduite; ce qui nécessite le remplacement du moyeu complet après une période de service bien courte par rapport à celle prévue initialement. Ceci revient cher pour les utilisateurs dont les moyens financiers sont souvent limités. A cet effet, nous nous proposons de chercher au niveau de la fabrication les causes de cette réduction de la durée de vie.

Au sein de l'entreprise CYCMA, principal fournisseur de la roue du fauteuil roulant, il est important d'analyser d'abord les 5M afin de déterminer les facteurs variants et les facteurs invariants. Ces facteurs vont permettre une meilleure estimation de la production quant à la qualité du produit. A la fin nous introduisons une étude fiabiliste du système de production de l'axe de la roue.



- a) Roue complète
- b) Moyeu complet
- c) Corps de moyeu
- d) Roulement à bille (2x)
- e) Flasques à rayon (2x)
- f) Axe (pièce motrice dans notre étude)
- g) Rondelle
- h) Ecou

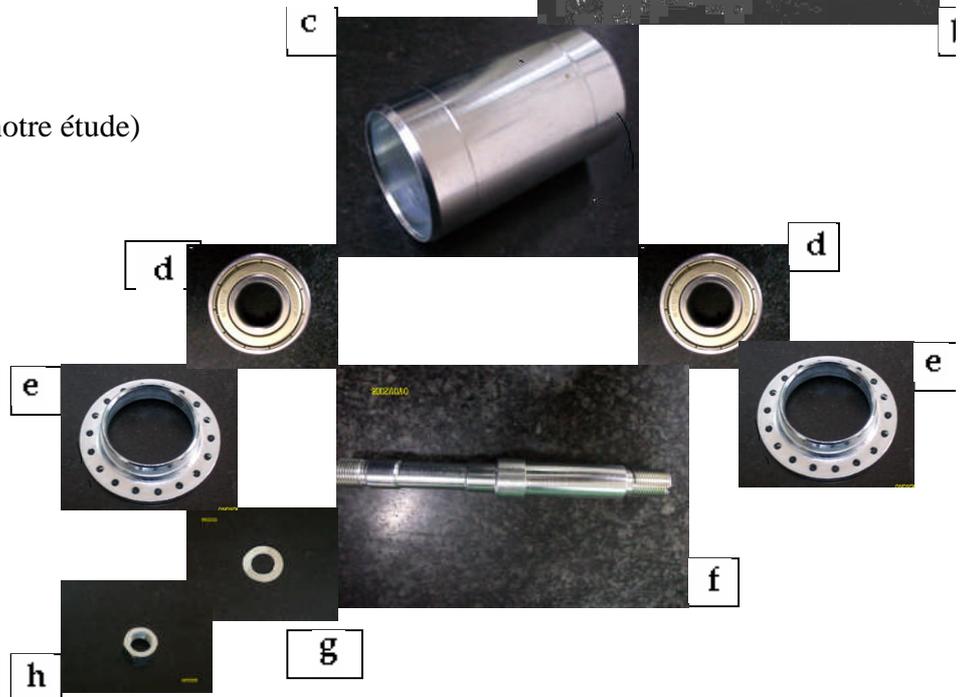


Figure1.2 Vue éclatée du moyeu de la roue d'un fauteuil roulant produit par l'entreprise CYCMA Guelma

1.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire est organisé en 5 chapitres. Après une introduction du sujet et de la problématique dans le chapitre 1 qui est le présent chapitre, l'étude bibliographique est donnée dans les chapitres 2 et 3. Et puis viennent les chapitres 4 et 5 dédiés aux travaux expérimentaux et de simulations. Ce qu'il faut retenir c'est que chacun de ces deux derniers chapitres, présente la procédure d'investiture expérimentale et/ou de simulation, les résultats et leur discussion sont donnés dans ces chapitres.

Enfin, à la fin de chaque chapitre une rétrospective du chapitre ou une conclusion vient le clôturer.

Le plan du travail donc est comme suit :

Le chapitre 1, après avoir présenté le contexte, la problématique et les objectifs de l'étude, sert à établir le plan ci-dessous.

Le chapitre 2 relate les nouvelles stratégies de fabrication, les enjeux, le tournage dur, UGV, la commande numérique, les matériaux d'outil de coupe, l'importance de la variation du système, l'usure des outils, le fini de surface, etc.

Le chapitre 3 introduit l'approche probabiliste et la fiabilité à la conception. Il montre les avancées scientifiques successives qui ont permis de construire des méthodes de dimensionnement tenant compte des écarts prévisibles et des incertitudes. Il présente aussi comment appliquer ces méthodes dans le domaine mécanique. Ce chapitre est une base de compréhension et d'initiation à l'étude fiabiliste.

Le chapitre 4 est une étude expérimentale au sein de l'unité de production CYCMA. Elle consiste d'abord à déterminer les invariants et les variants du système 5M, puis à étudier l'usure des outils de coupe sur un système de production effectif et l'influence des opérateurs. La particularité de ce système de production est qu'il est automatique à commande numérique. L'acheminement de la pièce de la pièce brute se fait par ravitailleur automatique qui alimente la machine d'une barre laminée. La machine est un tour à décolleter présentant des spécificités d'usinage particulières. Il permet l'usinage d'axe dans les deux sens et surtout, le système règle la profondeur de passe en fonction du diamètre de l'ébauche et du diamètre du palier à obtenir. Ce type de machine est très performant dans la fabrication des pièces type axe dont les diamètres maxi ne dépassent pas 20 mm en ébauche.

Par rapport aux 5M, l'usure de l'outil reste le problème difficile à maîtriser voire incontrôlable. C'est dans cette optique que l'étude fiabiliste est orientée car de la durée de vie de l'outil dépend la qualité de surface et la précision d'usinage.

Une comparaison avec une étude expérimentale au laboratoire par la méthode multifactorielle, est introduite.

Le chapitre 5 s'intéresse à l'analyse fiabiliste de la production de l'axe de la roue. Cette étude, à notre avis constitue une première car l'objectif est double dans les sens; il permet d'une part d'apporter une meilleure appréciation de la durée de vie des outils, au niveau d'un site de production et d'autre part d'associer cette durée de vie aux nombres de pièces produites et donc aux coûts de production.

L'analyse de fiabilité intègre la méthode du code de calcul PHIMECA Soft qui suit la procédure suivante:

- Définition du modèle géométrique
- Développement du modèle mécanique
- Détermination des modèles probabilistes associés au modèle mécanique
- Définition d'un scénario de défaillance exprimé par une fonction d'état limite
- Calcul de l'indice de fiabilité (inversement proportionnel à la probabilité de défaillance)

Dans ce chapitre une synthèse des résultats sera apportée et une discussion cernera les différentes étapes de l'analyse de l'usinage de l'axe du moyeu de la roue du fauteuil roulant. Les discussions seront orientées vers 2 directions principales, l'une fournira les appréciations de l'analyse des 5M et l'autre définira les indices d'appréciation de l'usinage de l'axe.

Une conclusion générale fournit un bilan des résultats et laisse entrevoir les perspectives de travaux futurs.

Enfin après conclusions, ce mémoire est clôturé par des références bibliographiques.

CHAPITRE II

Dans ce chapitre, nous proposons de présenter une étude bibliographique sur le procédé de fabrication dans lequel participent les 5 M, le matériel, le matériau à usiner, le milieu, la main d'œuvre et la méthode d'usinage. Et eu égard au vaste domaine que présentent les procédés de fabrication, l'axe sera orienté vers le procédé qui a fait l'objet de cette étude à savoir la réalisation des axes de petits diamètres sur des tours à décolleter. Ce n'est nul point de limiter notre étude à un type de machine outil, mais on va retrouver le même principe qui sera appliqué dans les autres procédés d'usinage.

2.1. Introduction

L'usinage est probablement le processus le plus largement répandu de la fabrication, les métaux et les alliages forment le volume des matériaux utilisés dans ce processus. Par conséquent, le sujet de la coupe des métaux a été le centre de beaucoup de recherches et a produit beaucoup de publications. Depuis que l'homme a commencé à usiner ces matériaux, beaucoup de problèmes ont surgi et beaucoup de solutions et idées ont été proposées. Le grand progrès a été réalisé dans l'augmentation du taux d'enlèvement de matière et dans la réduction des coûts de fabrication.

Le matériau peut être usiné dans peu de temps et cela en augmentant la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe. Pour le réaliser d'une manière économique beaucoup de facteurs sont reliés à la coupe des métaux, à savoir le **matériel** (machine outil, l'outil de coupe, dispositif de serrage), la **matière** à usiner, le **milieu** (l'ambiance et conditions de travail, la **méthode** d'usinage (gamme d'usinage et procédures d'usinage) et aussi la **main** d'œuvre qui dépend impérativement de la qualification de l'opérateur, [1, 2]. Ces 5 paramètres constituent les **5 M** et forment les moyens qui déterminent le procédé de fabrication. Pour respecter les cotes et les tolérances fixées à l'avance, il faut que le procédé soit bien réglé : Cependant, même si ce dernier est initialement bien réglé, il définit de lui-même en fonction de la variation des 5M et leurs interactions, son centrage (μ) et sa dispersion (σ) c'est-à-dire sa dispersion qui reflète sa façon réelle de travailler.

Les entreprises sont sans cesse confrontées à un double défi industriel qui consiste à accroître leurs parts de marché et à améliorer sans cesse leur compétitivité. Atteindre ces objectifs passe nécessairement par une écoute et une réponse rapide, voire immédiate, aux attentes des clients.

Ainsi, les entreprises doivent réduire leurs coûts et leurs cycles de développement, de fabrication, accroître également leur réactivité et améliorer toujours plus la qualité de leurs produits et prestations. [3]

2.2 Matériel dans un procédé de fabrication

2.2.1 Machine outil à commande numérique

L'usinage ou l'obtention de pièces mécaniques sous contrôle numérique s'étend désormais à l'ensemble des secteurs de l'industrie transformatrice des matériaux. Notons que la commande numérique s'applique d'ores et déjà dans de nombreux domaines tels que l'automatisation des machines de chargement de réacteurs nucléaires, le réglage automatique de l'écartement des rouleaux de laminoirs, les machines à mesurer, les oxycoupeuses, les poinçonneuses et les robots industriels. Qu'il s'agisse de fabrications réalisées en petites, moyennes ou grandes séries, répétitives ou non, les avantages des machines commandées numériquement sont reconnus par tous les utilisateurs et leur rentabilité n'est plus à prouver.

On constate l'évolution irréversible d'une industrie de fabrication de plus en plus automatisée (cellules ou ateliers flexibles), où les différentes fonctions s'intègrent de plus en plus, sous le contrôle des ordinateurs.

Certes, l'investissement en Machines-outils à Commande Numérique (MOCN) peut paraître élevé par rapport à celui que l'on pourrait faire en machines classiques, mais les avantages sont nombreux et il n'est pas d'exemple où une telle machine n'ait pas été amortie rapidement. Souvent même, la présence d'une MOCN chez un façonnier amène des marchés qui, sans cela, n'auraient jamais été proposés.

La commande numérique pour la première fois entièrement développée par TORNOS démontre un savoir-faire exemplaire dans tout le processus de solution globale pour le décolletage.

Souplesse, flexibilité et précision, sont les atouts principaux de la commande numérique, une nouvelle flexibilité. [4]

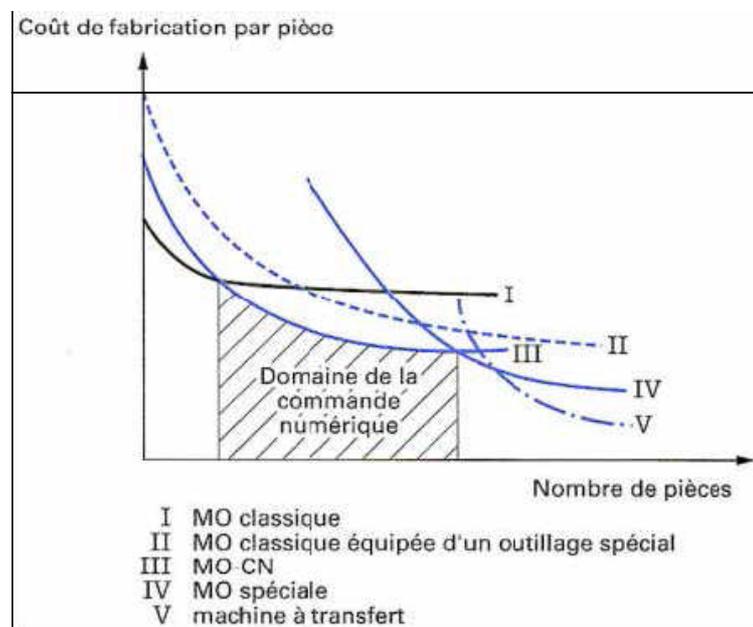


Figure 2.1: Intérêt de la commande numérique pour la fabrication de séries de pièces

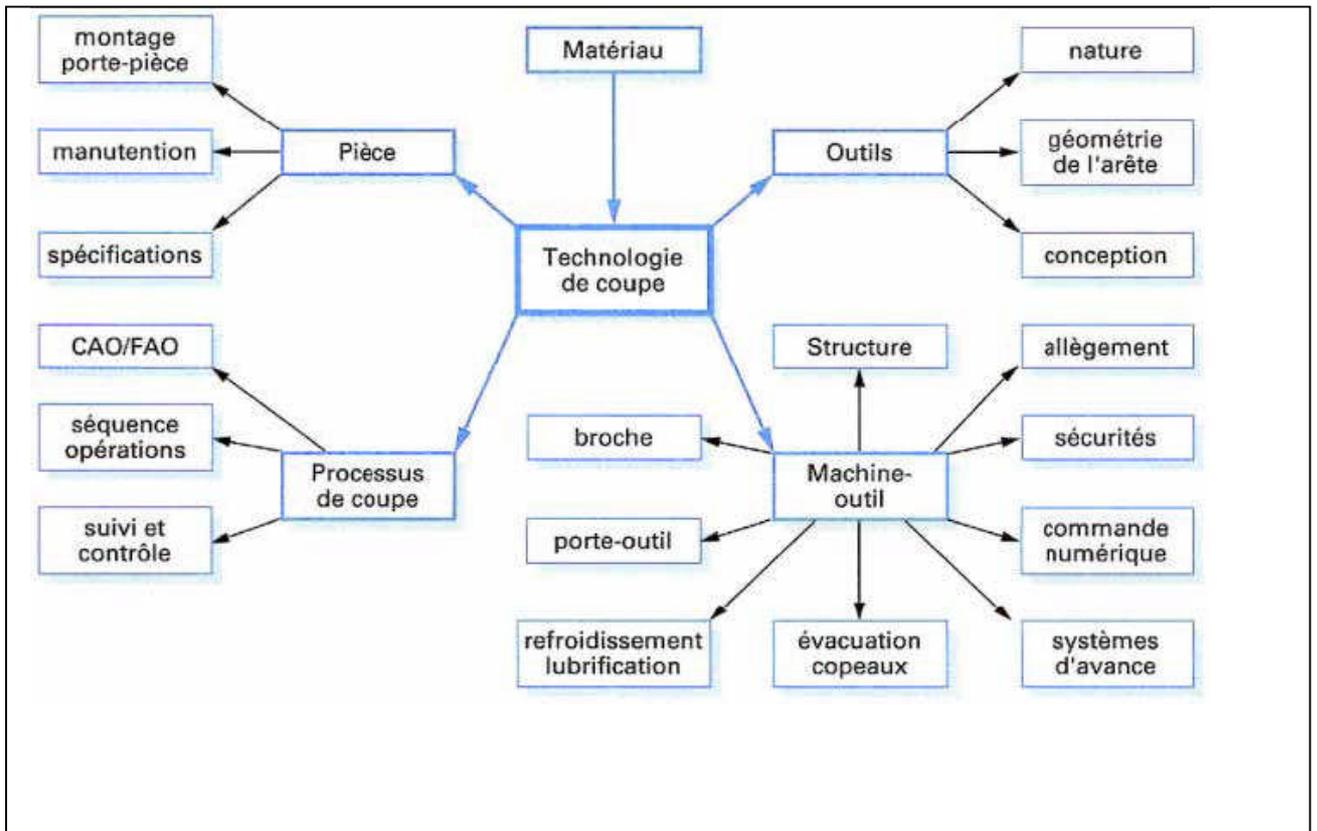


Figure 2.2: Interactions entre la machine-outil et les aspects technologiques de la coupe [5]

Cependant, il faut noter que la machine à commande numérique présente des avantages et des inconvénients. On se pose souvent la question " Pourquoi est-on amené à acheter une M.O.C.N.?"

Si la machine traditionnelle, conduite par un ouvrier professionnel, reste la machine pouvant convenir à l'usinage de pièces simples en travail unitaire ou de petite série, diverses raisons peuvent y contribuer comme avantages :

- _ La complexité des formes des pièces,
- _ La précision,
- _ La fidélité de reproduction,
- _ La charge de travail,
- _ La flexibilité,
- _ Un problème de coût.

- **La complexité des formes**

Certaines pièces ont des formes trop complexes pour une machine conventionnelle, l'usinage d'un grand rayon sur un tour ou encore un grand nombre d'opérations pour le fraisage d'une pièce. Ces usinages sont à envisager sur la machine outil à commande numérique, surtout si ce sont des petites séries renouvelables. On peut alors utiliser des outils simples, sans outillages particuliers supplémentaires. Les MOCN conviennent aussi très bien pour l'usinage en série. Elles permettent de regrouper plusieurs opérations sans démontage de la pièce.

- **Précision**

Une MOCN est plus rigide qu'une machine conventionnelle. Avec les vis à bille, on usine dans n'importe quel sens car il n'y a pas de rattrapage de jeu à faire. Sur une machine conventionnelle, on ne peut faire de la précision que si l'opérateur est qualifié et connaît bien sa machine.

- **Fidélité de reproduction**

Sur la machine outil à commande numérique, le cycle de travail se reproduit dans les mêmes conditions pour chaque pièce. La mémorisation des programmes d'usinage sur disquettes ou directement sur PC s'il existe un réseau d'atelier, assure la bonne répétition des fabrications.

- **Charge**

On peut investir dans une MOCN lorsque la société, avec les moyens conventionnels, n'arrive plus à fabriquer les pièces dans les délais.

- **Flexibilité**

Une nouvelle série peut être rapidement mise en route. Par exemple, sur un centre d'usinage à 2 palettes, il y a possibilité de mettre 2 opérations différentes. Mais il existe un problème de coût. C'est pour cela qu'on doit penser à une commande numérique lorsque les devis faits pour de nouvelles pièces sont souvent supérieurs aux devis des concurrents. Car il faut considérer les exemples d'incidences de la MOCN sur les coûts à différents niveaux.

- **Au niveau de la machine**

L'usinage sur une machine conventionnelle nécessite plus d'opérations ; il y a plus d'interventions humaines, l'attention permanente de l'opérateur est nécessaire. Les temps de coupe sur MOCN sont inférieurs au temps de coupe sur machine conventionnelle (rigidité), mais les prix sont plus élevés.

- **Au niveau atelier**

Il y a moins de préparation sur la pièce elle-même (disparition presque totale du traçage). On peut supprimer certains outillages spécifiques et utiliser des outils standards. La manutention de pièces sera réduite. Le contrôle ne se fait pas pièce par pièce. De plus, la machine peut fonctionner seule.

- **Au niveau de l'usine**

Le taux de productivité est élevé sur les machines outils à commande numérique. On pourra supprimer des machines conventionnelles et ainsi gagner de la place. On gagnera également de la place au niveau du stockage des outillages. Le temps de cycle est plus facile à contrôler, ce qui rend la planification plus simple. Le temps de passage d'une pièce dans l'atelier est plus court.

Néanmoins, il existe des précautions à prendre en fonction des contraintes et avantages cités ci-dessus.

- ✓ La programmation nécessite l'analyse exhaustive de la pièce, la connaissance poussée des codes, des capacités techniques et des automatismes de la machine.
- ✓ L'ouvrier doit être capable d'intervenir à tous les niveaux de la commande numérique et de la machine. Il doit être capable de régler celle-ci : conditions de coupe, réglage fin des outils, modifications de programme... pour obtenir une pièce bonne dans les meilleures conditions de qualité et de rentabilité.
- ✓ Pour bien maîtriser une MOCN, le recours à la formation est le moyen sûr d'une bonne maîtrise de l'ensemble du personnel.
- ✓ Il faut savoir aussi que le rejet de l'investissement dû à une certaine résistance au changement pourrait être dramatique pour l'entreprise. [6]

2-2-2 Outils de coupe

2-2-2-1 Types d'outils

2-2-2-2

Les outils de coupe sont habituellement identifiés par leurs forme, adaptée à une opération d'usinage, et leur matière. La partie active, le plus souvent amovible (alors appelée plaquette) est maintenue sur le corps d'outil par un moyen de fixation approprié. [CDCO'96]. . [7]

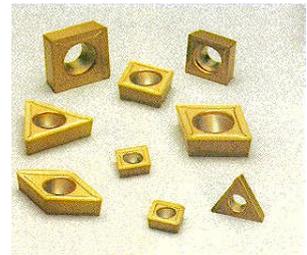


Figure. 2.3: Formes variées de plaquettes. [8]

Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont les suivantes:

- carbures revêtus (GC) ;
- carbures non revêtus (C) ;
- cermets (CT) ;
- céramiques (CC) ;
- nitrures de bore cubiques (CB) ;
- diamants polycristallins (CD).

2-2-2-3 Performances des outils de coupe

L'amélioration de la qualité de la production restera toujours l'un des soucis primordiaux pour le développement industriel. Le progrès technologique dans l'usinage des métaux est lié à l'amélioration du comportement des matériaux à la coupe. L'augmentation des performances sur les machines outils influe directement sur la durée de vie des outils coupants engagés en production. La sélection du matériau de l'outil est une phase délicate, compte tenu du conditionnement de la faisabilité de l'opération d'usinage, le type de la machine-outil et le coût ultérieur d'exploitation. Par conséquent le choix rationnel d'une nuance d'outil ne peut se faire qu'avec des expérimentations bien spécifiques au matériau donné. [9]

L'utilisation des outils revêtus devient de plus en plus répandue. Dans l'industrie moderne aujourd'hui plus de 40% de tous les outils de coupe sont **revêtus**. La finition des surfaces des pièces usinées est connue pour avoir l'effet considérable sur certaines propriétés telles que la résistance à l'usure et la force de fatigue. Ainsi, la qualité de la surface a de manière significative une importance pour évaluer la productivité des machines-outils, et des pièces mécaniques. Des conditions de coupe appropriées sont une tâche extrêmement importante parce que ceux-ci déterminent la qualité de surface des pièces fabriquées. Afin de connaître la qualité de surface et les propriétés dimensionnelles de précision à l'avance, il est nécessaire d'utiliser les modèles théoriques qui nous permettent de faire des prévisions en fonction des états d'opération. La méthode de réponse de surface (RSM) est pratique, économique et relativement facile d'usage. Les données expérimentales ont été utilisées pour établir le modèle mathématique pour le modèle de premier- et de second ordre, par la méthode de régression. Cette méthode a été employée par quelques chercheurs pour évaluer la durée de vie de l'outil et la rugosité de la surface [10–11-12-13–6]. Par exemple, Taraman [14], Hasegawa et autres. [15], Sundaram et Lambert [16] ont employé le RSM pour la rugosité extérieure de prévision. Baradie [17], Mital et Mehta [18], Kopac et autres. [19] ont étudié l'utilisation de RSM en développant un modèle extérieur de prévision de roughness. Petropoulos [20] a trouvé un effet prononcé de l'usure d'outil sur les valeurs de R_a et de R_{max} de la rugosité de surface par analyse statistique. Paulo [6] a étudié l'influence des états de coupe sur la finition de surface obtenue par tournage, basée sur les techniques de Taguchi. Yusuf Sahin *, A. Riza Motorcu ont développé le modèle de prévision de rugosité de surface de l'acier doux d'AISI 1040 à l'aide de la méthode statistique, à l'aide des outils de coupe **revêtus** de carbure dans diverses conditions de coupe. En employant la méthode de réponse des surfaces et le développement factorielle 2^3 de l'expérience, d'abord et les modèles de second ordre ont été développés avec un degré d'exactitude de 95%. [21]

Les matériaux déposés en revêtement sont très nombreux. Les plus courants sont : le Titane (Ti), le Nitrure de Titane (TiN) et l'Oxyde d'Aluminium (Al_2O_3) que l'on retrouve en monocouche ou combinés (Ti/TiN, TiC (carbure de titan TiN) (Figure 2 -10.).

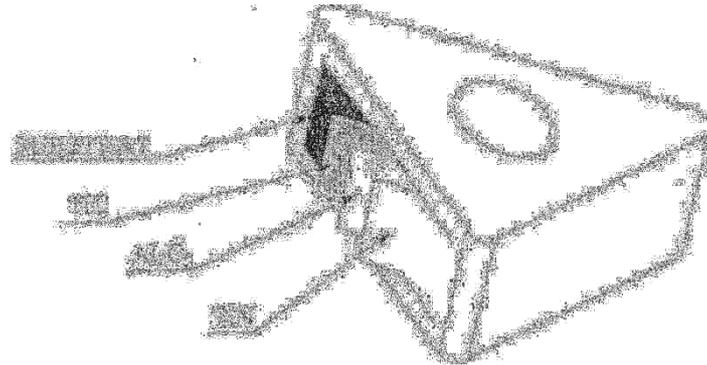


Figure.2.4: Plaquette en carbure revêtue, multicouches d'après [22]

On peut retenir globalement que :

- le nitrure de titane (TiN) est réputé mieux résister à l'abrasion. Pour cette raison, il est souvent utilisé en couche externe. De plus, il tolère des dépôts plus épais sans nuire à sa tenue en service. Le TiN est inerte vis-à-vis des aciers et le coefficient de frottement du métal sur le revêtement TiN est plus faible, ce qui minimise le risque de formation d'arête rapportée,
- le carbure de titane (TiC) adhère mieux aux substrats, constituant ainsi une excellente base d'application de couches de revêtement supplémentaires. Par contre, il est fragile et pour cela il est déposé en couche n'excédant pas 5 μ m,
- L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) est déposé en couche intermédiaire comme barrière de diffusion à la chaleur. Il conserve sa dureté à hautes températures, offrant une excellente résistance à l'usure, ainsi qu'une excellente protection contre la diffusion et l'oxydation à des vitesses et des températures de coupe très élevées. Un inconvénient majeur dans le cas des revêtements multicouches des plaquettes de finition est la perte de l'acuité d'arête. Pour cette raison, les métallurgistes ont mis au point des revêtements en couches minces de 1 à 2 μ m.

Les gains obtenus dans la coupe des métaux à l'aide de ces revêtements sont importants. Ces gains dépendent essentiellement du couple outil/matière. Cependant, pour caractériser l'influence du revêtement, nous précisons dès maintenant que trois modes de détérioration peuvent intervenir [23]:

- **abrasion:** Plus le revêtement est dur et moins ce mode d'endommagement peut intervenir. Les revêtements TiC et (Al_2O_3) sont performants du point de vue abrasion, **Figure 2-5**
- **diffusion (outil/copeau):** Ce mode d'endommagement est dans ce cas nettement plus important pour TiC, soluble dans l'austénite à partir de 1100 - 1150°C que pour TiN et Al_2O_3 tous deux insolubles dans les aciers même liquides,

- **fissuration et écaillage:** la détérioration s'effectue par fissuration du revêtement soumis à de fortes contraintes d'origine thermique entraînant des micro-écaillages (sur l'arête ou sur les flancs) puis une usure contrôlée par diffusion et abrasion. Ainsi, une couche extérieure de TiN semble aujourd'hui conduire aux meilleurs résultats lors du tournage des aciers inoxydables. L'usure par effets physicochimiques est très réduite.

Résistance à l'abrasion

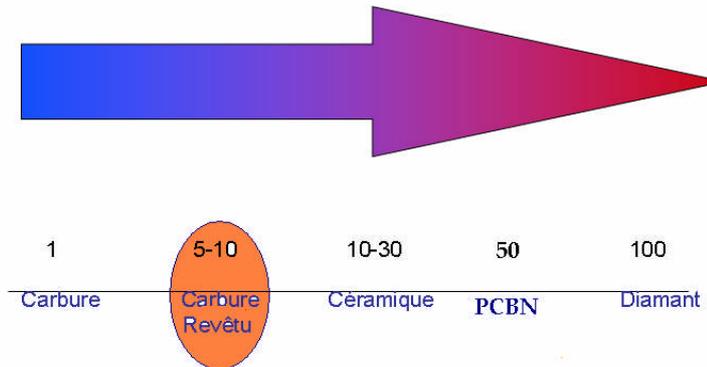


Figure.2.5: Résistance à l'abrasion

En résumé, la Figure 2.6 présente les différentes matières pour les outils de coupe et la Figure 2.7 montre une classification de ces matières très intéressantes puisqu'elle donne la possibilité de choisir la matière de l'outil en fonction de sa dureté, de sa résistance à l'usure et de sa ténacité. C'est des indicateurs de la performance de ces outils.

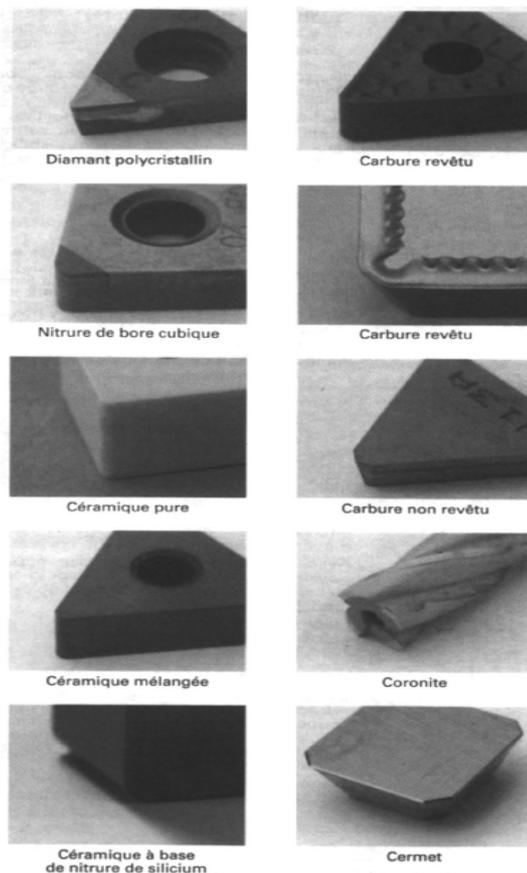


Figure. 2.6: Différentes matières pour outils de coupe

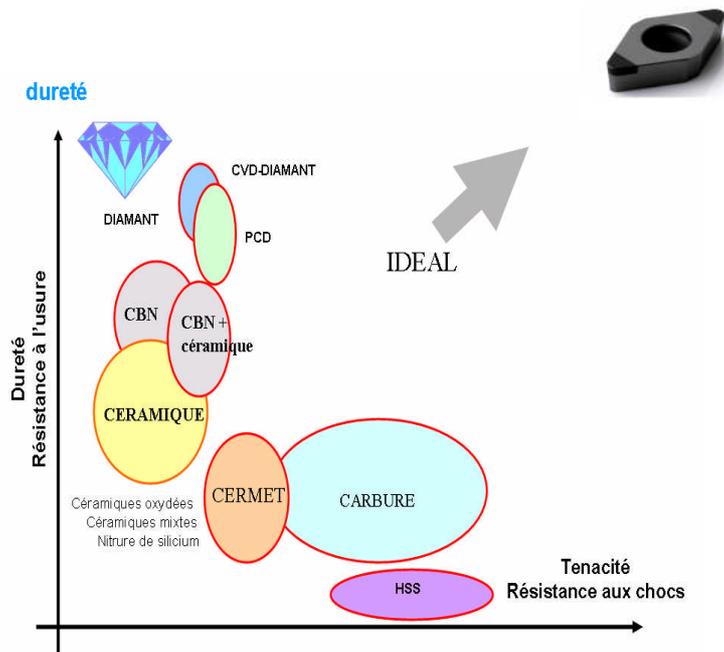


Figure.2.7: Classification des différents matériaux d'outils selon leur dureté et ténacité.

2-2-3 Les dispositifs d'usinage

En mécanique, la position d'une pièce par rapport à une autre doit souvent être précise, afin d'avoir une structure respectant les dimensions définies ou un mécanisme qui fonctionne bien. La mise en position de la pièce (MiP) et le maintien en position de la pièce (MaP) sont donc des opérations importantes.

On utilise souvent des pions de positionnement appelés « cimblots connus aussi sous le nom de doigts de positionnement. Il en existe de plusieurs formes, afin d'être au plus proche de l'isostatisme : cimblot cylindrique (réalise une liaison pivot glissant), cimblot dégagé (réalise une liaison linéaire rectiligne) ou cimblot oscillant (liaison rotule).

La norme DIN 6321 sur les pions de support et de positionnement (Aufnahme- und Auflagebolzen) est la plus communément utilisée.

Lorsque l'on usine une pièce, le résultat doit être conforme au plan, et en particulier les tolérances géométriques. Le placement de la pièce doit être précis sur le chariot de la machine outil, la pièce doit donc être mise en place de manière isostatique, et maintenue de manière à respecter si possible cet isostatisme.

Dans la pratique, le maintien de la pièce est souvent hyperstatique, notamment pour que la pièce ne bouge pas sous les efforts engendrés par l'usinage, il faut donc gérer cet hyperstatisme. On commence donc par une mise en position isostatique, puis on ajoute des éléments de maintien supplémentaires en essayant de ne pas déformer la pièce.

La qualité du positionnement conditionne la qualité de l'usinage, et notamment la reproductibilité dans le cas des fabrications en série, que ce soit en usinage conventionnel ou en commande numérique.

Considérons deux cas pratiques les plus connus:

- a) Serrage sur Table d'usinage (pour les pièces prismatiques)
- b) Serrage dans un Mandrin (pour les pièces de révolution)

a) Serrage sur Table d'usinage

Le premier élément de la mise en position et du maintien est la table d'usinage.

Les tables d'usinage sont en général magnétiques (surtout dans le cas de la rectification) soit avec un aimant permanent, soit avec un électroaimant. Cela permet un premier maintien des pièces ferreuses (fer, acier, fonte) ayant une face plane. Il s'agit d'un maintien par frottement (adhérence).

Certaines tables sont refroidies pour assurer un maintien par gel de l'humidité ambiante.

Lorsque les efforts générés sont peu importants, la table seule peut suffire au maintien :

si l'on n'a pas besoin d'une grande précision, on peut tenir la pièce à la main, par exemple dans le cas d'un perçage à une position approximative ;

la fixation magnétique ou par le froid peut suffire au maintien ;

la pression exercée par l'outil contribue à l'adhérence.

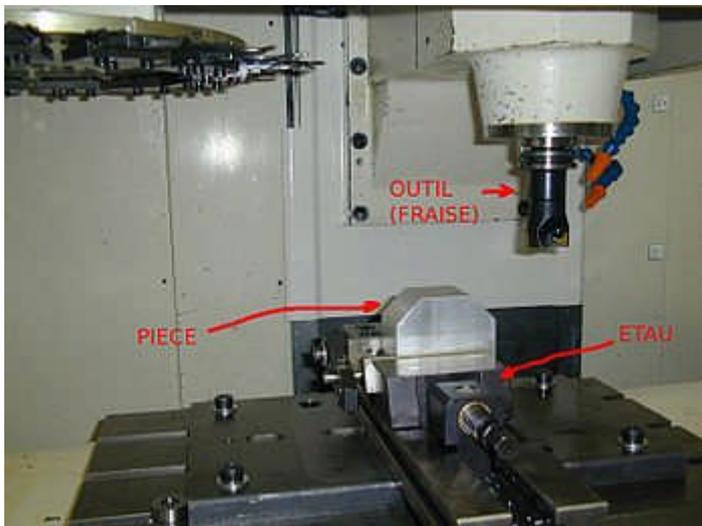


Figure 2.8: Serrage au moyen d'un étau sur une Fraiseuse à commande numérique

Lorsque l'on fait du fraisage, on maintient souvent la pièce dans un étau Figure 2.8. On commence par usiner la surface ayant la plus grande aire, appelée « face », afin de diminuer les erreurs d'usinage ultérieures. Cette face servira par la suite de surface de référence.

Le placement exact en x, y et z n'est pas critique : les mouvements du chariot et de l'outil permettent d'ajuster ces positions, la première opération consiste à prendre les références de la pièce en venant tangenter avec une pinnule. C'est l'orientation de la pièce qui est critique.

La face de référence Figure 2.9, de la pièce peut être placée :

soit contre le mors fixe de l'étau : en effet, l'étau est normalement « parfaitement » positionné par rapport aux axes de référence de la machine, le mors fixe est donc normalement parallèle au plan (xz) ;

soit sur deux cales posées sur le fond de l'étau, ce fond étant normalement parallèle au plan (xy).

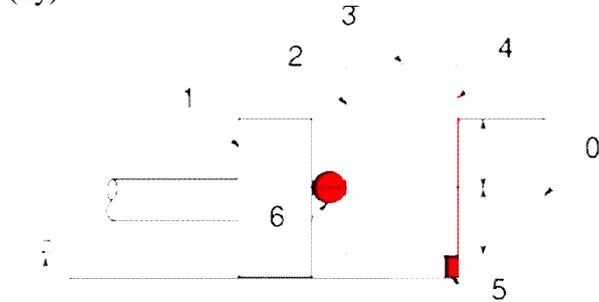


Figure2.9: Serrage dans un étau avec face de référence contre le mors fixe

La Figure 2.9 représente le serrage typique d'une pièce prismatique dans un étau pour un fraisage. La référence 0 représente le mors fixe de l'étau, la 1 le mors mobile, la 2 la pièce à usiner.

Si l'on veut usiner une face perpendiculaire à la face de référence 3, on place cette surface de référence contre le mors fixe 0, on assure un appui plan, ce qui bloque trois degrés de liberté (la translation en y et les rotations autour de x et de z). Le maintien contre le mors fixe est assuré par le mors mobile 1 ; toutefois, cela forme deux appuis plans, les degrés de liberté sont bloqués deux fois, ce qui n'est pas isostatique. Pour réduire cette contrainte, on peut intercaler un rondin 6 qui va assurer un appui linéaire rectiligne. Ce rondin est placé approximativement au milieu de la hauteur du mors, mais peut être déplacé si la pièce s'incline, en fonction du jeu pris par le mors mobile.

La translation en z et la rotation en y sont bloquées par une cale 5 placée sur le fond de l'étau, ce qui assure un contact s'approchant d'une liaison linéaire rectiligne. La translation en x est bloquée par le serrage (frottement).

Pour vérifier le contact linéaire avec la cale, on essaie de la faire bouger ; si elle pivote, on enfonce la pièce à coup de marteau du côté où elle bouge. En raison du porte-à-faux, on peut placer une seconde cale du côté du mors mobile, mais une seule des deux cales doit être bloquée.

Si l'on voulait un placement réellement isostatique, il faudrait mettre un rondin en dessous à la place de la cale et une bille entre le mors mobile et la pièce à la place du rondin, mais le placement serait difficile : tout en serrant, il faudrait maintenir la bille et le cylindre pour pas qu'ils ne roulent, ce qui nécessite au moins trois mains dont une devant se glisser entre la pièce et le mors mobile...

Enfin pour maintenir la pièce il faut la brider. Le bridage est l'opération consistant à maintenir une pièce sur un plateau en utilisant le frottement (adhérence). La pièce est pressée contre la table d'usinage par des pièces métalliques appelées brides ou sauterelle de bridage, la pression étant déterminée par le serrage d'une vis ou l'action sur un levier. Cette pression doit être suffisante pour résister aux efforts d'usinage.

La table constitue un appui plan, le plan étant (x, y). Les brides vont empêcher :

la rotation autour de l'axe z ;

les translations en x et en y.

Il ne s'agit pas d'un blocage par obstacle mais par adhérence. Le système serait donc isostatique s'il n'y avait qu'une seule bride ; c'est parfois possible pour des usinages ne générant que peu d'effort. Mais il est souvent nécessaire de travailler en hyperstatique, soit en raison de la forme de la pièce (pièces de fonderie par exemple), soit pour vaincre les efforts de coupe, soit pour éviter les vibrations lorsque la pièce a beaucoup de porte-à-faux. Dans ce dernier cas, on bien juste positionner les éléments contre la surface sans exercer de pression, afin de ne pas déformer la pièce.

Dans le cas d'un maintien dans un étau, l'étau est bridé sur la table d'usinage.

On peut automatiser le bridage en utilisant des vérins.

b) Serrage dans un mandrin

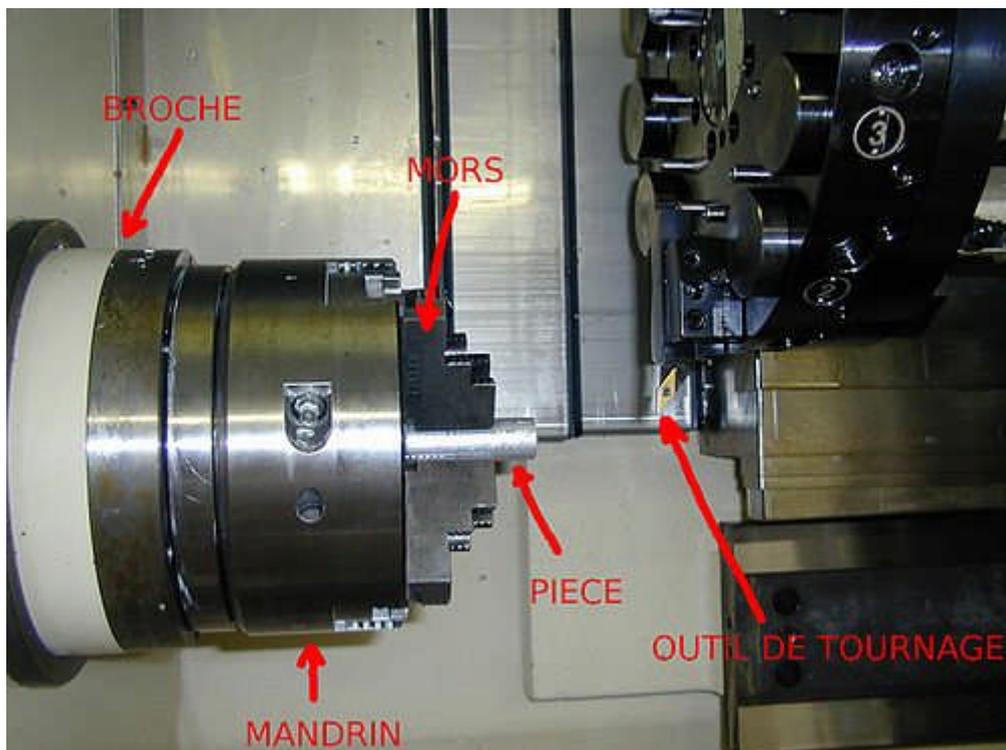


Figure 2.10: Serrage d'une pièce par l'extérieur avec les mors durs

Les pièces de révolution sont souvent usinées sur les tours. Pour les opérations de tournage, la pièce est serrée dans un mandrin solidaire de la broche de la poupée fixe Figure 2.10. La pièce est serrée par des mors mobiles qui assurent son centrage.

Habituellement, la pièce est serrée par trois mors placés à 120° ; le serrage se fait par une vis sans fin. Selon la précision de l'usinage, on utilise des mors durs ou des mors doux.

Les mors durs sont utilisés sur le brut (cylindre de matière première avant tout usinage). C'est un système de serrage rapide et simple, mais il ne permet pas d'avoir une bonne précision sur la concentricité (5/100 mm au mieux). Les mors sont en général en escalier, ce qui permet d'avoir un serrage par l'extérieur ou bien par l'intérieur.

Les mors doux sont des mors qui sont eux-mêmes usinés pour être au mieux adaptés à la pièce à produire.

Les pièces peuvent être serrées par l'extérieur ou par l'intérieur.

Dans le serrage extérieur, la surface de contact des mors est plane tandis que le brut est cylindrique ; chaque mors assure donc un contact linéaire rectiligne. La translation et la rotation d'axe x (axe de rotation du tour) sont bloquées par le frottement (adhérence) ; si la longueur de pièce sortant du mandrin est grande par rapport au diamètre de la pièce, on usine un cône au centre de l'extrémité libre de la pièce et on la maintient par une pointe sur la poupée mobile dite « contre-pointe » — pointe tournante, mais on utilisait autrefois une pointe fixe ou « pointe sèche ». Le positionnement n'est pas isostatique puisque les rotations autour de l'axe y et de l'axe z sont bloquées au moins par deux contacts linéaires rectilignes. Cependant, cette configuration permet d'avoir un bon équilibrage des masses, donc de réduire le système lors de la mise en rotation. Mais c'est la solution qui se rapproche le plus de l'isostatisme.

Le serrage intérieur peut être utilisé pour les pièces creuses, une pièce creuse peut être serrée par l'intérieur, ce qui permet d'usiner au plus proche de la broche.

Nous avons tenu dans cette section de rappeler la notion de dispositif d'usinage pour mieux entreprendre les 5M. Il faut savoir que chaque type de machine peut être équipé de différents dispositifs d'usinages. Qu'ils soient standards ou spéciaux, ils font partie des outils qui assurent la qualité et la précision d'usinage. On peut en dénombrer une grande variété, mais ce n'est pas l'objectif de notre travail. Cependant, nous développerons dans la partie analyse des 5M les dispositifs qui sont utilisés pour réaliser l'axe de la roue du fauteuil roulant qui a fait l'objet de cette étude. [24], [25]

2.3 Main d'œuvre dans un procédé de fabrication

Toute machine doit être manipulée, dans son installation, sa mise en service, son exploitation, son entretien et sa réforme. Cette manipulation reste attributive des moyens humains qui sont les garants de la sûreté de fonctionnement de la machine. Assurer la sûreté de fonctionnement implique d'abord que la machine doit être fiable c'est-à-dire quelle doit remplir une tâche donnée avec les résultats souhaités dans un temps donné; puis en cas de défaillance, elle doit être maintenable autrement dit, qu'on peut apporter les réparations nécessaires pour la rendre à son état initial pour reprendre son travail; et aussi il faut qu'elle soit disponible, c'est-à-dire qu'il faut qu'elle soit prête à remplir sa tâche dans un temps donné.

Il n'est nullement le but de développer dans ce travail le concept de la sûreté de fonctionnement, mais on a voulu montrer que la main d'œuvre existe à tous les niveaux de la production, et pour cela elle doit être performante à chacun de ces niveaux.

Dans le cas de l'usinage, il est intéressant de montrer quelques actions qui sont spécifiques avant d'entamer l'usinage et qui dépendent directement des moyens humains.

Le technicien d'usinage, ou le bureau des méthodes, doit déterminer la manière dont la pièce va être usinée. Cela implique de choisir la surface de référence, puis les placements dans l'étau par rapport à cette face.

L'usinage se fait à partir du plan (dessin technique). Les cotes définissent la longueur des éléments à usiner. Lorsque des éléments s'enchaînent, il faut donc ne pas avoir de cotes redondantes : s'il y a plusieurs moyens de réaliser un usinage, cela va inévitablement introduire des variations dans la fabrication.

Le dessinateur doit donc penser à la réalisation afin d'être sûr que le plan sera interprété de la même manière par tout le monde. Pour une chaîne de cotes, toutes les cotes doivent pouvoir se ramener facilement à la face disponible ayant la plus grande aire, puisque c'est en utilisant cette face comme face de référence que l'on aura la meilleure précision de placement.

Si le plan ne présente pas ces qualités, il faut faire un transfert de cotes, c'est-à-dire supprimer la cote problématique et la remplacer par une autre cote, en s'assurant que les cotes nominales et les ajustements restent inchangés.

2.4 Matière dans un procédé de fabrication

L'univers des matériaux est vaste et il importe donc de savoir qu'il est divisé en 6 grandes familles: céramiques, verres, métaux, polymères, élastomères et composites. Chaque famille est subdivisée en classes, sous classes et membres. On dénombre plus de 60000 membres.

Dans l'usinage, la classe des aciers reste celle qui pose beaucoup de problème quant à la fabrication des pièces. Cependant, de plus en plus, les métallurgistes élaborent de nouveaux matériaux répondent à des exigences de l'industrie (meilleure usinabilité, plus grande résistance mécanique, plus grande dureté).l'aptitude à être usiné et le niveau des propriétés mécaniques sont antagonistes [26].

Les réfractaires, les aciers fortement alliés dans leur état durci, les fontes alliées sont souvent difficilement usinables par des procédés conventionnels. Une étude récente sur les application de l'usinage dur, fait ressortir que 66% d'entre elles concernent des aciers traités, 26% couvrent les fontes et 8% les superalliages et autres matériaux.

a) Les aciers de construction pour traitement thermique :

Pendant l'usinage d'aciers durs, même à de faible vitesse de coupe, les outils en acier rapide et en carbure cémenté sont peu efficaces à cause de leur faiblesse à supporter des contraintes élevées à températures élevées. Par conséquent, des alliages ferreux traités (45HRC-450HV à 70 HRC – 930HV) constituent le principal domaine d'application des outils céramique et CBN. La prudence invite à dire qu'un matériau devient difficile à usiner lorsque sa dureté dépasse 300HV (30HRC ou 1020 MP a).

b) Les aciers d'outillage à froid (X200Cr12, 160CrMoV1, X100CrMoV5,...)

Ces aciers fortement alliés présentent des qualités de résistance à l'usure et à la compression exceptionnelles. Ils sont remarquables pour leurs faibles variations dimensionnelles au traitement thermique. La dureté de ces aciers peut varier de 50 à 65 HRC. Ils sont principalement utilisés pour tous les travaux à froid tels que : poinçons d'estampage, outils de coupe, molettes à rouler les pas de vis, lames de cisaille, outils de travail de bois, cames.

c) Les aciers d'outillage à chaud (X40CrMoV5, 40NiCrMo16, 35CrNiMo4)

Ces aciers possèdent une excellente résistance aux chocs thermiques et à la fatigue thermique. Leur résistance à hautes températures, leur ténacité et leur aptitude au polissage permettent de répondre aux sollicitations les plus sévères dans les domaines suivants : matriçage à chaud, moules à coulée sous pression, filage à chaud, lames de cisaille à chaud. La dureté après revenu varie de 30 à 55 HRC.

d) Les aciers à moules (C48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16,...)

L'acier XC 48, livré à l'état normalisé, permet après trempe d'obtenir une dureté de surface appréciable (50HRC). Le 40 CrMo8 spécialement conçu pour l'élaboration des moules pour matière plastique est livré à l'état trempé et revenu à une résistance de 1000 à 1100 Mpa. Il est caractérisé par la grande facilité d'usinage que lui donne la résulfuration. Cet acier peut être trempé superficiellement à la flamme ou par induction, permettant d'atteindre des duretés de 55 HRC. Des duretés superficielles beaucoup plus importantes pourront être obtenues par nitruration gazeuse ou ionique, environ 650HV. La couche nitrurée (0,3 à 0,5 mm) donne une excellente résistance à l'usure et améliore la résistance à la corrosion. Ces aciers à moules conviennent pour la réalisation de carcasses de moule pour matières plastiques. Semelles d'outillages, outils pour moulage sous pression, plaques porte- empreintes.

e) Les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100)

Fortement utilisé ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils C-BN sont employés avec succès lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de C-BN est préférable à un outil à forte concentration de C-BN ou une céramique mixte (Al₂O₃ + TiC) donnant une durée de vie trois fois supérieure dans le cas de la céramique, et six fois plus dans le cas du C-BN à forte concentration [27].

f) Les aciers rapides (HS6-5-2, HS2-9-1-8)

Cette famille d'aciers comprend, en majorité, les matériaux utilisés pour la fabrication des lames de découpe et des poinçons. La représentation de cette catégorie de matériaux regroupe les aciers rapides, les aciers de travail à chaud et les aciers de travail à froid. Bien que les outils en céramique mixte puissent être utilisés en tournage continu d'aciers à des duretés de 45-55 HRC à hautes vitesses, ils ne conviennent pas pour la coupe interrompue en raison de leur faible ténacité. Lors de l'usinage d'un acier rapide M2 (HS6- 5- 2) à 32 HRC, le C-BN s'affaiblit rapidement par rapport à un carbure [28] ; aux faibles vitesses de coupe (60m/min) une arête rapportée massive se développe, et aux hautes vitesses de coupe (137m/min), un cratère apparaît rapidement. De plus, pendant l'usinage du même acier rapide à haute dureté (62HRC), l'outil carbure s'affaiblissait rapidement quelle que soit la vitesse utilisée.

g) Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10CrNi6, 18CrMo4)

L'usinage de finition et la coupe continue d'acier de cémentation d'une dureté de 65HRC peuvent être effectués avec des C- BN à hautes vitesses de coupe comme le rapportent [29,30].

En générale, le liant céramique TIC est plus performant q'un liant métal C-BN, en raison de la capacité à garder une plus grande dureté aux températures élevées. L'usinage en coupe interrompue peut également être pratiqué avec satisfaction à l'aide de C-BN [31]. Les outils à base de céramique peuvent être utilisés à de plus faibles conditions de coupe, mais les risques de rupture augmentent beaucoup.

h) Les aciers de nitruration (30 CrMo4, 30CrAlMo6- 12, 40CrAlV6- 10)

Le but de la nitruration est de former une couche très dure sans trempe ultérieure. La nitruration peut être solide, gazeuse, liquide ou ionique. La dureté des couches peut varier de 850HV à 1400HV suivant le procédé de nitruration et selon le matériau traité. L'épaisseur des couches durcies n'excède pas 0,4mm. Pendant ce procédé, l'accroissement de la dureté est produit par l'insertion des atomes de carbone et d'azote dans le réseau cristallin du matériau. L'usinage de ces couches fines est très dur et problématique.

e) Les fontes grises

Ces fontes moulées sont utilisées en grandes quantités pour les application générales, leur faible coût en étant la raison principale. Les grises ont une plage de dureté typiquement comprise entre 180 et 320 HB. Dans ce cas, les C- BN dépassent de loin les performances des outils en carbure et en céramique (sial on) [32], et une fonte perlitique contenant peu de ferrite peut être usinée à des vitesses de coupe de 600m/min à l'aide de C-BN [33]. Cependant d'autres [34,35] ont trouvé que des outils à base d'alumine donnaient de bien meilleurs résultats que le C-BN. [36] a montré dans ses travaux que la ferrite libre produisait une usure rapide sur les outils en C-BN. Il a affirmé que les céramiques à base de nitrure de silicium ($\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{TiC}$) présentaient une excellente résistance à l'usure lors de l'usinage de la fonte grise.

i) les fontes blanches

Les fontes blanches ou trempées sont beaucoup plus dures, plus fragiles et plus résistantes à l'usure que les fontes grises à cause de la présence de carbures de fer (cémentite) au lieu de graphite. Leur dureté varie typiquement de 45 à 65 HRC et elles sont largement utilisées pour la fabrication des cylindres de laminoir. [8] a rapporté que lors du tournage ébauche de fonte trempée, les outils en carbure cémentés étaient limités par la vitesse de coupe 10m/min ou moins. Alors que les outils C-BN étaient capables de travailler de 60 à 90 m/min avec des avances de 0.3 à 0.7 mm/tr et des profondeurs de passe de 2 à 4 mm. Quand on compare les performances du C-BN avec la céramique conventionnelle pendant des opérations d'ébauche de fonte trempée (55HRC), les résultats montrent que la céramique ne peut pas être utilisée à des avances supérieures à 0.16 mm/tr, en particulier quand les vitesses de coupe sont plus hautes que 40m/min. Le C-BN se comporte très bien à des avances de 0.1mm/tr et des vitesses de coupe de 80m/min. Pour une comparaison, à 0.16mm/tr et 60m/min, la durée de vie de l'outil céramique n'est que 0.6minutes alors que celle de C-BN est de 200minutes.

2.5 Méthodes dans un procédé de fabrication

2.5.1 Les nouvelles stratégies de fabrication

La condition des pièces usinées en termes de, complexité, forme, matériau, taille, etc impose inévitablement aux fabricants d'adapter de nouvelles stratégies d'optimisation pour les processus de fabrication, permettant d'utiliser les dernières techniques de fabrication. Les phases intervenant à la formation de la pièce dans le processus de fabrication, sont généralement diverses: usinage, formage, coupe, traitement thermique et procédé de finition. Les stratégies d'optimisation peuvent éviter ou supprimer certaines phases telles que dans l'usinage à grande vitesse ou bien dans l'utilisation de la commande numérique de plus en plus performante et des outils de la conception et de la fabrication assistée par ordinateur CFAO, selon les formes initiales et les exigences requises de la pièce finie.

D'autres stratégies ont des objectifs pour réduire le temps requis pour certain ou toutes les phases par la substitution ou la combinaison des phases menant à la réduction des coûts de fabrication.

Le but réel des stratégies d'optimisation pour l'augmentation de la productivité, qualité, ou la réduction des coûts est la recherche de:

- l'augmentation des taux d'enlèvement de matière;
- L'amélioration de la qualité des pièces (précision du fini);
- La fabrication au plus près des cotes (moins de phases et moins d'enlèvement de matière)
- L'introduction de séquences machines plus efficaces et de plus grandes flexibilités. [37].

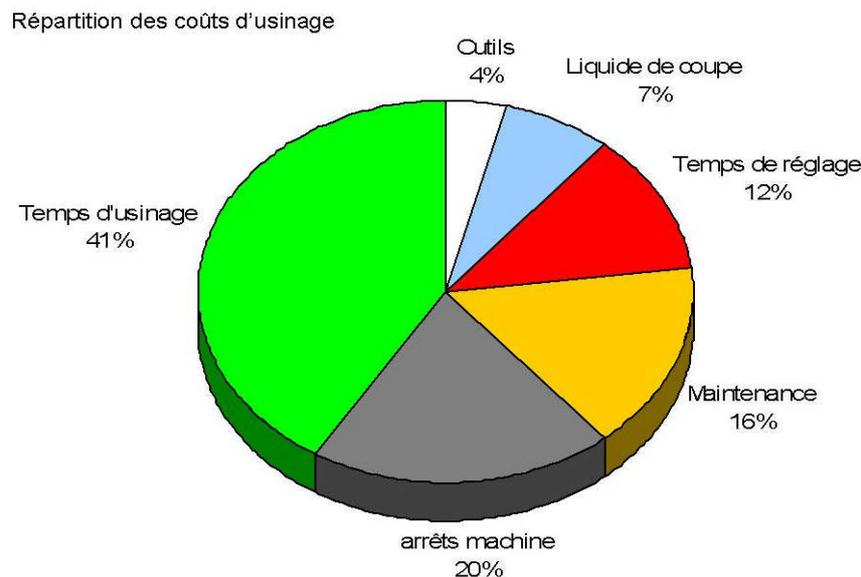


Figure 2.11: Répartition des coûts d'usinage

2.6 Défaillances dans un procédé de fabrication

Les défaillances dans un procédé de fabrication sont liées principalement à deux systèmes: d'une part il y a l'équipement avec son environnement proprement dit et d'autre part le processus.

L'équipement doit subir les lois de la maintenance industrielle qui régissent de la fiabilité, de la maintenabilité et de la disponibilité pour en assurer la sûreté de fonctionnement. Ceci n'est pas l'objectif de ce travail et reste attributaire des mainteniciens.

Par contre, il est très important de comprendre le processus car de lui dépend le produit fini. Dans l'usinage, le processus consiste à enlever de la matière en utilisant un outil de coupe. Pour assurer la qualité et la précision de la surface à obtenir il faut respecter les conditions et les régimes de coupe. Mais dans tous les cas de figures, le problème crucial est l'usure de l'outil qui en forme la source de défaillances de la précision d'usinage. A cet effet, nous reportons dans ce qui suit une étude sur l'usure des outils afin de mieux cerner la problématique.

2.6.1 Endommagement des outils de coupe

Le choix des meilleures conditions d'usinage vis-à-vis de l'usure, que ce soit avec des vitesses conventionnelles ou à grandes vitesses, consiste à trouver les conditions de coupe en tournage, en établissant un compromis entre la vitesse de coupe et la durée de vie des outils.

La durée d'utilisation de l'outil étant limitée par son degré d'usure, il en résulte que les temps d'usinage sont en rapport direct avec l'usure. Le **coût** de l'usinage, qui intéresse en définitive **l'entreprise**, est une conséquence de la tenue des outils à l'**usure**.

Les méthodes pour la recherche des conditions opératoires d'un Couple Outil- Matière mettent en évidence la nécessité d'établir la capacité d'usinabilité avant tout autre mesure de ces caractéristiques.

La qualité du travail d'un outil dans le processus d'usinage dépend de son degré d'usure. L'importance de cette usure a une influence directe sur:

- ❖ la qualité et la précision dimensionnelle de la surface obtenue,
- ❖ la tenue de l'outil dans le temps,
- ❖ la puissance nécessaire à la coupe.

2.6.2 Durée de vie d'un outil de coupe

La définition de la durée de vie **T** d'un outil selon la norme ISO 3686' est le temps de coupe total d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.

Il faudra donc maîtriser cette durée de vie ainsi que son évolution par rapport aux paramètres d'usinage. Dans la pratique, on pourra ramener cette durée de vie à des éléments plus concrets sur le poste de travail comme :

- un volume de copeau produit entre deux changements d'arêtes,
- un nombre de pièces usinées entre deux changements d'arêtes,
- une longueur d'usinage entre deux changements d'arêtes.

L'analyse du mécanisme de la coupe montre l'importance des phénomènes de déformation plastique et de fissuration au sein du matériau usiné, mais aussi celle des phénomènes inter faciaux qui déterminent les actions réciproques de l'outil et du copeau.

Dans l'usinage des métaux, on constate que la forme géométrique et l'état physique de l'outil sont modifiés par l'action combinée des forces de coupe et par la température atteinte par le tranchant. Ces modifications qui augmentent progressivement avec la durée d'usinage, sont couramment regroupées sous le terme **usure de l'outil**.

2.6.3 Usure des outils

L'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil - copeau. Celles-ci sont d'abord de nature mécanique. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface. Ceci exige pour l'outil des qualités de dureté et de ténacité remarquables.

Les phénomènes physiques qui provoquent la dégradation progressive du tranchant et, corrélativement, des qualités géométriques et mécaniques de la surface usinée, se traduisent par des modifications d'aspect visibles à l'oeil nu ou à l'aide d'un microscope. Ces manifestations macroscopiques permettent d'apprécier objectivement l'évolution de **l'usure** en fonction de divers paramètres géométriques mesurables.

Cette usure se manifeste sous plusieurs formes, dont les principales sont : **l'usure en dépouille**, **l'usure en cratère** et la **fissuration de l'arête** coupante suivie par la **chute** partielle ou totale de l'arête même.

Le travail mécanique fourni pour créer un copeau est presque intégralement transformé en chaleur. L'élévation de température qui en résulte est l'une des causes majeures de l'endommagement de l'outil. [37].

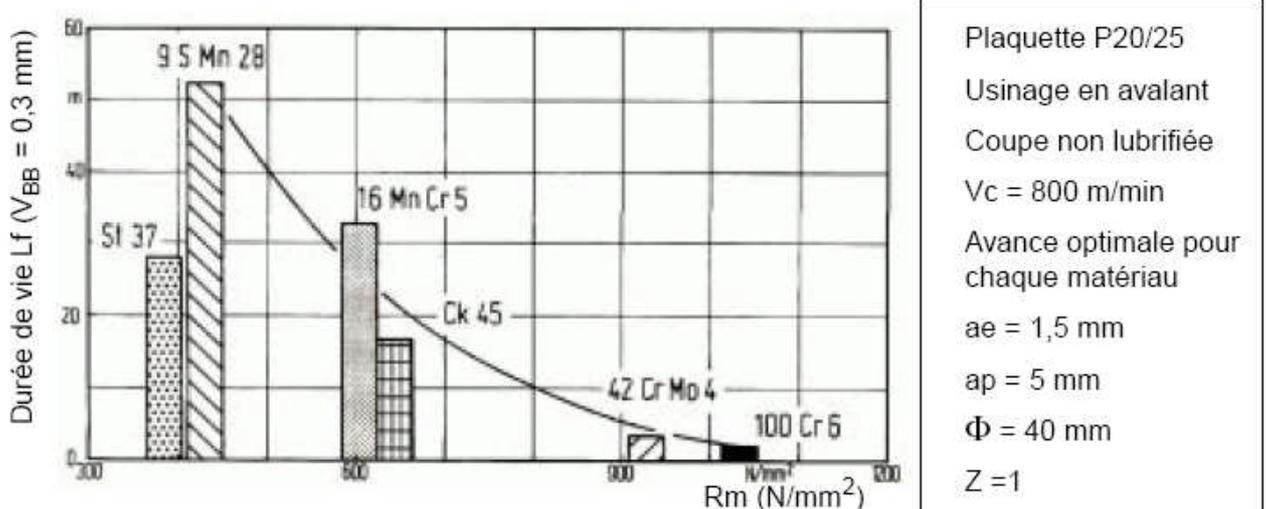


Figure. 2. 12: Relation entre durée de vie et résistance à la rupture de l'acier de la pièce usinée [38].

Les courbes donnant la valeur de l'usure en dépouille gardent le même profil que pour les courbes classiques de Taylor (progression linéaire après rodage, puis exponentielle). En raison de l'importance du cratère aux très hautes vitesses de coupe on observe des cassures d'arêtes. Les études expérimentales montrent l'existence de deux domaines vis-à-vis de la vitesse de coupe.

- Pour les vitesses de coupe " conventionnelles " (<400 m/min pour un C45), le copeau colle à la face de coupe (soudage par compression). Les vitesses de glissement ne sont pas très élevées, tout comme les forces centrifuges. La durée de vie ne change presque pas et la cratérisation diminue.

- Au-delà de 500 m/min pour ce matériau, la zone de contact atteint de très hautes températures.

La limite élastique du matériau de l'outil augmente et des phénomènes de diffusion avec le copeau interviennent. L'usure s'accélère avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La durée de vie n'est plus que de quelques centimètres pour un outil carbure, à 5000 m/min.

Koning et al [39] trouvèrent qu'à l'usinage des différents matériaux :les aciers fortement alliés,les aciers de cimentation,les aciers à nitruration et les aciers rapides, qui ont la même dureté (62HRC), et les mêmes conditions de coupe, résulte des taux d'usure variables. Cela signifie **que la dureté du matériau travaillé n'est pas un paramètre adéquat pour évaluer l'usure de l'outil.**

Les forces de coupe augmentent et en particulier les forces radiales car la pénétration de l'outil dans le métal devient difficile à cause de l'usure en dépouille. Le résultat d'un essai d'usure pour le tournage de 100Cr6 avec une dureté (HT 710) à une avance de 0.15 mm/tr, une profondeur de passe de 0.3mm et une vitesse de coupe de 150 m/min est montré dans la Figure.2-13. La rugosité de la surface était également surveillée pendant la progression de l'usure de l'outil

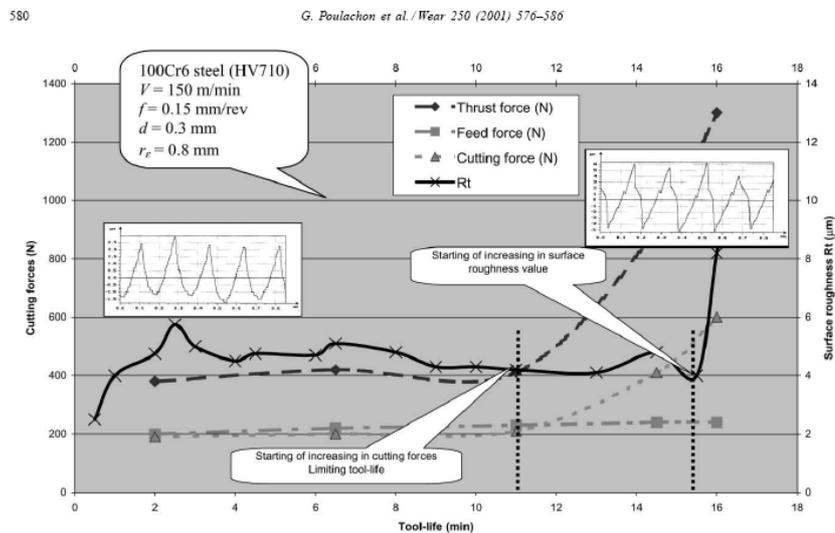


Figure.2.13: Evolution de l'effort de coupe et de la rugosité de surface en fonction de la durée de vie de l'outil[37].

La Figure.2.13 montre que l'augmentation de la rugosité de la surface due à l'usure de l'outil apparaît plus tard que l'augmentation de l'effort radial.

Ceci signifie que pour commander le processus du tournage dur dans la fabrication des pièces en série afin d'éviter la rupture de l'outil, il est recommandé de surveiller l'effort radial. Pendant ces essais, l'effort radial a été le plus sensible aux variations de la dureté de la pièce. Nous pouvons dire que c'est le meilleur facteur qui peut évaluer la dureté de celle-ci. [37].

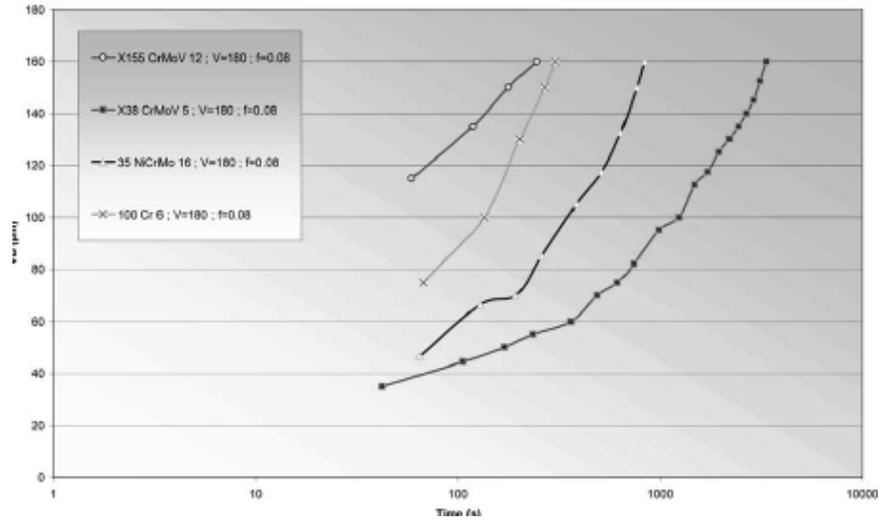


Figure.2.14: Evolution de l'usure en dépouille des quatre matériaux en fonction du temps.

La Figure.2.14 montre l'évolution de l'usure en dépouille en fonction du temps pour quatre matériaux usinés avec une vitesse de coupe de 180m/min et une vitesse d'avance de 0.08mm/tr. Bien que les divers aciers de même dureté aient été usinés avec le même outil (CBN), les durées de vie de ce dernier changent de manière significative pour chacun de ces aciers.

Les résultats dans la Figure.2.14 montrent que les aciers peuvent être classés dans deux groupes distincts selon le taux d'usure VB [40].

2.6.4: Diagramme causes/effets

Un des moyens efficaces pour suivre la performance d'un procédé de fabrication est d'utiliser le diagramme causes/effets connu sous le nom du diagramme d'Ishikawa ou **diagramme en arêtes de poisson**.

Le Diagramme de causes et effets, diagramme d'Ishikawa ou diagramme en arêtes de poisson est le fruit des travaux de Kaoru Ishikawa pour la **gestion de la qualité**.

Cet outil graphique issu d'un **brainstorming**, recense les causes aboutissant à un effet. Son analyse permet une aide à la décision pour soit corriger un fait existant, soit la mise en place d'un projet.

Les causes sont réparties dans les cinq catégories appelées **5M** :

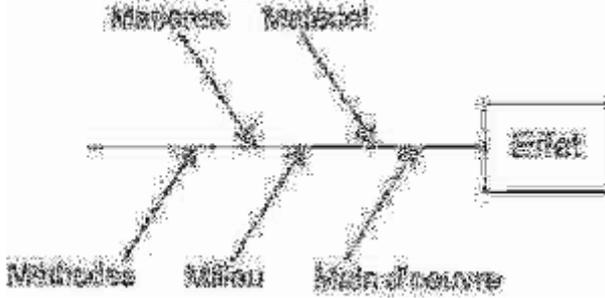


Figure 2.15: Diagramme d'ICHIKAWA (causes/effets)

Matière : Les **matières premières**, et plus généralement les inputs du processus.

Matériel : Concerne l'**équipement**, les machines, le **matériel informatique**, les **logiciels**, et les technologies.

Méthodes : Le mode opératoire et la recherche et développement.

Main-d'œuvre : tout ce qui concerne les **ressources humaines**.

Milieu : l'**environnement**, le positionnement, le **contexte**.

Chaque branche reçoit d'autres causes ou catégories hiérarchisées selon leur niveau d'importance ou de détail.

Il faut dans un premier temps définir clairement l'effet sur lequel on souhaite directement agir.

Il est très important de parvenir au consensus sur la définition et les caractéristiques de la question traitée.

Pour cela il faut :

- ▶ Lister à l'aide de la méthode de « brainstorming » par exemple, toutes les causes susceptibles de concerner le problème considéré.
- ▶ Il faut bien approfondir et explorer toutes les dimensions d'une situation donnée
- ▶ Classer par famille toutes les causes d'un problème déterminé (3 à 5 familles est un choix raisonnable)

Il est important de bien visualiser, de façon claire, cette relation ordonnée de causes à effet. Le diagramme d'Ishikawa se construit en cinq étapes :

- 1) Placer une flèche horizontalement, pointée vers le problème identifié ou le but recherché.
- 2) Regrouper les causes potentielles en familles, appelées communément les cinq M :

Matière, M1 : Recense les causes ayant pour origine les supports techniques et les produits utilisés.

- ▶ Main d'œuvre, M2 : Problème de compétence, d'organisation, de management.
- ▶ Matériel, M3 : Causes relatives aux Machines, aux équipements et moyens concernés.
- ▶ Méthode, M4 : Procédures ou modes opératoires utilisés.
- ▶ Milieu, M5 : Environnement physique : lumière, bruit, poussière, localisation, signalétique etc...

3) Tracer les flèches secondaires correspondant au nombre de familles de causes potentielles identifiées, et les raccorder à la flèche principale. Chaque flèche secondaire identifie une des familles de causes potentielles.

4) Inscrive sur des minis flèches, les causes rattachées à chacune des familles. Il faut veiller à ce que toutes les causes potentielles apparaissent

5) Rechercher parmi les causes potentielles exposées, les causes réelles du problème identifié. Ce sera notamment la cause la plus probable qu'il restera à vérifier dans la réalité et à corriger.

Rétrospective du chapitre 2

Dans ce chapitre nous avons organisé les rubriques de manière à ce que le texte soit d'une part un texte synthétique pour une meilleure compréhension des problèmes attrait à la qualité d'usinage et d'autre part pédagogique pour que tout étudiant qui veut s'intéresser à ce domaine y trouve des réponses qui peuvent le guider dans sa recherche.

Nous avons essayé de développer la notion des **5M** qui participent dans un procédé de fabrication. Dans ces **5M** nous avons montré la place du matériel, de la méthode, la main d'œuvre, la matière à usiner et le milieu. Nous l'avons clôturé par la notion des défaillances car d'elle dépendent les performances de notre système. Ces performances dépendent de la manière avec laquelle est suivi le système de production. Dans ce contexte nous avons proposé le diagramme de causes et effets.

Cependant, il nous a été difficile de coupler la théorie des diagrammes causes/effets avec la fiabilité à la conception. C'est pour cela qu'on a opté dans ce qui suit à présenter séparément les notions de fiabilité dans un chapitre à part. Néanmoins, avant d'attribuer le calcul de fiabilité, il fallait d'abord montrer l'importance du diagramme causes et effets, définir le suivi de l'usure de l'outil dans les conditions réelles et enfin coupler les résultats pratiques avec l'analyse fiabiliste de l'usure des outils qui restent l'élément essentiel de la garantie de la précision et de la qualité d'usinage.

CHAPITRE III

Dans ce chapitre, nous présentons quelques principes de bases de l'approche probabiliste qui vont nous permettre d'entreprendre l'analyse fiabiliste. L'axe est orienté d'une part vers l'étude des avancées scientifiques qui tiennent compte des méthodes de construction impliquant les écarts prévisibles et les incertitudes et d'autre part des outils nécessaires et disponibles pour une analyse fiabiliste. Cependant, il n'est pas question de rentrer dans le domaine aussi large que les méthodes probabilistes, seulement, on veut montrer les moyens disponibles qui rendent aujourd'hui possibles les études fiabilistes. Pour une meilleure compréhension, une liste de référence est donnée au fur et à mesure que l'on rentre dans le texte.

3.1 Généralités

Depuis maintenant un demi-siècle, des avancées scientifiques successives ont permis aux chercheurs et aux ingénieurs de construire des méthodes de dimensionnement tenant compte des écarts prévisibles et des incertitudes. C'est bien entendu les domaines ou celles-ci étaient les plus grandes qui ont mobilisé les efforts, pour le génie civil d'abord, en particulier la géotechnique, les actions naturelles, et ensuite pour les structures et les **constructions mécaniques**. C'est ainsi que l'application des probabilités et des statistiques pour des problèmes d'ingénierie s'imposent de plus en plus pour la conception et pour la maintenance.

Toute approche probabiliste implique la reconnaissance explicite d'un risque qui n'existe apparemment pas dans une approche déterministe, parce qu'il n'est pas identifié. Elle est donc naturellement l'objet d'une réaction de rejet et sa mise en application doit vaincre des obstacles inertiels, culturels et, également, liés à l'éducation.

La maîtrise du risque résulte tout d'abord de la connaissance experte et de la connaissance algorithmique. Comme l'illustre la Figure.3.1, les deux formes de la connaissance croissent exponentiellement avec le développement de l'humanité et, à chaque époque, l'homme s'appuie sur l'une et l'autre. Cependant, l'époque moderne construit également les théories et les outils de la fiabilité. En mettant à la contribution la théorie des probabilités, ils apportent, selon A.M. Hasofer, << une précision supplémentaire >> [41]

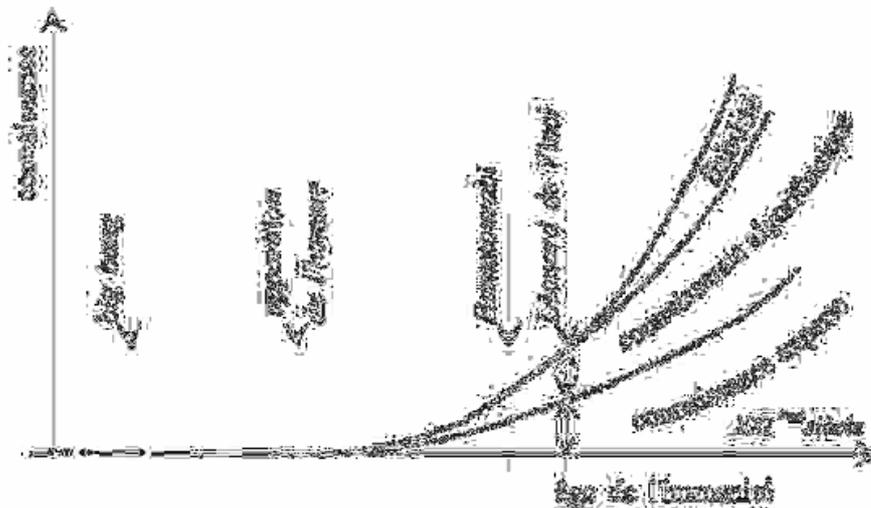


Figure.3.1: Evolution de la connaissance dans l'histoire.

3.2. La Fiabilité

3.2.1 Définition de la Fiabilité

Une définition technique de ce mot est donnée par le texte retenu par l'AFNOR [42]

«Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée... le terme est aussi utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou un pourcentage de succès».

Ainsi, la fiabilité peut être définie comme « la probabilité qu'un objet puisse exécuter sa fonction propre pendant un temps spécifié dans des conditions de fonctionnement définies ».

L'étude de la fiabilité est de plus en plus importante dans le domaine des microtechnologies afin d'assurer une évaluation précise d'un microsystème. L'enjeu de la fiabilité des microsystèmes est de comprendre les mécanismes d'endommagement afin d'optimiser la conception, la fabrication et de définir des critères de fiabilité. Le but est de garantir un nombre maximal de cycles de fonctionnement pour chaque système. [43]

3.2.2 Méthodes de fiabilité en mécanique

Les méthodes sont développées essentiellement en relation avec la modélisation des matériaux et des structures. Elles ont bénéficié de la mécanique de bien des acquis de disciplines scientifiques, la théorie des probabilités en premier lieu, et de l'expérience d'autres champs technologiques. Elles s'en différencient par une relation étroite avec les modèles de comportement mécanique. Selon l'expression de A.M. Hasofer (auteur avec N.C. Lind de la première définition invariante d'un indice de fiabilité [44], [45], elles « apportent une précision supplémentaire » au concepteur.

Le concepteur projette des ouvrages, des structures, des machines dont les conditions de réalisation et de fonctionnement, tout au long de la durée de vie espérée, ne sont pas parfaitement connues : la conception est placée dans un univers imprécis et incertain qui peut, dans certains cas au moins, être modélisée par un aléa probabilisable. Ce n'est pas la seule modélisation possible et certains suggèrent de faire appel aux ensembles flous ; elle n'est pas toujours possible : l'erreur grossière, voire la bêtise ne sont pas probabilisables !

En acceptant une approche par les probabilités, les méthodes de fiabilité en mécanique permettent de calculer des estimateurs de la fiabilité : probabilité notionnelle ou conditionnelle, indice de fiabilité, sensibilité de la défaillance à la description stochastique des données.

3.2.3. Principales méthodes d'évaluation de la fiabilité mécanique

Deux types de méthodes d'évaluation de la fiabilité sont présentés, la démarche traditionnelle et la méthode probabiliste, les méthodes d'essais accélérés (les essais accélérés sont les plus courts avec un avantage certain économiquement).

- ❖ Les méthodes traditionnelles de conception des systèmes mécaniques sont basées sur le concept de facteur de sécurité. Aujourd'hui, les systèmes sont de plus en plus performants et les facteurs de sécurité ne suffisent plus pour prendre en compte les fluctuations des charges, des propriétés des matériaux, des caractéristiques dimensionnelles, des conditions de fonctionnement, des approximations de la modélisation et du facteur humain. Les concepteurs réalisent que seule l'analyse fiabiliste permet une modélisation réaliste de ces incertitudes. De plus, elle offre un moyen de comparaison sur la base: économie/sûreté. [46], [47]

- ❖ Les Essais Accélérés sont une des approches les plus communes pour obtenir la loi de fiabilité ou le taux de défaillance de systèmes ou de composants dans des délais plus courts. Brièvement, ces essais consistent à réduire les durées de vie des produits par l'accélération des dégradations provoquant la défaillance. Pour ce faire, les niveaux des stress subis par le produit sont sévères afin d'obtenir des données plus rapidement.
- ❖ En fiabilité des structures, les méthodes approchées ou bien d'approximation de premier et de second ordre plus connues sous l'abréviation anglaise FORM/SORM (First and Second Order Reliability Methods) sont souvent efficaces pour évaluer la probabilité de défaillance, si celle-ci est présumée faible.

Une utilisation critique de ces méthodes permet de résoudre efficacement la plupart des problèmes. De plus en plus souvent, les études de fiabilité mécanique requièrent des modèles qui nécessitent des calculs aux éléments finis. Par conséquent, coupler efficacement les codes fiabilistes et les codes aux éléments finis devient une nécessité. [48]

3.2.4. Intérêt des méthodes fiabilistes : [49]

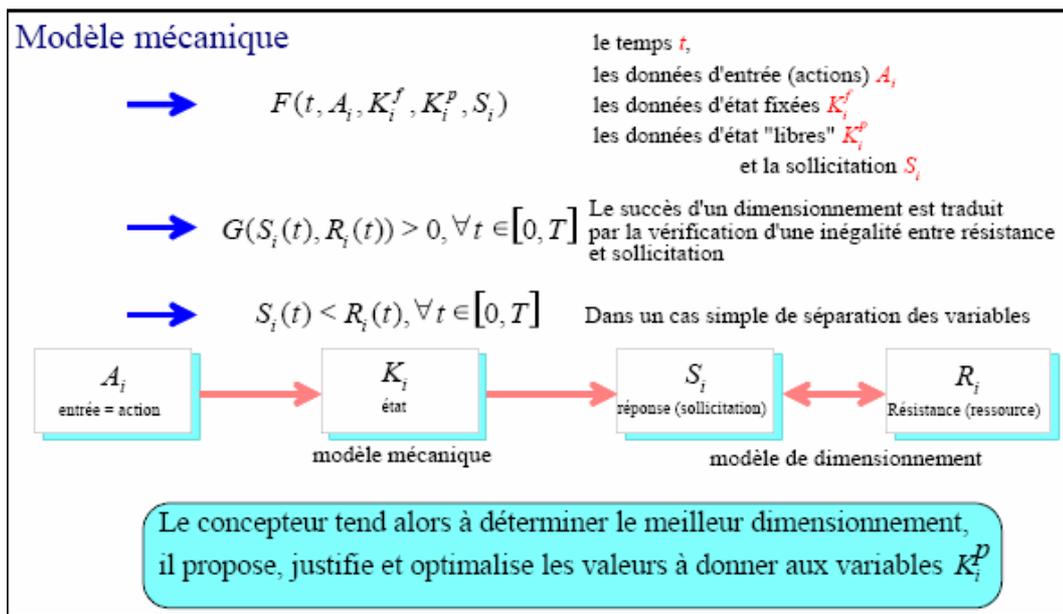
Elles proposent un traitement réaliste des incertitudes et une méthode d'évaluation de facteurs de sécurité trop souvent arbitraires ; elles apportent une aide à la décision conduisant à une conception plus économique et mieux équilibrée ; elles analysent les modes de défaillance et mesurent la fiabilité apportée par l'application des règlements ; elles permettent une réparation optimale des matériaux entre les différents composants d'une structure ; elles peuvent incorporer l'expérience acquise dans la conception par l'actualisation en fonction du retour d'expérience ; elles aident aux décisions de maintenance et de réparation dans un double objectif de sécurité et d'économie ; elles élargissent la maîtrise de la connaissance des incertitudes sur la réponse des structures.

3.3. Procédure d'Analyse de la Fiabilité

Dans cette section nous allons décrire les principales étapes qui permettent de réaliser une analyse de la fiabilité d'un matériau; d'une structure ou d'un système donné. Nous recommandons vivement la lecture du document présenté par M. Lemaire dans la référence [50]

3.3.1 Modèle mécanique

A partir d'une présentation générale, nous montrons quelles sont les hypothèses qui permettent de se ramener à un simple problème résistance-sollicitation. Un matériau ou une structure mécanique sont considérés comme des systèmes comportant une entrée, un état et une sortie [51], Figure.3. 2. Elle définit en premier lieu les actions à l'entrée qui peuvent être traduites par les toutes les sollicitations que doit subir la structure telles que les charges appliquées, les contraintes résiduelles, la corrosion, l'usure, la dégradation naturelle, la fatigue, le fluage, les surcharges, en deuxième lieu, l'état qui est représenté par un modèle mécanique dans lequel sont corrélés toutes les sollicitations pour présenter une loi de comportement du système particulièrement dans le temps afin de vérifier l'inégalité entre résistance et sollicitation et enfin, en troisième lieu, la sortie doit nous renseigner sur la probabilité de défaillance de notre système pour pouvoir prendre des décisions de réparation ou de réforme afin d'éviter toute catastrophe.



Tout l'intérêt d'un modèle mécanique est de présenter une loi de comportement du système qui reflète sa réalité physique et mécanique. Ce modèle ainsi développé doit être vérifié pour assurer la résistance du système c'est-à-dire sa fiabilité. Cette vérification est faite en tenant compte des incertitudes dans les variables de calcul qui sont exprimées par des distributions statistiques. Ce qui est recherché finalement est l'effet du temps. Cet effet traduit les niveaux d'approximation mécanique. La Figure 3.3 illustre ces niveaux avec l'effet du temps [52].

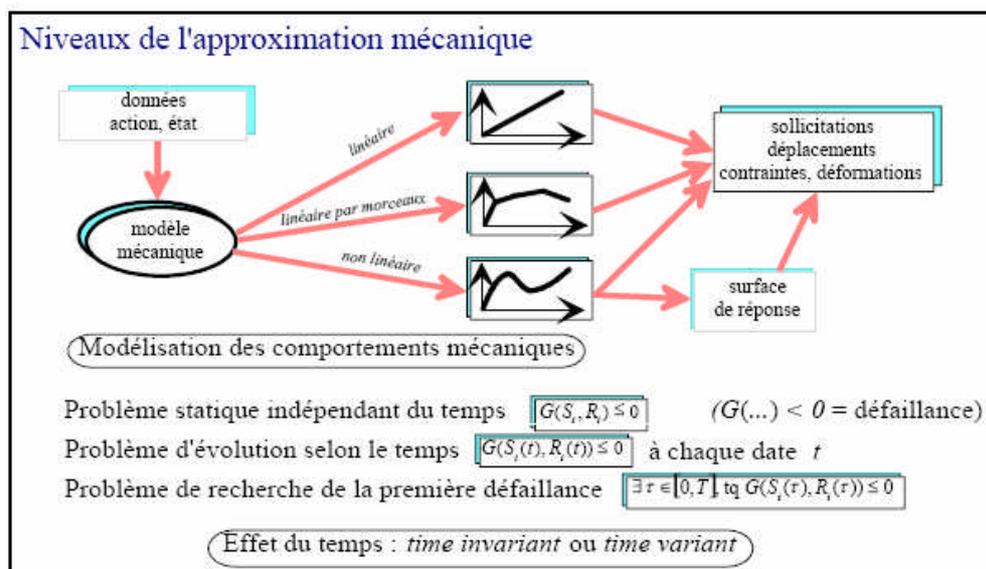


Figure 3.3: niveaux de l'approximation mécanique [53]

Il est important de disposer de modèles précis qui nécessitent de coûteuses ressources informatiques. Toutefois, il est possible de réduire les coûts informatiques par diverses solutions. [54]

3.3.2 Probabilité de défaillance

La probabilité de défaillance est définie par un vecteur de n variables aléatoires (X_1, \dots, X_n) , par le modèle mécanique avec une fonction de densité de probabilité $f_{X_i}(x_i)$ et $G(x_i)$ qui définit la fonction d'état limite résultant des calculs mécaniques. La Figure 3.4 explique la signification d'une probabilité de défaillance. En effet, dans un système, il existe n modes de défaillances. Pour chaque mode de défaillance, tous les paramètres sont pris avec leurs valeurs aléatoires selon une distribution statistique et sont placés dans un vecteur X_1 . Ce mode de défaillance est exprimé par une fonction d'état limite ou bien une fonction de performance exprimée par $G(X)$. L'inégalité exprime soit, le domaine de sûreté, l'état limite ou le domaine de défaillance.

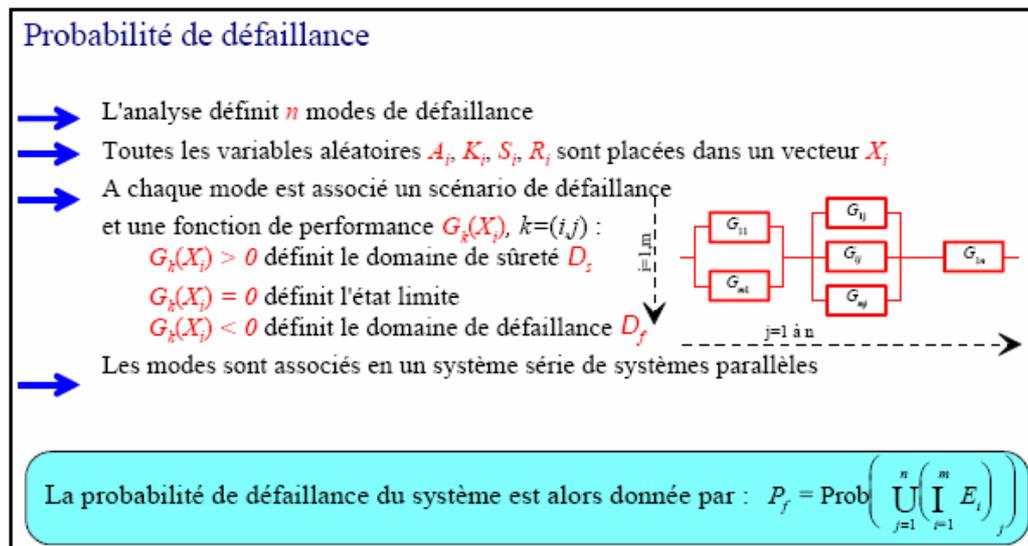


Figure 3.4: Probabilité de défaillance - représentation système [55]

3.3.3 Calcul de la probabilité de défaillance

La Figure 3.5 présente la méthode de calcul de la probabilité de défaillance d'un composant.

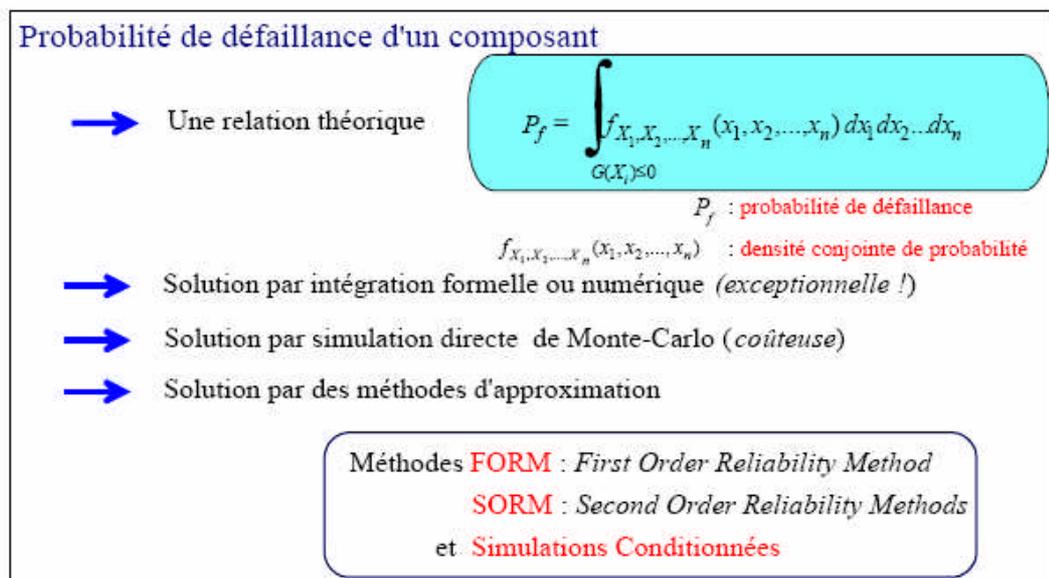


Figure. 3. 5: Probabilité de défaillance d'un système

Dans le cas d'un vecteur aléatoire $\{X\}$, $f_{\{X\}}(\{x\})$ est la densité de probabilité du vecteur $\{X\}$ et $G(\{X\})$ est la fonction d'état limite. La probabilité de défaillance est alors :

$$P_f = \int_{G(\{X\}) \leq 0} f_{\{X\}}(\{x\}) dx_1 \dots dx_n$$

L'expression obtenue est la forme générale de la probabilité de défaillance, l'intégrale est étendue à tout le domaine de défaillance (**Figure 3**) cette formulation reste simple,

La solution est théorique et son utilisation suppose que la densité conjointe de probabilité du vecteur $\{X\}$ est connue et que l'intégration est possible, deux exigences qui sont rarement satisfaites.

3.3.4. Exemple élémentaire Résistance R - Sollicitation S

Afin de mieux comprendre un calcul fiabiliste, nous présentons un cas élémentaire de 2 variables aléatoires: Résistance R – Sollicitations S, (Figure. 3.6).

Le scénario de fonctionnement est la disponibilité d'une résistance supérieure à la sollicitation, c'est à dire :

$$G(r, s) = r - s > 0$$

et le scénario de non fonctionnement, ou de défaillance, est alors:

$$G(r, s) = r - s < 0$$

La mesure de la défaillance est alors la probabilité associée à l'événement $\{R - S \leq 0\}$, soit :

$$\text{Probabilité de défaillance} = P_f = \text{Prob} (\{R - S \leq 0\})$$

La notation avec l'indice f vient du mot anglais failure.

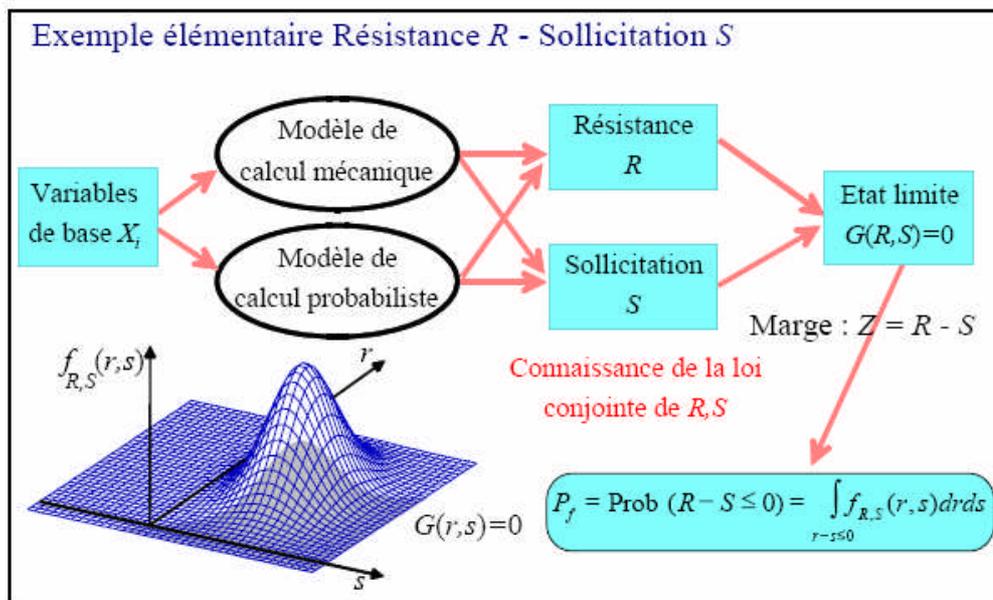


Figure.3. 6: Exemple élémentaire résistance - sollicitation

La fiabilité est, pour sa part, définie comme le complément de la probabilité de défaillance

$$\mathbf{Fiabilité = 1 - Pf}$$

R et S sont deux variables aléatoires caractérisées par une densité conjointe de probabilité notée $f_{R,S}(r, s)$.

La probabilité de défaillance P_f associée à la marge Z, est le poids probabiliste de la partie de l'espace constituée par le domaine $D_f : z = r - s < 0$:

$$P_f = \text{Prob}(R - S \leq 0) = \int_{r-s \leq 0} f_{R,S}(r, s) \, dr \, ds$$

3.3.4.1 Méthodes par indice de fiabilité

Comme il a été expliqué ci-dessus, il existe plusieurs méthodes pour calculer l'indice de fiabilité. Nous présentons ici la méthode d'approximation FORM / SORM.

Nous nous plaçons dans le cas où la fiabilité d'un composant est définie par la connaissance d'une fonction d'état limite $G(X_i) = 0$ des variables de conception X_i retenues comme variables aléatoires.

La problématique réside dans la résolution de l'équation de la probabilité de défaillance dans l'espace physique. Elle n'a pas de solution. C'est pour cela qu'on est amené à transformer l'espace physique en espace orthonormé par des solutions mathématiques d'approximations de premier ordre ou de second ordre d'où l'appellation FORM/SORM first order reliability method & second order reliability method (reliabilty = fiabilité) Figure 3.7.

Par convention donc, nous choisissons:

Le domaine de sûreté : $G(X_i) > 0$ et le domaine de défaillance : $G(X_i) < 0$

Hasofer et Lind ont montré que la mesure de l'indice de fiabilité devait être prise dans un espace de variables Gaussiennes normées U. Pour cela nous devons définir une transformation T, telle que :

$$U_i = T(X_j) \quad \text{et} \quad H(U_i) = G(T^{-1}(U_j))$$

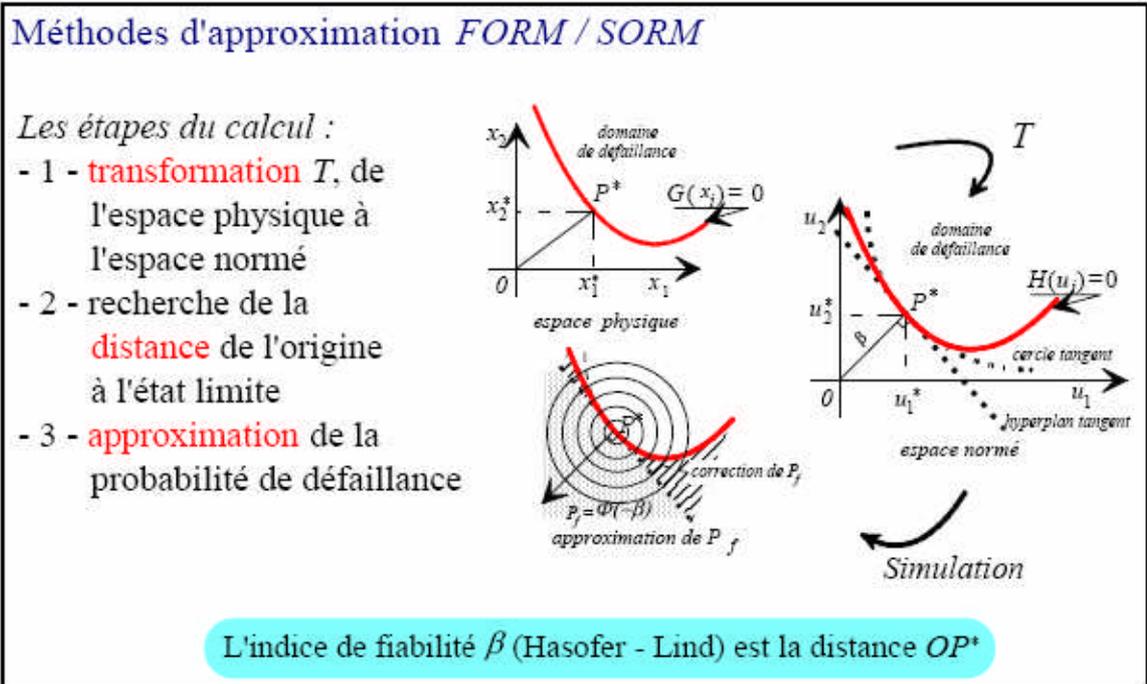


Figure 3. 7: méthodes d'approximation FORM/SORM, indice d'Hasofer – Lind

La Figure 3.8 donne les principaux indices de fiabilités les plus utilisés

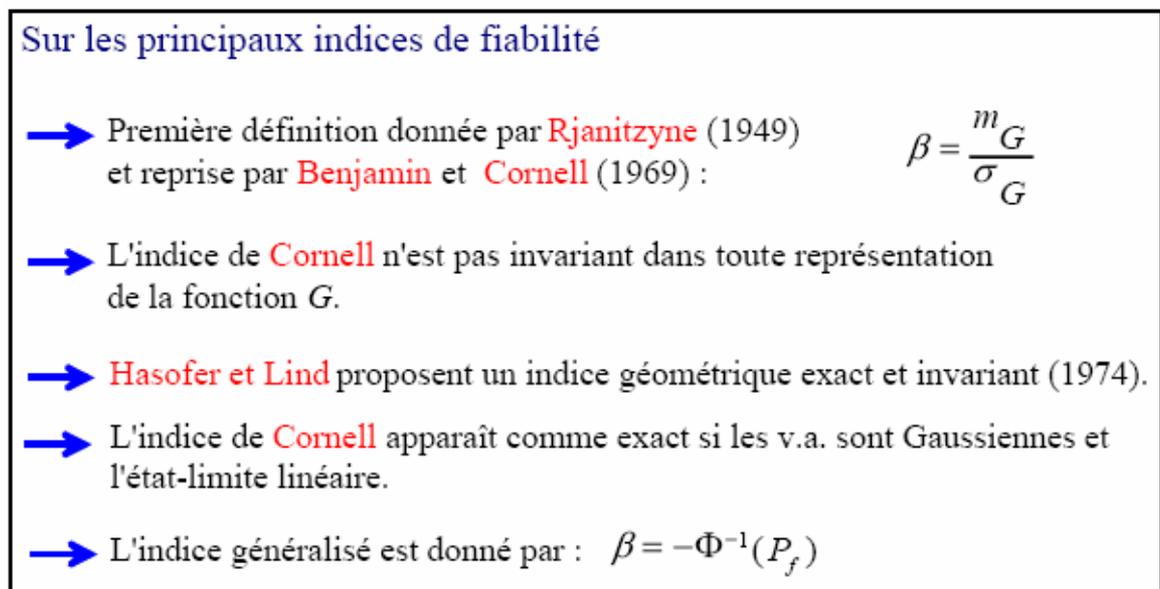


Figure.3. 8: sur les principaux indices de fiabilité

Pour les utilisateurs de la notion de probabilité de défaillance P_f , l'indice de fiabilité β est inversement proportionnel à P_f .

La définition de l'indice de fiabilité β , exact et invariant, est interprétée géométriquement comme le minimum de la distance de l'origine de l'espace des variables normées à la fonction d'état limite $H(U_j)$. Sa recherche peut donc être posée comme celle d'un minimum.

La Figure 3.9 présente la signification numérique de l'indice de fiabilité β .

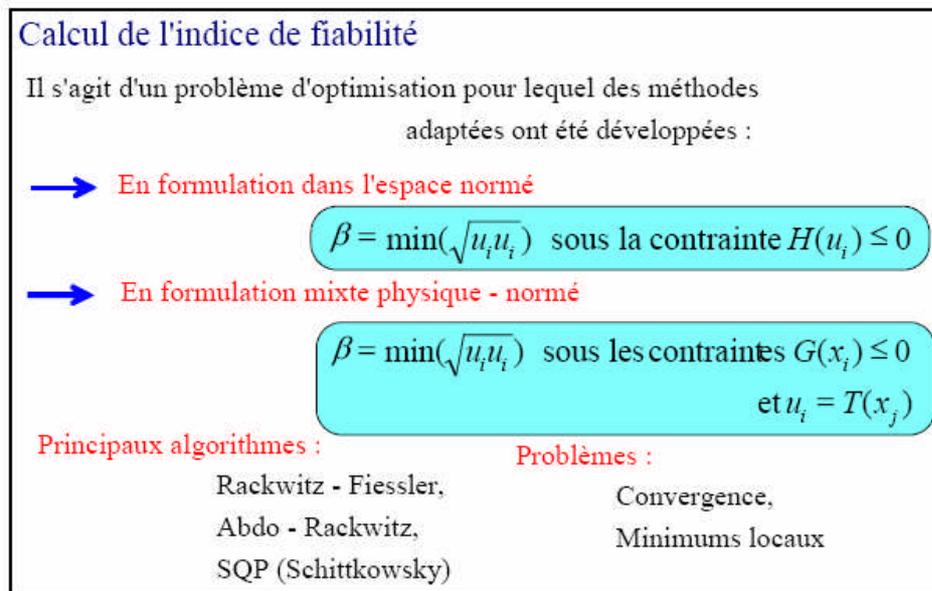


Figure.3. 9: Calcul de l'indice de fiabilité

3.3.5. Produits de l'analyse fiabiliste

Pour mener une analyse fiabiliste, il faut se munir d'outils performants et de machines performantes. Aujourd'hui avec l'avènement de la micro informatique et des codes de calculs tels que PHIMECA Soft; FERUM sous Matlab, LiFeRel et autres, ces calculs sont possibles. Il est seulement nécessaire d'organiser son modèle mécanique, de déterminer les modèles probabilistes des variables aléatoires et de définir des scénarios de défaillances. La Figure 3.10 résume les produits de l'analyse fiabiliste.

Il est très important de noter que la décision revient au groupe acteur dans le système analysé. La prise de décision est la responsabilité des décideurs et non des codes de calculs. Ces derniers fournissent des outils pour permettre au décideur de prendre la bonne décision.

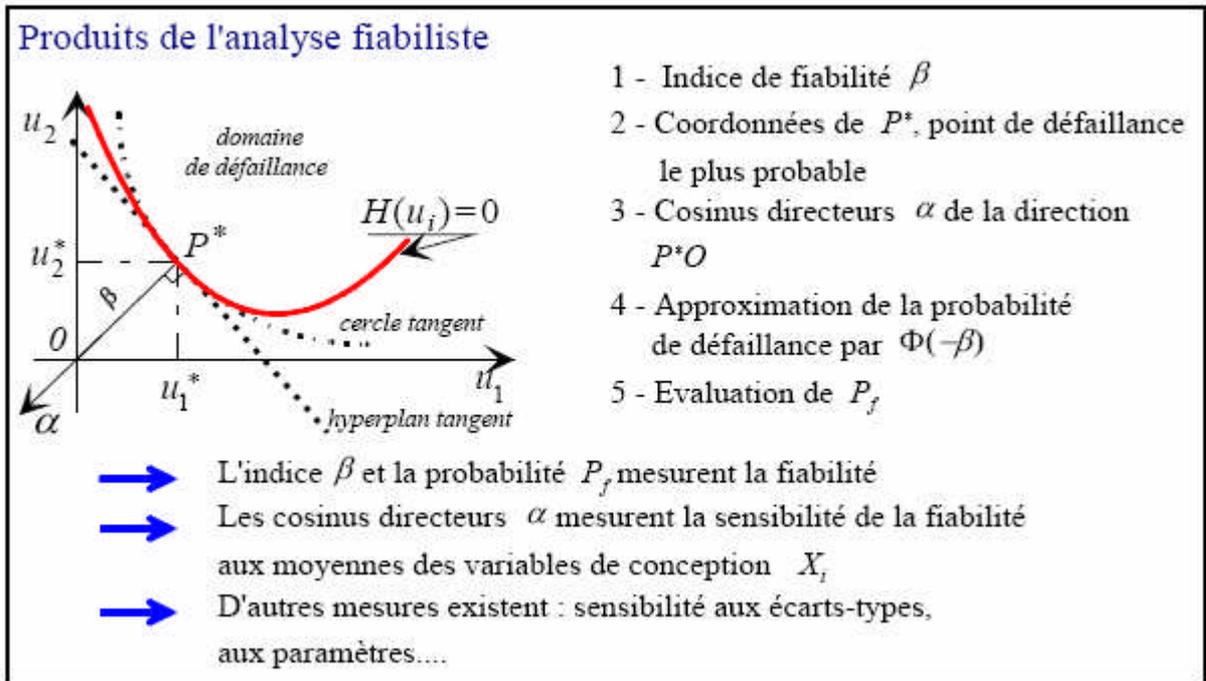


Figure.3. 10: Produits de l'analyse fiabiliste

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons voulu présenter quelques principes de base de l'analyse fiabiliste qui nous permettent de comprendre la manière d'entamer l'étude de la fiabilité de l'usure des outils. L'approche probabiliste est un domaine très vaste et destiné à des spécialistes en la matière. Dans ce travail nous nous considérons comme utilisateurs de cette approche et donc nous sommes conditionnés par les procédures de calculs proposés par les codes de calcul. Ces codes mis à la disposition des ingénieurs et chercheurs sont reconnus comme les seuls moyens pour répondre aux besoins des analyses fiabilistes. La présente étude est basée donc sur le code de calcul PHIMECA Soft [56].

CHAPITRE IV

Etude expérimentale

4.1. Analyse du procédé de production de l'axe de la roue

Même si le procédé est bien réglé initialement, sa façon réelle de travailler est définie par la variation des 5M et de leurs interactions.

Dans cette analyse nous allons définir les variants et les invariants des 5M au niveau du poste de travail pour l'obtention de l'axe de la roue.

4.1. 1.Milieu

Le centre de tournage à ravitailleur automatique est implanté dans une section de l'atelier à température stable, air conditionné, c'est-à-dire la température ambiante est de $16^{\circ} \pm 2^{\circ}$ et ne varie pas selon les saisons.

Il est supporté par des fondations spéciales absorbant les vibrations.

L'éclairage naturel est assuré par des vitres transparentes le long de la façade et recevant le maximum de lumière et souvent rehaussées par des néons fluorescents.

L'ambiance de travail est assurée par les opérateurs et le chef d'équipe qui ne ménagent aucun effort pour rendre leur travail agréable. Une feuille de route présente les tâches à réaliser.

Donc au niveau du Milieu, les conditions restent inchangées, si ce n'est l'état des vitres qui nécessitent un lavage ou bien une panne électrique qui pourrait influencer les conditions de travail.

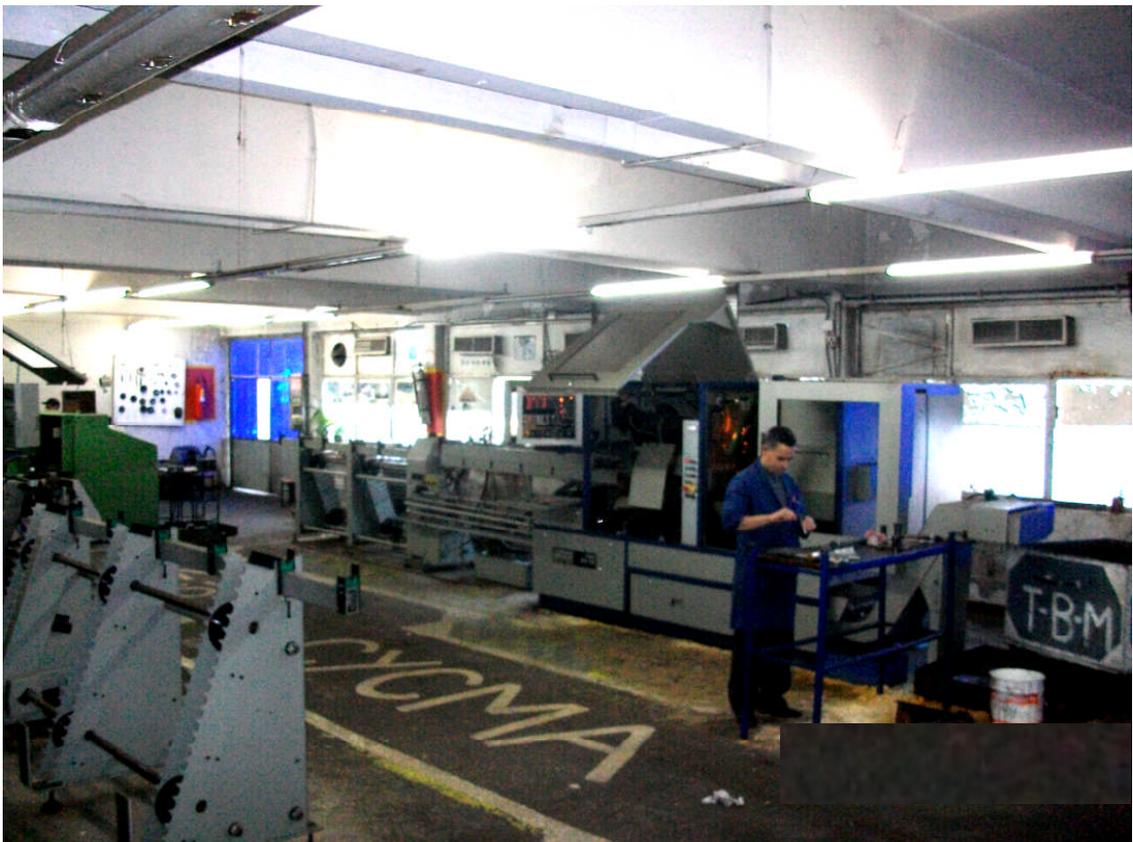


Figure. 4.1: Section de tournage numérique

4.1. 2.Materiel

Dans le poste de travail, un centre d'usinage avec un ravitailleur automatique, **le matériel** peut être divisé en deux parties.

- a) **La première partie** comporte les invariants qui se composent de la machine elle-même, du porte-pièce, de la tourelle porte-outil et du ravitailleur, constituant un système rigide, fiable, maintenable et disponible et dont le fonctionnement est assuré grâce à des inspections périodiques de maintenance, pendant les quelles le système est remis à l'état initial .Ces inspections consistent à vérifier La fiabilité dans la commande numérique, le comportement dynamique, le comportement thermique, la commande électrique et l'état général de la machine.

Il faut retenir que sur la machine Tornos Bechler,les mouvements de rotation et d'avance longitudinale sont donnés à la pièce et le mouvement d'avance transversale est donné à l'outil.

a.1) Machine utilisée

La machine utilisée est un tour à commande numérique équipé d'un dispositif de variation de la vitesse de la broche afin de maintenir la vitesse de coupe constante d'une façon rigoureuse.



Figure.4.2: Tour numérique (TORNOS BECHLER)

❖ Caractéristiques principales de la machine utilisée:

Combiné à trois broches, avec quatre positions verrouillées et une non verrouillée.

Position I : broche N° 1 (fixe, destinée au centrage) T11
Position II : broche N° 2 (tournante, destinée au perçage) T12
Position III : broche N° 3 (tournante, destinée au filetage ou taraudage) T13

Position IV : dispositif de prise de pièces (support destiné à soutenir des longues pièces lors de l'usinage et du tronçonnage) T14

Position V : position intermédiaire entre les positions III et IV, non verrouillée, elle permet d'évacuer de la broche poupée la chute de barre. (T15)

Moteur : Siemens 1 HU 3104-OAH 01 à courant continu avec tachymètre 0-2000tr/min

Broches

Vitesse de rotation : 0-2000 tr/min avec poulie menante Ø 80 mm
: 0-8000 tr/min avec poulie menante Ø 160 mm
Avances des broches : 100 mm pour pos. I, II et III
(Course utile) 80 mm pour pos. IV

Perçage maxi : 16 mm

Avance de perçage : Acier doux 0.15 mm
ETG 100 0.12 mm
: Acier inox 18/8 0.10 mm

Taraudage maxi : Acier doux M16 x 2
: ETG 100 M12 x 1.75

Filetage maxi (filière à rouler les filets)
Acier doux M14 x 2
ETG 100 M14 x 2
Acier inox M12 x 1.75

Pinces

Broches tournantes : type ESX-25
Broche fixe : type ESX-32

Commande de l'avance : par vérin hydraulique (Axe W)

Indexage : par vérin hydraulique-crémaillère (Axe B2)

Verrouillage : par vérin hydraulique

Prise de pièce : sur deux vés réglables, déplacement par axe W

Position de l'appareil réglable manuellement sur 150mm.

a.2) Ravitailleur



Figure.4.3: Ravitailleur

❖ **Caractéristiques principales du ravitailleur**

L'ensemble des dispositifs est conçu pour le ravitailleur de barres rondes.

Le diamètre de la matière à usiner peut varier entre 10 et 32mm, exceptionnellement 6mm en utilisant des tubes spéciaux.

Vitesse d'avance de la barre : 30 m/min

Longueur maxi de la barre : 4000mm

Huile : ISO VG 68. Par exemple MOBIL DTE26

Ou Shell Tellus Oil 68

Débit d'huile : 10 l/min

Pression dans le tube : 1,5 bars

Diamètre des diaphragmes : 1,2 mm

❖ **Graissage**

Pour le réducteur, utiliser une graisse lubrifiante de bonne qualité.

Par exemple :

BP – ENERGREASE HD-EP00

Mobil – MOBIL PLEX 44

Shell – RETINAX G

Contenance : 0.3 litres

Remplacer la graisse toutes les 10 000 heures d'utilisation ou au plus tard tous les 2 ans.

Le réducteur est graissé à vie, par conséquent il n'exige aucun entretien.

❖ Utilisation Cinématique

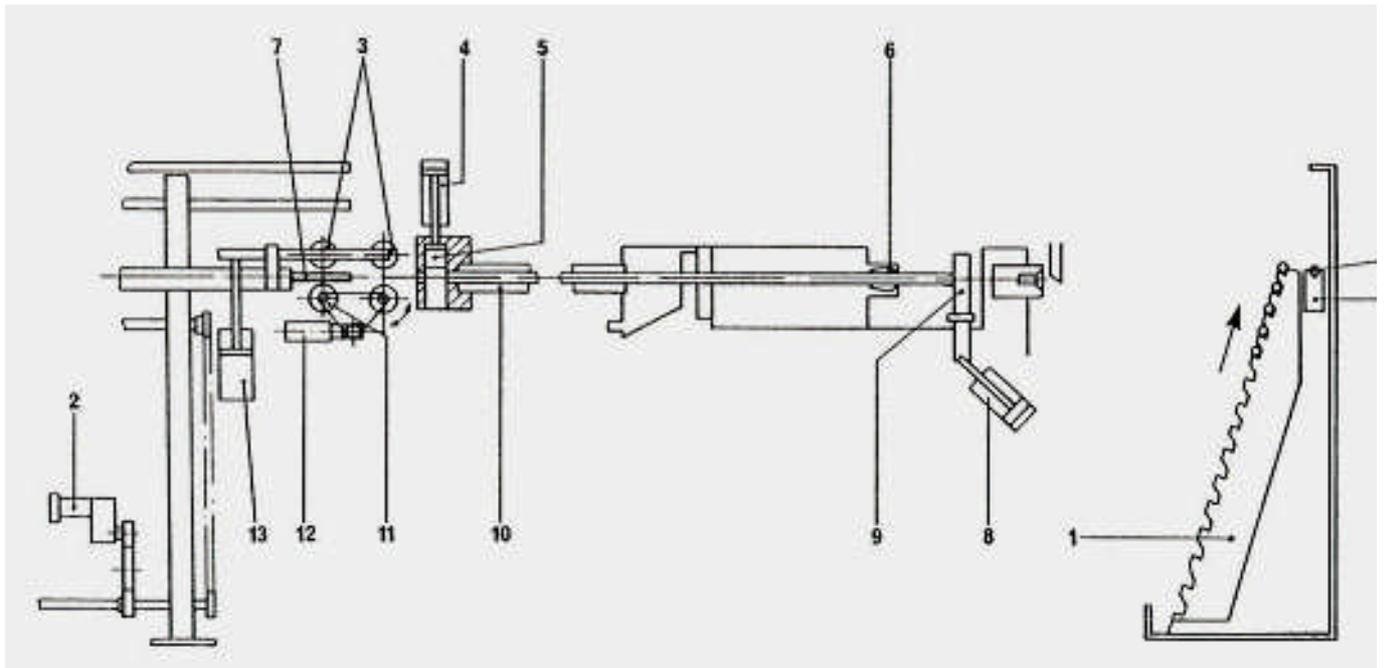


Figure 4.4: Schéma cinématique

La broche de la machine est arrêtée, la pince **6** de la poupée ouverte.

Les supports de chargements mobiles **1**, commandés par le système d'entraînement du motoréducteur **2**, placent la barre **7** dans les vé **14** du ravitailleur.

Le vérin **4**, en faisant reculer le piston **5**, effectue l'ouverture du tube **10**.

Le vérin **8** actionne la butée **9** qui va se placer dans l'axe de la poupée.

Par l'intermédiaire du vérin **13** les galets **3** sont appuyés sur la barre **7**, cette dernière étant logée dans la gorge de la molette **11**.

L'enclenchement du motoréducteur **12** entraîne la rotation des molettes et la barre est introduite dans le tube **10**, exception faite de la dernière partie qui se trouve encore à l'extérieur.

Etant donné que le signal de fin de chargement est donné par un détecteur placé sur la butée **9** et que la barre n'a pas encore atteint ce point, les galets **3** s'écartent, une nouvelle barre est placée dans les vé, l'opération décrite ci-dessus est répétée, la nouvelle barre va pousser la précédente jusqu'à la butée **9**.

A partir de cet instant, la pince **6** de la poupée va se fermer, la rotation du moteur **12** s'inverse, la barre de poussée, partiellement engagée dans le tube, revient à son point de départ, les galets **3** s'écartent de la barre.

La butée **9** s'escamote, le vérin **4** exécute l'obturation du tube, et après enclenchement du système hydraulique le cycle d'usinage peut débiter.

a.3) Les portes outils utilisés pour l'usinage de l'axe de la roue:

❖ **Chariotage**

• **Pour l'outil droit**

Porte-outil T MAX U
50525 SVJBR

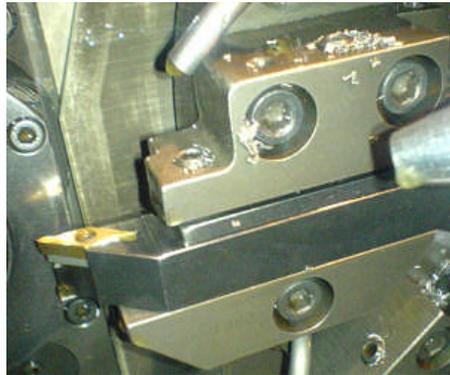


Figure 4.5: porte outil T MAX U (droit)

• **Pour l'outil gauche**

Porte outil T-MAX U
50535 SVJBL



Figure 4.6: porte outil T MAX U (gauche)

❖ **Tronçonnage**

Outil de tronçonnage en carbure métallique revêtu de titane, L123G2-0501-CF



Figure 4.7 Outil de tronçonnage

L 123G2-0501-CF



Figure 4.8 Porte outil de tronçonnage

- b) **La deuxième partie** présente les variants qui se composent d'une part de l'outil de coupe qui subit un réglage en fonction de sa géométrie et un changement après usure des arrêtes tranchantes et d'autre part des moyens de contrôle qui doivent être étalonnés pour assurer la précision de mesure et surtout une bonne maîtrise de la mesure. Il est à noter que des gabarits de control des cotes d'arbre (cotes de roulement) sont les plus souvent utilisés.

b.1) Nuances et poids des outils de chariotage

Trois nuances d'outil sont utilisées : Les unes sont en carbure revetues et les autres non revetues .Les désignations sont respectivement les suivantes: **VBMT16 04 04-53 415**, **VBMT16 04 04-53 425**, **VBMT16 04 04-53 S1P**.La nuance **GC 415** revetue d'une couche de TiN + AL2O3 + TiCN,soit un revêtement d'une epaisseur totale de 10 micron.

La nuance **P25(GC 425)** possède un double revêtement TiC + TiN d'une epaisseur de 8 micron.La nuance **S1P** est non revetue.

Les critères essentiels de la durée de vie des outils est habituellement la bande d'usure frontale VB figure 4.10 que l'on fixe généralement à une valeur **VB=0.3mm**.



Figure.4.9: les trois nuances de plaquettes sandvik

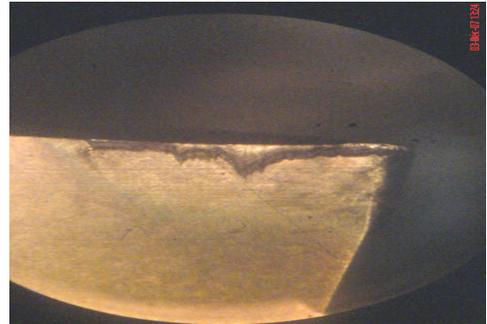


Figure.4.10: photo d'usure en dépouille



Figure 4.11: Axe de la roue avec les deux outils de chariotage(gauche et droit)

1. P=8.1739g (en P15, K15) ;(jaune)

Présente un triple revêtement extrêmement résistant à l'usure recouvrant un substrat spécialement mis au point pour limiter au maximum la déformation plastique à des températures élevées. Grâce à cette combinaison, le GC 415 convient pour les opérations allant de l'ébauche moyenne à la finition à des vitesses de coupe élevées avec une avance modérée dans le cas de matériaux à copeaux longs tels que l'acier et l'acier coulé. Figure 4.12

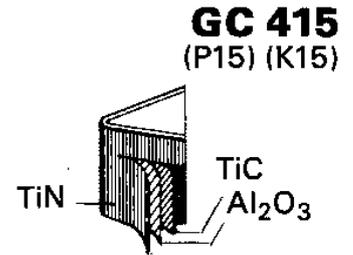


Figure 4.12: Nuance du GC415

2. P=6.1098g (en P10) ;(grise)

Nuances non revêtue présentant une résistance à l'usure très élevée et une bonne résistance à la déformation plastique. Conçue pour les opérations allant de l'ébauche légère à la finition de l'acier coulé à des vitesses de coupe élevées mais avec des avances modérées.

3. P=8.0354g (en P25, K20), (noire)

Une nuance polyvalente à double revêtement conçue pour les opérations allant de l'ébauche à la finition de matériaux à copeaux longs. Bonne résistance à la déformation plastique combinée avec une résistance et une ténacité parfaites de l'arête de coupe .Le **GC425** convient pour les opérations de copiage ou la résistance aux variations de températures dues aux avances variables est essentielle. Convient pour l'acier, l'acier coulé et l'acier inoxydable. Figure 4.13

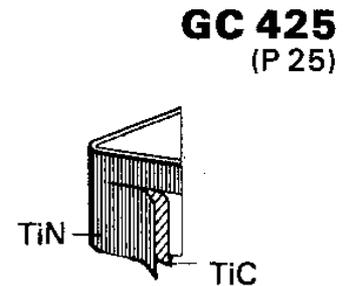


Figure 4.13: Nuance du GC425

b.2 Géométrie de l'outil de chariotage

V	B	M	T	16	04	04	-53
$\alpha=35^\circ$	$\beta=5^\circ$	$\pm 0,05$ à $\pm 0,13$	type	longueur L=16	épaisseur e=4	rayon r=0.4	code fabriquant

Tableau 4.1: la géométrie de l'outil

b.3 Usure des outils de coupe

La mesure de l'usure en dépouille VB des plaquettes utilisées pour l'usinage de l'axe de la roue est réalisée sur un microscope du type TOOLMAKERS MICROSCOPE SERIES 176(MITUTOYO).Figure 4.14



Figure 4.14: Toolmakers microscope séries 176 (MITUTOYO)

Après l'usinage d'un certain nombre de pièce, l'opérateur décide de changer la plaquette usée suite à un control visuel(état de surface de la pièce usinée) ; c'est à ce moment là que l'usure VB est mesurée.

La plaquette de coupe est placée sous l'objectif du microscope sur une table micrométrique à mouvements croisés, et la lecture se fait sur un vernier de micromètre. La ligne de référence de la mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis on déplace une deuxième ligne à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure VB.

L'usure apparaît sur la face de dépouille suivant une bande striée brillante parallèle à l'arrête. Elle est due au frottement de la pièce sur la face de dépouille de l'outil.

Le critère d'usure est la largeur de l'usure, nommée VB.

VB max = 0,3 mm

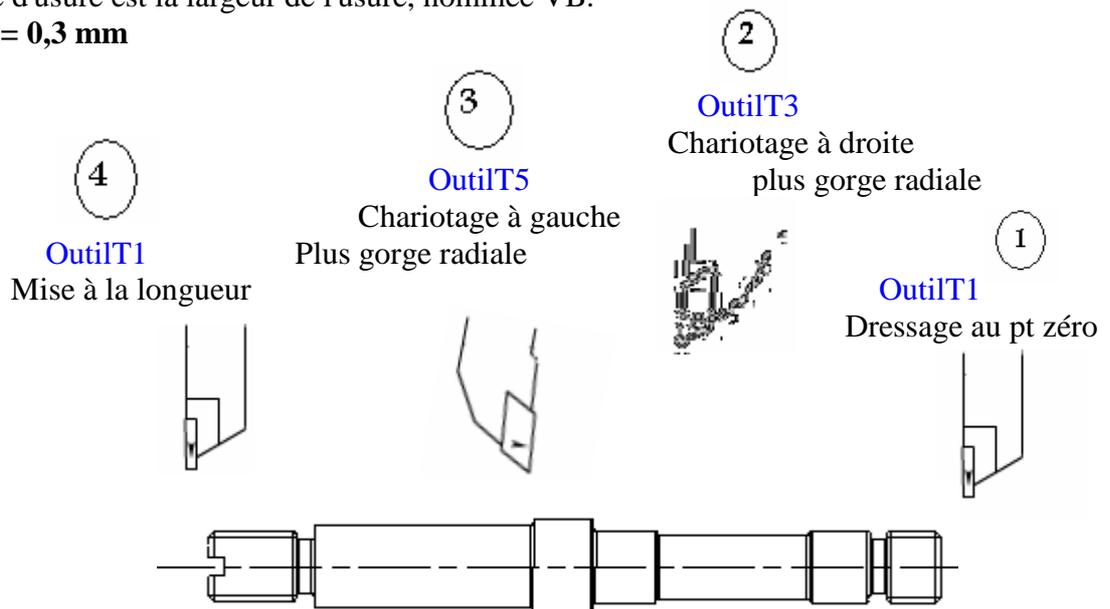
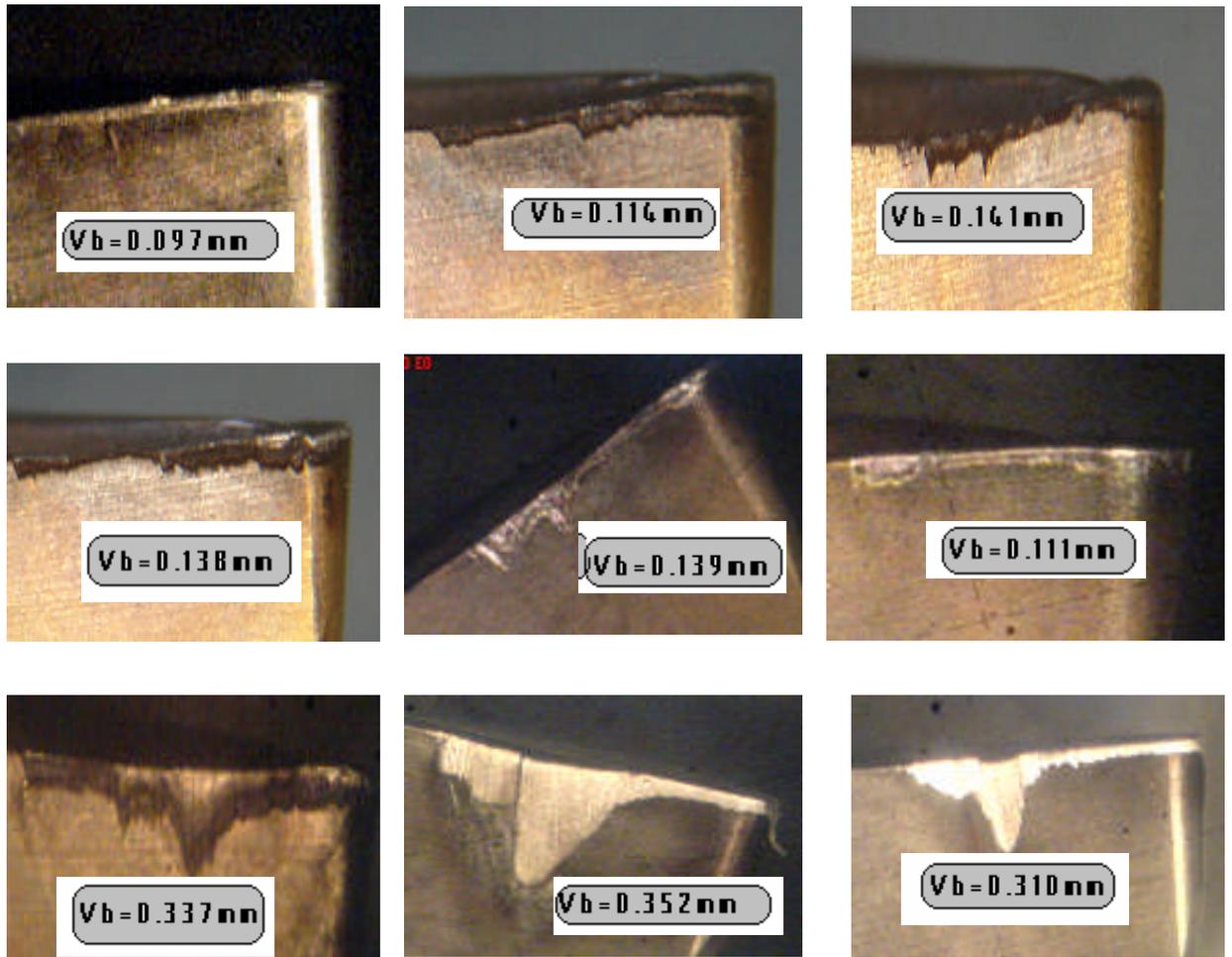


Figure.4.15: Schématisation de l'axe de roue avec les trois outils de coupe.

GC415 (Droit) ; 9SMn28K Ø16mm ; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$



GC415 (Gauche) ; 9SMn28K Ø16mm ; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$

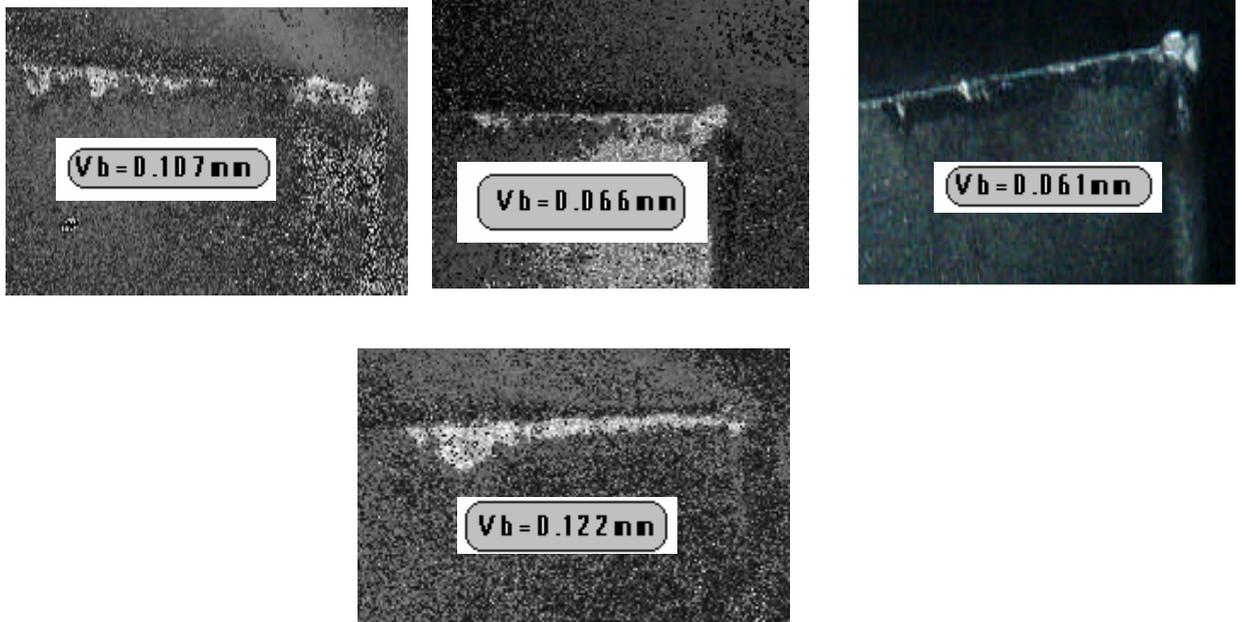


S1P (Droit); 9SMn28K Ø16mm; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$

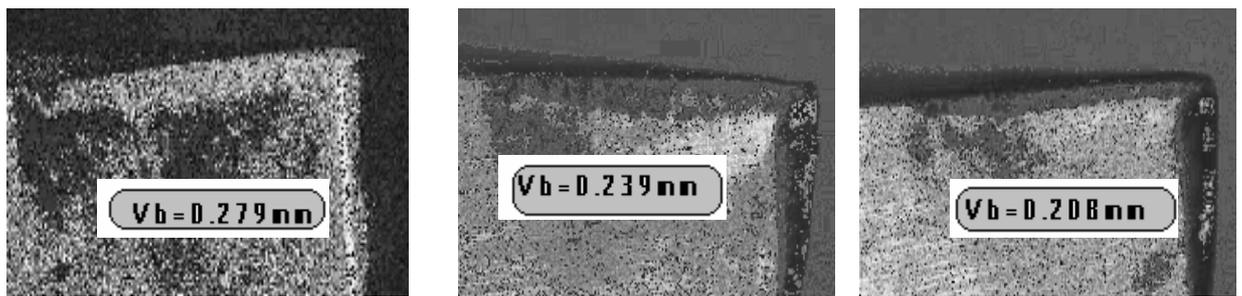


Figure 4.16a: Photos d'usure en dépouille (sur site)

P25 (Droit); 9SMn28K Ø16mm; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$



S1P (Droit) ; C45 Ø16mm; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$



S1P (Gauche) ; C45 Ø16mm; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$

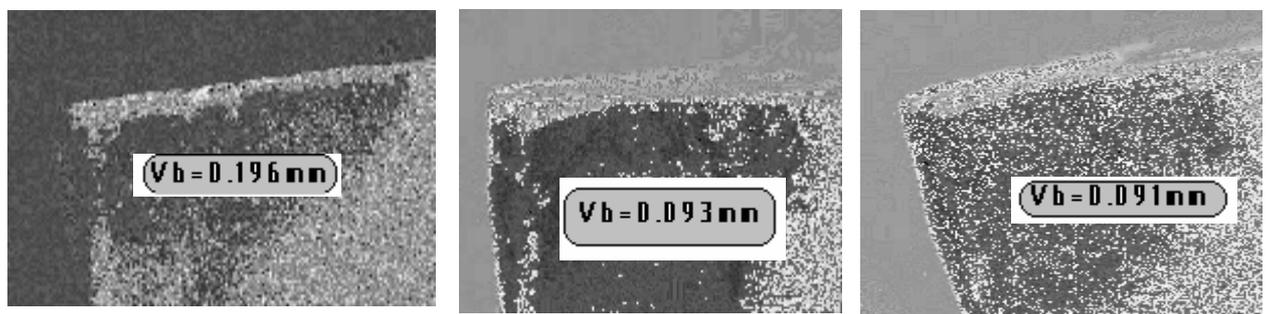


Figure 4.16b: Photos d'usure en dépouille (sur site)

GC415 (Droit et Gauche) ; 9SMn28K Ø16mm ; $V_c=220\text{m/min}$; $f=0,03\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$

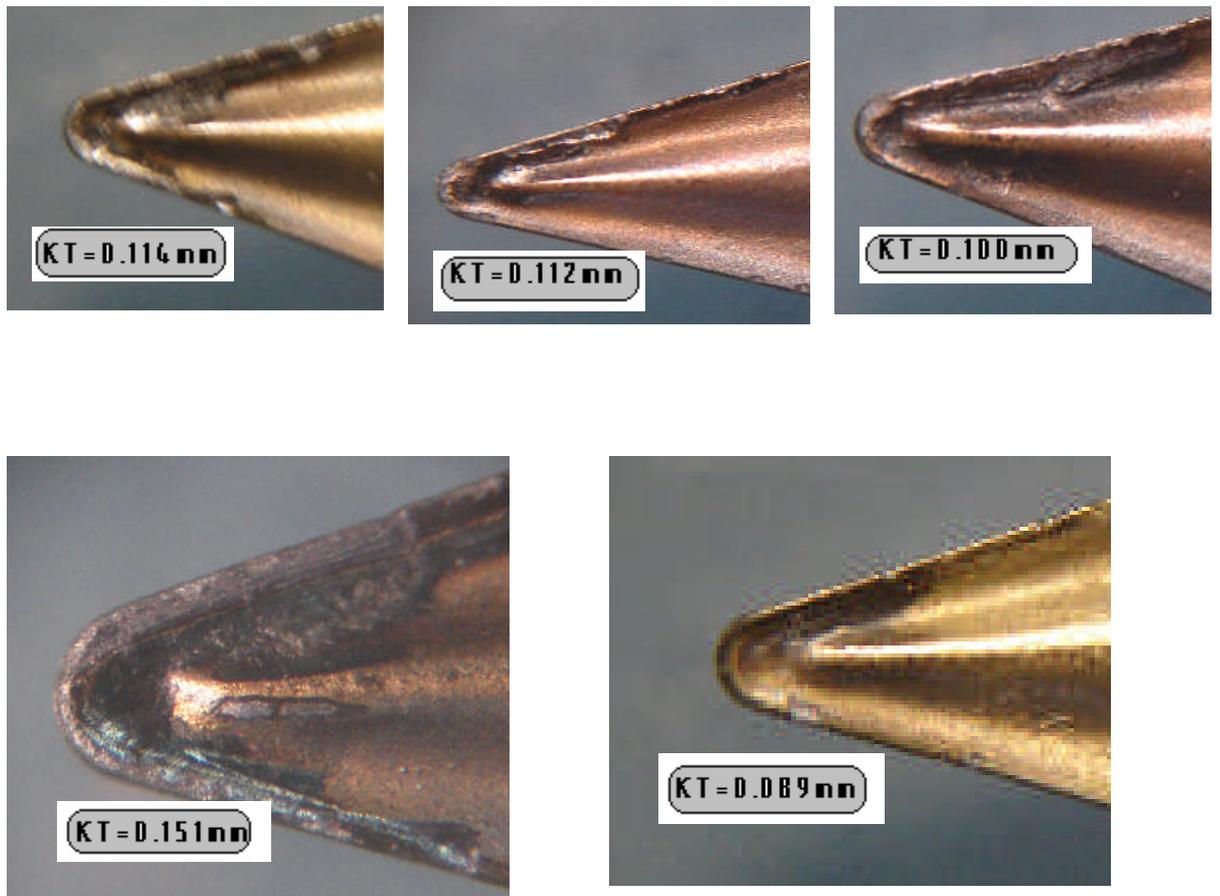


Figure 4.16c: Usure en cratère (sur site)



Figure 4.16 d: Effondrement du bec de l'outil (sur site)

b.4 Moyens de control de l'axe

Le contrôle se fait à l'aide des instruments suivants :

- Gabarit de control des cotes de roulements: $\varnothing 12h6$ (**G1**).
- Gabarit pour contrôler les cotes des diamètres $\varnothing 11,3$ sur les quels des filets M12x1 seront roulés (**G2**)

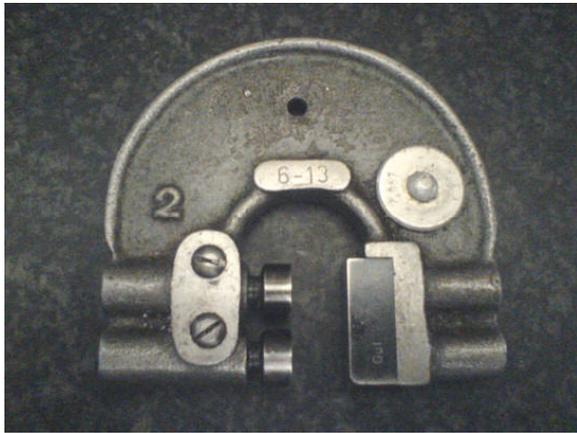


Figure.4.17: Gabarit G1

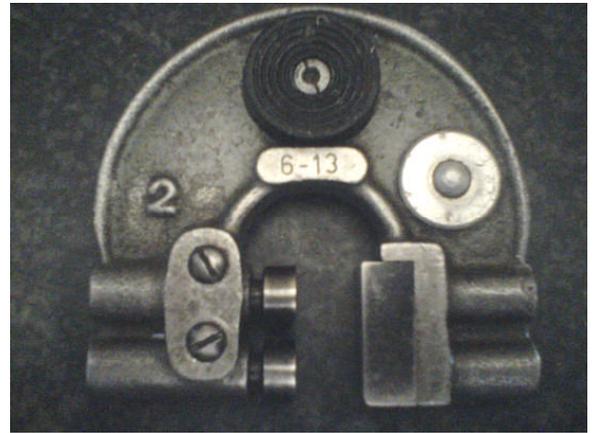


Figure.4.18: Gabarit G2

4.1.3 Méthode

Dans les conditions de travail à vitesses de coupe élevées, et pour des vitesses de rotations voisinant les 5000tr/min, il est recommandé de travailler avec lubrification dense.

Par ailleurs, les spécifications de l'usinage doivent être expliqués eu égard des procédures qui consistent à assurer une stabilité thermique et les fréquences de contrôles.

Pour assurer la stabilité thermique, la machine est mise en route pendant une heure de temps avant d'entamer l'usinage. Les fréquences de rotations sont variables sur la gamme des diamètres à cote fonctionnelle puisque la vitesse de coupe est maintenue constante. Cependant au dessous du diamètre inférieur au cotes de roulements, la vitesse de coupe devient variable puisqu'elle est limitée par le système et donc la fréquence de rotation est constante lorsqu'elle atteint les 5000 tr/min.

Le programme assure les avances et les vitesses de coupe, mais les profondeurs de passe dépendent du diamètre de l'ébauche. Il est important d'expliquer la procédure d'usinage de l'axe de la roue. Figure 4.23.

D'un coté la profondeur de passe est variable c'est-à-dire qu'en un seul déplacement de l'outil en un seul sens, la partie droite est usinée. Dans ce cas l'outil plonge dans la pièce en fonction du diamètre à obtenir. Tandis que l'avance est réglée en fonction de l'état de surface et de la précision de la cote à réaliser. La partie gauche subit un usinage avec plus d'un déplacement de l'outil dans les deux sens en respectant la profondeur de l'ébauche, semi finition et de finition. Le tableau (4.2) montre les régimes de coupe et le temps technologique de chaque diamètre pour le tournage de l'axe de la roue.

On peut conclure que dans ce cas, les variants peuvent provenir de la différence de diamètres de l'ébauche et des tolérances de cotes.

a. Détermination du temps technologique pour différents diamètres.

Temps technologique:

$T = L/A$ avec T (mn) ; L (mn) ; A (mm/mn) = a (mm/tr). N (tr/mn)

L = (longueur de passe plus la distance de l'engagement et/ou du dégagement)

T =temps de fabrication

a =avance (mm/tr)

A =avance (mm/mn)

N =fréquence de rotation

No	Palier (mm)	Vc(m/mn)	N(tr/mn)	f(mm/tr)	ap(mm)	Lg usinée(mm)	Td'usinage(mn)
1	Ø11,3	176	4960	0,04	2,35	9,5	0,0478
2	Ø10,5	165	5000	0,03	3,5	4	0,0266
3	Ø12h6	176	4676	0,03	2	10,08	0,0718
4	Ø10,75	169	5000	0,05	2,625	26,55	0,265
5	Ø12h6	176	4676	0,03	2	12,34	0,0527
6	Ø16	176	3500	0,03	0	11,83	0,0563
7	Ø13,85	176	4047	0,03	1,075	48,36	0,298
8	Ø14	176	4004	0,05	1	69,52	0,347
9	Ø11,3	176	4960	0,05	2,35	23,98	0,102
10	Ø10,5	165	5000	0,03	3,5	38,52	0,3852

Temps total du 1^{er} coté : $T_{Dr}=0.5202\text{min}$

Temps total du 2^{ème} coté: $T_{Ga}=1.1322\text{min}$

Tableau 4.2 : régime de coupe et temps technologique de chaque palier

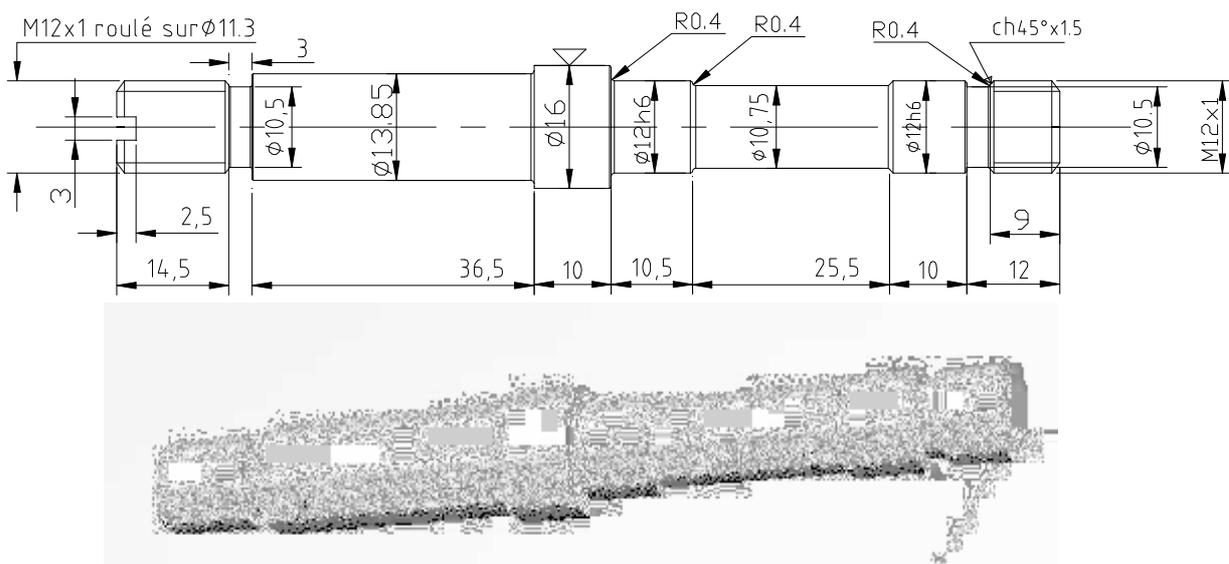


Figure.4.19: Dessin de l'axe de la roue en 2D et 3D

b. Programme de l'axe de la roue

Fiche programme 1

Phase 1 : Chariotage des diamètres : $\varnothing 11.3$, $\varnothing 10.5$, $\varnothing 12h6$, $\varnothing 10.75$, et $\varnothing 12h6$ en une seule passe.

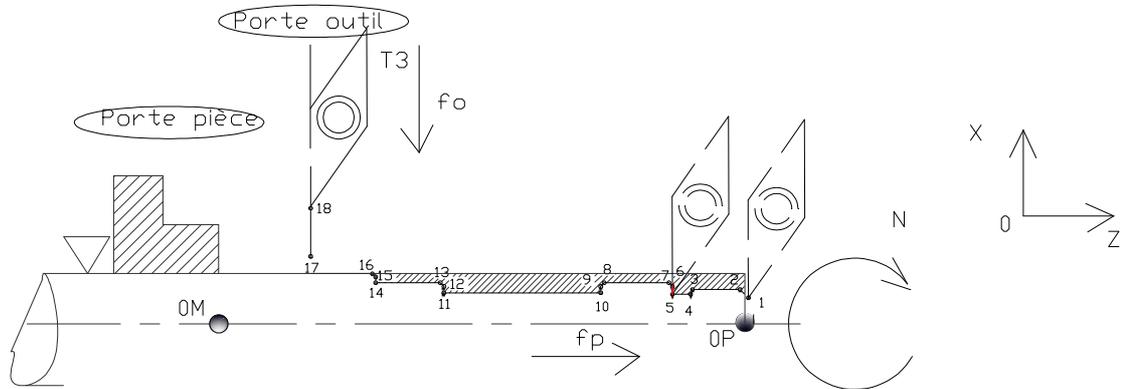


Figure 4.20: Chariotage du coté droit de l'axe

Programme	Schéma	Observations
M 199 G92 D10 D3 G92 D11 D71 G92 D30 D.7 G92 D31 D71 G92 D32 D.8 G92 D33 D3 G92 D35 D71 G92 D36 D71 G92 D50 D15.4 G92 D51 D71 G92 D52 D.4 G92 D53 D4 G92 D55 D71		-Déclenchement de l'indexage de la broche 1 -Adresses pour l'outil T3, T5
G92 S1=5000 G915 S1=2000		-Limitation de vitesse
R0=1 R1=- 122 R2=20 R3=0 R4=3 R5=18 R6=3 R7=0.03 R8=1000000 R9=1		-Paramètres R
L30001 N05 L30101 N10 G0 Z1 N15 G43 D11 X70		-Sortie outil et synchronisation des programmes pour l'usinage.

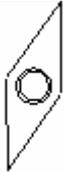
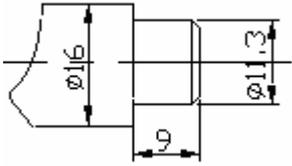
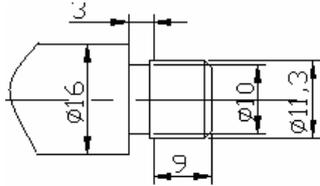
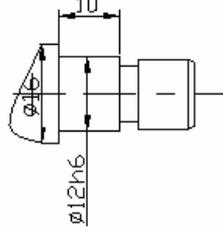
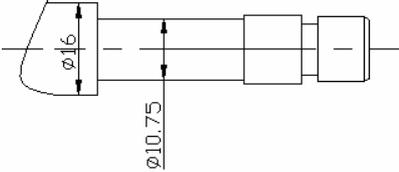
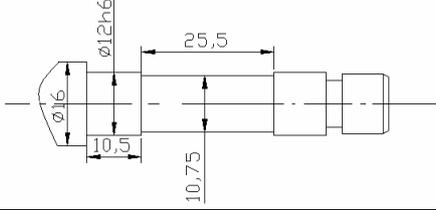
N35 M131 G195		- Suspension de la surveillance de la vitesse de rotation de la broche 1
S1=3500 M114		-Rotation de la broche 1 à gauche avec arrosage.
N31 T3		-T3 : outil rhombique, revêtu de AL ₂ O ₃ , TiN et de TiC
N40 G42 D32 G44 D30 Z.5 G43 D31X9.3 N45 G1 Z-1 X11.30 F.04 N50 Z-9		-Corrections d'outil -Chanfrein 1x45° -Chariotage du Ø11.3x8, Interpolation linéaire, Adresse, Avance.
N55 X10 F.03 N56 Z-12		-Chariotage du Ø10.5x3, Adresse, Avance
N60 X11.7 N65 G43 D35 X12 Z-12.2 N70 Z-21.8 N71 Z-22 X11.8		-Chariotage du Ø12h6, correction d'outil
N75 X10.75 F.02 N80 Z-47.5 F.05		-Chariotage Ø10.75, Adresse, Avance
N85 X11.8 N90 G43 D36 X12 Z-47.6 F.03 N95 Z-58		-Chariotage du Ø12h6, correction d'outil, Adresse, Avance
N100 X15.6 N105 X16 Z-58.3 N110 Z-70 F.06 N115 G0 G42 D0 X80		-Dégagement rapide, Adresse, Avance correction du rayon d'outil.

Tableau 4.3: Programme pour l'usinage du coté droit de l'axe

Phase 2 : Chariotage des diamètres : $\varnothing 13.85$, 14(ébauche), $\varnothing 11.3$, $\varnothing 9.3$, $\varnothing 10.5$ (finition) en deux sens (gauche et droit).Figure 4.21 a et Figure 4.21 b

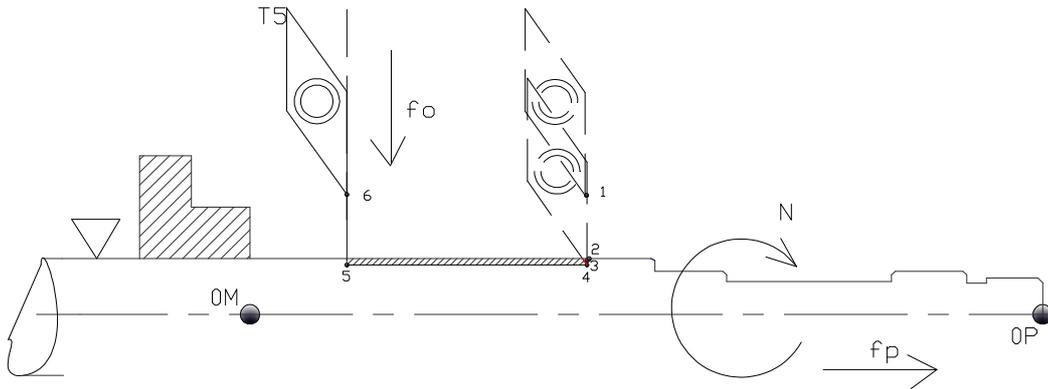


Figure 4.21a: Chariotage du coté gauche de l'axe dans le sens droit

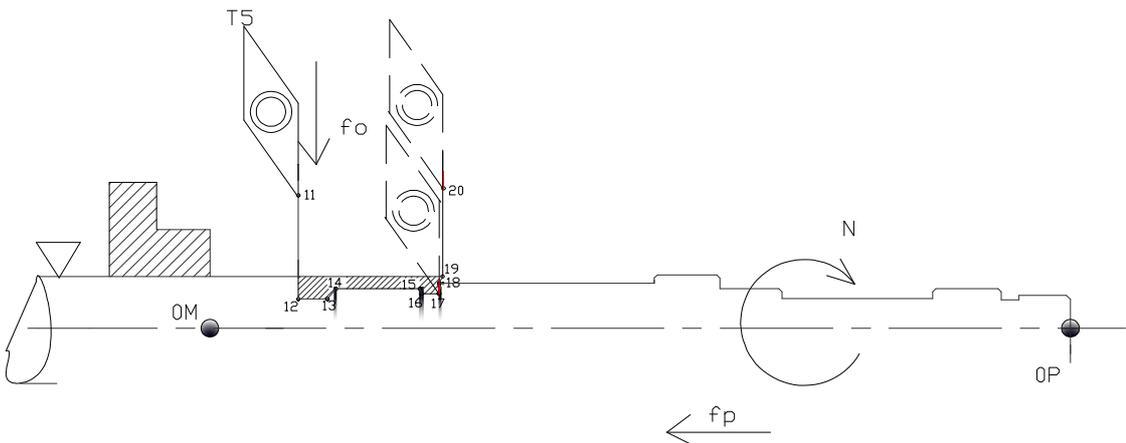


Figure 4.21b: Chariotage du coté gauche de l'axe dans le sens gauche

Programme	Schéma	Observations
N51 T5		-Outil rhombique, revêtu de AL_2O_3 , TiN et de TiC
120 M131 G195 S1=3500 M114		Suspension de la surveillance de la vitesse de rotation de la broche1. Rotation de la broche 1 à gauche avec arrosage.

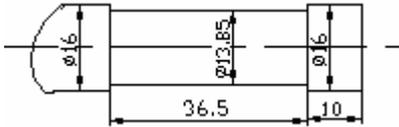
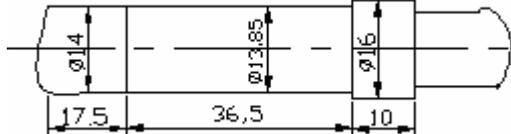
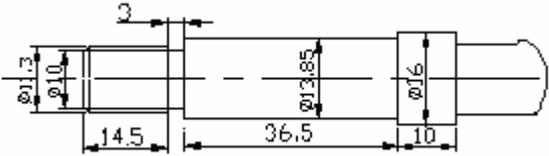
<p>N125 G0 G42 D52 G44 D50 Z-67.6 G43 D51 X20 N126 X16.1 F.04 N130 G1 X15.6 Z-68 F.03 N135 X13.86 N140 Z-105 F.04</p>		<p>-Corrections d'outil -Chariotage du $\varnothing 13.86$, Interpolation linéaire, Adresse, Avance</p>
<p>N145 G0 G42 D0 X30 N150 G41 D52 G44 D50 Z-126 G43 D51 X20 N155 G1 X14 Z-125.5 F.03 N160 Z-104.3 F.05</p>		<p>-correction du rayon d'outil. -Chariotage du $\varnothing 14$ (ébauche), Interpolation linéaire, Adresse, Avance</p>
<p>N165 X20 F.1 N170 G0 G41 D52 G44 D50 Z-125 N175 G43 D51 X20</p>		<p>Dégagement rapide, correction d'outil</p>
<p>N180 G1 X9.3 F.04 N185 Z-122.2 F.05</p>		<p>-Exécution chanfrein Interpolation linéaire, Adresse, Avance</p>
<p>N190 G43 D55 X11.31 Z-121 N200 Z-107.5 N205 X10.5 F.03 N210 Z-104.3 F.02 N215 X13.85 F.05 N220 X14.25 Z-103.9</p>		<p>-Correction de la longueur de l'outil positif -Chariotage du $\varnothing 11.3$, $\varnothing 10.5$ (finition).</p>
<p>N225 G0 G41 D0 X80</p>		<p>-Dégagement rapide, correction d'outil.</p>

Tableau 4.4: Programme pour l'usinage du coté gauche de l'axe

Phase 3 : Mise à la longueur Lg=122mm

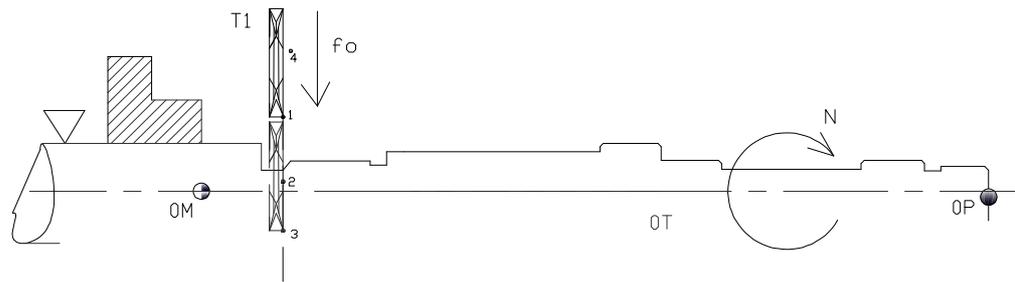


Figure 4.22: Mise à la longueur de l'axe

programme	schéma	observations
N11 T1		Outil de tronçonnage L123G2-0501-CF
N230 D131 G195 S1=2500		- Suspension de la surveillance de la vitesse de rotation de la broche1.
N240 G0 G44 D10 Z-122 G43 D11 X18.5 N245 G1 X6 F. 03		-Correction d'outil, interpolation linéaire, adresse, avance Dressage et mise à la longueur
M28		-Avance du trieur de pièce.
N250 G1 X-2.4 F.03 N255 G0 Z-121.9		-Interpolation linéaire, adresse, avance.
N260 G43 D11 X80		-Dégagement rapide, correction de la longueur de l'outil positif
M29		-Recul du trieur de Pièces
M31 G195 S1=2400 M114		- Suspension de la surveillance de la vitesse de rotation de la broche1. -Rotation de la broche 1 à gauche avec arrosage.
N270 eoo-5 N275 M30		Fin de programme

Tableau 4.5: Programme pour le tronçonnage de l'axe

c. Procédure de la fabrication de l'axe de la roue pour fauteuil roulant.

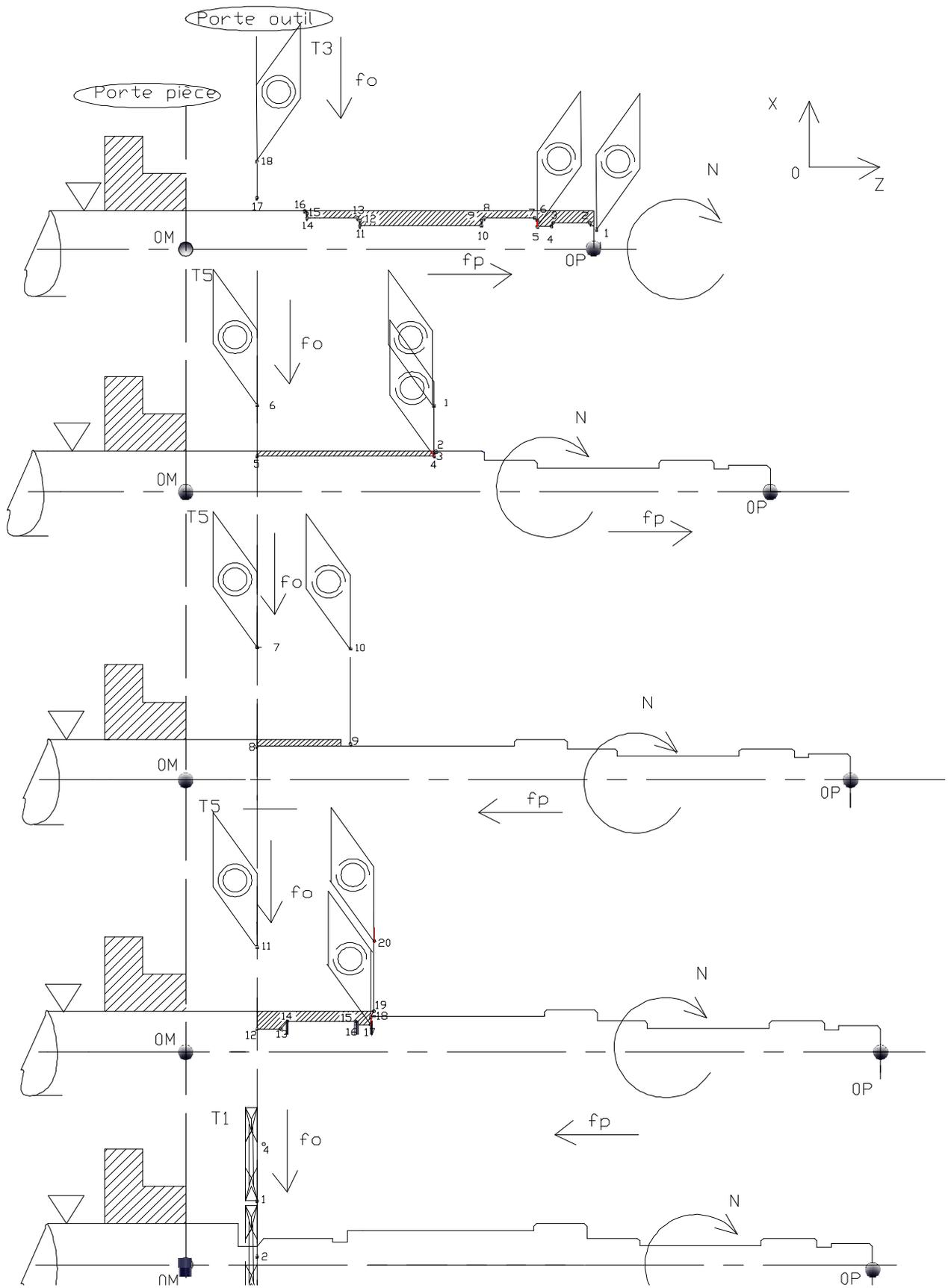


Figure 4.23: Procédure de la fabrication de l'axe de la roue pour fauteuil roulant

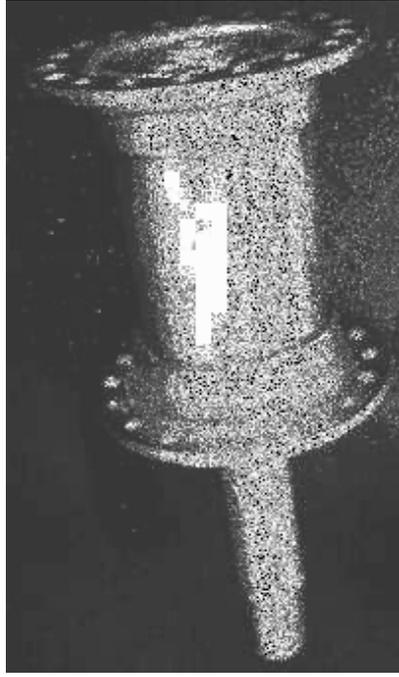


Figure 4.24: Dessin d'ensemble montrant, entre autres, des roulements à billes dont les bagues extérieures sont pressées dans le corps de moyeu, et dans les bagues intérieures glisse un **Axe**.

d. Choix des régimes de coupe pour l'usinage de l'axe de roue

Le choix du régime de coupe : V_c (m/min); f (mm/tr) et a_p (mm), s'effectue principalement en fonction :

- du type d'alliages usinés
- de la nuance et la géométrie de l'outil (angles et dimensions, rayon de bec)
- de la sévérité de l'opération (section de copeaux en ébauche, travail aux chocs, finition) avec des contraintes ou limites liées :
- à la qualité (précision, état de surface)
- aux caractéristiques de la machine (puissance, couple, vitesses de rotation et d'avance)
- à la sécurité (limitations de vitesses de rotation liées au mandrin de serrage, au balourd des pièces)
- à des critères technico-économiques de fabrication (productivité, coût) dont les valeurs dépendent de la durée de vie des outils de coupe, donc des paramètres de coupe choisis.

Tableau 4.6

Valeurs pour le tournage

IFANGER

Nuance : 9SMn28K Ø16mm $V_c=176$ m/min $N=3500$ tr/min

Werkstück Pièce à usiner Ømm	Drehzahl U/min.bei Schnittgeschwindigkeit (m/min.)von Nombre de tours t/min.Lors de vitesse de coupe (m/min.)de											
	10	15	20	30	40	50	70	100	200	300	400	500
5	640	950	1300	1900	2500	3200	4500	6400				
6	530	800	1100	1600	2100	2600	3700	5300				
8	450	670	900	1400	1800	2300	3200	4500	8000			
10	320	480	640	950	1300	1600	2200	3200	6400	9500		
12	270	400	530	800	1100	1400	1900	2700	5300	8000		
15	210	320	420	640	850	1100	1500	2100	4200	6400	8500	
20	180	270	360	540	720	900	1300	1800	3600	5400	6400	900
25	130	190	250	380	510	640	900	1300	2500	3800	5100	6400
30	100	160	210	320	420	530	740	1100	2100	3200	4200	5300
35	91	130	180	270	360	450	640	910	1800	2700	3600	4500
40	80	120	160	240	320	400	560	800	1600	2400	3200	4000
50	64	95	130	190	250	320	450	640	1300	1900	2500	3200
60	53	80	110	160	210	270	370	530	1100	1600	2100	2700
80	40	60	80	120	160	200	280	400	800	1200	1600	2000
100	32	48	63	95	130	160	220	320	630	950	1300	1600
120	27	40	53	80	110	130	190	270	530	800	1100	1300
150	21	32	42	64	85	110	150	210	420	640	850	1100
200	18	27	36	54	72	90	130	180	360	540	720	900
250	13	19	25	38	51	64	90	130	250	380	510	640
300	10	16	21	32	42	53	74	100	180	270	360	450
400	8	12	16	24	32	40	56	80	160	240	320	400
500	6	10	13	19	25	32	45	64	130	190	250	320

Tableau 4.6: Abaque pour le choix du régime de coupe

e. Fiche matière

C'est avec cette fiche que le chef de la section concernée peut faire sortir la matière du magasin une fois le dossier de fabrication est lancé par l'ordonnancement.

Date		Quantité		Décal	Designation de la pièce	No de la position
					Axe de roue (F R)	18 - 1056
N o Phase	Section	Magasin	Poids	Unité (Gramme)	Désignation et nuance matière	Dimensions du brut
70	40	4	216	8	D119 9Smn 28K	Ø 16X3000
						22 P/Barre

Tableau 4.7: Fiche matière pour l'usinage de l'axe (18-1056)

g. Gamme d'usinage de l'axe de roue

Numéro de phase	No de section et machine	Phase	Equipement	Temps/100 Pièces
70	40 1625	Tourner suivant dessin	360	150
60	43 2903	Fraiser suivant dessin	30	55
50	50 22113	Dégraisser	10	1,5
40	39 3301	Rouler filets M 12 X 1 (1 ^{er} côté) ; lg=14,5 mm	20	21
30	39 3301	Rouler filets M 12 X 1 (2 ^{ème} côté); lg= 9 mm	20	21
20	50 22113	Dégraisser	10	1,5
10	29 222	Zinguer	10	11,6
0	79	Contrôler, livrer Mag. (10).		

Tableau 4.8: Gamme d'usinage de l'axe de la roue (18-1056)

4.1.4 Matière

Il est à retenir qu'il arrive qu'il y est des ruptures de stocks des barres laminées de diamètre 16mm et d'utiliser des barres de diamètres 18mm et aussi de l'utilisation de différentes matières ayant de différentes résistances. Nous concluons alors que la dispersion de brut, de nance et de dureté constituent ainsi des **variants**.

4.1.4.1) Nuances, dureté et bruts des matières utilisées
Code de l'axe selon cycma : 18-1056

a. 1^{ère} nuance: 9SMn28K (acier de décolletage); Rd Ø16x3000
 Dureté : 170÷175HB; 16÷18HRC

b. 2^{ème} nuance: 9SMn28K (acier de décolletage); Rd Ø18x3000
 Dureté: 170÷175HB; 16÷18HRC

C	Si	Mn	P	S	Pb
≤0,14	≤0,05	0,90÷1,30	0,1	0,24÷0,32	-

Tableau 4.9: Pourcentages d'éléments constituant l'acier de décolletage 9SMn28K

c. 3^{ème} nuance: C45 (acier de construction ou d'amélioration); Rd Ø16x3000
 Dureté: 185÷192HB; 20÷25HRC

C	Si	Mn	P	S	Pb
0,42÷0,50	0,15÷0,40	0,50÷0,80	0,045	≤0,045	-

Tableau 4.10: Pourcentages d'éléments constituant l'acier de construction C45

C : Carbone

Le carbone est l'élément d'alliage de l'acier le plus important et aussi celui qui a le plus d'influence. Outre le carbone chaque acier non allié contient aussi. Du silicium, du manganèse, du phosphore et de soufre, lesquels entrent dans la fabrication sans y avoir été introduits. L'addition d'autres éléments d'alliage pour l'obtention d'effets particuliers comme l'augmentation du manganèse et du silicium conduit aux aciers alliés. Avec une augmentation de la quantité de carbone, la résistance et la dureté de l'acier croissent tandis que son allongement, forgeabilité, soudabilité et sa capacité d'être travaillé par enlèvement de copeaux diminuent. La résistance à la corrosion vis-à-vis de l'eau, acides et gaz chauds n'est pas influencée par le carbone.

Si : silicium

Le Si entre dans la composition de tous les aciers comme le manganèse. Déjà le minerai, suivant sa composition, en apporte une quantité correspondante. Dans l'élaboration de l'acier également, les revêtements réfractaires des fours en apportent aussi pendant la fonte. Les aciers sont appelés aciers au silicium s'ils en contiennent plus de 0,040%. Ce n'est pas un métal mais métalloïde comme le soufre et le phosphore. Le silicium augmente la résistance au laminage, la résistance et la solidité. Particulièrement dans la fonte. La dilatation est peu influencée ; la résistance à la traction est augmentée d'environ 10kg/mm² par 1% de si, l'allongement dans de semblables proportions, une forte teneur en si donne à l'acier un gros grain. Avec une grande teneur en si env. 14%, l'acier est résistant aux influences chimiques mais il n'est plus forgeable.

Mn : Manganèse

(Point de fusion : 1244°C)

Le manganèse augmente la résistance de l'acier, la dilatation est peu influencée, il augmente encore la forgeabilité et la soudabilité. Une forte teneur en Mn donne en présence de carbone une grande résistance à l'usure. Jusqu'à 3% de Mn, la résistance à la traction des aciers augmente de 10Kg/mm² par 1% Mn. Pour une teneur de 3-8% l'augmentation est moindre et au delà de 8% elle diminue, l'allongement suit à peu près la même courbe. Le Mn augmente beaucoup la profondeur de la dureté.

P : phosphore

Il y a plusieurs sortes de phosphore, blanche (jaune), rouge (violette), noire et encore d'autres, en générale le phosphore est reconnu comme élément nuis.

S : Soufre

Point de fusion 118°C)

Le soufre rend l'acier cassant à chaud, c'est un élément nuisible. On tolère une teneur de 0.025-0.030%. Dans les aciers de décolletage on en laisse jusqu'à 0.03%, il en résulte des inclusions de soufre dans la texture métallique provoquant des discontinuités favorisant la formation de copeaux courts.

Traitement pour l'acier doux (9SMn28K)

Cémentation : 880-950°C

Résistance à la traction : 52-77 Kp/mm²

Limite élastique : 42Kp/mm²

Allongement : 7mm

Recuit de normalisation : 890-950°C

Résistance à la traction : ≥38 Kp/mm²

Limite élastique : 24Kp/mm²

Allongement : 23mm

Trempe : 880-920°C

Revenu : 150-200°C

Utilisation

Automobile, engrenage.

4.1.5 Main d'œuvre

Trois opérateurs ont été formés pour une meilleure utilisation du centre de tournage.

Cependant, il est à noter que ces opérateurs se relèvent tour à tour en fonction de leur horaire de travail qui éventuellement peuvent prendre des décisions importantes quand au choix des périodes de changement des outils, de leur réglage, contrôle de la précision, changement de barres laminées, et le retour de l'expérience etc. Nous dirons alors que toutes ces décisions constituent **les variants**.

Définition des **variants** et des **invariants** dans les **5M** pour le centre de tournage

Tornos Bechler. Tableau 4.11 et Figure 4.25.

	1er M	2ème M	3ème M	4ème M	5ème M
	Milieu	Matériel	Méthode	Main d'oeuvre	Matière
Invariants	-Condition de travail -Eclairage -Température -Vibrations -Ambiance de travail	-Machine fiable -Porte pièce -Tourelle porte outil -Installation électrique	-Stabilité thermique -Fréquence de contrôle -Spécifications -Lubrification	-Ouvriers qualifiés	
Variants		-Outil S1P -Outil P25 -Outil GC415 - Usure -Réglage -Moyens de contrôle	-Principe de fabrication -Programme -Avance -Fréquence de rotation -Passe	Décisions	9SMn28KØ16 9SMn28KØ18 C45 Ø16 (Nuance et Géométrie)
Effet	T.Petite influence	Grande influence	Moyenne influence	Grande influence	Moyenne influence

La géométrie est importante du point de vue rigidité car elle détermine les profondeurs de passe.

Le tableau 4.11 les invariants et les variants du système et leur influence.

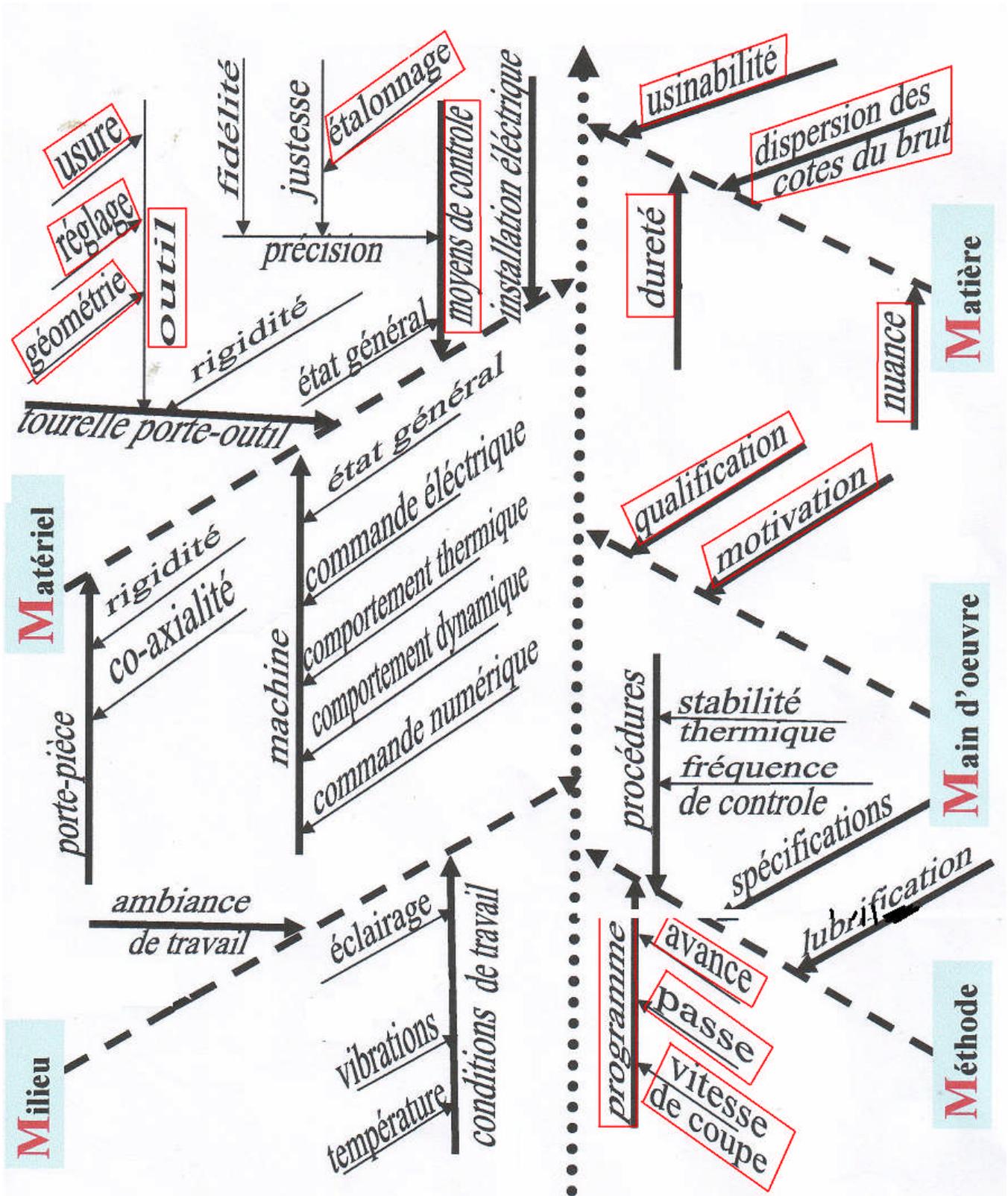


Figure 4.25 Variants et invariants du système

4.2 Etude de l'usure des outils de coupe dans les conditions réelles

Elle est menée dans les conditions réelles d'atelier, afin de déterminer sa durée de vie pour une meilleure estimation des coûts de fabrication des pièces.

4.2.1 Influence de la nuance des outils de coupe sur l'usure en dépouille VB

1. La matière de l'axe étant 9SMn28K Ø16 est usinée par trois nuances d'outils soient: GC415; P25; S1P.

1. a Coté droit

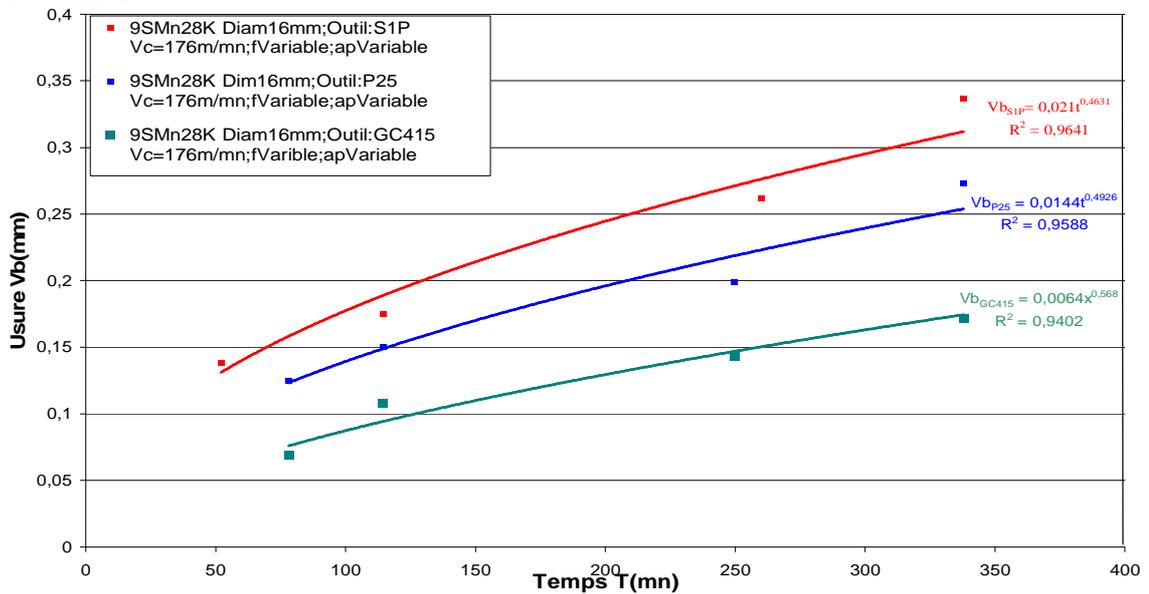


Figure 4.26 Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté droit).

- Nous remarquons sur cette figure que les trois outils réalisent le même nombre de pièces mais avec des taux d'usure différents. Le GC415 est le meilleur puis vient le P25 (GC425) et en fin le S1P.

1. b Coté gauche

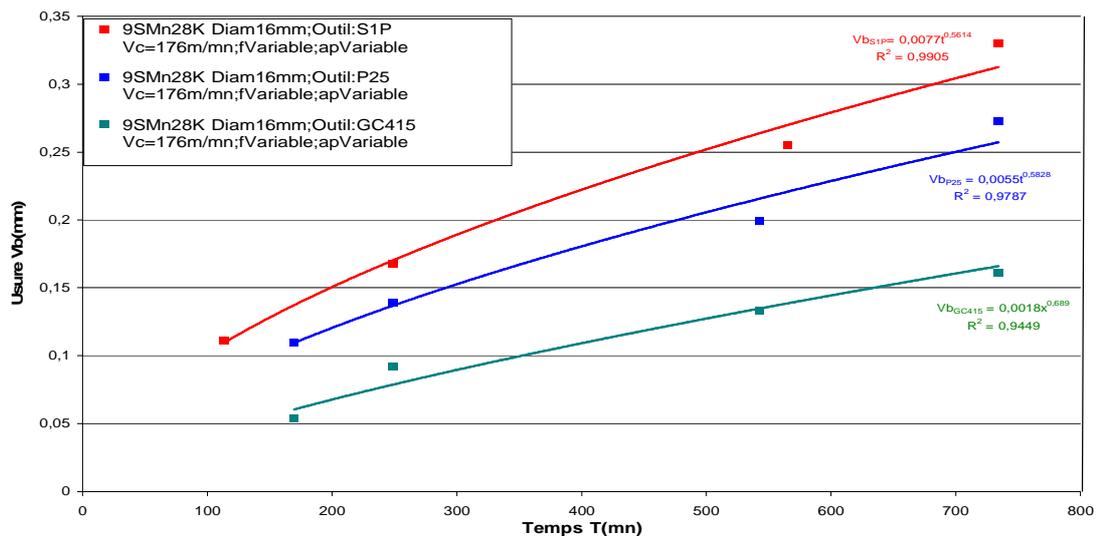


Figure 4.27 Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté gauche).

- Pour le coté gauche, nous avons le même résultat, seulement les taux d'usure des outils sont légèrement inférieurs, car l'outil gauche travaille en plusieurs passes tandis que l'outil droit travaille en une seule passe.

2. La matière de l'axe étant 9SMn28K Ø18 est usinée par trois nuances d'outils soient: GC415; P25; S1P.

2.a Coté droit

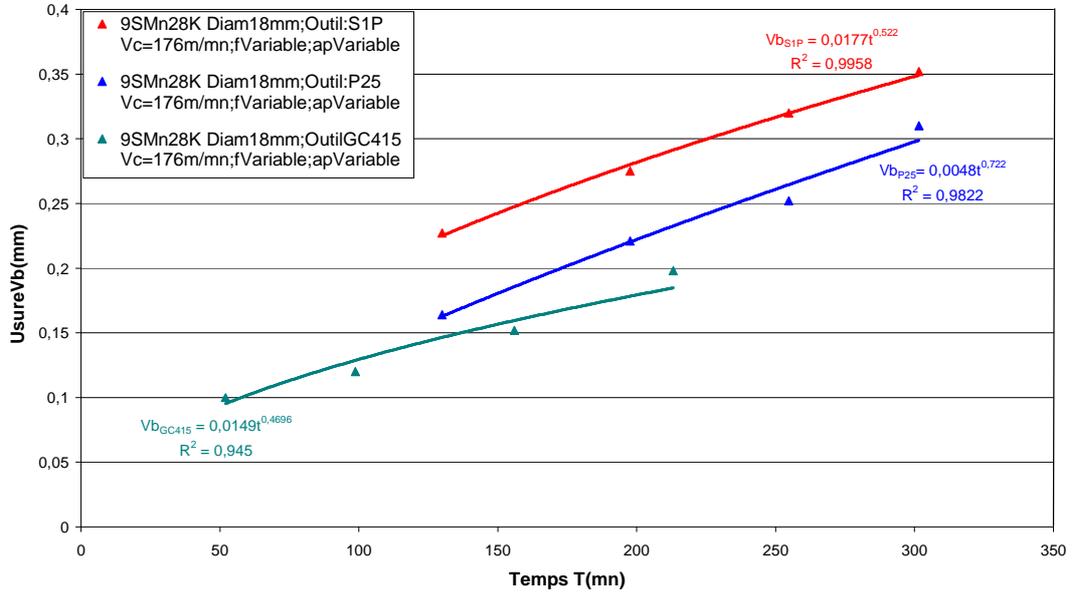


Figure 4.28 Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø18 (coté droit).

2.b coté gauche

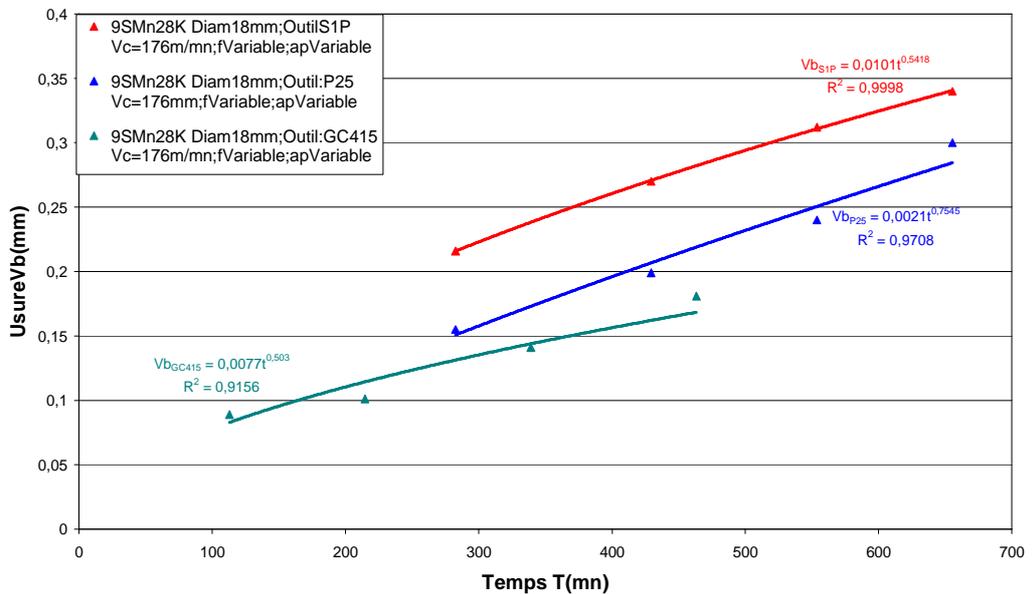


Figure 4.29 Evolution de l'usure des trois nuances d'outils en fonction du temps de coupe pour l'usinage du 9SMn28K Ø18.

3. La matière de l'axe étant C45 Ø16 est usinée par trois nuances d'outils soient: GC415; P25; S1P.

3. a Coté droit

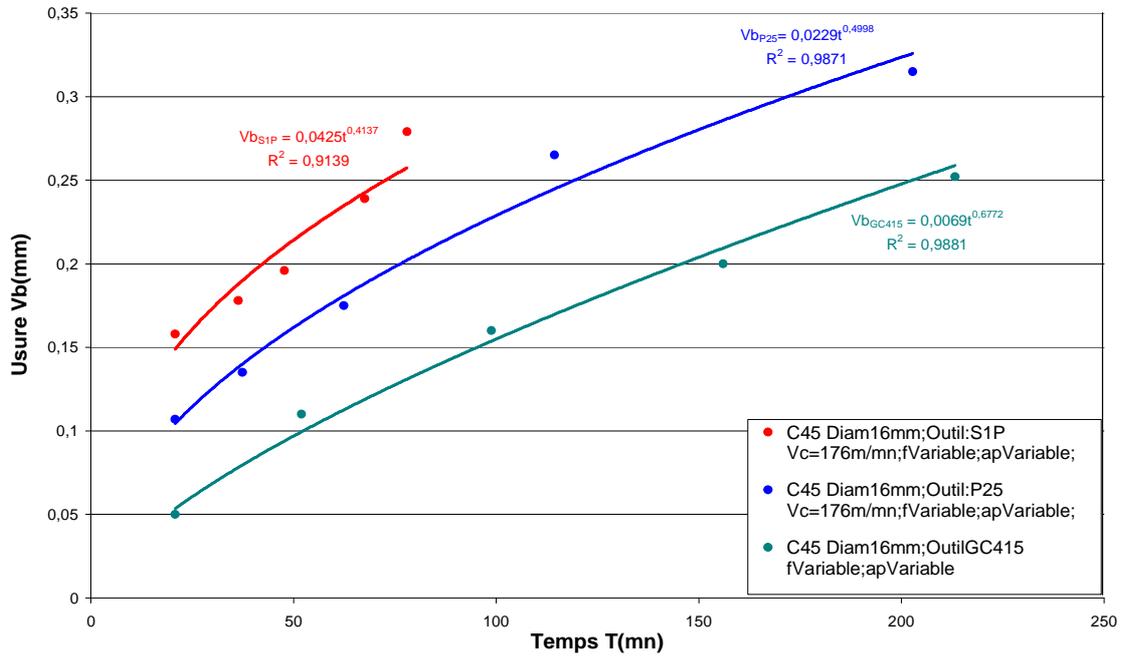


Figure 4.30 Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du C45 Ø16.

3. b coté gauche

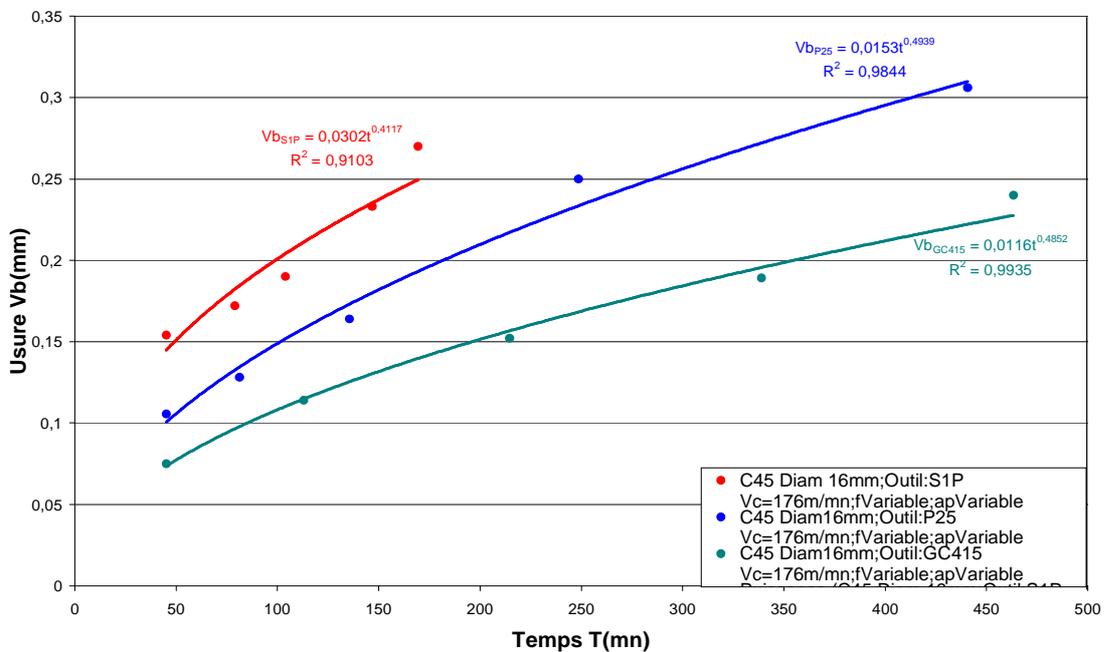


Figure 4.31 Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du C45 Ø16.

- Nous pouvons conclure alors que la nuance des outils de coupe a une influence significative sur l'usure.

4.2.2 Influences de la profondeur de passe sur l'usure en dépouille VB

1. Les trois nuances d'outils ont usiné deux matières de mêmes nuances (9SMn28K) mais de différents bruts ($\varnothing 16$, $\varnothing 18$).

2.

1. a Coté droit

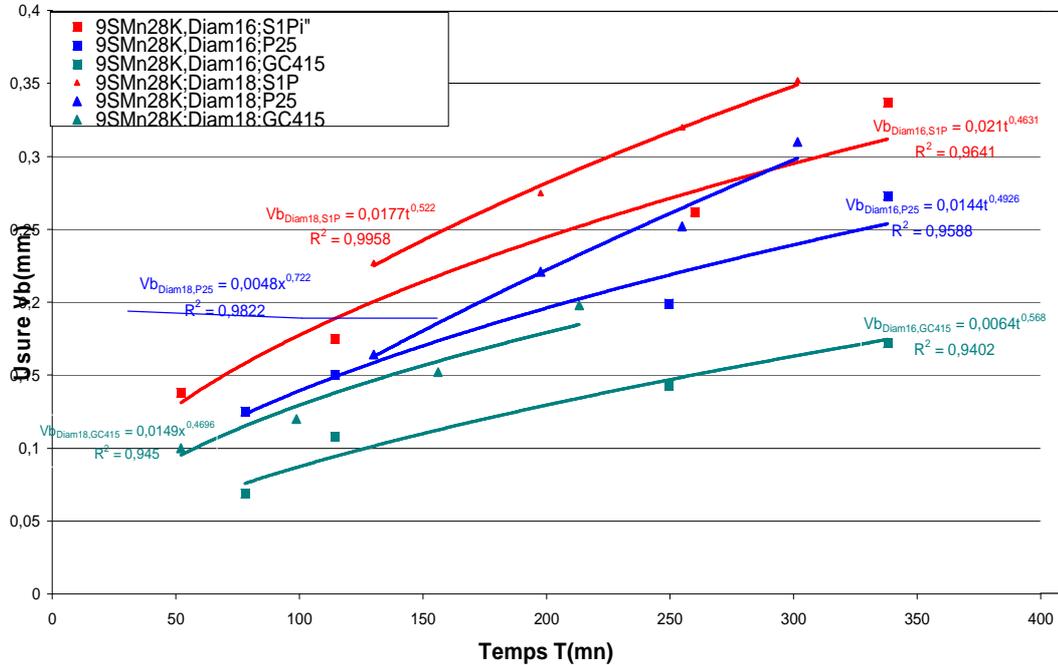


Figure 4.32: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K $\varnothing 16$ et $\varnothing 18$.

2. b Coté gauche

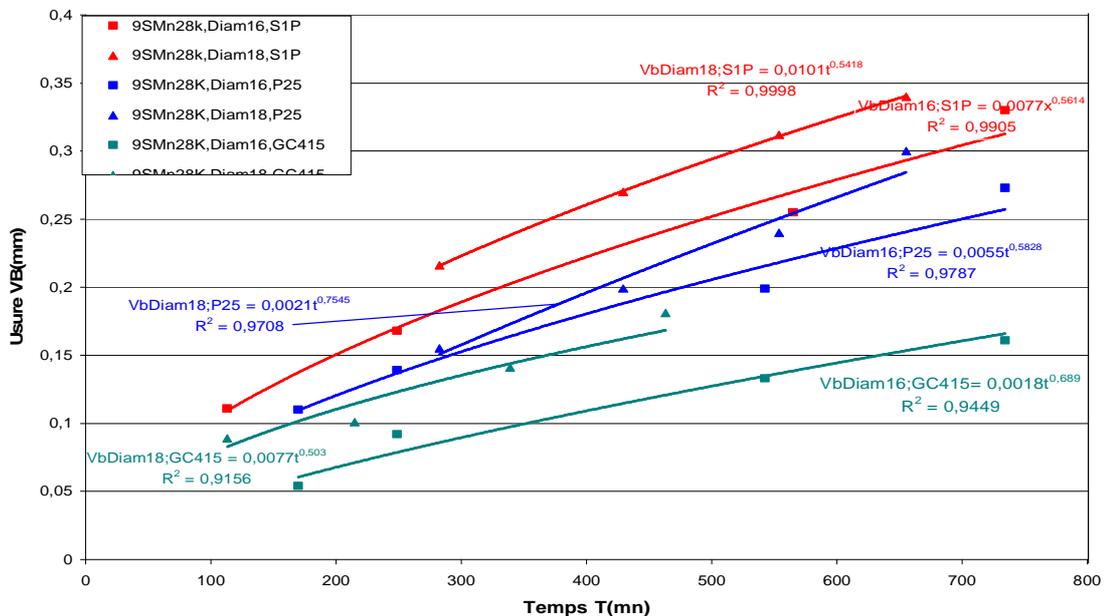


Figure 4.33: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K $\varnothing 16$ et $\varnothing 18$.

- Pour deux matières de même nuance et de différents bruts, les taux d'usure des outils ne sont pas identiques. Nous dirons que la profondeur de passe a une influence sur l'usure, même si elle n'est pas du même degré que l'influence de la nuance des outils de coupe.

4.2.3 Influences de la dureté de la matière à usiner sur l'usure en dépouille VB

1. Les trois nuances d'outils ont usiné deux matières de différentes nuances (9SMn28K et C45) mais de mêmes brut (Ø16).

1. a coté droit

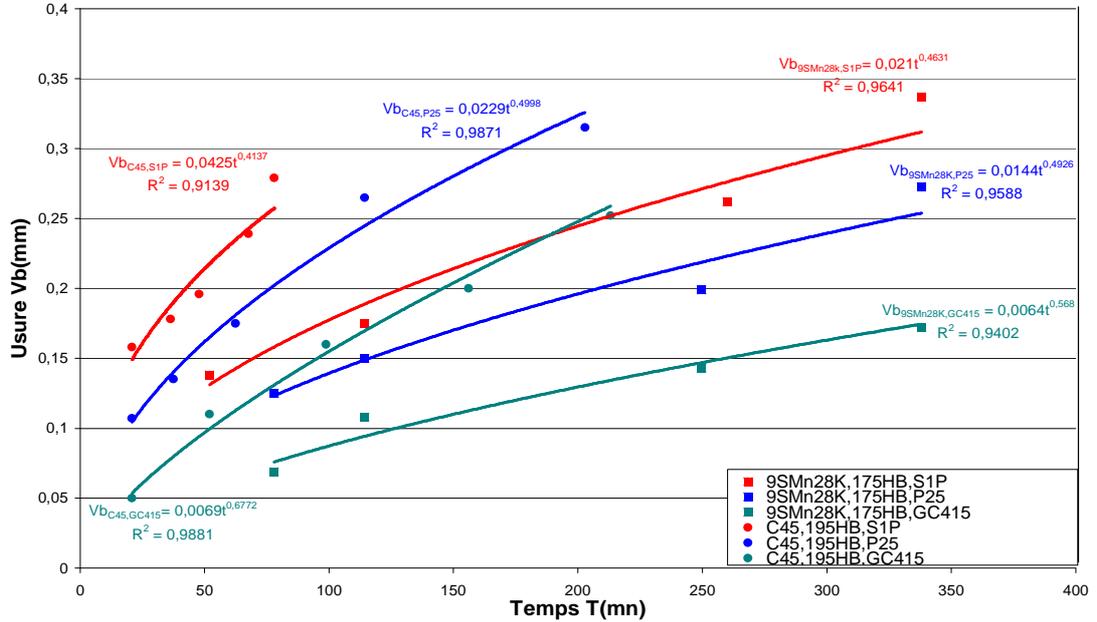


Figure 4.34: Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K et du C45 Ø16 (coté droit).

1. b Coté gauche

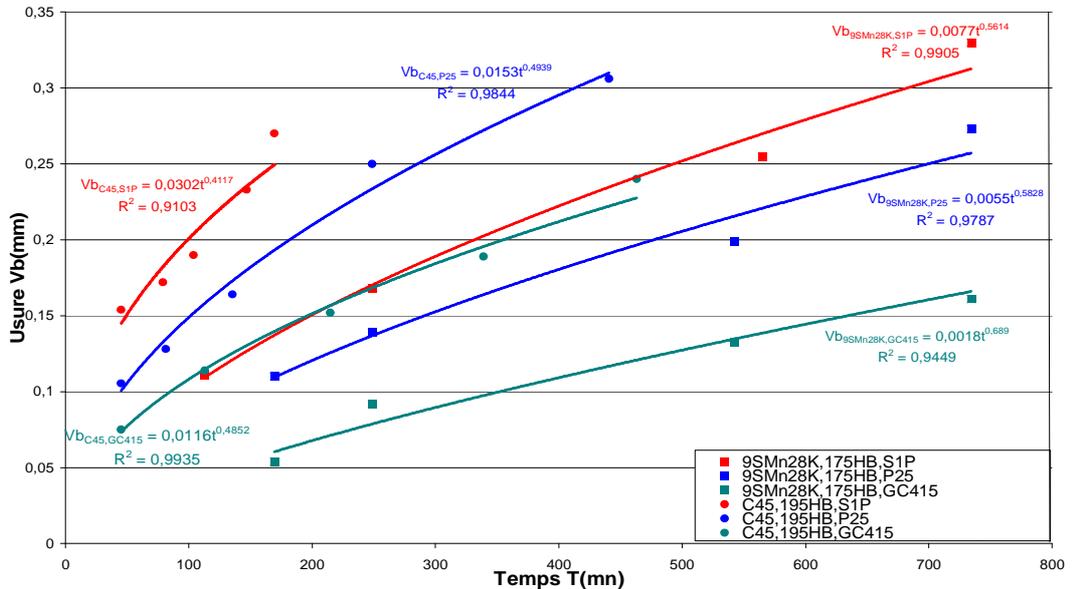


Figure 4.35 Evolution de l'usure de trois nuances d'outils pour l'usinage du 9SMn28K et du C45 Ø16 (coté gauche).

- L'allure des courbes ci-dessus illustre l'influence de la dureté du matériau usiné sur l'usure des outils de coupe.

4.2.4 Influences de la dispersion de nuance et de brut sur l'usure en dépouille VB

1. Les trois nuances de matières (9SMn28KØ16, 9SMn28KØ18 et C45) ont été usinées par un outil en S1P.

1. a Coté droit

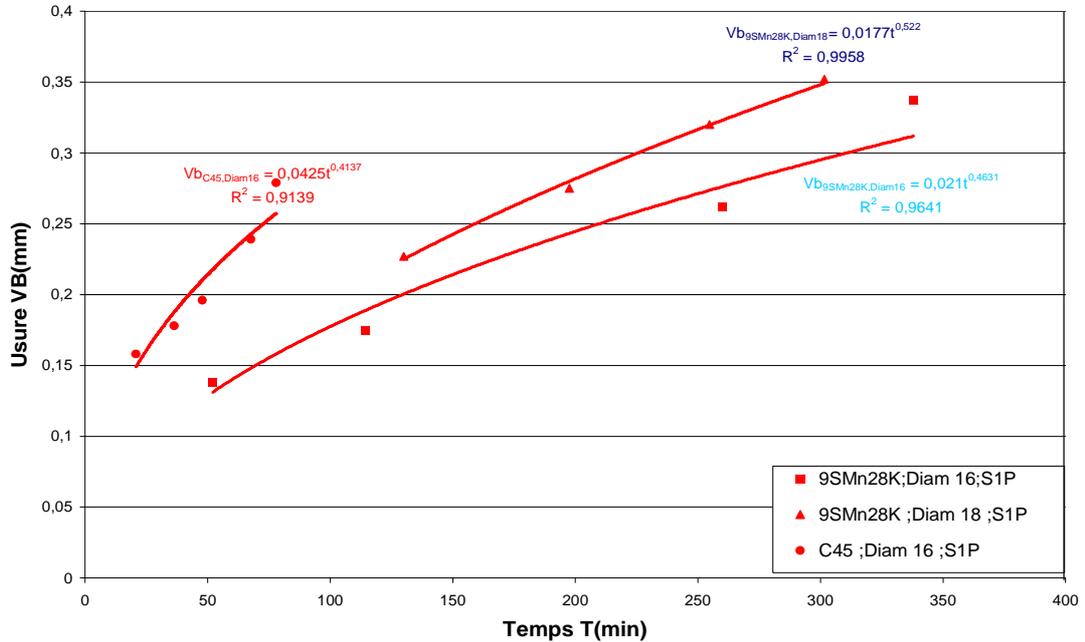


Figure 4.36 Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45 Ø16 (coté droit).

1. b Coté gauche

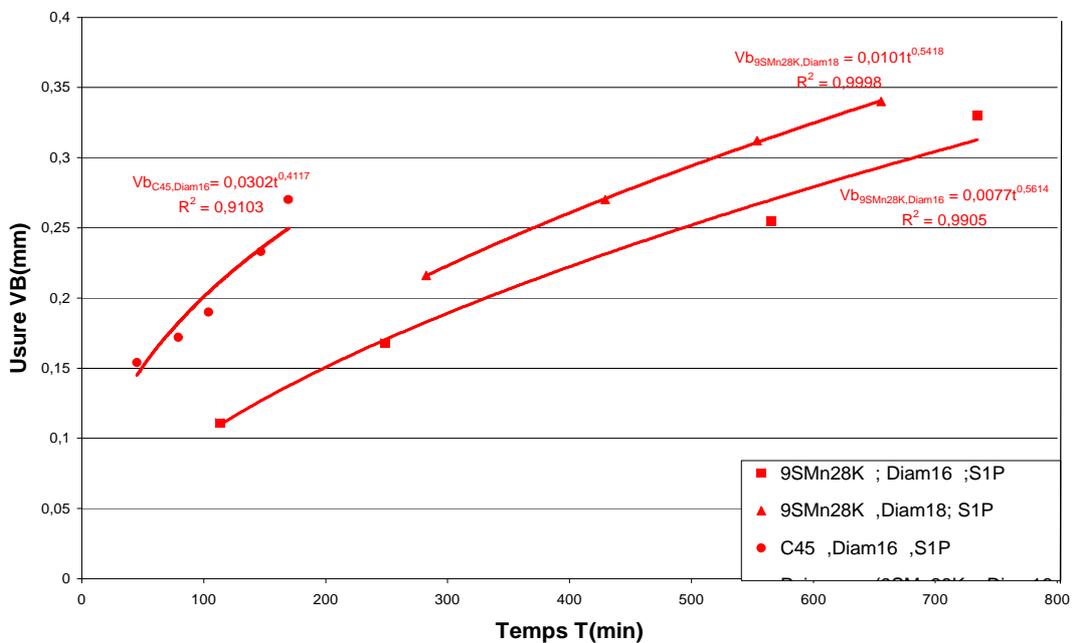


Figure 4.37 Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 et Ø 18 et du C45 Ø16 (coté gauche).

2. Les trois nuances de matières (9SMn28KØ16, 9SMn28KØ18 et C45) ont été usinées par un outil en P25.

2. a Coté droit

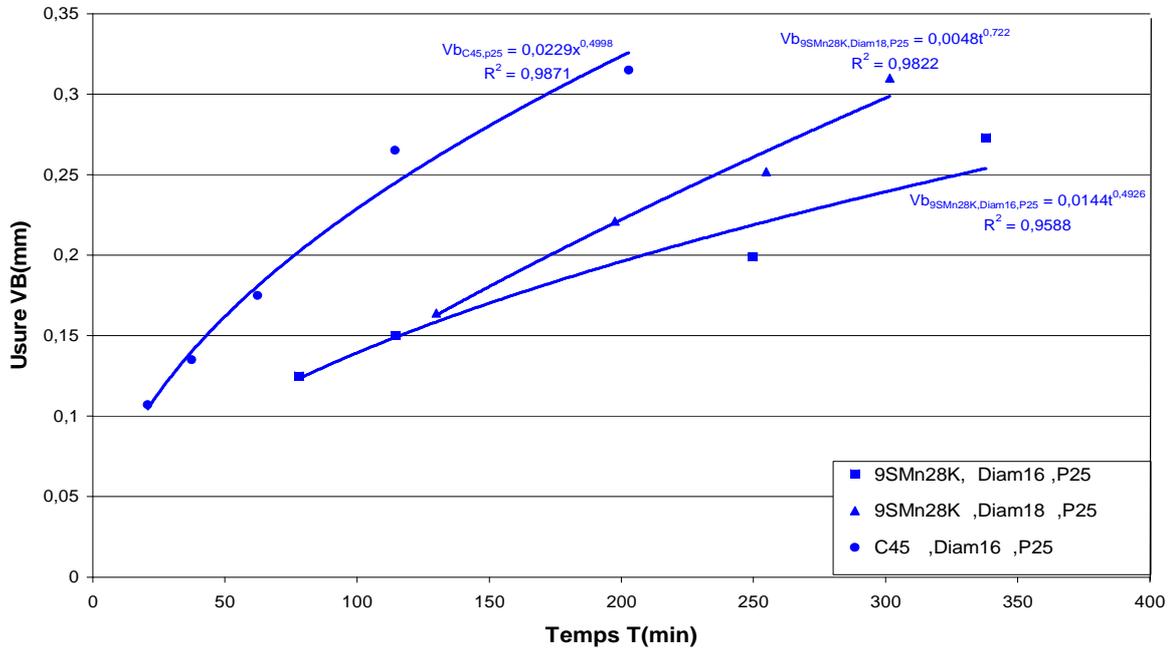


Figure 4.38 Evolution de l'usure du P25 pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45 Ø16.

2. b Coté gauche

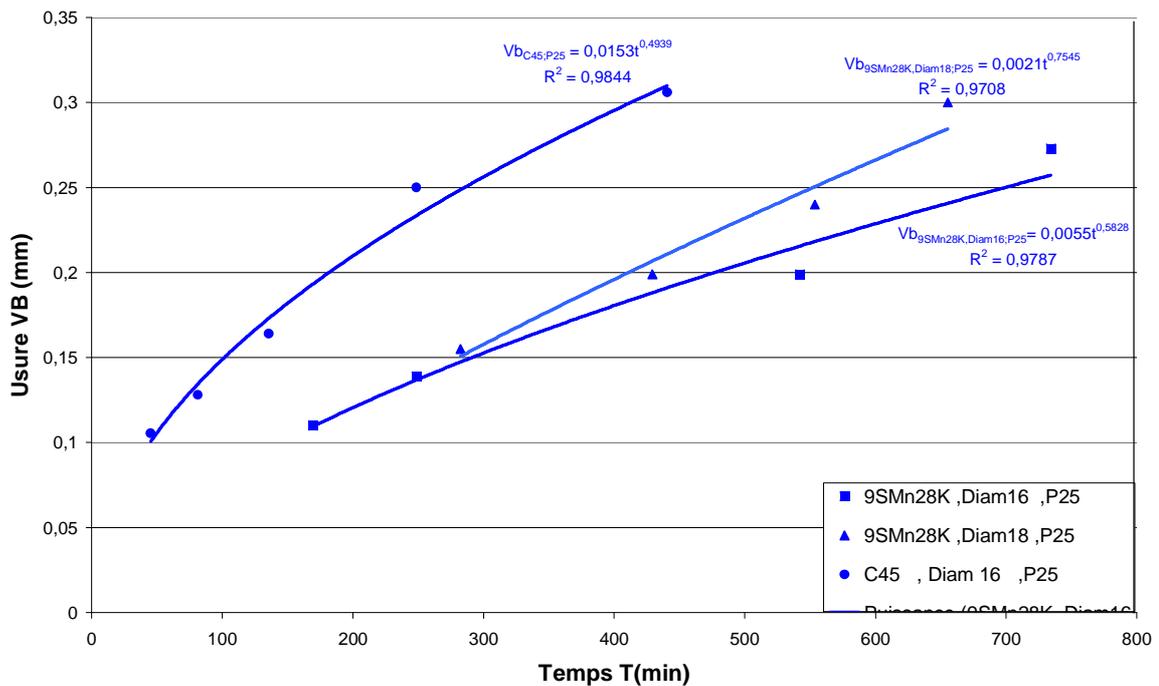


Figure 4.39 Evolution de l'usure du P25 pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45 Ø16.

3. Les trois nuances de matières (9SMn28KØ16, 9SMn28KØ18 et C45) ont été usinées par un outil en GC415.

3. a Coté droit

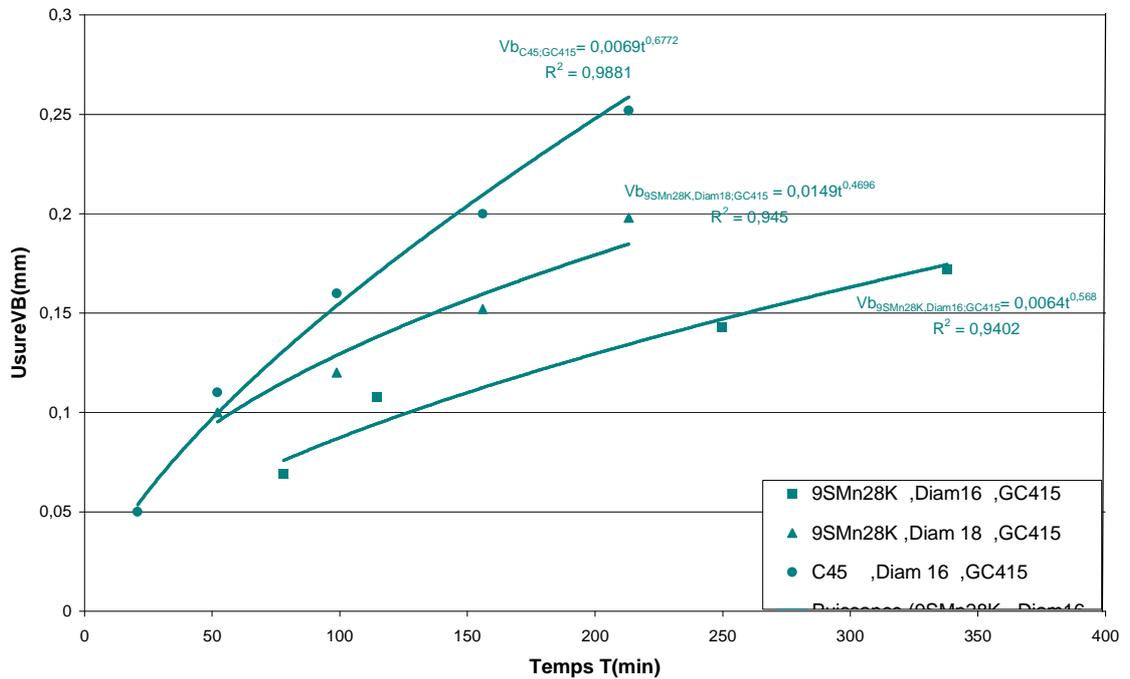


Figure 4.40 Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage Du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45 Ø16.

3. b Coté gauche

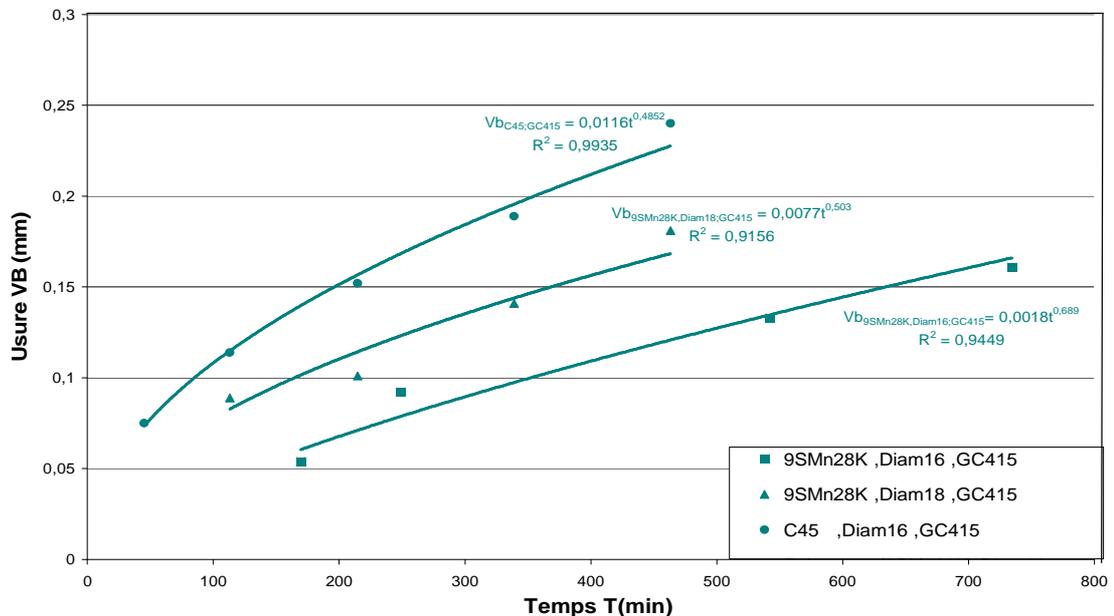


Figure 4.41 Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28KØ16 et 18 et du C45 Ø16.

- Les courbes montrent que l'influence de la nuance du matériau usiné (dureté) est plus importante que celle de la dispersion de brut (la profondeur de passe) sur l'usure pour chacun des outils (GC415, P25, S1P).

4.2.5 Influence de la main d'œuvre

1. L'usinage du C45 avec un outil en S1P par deux opérateurs.

1. a Coté droit

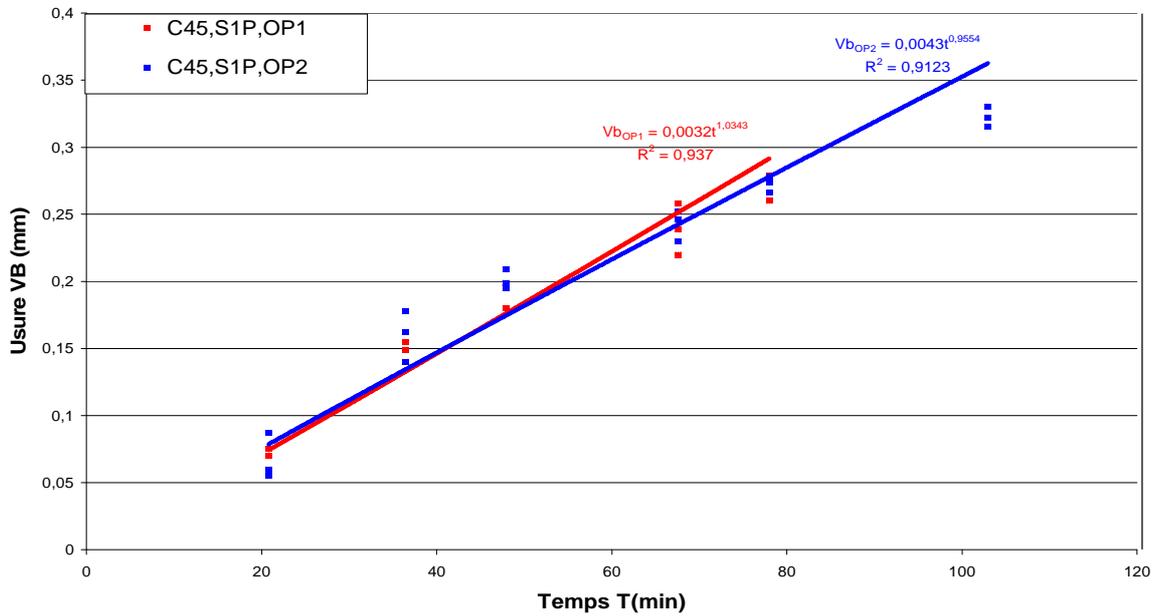


Figure 4.42 Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du C45 Ø16 (coté droit).

1. b Coté gauche

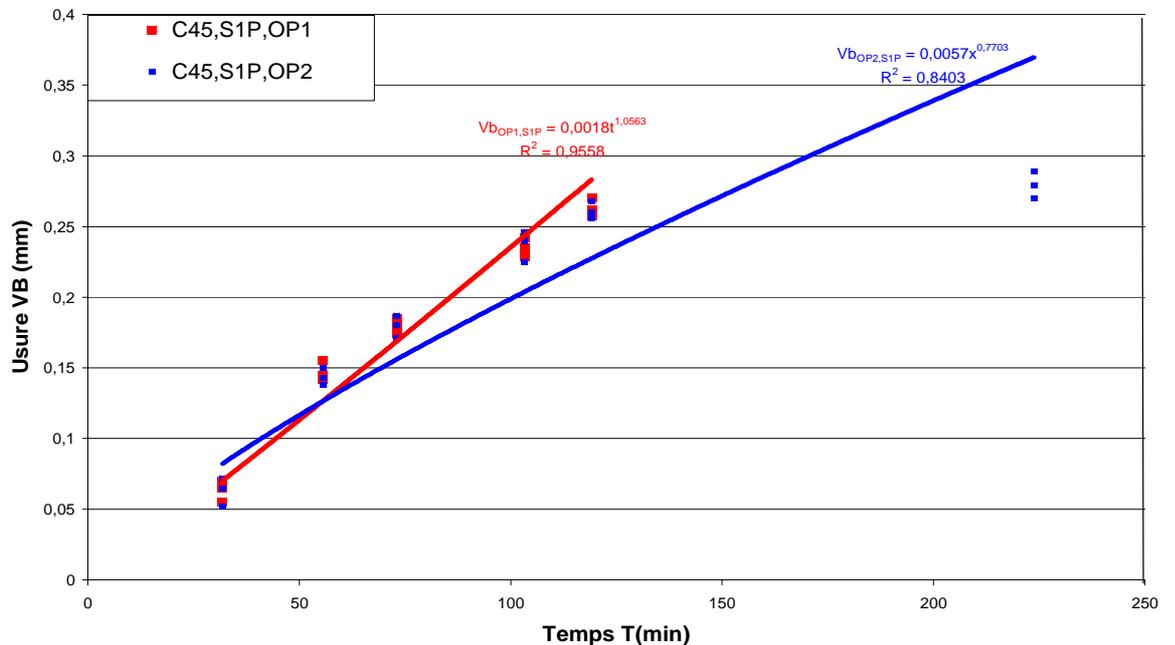


Figure 4.43 Evolution de l'usure du S1P pour l'usinage du C45 Ø16 (coté gauche).

2. L'usinage du 9SMn28K Ø16 avec un outil en GC415 par trois opérateurs.

2. a Coté droit

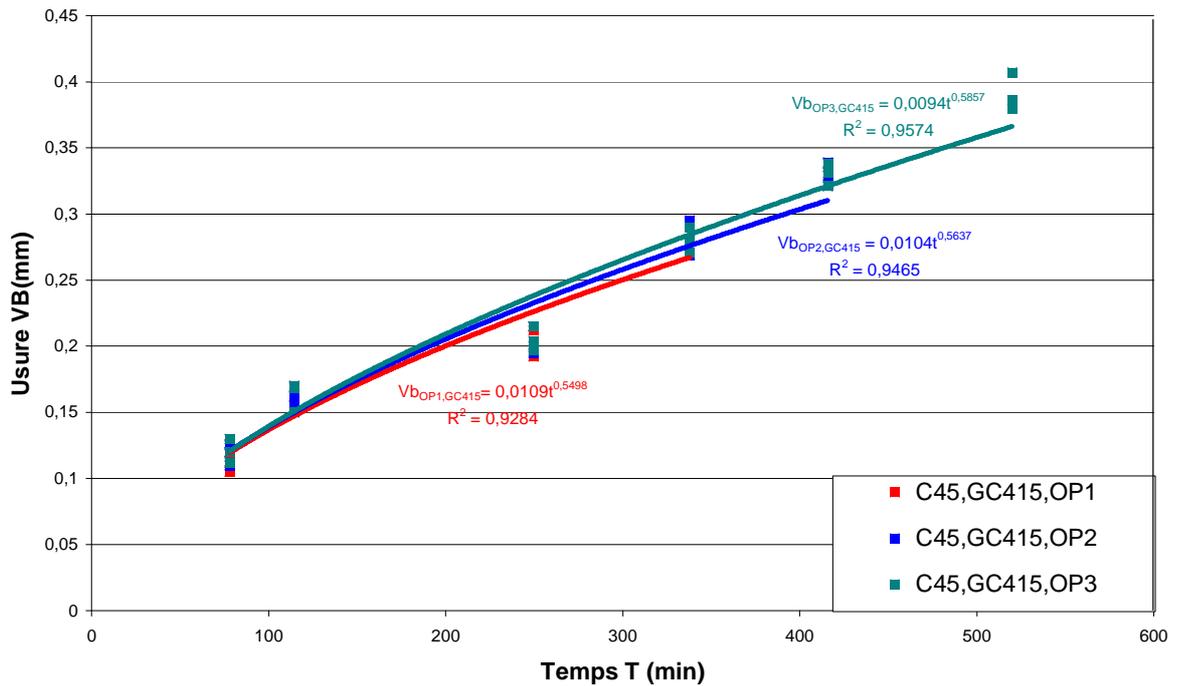


Figure 4.44 Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté droit).

2. b Coté gauche

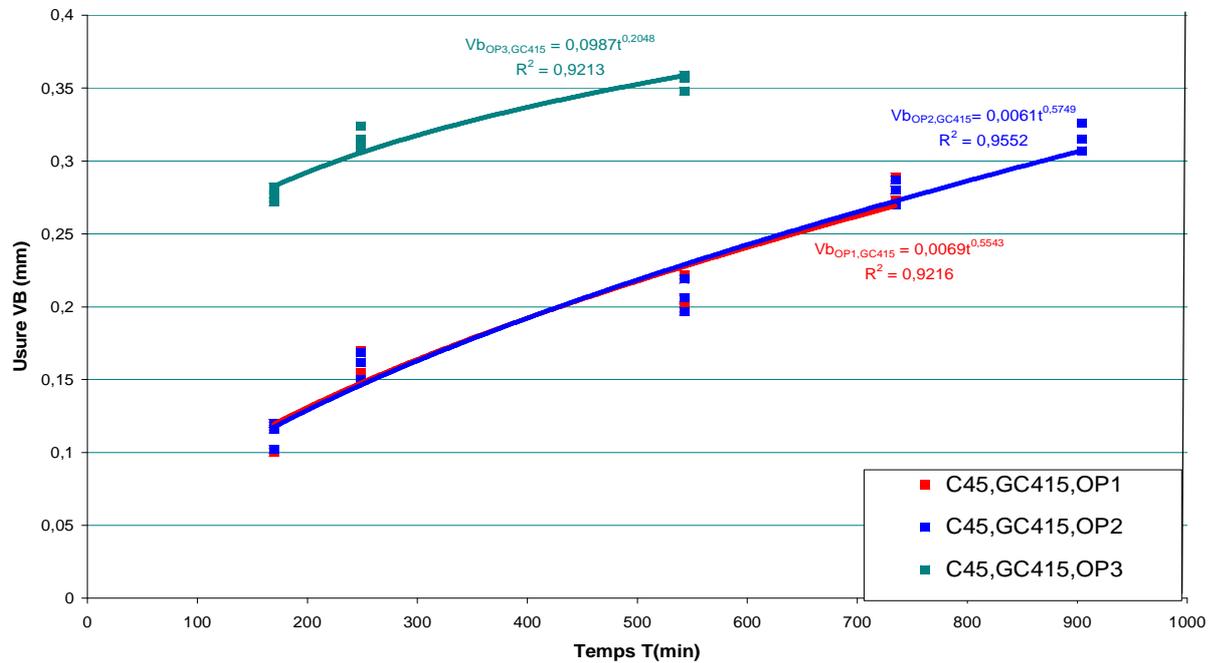


Figure 4.45 Evolution de l'usure du GC415 pour l'usinage du 9SMn28K Ø16 (coté gauche).

- Nous constatons ici que l'influence de la main d'oeuvre est significative, car à eux seuls revient la **décision** de changer l'outil à savoir à quelle usure VB il en est. Donc la différence entre ces opérateurs c'est le nombre de pièces usinées, d'où la qualité et la précision de ces dernières.

4.3 Etude de l'usure des outils de coupe au sein du laboratoire.

Les essais d'usinage de l'acier 9SMn28K, nécessaire à la réalisation de notre étude, ont été effectués au laboratoire de la coupe des métaux du département de génie mécanique à l'université du 8 Mai 1945 de Guelma. Cela va consister en une présentation du matériel noté ci-après.

4.3.1 Planification des expériences :

Les éléments du régime de coupe (V_c , f , a_p) ainsi que les paramètres géométriques de l'outil (α , γ , β , κ_r) sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la durée de vie de l'outil, la rugosité de la surface usinée, précision d'usinage représentant les paramètres de sortie. Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique : J-Goupy telle que :

$$Y = f(X_1 X_2 X_3 \dots X_n) \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

Y grandeur appelée (variable de sortie)

X variable appelé (paramètre d'entrée)

Pour parvenir à cette forme mathématique selon le type du plan, deux méthodes de planification des expériences sont présentes :

- a. méthode unifactorielle.
- b. méthode multifactorielle.

4.3.1.1 Méthode unifactorielle.

Cette méthode permet de déterminer un modèle mathématique exprimant la relation entre le paramètre d'optimisation étudié (Y) et un seul facteur prédéterminé (x)

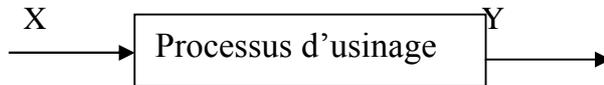


Figure 4.46 Schéma structural du processus de coupe.

Dans le domaine de l'usinage cette relation a généralement la forme suivante

$$Y = C_0 X_1^{C_1} \dots \dots \dots (2)$$

Ou : C_0 : C'est une constant qui tient compte de l'influence de tous les autres facteurs qui ne figurent pas dans la formule (2)

C_1 : c'est un exposant indiquant le degré d'influence de tous les autres facteurs X_1 sur le paramètre Y.

4.3.1.2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expérience d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation des procédés des systèmes complexes. La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tous d'abord le nombre d'essais nécessaires pour la réalisation des expériences (se détermine en fonction des facteurs de base c à d fonction d'entrée) ainsi que celui des niveaux de variation de ces facteurs. Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f et a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (rugosité, effort de coupe et usure) c'est la relation de la forme.

$$Y_1 = f(X_1, X_2, \dots X_i, \dots X_m) \dots \dots \dots (3).$$

Dans ce cas, la variation de ces facteurs se fait selon un plan d'expérience préalablement établi et qui prend en considération toutes les combinaisons de variation possibles (**tableau 4.12**)

Essais	Facteurs X_i										Paramètres		
	Valeurs naturelles					Valeurs codifiées							
	X_1	X_2	X_3	.....	X_M	X1	X2	X3	.....	X_M	Y_1	Y_2	Y_3
1	X_{1min}	X_{2min}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	-1	-1	-1	.....	-1	Y_{11}	Y_2	Y_3
2	X_{1max}	X_{2min}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	1	-1	-1	.....	-1	Y_{12}	Y_2	Y_3
3	X_{1min}	X_{2max}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	-1	1	-1	.....	-1	Y_{13}	Y_2	Y_3
4	X_{1max}	X_{2max}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	1	1	-1	.....	-1	Y_{14}	Y_2	Y_3
5	X_{1min}	X_{2min}	X_{3max}	.....	X_{Mmin}	-1	-1	1	.....	-1	Y_{15}	Y_2	Y_3
6	X_{1max}	X_{2min}	X_{3max}	.....	X_{Mmin}	1	-1	1	.....	-1	Y_{16}	Y_2	Y_3
7	X_{1min}	X_{2max}	X_{3max}	.....	X_{Mmin}	-1	1	1	.....	-1	Y_{17}	Y_2	Y_3
8	X_{1max}	X_{2max}	X_{3max}	.....	X_{Mmin}	1	1	1	.....	-1	Y_{18}	Y_2	Y_3
9	X_{1min}	X_{2min}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	-1	-1	-1	.....	-1	Y_{19}	Y_2	Y_3
10	X_{1max}	X_{2min}	X_{3min}	.....	X_{Mmin}	1	-1	-1	.....	-1	Y_{10}	Y_2	Y_3
.....
$N=p^m$	X_{1max}	X_{2max}	X_{3max}	.....	X_{Mmin}	1	1	1	.....	1	Y_{1N}	Y_{2N}	Y_{3N}

Tableau 4.12 Réalisation des essais d'après la méthode multifactorielle.

Chaque facteur X_i ne peut se varier que dans un intervalle bien déterminé.

Soit $X_i \in [X_{min}, X_{max}]$. On se sert des valeurs X_{min} , X_{moy} , X_{max} dans une expérience à trois niveaux ($p=3$), pour une expérience à deux niveaux ($p=2$), nous utilisons seulement le X_{min} et X_{max} .



Intervalle de variation
à trois niveaux.

Intervalle de variation
à deux niveaux.

Pour déterminer le nombre d'essais nécessaire, nous appliquons la formule suivante:

$$N=p^m \dots\dots\dots (4).$$

Ou N = nombre d'essais

P = nombre de niveaux de variation des facteurs de base.

m = nombre de facteurs de base.

Pour déterminer les critère d'usure, nous avons utilisé un plan d'expérience à huit essais : $p=2$ (deux niveaux), $m=3$ (trois paramètres d'entrée V_c , f et a_p), $N=2^3=8$ essais.

Tableau 4.13

Facteurs							
Essais	Valeurs naturelles			Valeurs codifiées			Paramètre
	Vc	f	ap	Z1	Z2	Z3	VB
1	Vc	f	ap	-1	-1	-1	VB ₁
2	Vc	f	ap	1	-1	-1	VB ₂
3	Vc	f	ap	-1	1	-1	VB ₃
4	Vc	f	ap	1	1	-1	VB ₄
5	Vc	f	ap	-1	-1	1	VB ₅
6	Vc	f	ap	1	-1	1	VB ₆
7	Vc	f	ap	-1	1	1	VB ₇
8	Vc	f	ap	1	1	1	VB ₈

Tableau 4.13 Plan d'expérience des essais de l'usure sur des éprouvettes en acier de décolletage 9SMn28K avec un outil de coupe GC415 pour un plan 2³.

4.3.2 Equipements et moyens utilisés

4.3.2.1 Machine outil utilisée: Tour conventionnel de la société chèque modèle SN40 figure 4.52 dont les caractéristiques sont les suivantes.

- Puissance du moteur électrique:6.6 kW
- Nombres de tours par minute: 45 à 2000 tr/min.
- Vitesse d'avance en millimètre par tour: 0.08 à 6.4 mm/tr.



Figure 4.47 Tour parallèle SN40

4.3.2.2 Matière usinée

Le matériau à usiner est un acier de décolletage de nuance 9SMn28K identique à celui qu'on usine à CYCMA, seulement de diamètre différent vu la différence des machines outils, **Figure 4.48**



Figure 4.48 Eprouvettes destinées pour la réalisation des essais d'usure pour un plan 2^3

4.3.2.3 Porte plaquette utilisée



Figure 4.49 Porte outil de coupe utilisé



Figure 4.50 Outil de coupe utilisé monté sur le porte outil

Le rôle du porte plaquette est important à plusieurs titres Figure 4.49 :

- Il permet de maintenir l'outil ou la plaquette en position rigide pendant l'usinage.
- Il oriente la plaquette dans l'espace .En effet, il contribue à la géométrie de coupe de l'outil.

4.3.2.4 Plaquettes utilisées

Les plaquettes utilisées **figure 4.51** choisies sont identiques à celles utilisées à CYCMA de même nuance et de même géométrie.

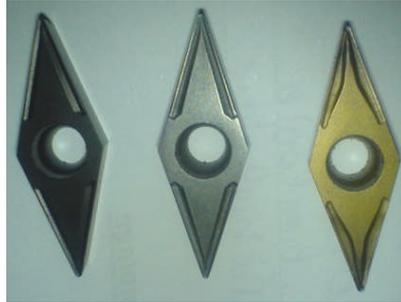


Figure 4.51 Plaquette sandvik VBMT 16-04-04-53
(GC425, S1P et GC415)

4.3.2.5 Microscope pour la mesure de l'usure en dépouille

Le microscope utilisé pour la mesure de l'usure en dépouille (VB) est du type **HUND (W.AD)**. La mesure s'effectue en plaçant la plaquette de coupe sous l'objectif du microscope, sur une table micrométrique à mouvements croisés et à affichage digital, avec une précision de 0.001 mm. La ligne de référence de la mesure est l'arête tranchante principale de la plaquette que l'on coïncide avec une référence située sur l'oculaire du microscope puis on déplace la plaquette de coupe à l'aide des jauges micrométriques jusqu'à la valeur limite supérieure de la bande d'usure VB. Après chaque séquence de travail la plaquette de coupe est démontée du porte outil, nettoyée, placée sous le microscope **Figure 4.52** pour mesurer les différentes grandeurs d'usure, après sous le microscope d'acquisition d'image **Figure 4.53** et enfin photographiée à l'aide d'un appareil photo numérique.



Figure 4.52 Microscope pour la mesure de l'usure



Figure 4.53 Microscope d'acquisition d'image de l'usure

4.3.2.6 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t , R_z) nous avons utilisé un rugosimètre surf test 301 (MITUTOYO) (figure 4.60), ce dernier est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), se déplaçant linéairement sur la surface usinée. Pour éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure a été faite directement sur la pièce sans avoir à la démonter de la machine. Figure 4.54



Figure 4.54 Mesure de la rugosité avec le rugosimètre portable mitutoyo

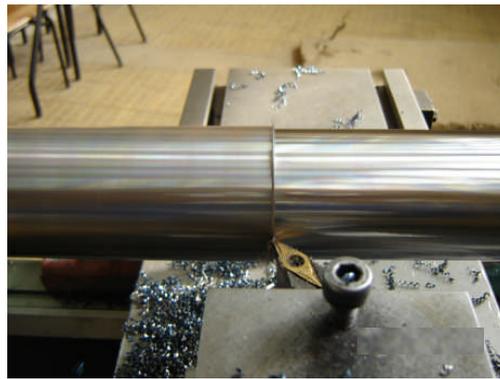


Figure 4.55 L'outil GC415 usinant le 9SMn28K Ø 80mm

4.4. Procédure expérimentale

Les essais de chariotage des éprouvettes cylindriques en acier de décolletage 9SMn28K ($\varnothing 80\text{mm}$, $L=290\text{mm}$, $HB=175$) sont effectués sur un tour parallèle extrêmement rigide **figure 4.47** dont la puissance de la broche est de 6.6 KW. L'objectif recherché est la détermination de l'influence des trois paramètres du régime de coupe (vitesse V_c , l'avance f et la profondeur de passe a_p) sur l'usure en dépouille VB des outils de coupe et sur le comportement de la rugosité (R_a , R_z , R_t) du fini de surface avec l'acquisition des efforts de coupe. Le seul matériau testé est le **GC415**.

Les essais ont été donc réalisés selon la méthode multifactorielle qui se fait selon un plan d'expériences avec $N=p^m=8$ essais. Tableau 4.14

Le suivi du comportement de l'usure en dépouille VB face aux variations des éléments du régime de coupe (V_c , f , et a_p) ont été réalisés à l'aide d'un microscope de type HUND (W-AD) avec une précision de 0.001mm.

Le suivi du comportement de la rugosité (Ra, Rz, Rt) est réalisé au moyen d'un rugosimètre qui est constitué d'un palpeur en diamant. La mesure a été faite sur la pièce usinée sans qu'elle soit démontée de la machine et cela pour éviter toute erreur possible et pour plus de précision la mesure prise est la moyenne de trois mesures. Quand au suivi du comportement des composantes des efforts de coupe, il est réalisé par l'intermédiaire d'un dynamomètre (KISTLER) qui compte parmi les équipements les plus fiables.

Vu la grande influence de l'usure en dépouille VB sur le changement de la rhéologie du contact outil pièce et vu la facilité de l'acquisition des moyens de control de celle-ci, elle sera suivie en priorité.

Pour des usinages courants en mécanique générale ou en outillage les limites acceptables pour les deux critères d'usure selon la norme ISO sont les suivants:

-Une largeur moyenne de la bande d'usure frontale [VB]=0.3 mm si elle est régulière ou une largeur maximale [VBmax]=0.5mm si elle est irrégulière.

Une profondeur maximale du crater [KT]=0.15mm.

4.4.1 Banc d'essais pour un plan 2³.

		Niveaux de facteurs						
Ordre des essais	Numéro des essais	Valeurs codifiées des facteurs			Valeurs naturelles des facteurs			
		Z1	Z2	Z3	N	f	ap	
1	4	-1	-1	-1	500	0,08	2	
2	8	1	-1	-1	710	0,08	2	
3	2	-1	1	-1	500	1,2	2	
4	3	1	1	-1	710	1,2	2	
5	1	-1	-1	1	500	0,08	3	
6	7	1	-1	1	710	0,08	3	
7	6	-1	1	1	500	1,2	3	
8	5	1	1	1	710	1,2	3	

Tableau 4.14 : Plan d'expériences des essais de l'usure sur des éprouvettes en aciers de décolletage 9SMn28K avec le matériau de coupe GC415 pour un plan 2³

4.4.2. Résultats de la méthode factorielle

(Essais réalisés au laboratoire de l'université 8 mai 45 Guelma).

Même si au départ on a essayé de simuler l'usure de l'outil sur tour parallèle en jouant sur la Vitesse de coupe, il s'avère qu'il est impossible d'obtenir les résultats souhaités. Donc cette tentative a échoué mais elle reste valable comme référence.

Nous nous sommes donc confrontés à plusieurs problèmes qui sont les suivants:

-Le tour parallèle conventionnel ne satisfait pas les conditions de travail du TORNOS BESHLEER:

- On ne peut pas atteindre les régimes de coupe
- Absence de lubrification
- Les outils ne correspondent pas à ce tour
- Les éprouvettes n'ont pas la même dureté.

❖ **Procédure**

1. **Pour la première éprouvette (163 HB)**

a. L'usinage du 9SMn28K de diamètre 80mm pour une longueur d'usinage de $L=290\text{mm}$ à un temps de coupe de $T=7.25\text{min}$ la passe et avec un régime de coupe de $N=500\text{ tr/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$, nous avons obtenu les résultats suivants:

-l'état de surface presque rugueux **figure 4.56**

-Copeaux longs **figure 4.57**

-apparition de l'arrête rapportée **figure 4.58**

-Cassure du bec de l'outil après une usure $VB=0,12\text{mm}$ à un temps d'usinage de $T=29\text{min}$. **figure 4.59**

b. L'usinage du 9SMn28K de diamètre 80mm pour une longueur d'usinage

de $L=290\text{mm}$ à un temps de coupe de $T=5\text{min}$ la passe et avec un régime de coupe de $N=710\text{ tr/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $a_p=2\text{mm}$, nous avons obtenu les résultats suivants:

-L'état de surface rugueux

-Copeaux longs

-Apparition d'arrête rapportée

-Cassure du bec de l'outil après une usure de $V_b=0.18\text{mm}$ à un temps de $T=30\text{min}$



Figure 4.56 Un outil en GC415 usinant le 9SMn28K



Figure 4.57 Copeaux longs

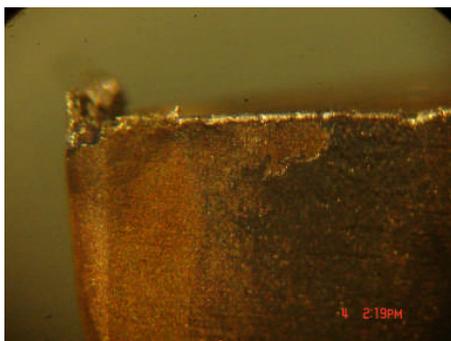


Figure 4.58 apparition de l'arrête rapportée

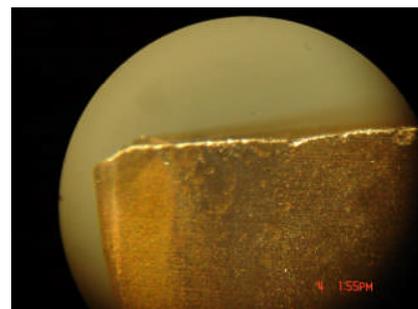


Figure 4.59 Disparition de l'arrête rapportée

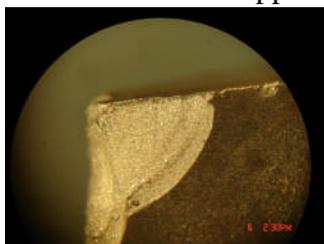


Figure 4.60 Effondrement du bec de l'outil

2. Pour la deuxième éprouvette (178 HB)

L'usinage du 9SMn28K de diamètre 80mm pour une longueur d'usinage de $L=290\text{mm}$ à un temps de coupe de $T=7.25\text{min}$ la passe et avec un régime de coupe de $N=500\text{ tr/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $ap=2\text{mm}$, nous avons obtenu les résultats suivants:

-Très bon état de surface

-Copeaux courts à

-Usure $VB=0.17\text{mm}$ à un temps de $T=87\text{ min}$ (12 passes)

Nous remarquons qu'après un temps de 87 min l'usure n'a pas atteint sa valeur limite qui est de $VB=0.3\text{mm}$



Figure 4.61 Copeaux courts

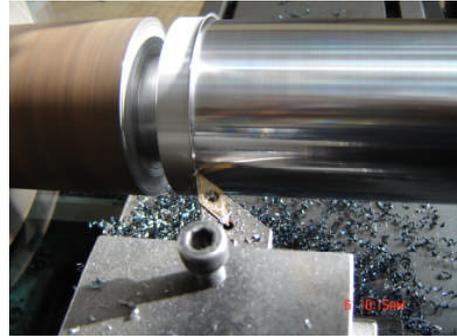
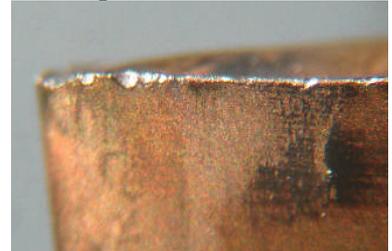
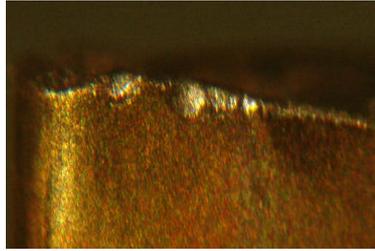
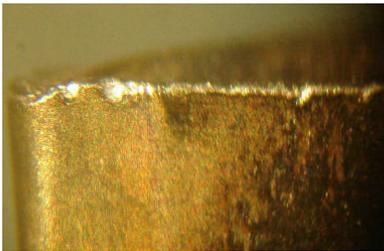


Figure 4.62 Un outil GC415 usinant le 9SMn28K Ø80

GC415; 9SMn28K Ø80mm; $N=500\text{ tr/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $ap=2\text{mm}$



GC415; 9SMn28K Ø80mm; $N=710\text{ tr/min}$; $f=0.08\text{mm/tr}$; $ap=2\text{mm}$

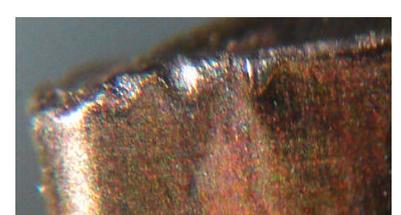
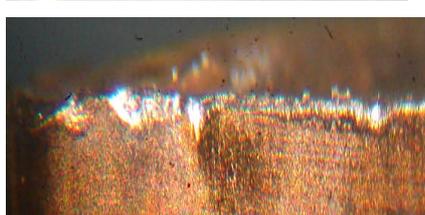
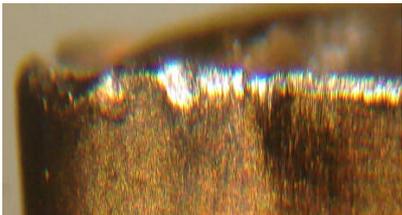
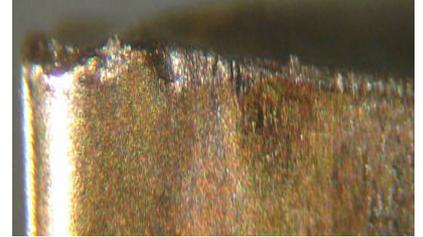
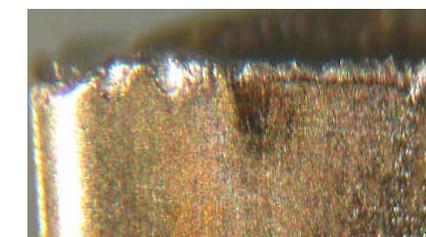
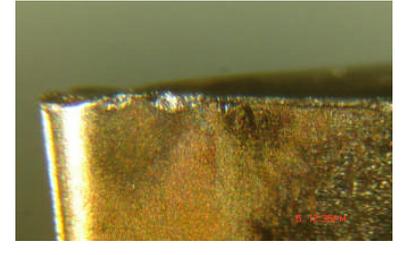
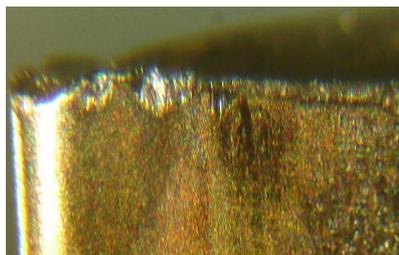
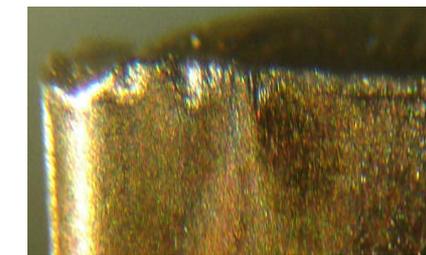


Figure 4.63: Photos d'usure frontale (au Laboratoire)

Rétrospective

Dans ce chapitre nous avons présenté deux parties distinctes. Mais elles restent très corrélées. La première partie donne une analyse du comportement de la machine TORNOS BESHLEER en introduisant le diagramme d'ISHIKAWA causes et effets. Ce dernier a permis de relater les **5 M**, (Matériel, Méthode, Main d'œuvre, Matière et Milieu) et de définir les variants et les invariants. En effet, il a révélé que 2 éléments sont les plus variants: l'usure de l'outil et les opérateurs. Ainsi, une expertise montre la différence qu'il y a entre deux opérateurs donnés quant au nombre de pièces usinées avant changement d'outil à cause de l'usure.

La deuxième partie concerne justement l'étude d'usure de l'outil sur site industriel c'est-à-dire en respectant les conditions d'atelier et non du laboratoire. Le résultat donne l'évolution de l'usure en fonction du nombre de pièces usinées.

Cette évolution est exprimée par un modèle mathématique qui fera le modèle mécanique qui traitera à son tour l'étude fiabiliste de l'usure. Donc on aura un couplage mécanique qui intègre à la fois l'usure de l'outil et le nombre de pièces usinées.

Les résultats obtenus au laboratoire n'ont pas aboutis aux résultats souhaités, seulement ils restent l'objet pour une étude avenir.

CHAPITRE V

. Etude fiabiliste : Cas de l'usure des outils

L'étude fiabiliste se fait en 5 étapes:

- Définir le modèle géométrique
- Déterminer le modèle mécanique de calcul
- Déterminer les modèles probabilistes
- Appliquer un scénario de défaillance exprimé par une fonction d'état limite $G(x)$
- Calculer la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité β .

5.1 Modèle Géométrique:

Dans le chapitre I, nous avons montré que dans tout procédé de fabrication participent les 5M : Le Matériel, la Matière, La Méthode, la Main d'œuvre et le Milieu. Le procédé, même s'il est initialement bien réglé, il subit des variations particulièrement quand il s'agit de l'outil de coupe. Ce dernier constitue l'élément le plus variant à cause de l'usure qu'on ne peut pas contrôler. Donc le modèle géométrique se résume en une arête tranchante subissant l'usure, Figure 5.1.

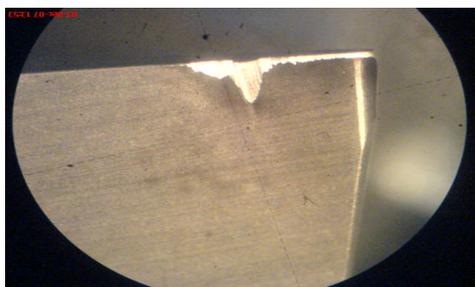


Figure 5.1: Usure en dépouille d'une plaquette en GC415

5.2 Modèle mécanique :

Il s'agit de déterminer une équation qui régit le comportement à l'usure de l'outil. Cette équation émane des résultats expérimentaux. Dans cette étude le modèle mécanique est déterminé à partir des courbes de tendances obtenues dans les résultats expérimentaux. A cet effet, nous obtenons un modèle par matière à usiner, par outil et conditions d'usinage. Dans notre cas nous avons utilisé 2 nuances d'acier dont l'une est à deux diamètres de brute et 3 nuances d'outils. Le tableau 5.1 résume ces modèles mécaniques.

Tableau 5.1 : Modèles mécaniques pour le calcul de la fiabilité

N°	Matière	Diamètre	Outil	Modèles Mécaniques	Numéro de l'équation
1	9SMn28k	18	S1P	$Vb_1=0.0177*Tk^{0.5220}$	(5.1)
2			P25	$Vb_2=0.0048*Tk^{0.7220}$	(5.2)
3			GC415	$Vb_3=0.0149*Tk^{0.4696}$	(5.3)
4		16	S1P	$Vb_4=0.0210*Tk^{0.4631}$	(5.4)
5			P25	$Vb_5=0.0144*Tk^{0.4926}$	(5.5)
6			GC415	$Vb_6=0.0064*Tk^{0.5680}$	(5.6)
7	C45	16	S1P	$Vb_7=0.0425*Tk^{0.4137}$	(5.7)
8			P25	$Vb_8=0.0229*Tk^{0.4998}$	(5.8)
9			GC415	$Vb_9=0.0069*Tk^{0.6772}$	(5.9)

Ou T est le temps d'usinage total qui est la somme des temps pour réaliser chaque palier de la pièce et k est le nombre de pièces.

$$T = \sum T_i \quad (5.10)$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \quad (5.11)$$

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= L_1 / (a_1 * n_1) \\ T_2 &= L_2 / (a_2 * n_2) \\ T_3 &= L_3 / (a_3 * n_3) \\ T_4 &= L_4 / (a_4 * n_4) \\ T_5 &= L_5 / (a_5 * n_5) \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

T_1, T_2, \dots, T_5 , temps d'usinage par palier, en min

L_1, L_2, \dots, L_5 , longueur des paliers, en mm

a_1, a_2, \dots, a_5 , avance de coupe pour usiner chaque palier, mm/tour

n_1, n_2, \dots, n_3 , fréquences de rotation par palier, tours/min

La fréquence n_i de rotation est déterminée en fonction de la vitesse de coupe et du diamètre à usiner :

$$n_i = 1000 * V_c / (\pi * d_i) \quad (5.13)$$

V_c étant la vitesse de coupe exprimée en m/min

La saisie de ces modèles est introduite à travers le module de modèle mécanique du code de calcul PHIMECA Soft. La Figure 5.2 montre un extrait de saisie de ces modèles. Le calcul déterministe est fait d'une manière paramétrique et automatique.

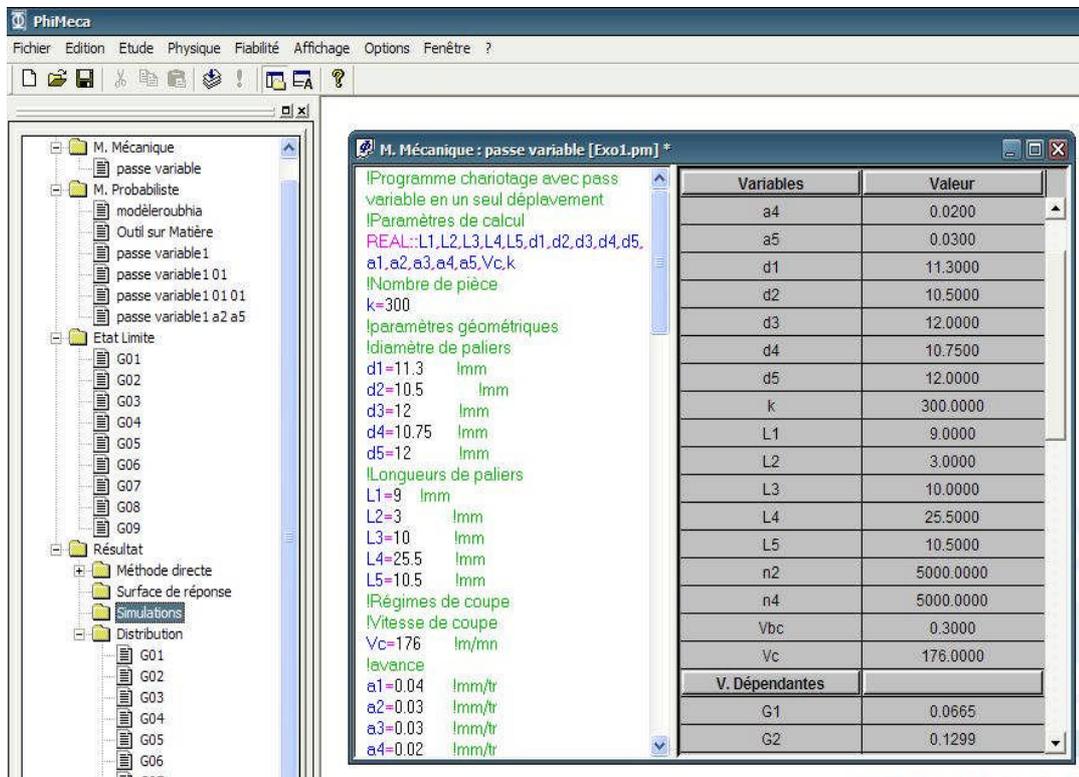


Figure 5.2 : Fenêtre de saisie de PHIMECA Soft des modèles mécaniques, probabilistes et des états limites

5.3 Modèles Probabilistes

Dans la section 5.2, nous avons présenté les modèles mécaniques où chacune des variables de chaque modèle a une valeur initiale donnée. En réalité, un certain nombre de variables indépendantes va avoir une définition stochastique, ceci est l'objet du modèle probabiliste. PHIMECA Soft donne un moyen très simple pour cette définition. Le modèle probabiliste est divisé en deux parties :

1. Déclaration des variables aléatoires
2. Définition des corrélations

La définition des caractéristiques stochastiques est une étape importante de l'analyse fiabiliste. Pour chacune des variables aléatoires, une loi de distribution et des paramètres associés doivent être choisis. Les informations introduites à ce stade doivent représenter les phénomènes réels en vue d'obtenir des résultats fiabilistes cohérents. Il s'agit donc de donner la valeur moyenne de la variable, et attribuer une loi de distribution statistique à la variable, avec un écart type.

La difficulté réside donc dans le choix du modèle probabiliste pour chaque variable aléatoire. Dans notre cas, les modèles probabilistes sont déterminés comme suit :

Pour les paramètres géométriques :

Dimensions de la pièce : la valeur moyenne est calculée à partir des résultats de mesures : c'est le cas des longueurs et diamètres. En réalité, ces dimensions sont contenues dans un intervalle de tolérances. Et c'est la moyenne qui est donnée. Les lois de distributions sont choisies normales pour toutes les cotes sauf pour les diamètres des portées de roulements où nous estimons qu'elles doivent être des lois lognormales car le diamètre a une tolérance exigeante qui est h_6 . L'écart supérieur étant égal à zéro et l'écart inférieur est de -0.011 .

Pour les régimes de coupe:

Ils dépendent de la précision du système. Le tour à décollet TORNOS Beschler est une machine très précise et tolère des coefficients de variation très serrés. C'est pour cela qu'on a attribué les données de précision de la machine. Les distributions suivent généralement des lois normales.

La distribution des valeurs de l'usure : elle est dépendante d'une part du système de mesure c'est-à-dire de la précision du microscope et d'autre part de l'opérateur qui doit avoir des connaissances pointues dans l'usure des outils de coupe. Ici le problème est de décider à quel point commence et se termine l'usure. La décision de départ est très importante car d'elle dépendront toutes les autres mesures. Encore faut-il garder le même opérateur ; ce n'est pas le cas dans notre travail car toutes les mesures ont été faites par notre soin suivant une même procédure.

Les corrélations sont donc imposées par le phénomène d'usure et dans le cas ci-présent, nous avons présenté les moyennes des variables avec les écarts types. Le Tableau 5.2 résume un exemple de modèles probabilistes appliqué dans cette étude. Au total au moins 20 variables sont prises en compte par le système de calcul de la fiabilité.

Tableau 5.2 : Paramètres de calcul avec leur distribution statistique

Type	Variable	Désignation	Unité	Distribution	Moyenne	Ecart Type	Observation
Régime de coupe	V_c^*	Vitesse de coupe	m/min	Déterministe	155 - 185	---	Contrôlée
	$n_{2..}$	fréquence de rotation	tours/min	Loi Normale	5000	50	Vitesse limitée par le système
	$n_{4..}$	fréquence de rotation	tours/min	Loi Normale	5000	50	
	a_1	avance sur palier 1	mm/t	Loi Normale	0.04	0.004	Dépendant de la Précision de la machine
	a_2	avance sur palier 2	mm/t	Loi Normale	0.03	0.003	
	a_3	avance sur palier 3	mm/t	Loi Normale	0.02	0.002	
	a_4	avance sur palier 4	mm/t	Loi Normale	0.05	0.005	
a_5	avance sur palier 5	mm/t	Loi Normale	0.02	0.002		
Géométrie	d_1	diamètre palier 1	mm	Loi Normale	11.3	0.05	Dépendant des Tolérances de cotes
	d_2	diamètre palier 2	mm	Loi Normale	10.5	0.05	
	d_3	diamètre palier 3	mm	Loi lognormale	12	0.0055	
	d_4	diamètre palier 4	mm	Loi Normale	10.75	0.05	
	d_5	diamètre palier 5	mm	Loi lognormale	12	0.0055	
	L_1	Longueur palier 1	mm	Loi Normale	9	0.4	
	L_2	Longueur palier 2	mm	Loi Normale	3	0.3	
	L_3	Longueur palier 3	mm	Loi Normale	10	0.25	
	L_4	Longueur palier 4	mm	Loi Normale	25.5	0.25	
Usure	V_b	Usure admissible	mm	Loi Normale	0.3	0.03	Acceptable
	k	Nombre de pièces		Déterministe	100 - 600		Comptabilisé

* V_c = constante. Le système calcule donc les fréquences de rotations en fonction du diamètre.

** Ces fréquences de rotation correspondent à la fréquence maximale limitée par le système. La profondeur de passe n'est pas constante et évolue en fonction du diamètre le long de la trajectoire de l'outil.

Le code de calcul PHIMECA Soft prend en charge ces modèles probabilistes une fois que les coefficients de variations et les corrélations sont ainsi définies. La Figure 5.3 montre un exemple de modèles probabilistes saisi dans PHIMECA Soft.

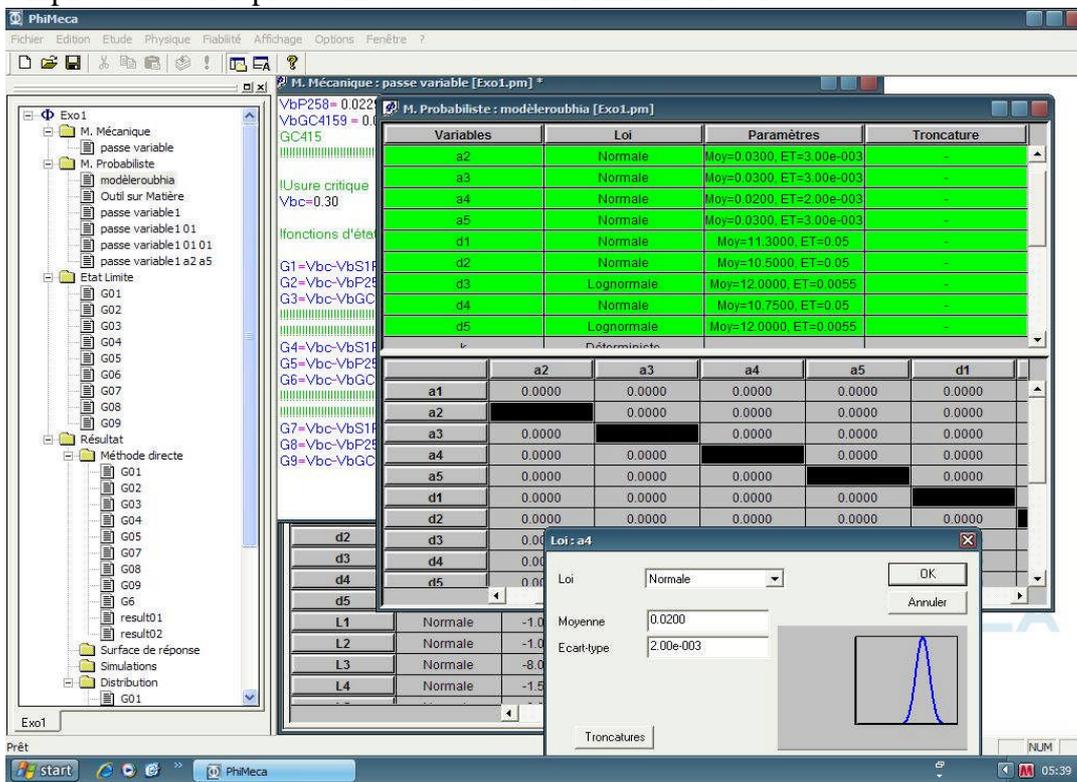


Figure 5.3 : Exemple de modèles probabilistes pour le calcul de fiabilité de l'usure des outils

5.4 Fonction d'Etat Limite

La probabilité de défaillance est définie par un vecteur de n variables aléatoires (X_1, \dots, X_n) , par le modèle mécanique avec une fonction de densité de probabilité $f_{X_i}(x_i)$ et $G(x_i)$ qui définit la fonction d'état limite résultant des calculs mécaniques.

$$Pf = \Pr[G(x) \leq 0] = \phi(\beta) \quad (5.14)$$

Dans le cas de l'usure des outils, l'état limite correspond à la valeur maximale de l'usure de l'outil, pour laquelle la précision de la cote à obtenir et l'état de surface ne sont plus garantis. Nous considérons dans ce cas les deux variables à savoir l'usure admissible V_b et le taux d'usure V_e obtenu expérimentalement en fonction des paramètres de coupes suivant le modèle:

$$Pf = \Pr[V_e \leq V_b] \quad (5.15)$$

Notre principale fonction d'état limite définissant le passage de la sûreté à la défaillance sera sous la forme :

$$G(V_b, V_e) = V_b - V_e \quad (5.16)$$

L'équation (5.16) gardera sa forme mais à l'intérieur, c'est V_e qui changera en fonction de la matière à usiner, la matière de l'outil, du diamètre du brut puisque le système régénère automatiquement la profondeur de passe le long de la trajectoire de l'outil et des régimes de coupe. Cependant, quelque soit la variabilité de ces paramètres, l'usure admissible restera constante. Nous obtenons ainsi 9 cas de figures à calculer, Tableau 5.1.

La Figure 5.4 montre un exemple de saisie de l'état limite sous PHIMECA Soft.

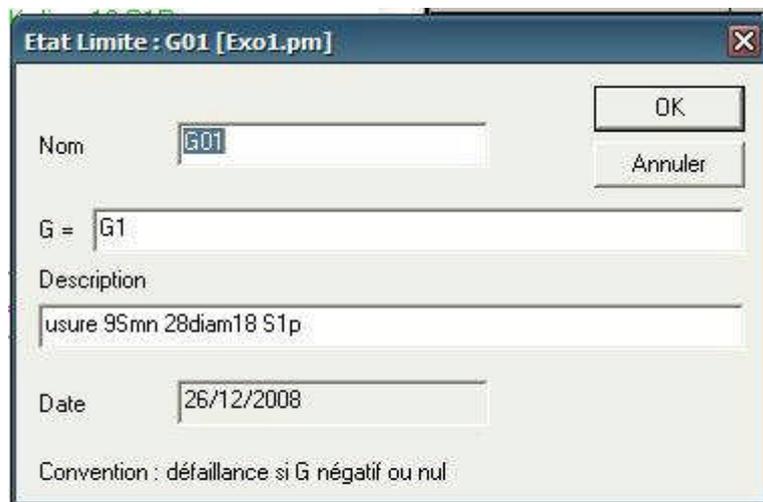


Figure 5.4 : Exemple de saisie de l'état limite

5.5 Calcul de l'indice de Fiabilité β :

5.5.1 Analyse Physique et Sensibilité des variables :

Le calcul fait recours aux codes de calculs puissants s'appuyant sur des méthodes d'approximations FORM/SORM ou bien de Monté Carlo. Dans ce travail, le calcul de la fiabilité est réalisé sous PHIMECA Soft [56].

Avant de lancer un calcul, il faut vérifier les caractéristiques déterministes du modèle physique et la sensibilité physique.

Phimeca soft, d'une part permet grâce à l'item '*Analyse Physique*' de réaliser un calcul mécanique déterministe en vue de vérifier la cohérence du modèle mécanique et la bonne évaluation de l'état limite. Il faut s'assurer que, dans cette étape, les valeurs moyennes donnent un état limite positif, sinon la position de départ est une configuration défailante ; ce qui n'est pas logique dans les démarches de conception.

Phimeca soft, d'autre part permet d'effectuer une analyse de sensibilité déterministe de la fonction d'état limite par rapport aux variables sélectionnées. Cette étape permet d'identifier le poids des différentes variables et de distinguer les types de variables : résistance ou sollicitation.

La fenêtre des résultats donne les dérivées de la fonction d'état limite par rapport aux variables sélectionnées. Ces dérivées sont évaluées aux valeurs courantes du modèle physique. La figure 5.5 donne un exemple de l'analyse de sensibilité des variables.

M. Mécanique		
passe variable		
Etat Limite		
G04	usure 9Smn 28diam16 S1p	
G = G4	0.0929	
Variables	Valeur	Sensibilité
a1	0.0400	0.2328
a2	0.0300	0.1368
a5	0.0300	0.5127
d1	11.3000	-8.25e-004
d2	10.5000	0.0000
d5	12.0000	-1.28e-003
k	300.0000	-3.20e-004
L1	9.0000	-1.04e-003
L2	3.0000	-1.37e-003
L5	10.5000	-1.47e-003
Vbc	0.3000	1.0000
Vc	176.0000	2.24e-004

Figure 5. 5 : Exemple d'analyse de sensibilité de variables

Les premières observations montrent que la variable la plus importante est l'usure admissible qui représente la défaillance du système. Elle est suivie par l'avance a_5 sur le palier de diamètre d_5 ; chose logique car c'est le diamètre qui réclame le plus de précision avec une portée de la pièce montée en l'air maximale et l'outil pourrait être déjà usé. Le risque de voir la cote ratée est maximal à ce niveau.

Mais ceci est à titre indicatif, car les calculs ne prennent pas encore en considération les incertitudes dans les variables.

5.5.2 Analyse Fiabiliste :

L'analyse de la fiabilité sous PHIMECA Soft peut s'effectuer par 5 méthodes :

L'analyse fiabiliste par la méthode directe, l'analyse fiabiliste par la surface de réponse, l'analyse par simulation de Montée Carlo, l'analyse de distribution et l'étude fiabiliste paramétrique. L'explication de ces analyses est fournie dans le manuel d'utilisation de PHIMECA Soft [56].

Une série de résultats peut être obtenue pour en faire des outils de décisions. Le problème dans ces conditions est de prendre la bonne décision qui n'est pas l'affaire d'une personne mais c'est de tout un groupe de personnes impliquées dans la production des pièces.

La Figure 5.6 illustre une batterie de résultats qui doit être soigneusement traitée pour une prise de décision pour un meilleur rendement de l'unité de production.

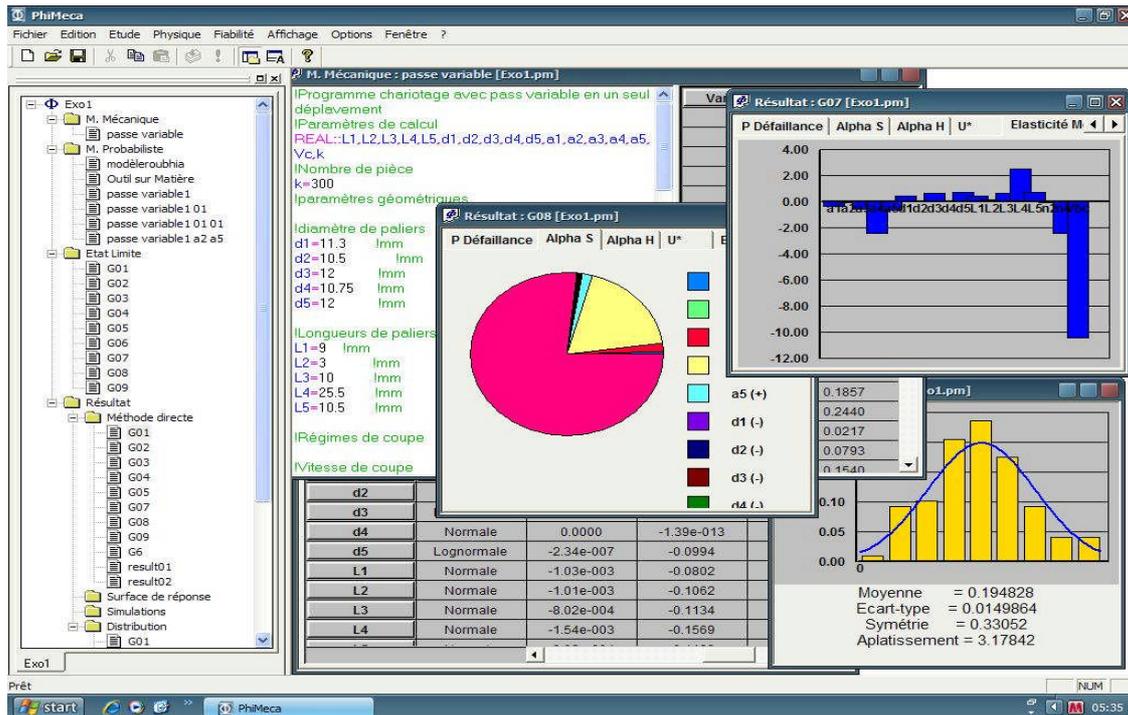


Figure 5. 6 : Exemple de résultats d'analyse de fiabilité sous PHIMECA Soft

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude paramétrique en calculant l'indice de fiabilité β , pour les différents modèles mécaniques (Tableau 5.1) et son évolution en fonction du nombre de pièces à usiner. En plus, afin de réserver la part d'importance des variables de calculs, des analyses fiabilistes directes ont été effectuées pour des valeurs moyennes bien choisies. L'analyse de distribution du système de calcul étant faite pour montrer la variabilité de la distribution stochastique des modèles mécaniques.

5.5.3 Analyse de Distribution des modèles mécaniques

Les résultats de cette analyse se résument à donner les histogrammes correspondant à chaque modèle mécanique pour le même état limite. 9 histogrammes sont affichés autour de la moyenne. Il est à constater que dans chacun des cas nous obtenons une distribution donnée. C'est ce qui rend le calcul fiabiliste très représentatif et plus significatif pour une prise de décision. La Figure 5.7 illustre ces distributions.

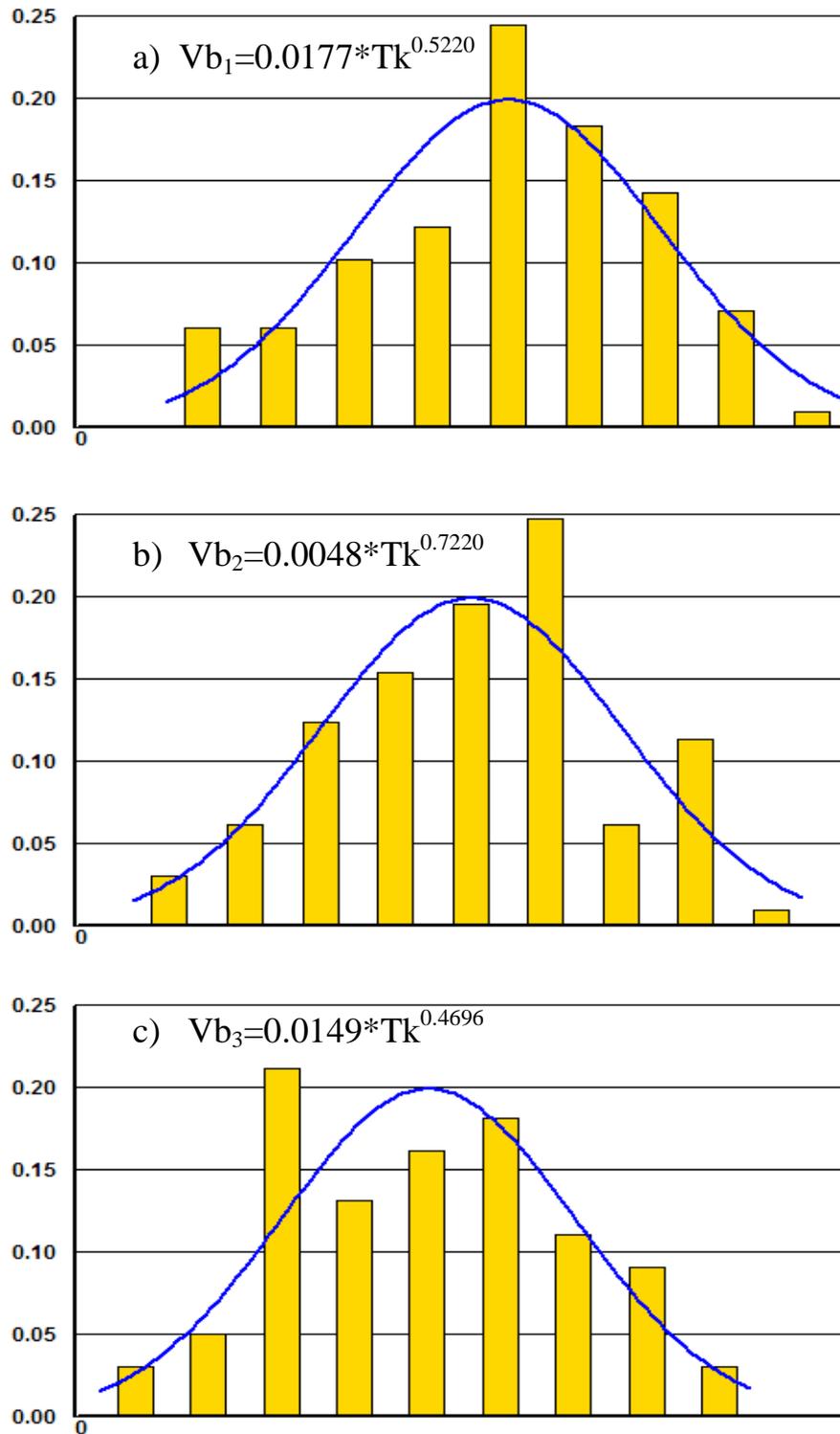


Figure 5.7 a) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques

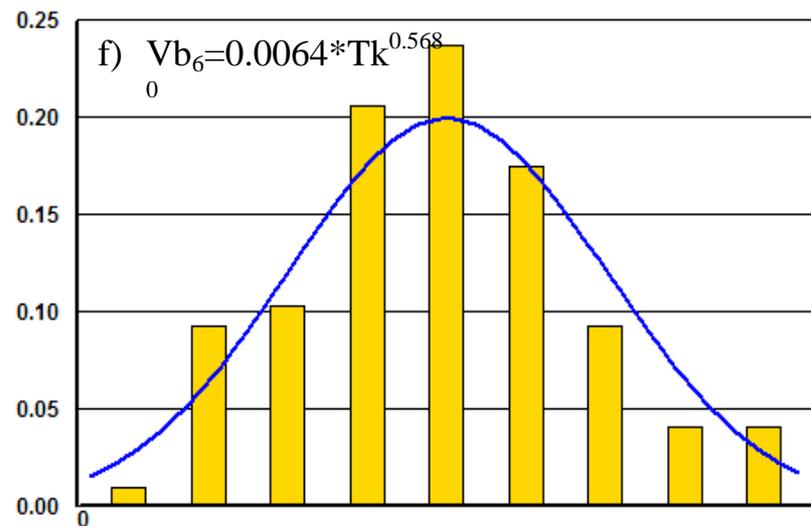
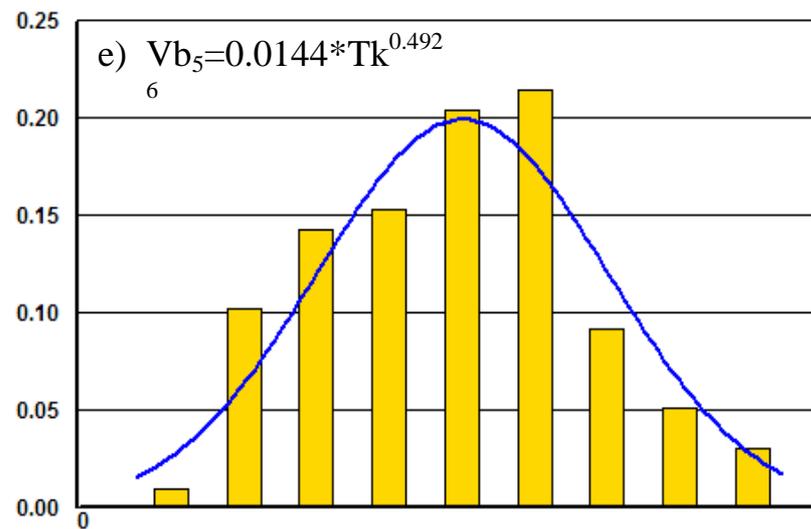
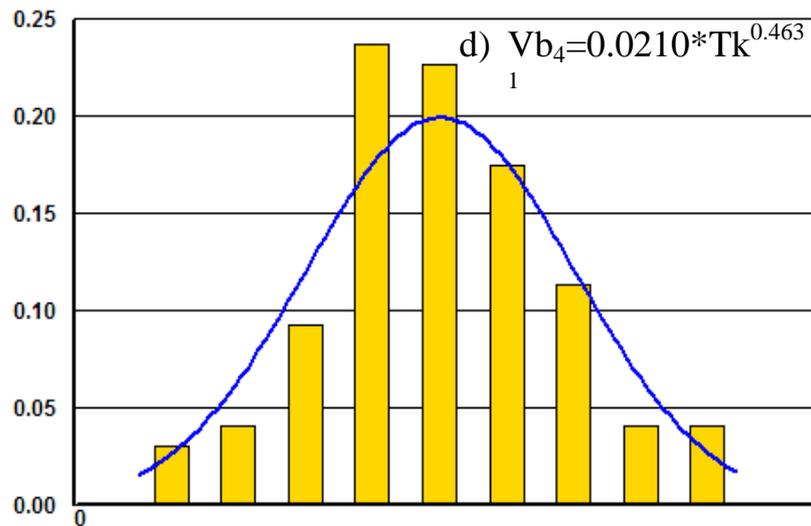


Figure 5.7 b) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques

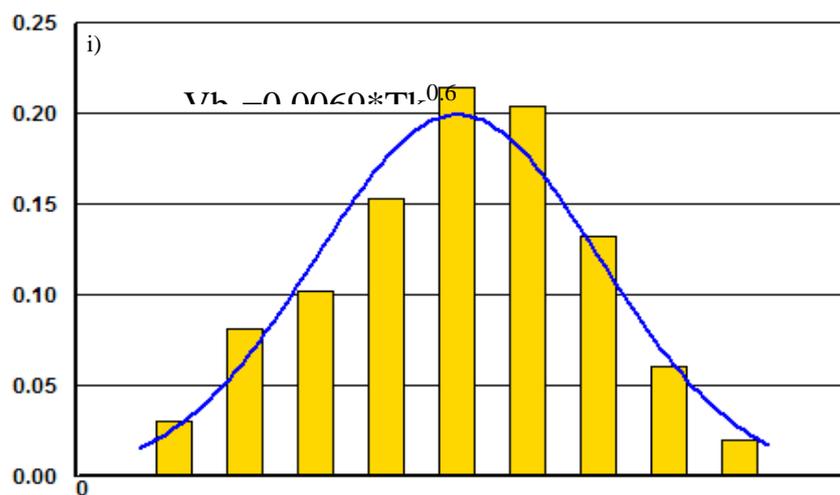
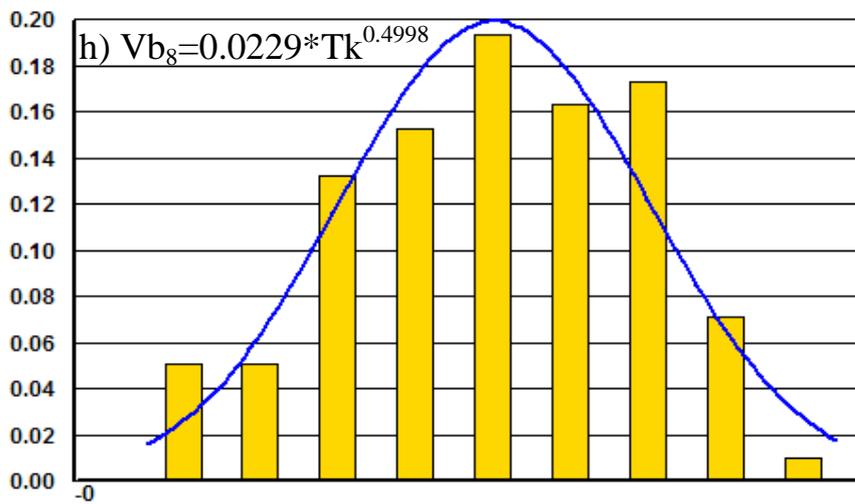
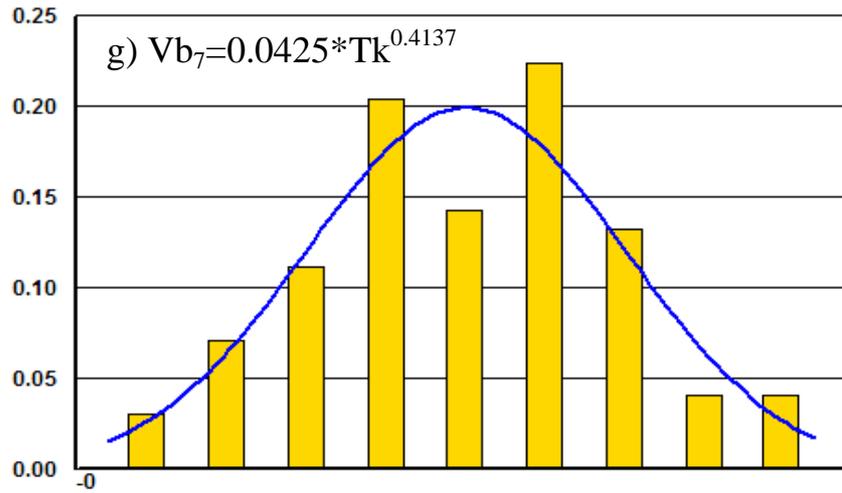


Figure 5.7 c) : Illustration des histogrammes pour les 9 modèles mécaniques

5.5.3 Etude Paramétrique Fiabiliste

Les calculs de fiabilité ont été menés par l'intermédiaire d'une surface de réponse à partir de 9 calculs numériques puis par simulation de Monte-Carlo sur la surface de réponse. Cette surface de réponse est logiquement supposée symétrique par rapport à l'axe des ordonnées puisque les résultats sont indépendants du signe de l'amplitude du taux d'usure spécifique.

Les variations de la fonction de fiabilité R en fonction du nombre de pièces à usiner pour une vitesse de coupe de fonctionnement donnée, montrent que celle-ci peut être utilisée pour estimer la durée de vie de l'outil qui a une relation directe avec la précision et l'état de surface à obtenir.

Cependant la décision de fiabiliser le système est de considérer une valeur acceptable de l'indice de fiabilité. Ceci dépend de la gravité et du risque que peut engendrer la défaillance du système considéré. Dans l'ingénierie, il est recommandé de prendre une probabilité de défaillance de 10^{-4} ($\beta=3.72$) pour les constructions générales, dans les constructions aéronautiques 10^{-5} ($\beta=4.26$) et dans les constructions nucléaires, il faut être plus exigeant c'est à dire minimiser la probabilité de défaillance à 10^{-6} ($\beta=4.56$).

Dans le cas courant on peut prendre un indice de fiabilité acceptable de **3.7191**, pour estimer le nombre de pièces à usiner en fonction des avances, des diamètres des paliers, des longueurs des paliers, des profondeurs de passes, de la matière à usiner et bien évidemment de la matière de l'outil et de sa géométrie.

Quatre cas de figures sont étudiés en fonction de la réalité de l'usine :

1) Etude fiabiliste de l'effet du diamètre de la pièce brute (Figure 5.8)

(Ce cas se présente suite à la rupture des stocks des barres de diamètre 16 mm. Pour y remédier, l'entreprise prend des barres de diamètre 18 mm. La matière étant du 9SMn28k).

2) Etude fiabiliste de la matière de l'outil (Figure 5.9)

(Dans ce travail trois types d'outils communément utilisés par l'entreprise sont étudiés : S1P, P25 et GC415)

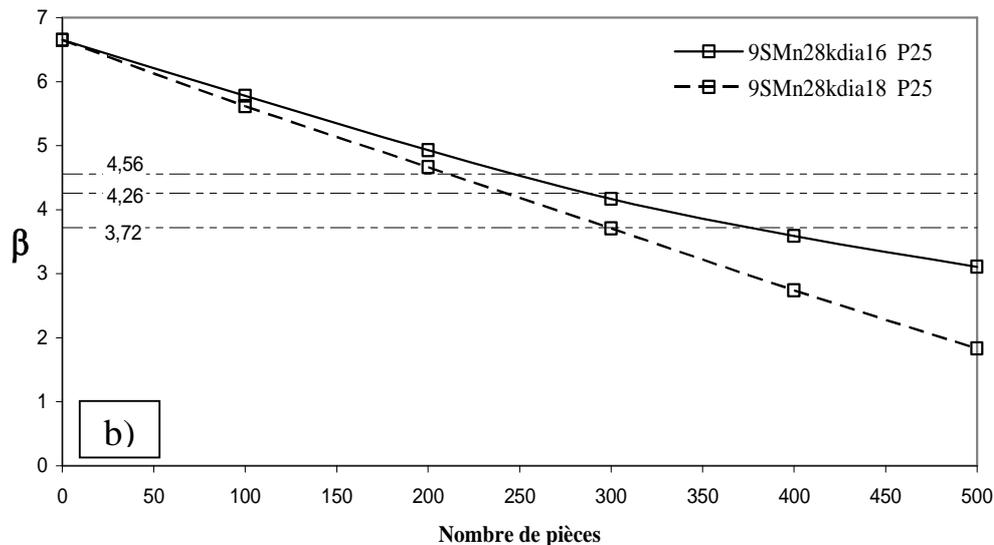
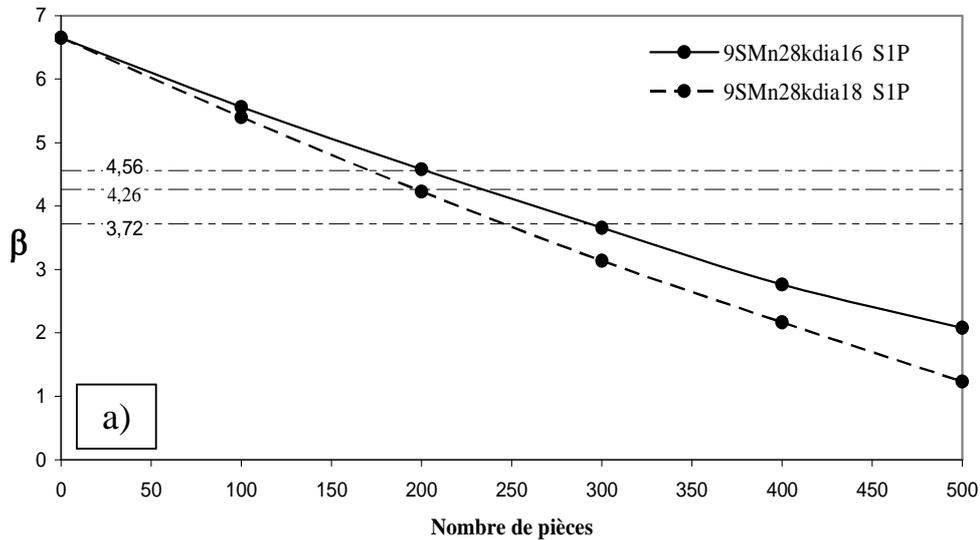
3) Etude fiabiliste de la matière à usiner (Figure 5.10).

(Deux matières ont fait l'objet de cette étude : 9SMn28k et le C45)

4) Etude de l'importance des variables de calcul (Figure 5.13)

5.5.3.1 : Etude fiabiliste de l'effet du diamètre de la pièce brute

Ce cas est tiré de la réalité dans l'entreprise. En effet, l'idéale est de prendre une barre laminée de diamètre 16 mm pour réaliser l'axe de la roue. Cependant, il arrive qu'il y ait rupture de stock et dans ces conditions, pour répondre aux besoins du marché dans les délais, l'entreprise utilise la matière disponible c'est-à-dire la même matière mais elle sacrifie 2 mm dans le diamètre en prenant une barre de 18 mm. Il est donc intéressant de savoir à tous les niveaux de production quelles pertes sont engendrées. Avec un code de calcul de fiabilité ceci est possible. L'objectif donc est de calculer l'indice de fiabilité en fonction du nombre de pièces à usiner pour 2 diamètres de barre. La Figure 5.8 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité β de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et du diamètre du brute. Ce dernier exprime l'effet de la profondeur de passe puisqu'elle est calculée par le système de production en fonction du diamètre à obtenir.



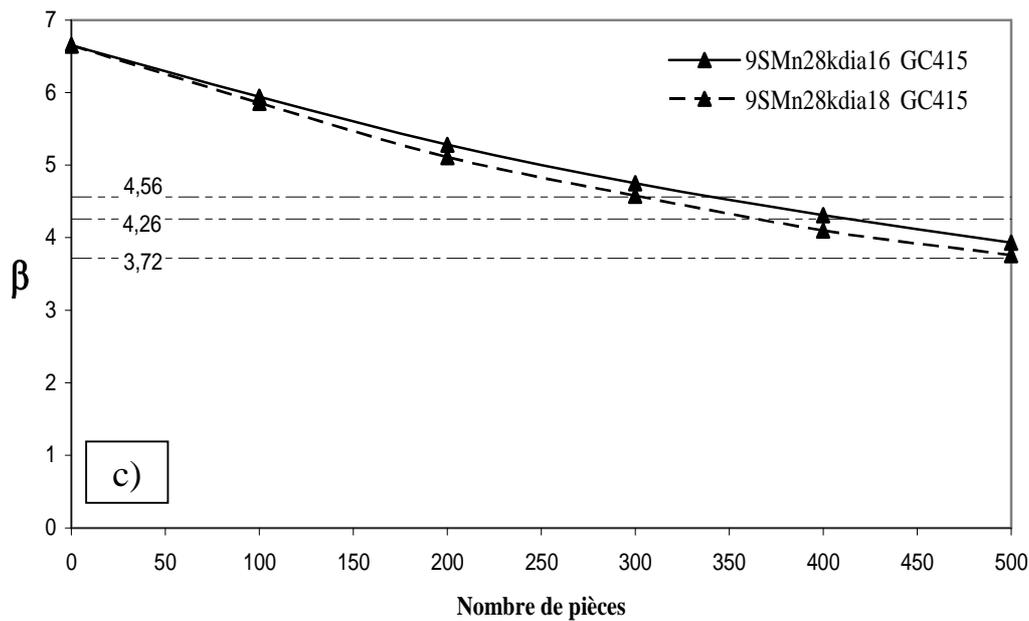


Figure 5.8 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et l'effet de la profondeur de passe. a) S1P, b) P25 et C) GC415

Si on considère l'indice de fiabilité acceptable de 3.72, il ressort des trois cas de figures que pour assurer l'état de surface et la précision d'usinage, les outils doivent être changés impérativement selon la matière de l'outil de coupe, la matière à usiner et le diamètre de l'ébauche comme il est indiqué dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outils : influence du diamètre de l'ébauche

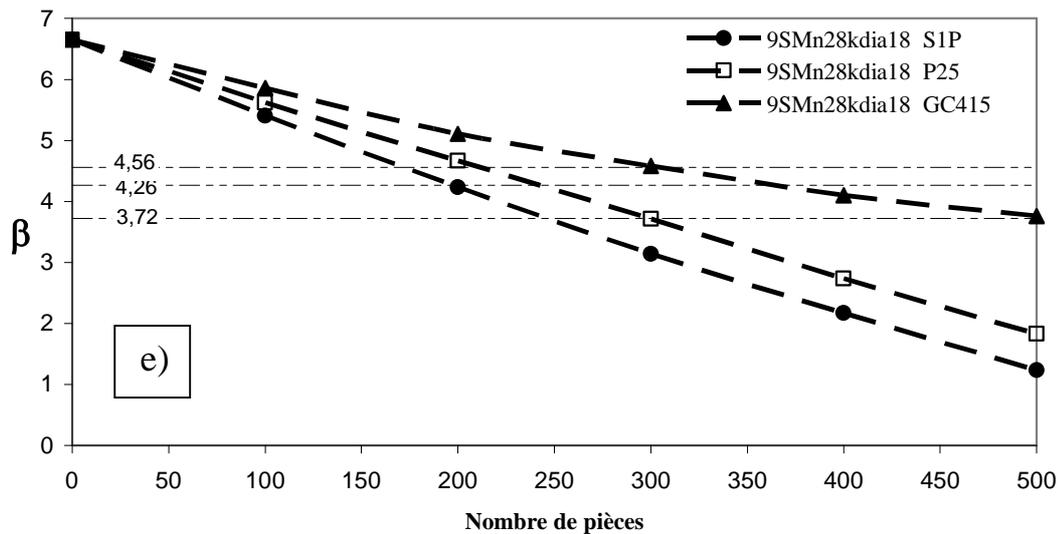
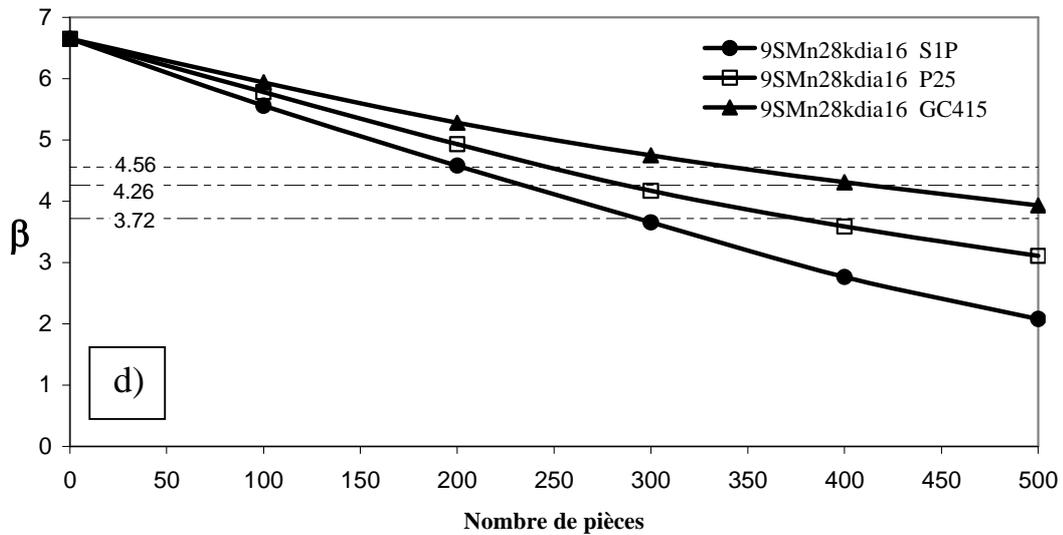
N°	Type d'outil	Matière à Usiner	Diamètre Ebauche	Nombre de pièces pour							
				β		Pf		β		Pf	
				3.72	10^{-4}	4.26	10^{-5}	4.56	10^{-6}		
1	S1P	9SMn28k	16	295		235		200			
2			18	245		195		170			
3	P25		16	380		280		252			
4			18	300		245		220			
5	GC41		16	525		420		350			
6	5		18	510		370		310			

Le Tableau 5.3 est très indicatif quant à la décision de changer d'outil. En effet quelque soit l'opérateur, dans le cas où l'on respecte les régimes de coupe fixés au départ, le fait de respecter les résultats du tableau assure une maîtrise dans la production et une meilleure gestion. Cependant, il est vrai que dès fois l'usure admissible ne sera pas atteinte, mais on est sûr d'éviter beaucoup de rébus de pièces qui causent beaucoup de pertes dans les coûts de production.

5.5.3.2 : Etude fiabiliste de la matière de l'outil

Pour réaliser la fabrication de l'axe de la roue, le plus souvent c'est le GC415 qui est utilisé, seulement il arrive que l'usine tombe en rupture de stock, chose qui l'oblige à utiliser le P25 quand il existe en stock, si non c'est le S1P.

Il est donc intéressant de savoir à tous les niveaux de production quelle est l'outil qui produit plus de pièces. Avec un code de calcul de fiabilité ceci est possible. L'objectif donc est de calculer l'indice de fiabilité en fonction du nombre de pièces à usiner pour trois outils de coupe. La Figure 5.9 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité β de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et de la matière de l'outil. Ce dernier exprime l'effet de la nuance et du revêtement des outils de coupe.



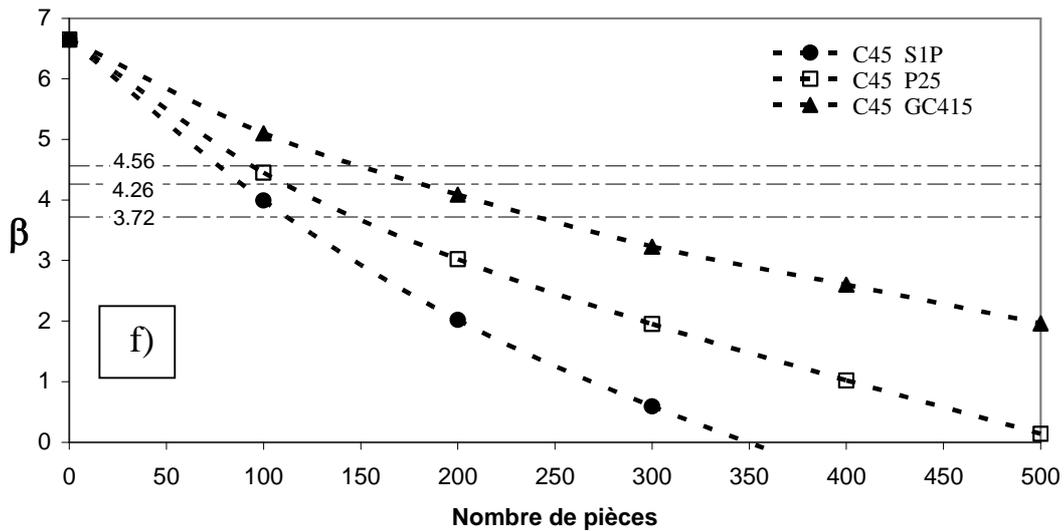


Figure 5.9 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et l'effet de la nuance et du revêtement des outils. d) 9SMn28KØ16,e) 9SMn28KØ18et f) C45 Ø16.

Si on considère l'indice de fiabilité acceptable de 3.72, il ressort des trois cas de figures que pour assurer l'état de surface et la précision d'usinage, les outils doivent être changés impérativement selon la matière de l'outil de coupe, la matière à usiner et le diamètre de l'ébauche comme il est indiqué dans le Tableau 5.4.

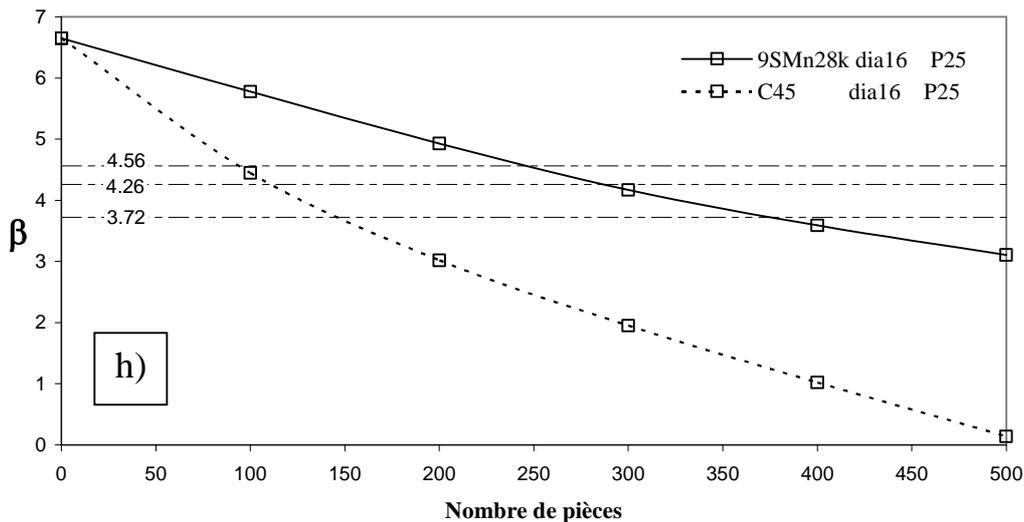
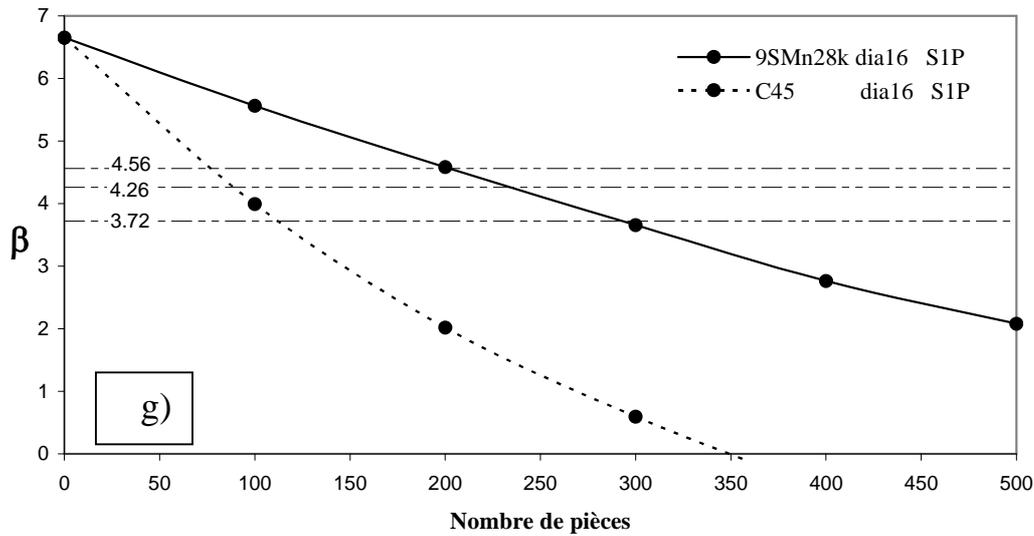
Tableau 5.4 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outils : influence de la matière de l'outil de coupe.

N°	Type d'outil	Matière à Usiner	Diamètre Ebauche	Nombre de pièces pour							
				β		P_f		β		P_f	
				3.72	10^{-4}	4.26	10^{-5}	4.56	10^{-6}		
1	GC415	9SMn28k	16	525		410		350			
2	P25		16	380		280		252			
3	S1P		16	295		235		200			
4	GC415		18	510		370		310			
5	P25		18	300		245		220			
6	S1P		18	245		195		170			
7	GC415	C45	16	248		175		150			
8	P25		16	150		110		90			
9	S1P		16	120		90		75			

Le Tableau 5.4 est très indicatif quant à la décision de changer d'outil. En effet quelque soit l'opérateur, dans le cas où l'on respecte les régimes de coupe fixés au départ, le fait de respecter les résultats du tableau assure une maîtrise dans la production et une meilleure gestion.

5.5.3.3 : Etude fiabiliste de la matière à usiner

Ce cas est tiré de la réalité dans l'entreprise. En effet, l'idéale est de prendre une barre laminée de diamètre 16 mm et de nuance 9SMn28K pour réaliser l'axe de la roue. Cependant, il arrive qu'il y ait rupture de stock et dans ces conditions, pour répondre aux besoins du marché dans les délais, l'entreprise utilise la matière disponible c'est-à-dire le même diamètre mais de nuance différente(C45). Il est donc intéressant de savoir à tous les niveaux de production quelles pertes sont engendrées. Avec un code de calcul de fiabilité ceci est possible. L'objectif donc est de calculer l'indice de fiabilité en fonction du nombre de pièces à usiner pour deux matières de nuance différente. La Figure 5.10 illustre l'évolution de l'indice de fiabilité β de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et de la matière à usiner. Ce dernier exprime l'effet de la matière à usiner.



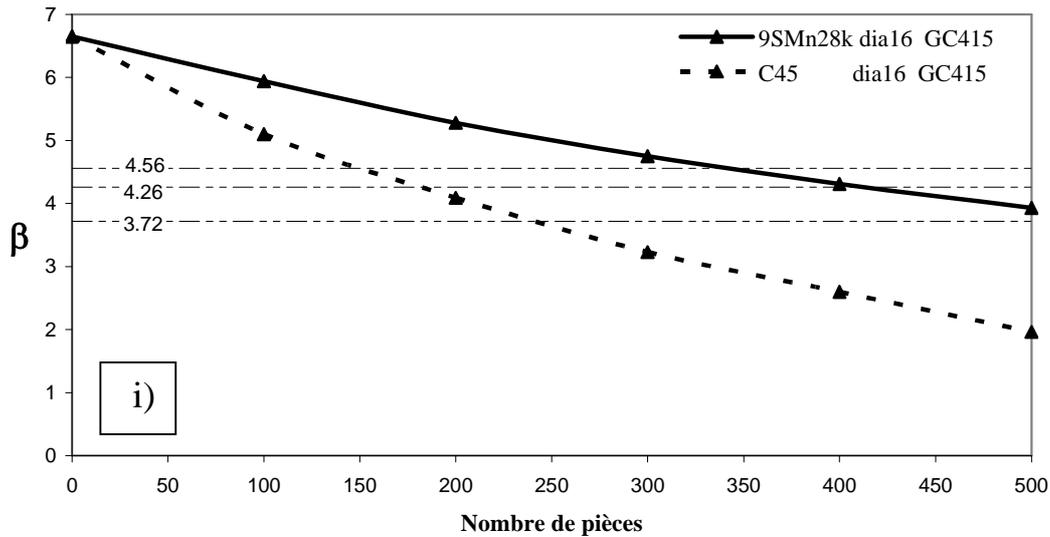


Figure 5.10 : Evolution de β , indice de fiabilité de l'outil de coupe en fonction du nombre de pièce et l'effet de la matière à usiner. g) S1P,h) P25 et i) GC415.

Tableau 5.5 : Nombre effectif de pièces avant changement d'outil : influence de la matière à usiner

N°	Type d'outil	Matière à Usiner	Diamètre Ebauche	Nombre de pièces pour							
				β		Pf		β		Pf	
				3.72	10-avr	4.26	10-mai	4.56	10-mai		
1	S1P	C45	16	120		90		75			
2		9SMn28K	16	295		235		200			
3	P25	C45	16	150		110		90			
4		9SMn28K	16	380		280		252			
5	GC415	C45	16	248		175		150			
6		9SMn28K	16	525		420		350			

Le Tableau 5.5 est très indicatif quant à la décision de changer d'outil. En effet quelque soit l'opérateur, dans le cas où l'on respecte les régimes de coupe fixés au départ, le fait de respecter les résultats du tableau assure une maîtrise dans la production et une meilleure gestion.

Alors qu'au niveau de l'entreprise, les opérateurs n'ont que leurs contrôles visuels qui décident du temps de changement des outils ; le premier opérateur cherche la quantité, le second veut la qualité et le résultat est un nombre de pièces rebutées. Le tableau 5.6 illustre la réalité sur site.

N°	Type d'outil	Matière à Usiner	Diamètre Ebauche	Nombre de pièces		Résultats Phimeca	Variation En %	
				Opérateur 1	Opérateur 2		PHI	PHI/O2	PHI/O1
				O1	O2			
1	GC415	9SMn28 k	16	650	550	525	0.95	0.81
2	P25		16	570	400	380	0.95	0.67
3	S1P		16	450	335	295	0.88	0.66
4	GC415		18	638	520	510	0.98	0.80
5	P25		18	490	350	300	0.86	0.61
6	S1P		18	388	300	245	0.82	0.63
7	GC415	C45	16	320	270	248	0.92	0.78
8	P25		16	190	160	150	0.94	0.79
9	S1P		16	150	140	120	0.86	0.80

Tableau 5.6: Comparatif entre le nombre de pièces admises dans la réalité et le résultat de PHIMECA soft.

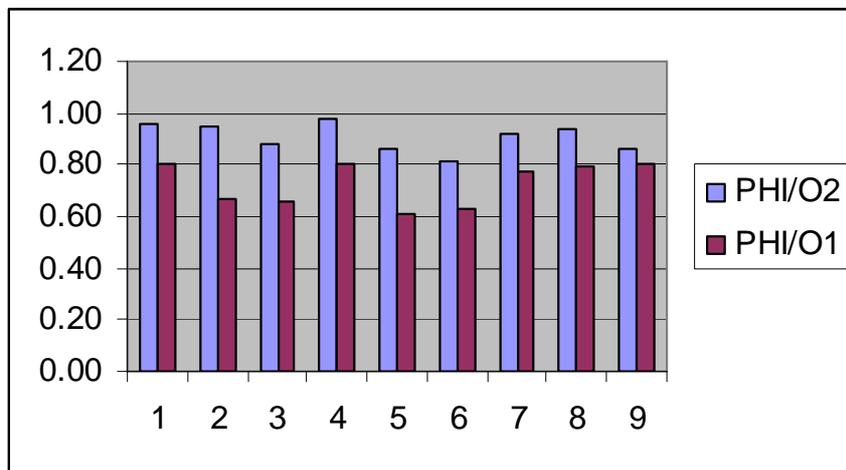


Figure 5.11 : Erreurs en pourcentage.

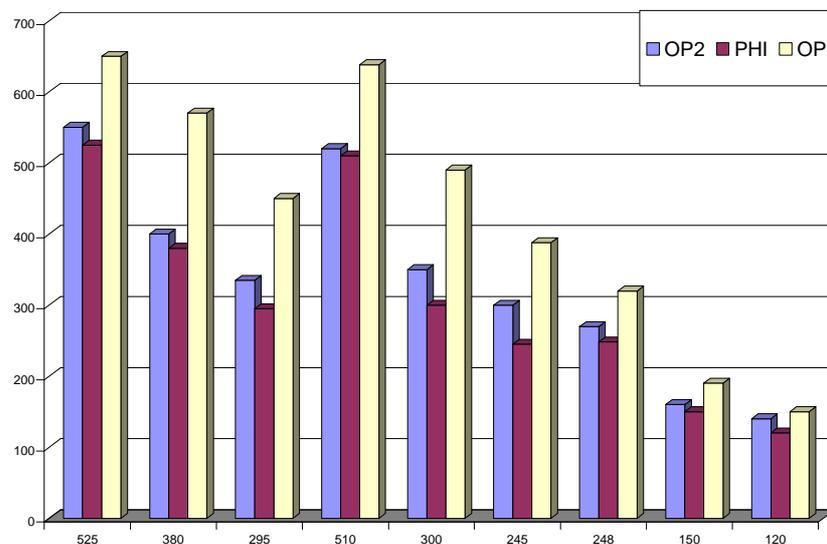


Figure 5.12 : Comparatif entre le nombre de pièces admises dans la réalité et le résultat de PHIMECA soft.

Le Tableau 5.6 montre la différence de pièces acceptées par les opérateurs 1 et 2 et les résultats de la fiabilité. La figure 5.12 explicite cette différence. Il faut comprendre par là que les opérateurs prennent des risques en allant jusqu'à l'usure complète de l'outil sans le savoir. C'est-à-dire ils se fient à leur contrôle visuel qui est loin d'être fiable. Ainsi, le risque d'avoir des pièces défectueuses pour l'opérateur 1 est de 20 à 40 % et pour l'opérateur 2, il est de 5 à 18%.

Par contre quand on utilise les résultats de la fiabilité, le risque de tomber sur une pièce rebutée est de ZERO. C'est-à-dire le **ZERO REBUT**.

5.5.3.4 Etude de l'importance des variables de calcul

L'utilisation des outils de fiabilité permet de déterminer, de produire de différents outils de prises de décision. En plus de l'indice de fiabilité, il est possible de montrer l'importance des paramètres de calculs impliqués dans le modèle mécanique. Ainsi, il est intéressant de voir quel degré d'importance ou bien de sensibilité présente chaque paramètre dans la présente étude. Cette procédure de travailler fait appel au calcul de la fiabilité par la méthode directe.

Avant d'aborder cette question; il est très important de rappeler que l'usinage de la partie droite de l'axe de la roue du fauteuil roulant est réalisé sur un tour à décolleter à commande numérique. La particularité de ce tour réside dans la fixation de la vitesse de coupe V_c constante, et de programmer les avances automatiquement pour chacun des paliers de l'axe à usiner en fonction de la précision dimensionnelle et de la qualité de surface. Quand à la profondeur de passe elle est calculée par le système et donc elle varie en fonction du diamètre de l'ébauche et du diamètre à obtenir. Le Tableau 5.7 résume les régimes de coupe (V_c étant égale à 176m/min) et donne les profondeurs de passe calculées par le système.

Tableau 5.7: Profondeurs de passe calculées par le système.

Palier	Diamètre Ebauche	Diamètre Fini	Longueur L	Profondeur de passes	Avances a
1	18	11.3	9	3.35	0.04
2		10.5	3	3.75	0.03
3		12	10	3	0.02
4		10.75	25.5	3.625	0.05
5		12	10.5	3	0.02
1	16	11.3	9	2.35	0.04
2		10.5	3	2.75	0.03
3		12	10	2	0.02
4		10.75	25.5	2.625	0.05
5		12	10.5	2	0.02

La Figure 5.13 montre les résultats d'analyse directe de la fiabilité et donne la sensibilité de chacun des paramètres impliqués dans l'usinage. Dans des études expérimentales basées sur le plan d'expériences, les analyses de cette sensibilité se fait individuellement c'est à adire pour chaque paramètres. Mais dans le cas présent la simulation sous PHIMECA Soft permet de montrer exactement quel paramètre est le plus influent.

Dans les cas de cette étude, il importe de constater que le système dépend de la matière à usiner, de la matière de l'outil, de la machine utilisée, et des régimes de coupes. Tous ces paramètres sont exprimés par un modèle mécanique qui englobe l'effet de ces paramètres. Si on observe la Figure 5.13, on voit que deux paramètres principaux sont les plus dominants: l'usure [VB] et l'avance a_4 égale à 0.05 sur le palier 4 de l'axe qui représente le palier le plus long et avec la plus grande profondeur de passe (Tableau 5.7).

Pratiquement dans tous les cas de figure l'usure [VB] domine de 67 à 99% et l'avance a_4 vient respectivement de 56 à 1%. Si l'on considère l'analyse par matière usinée, on note que si la profondeur de passe diminue c'est-à-dire dans le cas du 9SMn28k, le diamètre du brut rend la durée de vie de l'outil moins sensible à l'avance pour les trois matières des outils. Avec le GC415, l'usinage dépend à 99% de la matière de l'outil. Si on augmente la dureté de la pièce, la sensibilité des paramètres prend une autre forme car elle dépend de la nature de l'outil de coupe. En effet, la matière dure rend l'usinage plus difficile et il faut prendre beaucoup de précaution. Dans le cas du GC415, les profondeurs de passes s'imposent et dans ce cas il faut réduire l'avance et sont hors gammes des vitesses imposées par le système à commande numérique.

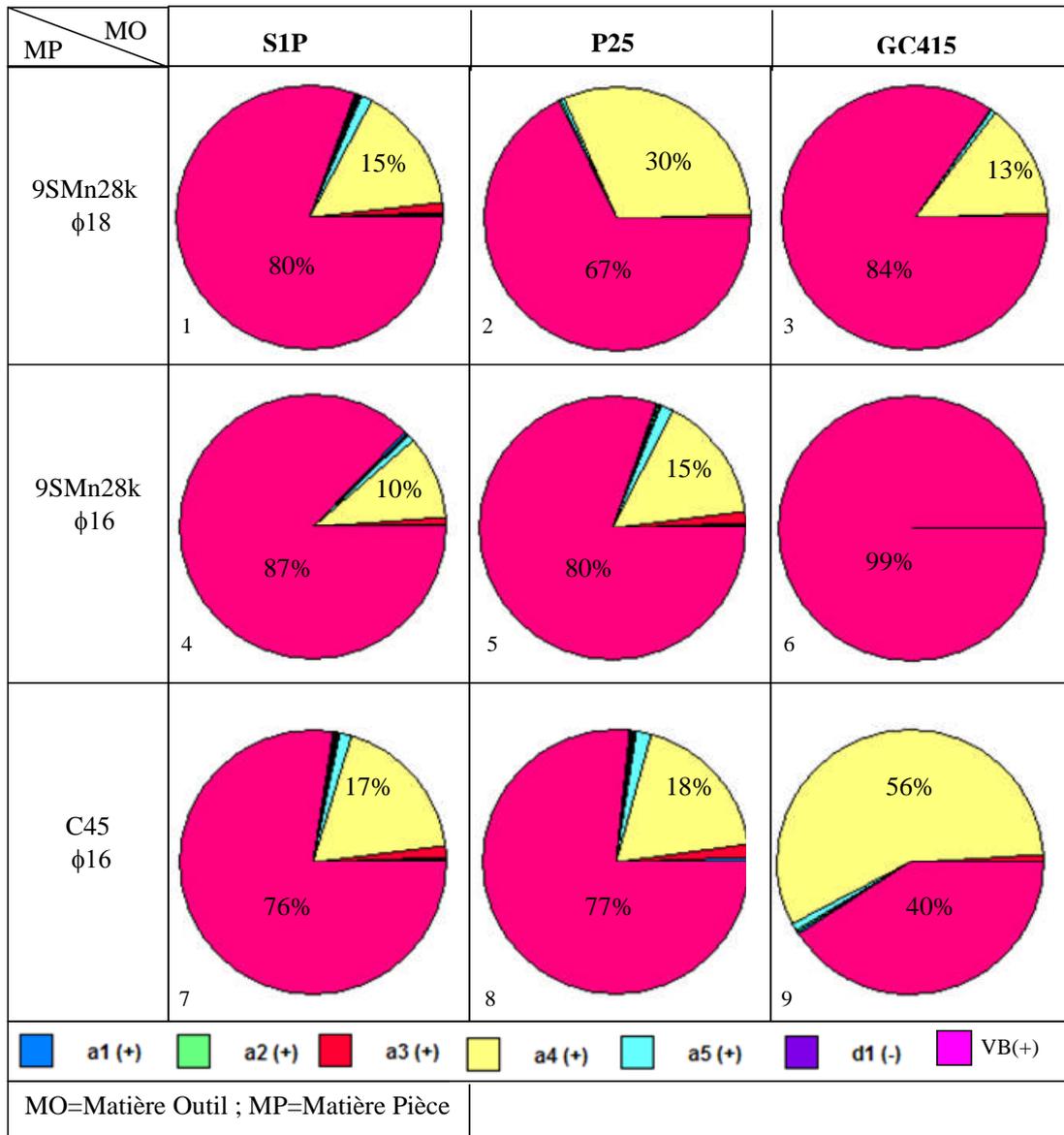


Figure 5.13: Importance des variables de calcul dans un système d'usure d'outil.

Conclusion du chapitre 5

Dans ce chapitre, l'analyse fiabiliste a permis d'une part de définir par simulation le nombre exact de pièces à usiner avant de changer l'outil et d'autre part de donner l'importance des régimes de coupe qui servira dans leur choix. Cependant, l'usure [VB] reste le paramètre le plus dominant et le choix de l'avance pour une grande profondeur de passe reste prépondérant. Il ne suffit pas d'opter pour des outils revêtus pour améliorer la productivité et baisser les coûts de production mais il faut aussi faire le bon choix des régimes de coupes. Les résultats présentés dans cette étude fiabiliste sont des outils d'aide à la décision qui reste à l'appréciation de l'utilisateur.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons présenté deux parties distinctes. Mais elles restent très corrélées.

Dans La première partie nous avons analysé le comportement de la machine TORNOS BESHLE en introduisant le **diagramme d'ISHIKAWA** causes et effets. Ce dernier a permis de relater les **5 M**, **m**atériel, **m**éthode, **m**ain d'œuvre, **m**atière et **m**ilieu et définir les variants et les invariants. En effet, il a révélé que 2 éléments sont les plus variants: **l'usure** de l'outil et les **opérateurs**. Ainsi, une expertise montre la différence qu'il y a entre deux opérateurs donnés quant au nombre de pièces usinées avant changement d'outil à cause de l'usure.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous nous sommes intéressés à l'usure des outils sur site industriel c'est-à-dire en respectant les conditions réelles d'atelier. Le résultat a donné l'évolution de l'usure en fonction du nombre de pièces usinées. Cette évolution est exprimée par un modèle mathématique qui a fait l'objet de l'étude fiabiliste de l'usure.

Nous avons donc mené une étude fiabiliste sous un code de calcul de fiabilité **PHIMECA soft**, afin d'intégrer les incertitudes et les paramètres aléatoires pour une meilleure appréciation du coût de revient des pièces à usiner. L'application est orientée vers **l'usure** des outils de coupe qui constituent le facteur le plus variant dans le système **5M**.

Nous avons voulu présenter quelques principes de base de l'analyse fiabiliste qui nous permettent de comprendre la manière d'entamer l'étude de **la fiabilité** de l'usure des outils. L'approche probabiliste est un domaine très vaste et destiné à des spécialistes en la matière. Dans ce travail nous nous considérons comme utilisateurs de cette approche et donc nous sommes conditionnés par les procédures de calcul proposées par les codes de calcul. Ces codes mis à la disposition des ingénieurs et chercheurs sont reconnus comme les seuls moyens pour répondre aux besoins des analyses fiabilistes.

Donc on a eu un couplage mécanique qui a intégré à la fois l'usure de l'outil et le nombre de pièces usinées.

La méthode fiabiliste a permis d'estimer le nombre exact de pièces à usiner avant changement d'outil, pour un **zéro rebut**.

Les essais effectués au laboratoire, afin de faire une comparaison des deux durées de vie des outils de coupe tout en essayant de garder les mêmes moyens, n'ont pas aboutis aux résultats souhaités à cause de plusieurs paramètres à savoir (différences dans les régimes de coupe, dans la dureté de la pièce à usiner, dans l'absence de lubrification et les outils ne conviennent pas au tournage conventionnel). Néanmoins, ils nous ont permis d'apprécier les différences dans les deux systèmes d'essais, réel et de laboratoire.

Enfin l'application des résultats de notre étude sur la fabrication de l'axe de la roue du fauteuil roulant s'est avérée fructueuse pour l'entreprise CYCMA, car elle a conduit à une production **sans rebut**.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **M.B. Bever, E.R. Marshall, L.B. Ticknor**, *The energy stored in metal chips during orthogonal cutting*, *J. Appl. Phys.* 24 (1953) 1176–1179.
- [2] **M.C. Shaw**, *Metal Cutting Principles*, Oxford University Press, London, ISBN 0-19-859002-4, 1984, 594 pp.
- [3] <http://www.ctn.asso.fr> VA Info, publication éditée avec l'aide du Conseil Régional de Basse-Normandie, de l'État et de l'Union Européenne par le Centre des Nouvelles Technologies.
- [4] (*Machine-outil à commande numérique Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.*) *Assembly, Aix-en-Provence, Key Note Paper, 7 p., 98 réf 23-29 août 1992.*
- [5] **H. SCHULTZ et (T.) MORIWAKI**. – *High speed machining. 42e CIRP general.*
- [6] **P. HOUZET** ISSN 1264-692X, **Ch. Van Boxsom**, *Président par intérim du CTN* http://publications.ctn.asso.fr/generateur/bdd_num.php?num=14&action=lancer 19/09/2003.
- [7] [**CDCO'96**] *ENSAM- TOOL- GIAT Industries .Goupe, [CDROM], Paris, ENSAMTOOL- GIAT Industries, 1996.*
- [8] [*© Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique*].
- [9] **S.BEN SALEM; B. Hadj SASSI δ A.MOISAN** *Evaluation des performances des outils de coupe en UGV par la méthode des plans d'expériences.*
- [10] **DC. Montgomery** *Design and analysis of experiments. 2nd ed. New York: Wiley; 1984.*
- [11] **WS. Lin, BY. Lee, Wu CL**. *Modeling the surface roughness and cutting force for turning. J Mater Process Tech* 2001; 108: 286–293.
- [12] **C.-X. Feng**, *An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness In: Proceedings of the 2001, Industrial Engineering Research Conference, Paper No. 2036, 2001.*
- [13] **PVS Suresh, Rao P. Venkateswara, SG. Desmukh**. *A genetic algorithmic approach for optimization of the surface roughness prediction model. Int J Mach Tool Manu* 2002; 42:675–680.
- [14] **K. Taraman** *Multi-machining output-multi independent variable turning research by response surface methodology. Int J Prod Res* 1974; 12(2):233–245.
- [15] **M. Hasegawa, A. Seireg, RA. Lindberg**. *Surface roughness model for*

turning. *Tribol Int* 1976(December):285–289.

- [16] **RM. Sundaram, BK. Lambert.** *Mathematical models to predict surface finish in fine turning of steel. Int J Prod Res* 1981; 19:557–564. Part II.
- [17] **MA. El Baradie.** *Surface roughness prediction in the turning of high strength steel by factorial design of experiments. J Mater Process Tech* 1997; 67:55–61.
- [18] **A. Mital, M. Mehta.** *Surface finish prediction models for fine turning. Int J Prod Res* 1998; 26, 12:1861–1876.
- [19] «[http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine- outil _%C3 %AO _commande _num%C3 %A9rique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine-outil_%C3%AO_commande_num%C3%A9rique)»
- [20] **PG. Petropoulos.** *Statistical basis for surface roughness assessment in oblique finish turning of steel components. Int J Prod Res* 1974; 12:345–360.
- [21] **Y. Sahin *, A. Riza Motorcu.** *Modèle de rugosité de surface pour l'usinage d'un acier doux avec un outil revêtu de carbure*
- [22] **J. CALDERON.,** *Caractérisation dynamique du système Piece-Outil-Machine : usinage de pièces minces .Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1998, 221 p.*
- [23] **R. LEVEQUE, F. LEROY.,** *Nouveaux matériaux pour outils de coupe : modes de détérioration et méthodes d'essais.Sciences techniques, Décembre 1976, Vol.37, pp.53-58.*
- [24] **R. Dietrich, G. Facy, E. Hugonnaud, M. Pompidou, J.-P. Trotignon,** *Précis de construction mécanique, 2. Méthodes, fabrication et normalisation, Afnor/nathan, La Défense/Paris, 1979, 244 p. (ISBN 2-09-194002-X), p. 160-174*
- [25] **R. Dietrich, D. garsaud, S. Gentillon, M. Nicolas,** *Précis de méthodes d'usinage — méthodologie, production et normalisation, Afnor/nathan, La Défense/Paris, 1981, 181 p. (ISBN 2-09-194015-1), p. 28-43*
- [26] **A. Moison,** *l'usinage, les référentiels Dunod. Conception en mécanique industrielle août 1998.*
- [27] **K. Oishi, T .Nishida,** "study on fracture characteristics of ceramic cutting tools", *wear, N°118, 2001.*
- [28] **M. Lee. L Hibbs,** " the effet of heat treatment on the performance of borazon compact cutting tools machining alloy steels", *GE Company. Technical information series, 1992.*
- [29] **H.Eda et al,** " cutting tools" .*American societ for Metals Park, Ohio, 1980.*
- [30] **Y.Kono et al,** "cutting performance of sintered C-BN tools", *cutting tool materials: Procending of an international conference. Kentucky 1990.*

- [31] **W. König et al**, "Machining of hard materials". *Annals of the CIRP*, 1984, 33 (2).
- [32] **D.G. Flom et al**, "High speed machining of cast iron with BWN compacts", *wear*, N°47-1991
- [33] **P.J. Heat**, "properties and uses of amrite". *carbide and tool journal*, 19(2), 1987
- [34] **A. Spinawal et al**, "cutting tool life comparison", *proceeding of the 25th International Machine tool design and Research conference août 1998*. 1985
- [35] **J. Wallbante et al**, "wear of ceramic tools when machining cast iron", *Advanced Materials et manufacturing process* 3 (3).1988.
- [36] **E. TRENT**, *Metal cutting London: Butterworths and co ltd*, 1977, p.203.
- [37] **H. Schulz**. – *Hochgeschwindigkeitsfräsen metallischer und nichtmetallischer Werkstoffe – Ed. Hanser (1989)* .
- [38] **W. Koenig, R. Komanduri, H.K. Tonshoff, G. Ackershott**, *Machining of hard materials, Annals of the CIRP* 33 (2) (1984) 417–427.
- [39] **G. Poulachon ; A. Moisan ; I.S. Jawahir**, *Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools*.
- [40] **G. Poulachon ;B.P. Bandyopadhyay ;I.S. Jawahir ;S. Pheulpin, E. Seguin**. *The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools. Received 29 July 2002; received in revised form 6 September 2002; accepted 10 September 2002 1 October accessible en line 2004*
- [41] **J. Goyet, B. Jacob, M. Lemaire, and H. Mathieu**. *Fiabilité des constructions. Revue Française de Genie Civil*, 2(5) :529-610, septembre 1998. ISSN 1279-5119.
- [42] **AFNOR** . *Eurocode 1 : Base du calcul et Action sur les structures et document d'application Nationale .Technical Report XP ENV 1991-1, AFNOR, avril 1998*.
- [43] **O. Millet, D. Collard & L. Buchaillet** *Fiabilité des microstructures en polysilicium : Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie IEMN, UMR CNRS 8520*.
- [44] **P. Davim J.** *A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. J Mater Process Technol* 2001; 116:305–308. 326 Y. Sahin, A.R. Motorcu/*Materials and Design* 26 (2005) 321–326.
- [45] **[HL74] A.M. Hasofer and N.C. Lind**. *Exact and invariant second moment code for-mat. Journ. Eng. Mechanics Div., vol 100:111-121, 1974*.

- [46] **J.C Ligeron, A. Delage, M. Nef.** «La Fiabilité en exploitation : Organisation et traitement des données». *Technique et Documentation*, Ed LAVOISIER, Paris.1984.
- [47] **A. Pages, M Gondran.** «Fiabilité des systèmes» Préface de Maurice Magnien. Ed EYROLLES, Paris 1980.
- [48] **N. Devictor ; M. Lemaire** (Directeur de thèse) ; *Travaux Universitaires-Thèse nouveau doctorat 1996 [Note(s): [235 p.]] (bibl.: 126 ref.) (Année de soutenance : 1996) (No: 96 CLF2 1863)*
- [49] **[ASC83] Committee on Reliability of Offshore Structures ASCE.** *Application of reliability methods in design and analysis of offshore platforms. J. Struc. Eng., 109(10):2265-2291, October 1983.*
- [50] **M. Lemaire.** *Cours de «Fiabilité des Structures Mécaniques : Couplage Mécano Fiabiliste Statique».* LARMA, Université de Blaise Pascal- Clermont II, France. Septembre 2001.
- [51] **[ASC83] Committee on Reliability of Offshore Structures ASCE.** *Application of reliability methods in design and analysis of offshore platforms. J. Struc. Eng., 109(10):2265-2291, October 1983.*
- [52] **A. Mohamed, F. Suau, and M. Lemaire.** *A new tool for reliability based design with ANSYS FEA. In ANSYS Conference 4 Exhibition, Houston, USA, pages 3.13-3.23. ANSYS, Inc, 1996.*
- [53] **M. Lemaire.** *Reliability and mechanical design. Reliability engineering 4 systems safety, 55(2):163-170, February 1997.*
- [54] **A. Mohamed and M. Lemaire.** *Linearized mechanical model to evaluate reliability of offshore structures. Structural Safety, 17:167-193, 1995.*
- [55] **J.P. Muzeau and M. Lemaire.** *Probabilistic Methods for Structural Design, volume 56, chapter Reliability analysis with implicit formulations, pages 141-160. Kluwer Academic, 1997. ISBN 0 7923 4670 X.*
- [56] **PHIMECA Engineering.** (2002). *PHIMECA-reliability-based design and analysis. Users' manual, version 1.6, Aubière, France.*

