



Mémoire :

Présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Magistère en Génie Mécanique

Option :
Mécanique avancée.

THÈME :

**CONTRIBUTION A LA RÉCUPÉRATION
DES PERFORMANCES PERDUES
ET DE LA PRÉCISION
DES MACHINES-OUTILS**

Par :

Smain AIB

Soutenu le : 13/12/2009.

Devant les membres de jury :

- Président Pr Ahmed BELAOUAR PROF Université Mentouri Constantine
- Rapporteur Dr Rachid CHAIB M.C. Université Mentouri Constantine
- Examineurs Pr Hamlaoui BOUGHOUAS PROF Université Mentouri Constantine
Pr Fayçal MILI PROF Université Mentouri Constantine

Décembre 2009

REMERCIEMENT

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Mentouri, faculté des sciences de l'ingénieur, département de génie mécanique, laboratoire de mécanique, et l'Algérienne des équipements et machines-outils ALEMO, filiale de l'entreprise nationale de production de machines-outils ENPMO sise à Oued Hamimime Khroub Constantine.

Mes plus grands remerciements s'adressent à Monsieur Rachid CHAIB, maître de conférences à l'université Mentouri Constantine, l'ami, frère et maître, merci de m'avoir consacré autant de temps et de m'avoir aidé dans la construction de ce travail avec autant d'enthousiasme et d'amitié. J'espère de tout cœur pouvoir encore travailler de nombreuses années à ses côtés.

Je souhaite aussi remercier Monsieur Hichem BOUCHENITFA, doctorant thésard à l'université Mentouri Constantine pour sa disponibilité, son amitié, ses conseils qui m'ont été très utiles tout au long de ce travail.

J'adresse également mes plus vifs remerciements à mon frère Abdelatif, doctorant à l'université de SKIKDA, pour son aide et ses compétences et sa collaboration à cette recherche technologique dans la réalisation de l'outil d'aide au diagnostic qui valide le travail exposé dans ce document.

Mes plus vifs remerciements s'adressent aussi à Monsieur A. HALIMI, Président Directeur Général de ALEMO de m'avoir permis de se détacher et se pencher sur mes études de post-graduation malgré ma lourde responsabilité de directeur de structure de production.

Que mes collègues de ALEMO et ceux de CMT plus particulièrement Messieurs CHOUAT Said et KHENGUI Mohammed, trouvent ici mes remerciements chaleureux pour leur soutien humain et matériels qu'ils m'ont apportés.

Je voudrais maintenant remercier vivement le jury présidé par Monsieur BELLAOUAR Ahmed, professeur à l'université Mentouri Constantine pour sa disponibilité et ses conseils judicieux. Que Messieurs Hamlaoui BOUGHOUAS et Fayçal MILI, Professeurs à l'université de Mentouri soient remerciés d'avoir bien voulu prendre connaissance de ce travail et de participer au jury.

Je remercie également Monsieur Mahdi KHALFI, doctorant à l'université Mentouri Constantine pour son aide dans le réarrangement et mise la en page de ce manuscrit.

Enfin, à mes parents, à mon épouse LEILA et mes 04 enfants Abderrahmane, Youcef dit Oussama, Aymen et HIBA pour tout leur soutien et leur patience, je leur suis infiniment reconnaissant. Ils ont su durant ces deux années, par leurs nombreuses attentions, me donner l'énergie de réaliser ce travail.

Smain AIB.

RESUME

Aujourd'hui avec l'ouverture du marché, la problématique concernant les chances de succès d'une entreprise dépendent, en effet, pour une bonne part de sa capacité à mieux communiquer avec ses clients et à mieux les servir. En effet, il n'existe pas de qualité en soi, il s'agit toujours d'une qualité pour quelqu'un qui a des attentes : attentes qu'il faut bien comprendre et satisfaire.

Les sociétés sont confrontées à une concurrence de plus en plus rude, exigeant de toute entreprise plus de compétitivité dans les conditions de qualité, les moindres coûts et les meilleurs délais de réalisation.

Dans la compétition mondiale, de nombreuses entreprises offrent des produits qui ont des performances comparables : les asiatiques, les américains, les européens, tout le monde sait fabriquer des voitures, des téléviseurs, des produits cosmétiques ...etc.

Percevoir le premier les évolutions du marché, développer rapidement des produits et des services adaptés...sont autant d'enjeux qui, au départ, dépendent de notre capacité d'écoute et d'analyse.

Il faut souligner tout de suite que les machines outils de génération ancienne se prêtent parfois mieux, à certaines tâches, que celles récentes, modernes et de génération nouvelle. Leur construction robuste offre en effet l'avantage d'investissements minimisés par une remise à neuve complète, en dépit d'un état d'usure global souvent avancé.

Dans l'industrie, les équipements de production sont affaiblis dans le processus de réalisation durant leur vie active, par des dysfonctionnements (usure, dérèglement, pertes de performance, de précision, etc....) qui affectent les conditions citées ci-dessus, voir amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient.

C'est pourquoi dans ce travail, nous proposons au service de maintenance, un outil d'aide au diagnostic des défauts géométriques des machines outils et une démarche ou méthodologie de correction géométrique par grattage qui permet la reconstruction de la géométrie de la machine et rétablit la précision de travail, voire retrouver les performances perdues. Ainsi, l'exécution des étapes de la correction géométrique optimise les délais, les rebuts, les coûts totaux et ce en minimisant le nombre, le coût et le délai de chaque phase de travail.

La démarche, à suivre pour aboutir à ce résultat, est basée principalement sur l'analyse d'un grand nombre de cas de machines rénovées afin de trouver les liens et les chemins possibles (critiques) entre les symptômes (défauts sur la pièce finie) et les sources (défauts géométriques sur les organes de la machine).

Mots clés : *Grattage, Correction géométrique, Précision, Planéité, Portage, Grattoirs, Outil d'aide au diagnostic, Epreuves pratiques.*

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO RECOVER LOST PERFORMANCE AND PRECISION OF MACHINES-TOOLS

Today with the opening of the market, most companies' problem is how to be competitive when offering to their customers services at the best quality, delay and lowest cost. Old generation machine tools sometimes suits best the performance of particular machining operations, compared to newly built machines. Their solid construction and castings allow a complete renewing at low cost even if geometrical surfaces are often very used.

In practice machine tools are used in a disturbed manner, some areas are more solicited then others therefore subject to more wear, and dysfunction such as loss of geometrical leveling, loss of performance and precision which inevitably leads to a raise in production costs. That is why we will present in this paper the scraping method and its influence on geometrical correction and then elaborate a procedure or method of scraping in the form of a chart or diagnosis program for geometrical corrective actions which optimizes delay and global cost by minimizing the number of scraping actions and the cost of each one of them.

Therefore in this work, we propose that the maintenance department, a tool for diagnosis of geometric imperfections of machine tools and a methodology or approach to geometric correction by scratching which allows the reconstruction of the geometry of the machine and restores precision work, or find the lost performance. Thus, the execution stage of the geometric correction optimizes timing, rebus, total costs and minimizing the number, cost and time of each phase of work.

The method of doing to reach these results is basically based on analysis of a bigger number of reconditioned machines- tools to find out the links and the possible ways between the symptoms (defects on machined parts) and the causes (geometrical defects on machines organs).

Key words: Scraping, Geometrical correction, Precision, Planning, Portage, Scrapers, Practical trials.

ملخص

مساهمة لاستعادة تأدية الكاملة المفقودة و دقة الآلات الصناعية

في ظل اقتصاد السوق و المنافسة الحادة، فإن الإشكالية التي تواجهها كل شركة أو مؤسسة اقتصادية، تظل محصورة فيما مدى قدرتها على المنافسة و البقاء في السوق و مضاعفة بذلك جودة منتوجها بقلة كلفته و سرعة إنتاجه، عناصر ثلاثة سر انجذاب و إرضاء كل متعامل اقتصادي، هذا من جهة.

و من جهة أخرى، فلقد لاحظنا أن الآلات قديمة الصنع (أي من الجيل القديم)، بالإضافة أنها تفضل بكثير عن الآلات الجديدة الصنع (أي من الجيل الجديد) في تحقيق بعض الأعمال، فهي تسمح كذلك من حيث متانة صنعها، بإعادة تحديثها كلية و بكلفة زهيدة رغم حالة قدم متقدمة.

ففي الواقع و الممارسة اليومية، فإن التجهيزات الصناعية معرضة كما هو معروف، لجملة من الإختلالات : القدم، فقدان الدقة، انعدام التحكم و الضبط.... مما يؤثر سلبا على عناصر المنافسة السابقة الذكر و بالتالي على قدرة الإنتاج و كلفة المنتج.

ولذلك في هذا العمل، فإننا نقترح على إدارة الصيانة، وهي أداة لتشخيص العيوب الهندسية للآلات و منهجية أو نهج التصحيح الهندسي من الخدش الذي يسمح للتعمير هندسة الجهاز و يعيد دقة العمل، أو العثور على الأداء فقدت. وبالتالي ، فإن مرحلة التنفيذ للتصويب الهندسي يحسن التوقيت ، وبقاء الظروف على حالها ، فإن مجموع التكاليف و التقليل من عدد و التكلفة و الوقت في كل مرحلة من مراحل العمل.

لهذا، ارتأينا في بحثنا هذا، تقديم و اقتراح طريقة (أو منهجية) معروفة بطريقة الكشط نبين من خلالها على برنامج فحص و تنفيذ خاص بكل المراحل المتعلقة بهذا التصحيح الهندسي و الذي من شأنه تقليل عدد و كلفة و أجل كل مرحلة من مراحل الإنجاز.

لذا، و للوصول إلى هاته النتيجة، فإننا انتهجنا طريقة عمل تعتمد أساسا على تحليل أكبر عدد من الآلات التي خضعت إلى التجديد قصد إيجاد الروابط (أو المسالك) المحتملة بين الأسباب (عيوب ملحوظة على قطعة منتهية الصنع) و المسببات (عيوب هندسية تطرأ على أعضاء مختلفة من الآلة).

الكلمات المفتاحية: كشط ، تصحيح هندسي، دقة، مسطاحية، محملة، أدوات الكشط، تطبيقات.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENT	I
RESUME	III
ABSTRACT	IV
ملخص	V
TABLE DES MATIERES	VI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PROBLEMATIQUE	5
ET ETAT DE L'ART	5
I.1. PREFACE	5
I.2. AMELIORATION CONTINUE EN MAINTENANCE	7
I.3. RENDEMENT DES MOYENS DE PRODUCTION	9
I.4. MICRO ET NANO PRECISION	10
I.4.1. UN CONCEPT ESSENTIEL : LA CHAINE METROLOGIQUE	11
I.4.2. LES PERTURBATIONS PHYSIQUES QUI COMPROMETTENT LA PRECISION	12
I.4.3. LA CORRECTION DES ERREURS DE MACHINES	13
I.5. ANALYSE DES MACHINES DE PRECISION	15
I.5.1. ANALYSE D'UNE MACHINE COMME EN GENERATEUR DE POSITIONS	15
I.5.2. ANALYSE DE LA PRECISION DES MACHINES CLASSIQUES :	17
I.6. CAUSES PHYSIQUES CONCOURANT A PERTURBER LA GEOMETRIE DES MACHINES	19
I.6.1. ELIMINATION DES FORCES PERTURBANT LA GEOMETRIE DES MACHINES :	20
I.6.2. ERREURS PROVENANT DES LIAISONS ENTRE SOLIDES DE LA CHAINE	22
I.7. CORRECTION DE LA GEOMETRIE	25
I.7.1. UN TRAITEMENT « MECANIQUE » DE L'INFORMATION PEUT-IL CONDUIRE A AMELIORER LA QUALITE D'UN GUIDAGE ?	25
I.7.2. LIMITES DE LA CORRECTION	25
I.8. L'EVOLUTION DES MACHINES-OUTILS	26
I.8.1. LES PREMIERES MACHINES-OUTILS	26
I.8.2. LES PREMIERES MACHINES-OUTILS MOTORISEES	26
I.8.3. LA REVOLUTION INDUSTRIELLE	27
I.9. CLASSEMENT DES MACHINES-OUTILS	28
I.10. DIFFERENTES OPERATIONS REALISEES PAR LES MACHINES-OUTILS	29
I.11. CONCLUSION	30
CONTRÔLE GÉOMÉTRIQUE DES MACHINES-OUTILS	33
II.1. GENERALITES	33
II.2. PRINCIPES GENERAUX DE VERIFICATION DES MACHINES-OUTILS	33
II.2.1. ÉPREUVES PRATIQUES	34
II.2.2. VERIFICATIONS GEOMETRIQUES	35
II.2.2.1. PLANEITE	37
II.2.2.2. COÏNCIDENCES DES AXES	39
II.2.2.3. PARALLELISME	40

II.2.2.4.	PERPENDICULARITE	43
II.2.2.5.	DEFAUTS DE BROCHES	47
II.3.	APPAREILS DE MESURE	50
II.3.1.	APPAREIL D'USAGE COURANT	50
II.3.1.1.	LES APPAREILS NON REGLABLES.....	50
II.3.1.2.	APPAREILS REGLABLES	53
II.3.2.	APPAREILS D'USAGE EXCEPTIONNEL.....	56
II.4.	TOLERANCE A IMPOSER DANS LE CONTROLE DES MACHINES-OUTILS.....	59
II.5.	CONCLUSION	61
CORRECTION GEOMETRIQUE DES MACHINES-OUTILS PAR GRATAGE.....		63
III.1.	INTRODUCTION.....	63
III.2.	PRINCIPE DU GRATAGE	64
III.2.1.	PROCEDE DE TRAVAIL	64
III.2.2.	CONDITIONS PRELIMINAIRES DU GRATAGE.....	64
III.3.	BUT DU GRATAGE.....	65
III.4.	TECHNIQUE ET QUALITE DU GRATAGE.....	66
III.4.1.	CLASSEMENT DES TECHNIQUES DE TRAVAIL.....	68
III.5.	LES OUTILS DE GRATAGE.....	70
III.5.1.	GRATTOIRS PLATS, TRIANGULAIRES ET A CUILLERES	70
III.5.2.	MATERIEL A COLORER	71
III.5.3.	DETERMINATION DES BOSSES DE PORTAGE PAR LE PROCEDE DE COLORATION	72
III.5.4.	PHASES D'OPERATION	73
III.5.5.	MESURE DE LA PLANEITE ET DU PARALLELISME.....	74
III.5.6.	PHASES D'USINAGE DANS LE GRATAGE DES SURFACES PLANES	75
A) A L'AIDE DES CALES DE JEU		75
III.5.7.	AFFUTAGE DES GRATTOIRS	76
III.6.	CONCLUSION	78
DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC		80
IV.1.	INTRODUCTION.....	80
IV.2.	IDEE DE DEVELOPPER UN OUTIL D'AIDE.....	81
IV.3.	PRESENTATION DE L'OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC	83
IV.3.1.	DENOMINATION DE L'OUTIL.....	83
IV.3.2.	DEFINITION ET OBJECTIF	83
IV.3.3.	INTERFACE.....	84
IV.4.	CONCLUSION	93
EXEMPLE PRATIQUE : REMISE A NIVEAU DES EQUIPEMENTS DU CMT		96
V.1.	INTRODUCTION.....	96
V.2.	CYCLE DE VIE D'UNE MACHINE	97
V.3.	INDICATEURS MAINTENANCE.....	98
V.4.	APPROCHE PROBABILISTIQUE.....	99
V.5.	ANALYSE GLOBALE	100
V.6.	1^{ER} EXEMPLE : TOUR PITTLER PD250R	101
V.6.1.	COURBE DE FIABILITE	102
V.6.2.	COURBE D'INDISPONIBILITE.....	103
V.6.3.	COURBE DU TAUX IMPRODUCTIF.....	104
V.6.4.	COURBE DES SURCOUTS.....	105
V.6.5.	VERIFICATIONS GEOMETRIQUES.....	105
V.6.6.	CORRECTION GEOMETRIQUE	108
V.7.	2^{EME} EXEMPLE : TOUR A VILEBREQUIN DORRIES	108
V.7.1.	INTRODUCTION	108

V.7.2. PRESENTATION DU PROJET	108
V.8. BILANS DES TRAVAUX DE LA CORRECTION GEOMETRIQUE DES EQUIPEMENTS DE PRODUCTION DE CMT PAR ALEMO	111
CONCLUSION GÉNÉRALE	113
REFERENCES	117
ANNEXES	120
RESUME	117
ABSTRACT	117
ملخص	118

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Comme tout instrument de mesure, les moyens de production sont soumis à des facteurs provoquant des variations au cours de leur utilisation. De plus, soumis à une utilisation intensive et parfois même dans des conditions peu recommandées, ils font apparaître des défauts géométriques flagrants.

Dans la grande majorité des ateliers, les machines de production sont peu ou pas suivies et entretenues ; les vidanges sont rarement faites à temps, et des utilisations en surrégime sont très courantes. Conséquence : Les machines finissent par avoir des dérives voire même des défauts ponctuels. Les opérateurs expérimentés apprennent à travailler avec ces imperfections géométriques et corrigent d'eux-mêmes l'erreur (course de la broche par exemple).

Ce comportement a deux conséquences : la première est la dégradation progressive de la machine et de sa production ; une machine ayant un défaut de géométrie génère des vibrations pouvant provoquer des états de surfaces dégradés ou des défauts de formes sur les pièces fabriquées. A plus ou moins long terme, c'est l'aptitude de la machine qui sera dégradée et parfois de manière très importante, entraînant des coûts de remise en état bien supérieurs à ceux d'une maintenance minimum obligatoire.

La seconde conséquence est la non interchangeabilité de l'opérateur ; pour réduire les coûts de formation, ils sont généralement affectés à des postes fixes. Ils sont alors les seuls à connaître les défauts de leur machine. Il n'est pas alors rare de voir un fraiseur rajouter ou enlever des centièmes par rapport à la côte demandée pour corriger les défauts géométriques de sa machine. Le problème survient lorsque l'opérateur est absent, la personne censée le remplacer, ne disposant pas d'un relevé métrologique des défauts des broches, va alors générer un nombre considérable de non-conformité.

De par la précision productiviste imposée par la conjoncture, les chefs d'ateliers ont généralement une vision à court terme du parc machine et privilégient l'aspect curatif des réparations de machine à l'aspect préventif de la maintenance et de la métrologie. Ce choix se révèle lourd de conséquences à long terme.

D'autre part et comme nous l'avons expliqué plus haut, les machines outils de génération ancienne se prêtent parfois mieux à certaines tâches, que celles récentes et modernes de génération nouvelle ; leur construction robuste offre l'avantage d'investissements minimisés par une remise à neuve complète, en dépit d'un état d'usure global souvent avancé. C'est au moyen de la correction géométrique par grattage qu'il est possible de reconstruire la géométrie de la machine et rétablir la précision de travail. Désormais, la maintenance est devenue l'une des fonctions stratégiques de l'entreprise. Elle constitue un facteur de compétitivité et de pérennité décisif pour l'entreprise visant à répondre aux impératifs industriels à savoir améliorer la fiabilité des équipements et la qualité des produits tout en réduisant les coûts.

En se basant sur l'expérience d'une quinzaine d'année dans le domaine de la correction géométrique d'un grand nombre de cas de machines rénovées, nous avons appréché la présente étude qui consiste à élaborer un programme d'aide au diagnostic permettant de contribuer à la récupération des performances géométriques perdues des machines-outils, et cela sur la base des vérifications géométriques et épreuves pratiques des machines-outils.

Le travail a été ainsi répartie sur cinq chapitres : le premier, intitulé « Problématique et état de l'art », comprend notre préoccupation principale à tous qui n'est que la réduction des coûts. Toute entreprise qui parvient à renforcer sa position sur le marché en temps de crise augmente ses chances de gagner des parts de marché malgré les difficultés présentes et de ressortir plus forte de la crise, prête à profiter de la reprise économique.

La crise nous impose à tous de réduire les coûts mais aussi de chercher de nouvelles façons d'augmenter nos bénéfices. Le contexte commercial traduit la conjoncture de marché dans laquelle se situe l'unité de production. Il rapproche trois éléments économiques qui caractérisent la santé de l'entreprise : la progression annuelle des volumes produits, l'évolution de la productivité, autrement dit la quantité produite par salarié, et l'évolution du coût ajouté rapporté à l'unité produite. Une baisse des deux premiers critères et une hausse du troisième amplifieront la pression sur la maintenance.

Dans le second chapitre, intitulé «Contrôle géométrique des machines-outils », nous présentons le contrôle géométrique des machines-outils en se basant sur les vérifications géométriques et épreuves pratiques. Les principes généraux de vérification des machines-outils, les différents appareils de mesure ainsi que les tolérances imposées sont réunis dans ce chapitre. Les défauts de géométrie qui apparaissent sur les machines seront corrigés par la méthode de grattage, une méthode qui sera présentée et développée dans le chapitre III.

Le troisième chapitre, intitulé «Correction géométrique des machines-outils par grattage », a été consacré à la présentation de la correction géométrique par grattage, le principe du grattage, son but, ses techniques et ses outils. Quelques gammes de grattage, comme la correction d'une surface plane et autres, sont retenues à titre d'illustration.

Le quatrième chapitre comporte notre contribution dans le « développement d'un outil d'aide au diagnostic » permettant d'identifier les défauts de géométrie se basant sur la norme des contrôles géométriques des machines-outils. Cet outil est dénommé « CALICONTROLE » et est développé sous MATLAB.

Dans le cinquième chapitre, nous illustrerons notre étude par un cas pratique à travers lequel et en utilisant le contrôle géométrique et grace justement à la correction géométrique par le grattage, nous pensons avoir contribué à la remise à niveau des équipements de production du complexe Moteurs tracteurs de Oued Hamimime Khroub, convention avec l'Algérienne des Equipements et Machines-Outils (ALEMO).

Enfin, une conclusion générale qui ramassera les différents résultats et permettra éventuellement d'entrevoir d'autres perspectives possibles pour une étude encore plus poussée dans ce domaine précis.

CHAPITRE

I

PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART

PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART

I.1. PREFACE

Nous sommes confrontés à une crise économique mondiale. La crise financière a déclenché et précipité, directement et indirectement, la situation économique actuelle.

La réduction des coûts est désormais notre principale préoccupation à tous. Mais nous ne devons pas nous contenter de mesures immédiates. Il faut aussi tenir compte des évolutions à long terme et agir avec intelligence pour que nos affaires se trouvent en bonne position pour saisir les opportunités futures. C'est pourquoi et afin de mettre en place un système de gestion de maintenance performant, l'entreprise algérienne est amenée à évaluer son système existant par rapport à ce qu'il devrait l'être d'une part et prendre les décisions stratégiques prioritaires de maintenance qui s'imposent d'autres part.

Nous tenons à souligner l'importance d'une vision qui va au-delà des préoccupations actuelles, y compris dans les mesures immédiates de réduction des coûts. Personne ne peut savoir combien de temps la crise va durer, mais la croissance reprendra inmanquablement.

C'est pourquoi il est important de continuer à investir dans la productivité. Même avec les difficultés actuelles ; il existe toujours de nombreuses opportunités. Comment pouvons-nous améliorer notre rentabilité aujourd'hui tout en investissant pour demain et en continuant à majorer notre compétitivité ?

Toute entreprise qui parvient à renforcer sa position sur le marché en temps de crise augmente ses chances de gagner des parts de marché malgré les difficultés présentes et de ressortir plus forte de la crise, prête à profiter de la reprise économique.

La crise nous impose à tous de réduire les coûts mais aussi de chercher de nouvelles façons d'augmenter nos bénéfices. [1].

Or, malgré l'édification d'une base industrielle importante, souvent avec l'apport initial des technologies occidentales, le patrimoine industriel algérien rencontre des difficultés pour assurer une maintenance appropriée, contribuant à la pérennité, voire au développement de cette base. Or, toute machine tournante soumise à des contraintes fortes doit être entretenue et révisée régulièrement. Cependant, au delà d'une simple maintenance statique (calcul des durées de vie moyennes de chaque élément), il est possible de tenir compte de certains paramètres et d'obtenir un diagnostic précis des machines, ainsi augmenter sa durée de vie. De ce fait et pour être plus compétitifs, les responsables de la maintenance ne doivent plus se contenter de surveiller et de réparer un équipement, mais doivent envisager des stratégies de maintenance. A cet effet, la maintenance doit s'adapter continuellement au progrès des domaines techniques, technologiques et organisationnels. De plus, la crise existante dans le milieu industriel algérien conduit à des nouvelles implications sur les stratégies des entreprises dans ce domaine. C'est pourquoi, ce travail propose un outil d'aide au diagnostic pour la gestion des processus de maintenance basé sur une démarche d'amélioration globale de la maintenance, pour récupérer les performances perdues et rétablir la précision des Machines Outils, causées par des défauts géométriques et à la prise de décision à la correction, en utilisant la correction géométrique par grattage. Ainsi prolonger la durée de vie ultime des machines outils.

L'approche développée fournit un cadre de référence des processus de maintenance des machines outils et propose une méthodologie basée sur l'analyse des performances perdues des machines. Ce travail introduit une nouvelle vision de la maintenance qui permet de contribuer à la compétitivité des entreprises indépendamment de leur taille, de corriger des défauts géométriques sur machines outils, causants des rebuts dépassant les 50%. Les défauts dimensionnels et d'état de surface des pièces peuvent être dus à des mauvais outils, des broches détériorées ou un mauvais serrage. Cependant, la cause majeure de ces défauts peut généralement être attribuée aux erreurs de positionnement - Somme des erreurs géométriques et de mouvement - de la machine outil elle-même. Les rebuts entraînent des pertes d'argent, de temps, des clients....

L'audit de la maintenance, étape indispensable de tout progrès de maîtrise de la fonction maintenance, voire la maîtrise des dysfonctionnements et la récupération des performances, va permettre à l'entreprise de diagnostiquer son système de maintenance existant, mettre en évidence ses forces et ses faiblesses tout en déterminant d'une manière claire et précise les priorités et les actions à mener dans l'entreprise.

Parmi ces actions, on peut citer :

- ✓ L'enrichissement et l'affinage des informations justes et pertinents nécessaires à la maîtrise des performances industrielles ;
- ✓ L'amélioration de la disponibilité des équipements et de la sécurité ;
- ✓ Les priorités dans les travaux à mener dans l'entreprise ;
- ✓ La maîtrise des coûts directs ;
- ✓ D'orienter les actions de maintenance à mener vers les problèmes pertinents ;
etc.

I.2. AMELIORATION CONTINUE EN MAINTENANCE

La maintenance d'usine n'est pas la fonction de l'ombre que l'on croit ; mais bien une fonction de contribution à la productivité et à la rentabilité de l'entreprise.

Il convient de sortir du schéma, trop banal aujourd'hui, de maintenance support à la seule entité production : la maintenance reste au service du produit et de l'entreprise en éliminant partout où elle le peut le gaspi ; l'erreur et l'inutile technique ... même si ce dernier procure de petits plaisirs!

Dans son statut actuel, la maintenance est considérée comme une fonction de frais généraux. Dès qu'un souci économique apparaît, des impasses sur telles ou telle tâche de maintien du patrimoine, du potentiel de production sont faites : la maintenance commence à être négligée et on rentre de nouveau dans une logique d'exploits onéreux pour retrouver les conditions optimisées de production.

Prise en compte comme une fonction contributive à la rentabilité usine, elle entre parfaitement dans la démarche de progrès industriel, sait déterminer les meilleures solutions : celles qui coûtent le moins avec la réponse technique appropriée, celles qui créent la meilleure continuité et qualité des productions.

Le contexte commercial traduit la conjoncture de marché dans laquelle se situe l'unité de production. Il rapproche trois éléments économiques qui caractérisent la santé de l'entreprise : la progression annuelle des volumes produits, l'évolution de la productivité, autrement dit la quantité produite par salarié, et l'évolution du coût ajouté rapporté à l'unité

produite. Une baisse des deux premiers critères et une hausse du troisième amplifieront la pression sur la maintenance.

Reste l'obsolescence des matériels qui est un leitmotiv à chaque évaluation : « Comment tenez-vous compte du vieillissement du matériel ? » Inlassablement, nous répondons que nous n'en tenons pas compte et nous redessignons la figure I-1 suivante

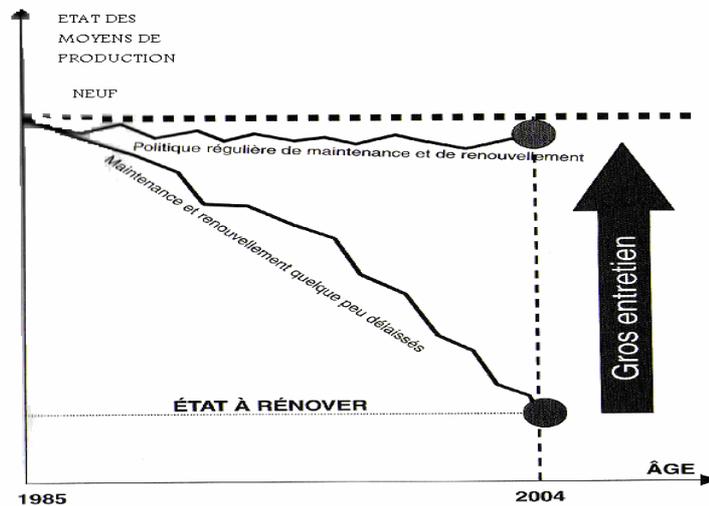


Figure I-1 : Gros entretien pour compenser le manque de maintenance

De deux choses l'une :

- Soit on a entretenu régulièrement les équipements et effectué les renouvellements appropriés d'organes : l'état est voisin d'un état neuf et la méthode d'évaluation s'applique parfaitement.
- Soit on a négligé à certains moments la maintenance et les équipements et l'état s'est fortement dégradé : on applique aussi la méthode complétée par l'estimation d'un budget de gros entretien.

Beaucoup de directions d'usines privilègient l'aspect budget sur les manques à gagner liés à une maintenance déficiente. Trop de maintenance ne génère pas forcément un taux de pannes moindre.

Il convient néanmoins d'examiner les deux coûts induits essentiels que sont les pertes liées aux défaillances et les surconsommations excessives voire surcoûts énergétiques associés à l'exercice de la fonction maintenance.

I.3. RENDEMENT DES MOYENS DE PRODUCTION

Avant toute chose, il y a lieu de valider les enjeux en termes d'impact de la maintenance sur le fonctionnement de l'outil de production. L'un des objectifs majeurs du directeur d'usine est d'utiliser les machines installées au maximum de leurs capacités.

En conséquence, tout doit être mis en œuvre pour obtenir une utilisation optimale de chacun des équipements en agissant sur la réduction des temps de « non-production », l'élimination des arrêts, l'amélioration des cadences, la non génération de défauts, de rebuts et/ou de déchets. En quoi la maintenance peut-elle contribuer à l'amélioration du rendement de l'outil de production ?

Pour suivre l'efficacité globale des actions mises en œuvre par tous, maintenance comprise, l'instrument de mesure le plus adapté est incontestablement le taux de rendement synthétique (TRS). C'est l'indicateur fédérateur qui traduit les progrès de tout un chacun dans la performance industrielle.

Le TRS peut se définir comme le rapport entre le temps de production de pièces bonnes à la cadence nominale et le temps d'ouverture de l'équipement. La différence entre le dénominateur et le numérateur est constituée par les diverses pertes des productions, schématisées par la figure I-2 ci-après dues :

- à des arrêts ou des non utilisations ;
- à des ralentissements ou à un travail avec cadence inférieure à la cadence nominale ;
- à des non-qualités : rebuts, retouches, voire des recyclages

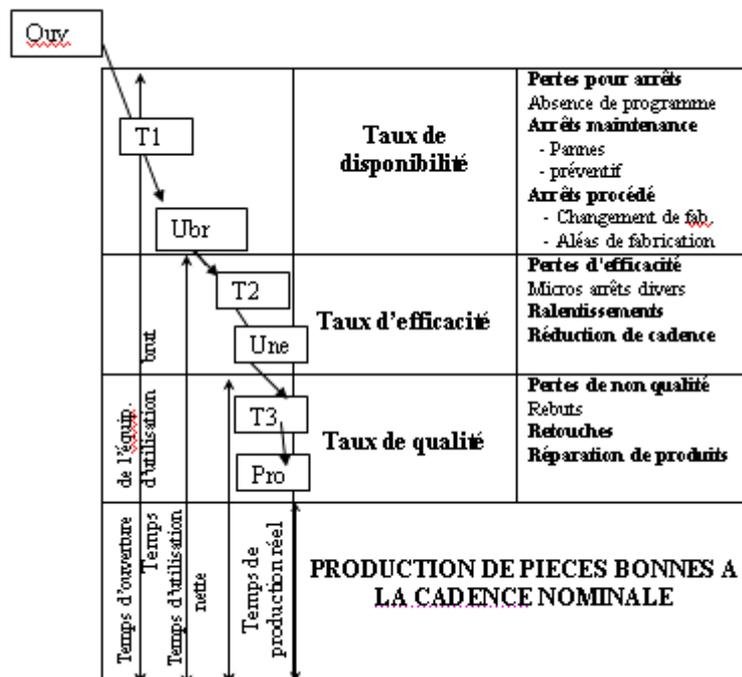


Figure I-2 : Le taux de rendement synthétique

Il convient donc, dans l'évaluation de la maintenance, de vérifier les enjeux induits par une amélioration du « vrai » rendement. Quelles diminutions d'arrêts peut-on envisager ? Quel positionnement des arrêts dans le cycle productif ? Quelles améliorations de fonctionnement peut-on escompter ?

Le rendement voire la disponibilité pourraient être complétés par d'autres indicateurs de production : réclamations clients, sécurité, hygiène, taux de service... très représentatifs de l'activité et des objectifs que doit partager à tout instant la maintenance. La finalité est sans aucun doute de produire avec un rendement optimal en satisfaisant l'ensemble des clients, dans des conditions d'hygiène et de sécurité évidentes et un respect de l'environnement de tout instant [2].

I.4. MICRO ET NANO PRECISION

Le progrès de la construction d'objets de précision a d'abord permis à l'homme de se situer dans l'univers qui l'entourait. Le développement des horloges et leurs applications à la navigation, la réalisation d'instruments optiques, a permis l'observation de l'environnement lointain.

La maîtrise de la qualité géométrique a conduit à créer des objets qui, aujourd'hui remplissent notre univers en assurant des fonctions qui sont devenues indispensables.

1.4.1. Un concept essentiel : la chaîne métrologique

Dans toute machine, l'objet 'outil' et l'objet 'pièce' qui sont interaction son reliés l'un à l'autre par une chaîne de solides et de liaison. Les objets outil et pièce sont très souvent des solides assez parfaitement indéformables, parfois des influences à distance comme des rayons lumineux, mais qui, du point de vue qui nous intéresse se comportent comme des solides, d'une façon très familière, on peut dire que la chaîne métrologique supporte le trajet des micromètres,(ou des nanomètre) entre l'outil et la pièce par un chemin parallèle au contacte outil/pièce et assure la maîtrise des positions relatives de ces deux objets au niveau de leur interaction. L'analyse de la qualité de la machine se fait obligatoirement par celle de cette chaîne. On peut prévoir les effets du cumul de diverses influences.

L'évaluation d'une machine, la mise en évidence de ses faiblesses, la mise en œuvre de cette chaîne métrologique. Des éléments solides assurent une liaison permanente et théoriquement invariable entre leurs deux extrémités. C'est le rôle assuré dans un outil par les éléments constitutifs tels que les bâtis, les colonnes les chariots, un deuxième type de maillon, souvent moins visible sur le plan matériel assure la réalisation de liaisons modifiables, paramétrables entre les éléments du premier type. Ces liaisons variables sont à la base de la possibilité offerte de déplacer l'outil dans l'espace de travail de la machine. On les désigne par le terme « glissières ». Il est fréquent, dans les machines classiques que ces glissières soient constituées simplement par des surfaces aménagées sur les extrémités des éléments solides de la machine. La mise en contact de ces surfaces assure une liaison géométrique entre les positions des éléments concernés. Dans le cas le plus courant, cinq degrés de liberté sont nominalement figés et le sixième degré, qui correspond au mouvement nominalement permis par la liaison glissière est contrôlé par mécanisme de positionnement variable, par exemple, par un système vis/écrou éventuellement doté d'une fonction asservissement. La qualité géométrique de la glissière dépend fortement des phénomènes présents au niveau du contact physique entre les surfaces, et du maintien de ce contact. Des éléments intermédiaires peuvent participer à cette relation entre deux surfaces, un lubrifiant, des éléments roulants ou des éléments flexibles. Pour l'instant, nous ne considérons que l'aspect « liaison en position » associé à ce contact, nous ne conserve donc que le point de vue "information de position relative" entre les solides qui portent les surfaces de la glissière. Nous pouvons remarquer que les éléments en contact effectuent d'une façon implicite mais réelle un traitement d'information. Le contact de deux surfaces à pression faible correspond à la recherche de points les plus saillants. Lorsque des surfaces en contact, correspondant à une minimisation de

l'énergie de déformation élastique conduit vers des solutions aux moindres carrés. La présence de fluides entre les surfaces réalise d'une façon physique la recherche d'une solution moyenne sur l'ensemble de points en regard. Un ensemble d'éléments roulants, assimilables chacun à un ressort réalise une fonction équivalente, mais apporte la contribution de ses propres défauts de géométrie, très dépendante du phasage en rotation des divers éléments qui est très peu reproductible. Les liaisons réalisées par l'intermédiaire d'éléments flexibles réalisent une forme de traitement de l'information imposée suivant un degré de liberté, ils réagissent par une variation prévisible des cinq autres degrés de liberté. Leur comportement, exempt de phénomènes de frottement est parfaitement répétable. De la même façon, nous ne considérons les éléments solides de la chaîne que sous la fonction « information de position relative » entre les deux extrémités de l'élément considéré. Les éléments correspondent sont alors considérés comme des « transmetteurs de position ». Le premier enseignement à tirer de cette notion de chaîne métrologique est lié à la mise en évidence de la longueur développée de la chaîne d'éléments successifs à travers laquelle on devra préserver une qualité géométrique équivalente à celle qui est demandée sur l'objet fabriqué qui est, lui de relativement faible dimension.

1.4.2. Les perturbations physiques qui compromettent la précision

La transmission de l'information « position » à travers la chaîne métrologique s'effectuant à travers des éléments concrets est soumise à des altérations très diverses qui ont pour résultats d'aboutir à des erreurs dans la position géométriques entre l'outil et la pièce travaillée. Il est intéressant d'esquisser un inventaire de ces causes. Il sera ensuite possible de minimiser ou de corriger l'effet de ces causes ou encore mieux d'éliminer leur influence.

- **Erreurs de réalisation des références métrologiques**

Ces références sont réalisées sous forme d'objets matériels comportent des imperfections.

Les surfaces de glissières présentent des défauts de forme, ce qui engendre des mouvements erronés, les erreurs de réalisation des transmetteurs de position conduisent à des mouvements dont la position relative est différente de ce qui avait été prévu. A ce stade, nous pouvons considérer que ces erreurs de position sont stables. Elles sont de ce fait corrigibles d'une façon assez universelle par le moyen d'une correction informatique des informations. Dans certains cas, des moyens de correction matériels peuvent rester plus intéressants comme le cas de correction géométrique par l'opération de grattage.

- **Causes physiques de variation des éléments constituant la machine**

Les différents éléments participant à la chaîne métrologique sont soumis à des perturbations susceptibles de modifier l'information qu'ils portent. Nous pouvons examiner les plus fréquentes.

a) Application d'efforts :

Les efforts appliqués sur les éléments constituant la chaîne métrologique, solide de liaison autant que glissières provoquent des déformations. Nous devons classer ces efforts en deux catégories : ceux qui sont prévisibles et répétables, et ceux qui ne le sont pas. Dans la première catégorie, nous trouvons principalement les poids des éléments de la machine qui correspond à des efforts importants, mais qui présentent souvent un caractère de permanence suffisant. Il faut cependant se méfier des machines à éléments interchangeables et des machines présentant des éléments lourds susceptibles de subir des mouvements de pivotement autour d'axes non verticaux. Dans la seconde catégorie, nous trouvons principalement les efforts liés au travail réalisé par la machine. Ces efforts sont cependant souvent très modérés quand on doit mobiliser le potentiel de précision de la machine.

L'existence de vibrations provenant de la machine elle-même ou de l'environnement introduit des efforts et donc des déformations des éléments. Ils sont beaucoup plus difficiles à prendre en compte que ceux qui proviennent de la pesanteur. Des solutions de protection internes à la machine ou externes existent mais ce problème reste difficile.

b) Variations de température

La dilatation homothétique :

Les variations de température provoquent des déformations des éléments solides par le phénomène de dilatation de 12.5 micromètres par mètre et par degré Kelvin. Des matériaux particuliers, l'Invar, alliage à 36% de nickel, ou le Zérodur, verre comportant une phase vitreuse et une phase cristalline permettent de diviser par dix ou cent cette sensibilité à la dilatation. Ils sont cependant coûteux et difficiles à mettre en forme et à utiliser. Bien que parfois utiles, ils ne constituent pas une réponse universelle au problème de la dilatation. Ce phénomène de dilatation, bien connu de tous correspond à la dilatation homothétique répondant à une variation homogène de température. Dans ce cas, les erreurs sur les élévations de longueurs sont bien en rapport avec le coefficient de dilatation, éviter les effets de ce phénomène conduit à prendre des précautions relativement élémentaires. En dernier recours, une mesure de température des éléments peut apporter une amélioration de précision par le moyen d'une correction relativement simple.

1.4.3. La correction des erreurs de machines

La qualité géométrique des machines résidant dans une « information », il vient naturellement à l'esprit de corriger cette information. Dans le métier de la machine-outil, il était bien

connu, mais mal codifié qu'il fallait courber les surfaces de glissières pour obtenir des mouvements vraiment rectilignes. Des mécanismes, parfois assez complexes sont prévus pour engendrer des efforts qui provoquent sur les éléments de structure des déformations naturelles dues, par exemples à la pesanteur.

La présence devenue universelle de calculateurs numériques autorise maintenant une possibilité de stockage et de traitement d'information presque illimitée. De ce point de vue, le cas des machines à mesurer est très favorable puisqu'il suffit de modifier en ajoutant simplement des corrections les informations qu'elles fournissent sur la position de leur outil qui est presque toujours sphérique. Le cas des machines d'usinage est plus complexe, s'il est relativement facile de modifier les coordonnées cartésiennes de l'extrémité d'un outil, il n'est pas toujours facile de modifier la direction d'un outil long. Même sur des machines dites cinq axes qui ont ce potentiel, la réalisation de petits mouvements de correction peut être difficile du fait des limites de la mécanique de la machine. La solution peut alors résider dans l'introduction de mécanismes spécialisés de correction.

a) Limites de la correction des machines :

La correction des machines peut être assez facilement basée sur une information stockée correspondant au relevé des erreurs de la machine saisies lors d'une opération d'étalonnage. On donne alors une correction efficace pour l'état dans lequel se trouve la machine lors de cette opération d'étalonnage. Le problème se pose de la validité de cette information qui peut se révéler périmée et ne peut porter que sur la part « répétable » de ces erreurs. Il faut d'ailleurs vérifier si cette information reste stable à long terme. La part non répétable de ces erreurs ne peut être corrigée, en particulier celle qui relève des effets vibratoires et des variations de l'état thermique.

b) Vers une correction plus efficace de la géométrie des machines par l'intégration du concept « information »

Une évolution vers une correction plus efficace consiste à actualiser très fréquemment les informations sur la variation de géométrie à partir d'informations fournies par des capteurs fonctionnant en temps réel ou légèrement différé.

Dans la chaîne métrologique d'une machine, les guidages constituent un maillon faible vis-à-vis des perturbations physiques diverses, en particulier vis-à-vis des efforts susceptibles de s'exercer à ce niveau. L'existence de jeux, le comportement mal déterminé des éléments intermédiaires contribuent à introduire des effets non répétables, donc très difficiles à corriger.

c) Vers la structure métrologique « dissociée » :

Un développement du concept peut être trouvé en spécialisant les surfaces de guidages dans leur rôle de « porteur d'information » et de les dispenser totalement de la fonction « transmission d'efforts ». Leur forme géométrique qui n'a pas besoin d'être parfaite, elle est susceptible d'être

étalonnée et corrigée. De ce fait, la conception de leur structure qui n'a à supporter aucune autre charge que son poids peut être extrêmement libre et optimisée vers une très grande stabilité de géométrie. Leur supportage peut en particulier être optimisé d'une façon qui les rende très peu sensibles aux vibrations de l'environnement.

Comme il reste nécessaire de maintenir en position les éléments de la machine et de supporter les efforts éventuels de travail, on doit prévoir, en parallèle à l'ensemble des éléments qui constituent la chaîne métrologique, une chaîne « porteuse » dont la fonction sera de supporter les éléments de la chaîne métrologique et d'amener l'outil en position relative par rapport à la pièce d'après les informations fournies par cette chaîne métrologique. [3].

I.5. ANALYSE DES MACHINES DE PRECISION

I.5.1. Analyse d'une machine comme en générateur de positions

Nous analysons les origines des erreurs de géométrie dans les architectures « **classique** » de machines. Nous construisons des modélisations de ces erreurs en vue d'introduire des méthodes de correction de ces imprécisions.

On peut analyser une machine comme un générateur de positions et de déplacements dans lequel la position relative de l'outil par rapport à la pièce doit être maîtrisée. La réalisation de cette position relative, dans les machines classiques, fait toujours appel à une « chaîne d'éléments » à travers laquelle on assure le repérage relatif de la position outil/pièce.

Cette chaîne d'éléments est habituellement constituée de solides reliés par des liaisons. Dans cette analyse, nous l'appelons « **chaîne métrologique** » [4]. Cette chaîne est fondamentale, car c'est elle qui supporte et transmet l'information de position relative entre « l'outil » et la « pièce ».

La fonction principale d'une machine est mise en position d'un outil dans un système de coordonnées lié à une pièce. En général, la variation de chaque coordonnée correspond au fonctionnement d'une glissière que nous identifions comme une liaison de guidage paramétrable (figure I.1). Un système de commande associé à chaque glissière impose la valeur du paramètre variable associé à chaque glissière un dispositif de mesure peut indiquer la valeur réellement atteinte par ce paramètre. Pour faciliter la réalisation de certaines opérations et permettre en particulier à l'outil d'accéder à la pièce sous différentes orientations, les machines peuvent comporter plus que les trois glissières suffisantes au balayage simple de l'espace géométrique. En plus de ces glissières, dans les machines de

fabrication, l'outil ou la pièce est associé à un système de guidage permettant un mouvement relativement rapide qui assure l'opération de coupe.

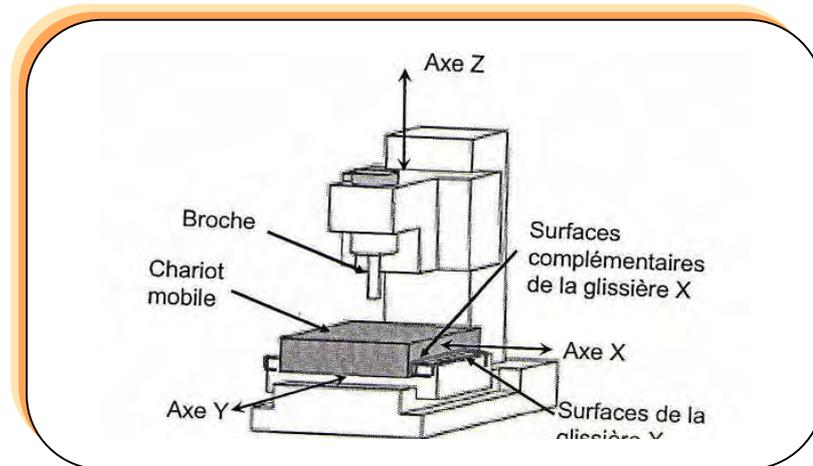


Figure I-3 : Schéma d'une fraiseuse classique, présentation des glissières

Une glissière, qui constitue le mécanisme participant à la constitution d'une machine, comporte principalement deux surfaces mises en contact. Ces surfaces assurent le positionnement relatif de deux solides tout en permettant de faire varier un degré de liberté [5] (figure I.4). Une première surface, la glissière proprement dite, matérialise la direction du mouvement que l'on veut réaliser, sous la forme d'une surface prismatique décrite par un ensemble de droites parallèles au mouvement à obtenir. Élément mobile guidé s'appuie dessus par l'intermédiaire d'une surface complémentaire que nous appelons la « **contre glissière** ». On peut ainsi engendrer un mouvement de direction choisie compatible avec forme des surfaces en contact.

De nombreux problèmes technologiques sont posés au niveau du contact physique des surfaces ; en particulier, la nécessité d'un « troisième corps », interposé entre les surfaces, indispensable pour les séparer et préserver durablement l'état de ces surfaces. Il s'agit souvent d'un fluide visqueux comme l'huile ou même de l'air. L'état des surfaces au contact n'est pas quelconque ; il doit en particulier conduire à préserver de la façon la plus permanente possible la présence du lubrifiant. L'adhésion entre matériaux et le lubrifiant est une propriété importante. D'ailleurs, la caractéristique principale des « huiles de glissière » est la capacité de mouillabilité. Certaines technologies font appel à la présence d'éléments roulement, ce qui n'exclut pas nécessité d'un lubrifiant [6]. Dans ce travail, nous limitons la réflexion technologique aux effets qui agissent sur le positionnement relatif des solides en contact.

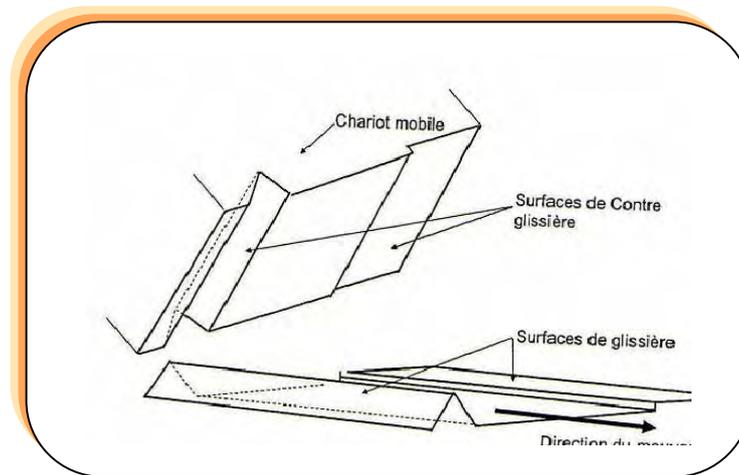


Figure I-4 : Schéma glissière contre glissières

1.5.2. Analyse de la précision des machines classiques :

L'utilisation des machines classiques, construites dans une période que nous arrêtons aux années soixante, correspondait à reporter sur une pièce les trajectoires engendrées par le mouvement des glissières, ces glissières étant animées plutôt séparément. Cette utilisation avait pour effet d'introduire les défauts géométriques des glissières directement sur les pièces obtenues. On peut citer par exemple le parcours d'une génératrice de cylindre par le moyen du déplacement d'un chariot « traînard » de tour parallèle. En général, la qualité géométrique du mouvement obtenu était meilleure que celle des surfaces de glissière en contact fondamentalement grâce à des phénomènes de lissage ou de moyennage. Les besoins liés à l'évolution de l'aéronautique ont demandé, avec l'apparition de la « structure intégrale » dans les années soixante, la réalisation de formes complexes usinées faisant appel à la variation simultanée de plusieurs coordonnées dans des conditions de précision exigeantes. Les machines de copiage, d'abord employées dans ce but, ont laissé la place à des machines à commande numérique consacrant ainsi la pénétration du traitement automatisé de données dans le domaine de la machine-outil.

On distinguera, dans les défauts des trajectoires engendrées par les machines les défauts à variation lente, comme la courbure des glissières de ceux qui sont provoqués par les éléments technologiques constituant la chaîne, qui sont à variation spatiale rapide. Il peut s'agir de défauts de forme d'éléments roulants, d'irrégularités de transmission de chaînes d'engrenage, d'insuffisances de résolution des chaînes de calcul. Les conséquences sur le fonctionnement des machines peuvent être sévères. On peut citer beaucoup de cas depuis « les raies fantômes » dans les transmissions de voiture [8], les ondulations de surface des verres de lunettes [9] qui provoquent des maux de tête jusqu'à des problèmes de tenue en fatigue

des couteaux qui servent à couper des produits en ouate de cellulose comme les couches culottes.

La disponibilité d'un potentiel de calcul présent sur les machines permet alors d'envisager de traiter des informations complémentaires susceptibles d'améliorer la précision des mouvements engendrés [9]. En fait, l'association de l'« information » à la précision existait dans les technologies classiques de machines-outils, même si cette association relevait du domaine du « non dit ». Sur des machines, comme par exemple les rectifieuses rectilignes, un film d'huile existe au niveau des surfaces de contact entre la table mobile et la glissière. Dans le calcul d'une vitesse de glissement non nulle, l'existence de rugosités résultant de la finition par « grattage » des glissières engendre une surpression au sein du film d'huile. Cette pression permet alors de soulever la table et d'obtenir une trajectoire correspondant à la moyenne des irrégularités de forme des deux surfaces en regard. Ce phénomène, qui apporte une amélioration de trajectoires, cache en réalité un traitement de l'information à travers le film d'huile. La surpression capable de séparer les surfaces et d'éviter le contact solide résulte de l'existence, au niveau de chaque irrégularité de surface issue du « grattage », d'un petit palier répondant au modèle décrit par RAYLEIGH [10] (fig I.5)

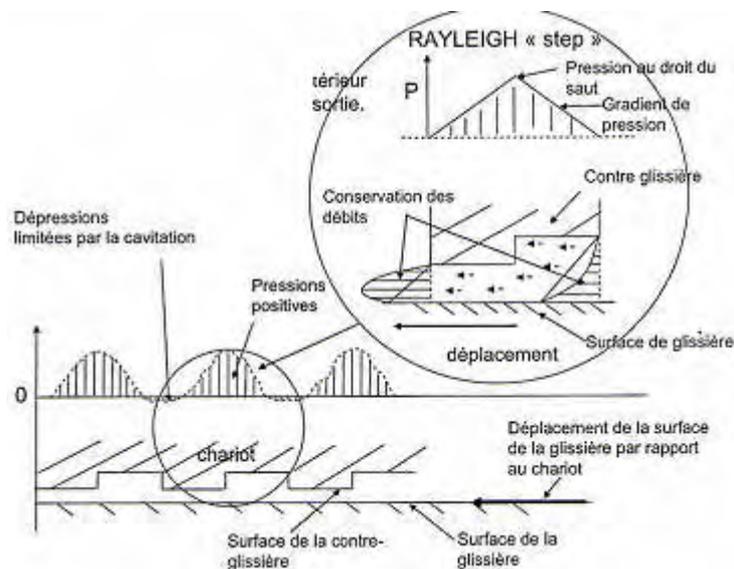


Figure I-5 : Modèle de RAYLEIGH

Le débit entraîné par le mouvement relatif des deux surfaces dans le cas d'un profil de vitesse triangulaire entraîne une accumulation de fluide sous le patin. Le gradient de pression qui s'établit superpose un écoulement entre deux plans du centre vers l'extérieur qui conduit à équilibrer les débits d'entrée et de sortie.

Les pressions positives peuvent atteindre un niveau important tandis que les pressions effectives, limitées par le phénomène de cavitation, ne peuvent créer d'effet d'aspiration pour une valeur supérieure à une atmosphère. Globalement, le bilan des pressions conduit donc à un soulèvement de la table. Au cas où l'on voudrait obtenir une séparation certaine des surfaces de guidage, même en cas de vitesse relative nulle des surfaces en regard, on peut alimenter le film fluide par une source extérieure de débit de fluide visqueux. Dans tous les cas, le film fluide sous pression assure, par moyennage géométrique, une fonction de « filtrage » des irrégularités des surfaces. La réalisation des surfaces grattées elles-mêmes correspond au traitement d'une information. Le travail du gratteur consiste à enlever de la matière au niveau des points de contact qu'il met en évidence en juxtaposant les surfaces ; l'introduction, d'un colorant fluide entre ces surfaces permet de repérer ces points.

Il faut remarquer que dans la famille des machines industrielles, on peut distinguer les « machines de production » destinées aux opérations de fabrication et les « machines de mesure », destinées au contrôle. Le rôle final de ces deux types de machines est légèrement différent sur une constitution de départ assez similaire. En effet, dans une opération de fabrication, on vise à réaliser le plus parfaitement possible la mise en place de l'outil par rapport à la pièce, alors que, dans une action de vérification ou de contrôle, on peut être conduit à se contenter de « constater » simplement cette position relative, avec en général un niveau d'incertitude plus fin. En réalité, ces deux types de machines ont le même but à savoir la maîtrise de la position d'un objet « outil » par rapport à un référentiel lié à l'objet « pièce ». Leurs architectures de conception sont souvent similaires. L'exigence d'un résultat plus fin pour les machines de mesure est facilitée par le fait que celles-ci supportent beaucoup moins d'efforts de travail.

I.6. CAUSES PHYSIQUES CONCOURANT A PERTURBER LA GEOMETRIE DES MACHINES

La qualité de la géométrie des machines est liée à la sensibilité de forme des éléments constituant la chaîne métrologiques : à savoir d'une part les solides et d'autre part les liaisons entre ces solides. Les deux causes principales de déformation de ces deux types d'éléments sont : les différentes forces qui peuvent s'exercer sur eux, et les perturbations thermiques qui peuvent entraîner des déformations par phénomène de dilatation [11].

Les forces liées au travail de la machine : principalement des forces de coupe. Ces forces sont en principe très modérées lorsque l'on cherche à exploiter la qualité géométrique de la machine, principalement au cours des opérations de finition. Il en est de même pour des opérations de palpation dans l'exécution de mesures pour lesquelles les efforts sont toujours extrêmement modérés et ont très peu d'influence sur la déformation des éléments de la machine.

- ❖ Les forces liées au poids des éléments de la machine : ces forces, qui peuvent être très importantes, sont en principe répétables pour des coordonnées identiques de la machine. Seul peut varier le poids d'équipements interchangeables, comme par exemple, l'échange de têtes sur une fraiseuse l'effet de ces forces est, en général, relativement facile à compenser, éventuellement par des solutions purement mécaniques.
- ❖ Les qualités d'accélération, proportionnelles aux masses, associées aux vibrations extérieures et intérieures. Ces forces augmentent très sensiblement avec la vitesse et deviennent prépondérantes pour des machines à dynamique rapide.
- ❖ Les forces de frottement au niveau des glissières : ces forces dépendent de la technologie de glissière employée. Il ne faut pas oublier que les technologies à forces de glissement réduites présentent l'inconvénient d'introduire peu d'amortissement ce qui est sensible en cas de sollicitation vibratoires. Cette caractéristique est importante pour les machines d'usinage et restreint le recours à ce type de technologies. Il existe donc des forces tangentielles exercées dans la direction des glissières, dont le sens dépend de celui du mouvement qui a permis d'atteindre la position. L'effet de ces forces peut être important surtout par les rotations qu'elles sont susceptibles de provoquer sur les éléments de la machine, en particulier si le bras de levier qui existe entre les glissières et les systèmes de commande de position est important. Les chaînes porte câbles introduisent aussi souvent des efforts de frottement. L'effet de ces forces introduit un effet d'hystérésis qui peut apparaître comme l'effet d'un jeu sur des machines qui n'en comportent pas.

1.6.1. Elimination des forces perturbant la géométrie des machines :

Une méthode praticable pour éviter les déformations provoquées par les forces variables consiste à faire « disparaître » ces forces. Cette solution est bien adaptée au traitement des forces de pesanteur pour lesquelles il est possible de créer un effort opposé.

Considérons le cas d'un chariot se déplaçant sur un portique : il est possible d'envisager de créer un effort, opposé au poids du chariot, appliqué à la verticale du centre de gravité. On peut imaginer tout système capable de créer ce type d'effort. Le plus élémentaire mais irréaliste pourrait être constitué d'un ballon aérostatique exerçant un effort vers le haut et accroché à la verticale du centre de gravité du chariot. Cet exemple décrit bien la force constante exercée par un système à raideur nulle. D'une façon plus réaliste, on peut envisager l'emploi d'un dispositif « équilibreur de charge » utilisé fréquemment en manutention de charges répétitives, pour aider au chargement de machines par exemple. Une condition importante est d'éviter de transmettre des efforts pouvant être introduits par les frottements dans ce mécanisme. Un dispositif viable et envisageable est d'intégrer dans chacune des jambes du portique deux jambes verticales appuyées chacune sur un appui glissant sans frottement, par exemple un patin aérostatique, ces jambes sont guidées dans le portique par une liaison sans frottement de type lames flexibles. Une poutre repose sur le haut de ces jambes et un appui glissant sans frottement, relié au chariot par un ressort taré ou un vérin constitué par un soufflet de dilatation sous pression d'air, s'appuie sur cette poutre (figure I.8).

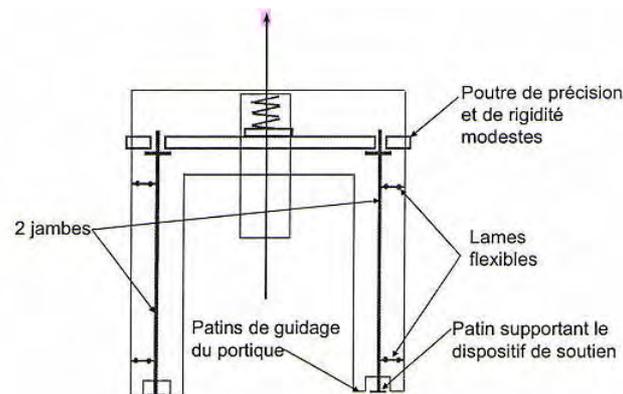


Figure I-8 : Dispositif de compensation de poids du chariot

De cette façon, le chariot est soumis à une force verticale de valeur constante passant par le centre de gravité et colinéaire à son poids. Dans ce cas, le déplacement du chariot le long du portique ne perturbe plus l'équilibre de celui-ci. On peut considérer que le chariot est en « apesanteur » et qu'il est maintenu en position par les guidages de précision.

Une faiblesse de cette solution est que les forces d'inertie liées au champ des accélérations et aux vibrations ainsi que les forces de travail continuent à solliciter la structure de précision qui est la seule à apporter une rigidité. Des constructeurs de machines-outils ont pratiqué cette solution en implantant à la place de chaque jambe un vérin hydraulique dont la pression était

associé à la position en Y du chariot. Ce principe, très complexe à régler est moins intéressant que la solution présentée sur la figure I.8.

Il a existé, dans l'histoire de la construction des machines, un centre d'usinage dont la colonne était guidée par des douilles cylindriques sur deux barres rondes encastrées dans le bâti. Un système auxiliaire de patins aérostatiques montés sur ressort permettait d'exercer un effort opposé au poids de la colonne (Figure I.9).

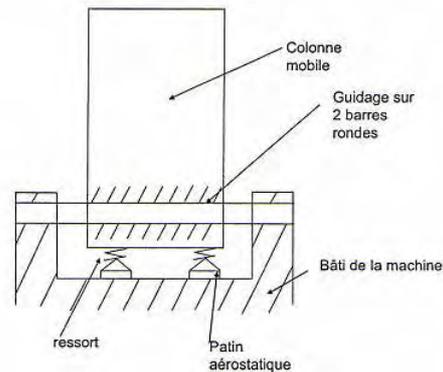


Figure I-9 : Centre d'usinage

Cette application présente un aspect pervers car elle permet d'alléger le système de guidage qui, du fait de cet allégement, présente une rigidité faible vis-à-vis des vibrations. Ce type de solution peut présenter un intérêt dans le cas de machines à mesurer mais pas dans celui de machines subissant des sollicitations dynamiques.

1.6.2. Erreurs provenant des liaisons entre solides de la chaîne

Pour constituer une chaîne, comme décrit précédemment, les solides doivent être réunis par des systèmes de liaison permettant de maîtriser, en l'imposant, la position relative de deux solides adjacents. Ces systèmes constituent les « **guidages** » de la machine et sont les éléments les plus délicats dans la stabilité de la chaîne métrologique.

Un guidage élémentaire correspond à la mise en contact de deux surfaces, une surface de glissière et la surface interne correspondante du chariot, la « contre glissière ». Cette mise en contact introduit un problème technologique majeur. En effet, la correspondance parfaite des surfaces d'appui est difficile à réaliser et surtout à garantir. La recherche d'une amélioration de la qualité du contact entre les surfaces, par le choix d'une liaison isostatique parfaite, conduit à de fortes pressions de contact favorisant l'usure et conduisant à une faible rigidité ainsi qu'à une stabilité souvent insuffisante. Le renforcement des zones de contact rend la

liaison hyperstatique. Une telle situation aggrave les conditions de conjugaison des surfaces et peut être source d'apparition de comportement mal maîtrisés. Malgré ces inconvénients, le caractère hyperstatique d'une liaison est susceptible d'apporter des avantages importants. On peut en effet profiter d'une meilleure rigidité de la liaison, qui est plus homogène dans toutes les directions et risque moins de conduire à des basculements imprévus. Cette rigidité peut aussi s'accompagner de la présence d'un effet d'amortissement dynamique. L'imperfection inévitable, dans la mise en regard des surfaces de glissières plus ou moins hyperstatiques, conduit à toujours réserver des jeux qui empêchent l'élimination totale de l'huile entre les surfaces de glissières pendant les périodes d'arrêt. De cette façon, au redémarrage, la présence d'huile entre les surfaces est plus vite assurée et, dans le cas d'un mouvement qui ne se déplace pas lors d'une opération de travail, cette présence d'huile donne une fonction d'amortissement du fait de l'« écrasement du film d'huile ». Le deuxième avantage apporté par l'hyperstaticité tient dans un effet mécanique de « moyennage » des données. En effet, un système mécanique contraint prend spontanément une position d'équilibre correspondant à un minimum d'énergie de déformation élastique. Cette position d'équilibre tend vers le résultat qui est obtenu en déterminant par une méthode aux moindres carrés la coïncidence des deux surfaces. Cette concordance suppose une homogénéité des rigidités. Il faut, dans l'introduction d'un caractère hyperstatique, savoir prendre les précautions nécessaires pour maîtriser les effets des efforts internes susceptibles de se développer au niveau des contacts.

a) Nécessité de guidages bilatéraux

Un besoin, souvent incontournable, correspond au fait de devoir maintenir la « bilatéralité » des liaisons, indispensable en cas d'inversion des efforts transmis par une liaison, d'une façon qui peut être normale ou accidentelle. Ceci introduit la nécessité absolue d'un hyperstatisme.

La solution classique consiste à réaliser un guidage « fermé » en établissant des surfaces en regard des surfaces de guidages. Cette solution conduit à maintenir des jeux qui conduisent, à au moins deux, sinon plusieurs positions d'équilibre en cas de variation d'efforts exercés sur la liaison. La maîtrise dimensionnelle exige pour ce type de solution conduit à prévoir des lardons de réglages de jeu utilisant souvent des cales à faible pente (figure I.10). Le réglage en est difficile, résultat d'un compromis entre la recherche d'un jeu minimal et le risque d'un blocage du mouvement par serrage excessif. Ce serrage peut se trouver aggravé soudainement par un effet de dilatation ou de déformation de la glissière. Un dispositif de lubrification efficace ou une technologie de guidage à frottement faible simplifie ce compromis. Une telle solution conduit à maintenir un effet de « traversée de jeu » entre les positions correspondant

à des efforts de sens différents. Dans un tel guidage, on ne sait souvent pas bien distinguer la surface de glissière qui assure le guidage de celle qui assure le « maintien de contact ».

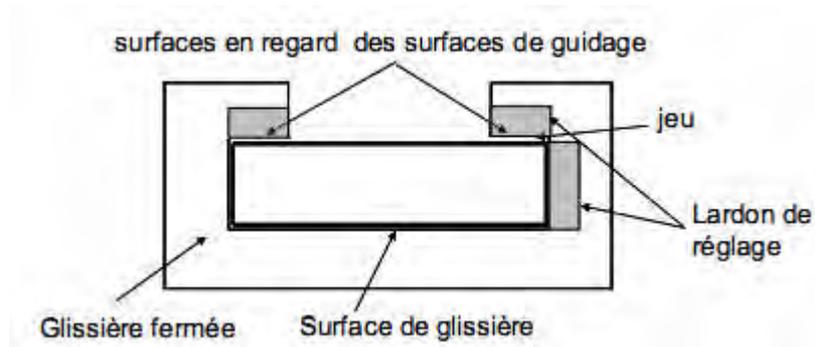


Figure I-10 : Glissière fermée dotée de cales de réglage fin

b) Erreurs provenant des éléments de référence.

Les chaînes métrologiques comportent des éléments de référence : systèmes de mesure et surfaces de guidage. Ces éléments sont susceptibles de comporter des erreurs, en général assez stables, leur stabilité étant liée à celle de solides.

Les erreurs de guidages peuvent provenir d'imprécisions sur la réalisation initiale des pièces constituant la chaîne. Elles peuvent aussi être le résultat de déformations liées aux efforts transmis par ces éléments. Des déformations importantes peuvent résulter de la non homogénéité de la dilation dans un élément appartenant à la chaîne. Cette non homogénéité est particulièrement à craindre dans les éléments qui associent des matériaux ayant des caractéristiques différentes. Elle peut également correspondre à une non uniformité de température dans des pièces monolithiques de matière homogène surtout si celles-ci sont un peu conductrices de la chaleur. De ce fait, le choix du matériau idéal résulte d'un compromis entre diffusivité thermique et coefficient de dilatation. Des dispositions particulières doivent être prises pour améliorer l'uniformité de température ou diminuer la sensibilité des structures aux flexions thermiques.

I.7. CORRECTION DE LA GEOMETRIE

I.7.1. Un traitement « mécanique » de l'information peut-il conduire à améliorer la qualité d'un guidage ?

Dans la mesure où les erreurs des systèmes de mesure et des références métrologiques qui relèvent d'une notion d'information présentent un caractère permanent, on peut envisager de les corriger à partir des données enregistrées préalablement. De nombreuses techniques ont été développées et ont longtemps constitué l'apanage des constructeurs de machines-outils de haute et très haute précision. L'utilisation exclusive de techniques relevant de systèmes mécaniques limite sévèrement le potentiel des corrections appliquées. De plus, ces moyens relèvent souvent du domaine des savoir-faire et des secrets de fabrication.

a) Compensation des défauts par modification des glissières

Le premier moyen pratiqué traditionnellement conduit à réaliser des glissières présentant des modifications de forme de faible amplitude susceptible de corriger, par exemple, les effets du poids des chariots qui se déplacent. Un cas idéal, et important, permet d'introduire cette problématique. Il s'agit de machines dans lesquelles un chariot lourd se déplace sur une glissière rectiligne. Sous l'action du poids du chariot qui se déplace, la flexion des glissières donne une trajectoire bombée concave pour cette raison les constructeurs prévoient lors de la fabrication des bancs de tours, un bombage convexe. Cette modification des glissières rectilignes a été apportée pour corriger le défaut suscit.

La réalisation d'une surface adaptée du chariot sur le profil des glissières du banc de tour de quelques centièmes de millimètres par grattage est relativement facile. L'opération consiste à mettre du colorant sur les glissières du banc, ensuite déplace le chariot le long des glissières, enfin adapter le chariot, par grattage des bosses de portage, sur les glissières jusqu'à obtenir un état de surface bien portée (voir paragraphe III techniques de grattage).

I.7.2. Limites de la correction

La non permanence des défauts à corriger peut provenir de sources diverses. Citons principalement :

- L'usure lente des surfaces de glissières ou des éléments roulants ;

- La variation rapide de configuration non maîtrisée des dispositifs technologiques de guidage, principalement sur les types des guidages comportant des éléments roulants qui ne conserve pas leur phase ;
- Les déformations de surfaces de référence sous l'action d'effets liés aux forces transmises. Le caractère permanent de ces forces est souvent incertain. On distingue dans ces forces :
 - 1- Le poids des éléments de la machine, qui présente une certaine stabilité, hormis les changements d'équipements.
 - 2- Les effets des accélérations correspondant aux vibrations de l'environnement de la machine impossible de prévoir à l'avance ;
 - 3- Les effets des accélérations propres de la machine sur les éléments de structure ou les liaisons entre éléments. On peut citer tout particulièrement les effets liés à l'irrégularité cinématique des systèmes d'entraînement.
 - 4- Les effets des forces de frottement existant au niveau des glissières et qui changent de sens avec la direction d'accostage.
- Les déformations sous l'effet de variations de température.

I.8. L'EVOLUTION DES MACHINES-OUTILS

I.8.1. Les premières machines-outils

En 3 500 avant J.C, l'homme a déjà inventé quelques machines, par exemple le tour du potier. Plus tard, le tour à bois transforme des rondins en quilles et en boules. Jusqu'à la Renaissance, les tours ont été actionnés à la main, par des artisans, avec un arc en bois ou au pied avec une pédale. Au XIX^e siècle, Léonard de Vinci perfectionne les tours à bois de son temps et il étudie des projets de machines capables de fabriquer des objets sans l'homme [12].

I.8.2. Les premières machines-outils motorisées

Les premières machines-outils sont inventées vers 1760. Verbruggen construit une machine à aléser, c'est-à-dire à calibrer les canons et Vaucanson conçoit le premier tour à chariot et une perceuse dont les divers dispositifs devinrent les organes essentiels de la machine-outil.

Construit par Watt en 1775, le moteur à vapeur révolutionne l'industrie. Dans les vastes usines, la force motrice de la machine à vapeur est transmise aux machines-outils par des poulies et des courroies. Des blocs de métal sont creusés par des fraiseuses ou découpés par des étaux limeurs pour obtenir des pièces plus complexes. Les machines-outils guidées par des ouvriers commencent à réaliser des pièces en série.

1.8.3. La révolution industrielle

La plupart des machines-outils avaient été inventées à la fin du XVIII^e siècle, mais c'est au cours du XIX^e siècle, et particulièrement après 1830, qu'elles vont se répandre et se transformer en machines industrielles.



Figure I-11 : Usine de montage de locomotives (Canadien Pacifique Limitée)

Au début du XIX^e siècle, les ingénieurs anglais prennent beaucoup d'avance. Leurs machines-outils, tours à fileter les vis et les boulons, tours à mortaiser ou les machines à encocher, fabriquent en série. La marine britannique installe, en 1803 à Portsmouth, la première chaîne de montage : 45 machines spécialisées fabriquent 130 000 poulies par an pour les navires à voile. A la même époque, l'Américain Whitney invente un outillage capable de produire des pièces de fusils identiques.

Ces nouvelles méthodes de production améliorent le travail des ouvriers. Travaillant dans des usines, ils effectuent des tâches qui ne demandent plus beaucoup de qualification.

I.9. CLASSEMENT DES MACHINES-OUTILS

Selon la norme ISO E60-001, les machines-outils sont classées en six catégories[13], Machines travaillant par **enlèvement de métal** (tours, machines à fileter, à tarauder, à raboter, à percer, à fraiser...)

- Machines travaillant par **déformation du métal** (machines non hydrauliques ou hydrauliques à déformer les métaux).
- Machines de **soudage et oxycoupage** (machines à souder classées dans les normes CNS).
- Machines à **bois** (scies à ruban, scies circulaires, machines à raboter, à profiler, tours à bois, etc.).
- Machines-outils **électriques portatives** (à percer, tarauder, meuler, scier, etc.).
- Machines-outils **pneumatiques** (marteaux, fouloirs, machines à visser, à perforer, etc.).

A l'aide d'une fraise, la fraiseuse exécute toutes sortes de travaux sur une pièce métallique : défonçage, rainurage, sciage, taillage d'engrenage...

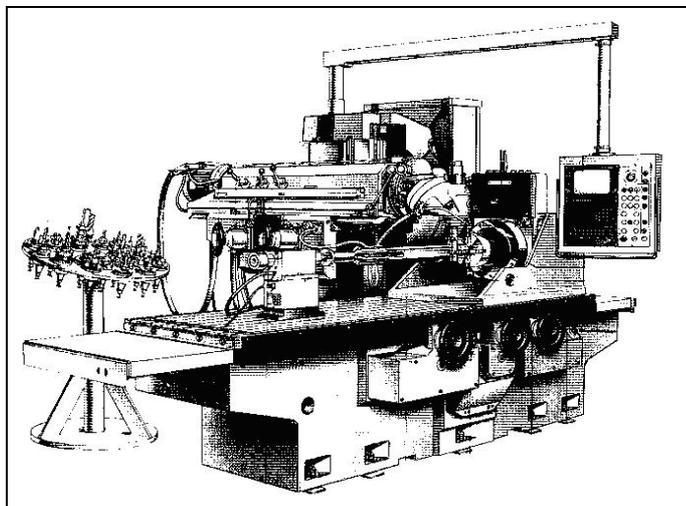


Figure I-12 : Fraiseuse à banc de commandes numérique paraxiale.

Le tournage (action d'usiner une pièce animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe sur un tour) est une des opérations les plus courantes d'usinage de pièces par enlèvement de matière.

Il y a des tours horizontaux, verticaux, en l'air ou frontaux, automatiques, parallèles de décolletage (pour l'usinage direct de pièces à la suite les unes des autres dans une barre de métal tronçonnée au fur et à mesure de leur fabrication).

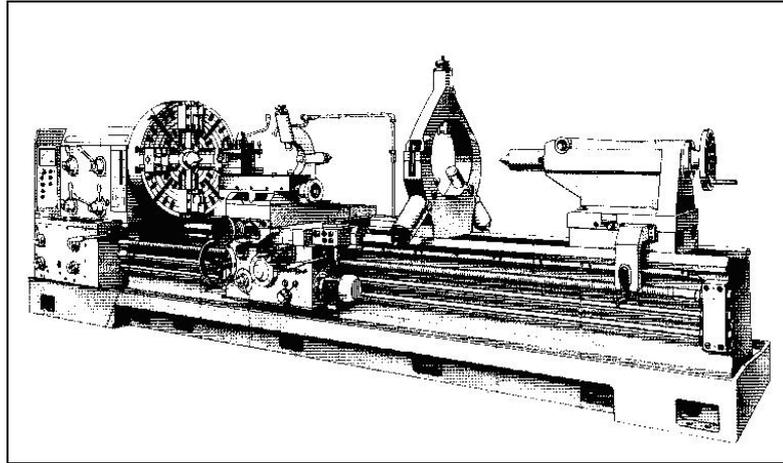


Figure I-13 : Tour parallèle.

Les centres d'usinage permettent l'usinage industriel automatisé (ou le tournage) des pièces par commande numérique où la sélection des outils s'effectue automatiquement à partir d'un magasin d'outillage intégré dans le centre.

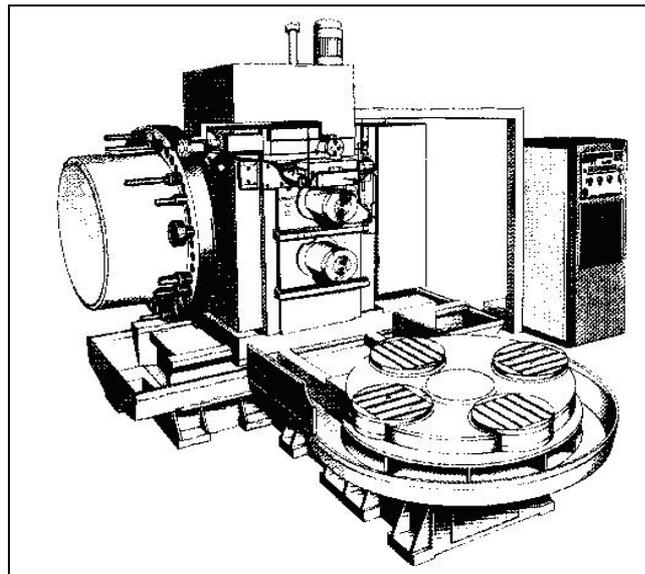


Figure I-14 : Centre d'usinage

I.10. DIFFERENTES OPERATIONS REALISEES PAR LES MACHINES-OUTILS

La figure I-15 ci-dessous représente les différentes opérations de tournage (chariotage, dressage, filetage,... etc.), fraisage, rabotage, mortaisage,... etc., réalisées par les machines-outils.

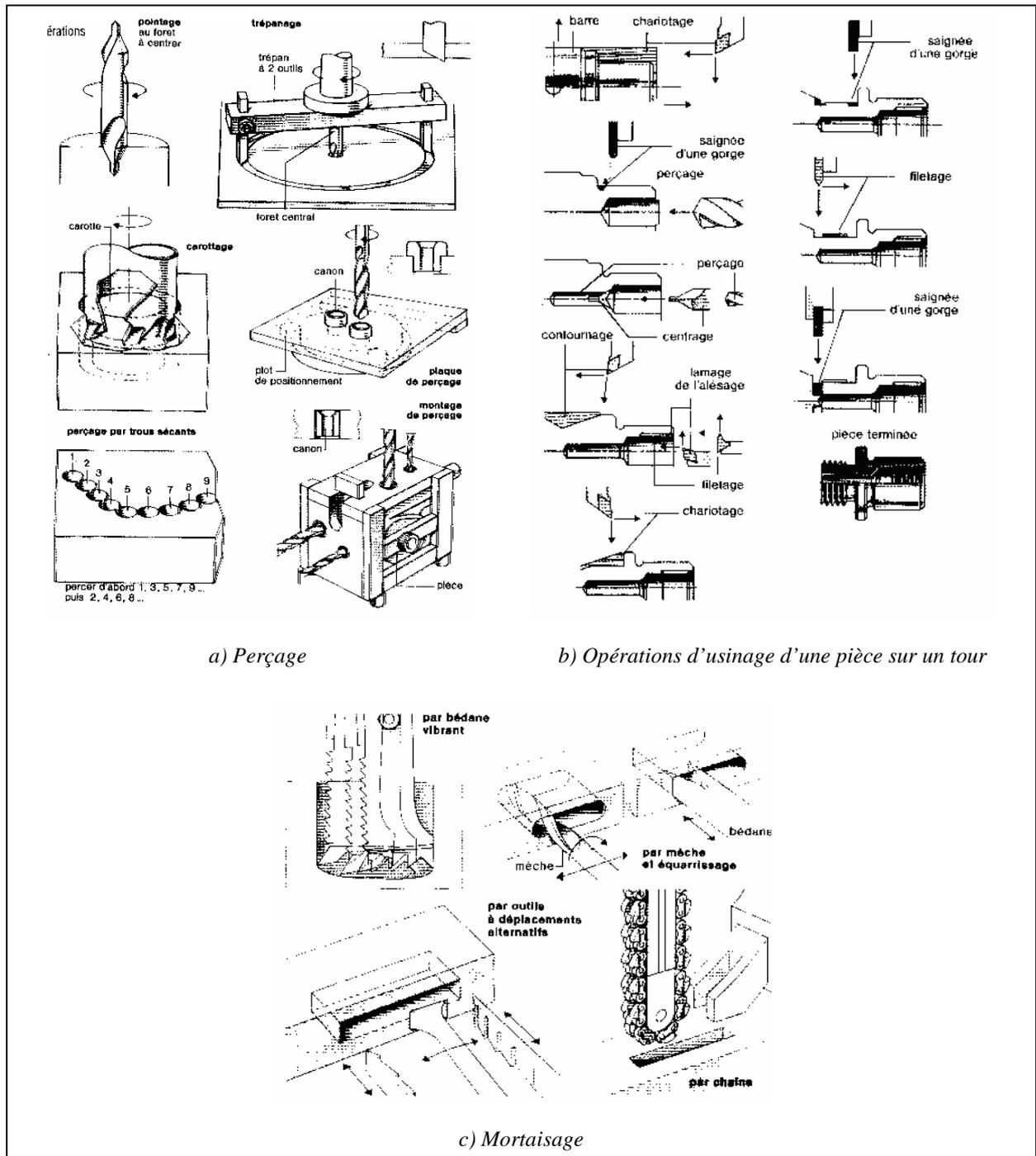


Figure I-15 : Opérations réalisées par les machines-outils.

I.11. CONCLUSION

Aujourd'hui, l'outil informatisé, appelé commande numérique, remplace de plus en plus l'équipement manuel et permet de programmer à l'avance les opérations à réaliser. Les pièces sont parfois fabriquées jusqu'au millième de millimètre et peuvent valoir plusieurs milliers d'euros !

L'analyse des causes d'imprécision des machines outils nous conduit à identifier la notion de précision basée sur le contrôle géométrique et la méthode de correction de la géométrie des machines qu'est le grattage exposé dans le chapitre III.

Estimer la performance machine c'est connaître sa géométrie d'assemblage et les principaux sous systèmes. [14].

Mais, si la machine-outil remplace l'homme pour l'exécution de certaines tâches, celui-ci sera toujours indispensable pour la programmer et assurer la maintenance. C'est le technicien en usinage qui assurera la fabrication des pièces que l'on retrouvera dans l'automobile (moteur), l'industrie métallique, l'aviation (train d'atterrissage), le médical (broche pour relier les os) ou encore le spatial. C'est lui qui concevra des éléments qui peuvent être de quelques millimètres ou de plusieurs mètres.

Les métiers de l'usinage sont associés aux machines utilisées : on distingue par exemple le tourneur, le fraiseur, le rectifieur...

Le technicien en usinage est précis, observateur, capable de se représenter mentalement les pièces en trois dimensions à partir d'un plan. En effet, imaginer un élément en 3D sur la base de croquis ou de plans, le voir évoluer dans l'espace et créer un prototype de production sont pour lui ses principales activités.

Aujourd'hui, le technicien est indispensable pour le bon fonctionnement des toutes les machines. Mais l'avenir est peut-être aux « ateliers sans hommes » et on peut se poser la question : « ***La machine remplacera-t-elle un jour définitivement l'homme ?*** » et « ***Viendra-t-il un jour où les machines deviennes capables de fabriqué... des machines ???*** »

CHAPITRE

II

***CONTRÔLE
GÉOMÉTRIQUE DES
MACHINES-OUTILS***

CONTRÔLE GÉOMÉTRIQUE DES MACHINES-OUTILS

II.1. GENERALITES

Les principes généraux qui sont appliqués à la vérification des machines-outils ont pour origine le désir d'établir des conditions de réception susceptibles d'être adaptées par tous les intéressés, constructeurs et usagers. Ce désir s'est manifesté peu à peu non seulement sur le plan national, mais aussi sur le plan international, comme conséquence des échanges toujours plus nombreux entre les différents pays.

C'est pour répondre à ce véritable besoin que l'Organisation Internationale de Normalisation (I.S.O) a publié un code d'essais des machines-outils pour effectuer les vérifications nécessaires ; ces informations d'ordre général, ne s'appliquent pas à chaque catégorie de machines-outils.

Le code d'essais est un document important auquel il est nécessaire de se référer pour une étude approfondie des méthodes de réception. Il a paru toutefois utile de présenter, sous une forme résumée, les éléments essentiels qu'il importe d'avoir présent à l'esprit lorsqu'on désire appliquer, en toute connaissance de cause, les prescriptions relatives à chaque machine.

II.2. PRINCIPES GENERAUX DE VERIFICATION DES MACHINES-OUTILS

Malgré leurs imperfections, deux seuls procédés de contrôle étaient susceptibles d'être unifiés, les épreuves pratiques et les vérifications géométriques. Dans les deux cas, il est important de ne commencer les opérations de contrôle qu'après avoir mis la machine en position de travail ; à cet effet, la machine doit être implantée d'une manière telle que toute

cause de vibrations parasites ou de défaut de stabilité soit éliminée dans la mesure du possible ; de même il sera nécessaire, notamment pour certaines vérifications géométriques, de faire fonctionner la machine à vide pendant un temps suffisant pour que certains éléments atteignent la température normale en cours de travail ; cette dernière recommandation n'est pas réalisable si la machine n'est pas implantée, et dans ce cas, il doit en être tenu compte dans les résultats des mesures effectuées.

Il est aussi recommandé, pour toutes les vérifications comme pour les épreuves pratiques, que tous les mouvements ne servant pas aux contrôles soient bloqués.

II.2.1. Épreuves pratiques

L'intérêt des épreuves pratiques réside essentiellement dans le fait qu'elles apportent un résultat basé sur l'usinage de pièces sans qu'il y ait lieu de se préoccuper de la construction de la machine. Celle-ci peut donc, comme on l'a signalé plus haut, être constamment améliorée conformément aux progrès de la technique, sans que les méthodes de contrôle qui lui sont destinées aient à être modifiées [15].

Les épreuves pratiques doivent répondre à deux conditions essentielles : correspondre aussi exactement que possible à ce qu'on attend de la machine et être exécutées dans les conditions qui se rapprochent le plus de la réalité.

La première condition ne peut être remplie qu'après une étude détaillée des usinages qu'il est normal de demander à la machine, en excluant tout usinage présentant un caractère exceptionnel ; par exemple, il est normal qu'un tour parallèle usine un cylindre monté entre pointes, alors qu'il n'est pas courant de l'utiliser pour effectuer des perçages avec un foret monté dans la contrepointe.

Les machines outils utilisent dans leurs travaux les mouvements de rotation et de translation, il convient ainsi de rechercher par quelles combinaisons de ces deux mouvements il est possible de réaliser les usinages élémentaires dont l'ensemble représente l'utilisation normale de la machine ; on déduit de cette étude préliminaire la forme des pièces d'essais.

La deuxième condition se heurte au fait que, pour vérifier l'usinage des pièces d'essais il faut terminer les opérations par une "finition" permettant la mesure des dimensions et l'évaluation des tolérances. La plupart du temps, il serait inutilement coûteux de réaliser l'usinage complet depuis l'ébauche, et l'on se contente d'effectuer les toutes dernières phases.

Bien entendu, toutes mesures doivent être prises pour éviter de faire apparaître des efforts susceptibles de superposer à ceux de l'usinage proprement dit ; les flexions, en particulier, doivent être éliminées surtout lorsque les pièces d'essais sont en porte à faux.

Par ailleurs, malgré l'intérêt théorique que présente l'exécution exclusive des épreuves pratiques, on ne saurait recommander des essais trop coûteux ; en particulier, si les pièces d'essais doivent avoir les dimensions excessives, comme pour les tours à grande longueur de banc, il est naturel de revenir à des vérifications géométriques, s'il en existe, qui soient plus simples et moins coûteuses.

Les résultats fournis par les épreuves pratiques consistent en simples opérations de métrologie classique, qui ne présentent aucune difficulté et dont l'exécution ne réclame que des instruments de mesure courants.

II.2.2. Vérifications géométriques

Les vérifications géométriques consistent à contrôler les dimensions, les positions et les déplacements des organes de la machine qui jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement de celle-ci. Ces contrôles sont, en fait, indépendants du fonctionnement lui-même et se rapportent plutôt aux formes, par conséquent, à la construction de la machine ; on est donc obligé d'admettre que, si ces contrôles donnent satisfaction, la machine peut exécuter d'une façon correcte les usinages auxquels elle est destinée ; mais cette déduction n'est, en fait, qu'une hypothèse basée sur une certaine expérience de la construction en machines-outils, ce n'est pas une preuve.

Toutefois, l'attrait que présente pour l'esprit l'exécution de vérifications géométriques et, peut-être aussi, un certain orgueil ressenti par les constructeurs dans la constatation des bons résultats obtenus par cette méthode, font que les vérifications géométriques ont eu et ont toujours beaucoup d'adeptes. Ce n'est qu'assez récemment que leur efficacité a soulevé les objections rappelées ci-dessus.

Pour être réellement utiles, les vérifications géométriques doivent obéir à des règles assez strictes qui sont d'ailleurs applicables toutes les fois qu'il est question d'effectuer des mesures sur un corps solide ; une machine-outil est, en effet, un corps solide dont tous les éléments doivent être mesurés théoriquement par les procédés de la géométrie classique.

La machine-outil considérée comme un solide est rapporté à trois axes de coordonnées ; on en déduit les dimensions ou les déplacements de certains de ses organes. Il est facile de

trouver des axes naturels de référence qui sont la verticale rendue apparente par un fil à plomb et le plan horizontal concrétisé au moyen d'un niveau ; il suffit de matérialiser les éléments de ces coordonnées pour effectuer les mesures nécessaires sans la moindre équivoque. En général, on est amené à niveler la machine, c'est-à-dire la fixer au sol de manière à obtenir qu'une ligne ou un plan soit horizontal ; presque toujours on cherche à rendre horizontale une glissière, comme dans le tour ou la rectifieuse, et l'on rapporte à cette origine toutes les mesures à effectuer.

Les vérifications prévues ont été établies d'après des principes bien définis qui assurent l'unité des contrôles. Ces principes sont les suivants :

- La base de départ des vérifications doit être nettement définie ;
- Les épreuves doivent se succéder dans un ordre tel que l'addition des erreurs soit réduite au minimum ;
- Les erreurs doivent avoir une valeur et un sens déterminés.

Il est essentiel de fixer rigoureusement la base de départ des vérifications, sous peine d'entraîner des erreurs inévitables dans la suite des opérations. On s'accorde en général, pour reconnaître la nécessité de bien niveler la machine à contrôler, sans préciser toujours la portée d'une telle opération ; en fait, le nivellement consiste essentiellement à rendre horizontal un plan déterminé, formé soit d'une table, soit de glissières, de manière à pouvoir utiliser le niveau comme premier appareil de vérification. Dans beaucoup d'ateliers, on contrôle, l'horizontalité du socle sur lequel sera implantée la machine ; en réalité, et sauf exception, cette opération ne sert qu'à préparer l'obtention de l'horizontalité du plan de base défini ci-dessus. C'est pourquoi les machines de qualité sont munies de dispositifs rationnels (vérins ou coins spéciaux convenablement disposés). Pour réaliser cette horizontalité sans avoir recours à des procédés qui déforment les bâtis et n'assurent pas la constance du nivellement.

La réalisation de la deuxième condition est plus délicate ; pour qu'elle soit obtenue intégralement, il faudrait que chaque mesure soit effectuée à partir du plan horizontal défini ci-dessus, sans intermédiaires, cette condition étant irréalisable, il convient tout au moins de réduire au minimum le nombre de ces intermédiaires, de manière à éviter autant que possible l'addition des erreurs ; à cet effet, il est indispensable d'étudier la forme de la machine et, en particulier, toutes les symétries de manière à se rapprocher le plus possible des desideratas exprimés ci-dessus.

Malgré tous les efforts, la règle de l'addition, si elle était appliquée rigoureusement conduirait à fixer des tolérances excessives pour certaines opérations ; aussi doit-on admettre, sans aucune preuve scientifique d'ailleurs, que les erreurs sur chaque organe se compensent dans une certaine mesure. Enfin, il est indispensable de définir avec précision les erreurs tolérées, en sens et en grandeur. C'est-en effet, d'après les tolérances que sont appréciées la précision d'une machine et les difficultés opératoires ; il importe donc de n'en fixer la grandeur qu'à bon escient, en évitant l'excès de sévérité qui augmenterait sans raison les difficultés du constructeur et l'excès contraire qui rendrait les vérifications pratiquement inutiles.

D'autre part, il est nécessaire de fixer, dans certains cas, le sens de l'erreur, qui n'est pas toujours indifférent ; aussi y a-t-il lieu d'adopter des conventions telles que ce sens soit déterminé sans ambiguïté toutes les fois qu'il y a lieu de le faire. Les vérifications à effectuer en matière de machines-outils se ramènent presque toujours au contrôle de propriétés géométriques simples ; seules quelques rares opérations, comme par exemple la vérification des vis mères, font appel à des notions plus complexes.

Les vérifications peuvent être divisées en trois groupes :

- Vérifications de dimensions et de position d'organes ;
- Vérifications de déplacements relatifs ;
- Vérifications spéciales.

Les vérifications de dimensions et de position d'organes comprennent toutes les opérations qui intéressent aux organes au repos de la machine ; planéité de surfaces, rectitude de guidages, coïncidence et intersection d'axes, parallélisme et perpendicularité entre elles de lignes et de surfaces planes.

II.2.2.1. Planéité

La planéité (ou plénitude) d'une surface est souvent vérifiée au niveau, posé soit directement sur la surface, soit sur une règle reposant sur cette surface. Une telle opération ne présente pas toujours des garanties suffisantes de précision, en raison des difficultés d'étalonnage et des possibilités de dérèglement des niveaux ; d'autre part, les erreurs de détail ne peuvent être mises en évidence d'une manière suffisante.

La méthode recommandée permet d'effectuer des contrôles en autant de points que l'on désire, au moyen de règles et de cales (voir Fig. II-1), dont la précision, aussi grande qu'il est nécessaire est, de plus, très facile à contrôler.

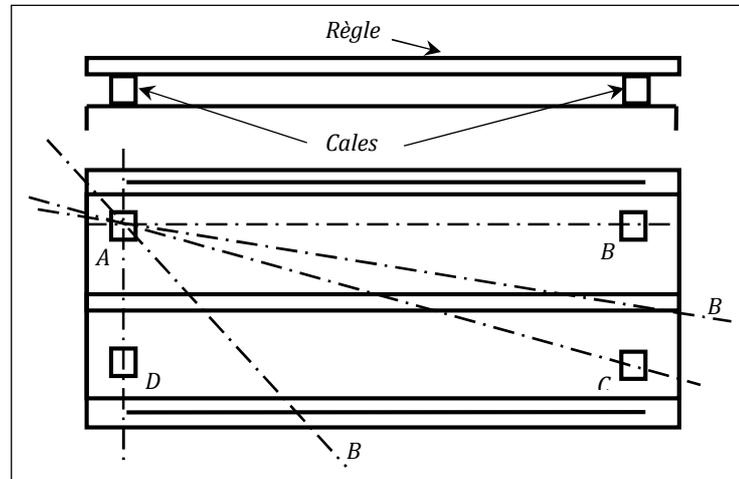


Figure II-1 : Contrôle de la planéité.

La méthode peut se résumer ainsi : s'assurer qu'une ligne AB du plan à vérifier est parallèle à la face d'une règle portée par deux cales ; contrôler, à partir de cette ligne, que la surface à vérifier est formée de droites passant par A et de droites passant par B ; Il est facile de voir que seul le plan répond à la question. Les erreurs locales se vérifient facilement en interposant au point à vérifier une cale entre le plan et la règle supportée elle-même par des cales de même épaisseur ; le contrôle des grandes courbures que présentent souvent les plans est décelé aussi très facilement par ce rapport à la surface $ABCD$, les cotes du plan mesurées au milieu des lignes AD et BD seront plus faibles que celles des points A, B, D . Lorsque la vérification prend une grande importance, il est recommandé de reporter sur un dessin les cotes des différents points ; les grandes courbures et les défauts locaux apparaissent immédiatement.

Lorsqu'il s'agit d'implantation, le niveau est à recommander, malgré ses défauts, car il contrôle non seulement la planéité, mais encore le parallélisme à un plan horizontal, et permet ainsi d'obtenir les bases de départ indispensables à l'exécution des vérifications géométriques ; aussi son emploi est-il préconisé pour tous les contrôles de mise en place, en particulier pour le contrôle des glissières des bancs.

Le mesurage au marbre consiste à enduire le marbre de rouge de bijoutier ou d'oxyde de chrome dilué dans l'huile fine. On pose le marbre ainsi enduit sur la surface à mesurer. On lui imprime un léger mouvement de va-et-vient. On enlève le marbre et on note la répartition des

points de contact par unité de surface. Cette répartition doit être uniforme dans toute l'étendue de la surface et doit présenter une valeur donnée. Ce procédé ne s'applique qu'aux surfaces de petites dimensions présentant un état de surface relativement fin (surfaces grattées ou rectifiées).

II.2.2.2. Coïncidences des axes

Les coïncidences d'axes sont à contrôler dans plusieurs cas (axes de broches ou axes de broches et axes de lunettes). Dans la première vérification, le mode opératoire le plus recommandé consiste à monter, sur l'une des broches pouvant recevoir un mouvement de rotation, un amplificateur (voir Fig. II-2) dont le palpeur vient au contact de l'autre broche ; on fait tourner la première broche et l'on note pendant cette rotation les différences de lectures de l'amplificateur ; la seule précaution à prendre consiste à tenir compte de l'erreur provenant du renversement de l'amplificateur ; on sait, en effet, que le poids de l'aiguille peut modifier la lecture lorsque l'amplificateur n'est pas dans sa position d'étalonnage ; il suffit d'apprécier cette erreur dans les opérations préliminaires.

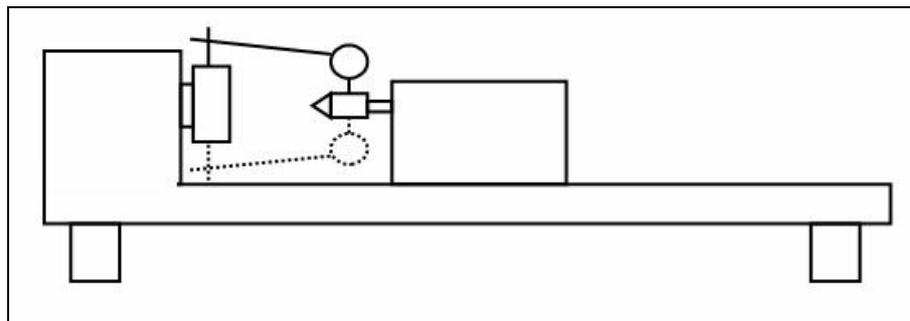


Figure II-2 : Contrôle de la coïncidence des axes de broches.

Cette méthode présente l'avantage de s'appliquer quels que soient les diamètres respectifs des broches à vérifier ; elle est mentionnée souvent dans les tableaux de vérifications géométriques (par exemple, l'opération N° 25 des machines à rectifier universelles).

Dans le deuxième cas (broche et lunette), il est recommandé de monter dans la broche un mandrin de précision (voir Fig. II-3) ayant un diamètre tel qu'il puisse entrer dans la lunette en réalisant un ajustement de catégorie bien déterminée ; on repère ensuite la position du mandrin lorsqu'il est engagé plus ou moins dans la lunette. On peut citer, comme exemple de ces vérifications, la coïncidence de l'axe de la broche horizontale d'une fraiseuse et de l'axe de sa lunette.

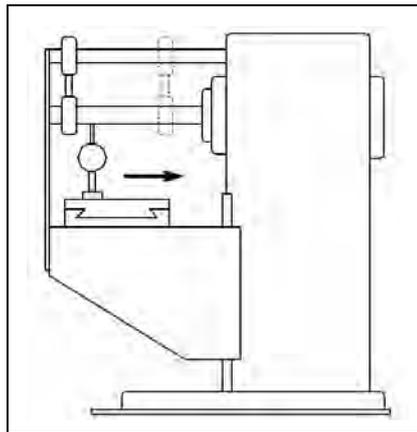


Figure II-3 : Coïncidence des axes (cas broche et lunette).

Enfin, il est assez rare d'avoir à vérifier la coïncidence des axes de deux lunettes ; cette opération s'effectuerait avec un mandrin de précision de diamètre convenable, dans les mêmes conditions que pour la coïncidence d'axes de broches et de lunettes.

II.2.2.3. Parallélisme

Plusieurs cas peuvent être distingués dans les vérifications de parallélisme :

- Ou bien le déplacement d'un axe ou d'un plan à contrôler est parallèle à cet axe ou à ce plan ; c'est le cas du déplacement longitudinal d'une table de fraiseuse ou du coulisement d'une broche d'aléuseuse.
- Ou bien un organe déterminé se déplace parallèlement à une ligne ou à une surface.
- Ou bien l'axe d'une broche animée d'un mouvement de translation doit rester parallèle à une table.

Les contrôles de parallélisme d'axes reviennent, également, à s'assurer que ces axes sont dans un même plan. Les vérifications de parallélisme interviennent surtout dans le cas d'une surface plane et d'une ligne (matérialisée par des glissières, des broches ou des rainures) ; il est rare d'avoir à vérifier, soit le parallélisme de deux lignes, soit celui de deux surfaces.

La vérification du parallélisme d'une ligne (broche par exemple) à une surface revient à un contrôle d'épaisseur, ce contrôle pourrait s'effectuer avec des cales que l'on glisserait entre la broche et la surface ; il est, en général, préférable d'utiliser des amplificateurs dont on fait glisser le socle sur la table (voir Fig. II-4), soit directement, soit par l'intermédiaire d'une règle, et dont la touche palpe la génératrice inférieure de la broche. Il est utile de se servir d'une règle, en raison des légères inégalités locales que présente presque toujours une table.

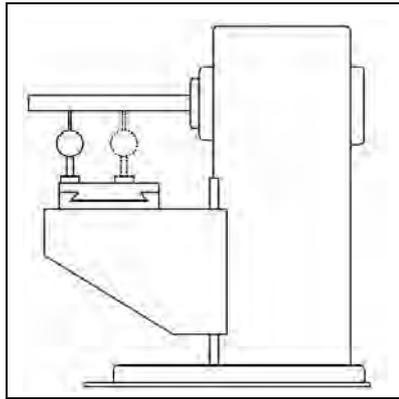


Figure II-4 : Vérification du parallélisme d'une broche.

Le parallélisme à la table d'une broche fraiseuse horizontale se vérifie dans les conditions ci-dessus ; il en est de même du parallélisme de la glissière d'un banc à un plan vertical ; l'amplificateur est monté sur une traverse de forme convenable (voir Fig. II-5), et le plan est matérialisé par une règle, mais, dans ce cas, se pose un autre problème de vérification qui consiste à s'assurer de la rectitude d'une ligne présumée droite ; un tel contrôle n'est à envisager ; dans la pratique, que dans le cas des grandes longueurs (glissières de bancs de tour de grande dimensions, de raboteuse , etc.), pour les quelles les procédés normaux du niveau et de la règle ne peuvent s'appliquer.

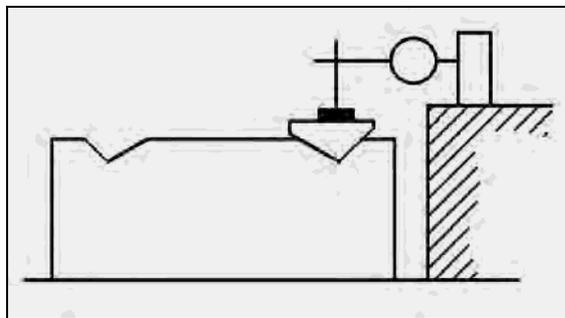


Figure II-5 : Vérification du parallélisme d'une glissière.

Les constructeurs emploient, suivant les coutumes, des méthodes qui, bien appliquées, donnent satisfaction, sans toute fois être entièrement irréprochables. Les deux méthodes les plus employées sont celle où la ligne droite de référence est matérialisée par un fil et celle où cette ligne est obtenue optiquement.

Si l'on considère le cas d'un tour où l'utilité de ce contrôle apparaît d'une manière particulièrement nette, la première méthode s'emploie en général de la façon suivante : un fil est tendu entre pointes et l'opérateur le vise au moyen d'un microscope sur le chariot porte-

outil (voir Fig. II-6) ; les erreurs apparaissent au cours des visées effectuées en déplaçant le chariot sur ses glissières.

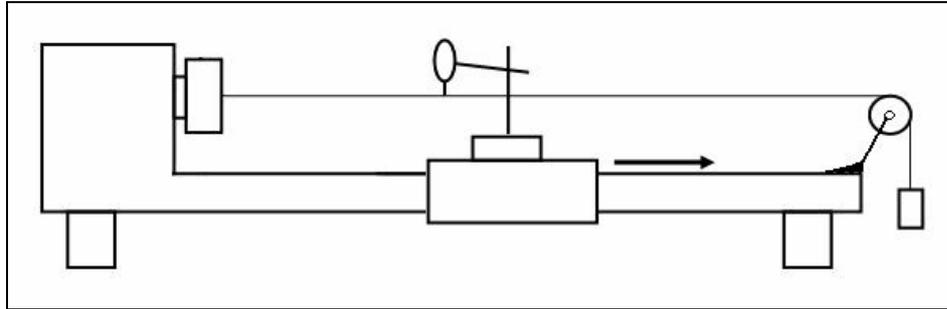


Figure II-6 : Contrôle du parallélisme d'un tour.

On peut aussi monter sur le chariot une touche réalisant par contact avec le fil un circuit électrique qui se rompt au moment où se manifestent des erreurs de rectitude. D'autres méthodes équivalentes peuvent être utilisées, suivant les cas et suivant les machines mais la critique principale de l'emploi du fil réside dans sa flexion sous l'action de son poids et dans ses irrégularités locales ; ce n'est que par des précautions très grandes que l'on parvient à éviter les erreurs qui en résultent, en particulier les erreurs de torsion.

Dans la deuxième méthode, le fil est remplacé par un rayon lumineux. La mesure s'effectue en général par autocollimation (voir Fig. II-7), autrement dit, une graduation à une croix portée par une lunette autocollimatrice montée sur contre-pointe se réfléchit sur un miroir porté, par exemple, par la broche de poupée et est observée par exemple, par la lunette elle-même.

Le principe du procédé est irréprochable et son application donne d'excellents résultats dans la plupart des cas ; il peut arriver, toute fois, que des erreurs appréciables soient occasionnées par des variations de réfraction de l'atmosphère ou s'effectuent les mesures.

C'est pourquoi, il n'est pas encore possible de citer un procédé exempt de toute critique.

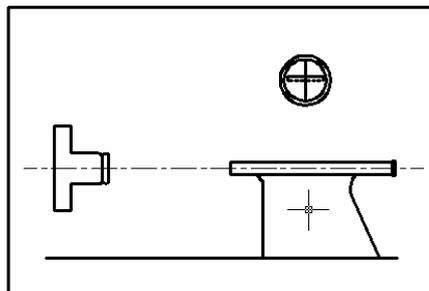


Figure II-7 : Contrôle du parallélisme par rayon lumineux.

II.2.2.4. Perpendicularité

Les vérifications de perpendicularité s'appliquent, comme celles de parallélisme, aux lignes et aux surfaces. La vérification de perpendicularité de deux surfaces s'effectue au moyen de niveaux équerres ; elle suppose que les surfaces à vérifier soient respectivement horizontale et verticale ; c'est le cas, par exemple, du contrôle de la perpendicularité du montant aux glissières du banc dans les aléseuses. Ce procédé, commode et rapide, à l'inconvénient d'ajouter les erreurs des équerres à celles de niveaux.

Les vérifications de perpendicularité de lignes s'effectuent dans certains cas, tels que ; perpendicularité de l'axe de la broche à la rainure longitudinale de la table d'une fraiseuse horizontale ; on utilise, en général, un amplificateur monté sur la broche par l'intermédiaire d'un long levier et dont la touche palpe la rainure dans deux positions symétriques (voir Fig. II-8). La différence de lectures du palpeur, divisée par la distance de deux points palpés, donne immédiatement l'erreur cherchée.

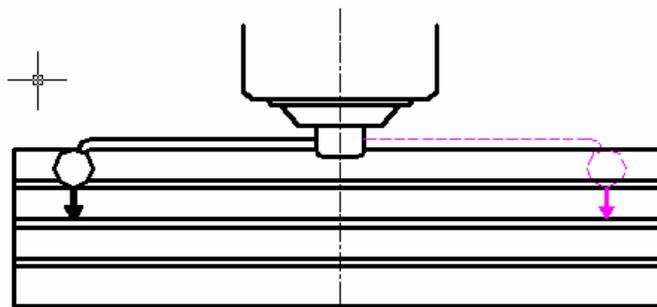


Figure II-8 : Vérifications de la perpendicularité de la broche à la table d'une fraiseuse.

Les vérifications de perpendicularité de lignes et de surfaces s'effectuent de la même manière ; c'est le cas, par exemple, de la perpendicularité à la table de la broche d'une fraiseuse verticale ; il est commode, pour ce contrôle, de palper non la table mais une règle posée sur elle, de manière à éviter les erreurs locales de la table. Enfin, on doit évidemment effectuer la vérification, conformément aux principes de géométrie élémentaire, dans deux plan différents, dont l'un soit de préférence un plan de symétrie de la machine.

Les vérifications dites « de déplacements relatifs » s'exécutent dans des conditions analogues à celles des vérifications au repos ; elles se rencontrent d'ailleurs plus fréquemment et font intervenir un nombre plus grand d'organes.

Le déplacement d'un organe de machine-outil ne peut être que rectiligne ou circulaire, à moins qu'il ne s'agisse de vérifications particulières les déplacements rectilignes entraînent des vérifications de parallélisme ou de perpendicularité.

Les vérifications de perpendicularité se ramènent, en fait, à des vérifications de parallélisme au moyen d'équerres ou d'appareils équivalents ; les mêmes cas se retrouvent ; un organe déterminé se déplace dans une direction perpendiculaire à un plan donné ou dans un plan perpendiculaire à une direction donnée ; c'est le cas des tables de fraiseuse se déplaçant sur le montant, ou des chariots porte-meule des rectifieuses universelles se déplaçant perpendiculairement à la ligne des pointes ; il suffit d'utiliser des équerres dont l'une des branches soit parallèle au déplacement de l'organe (voir Fig. II-9).

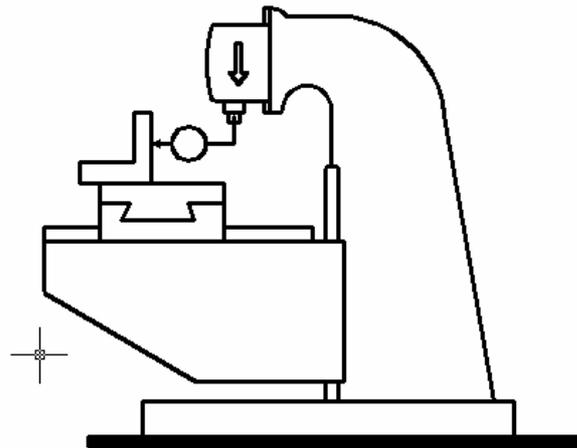


Figure II-9 : Vérifications de la perpendicularité de la broche à la table d'une fraiseuse.

cette équerre peut affecter la forme d'un cylindre droit posé sur une table, dans le cas où le déplacement perpendiculaire à la table a une grande amplitude ; elle peut avoir également la forme d'un mandrin équerre (cas du chariot porte meule de la rectifieuse universelles fig.11) ;

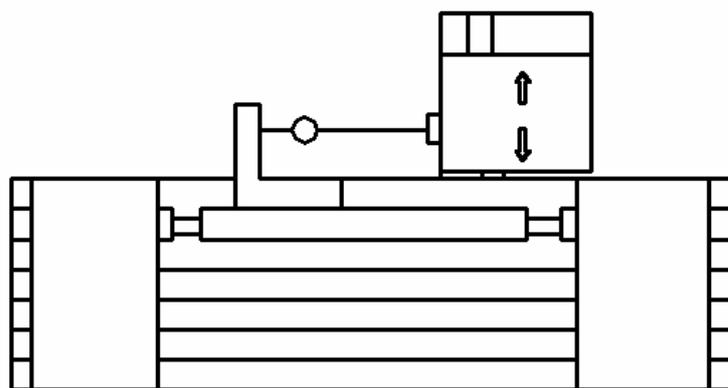


Figure II-11 Vérifications de la perpendicularité du chariot porte meule à la table de la rectifieuse

Dans ce cas, la branche perpendiculaire du mandrin proprement dit peut avoir une large surface, de manière à bien matérialiser le plan parallèlement auquel se déplace l'organe.

Dans un autre cas, il y a lieu de vérifier que deux mouvements sont rectangulaires, par exemple que les déplacements longitudinal et transversal d'une table sont à angle droit ; l'équerre est alors posée sur la table (voir Fig.II-12), une branche est orientée suivant l'une des directions, puis l'autre branche est palpée par un amplificateur lorsque la table est animée d'un déplacement suivant l'autre direction.

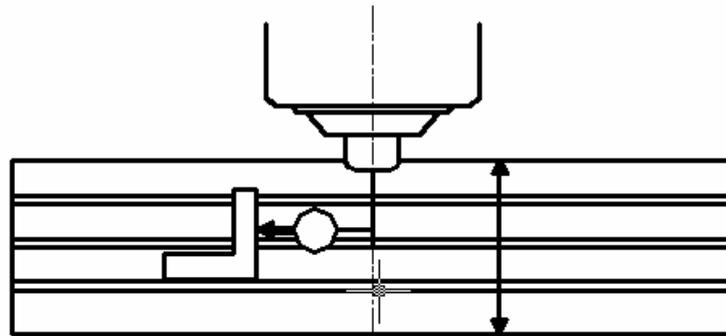


Figure II-12 Vérifications de la perpendicularité des déplacements longitudinal et transversal

Les vérifications de déplacements relatifs s'appliquent également à la rotation des tables et des axes. La rotation d'une table doit répondre aux conditions suivantes :

- La face utile de la table reste dans un même plan lorsqu'elle est animée d'un mouvement de rotation ; s'il y a lieu, le mouvement de rotation s'il y a excentricité. La première condition englobe celles qui intéressent la rotation proprement dite et qu'on désigne parfois par d'autres termes ; dévers, déplacement axial, etc. ; elle est contrôlée facilement à l'aide d'un amplificateur qui palpe en plusieurs points, chacun pendant plus d'un tour.
- La deuxième condition n'est pas exigible dans tous les cas ; elle n'est à imposer que pour les machines où le centrage de la pièce sur la table doit être effectué avec soin, c'est le cas, par exemple, pour les perceuses aléseuses, pour les machines à tailler les engrenages (voir Fig. II-13) ou même pour les fraiseuses universelles ; dans le cas où la table peut effectuer un tour complet, il est facile de contrôler l'excentricité au moyen d'un mandrin monté sur la table (cas de perceuses aléseuses), au contraire, lorsque la table ne peut tourner que d'une fraction de tour, ce qui arrive presque toujours avec les fraiseuses universelles, le contrôle de l'excentricité ne peut être effectué que par des opérations géométriques d'une exécution difficile et d'une précision discutable ; il n'a donc pas paru opportun de les imposer.

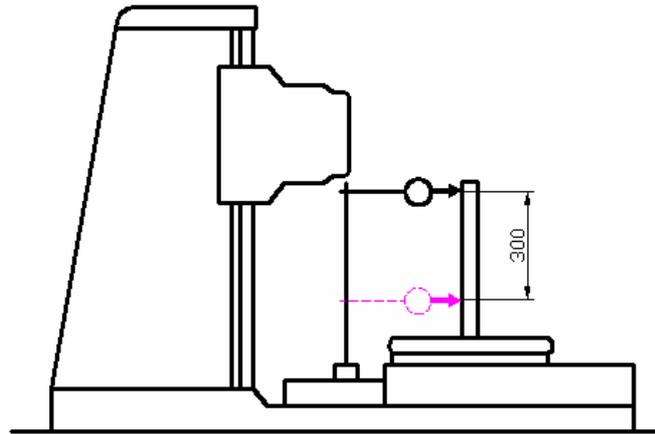


Figure II-13 Vérifications de l'excentricité de la perceuse aléuseuse

La rotation des axes doit répondre à un certain nombre de conditions ; tout d'abord, il ne doit se produire aucun déplacement axial ; ces déplacements sont dus, soit à des défauts de butées ou de contre butées, soit au voile de certaines butées qui occasionnent des mouvements, périodiques suivant l'axe ; ces déplacements axiaux entraînent dans le cas des tours à fileter, des défauts périodiques sur les vis, dans le cas des fraiseuses verticales ou des aléuseuses - fraiseuses, des erreurs de planéité sur les surfaces fraisées, etc.

La vérification s'effectue en montant, dans le cône intérieur, une broche présentant à son extrémité un méplat ; en exerçant sur ce méplat une pression constante, on met en évidence l'erreur due à la butée qui est décelée par un amplificateur ; l'erreur due à la contre-butée est plus difficile à matérialiser, puisqu'il faut exercer une traction sur la pointe (opération peu réalisable en pratique). Enfin l'erreur due au voile de la face d'appui est contrôlée à l'aide d'un amplificateur dans les conditions exposées à l'occasion des tours de précision (*fig.II-14*).

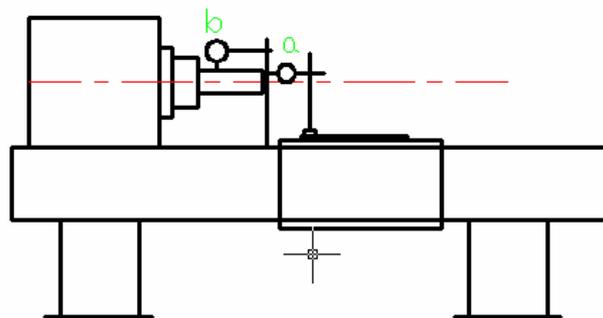


Figure II-14 Vérifications du voile de la face d'appui à l'aide d'amplificateur

L'exécution de ces différents contrôles est indispensable dans le cas de machines très précises ou la moindre cause d'erreurs doit être mise en évidence ; ils peuvent être groupés en

un seul, dans le cas de machines de précision normale, telles que les tours ordinaires ou les fraiseuses verticales.

II.2.2.5. Défauts de broches

Avant d'aborder la question des défauts de broches et de définir les contrôles à effectuer sur ces organes, il est indispensable de préciser les termes suivants :

- ***Faux rond de forme*** : c'est l'erreur géométrique de la section droite d'une pièce cylindrique par rapport au cercle théorique (l'ovalisation est un cas particulier du faux rond de forme).
- ***Excentricité*** : c'est la cote définissant la distance prévue entre deux axes parallèles (l'erreur d'excentricité est l'erreur sur cette cote).
- ***Battement radial d'une droite en un de ses points*** : lorsque l'axe géométrique d'un organe ne coïncide pas exactement avec l'axe de rotation, le battement radial (ou erreur de concentricité) est la distance entre les traces de ces deux axes sur un plan perpendiculaire à l'axe de rotation au point considéré. Si le battement radial est constant en tous les points de l'axe, la droite et l'axe sont parallèles ; on se trouve en face d'une simple excentration.
- ***Faux rond de rotation d'une pièce en un point de l'axe et dans un plan perpendiculaire à l'axe de ce point*** : c'est l'erreur de mouvement dans la rotation de la pièce autour de son axe de rotation réel provoquée par l'existence d'un battement radial.

Dans les vérifications géométriques des machines-outils, le battement radial d'un axe se mesure par l'intermédiaire du faux rond de rotation d'un mandrin de contrôle monté sur l'axe. Le faux rond de rotation représente le double du battement radial au point considéré. La figure II-15 ci-après montre la distinction qu'il y a lieu de faire entre les deux termes "Battement radial" et "Faux rond de rotation".

Pour éviter toute confusion et supprimer tout risque d'erreurs, il n'est fait usage dans notre manuscrit que de l'expression « faux-rond de rotation » ou tout simplement « faux-rond » et la tolérance indiquée & été systématiquement rapportée à ce faux-rond de sorte que les lectures faites sur l'instrument de mesure n'ont jamais à être divisées par deux. Pour effectuer la mesure, les appareils de contrôle utilisés ne doivent pas évidemment présenter de faux rond de forme.

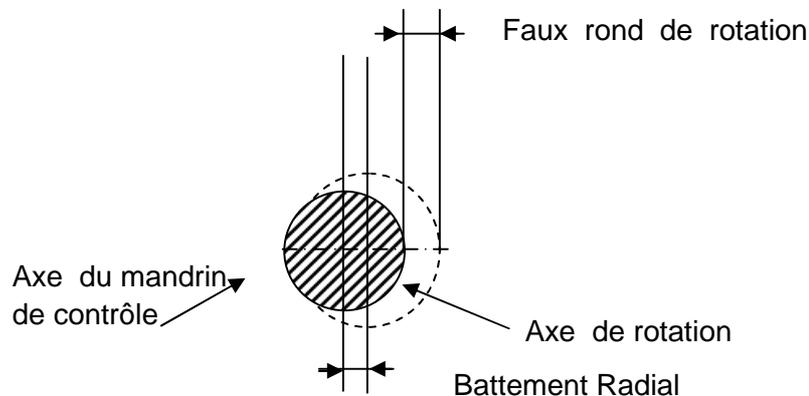


Figure II-15 Faux rond de rotation

Dire que les broches doivent être exemptes de faux rond signifie donc que l'axe du cône intérieur de la broche et l'axe de rotation de celle-ci sont confondus ; dans le cas contraire, le mouvement de rotation est, ou bien excentré si les deux axes indiqués ci-dessus sont parallèles, ou bien conique si ces deux axes se coupent, ou bien à forme hyperboloïde si les deux axes occupent l'un par rapport à l'autre une position quelconque.

Le contrôle par faux rond implique ainsi deux vérifications, l'une à la sortie du logement, l'autre à une certaine distance de cette sortie (*fig. II-16*) ; si les mesures correspondantes sont les mêmes, la broche est excentrée, dans le cas contraire, les deux axes sont dans des positions quelconques.

Il est à noter qu'il faudra tourner les broches à un régime moyen pendant un certain temps de manière à obtenir la mise en place avant la vérification et tenir compte ainsi du changement de leur position produit par l'élévation de température des paliers, ce qui impose particulièrement dans le cas des rectifieuses.

Enfin, -tout au moins pour les broches munies de pointes, comme les pointes vives de tours- la pointe doit être sur l'axe de rotation de la broche ; une simple mesure à l'amplificateur met en évidence l'erreur correspondante.

Les vérifications géométriques comportent également un certain nombre d'opérations spéciales ; il est difficile de donner, pour la plupart d'entre elles, des indications d'ordre général, car leur exécution affecte presque toujours des formes particulières.

On peut citer, à titre d'exemple, les vérifications intéressant les repérages de tourelles de tours verticaux ou de tours automatiques ; dans certains cas, pour les tours à tourelle revolver

par exemple (fig.II-17) il est indispensable de prévoir l'application d'une force déterminée pour s'assurer de la valeur du blocage ; dans d'autres cas (tours automatiques par exemple), le repérage s'effectue simplement à l'aide d'un amplificateur.

Il y a lieu de mentionner spécialement le cas de la vérification des vis mères et, en particulier, des vis mères de tours. Les contrôles intéressant leur position : déplacement axial ou parallélisme aux glissières, n'offrent pas de difficultés spéciales ; par contre, le contrôle du pas est pratiquement irréalisable. En effet, il n'est pas possible de mesurer le pas d'une vis de plus d'un mètre de long sans utiliser des dispositifs spéciaux et coûteux que la plupart des ateliers ne possèdent pas ; ce genre de contrôle, qui représente l'une des difficultés les plus typiques d'exécution des vérifications géométriques, ne peut être effectué couramment que par des laboratoires spécialisés auxquels il convient d'avoir recours, à moins qu'il ne soit remplacé par l'épreuve pratique correspondante dans laquelle la vérification est réduite à celle d'une vis de 300 mm au maximum.

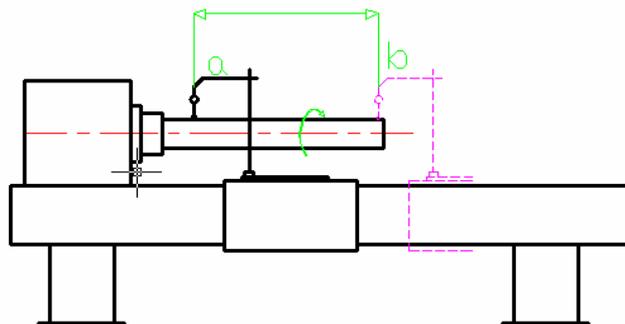


Figure II-16 Vérification géométrique du faux rond de la broche du tour parallèle

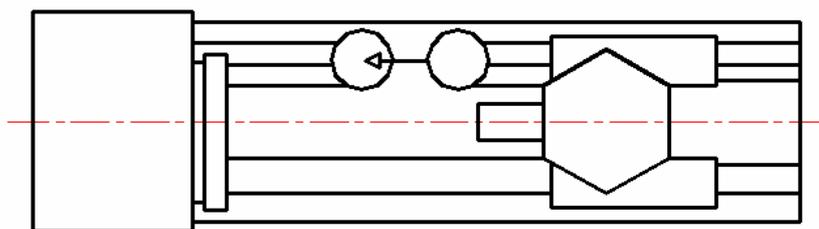


Figure II-17 Vérification géométrique intéressant les repérage des tourelles

II.3. APPAREILS DE MESURE

Les appareils nécessaires à l'exécution des vérifications intéressant les machines-outils peuvent être rangés dans deux catégories ; les appareils d'usage courant et les appareils d'usage exceptionnel. Chaque type doit répondre à des conditions bien déterminées de précision et de commodité ; il ne saurait être question d'en effectuer ici une description complète, mais il a paru nécessaire d'exposer les principes auxquels ils doivent répondre et d'indiquer la précision qu'on doit en attendre normalement.

II.3.1. Appareil d'usage courant

Ces appareils sont ceux qui peuvent être utilisés pour toutes les vérifications effectuées couramment dans les ateliers de mécanique ; on peut les classer en deux catégories :

- Appareils non réglables ;
- Appareils réglables.

II.3.1.1. Les appareils non réglables

Ce sont ceux qui, par construction, matérialisent immuablement une dimension ou une figure géométrique simple : épaisseur, ligne droite, angle droit, plan.

Les principaux appareils de ce type sont les cales, les règles, les équerres, les cylindres de précision, les mandrins.

Les cales utilisées normalement sont des blocs parallélépipédiques dont la longueur nominale est représentée par la perpendiculaire commune à leurs deux faces mesurantes : l'expérience a prouvé qu'on pouvait obtenir facilement des cales d'une très grande précision en possédant la propriété de s'assembler entre elle par simple contact ; grâce à cette possibilité, les contrôleurs peuvent obtenir facilement, et avec la précision du 1/100 mm, au moins, les longueurs nécessaires aux vérifications courantes de planéité des surfaces, de distance d'axes etc.

Dans certains cas, les cales doivent avoir des formes spéciales ; c'est ce qui se produit, par exemple, pour la vérification des glissières des bancs de tours dont les profils varient suivant les constructeurs (*voir Fig. II-18*).

Les règles utilisées dans les vérifications de machines-outils peuvent avoir soit une, soit deux faces utiles ; les règles du premier type servent aux vérifications de planéité et, plus généralement, aux contrôles où la longueur à vérifier est relativement grande ; leur forme bien connue est telle que les possibilités de déformation soient réduites au minimum (voir Fig. II-19).

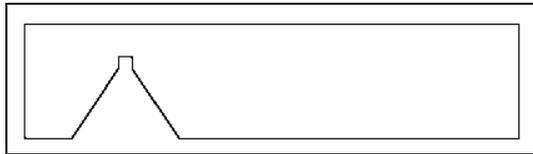


Figure II-18 : Cale de forme spéciale.

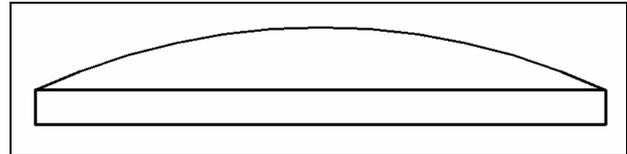


Figure II-19 : Règle.

Les autres règles sont surtout employées très fréquents où il y a intérêt à faire appuyer la touche d'un amplificateur sur l'une de leurs faces, au lieu de palper sur la face intéressée (table ou glissière), afin d'éviter les erreurs provenant d'un défaut local ; la longueur de telles règles est en général limitée et, dans les cas particuliers où il serait nécessaire de contrôler de grandes longueurs, comme par exemple dans les vérifications intéressant les raboteuses, elles peuvent être remplacées par des cales à bouts plans ayant rigoureusement la même épaisseur et convenablement réparties sur la surface à contrôler (voir Fig. II-20).

Les règles doivent subir des vérifications fréquentes, pour lesquelles on peut employer le procédé classique de comparaison, deux à deux, de la surface intéressée et de deux autres surfaces planes bien contrôlées ; chaque opération peut être effectuée, par exemple, dans les mêmes conditions que pour la planéité des tables des machines. On peut également utiliser des procédés spéciaux et en particulier, des procédés optiques.

Les équerres, dont le but essentiel est de matérialiser un angle droit, peuvent affecter plusieurs forme suivant l'usage auquel on les destine, équerres ordinaires, à branches ou en forme de cylindres, mandrins équerres, niveaux équerres, etc. ; leur vérification s'effectue soit par retournement, soit à l'aide de cales et par comparaison avec un angle droit matérialisé d'une manière convenable, suivant que l'angle droit à contrôler est formé par la partie intérieure ou extérieure des branches (voir Fig. II-21) ; l'erreur est exprimée en pourcentage $\frac{l}{L}$ de la valeur de l'écart l de la branche par rapport à sa position théorique à la longueur L de cette branche.

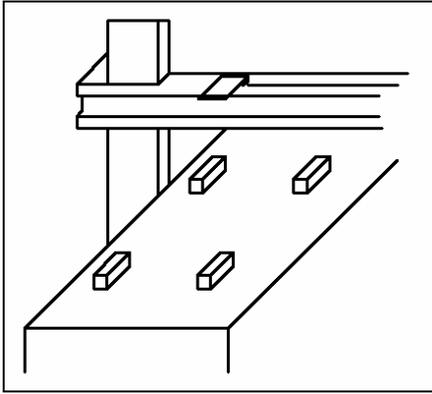


Figure II-20 : Vérification d'une raboteuse.

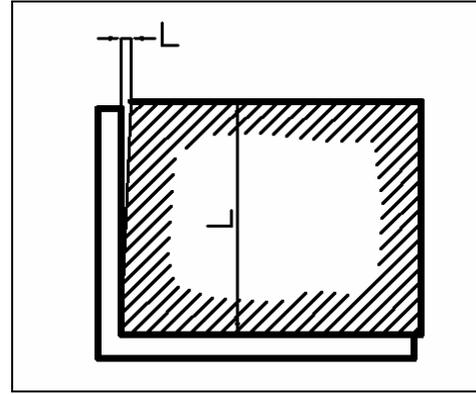


Figure II-21 : L'erreur d'une équerre.

L'équerre ordinaire, à deux branches perpendiculaires, peut avoir des surfaces plus ou moins grandes suivant qu'il s'agit de vérifier la perpendicularité de deux lignes, de deux surfaces ou d'une ligne et d'une surface. Elle a souvent la forme d'un cylindre droit à base circulaire, forme qui se prête dans les conditions les meilleurs au contrôle de perpendicularité d'une surface à un déplacement de grande importance.

Le cylindre équerre (voir Fig. II-22) est utilisé spécialement dans le cas du contrôle de la perpendicularité d'un axe matérialisé par mandrin à une surface ou à un déplacement.

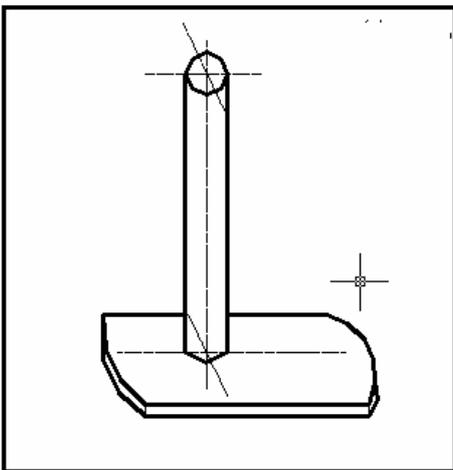


Figure II-22 : Cylindre équerre.

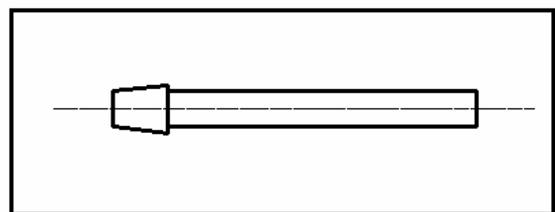


Figure II-23: Mandrin.

Enfin, le niveau équerre intervient lorsque la vérification de perpendicularité doit être rapportée au plan horizontal, c'est-à-dire, presque toujours, pour des contrôles de mise en place.

Les cylindres entre pointes et les mandrins servent à matérialiser des lignes droites. Il convient de bien connaître, pour ces instruments, la flexion qu'ils subissent sous l'influence

de leur propre poids. On peut diminuer cette flexion en utilisant, soit des tiges creuses, soit des barres pleines d'un diamètre suffisamment grand par rapport à la longueur.

Les mandrins sont utilisés d'une manière plus courante pour matérialiser des axes de broches de poupées de tours, broches de fraiseuses ou d'aléseuses ; ils peuvent être montés dans le cône intérieur et servent soit à vérifier le faux rond, soit à contrôler la direction de l'axe correspondant. Leur longueur utile est d'environ 300 mm et une de leurs extrémités doit avoir une forme telle qu'ils puissent entrer "juste" dans le cône intérieur correspondant ; leur diamètre n'est pas normalisé mais, en l'absence de règles précises, il doit être aussi voisin que possible de celui de la broche.

Enfin, on peut rattacher aux mandrins les tampons lisses qui permettent la vérification de trous alésés dans les conditions fixées par les normes d'ajustement.

D'une manière générale, les appareils non réglables peuvent être fabriqués avec une précision aussi grande qu'on le désire. Les mandrins et les cales à bouts plans n'ont, en pratique, aucune erreur appréciable ; les règles, atteignent très facilement la précision du 1/100 par mètre quand aux équerres, elles peuvent largement atteindre 0.01 sur 300, précision qui suffit dans la plupart des contrôles.

II.3.1.2. Appareils réglables

Ce sont ceux qui donnent directement, par la lecture d'une graduation, la mesure de la grandeur à vérifier ; le contrôle de cette graduation doit être effectué périodiquement.

Les instruments de cette catégorie les plus utilisés sont les palmers et les pieds à coulisse, les niveaux, les amplificateurs.

Les palmers et les pieds à coulisse sont trop connus pour qu'il soit nécessaire de les décrire ; il suffit de mentionner tous les services qu'ils peuvent rendre pour les mesures d'épaisseurs (constance de diamètre, cylindricité de mandrin, etc.) ; des recommandations express doivent être faites aux manipulateurs en vue d'effectuer les mesures sous pression constante.

Il est facile d'obtenir, avec un bon palmer et par une manipulation soignée, une précision supérieure à 0.01.

Le niveau connaît des alternatives de faveur et de défaveur, suivant les idées en cours et suivant l'intérêt que leur portent les usagers.

En principe, il est d'un emploi particulièrement commode pour vérifier l'horizontalité des surfaces et des lignes ; toutefois, il est sujet, lorsqu'il est précis, à ces dérèglages dus aux conditions atmosphériques et d'autre part, la bulle risque d'être instable et de fausser les mesures.

Il peut donc être avantageux parfois de choisir un niveau à rayon de courbure plus faible et à lire les indications à l'aide d'une loupe ou d'une petite lunette, pour éviter les inconvénients signalés ci-dessus.

Les amplificateurs représentent le type d'instruments le plus utilisé dans les vérifications de machines ; ils servent, soit seuls, soit associés aux appareils fixes décrits ci-dessus, à l'exécution de presque toutes les opérations de contrôle ; c'est pourquoi il a paru nécessaire de donner quelques détails sur leur conception et sur leur emploi.

L'amplificateur est constitué essentiellement par l'appareil de mesure proprement dit et par un socle ou dispositif de fixation. L'appareil de mesure comprend, en général (*fig. II-24*), une touche ou palpeur de forme hémisphérique en acier ou en matière dure telle que l'agate ; cette touche est fixée à l'extrémité d'un levier qui, par l'intermédiaire d'autres leviers, agit soit sur un miroir réfléchissant, soit sur une aiguille ; un déplacement causé par le contact du palpeur avec une surface donnée se traduit, suivant les cas, par le déplacement d'une aiguille sur un cadran, d'un stop lumineux, sur un cadran ou d'une graduation devant un repère. Si l'appareil est convenablement réglé, la valeur de la dimension mesurée est donnée par une lecture directe.

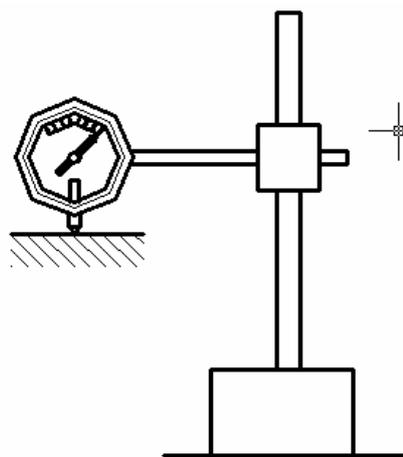


Figure II-24 Comparateur (amplificateur) à cadran

L'appareil de mesure est fixé, en général, par l'intermédiaire d'un levier, à un socle ou à un dispositif de fixation ; le socle doit être tel qu'il permette une assise convenable sur la

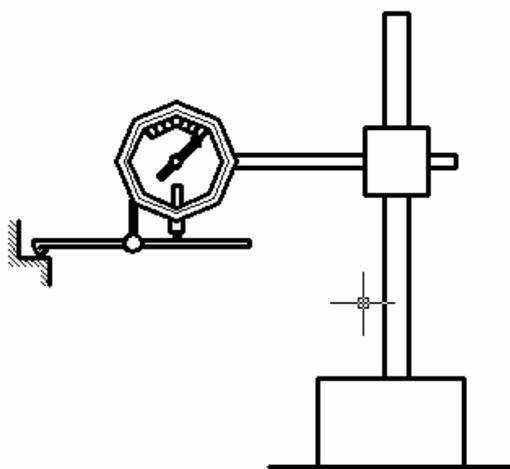
surface à vérifier ; sa surface inférieure est donc plane, en forme de V ou l'angle droit, suivant la nature de la vérification, et il importe que la précision avec laquelle ce socle s'appuie sur la surface intéressée soit supérieure à la précision demandée à la vérification proprement dite.

Le dispositif de fixation varie également suivant la forme de la surface où doit être fixé l'amplificateur ; presque toujours, cette surface est cylindrique et l'amplificateur est alors muni d'un collier de fixation.

Il convient enfin de mentionner les cas particuliers où l'amplificateur est utilisé pour des mesures intérieures et pour des mesures de perpendicularité. Dans le premier cas (*fig.II-25*), le palpeur est muni d'un renvoi permettant d'assurer le contact sur la surface intérieure intéressée : cylindre, fond de rainure etc. dans le second cas, l'appareil de mesure est placé à l'extrémité d'un levier ayant une longueur suffisante pour que la distance des deux points palpés sur une même droite en faisant tourner le levier de 180° soit au moins de 300 mm. Ces cas particuliers n'ont d'ailleurs été indiqués qu'à titre d'exemples, et l'on pourrait multiplier à l'infini les possibilités d'application des amplificateurs.

La précision des amplificateurs dépend de leur construction ; un amplificateur à leviers mécaniques dépasse rarement la précision de 0.01 mm.

Un amplificateur optique peut atteindre une précision pratique de 0.002 mm mais son emploi, très délicat, permet rarement de dépasser à l'atelier 0.005 mm ; certains amplificateurs basés sur un principe pneumatique atteignent la même précision et leur emploi apparaît plus commode



figureII-25 : Mesure intérieure ou mesure de perpendicularité

D'autre part, toutes précautions indispensables doivent être prises pour assurer aux mesures par amplificateurs la précision nécessaire ; l'étalonnage doit être fréquemment vérifié, par exemple au moyen de cales à bouts plans d'épaisseurs variables ; certains amplificateurs ne doivent être utilisés que dans une position déterminée, par exemple la position verticale, le déplacement de l'aiguille par son propre poids entraînant, dans les autres positions, une erreur dont il importe de tenir compte.

II.3.2. Appareils d'usage exceptionnel

Cette désignation s'applique aux appareils qui, par leur principe ou par leur forme, sont destinés, soit à des vérifications très délicates, soit à des contrôles spéciaux aux machines-outils.

Dans le premier groupe se rangent les appareils utilisant l'optique ou l'électricité et faisant appel à des manipulations d'ordre physique ;

C'est le cas des dispositifs destinés à la vérification des grandes longueurs qui nécessitent les bancs de tours ou d'aléseuses. Les avantages et les inconvénients des différents dispositifs ont été examinés au paragraphe II-3-1.1, mais il est indispensable de revenir sur les difficultés que présentent ces opérations ; tout d'abord, le bâti n'est pas toujours nivelé avec la précision voulue et subit des déformations qui modifient dans le temps les résultats des vérifications ; ensuite, les opérations de contrôle sont sujettes à des erreurs imputables aux circonstances du moment, telles que les variations de température, de pression, de réfraction de l'air, etc. la précision des appareils employés ; aussi, le contrôle des bancs de grande longueur est-il une opération nécessitant beaucoup de soins et un choix particulièrement judicieux des méthodes à employer suivant les circonstances.

Dans le même ordre d'idées, les appareils de vérification d'engrenages demandent une technique particulière ; certaines méthodes, prévues pour la vérification des engrenages fabriqués à titre d'essais pratiques, font appel à des appareils spéciaux dont la description ne saurait être entreprise ici ; il est donc impossible de recommander plus particulièrement une méthode ou un procédé, mais il y a lieu d'attirer l'attention des contrôleurs sur la nécessité de s'imposer, avant toute opération, une étude sérieuse du principe, des possibilités et de la précision des appareils qu'ils auront choisis.

Dans le deuxième groupe, il convient surtout d'envisager les appareils destinés à la vérification des vis mères. Ainsi qu'il a été signalé au paragraphe II-3, ce problème ne peut

être considéré comme résolu actuellement, à moins de faire appel à une épreuve pratique ; en effet, les ateliers acheteurs de machines-outils auront parfois, dans leurs services de contrôle, des appareils de vérification de vis atteignant une longueur de 300 mm, mais ils seront démunis, à moins de cas particuliers exceptionnels, des moyens indispensables à la vérification des vis dont la longueur dépasse un mètre, et ils devront se contenter soit d'une attestation du constructeur, soit d'une mesure effectuée dans un laboratoire bien outillé.

Quelques appareils d'un principe irréprochable et d'une précision suffisante existent chez les constructeurs ; les uns prennent pour base de mesure le filet lui-même ; d'autres utilisent un écrou qui est, soit l'écrou de vis mère lui-même, soit un moulage de cette vis. Il n'y a aucune raison pour préconiser une méthode plutôt qu'une autre, car l'expérience a montré avec quelle diversité de vérifications, les constructeurs réputés arrivaient à fabriquer des vis mères irréprochables ; d'ailleurs, le pas de vis est incontestablement la caractéristique d'un filetage la plus facile à mesurer.

Quant au contrôle des vis de faible longueur, il tend à s'effectuer au moyen des appareils qui sont, par destination, affectés à des mesures de tapons filetés de précision et qui, par conséquent, présentent toutes les garanties nécessaires ; cette manière d'opérer se répand de plus en plus dans les ateliers de mécanique, ce qui permet de considérer comme résolu le problème de la vérification des vis mères par épreuve pratique.

Les conditions de précision imposées aux vis mères fixent aux appareils eux-mêmes des précisions qui sont largement tenues ; on peut admettre qu'un bon appareil de mesure de pas de vis a une précision de deux à cinq fois plus grande que celle des pièces à vérifier.

Ceci posé, il convient de fixer avec précision les conditions de vérification d'une vis ; on admet, en général, une erreur de pas maximale sur une longueur déterminée, 300mm par exemple ; mais il est évident que la vis ne doit pas présenter dans ses parties intermédiaires des irrégularités accidentelles qui se compenseraient aux extrémités.

C'est pourquoi il y a lieu de fixer, en général, une erreur totale et une erreur locale ; l'erreur totale représente la tolérance admise pour le pas sur toute sa longueur ; l'erreur locale représente au contraire la tolérance admise sur la longueur comprise entre deux mesures consécutives.

Dans les opérations courantes, les mesures se font tous les 50 mm et la valeur de l'erreur constatée dans cet intervalle est environ la moitié de celle de l'erreur totale, mais il y a lieu de

considérer que l'origine des mesures n'est pas fixée, ce qui permettrait qu'une simple vérification effectuée tous les 50mm n'aurait pu déceler.

Il est commode de représenter le résultat des vérifications d'une vis mère par un graphique (*fig.II-26*) où les longueurs de vis sont portées en abscisses et les erreurs sur le pas en ordonnées.

L'erreur totale admise sur le pas pour toute la longueur vérifiée est indiquée par une droite, et l'erreur en chaque point est donnée par une courbe dont la droite mentionnée ci-dessous représente la valeur moyenne ; comme il n'y a aucune raison, en général, pour tolérer seulement un pas trop fort ou trop faible, les erreurs tolérées peuvent être symétriques par rapport aux abscisses ; enfin, si l'on a fixé soit des maxima d'erreurs dans les intervalles de mesure, soit, dans le cas des grandes longueurs des tolérances variables, il y a lieu d'établir et d'interpréter le graphique en tenant compte de ces données supplémentaires. En général, et en mettant à part les erreurs d'usinage tout à fait accidentelles, le graphique fait ressortir soit une erreur systématique sur le pas, soit une erreur périodique provenant d'erreurs d'usinage ou de montage de la vis mère.

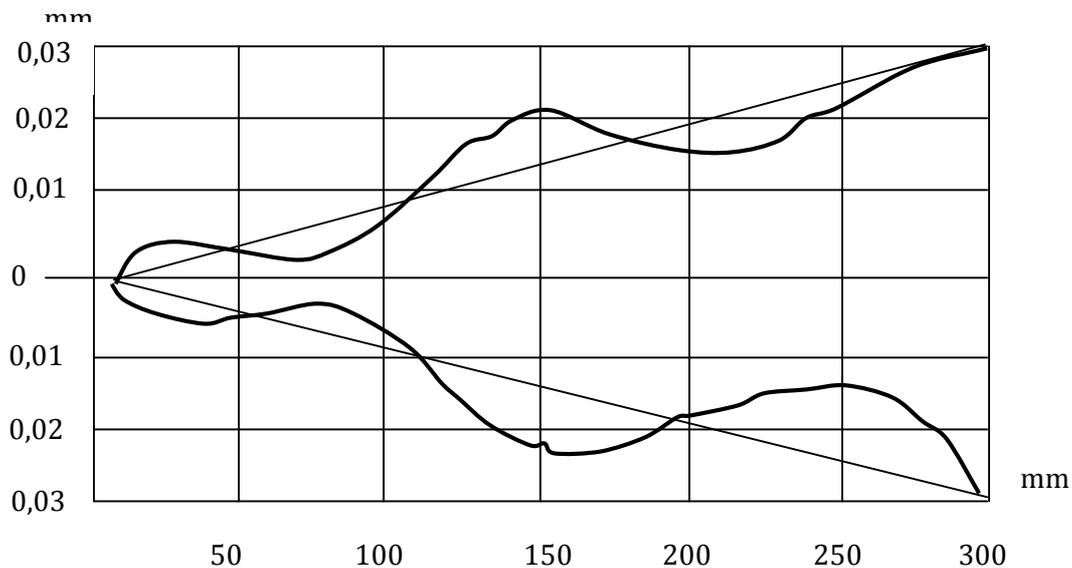


Figure II-26 Vérification des résultats d'une vis mère

II.4. TOLERANCE A IMPOSER DANS LE CONTROLE DES MACHINES-OUTILS

Les tolérances qui sont appliquées dans les différentes vérifications géométriques ont été adoptées à la suite d'un très grand nombre d'expériences ; mais leur fixation a fait, a priori, l'objet de certaines règles précises qui sont exposées ci-après.

Il existe un chiffre minimal au-dessous duquel les tolérances n'auraient pas de sens ; ce chiffre est, en principe le 1/100 mm et, dans certains cas très limités, 0.5/100. Les machines pour lesquelles des tolérances plus étroites seraient nécessaires échappent, sauf de rares exceptions, aux règles de normalisation exposées ci-dessus.

Les tolérances fixées sans indications particulières doivent être considérées comme valables en plus ou en moins ; ainsi, le défaut du parallélisme d'un axe à une table pour lequel est prévue une tolérance de 0.01 sur 300 mm peut représenter un axe dirigé vers la table ou au contraire s'écartant d'elle à partir de son origine. Les règles courantes de normalisation ne peuvent, en effet, s'appliquer intégralement dans le cas de machines-outils où, très souvent, le sens de la tolérance est indifférent.

Inversement, il y a lieu de fixer d'une manière précise le sens de la tolérance lorsque celui-ci a une importance réelle. Cette fixation est faite de plusieurs manières,

- Par une indication explicitée ;
- Par des signes algébriques ; il est affecté un signe à des directions bien définies ; par exemple, on définit les directions avant arrière, haut bas, droite gauche, par rapport à un ouvrier placé en position normale de travail ; on les affecte, suivant le cas, du signe + ou - ; le signe placé devant les tolérances indique alors rigoureusement le sens de celles-ci. Ce procédé, qui présente de très grands avantages, ne peut malheureusement pas se généraliser au-delà de quelques vérifications simples, car l'enchaînement des erreurs conduirait à des oppositions de signes, et par suite, à des confusions ; aussi, le cas des tours parallèles est-il à peu près l'un des seuls où la méthode puisse s'appliquer.
- Par des spécifications complémentaires ; par exemple, une erreur sur la perpendicularité est complétée par une indication restrictive sur la valeur de l'angle formé par les surfaces ou les lignes intéressées ; le cas où il est spécifié que 90° se rencontre très fréquemment.
- Par des références aux normes des ajustements ; c'est le cas, en particulier, du contrôle de certains alésages qui doivent répondre aux conditions fixées par une qualité d'ajustement (qualité H7, par exemple).

La valeur des tolérances est, soit fixée une fois pour toutes, soit variable suivant les dimensions des organes à vérifier.

Les tolérances fixées une fois pour toutes sont celles qui correspondent à des organes dont la vérification est pratiquement indépendante des dimensions de l'organe mesuré ; c'est le cas, par exemple, du diamètre du cylindre dans l'épreuve pratique des tours.

Les tolérances variables sont celles qui correspondent :

- A des vérifications communes à des machines de même type, mais de dimensions variables ; par exemple, le "rond" d'un cylindre peut être affecté de tolérances proportionnelles au diamètre, lorsque cette vérification intéresse des tours de hauteurs de pointes très différentes.
- A des vérifications intéressant des dimensions importantes telle que les erreurs ne puissent être constantes ; par exemple, la planéité des tables est affectée d'une tolérance proportionnelle aux longueurs intervenant dans la vérification ;
- A des vérifications se rapportant plus ou moins directement à des mesures d'angles ; c'est le cas, par exemple, des "faux ronds" de broches ou l'erreur est, en fait, évaluée en tangente de l'inclinaison de l'axe de la broche par rapport à sa position théorique.

Lorsque les dimensions intéressées sont faibles, les tolérances variables leur sont proportionnelles ; toutefois, la tolérance ne doit jamais être fixée au-dessous de 0.01 ; par exemple, la tolérance, à admettre sur une longueur de 300 mm est limitée à 0.01 même si elle est indiquée sous la forme 0.02/300. Lorsqu'il s'agit, au contraire, de dimensions très grandes, comme par exemple de tours à bancs très longs il ne serait pas possible de conserver la règle de proportionnalité, en raison de multiples causes d'erreurs possibles ; dans ces cas, il y a lieu de consentir des tolérances supplémentaires dont la grandeur augmente avec la longueur mesurée mais ne doit pas dépasser un maximum donné.

Les tolérances indiquées représentent, en général, le résultat de la mesure directe qui leur correspond, il y a lieu, toutefois, de tenir compte des conditions ci-après ;

- Certaines mesures doivent être répétées plusieurs fois, en changeant l'origine de la vérification ; l'erreur dont il y a lieu de tenir compte est obtenue en faisant la moyenne arithmétique des erreurs constatées à chaque mesure ;
- Certaines erreurs s'obtiennent par différence ; c'est le cas, par exemple, de la perpendicularité d'une broche à la rainure d'une table mesurée au moyen d'un amplificateur monté au bout d'un long levier et dont il est inutile de régler le zéro.

Dans certains cas, les tolérances correspondant à une même vérification sont multiples ; c'est le cas des vérifications du pas de filetages ou de vis mères, ou il y a lieu de fixer une tolérance globale et des tolérances locales dans les conditions indiquées plus haut, de manière à garantir la régularité des dimensions vérifiées.

Certaines tolérances n'ont pas été fixées, car elles correspondent à des propriétés très particulières et font intervenir des appareils très spéciaux ; les vérifications correspondantes ont été indiquées surtout à titre documentaire et ne font partie qu'indirectement de la normalisation des conditions de réception.

Pour terminer, il convient de fixer les erreurs que l'on peut admettre pour les appareils de mesure utilisés dans une vérification déterminée. La règle générale, d'après laquelle l'appareil de vérification doit avoir une précision dix fois plus grande que le produit à contrôler, est évidemment la meilleure, mais ne peut être appliquée que dans des cas restreints, sous peine de conduire à des difficultés opératoires inadmissibles. Aussi peut-on admettre d'une manière plus rationnelle, la règle du 1/5 qu'il est possible de respecter pour la majorité des vérifications. En aucun cas il ne faudra accepter que la précision de l'appareil de mesure soit inférieure au double de celle de la grandeur à vérifier.

II.5. CONCLUSION

Nous avons essayé d'unifier les conditions techniques d'examen de la précision géométrique des machines-outils fonctionnant à vide ou dans des conditions de finition, à l'aide des vérifications géométriques et des épreuves pratiques.

Une machine-outil est une machine, non portable en travail, actionnée par une source extérieure d'énergie et permettant l'usinage du métal, du bois, etc... par enlèvement de matière ou par déformation.

Dans ce chapitre, cette étude ne concerne que le contrôle de la précision proprement dite. En particulier, elle ne traite ni de l'examen du fonctionnement de la machine (vibrations, bruits anormaux, points durs dans les déplacements d'organes), ni de celui des caractéristiques (vitesses, avances), examens qui doivent en principe précéder celui de la précision de la machine. L'attention est d'ailleurs attirée sur le fait que les vérifications géométriques font l'objet de longs développements, il n'en est pas de même des épreuves pratiques ; car le problème du contrôle des pièces d'essai aux points de vue positions, dimensions et formes se trouve traité dans tous les ouvrages courants de métrologie.

CHAPITRE

III

***CORRECTION
GÉOMÉTRIQUE DES
MACHINES-OUTILS
PAR GRATAGE***

CORRECTION GEOMETRIQUE DES MACHINES-OUTILS PAR GRATTAGE

III.1. INTRODUCTION

Actuellement, les sociétés sont confrontées à une concurrence de plus en plus rude, où l'entreprise devra être compétitive dans les conditions de qualité de produits et services, au moindre coût et meilleurs délais de réalisation. Dans l'industrie, les équipements de production sont affaiblis dans le processus de réalisation durant leur vie active, par des dysfonctionnement (usure, dérèglement, pertes de performance, de précision, etc.) qui affectent les conditions citées ci-dessus, voire amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient.

Percevoir le premier les évolutions du marché, développer rapidement des produits et des services adaptés...sont autant d'enjeux qui, au départ, dépendent de notre capacité d'écoute et d'analyse.

Etant donné que les machines outils de génération ancienne se prêtent parfois mieux, pour certaines tâches, que celles récentes et modernes de génération nouvelle, leur construction robuste offre l'avantage d'investissements minimisés par une remise à neuve complète, en dépit d'un état d'usure global souvent avancé.

Les défauts de géométrie apparus après vérification géométrique vont être pris en charge par une correction en utilisant la technique de grattage. Cette dernière sera développée dans le présent chapitre.

III.2. PRINCIPE DU GRATTAGE

Qu'est ce que le grattage ? Le grattage est l'enlèvement de petits et menus copeaux sur une surface déjà préparée à l'aide d'un outil à arête vive, appelé le grattoir, appliqué généralement soit :

- Sur des surfaces devant être dans tous les cas planes (degré élevé de planéité), ou bien dans des positions mobiles ou fixes des pièces d'usinage formant un ensemble.
- Sur de différentes surfaces devant particulièrement bien porter, et où le degré élevé de la précision de mesures, forme et position ne peut être obtenu par usinage mécanique.

III.2.1. Procédé de travail

Dans le grattage, des ergots (rayures d'usinage, bosses de portage) de la surface de la pièce sont enlevés par le grattoir. Il en résulte des surfaces lisses grâce à l'angle de coupe toujours supérieur à 90° (voir Fig. III-1).

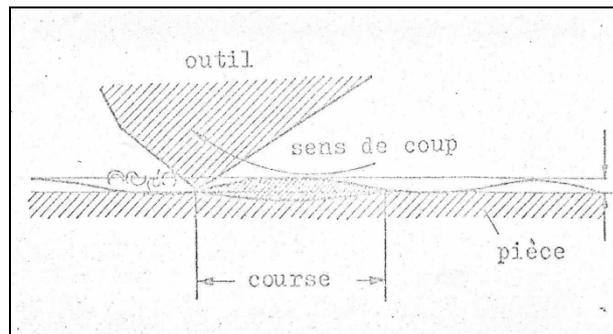


Figure III-1 : Principe de grattage.

III.2.2. Conditions préliminaires du grattage

Avant de gratter, il faut que chaque surface soit finie par limage, tournage, ou rabotage (mais non par rectification). La figure III-2 Montre l'état de la surface au départ et après grattage.

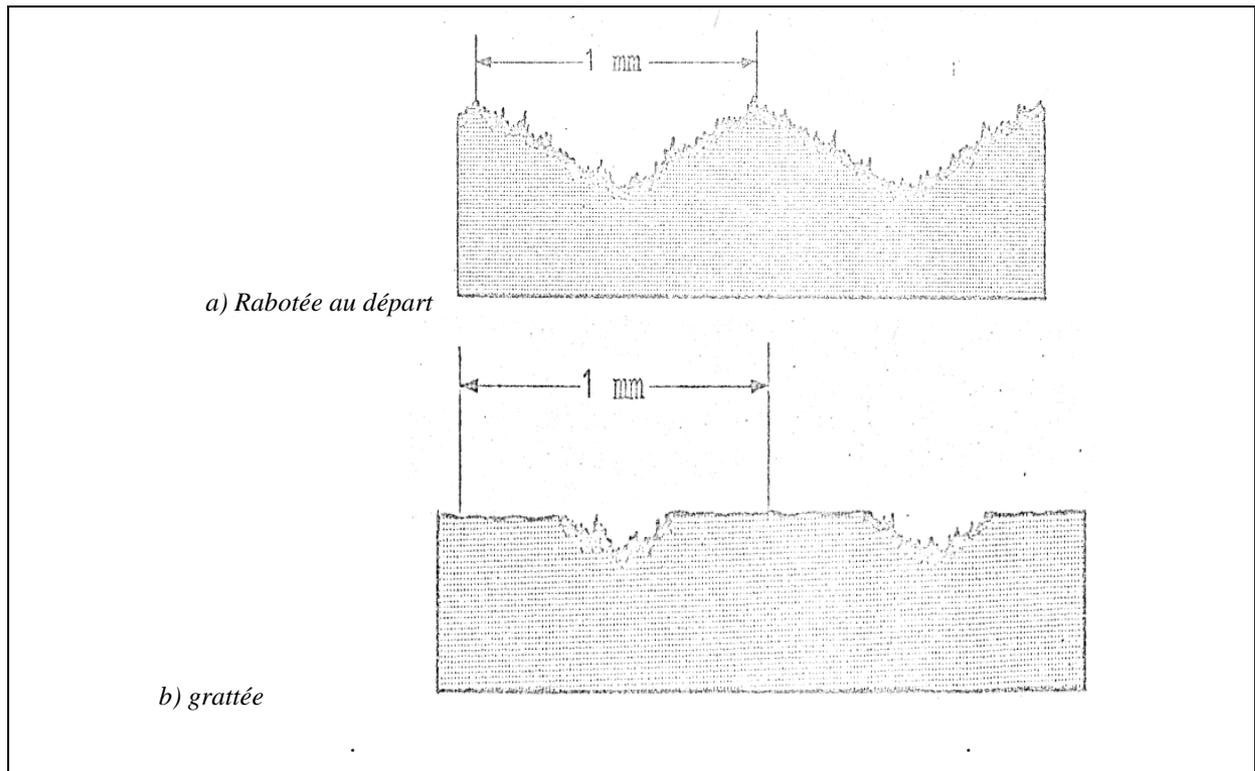


Figure III-2 : Etat superficiel de la surface.

III.3. BUT DU GRATTAGE

Le degré élevé de planéité d'une surface (par exemple dans le cas de marbre et cales en vés à toucher, tables de mesure) ne peut être obtenu que par grattage, car l'usinage mécanique de la pièce ne peut guère éviter une légère déformation, par suite de serrage et des forces génératrices dans l'enlèvement de copeaux.

Pour des surfaces superposées de pièces formant un ensemble, on veut obtenir par le grattage un contact parfait et un appui uniforme ; ce qui, selon la destination des pièces, pourrait conduire :

- Dans le cas des surfaces non-coulissantes à l'étanchéité à l'huile,
- Dans celui des surfaces coulissantes à l'obtention de la plus grande précision des mesures, de la forme et de la position par rapport à la contre-pièce en conservant la couche d'huile simultanément

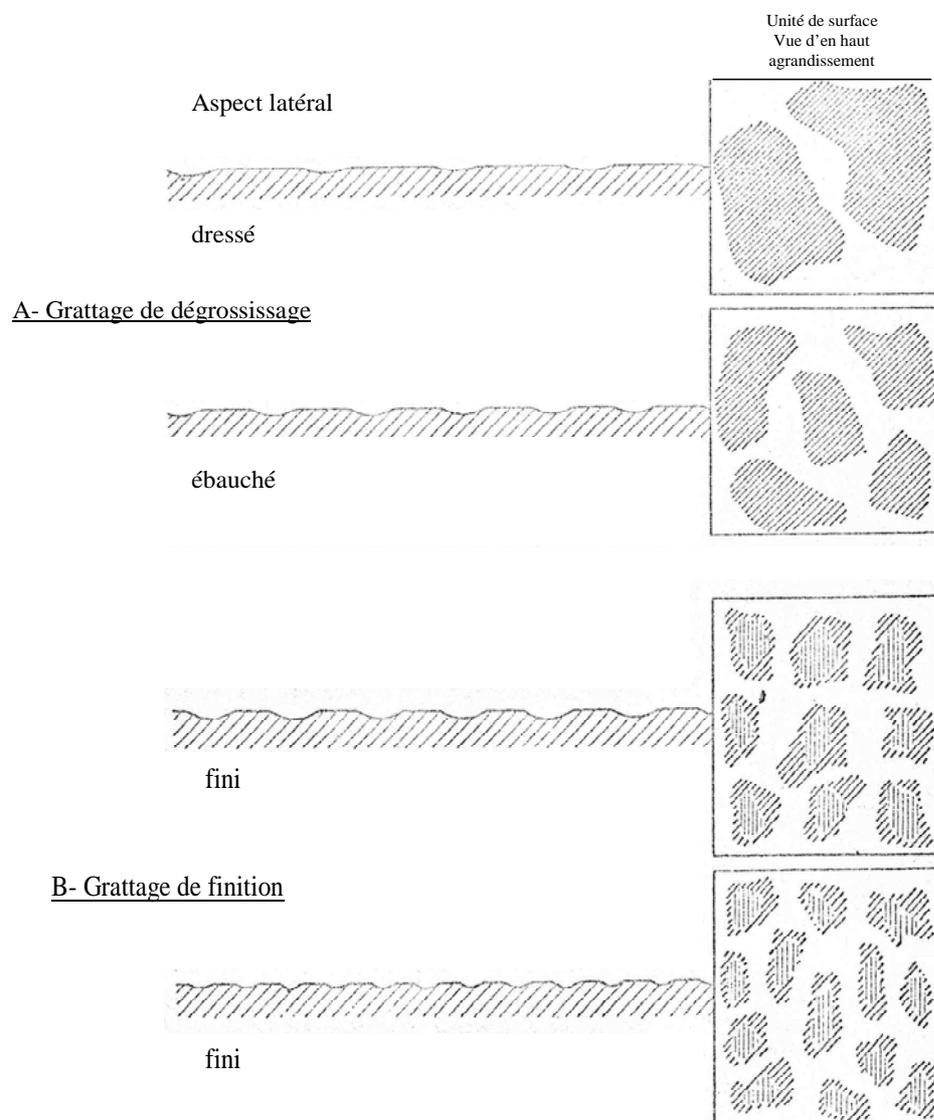
Pour des pièces coulissantes et de guidage, par exemple des glissières longues chargées, il peut être nécessaire d'équilibrer de légères flexions par des cintrages correspondants pour observer la précision demandée.

Pour des surfaces cylindriques de glissement, il suffit souvent de gratter une seule surface (par exemple palier d'un arbre).

III.4. TECHNIQUE ET QUALITE DU GRATTAGE

Par enlèvement des bosses (rugosité), le grattage provoque un lissement (nivellement) de la surface de la pièce et augmente ainsi la qualité de l'état de surface (voir *Tableau III-1*). Pour mesurer la qualité de surface, on a fixé le nombre de bosses de portage sur une surface de 25×25 mm. On le trouve, en appliquant une couche d'huile colorée sur un marbre puis qui donne les qualités de grattage.

Par répétition du grattage, le nombre de bosses de portage augmente de plus en plus, jusqu'à ce qu'un appui uniforme sur la surface entière soit obtenu, diminuant ainsi le nombre de bosses de portage [16].



C- Grattage de super finition

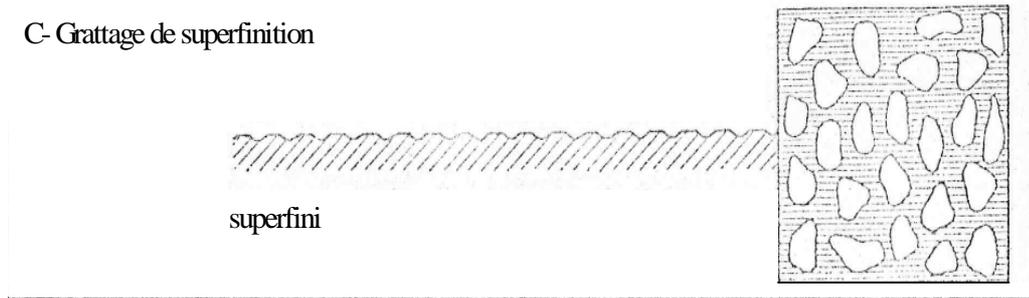


Figure III-4 : Reproduction agrandie de surfaces grattées

Tableau III-1 : Caractérisation de la qualité du grattage.

Désignation		Nombre de bosses portage sur 25×25 mm	Emploi	Genre de surface
Grattage de dégrossissage	Dressé	1 à 3	Surfaces d'appui, surfaces adjacentes.	Surfaces planes.
	Grattage d'ébauche	4 à 5	Tous genres de surfaces, de même pour faire ensuite le grattage fin et superfin	
Grattage fin	Grattage de finition	6 à 19	Glissières et paliers pour machines de tous genres.	Surfaces planes et courbées.
Grattage superfin		20 et plus	Appareils à toucher, surfaces de tous genres de qualité supérieure.	

Degré de qualité	Aspect	Nombre	Dimension	Distribution
Peu élevé	Fortement coloré	Limité	A grandes surfaces	Irrégulière
Plus élevé	Légèrement colorées, bords marqués plus nettement	Accru	Inférieures	Moins irrégulière
Très élevé	Brillantes, fond légèrement teint	Elevé	Encore inférieures	Régulière

La technique du grattage à employer (maniement et guidage du grattoir) résulte de la qualité de grattage demandée (nombre de bosses de portage par unité de surface).

Pour cela, on distingue le grattage des surfaces planes et le grattage des arrondis et des profils où il ya certaines conditions d'utilisation à respecter : exemples pour le grattage fin, la course du grattoir est moyenne comparée à celle du grattage gros qui est plus longue, la pression pour le grattage fin est moyenne par contre pour le grattage superfine, elle est légère et les mouvements du corps sont différents pour chaque type de grattage, ainsi que la position du corps, angle d'incidence et la profondeur du copeau enlevé.

III.4.1. Classement des techniques de travail

a) Grattage des surfaces planes :

Désignation	Course	Pression	Mouvement	Position du corps	Angle d'inclinaison	Profondeur de copeau mm env
Grattage gros	Longue	Forte	Faire intervenir le poids du corps, pousser fortement	Légèrement inclinée, écart plus grand de l'endroit à gratter	$\approx 30^\circ$	0,01 à 0,03
Grattage fin	Moyenne	Moyenne	Pousser fortement sans l'intervention du poids du corps	Incliné, écart plus petit de l'endroit à gratter	35° à 40°	0,005 à 0,01
Grattage superfine	Courte	Légère	Légèrement à partir de l'articulation de la main	Plus inclinée, auprès de l'endroit à gratter	$\approx 45^\circ$	0,003 à 0,08

b) Grattage des arrondis et des profils :

Désignation	Course	Pression	Mouvement	Position du corps	Angle (α) d'inclinaison	Profondeur de copeau mm env
Grattage gros	Longue	Moyenne	En forme d'hélice, en poussant et en tirant	Légèrement inclinée	$\approx 60^\circ$	0,01 à 0,03
Grattage fin	Moyenne	Moyenne	A droite et à gauche à partir de l'articulation du bras	Légèrement inclinée	$\approx 60^\circ$	0,005 à 0,01
Grattage superfin	Courte	Légère	A droite et à gauche à partir de l'articulation de la main	Légèrement inclinée	$\approx 60^\circ$	0,003 à 0,08

Angle (α) d'inclinaison remplace un angle d'attaque (repassage) de :

$\approx 105^\circ$ pour la fonte grise

$\approx 85^\circ$ pour l'acier

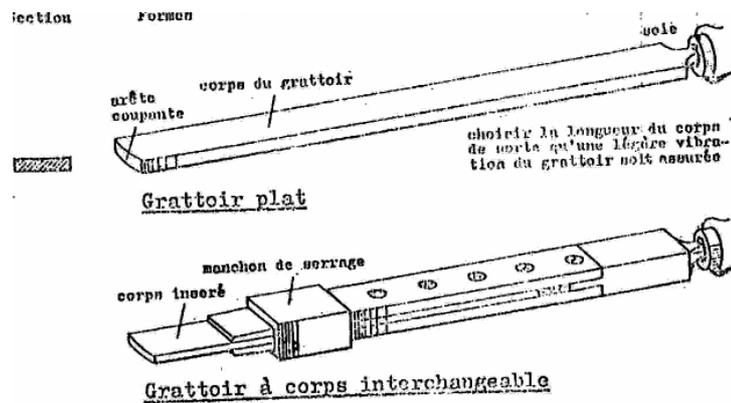
$\approx 90^\circ$ pour le bronze et le laiton

III.5. LES OUTILS DE GRATTAGE

III.5.1. Grattoirs plats, triangulaires et à cuillères

Les grattoirs forgés en bon acier à outils, subissent un premier affûtage, sont trempés, réaffûtés et affilés. Pour travailler des matières particulièrement dures, on peut pourvoir les grattoirs de plaquettes au carbure métallique.

Pour surfaces Planes



Pour surfaces courbes

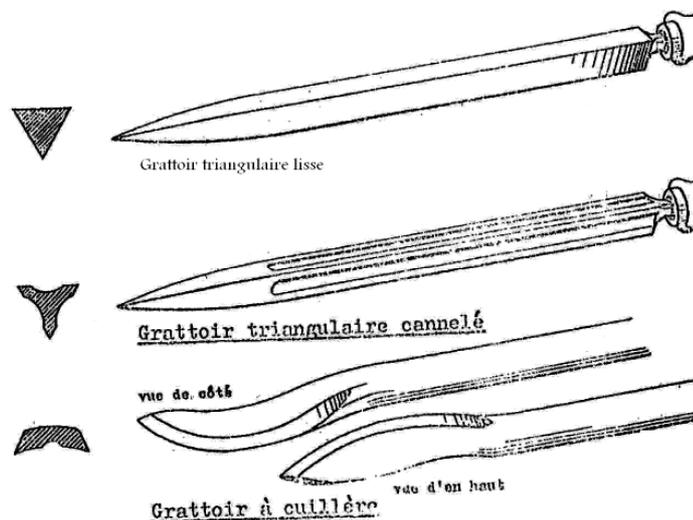


Figure III-5 : Différents types de grattoirs

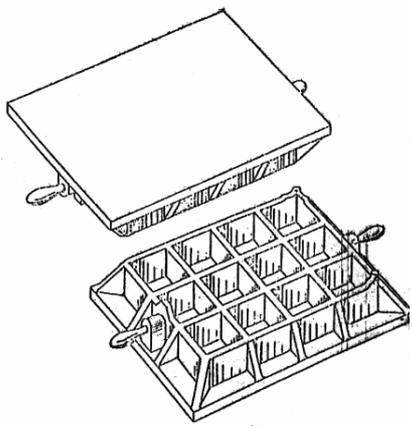
Remarque : On doit employer des lubrifiants conformes au grattage des différentes matières

III.5.2. Matériel à colorer

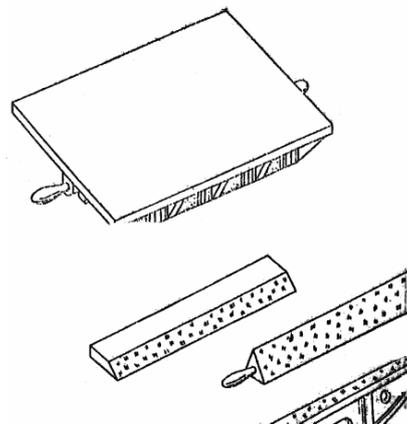
Le marbre à toucher : est une plaque en fonte grise pourvue de deux poignets dont la surface a subi un grattage de finition offrant par conséquent une parfaite planéité.

Cependant, la face inférieure de la plaque est renforcée contre la flexion par des nervures et comporte trois pieds, ce qui lui donne une grande solidité. La grandeur des plaques est normalisée.

Ces marbres servent à rendre visibles les bosses de portage des surfaces planes à l'aide d'une couche colorante. En général, la surface des pièces doit être plus petite que le marbre.



Marbres à toucher



Règles à toucher

Figure III-6 : Marbres et règles à toucher



Figure III-6 : Marbres et règles à toucher

On se sert de :

- * Règles à toucher
- * Règles prismatiques
- * Règles-ponts à toucher pour des pièces plus grands et de
- * Cylindres à toucher pour des alésages, coussinets etc.

Comme colorants, on emploie un mélange de craie, d'huile et de sanguine ou de bleu de Berlin.

Pour les travaux simples, on peut fabriquer soi-même avec de l'huile, les colorants de suie ou de minium. Le minium est dangereux ; faire attention lors de son usage !



Figure III-6 : Marbres et règles à toucher

Remarques :

Ne pas employer les marbres à toucher pour d'autres travaux (p.ex. traçage, alignement etc.) et les placer exclusivement sur les pieds.

Après l'usage, nettoyer soigneusement la surface colorée, la recouvrir d'une huile non-acide et fermer par un couvercle en bois.

III.5.3. Détermination des bosses de portage par le procédé de coloration

Dans le procédé de coloration, les bosses de portage sont rendus visibles par friction des surfaces à usiner sur une surface de degré élevé de planéité qui est légèrement couverte par une couleur. La couleur reste sur la pièce et indique ainsi les bosses de portage. Selon le degré de qualité des surfaces colorées, on distingue trois aspects caractéristiques :

- * Degré de qualité peu élevé, son aspect fortement coloré, présentant un nombre limité à grandes surfaces et de distribution irrégulières
- * Degré de qualité plus élevé, son aspect est légèrement coloré bords marqués plus nettement, présentant un nombre accru à dimensions intérieures et de distribution moins irrégulières
- * Degré de qualité très élevé, les bosses de portage sont brillantes et fond légèrement teints, présentant un nombre élevé à dimensions encore inférieures et de distribution régulières.

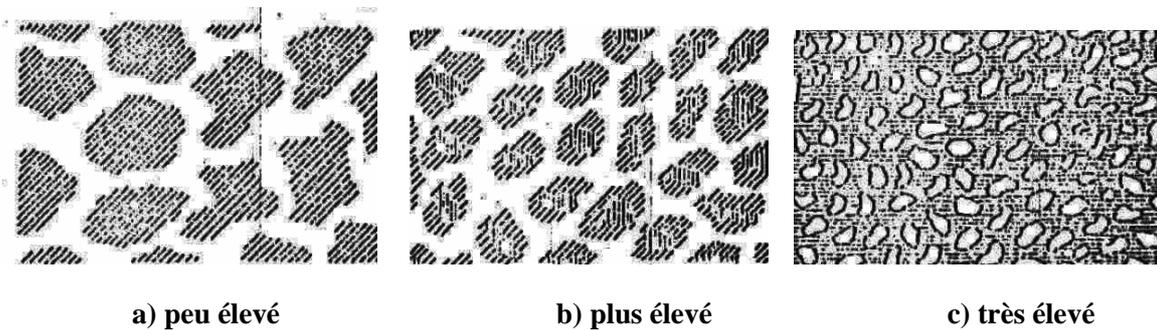


Figure III-7: Degré de planéité

III.5.4. Phases d'opération

- * Nettoyer le marbre à toucher au moyen d'un dégraisseur approprié ou à l'aide d'un chiffon propre.
- * Enduire le marbre de colorant en appliquant une couche mince et uniforme. Avoir soin de ne laisser tomber sur le marbre aucun corps étranger, vérifier, si nécessaire, avec l'éminence de la main.
- * Placer la pièce avec précaution (ne pas basculer) sur le marbre.
- * Imprimer à la pièce un mouvement circulaire sous une pression légère et constante.
- * Soulever la pièce uniformément. Tenir la surface colorée face à la lumière de sorte que les endroits portants soient bien visibles.

Remarque :

Repérer alternativement l'usinage et la coloration des bosses de portage jusqu'à l'obtention de la qualité de l'état de surface désirée.

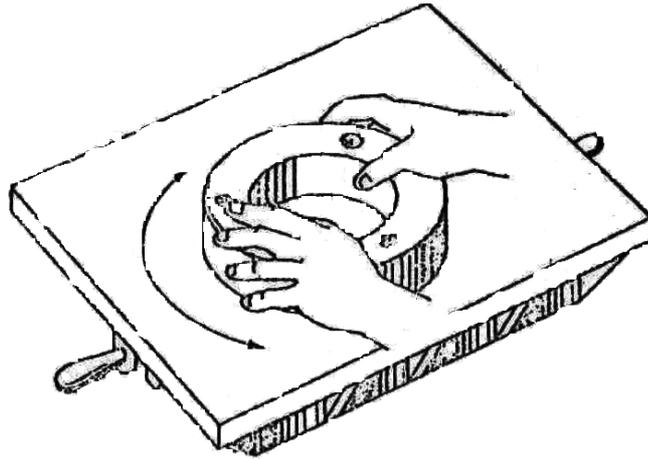


Figure III-8 Imprimer la pièce de mouvement circulaire avec une légère pression constante



Figure III-9 Listel en cours de coloration sur marbre

III.5.5. Mesure de la planéité et du parallélisme

Dans le grattage des surfaces, différents procédés de mesure sont employés pour vérifier la planéité d'après le degré de précision demandé :

- * Cales de jeu, p.ex. pour constater la convexité,
- * Niveau à bulle, surtout pour aligner et mesurer les grandes surfaces,
- * Comparateur à cadran pour les précisions élevées.

III.5.6. Phases d'usinage dans le grattage des surfaces planes

a) à l'aide des cales de jeu

1. Dresser.
 2. Tâter avec les cales de jeu (espion) de 3/100
 3. dans le cas d'une forme bombée, aplanir celle-ci par grattage après avoir déterminé sa position exacte, ensuite colorer avec précaution.
 4. Gratter et colorer alternativement jusqu'à l'obtention du degré de qualité exigé.
- Remarque : une forme bombée peut falsifier l'image colorée.

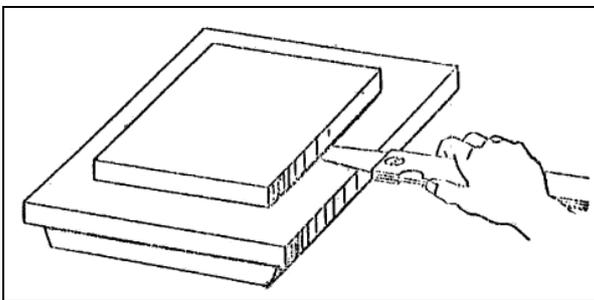
b) à l'aide du niveau à bulles

1. Aligner le marbre ou la pièce à gratter au niveau à bulles.
2. Gratter la surface d'après le niveau à bulles et l'image colorée.

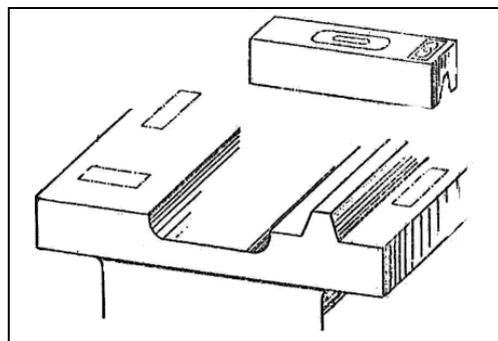
c) à l'aide du comparateur à cadran

1. Aligner le marbre avec le niveau d'eau
2. monter la pièce en l'appuyant en trois points sur le marbre et l'aligner au niveau d'air.
3. Tâter la surface grattée avec le comparateur à cadran (le support du comparateur glisse sur le marbre).
4. Repérer les opérations de grattage, coloration et mesure jusqu'à l'obtention du degré de qualité demandé.

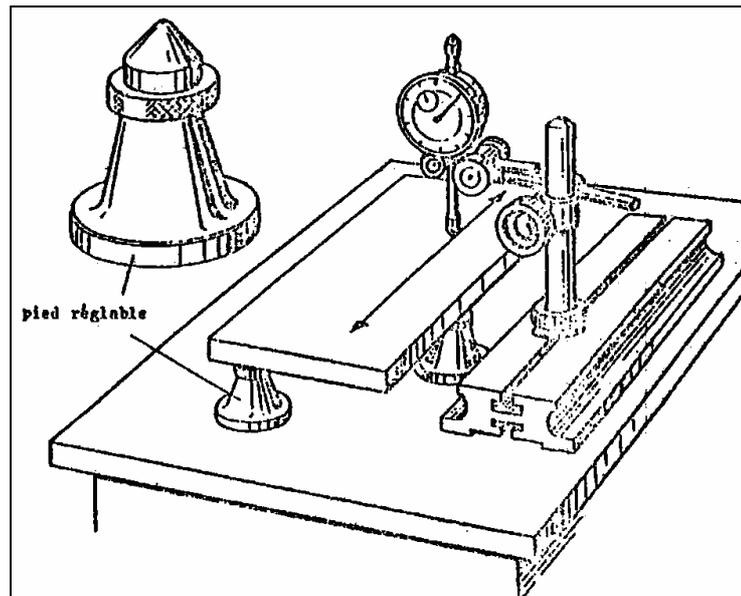
Remarque : la mesure du parallélisme des surfaces opposées se fait avec le comparateur à cadran, mais l'alignement n'est pas nécessaire.



a) A l'aide de cales de jeu



b) à l'aide de niveau à bulles



c) A l'aide de comparateur à cadran



III.5.7. Affûtage des grattoirs

Le grattoir est affûté au mieux au moyen d'une meule en grès sous légère pression et en refroidissant grandement à l'eau.

L'affûtage sur des affûteuses à sec se fait à une pression si réduite qu'aucun échauffement n'est produit. De plus, il faut refroidir le grattoir plusieurs fois dans l'eau.

Tandis que les grattoirs plats sont conduits sur une cale, l'affûtage des grattoirs triangulaires et des grattoirs cuillères se fait à main libre.

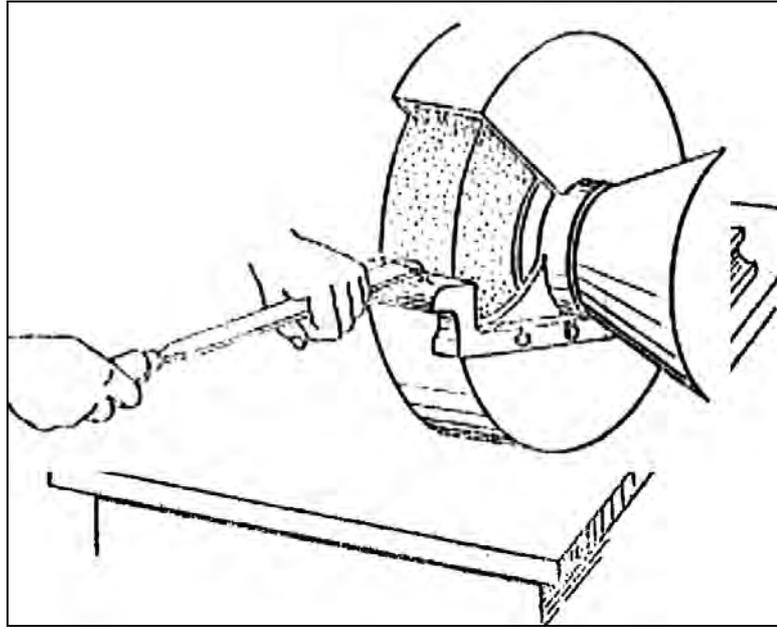


Figure III-10: Affûtage des grattoirs plats sur cale

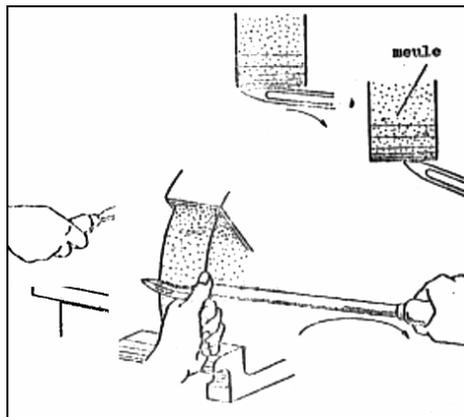


Figure III-11: Affûtage des grattoirs triangulaires et à cuillères

Remarque :

Le repassage du grattoir est nécessaire pour enlever les rayures et les bavures produites pendant l'affûtage du grattoir.

Le repassage se fait sur une pierre d'huile naturelle ou sur une pierre artificielle.

En repassant avec la pierre, on utilise une huile très liquide. Les pierres artificielles sont conservées dans un bain de pétrole.

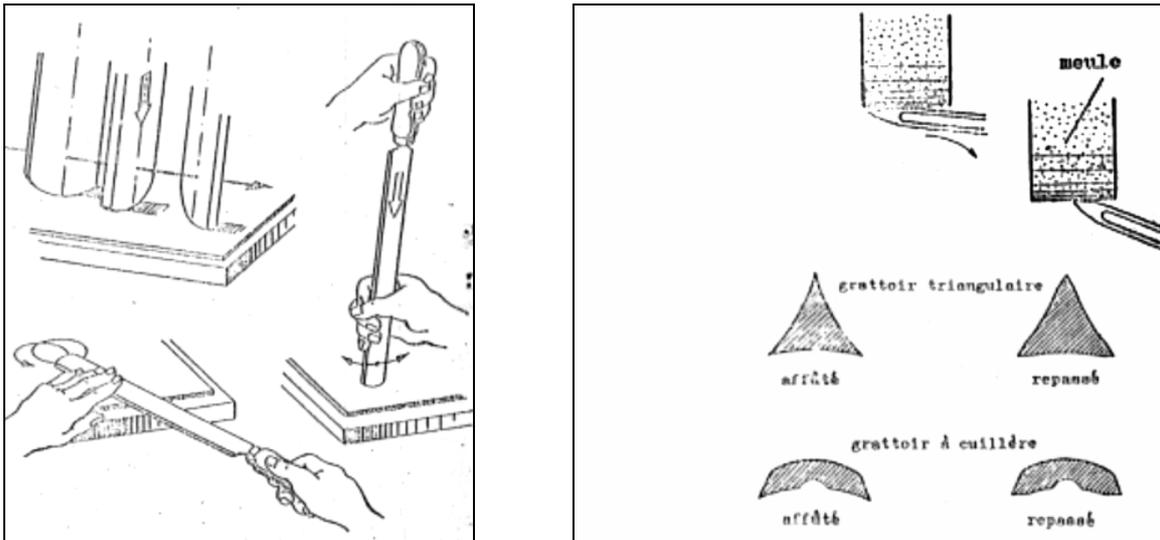


Figure III-12: Repassage des grattoirs plats, triangulaires et à cuillères

III.6. CONCLUSION

On peut dire que l'opération de grattage a une influence directe sur la qualité de la correction géométrique. Redonner à une machine ses caractéristiques d'origine en matière de précision et prolonger sa durée de vie sans pour autant déboursier des sommes d'argent colossales est une bonne affaire pour les managers des grandes sociétés.

La technique en elle-même est un travail d'artiste car ce n'est pas donné à n'importe quel technicien de savoir manier un grattoir et déceler les endroits où il faut agir pour redonner à la machine sa précision d'origine et lui permettre de récupérer ses performances perdues.

CHAPITRE

IV

***DÉVELOPPEMENT
D'UN OUTIL D'AIDE
AU DIAGNOSTIC***

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC

IV.1. INTRODUCTION

Les moyens de production sont, comme les instruments de mesure, soumis à des facteurs provoquant des variations au cours de leur utilisation. De plus, soumis à une utilisation intensive et parfois même dans des conditions peu recommandées, des défauts géométriques apparaissent.

Dans la grande majorité des ateliers, les machines de production sont peu ou pas suivies. Les vidanges sont rarement faites à temps, en plus des utilisations en surrégime et mal entretenues, les machines finissent par avoir des dérives voir même des défauts ponctuels. Les opérateurs expérimentés apprennent à travailler avec ces imperfections géométriques et corrigent d'eux-mêmes la course de la broche. Ce comportement a deux conséquences :

La première est la dégradation progressive de la machine et de sa production. Une machine ayant un défaut de géométrie génère des vibrations pouvant provoquer des états de surfaces dégradés ou des défauts de formes sur les pièces fabriquées. A plus ou moins long terme, c'est l'aptitude de la machine qui sera dégradée et parfois de manière très importante, entraînant des coûts de remise en état bien supérieurs à ceux d'une maintenance minimum obligatoire.

La seconde est la non interchangeabilité de l'opérateur. Pour réduire les coûts de formation, ils sont généralement affectés à des postes fixes. Ils sont alors les seuls à connaître les défauts de leur machine. Il n'est alors pas rare de voir un fraiseur rajouter ou enlever des centièmes par rapport à la côte demandée pour corriger les défauts géométriques de sa machine.

Le problème intervient lorsque l'opérateur est absent. La personne censée le remplacer, ne disposant pas d'un relevé métrologique des défauts des broches, va alors générer un nombre anormal de non-conformités.

De par la précision productiviste imposée par la conjoncture, les chefs d'ateliers ont généralement une vision à court terme du parc machine et privilégient l'aspect curatif des réparations de machine à l'aspect préventif de la maintenance et de la métrologie, ce choix se révèle lourd de conséquences à long terme.

Cette étude consiste à élaborer un programme d'aide au diagnostic permettant de contribuer à la récupération des performances géométriques perdues des machines-outils.

En se basant sur l'expérience d'une quinzaine d'année dans le domaine de la correction géométrique d'un grand nombre de cas de machines rénovées afin de trouver les liens et les chemins possibles entre les symptômes (défauts sur la pièce finie) et les sources (défauts géométriques sur les organes de la machines), cette étude est basée principalement sur les vérifications géométriques et épreuves pratiques des machines-outils.

Par vérification géométrique, on entend les vérifications de dimensions, de formes et de positions d'organes ainsi que celles de leurs déplacements relatifs. Elle comprennent toutes les opérations qui intéressent les organes de la machine (planéité de surface, coïncidence et intersection d'axes, parallélisme et perpendicularité entre elles, de lignes droite et de surfaces planes...). Elles ne concernent toutes fois que les dimensions, les formes, les positions et les déplacements relatifs susceptibles d'intervenir dans la précision du travail de machine.

Quant aux épreuves pratiques, elles consistent en l'exécution de pièces-type répondant aux opérations fondamentales pour

IV.2. IDEE DE DEVELOPPER UN OUTIL D'AIDE

On distingue habituellement et schématiquement quatre étapes principales dans l'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système (*voir Figure IV-1*).

- Analyse technique et fonctionnelle ;
- Analyse qualitative ;
- Analyse quantitative ;
- Synthèse et conclusion.

Dans ce qui suit, nous allons expliquer comment est née l'idée de développer notre outil d'aide diagnostic en se basant sur les quatre points suscités.

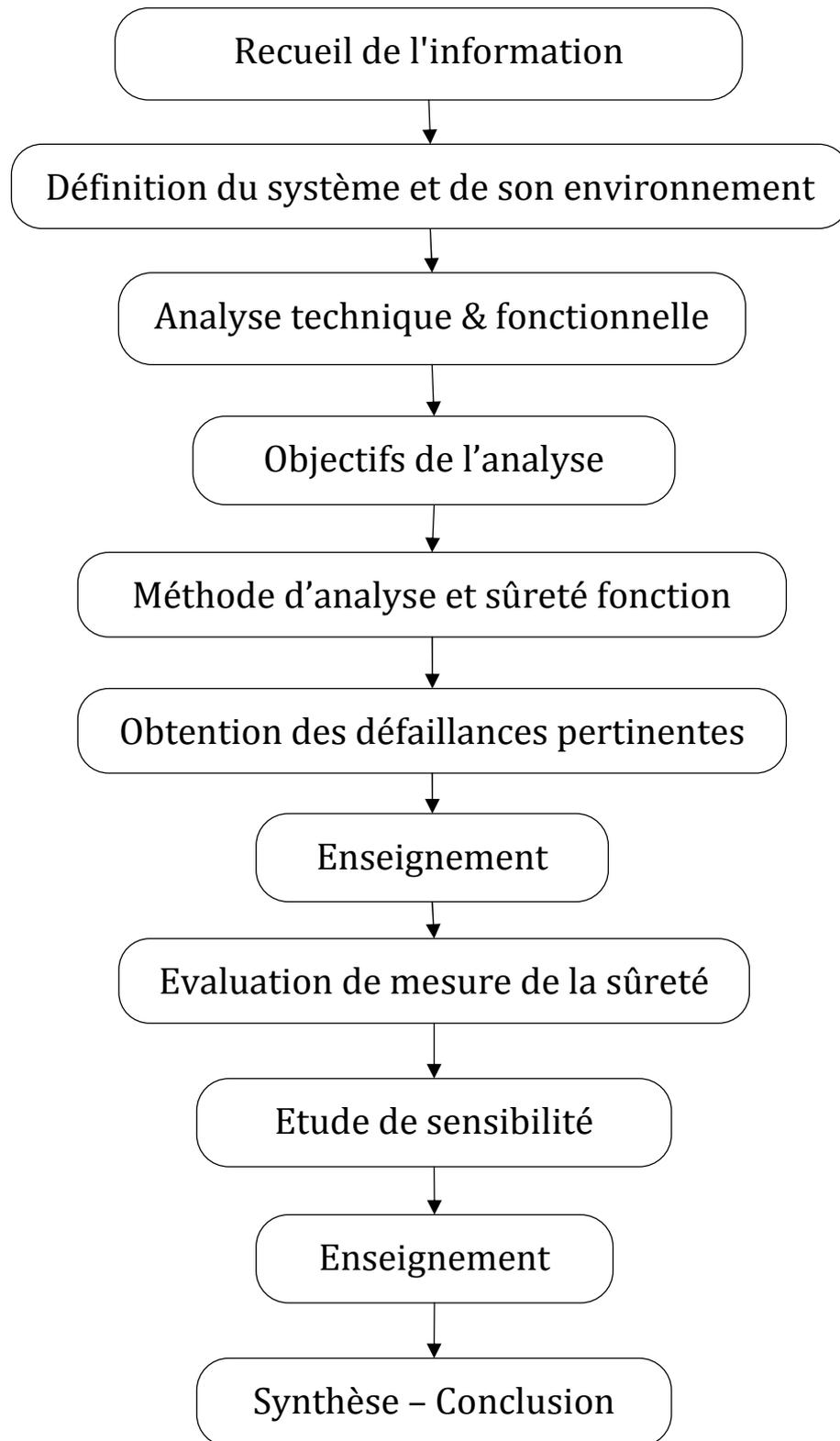


Figure IV-1 : Etapes principales de l'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement d'un système.

Tout abord le recueil des premières informations relatives au système et ses caractéristiques techniques et fonctionnelles. On cherchera notamment à recueillir les informations relatives aux composants constituant le système.

Les objectifs de l'analyse de la sûreté de fonctionnement doivent être clairement définis : s'agit-il d'une étude de la fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité ou de sécurité ? Quelles sont les fonctions importantes concernées par l'analyse ?

De nombreux enseignements sont alors tirés de cette analyse par l'identification et l'évaluation des points faibles ou forts du système, des composants critiques, du niveau de sûreté de fonctionnement atteint...

La synthèse de l'analyse mettra en évidence, par exemple les défaillances et leurs combinaisons qui compromettent la sûreté de fonctionnement du système.

Seront alors dégagées les améliorations techniques susceptibles d'augmenter la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité [17].

IV.3. PRESENTATION DE L'OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC

IV.3.1. Dénomination de l'outil

Nous avons choisi de dénommer notre outil d'aide au diagnostic par le terme « *Calicontrôle* » pour la simple raison de montrer l'importance du calibrage et du contrôle.

IV.3.2. Définition et objectif

C'est un outil permettant de localiser les dégradations de performance géométrique détectée en phase de contrôle géométrique des machines. Nous proposons une méthode d'analyse permettant de relier les effets extraits des résultats de tests de qualification à des causes correspondant défaillances sur le processus délocalisé, par l'intermédiaire de la procédure de vérification géométrique et épreuves pratiques. La mise en œuvre de cette méthode est illustrée sur un exemple industriel s'appuyant sur l'exploitation des résultats de tests de circularités, planéité, alignement, rectitude etc...

L'objectif de cet outil est de localiser les parties présentant des défaillances géométriques pertinentes et de proposer des solutions pour corriger ces imperfections.

Appuyé par des photos réelles de vérifications géométriques des différentes phases de contrôle dans un environnement industriel et aussi des simulations des opérations de vérification par CATIA V5 [18]

IV.3.3. Interface

Cet outil est développé sous environnement MATLAB [19] en lui donnant l'interface présentée dans la figure IV-2.

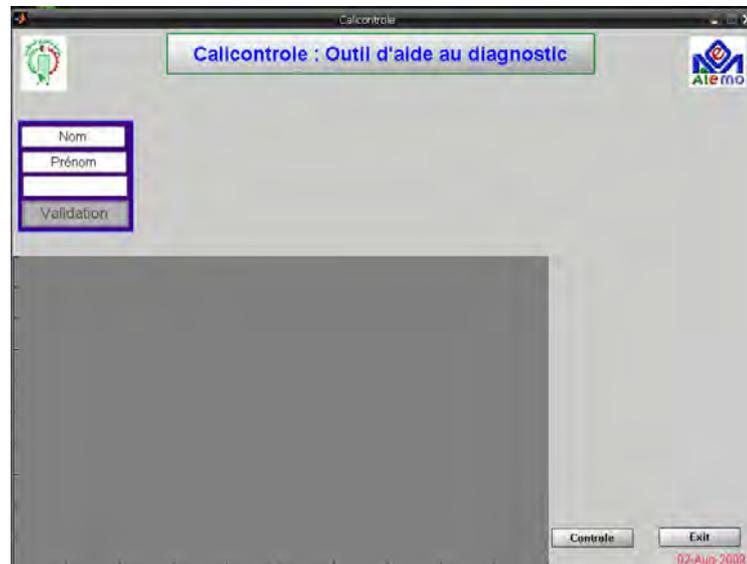


Figure IV-2 : Interface de l'outil.

Par mesure de sécurité un nom et un mot de passe lui ont été attribués.

Après saisi du nom et du mot de passe et validation, un défilement d'un ensemble de machines-outils apparaît où l'on peut choisir le type de machine qu'on veut contrôler (un tour, une fraiseuse, ... etc.).



Figure IV-3 : Type de machines.

Ensuite, et suivant le type de machines qu'on a choisi, plusieurs modèles se défilent, par exemple, en choisissant le tour, nous aurons le choix entre les différents modèles de tours à savoir : tour parallèle, tour vertical, tour révoluer, ... etc. (voir Figure IV-4).



Figure IV-4 : Modèles de machines.

Remarque : Pour l'instant, cet outil a été développé seulement pour le cas d'un tour parallèle et sera généralisé pour l'ensemble des machines-outils pour une meilleure exploitation.

La première étape dans l'analyse de notre système de vérification et correction géométrique consiste à identifier le type de machine, la commande, la date, le N° de machine, ..., etc. (voir Figure IV-5).

Cette première phase est primordiale pour le problème de traçabilité des vérifications et corrections apportées par les personnes concernées et dans le temps.

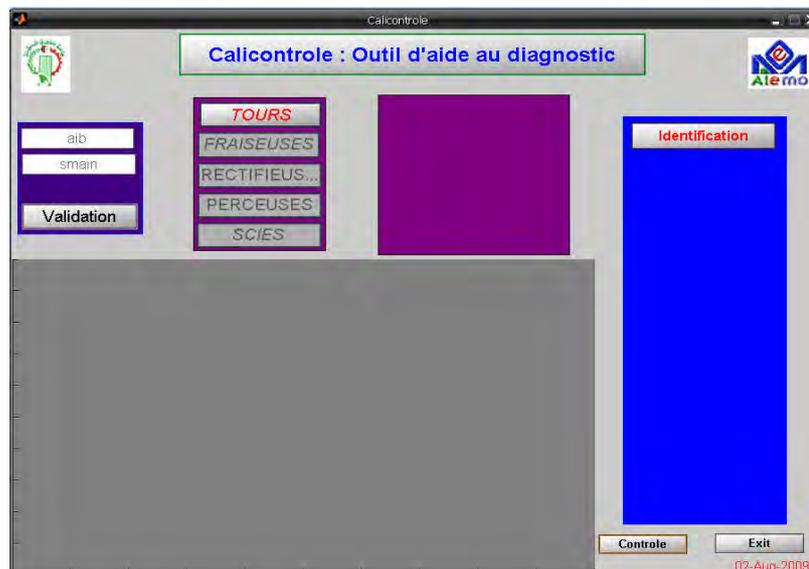


Figure IV-5 : Identification.



Figure 5-1 : Identification

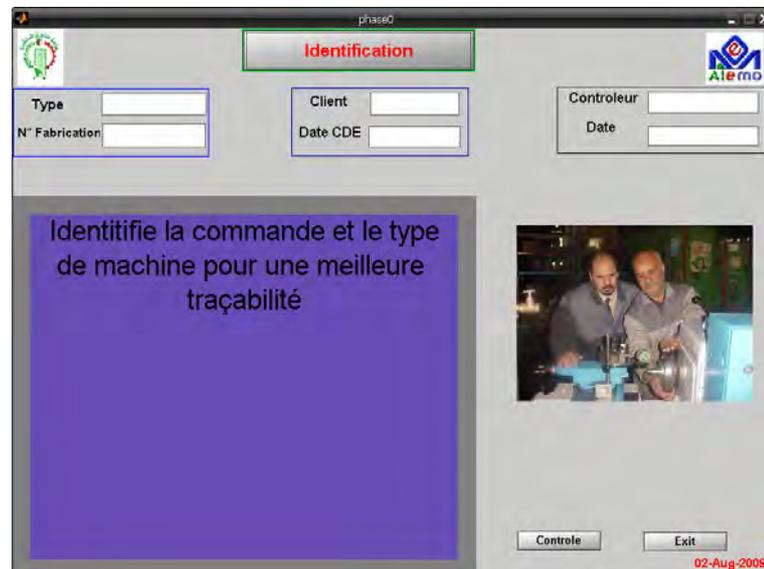


Figure 5-2 : Identification

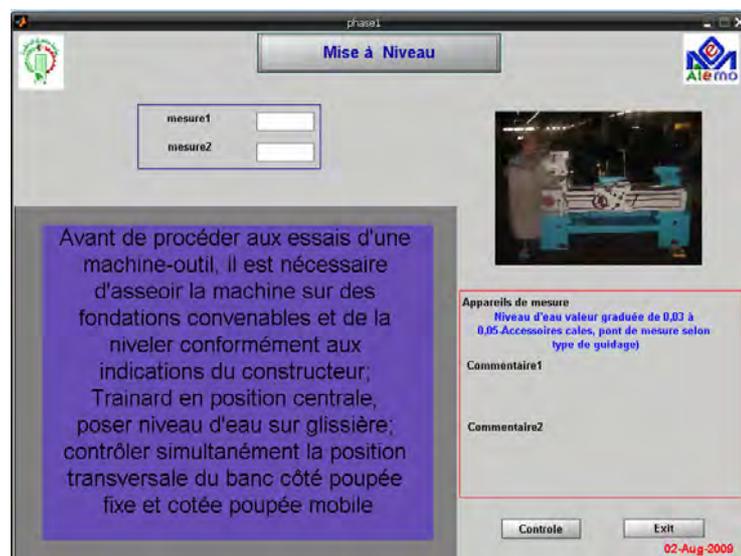


Figure IV-6 : Définition de la phase de travail et des outils.

Ensuite vient la phase de mise à niveau : une définition de la phase de mise à niveau vient se dérouler en cliquant sur l'icône principale ; par exemple, ici pour la mise à niveau s'affiche : (figure IV-6)

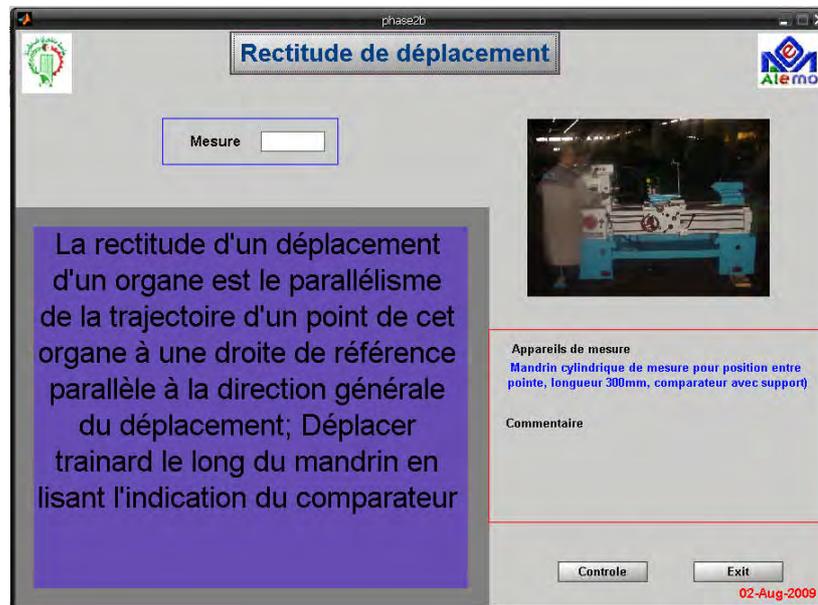


Figure IV-6 : Définition de la phase de travail et outils

Avant de procéder aux essais d'une machine-outil, il est nécessaire d'asseoir la machine sur des fondations convenables et de la niveler conformément aux indications du constructeur. trainard en position centrale, poser le niveau d'eau sur glissières ; contrôler simultanément la position transversale du banc coté poupée fixe et coté poupée mobile.

Aussi pour chaque phase, les instruments de métrologie nécessaires à l'exécution des chaque vérification géométrique, seront bien exprimés par exemple toujours pour le cas de la mise à niveau les appareils de mesure sont : Niveau d'eau valeur graduée de 0,03 à 0,05- Accessoires cales, pont de mesure selon type de guidage.

Une photo réelle dans un environnement industriel s'affiche puis si l'utilisateur veut visionner la simulation de cette phase par CATIA, il lui suffit de cliquer sur contrôle.

Des zones de saisie sont nettement claires, si les côtes prescrites sont dans les tolérances, seul le commentaire de la phase s'affiche dans la cas contraire, des recommandations et orientations sont données pour corriger là où il faut corriger pour redonner la sûreté de fonctionnement de la géométrie de la machine-outil. Ainsi pour toutes les phases présentées, le même scénario se répète mais sera spécifique pour chaque phase de travail.

Si la côte entrée dans la zone de saisie est dans les tolérances, un commentaire s'affiche (voir Figure IV-7). Si ce dernier s'affiche en vert cela veut dire que l'examen exécuté est acceptable et aucune correction n'est nécessaire.



Figure IV-7 : Exécution d'une entrée de côtes dans les tolérances.



Figure IV-8 : Exécution d'une entrée de côtes hors tolérances.

Dans le cas contraire, si la côte prélevée est hors tolérance, le commentaire s'affichera dans ce cas en rouge et tout de suite la mesure à prendre s'affiche pour corriger cette non-conformité (voir Figure IV-8).

On voit bien sur l'interface le contrôleur en train d'exécuter réellement dans le milieu industriel la phase de travail, ici la rectitude.

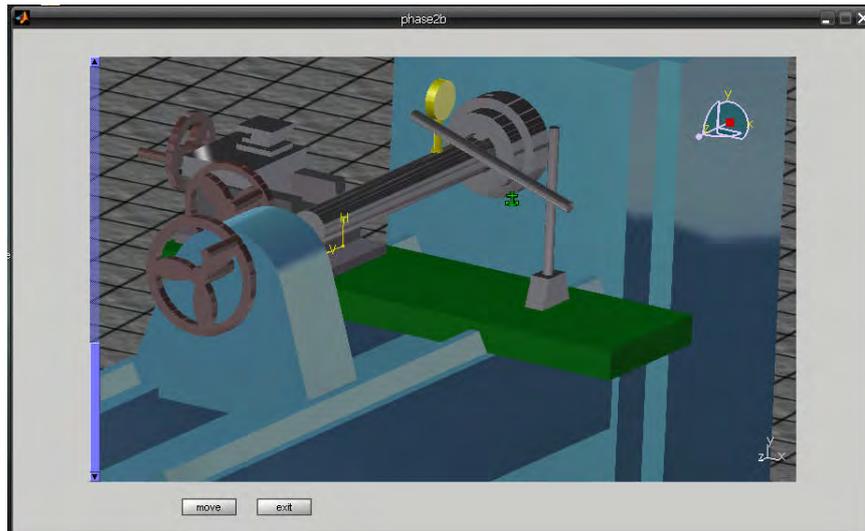


Figure IV-9 : Simulation de la phase de rectitude.

Une simulation de chaque phase de travail est présentée sous CATIA, pour une meilleure assimilation de la phase concernée.

Et ainsi de suite, chaque phase exécutée sera enregistrée pour la synthèse et la conclusion.

Nous présenterons par la suite un ensemble de figures (IV-10 jusqu'à 17) pour les différentes simulations présenter dans cet outil d'aide :

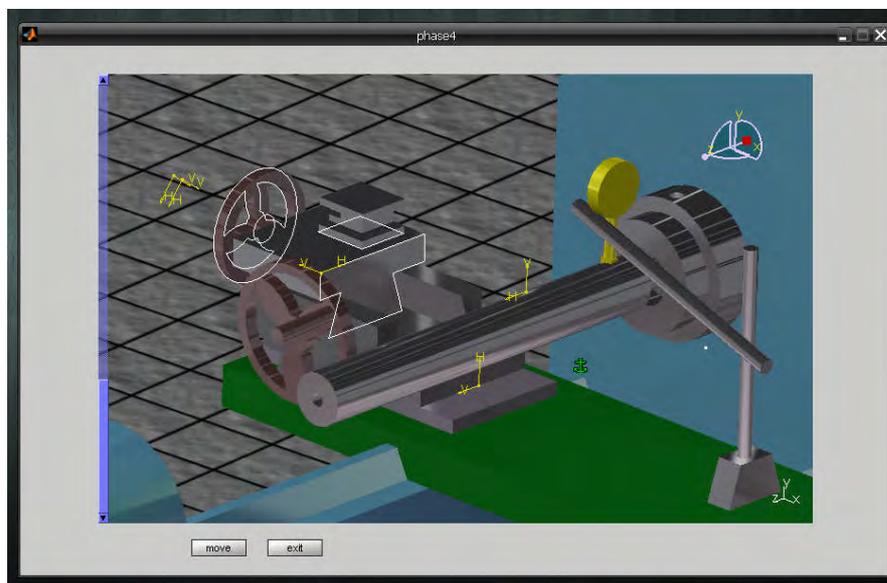


Figure IV-10 : Simulation de la phase du faux rond.

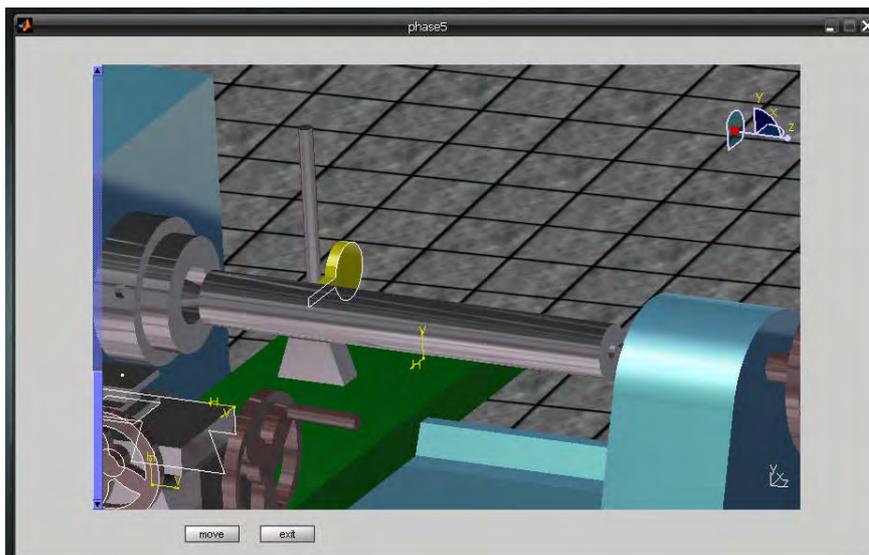


Figure IV-11 : Simulation de la phase du parallélisme.

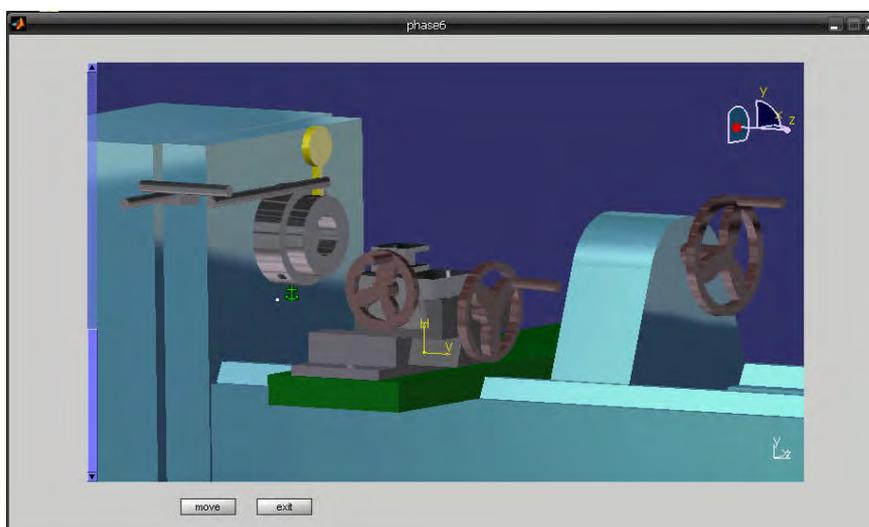


Figure IV-12 : Simulation de la phase du faux rond du cône.

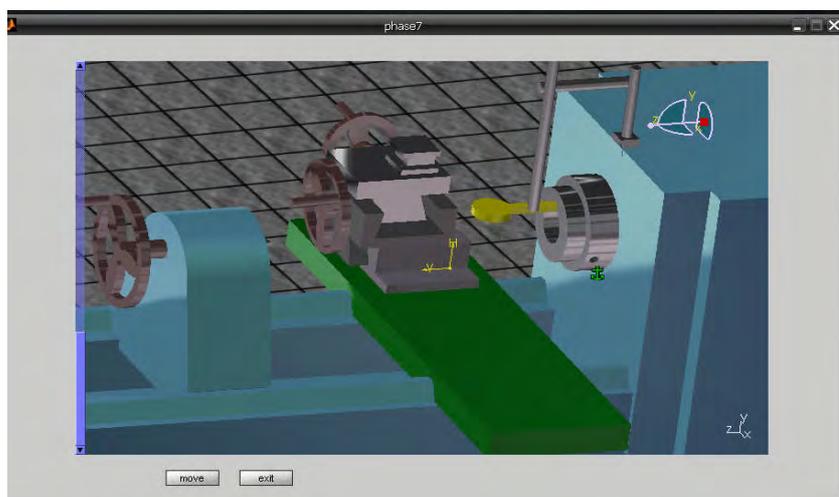


Figure IV-13 : Simulation de la phase de voilage.

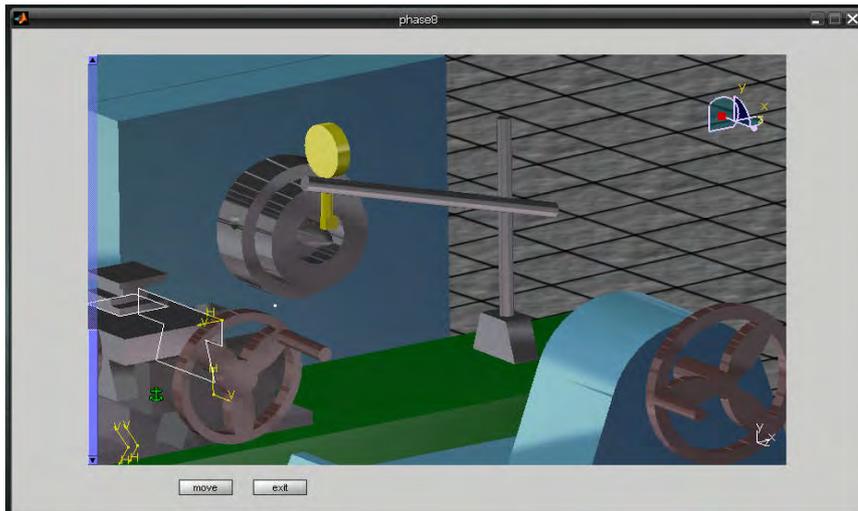


Figure IV-14 : Simulation de la phase du faux rond de la poinrte.

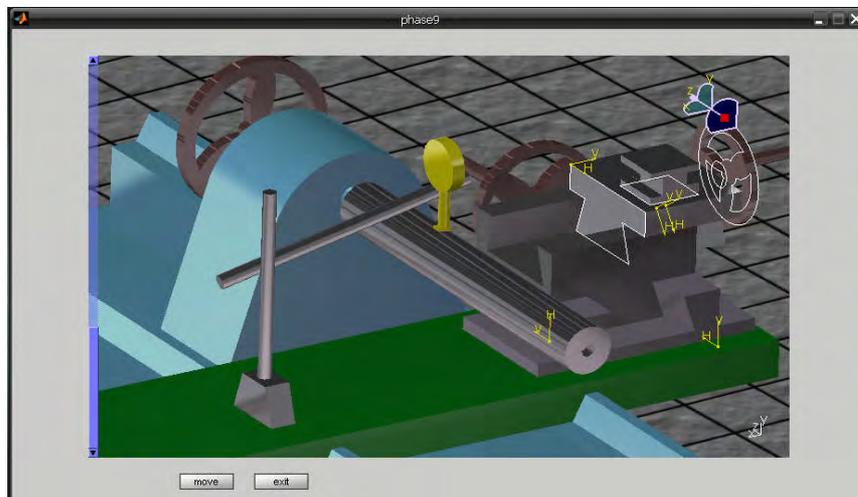


Figure IV-15 : Simulation de la phase du parallélisme du guidage du trainard/poupée mobile.

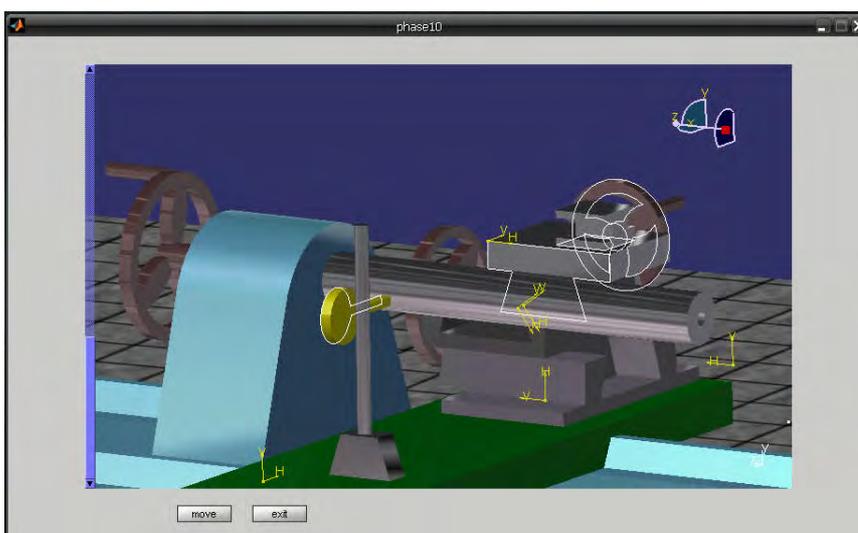


Figure IV-16 : Simulation de la phase du parallélisme du canon dans le plan horizontal.

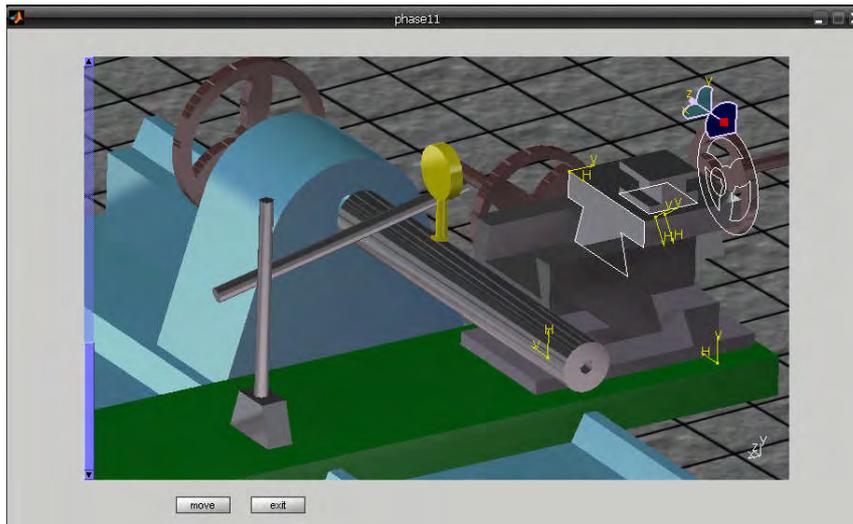


Figure IV-17 : Simulation de la phase du parallélisme du canon dans le plan vertical.

Récapitulation du diagnostic et des mesures à prendre

Nom Superviseur	Prenom Superviseur	Type de Machine	N° Fabrication	Client	Date Commande	Controleur	Date Opération
aih	smain	Tour PITLER	1971	CMT	Convention	CHAOUA	1er Trimestre 2008
<p>Mise à Niveau</p> <p>Mise à niveau de la machine dans le sens longitudinal</p> <p>mise à niveau de la machine dans le sens transversal</p>	<p>Rectitude de Déplacement</p> <p>Mesure à prendre : Régler la poupée mobile</p>	<p>Alignement</p> <p>Vers le(+) gratter poupée mobile , vers le(-) gratter boîte à broche</p> <p>Vers le(+) gratter poupée mobile , vers le(-) gratter boîte à broche</p>	<p>Faux-Rond</p> <p>Mesure à prendre: Serrage ecrou de broche sinon changement des roulements de broche</p> <p>Mesure à prendre: Serrage ecrou de broche sinon changement des roulements de broche</p>				
<p>Parallélisme</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation par grattage de la boîte à broche</p> <p>Mesure à prendre: Selon conception, réglage de la boîte ou son grattage</p>	<p>Faux rond du Cone</p> <p>Mesure à prendre: Rectification du nez de broche pour avoir la circonférence demandée</p>	<p>Voilage</p> <p>Mesure à prendre: Rectification de la face frontale de la broche</p>	<p>Faux rond de la pointe</p> <p>Mesure à prendre: Rectification de l'intérieur de la broche</p>				
<p>Parallélisme du Guidage</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation et grattage du palier de guidage de la vis mère et barre de chariotage</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation et grattage du palier de guidage de la vis mère et barre de chariotage</p>	<p>Parallélisme du Canon</p> <p>Mesure à prendre: Alésage poupée mobile raté donc confection d'un autre canon</p> <p>Mesure à prendre: Alésage poupée mobile raté donc confection d'un autre canon</p>	<p>Guidage Canon</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation par grattage du prisme de guidage de la semelle</p> <p>mesure à prendre: Adaptation par grattage de la semelle de la poupée mobile</p>	<p>Retour au menu</p> <p>Imprimer</p> <p>Quiter</p>				

Figure IV-18 : Récapitulation du diagnostic

Avantages :

- Conserver et exploiter le savoir faire et l'expérience dans le domaine de la correction géométrique et détection des défauts
- Simplicité d'utilisation et d'emploi, conçu pour une mise en œuvre par l'opérateur machine, pas de connaissance de spécialiste nécessaire ;
- Mesure simultanée de la position et des erreurs et défauts de rectitude, circularité, perpendicularité... ;
- Mesure rapide, simple, précis et sans compromis.
- Mesures rapides, une séquence de mesure ne prend que quelques minutes ;
- Réduire les erreurs dues à la méconnaissance (mauvaise interprétation) de la norme
- Aide à la prise de décision par des mesures à prendre concernant les parties à gratter ou changement de pièces défectueuses (roulement ou autres)
- les vidéos de simulation par CATIA rapproche à l'utilisateur la démarche exacte pour effectuer des opérations de contrôle même s'il ne possède pas une connaissance approfondie dans le domaine.

IV.4. CONCLUSION

Pour conclure, on dira que par vérification et correction géométrique, on aboutit à une précision parfaite de la machine-outil, or le mot " précision" est un mot difficile, parce que trop "imprécis", il rassemble et mêle trop de qualité différentes. L'opération de base dans une fabrication est de maîtriser la position relative d'un objet « outil » et d'un objet « pièce ».

On vise à réaliser le plus parfaitement possible cette position, par contre dans une action de vérification ou de contrôle, on peut être conduit à se contenter de « constater » simplement cette position relative, mais en général avec un niveau d'incertitude plus fin. Cet exposé ne cherche pas à présenter d'une façon exhaustive tout le savoir-faire qui existe dans le contrôle et la vérification des machines-outils, mais se contentera de développer l'importance de l'aspect « information » dans la récupération des performances géométriques des machines-outils.

Cet outil d'aide au diagnostic permettra, dans un esprit de continuité à la correction géométrique par grattage des machines-outils, d'aboutir à traiter des erreurs de position géométrique. Il est intéressant d'esquisser un inventaire de ces causes d'erreurs, il sera ensuite possible de minimiser ou de corriger l'effet de ces causes ou encore mieux d'éliminer leur influence.

EXEMPLE PRATIQUE : **V**
REMISE A NIVEAU
DES EQUIPEMENTS
DU CMT

EXEMPLE PRATIQUE : REMISE A NIVEAU DES EQUIPEMENTS DU CMT

V.1. INTRODUCTION

Les machines outils (de tournage, fraisage, etc.) de génération ancienne se prêtent par fois mieux que les machines outils modernes à certaines tâches, leur construction très robuste offre l'avantage d'investissement minimisés par une remise à neuf complète, en débit d'un état d'usure global souvent avancé, aujourd'hui le service de reconditionnement s'ajoute au service maintenance du fabricant.

Pour certaines applications d'usinage, les meilleures machines de fraisage de construction conventionnelle avec une broche mûrie d'une boîte d'engrange et des glissières plates conservent l'avantage, lors qu'il faut par exemple enlever des volumes de copeaux importants sur des pièces en matières difficiles à usiner. La majorité des utilisateurs est parfaitement consciente de ces avantages, d'où une demande permanente de ce genre de machines.

En raison de leur construction archi-solide, une remise à neuf de ces anciennes machines-outils, après que leur état d'usure ait franchi le point critique, est pratiquement toujours rentable.

Le calcul est assez simple puisque une remise à niveau d'une machine vétuste dont l'état correspond à l'état du neuf, pour un prix qui est environ le tiers du prix d'achat d'origine. Chaque machine est complètement démontée, puis reconstruite après que ses composantes aient été remises à neuf ou changées.

En effet, une remise à neuf ne se conseille que si l'usure atteint un degré qui ne peut plus être contrôlé par un service de maintenance habituel.

Ce genre de machine-outil est particulièrement intéressant pour les ateliers d'outillage avec leur taux de travaux spéciaux unitaires ou de petites séries parce que la main d'œuvre y est habituée et sait s'en servir.

L'objectif principal dans ce dernier chapitre, est de montrer l'importance de l'étude d'investissement faite par le Complexe Moteur Tracteurs et comment l'opération de correction géométrique par grattage des équipements de production du complexe CMT réalisée par ALEMO a contribué favorablement à sauver le parc de production et assurer une continuité du service (disponibilité, sécurité, performance, etc.) et de réaliser ainsi des économies en gain d'énergie, la réduction des charges de réparation ou de rénovation et la limitation des pertes économiques liées aux pannes et enfin conserver le patrimoine de l'entreprise (allongement de la durée de vie).

Il est noté que cette étude a ciblé des équipements de technologie universelle, dont l'année de fabrication se situe en 1971, et ayant une position névralgique dans le processus d'usinage. L'obsolescence, la vétusté et la géométrie de ces mêmes machines-outils, génèrent des surcoûts qui sont en progression d'une année à une autre.

Pour illustrer tout ce qui a été présenté ci-dessus, nous proposons de prendre un équipement de production (la même étude a été faite pour l'ensemble des équipements et a donné les mêmes résultats).

V.2. CYCLE DE VIE D'UNE MACHINE

Le cycle de vie d'un équipement est estimé par une fonction de fiabilité $R(t) = e^{-\lambda t}$ évaluée par un calcul probabiliste d'un taux de défaillance λ , est représentée en courbe baignoire, (figure V.1).

Les moyens de production sont, comme les instruments de mesure, soumis à des facteurs provoquant des variations au cours de leur utilisation. De plus, soumis à une utilisation intensive et parfois même dans des conditions peu recommandées, des défauts géométriques apparaissent.

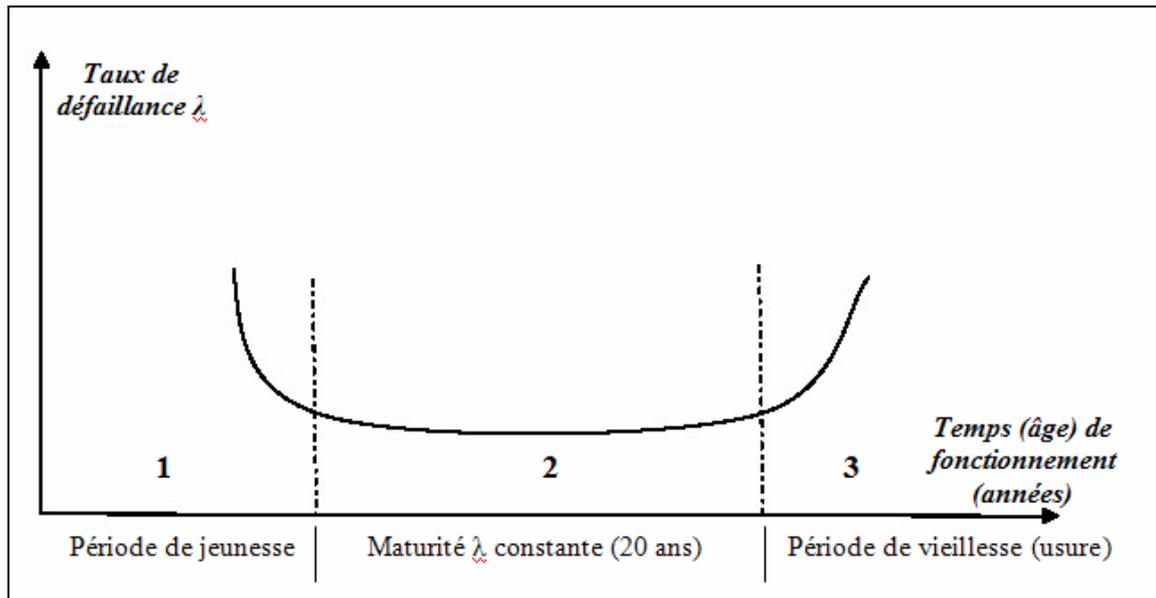


Figure V-1 : Cycle de vie d'une machine.

Interprétation de la courbe :

Comme le montre la figure V-1, le cycle de vie d'une machine-outil est composé de trois périodes principales :

1. Période de défaillance précoce jeunesse : période éventuelle au début de la vie d'un équipement à un instant donné et pendant laquelle le taux de défaillance décroît rapidement. De nos jours, elle est équivalente à la période de rodage assurée par le constructeur.
2. Le fond de la baignoire correspond à la maturité ou le taux de fiabilité des composants est le meilleur. Il est sensiblement égal dans le cas de machine-outil à environ 15 et 20 ans.
3. La montée progressive de la fréquence de la défaillance correspond à la vieillesse où à la dégradation de la fiabilité. (objet de notre analyse car les équipements proposés sont dans cette zone de vieillesse). Par ce travail, nous essayons d'augmenter le fond de la baignoire.

V.3. INDICATEURS MAINTENANCE

Orienté vers l'action, le tableau de bord est un outil de gestion basé sur la mesure,. C'est aussi un instrument de pilotage et d'animation. Il rassemble, sous forme synthétique, l'ensemble des indicateurs pertinents, mis en forme de façon à caractériser l'état de l'évolution de la fonction maintenance. Chacun des indicateurs qui le composent doit être comparé à une valeur « objectif ». L'indicateur fondamental est le MTBF (Mean Time Between Failure). Il s'agit de mesurer la durée moyenne entre deux dysfonctionnements. Il mesure le niveau de non perturbation du fonctionnement du système [17].

V.4. APPROCHE PROBABILISTIQUE

Considérons une machine-outil ayant une fréquence de pannes de trois (03) fois par an (3 P/an) correspondante au temps de bon fonctionnement.

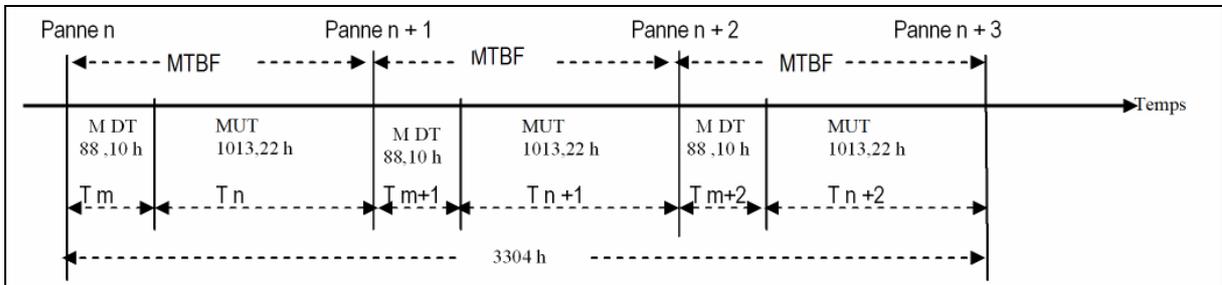


Figure V-2 : Fréquence de pannes d'une machine.

Avec :

MDT : *Mean down time.*

MUT : *Mean up time.*

MTBF : *Mean time between failure.*

Pour une fréquence de pannes de trois fois par an on a un MTBF Référentiel :

$$\text{MTBF}_{\text{Réf}} = 1101,33 \text{ heures} \quad (\text{V-1})$$

Calcul du taux de défaillance référentiel :

Le taux de défaillance référentiel $\lambda_{\text{Réf}}$ (Objectif de la DMI) est égale à MTBF^{-1} , ainsi on a :

$$\lambda_{\text{Réf}} = 1/1101,33 = 9,08 \times 10^{-4} \quad (\text{V-2})$$

V.5. ANALYSE GLOBALE

Tous les résultats de l'analyse des équipements convergent vers la même synthèse à savoir :

- Age de l'équipement → Vieux
- Complexité technologique → Traditionnelle
- Capacité → Insuffisante
- Cadence de production → Réduite
- Valeur additionnelle d'unité de production → Elevée
- Part de la Sous-traitance → Importante
- Maintenabilité → Difficile et coûteuse
- Condition d'intervention → Particulière
- Taux de pannes → Important
- Fréquences de pannes → Très fréquentes
- Temps d'intervention → Important (long délai de réponse)
- Type d'équipement → Spécifique
- Type de défaillance → Usure et vieillissement
- Rebut → Important
- Moyen de production → Spécifique et coûteux

V.6. 1^{ER} EXEMPLE : TOUR PITTLER PD250R

Dans cet exemple, nous allons essayer de montrer, en se basant sur la méthode de correction géométrique et l'outil d'aide au diagnostic que nous avons élaboré, la récupération des performances perdues du tour PITTLER PD250R N° 1627 du parc de production CMT en matières de géométrie causées par l'obsolescence, la vétusté et la géométrie dégradée des machines-outils, générant ainsi des surcoûts qui sont en progression d'une année à une autre, que nous pourrions observer clairement à travers l'analyse présentée ci-après, et que la non réalisation de cette correction géométrique et réhabilitation des équipements accentuerait les surcoûts pour aboutir dans très peu de temps à l'arrêt de cette activité industrielle.

Tableaux récapitulatifs des temps :

1- PRODUCTION

Année	Temps mis en service (h)	Reglage		Contrôle		Temps de reprise (h)	Temps de rebut (h)
		Nbre de fois	Temps (h)	Taux	Séparé (h)		
1999							
2000							
2001	194	36	180	100%	110	150	80
2002	196	38	210	100%	120	200	90
2003	186	40	240	100%	144	230	100
2004	189	44	264	100%	180	230	120
2005	280	50	300	100%	200	250	170

2- MAINTENANCE

Nbre d'arrêt	Tp d'arrêt	Taux d'arrêt	MTBF	Taux def. λ (10^{-4})	Tps total d'indispon	Taux dispo %	Production prévue(h)	Production réelle(h)	Rend. (%)
			1101,33	9,08					
			1101,33	9,08					
11	941	30,01%	285,09	35,1	1505	69,99%	3136	1631	52,01
21	1031	31,92%	153,80	65,0	1647	68,08%	3230	1583	49,01
39	1115	34,35%	83,23	120,1	1785	65,65%	3246	1461	45,01

24	1121	35,91%	130,08	76,9	1874	64,09%	3122	1261	40,39
16	1165	35,26%	206,05	48,5	2115	64,74%	3304	1248	37,77

Valeurs référentielles :

$$\lambda = 9,08 \times 10^{-4}$$

Temps arrêt Normatif = 264,32 h

MTBF = 1101,33 h

Ces données sont employées dans la réalisation des différents graphes ci-après :

Calcul des taux de défaillance

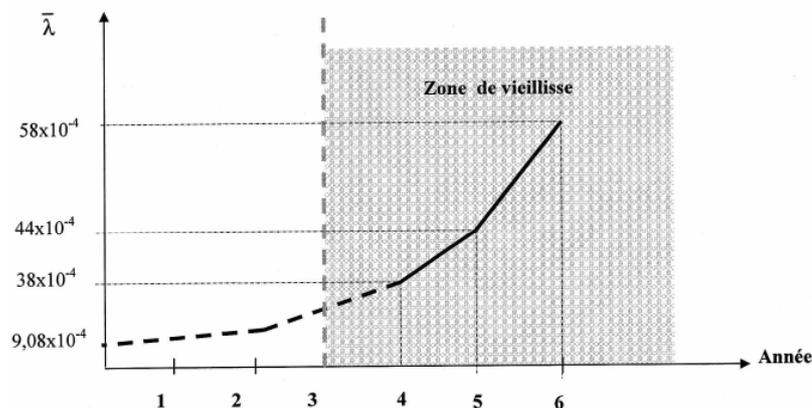
$$\lambda_{90-95} = \frac{1}{261,33} = 38 \times 10^{-4} \text{ (tranche de vie 1990-1995)}$$

$$\lambda_{96-2000} = \frac{1}{224} = 44 \times 10^{-4} \text{ (tranche de vie 1996-2000)}$$

$$\lambda_{2001-2005} = \frac{1}{171,65} = 58 \times 10^{-4} \text{ (tranche de vie 2001-2005)}$$

V.6.1. Courbe de fiabilité

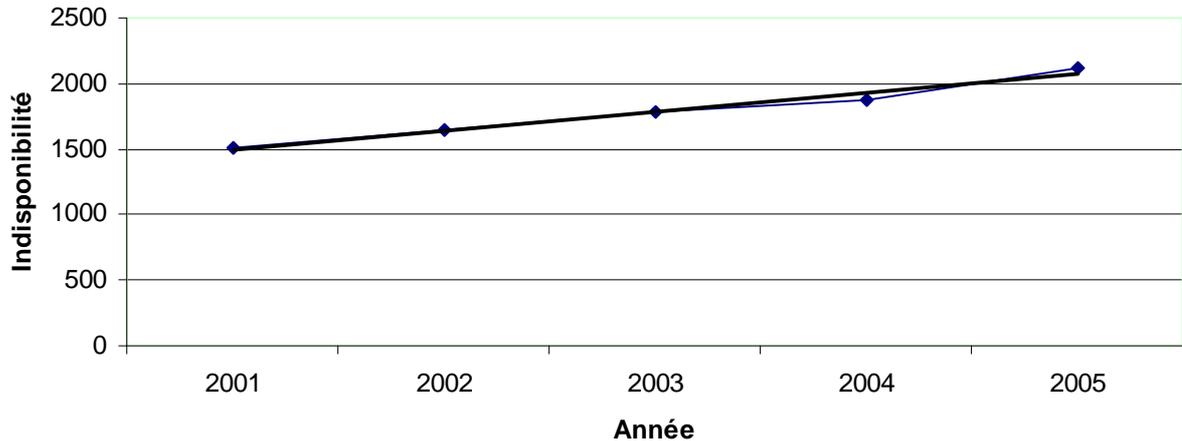
1. Courbe de fiabilité :



Graphe V-3 : Courbe de fiabilité.

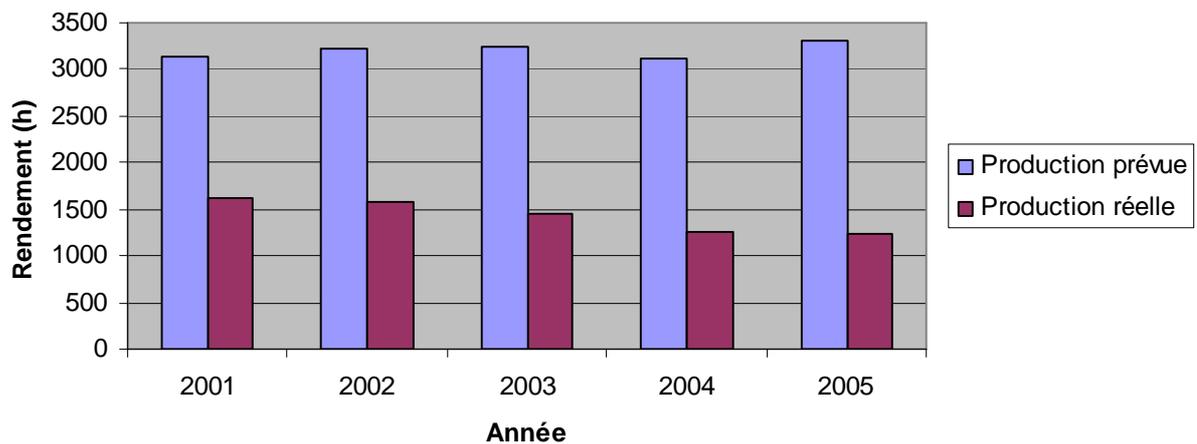
On remarque que l'équipement se situe dans la zone de vieillesse, donnant ainsi une usure et dégradation structurelle, dont le taux de défaillance est irréductible, ce qui nécessite une rénovation d'ensemble et une correction géométrique importante.

V.6.2. Courbe d'indisponibilité



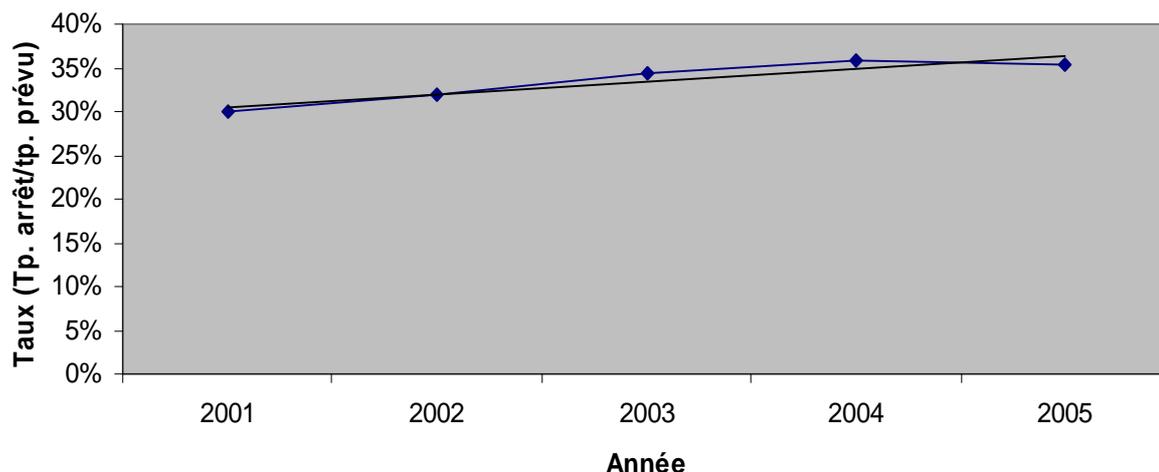
Graphe V-4 : Courbe d'indisponibilité.

La lecture de cette courbe montre une croissance d'indisponibilité qui se traduit par une non productivité.



Graphe V-5 : Courbe de production.

V.6.3. Courbe du taux improductif



Graphe V-6 : Taux improductif.

La lecture de ce graphe montre une croissance des temps improductifs de production due aux temps d'arrêt cumulés enregistré qui se traduit par des temps improductifs.

Tableaux récapitulatifs des coûts :

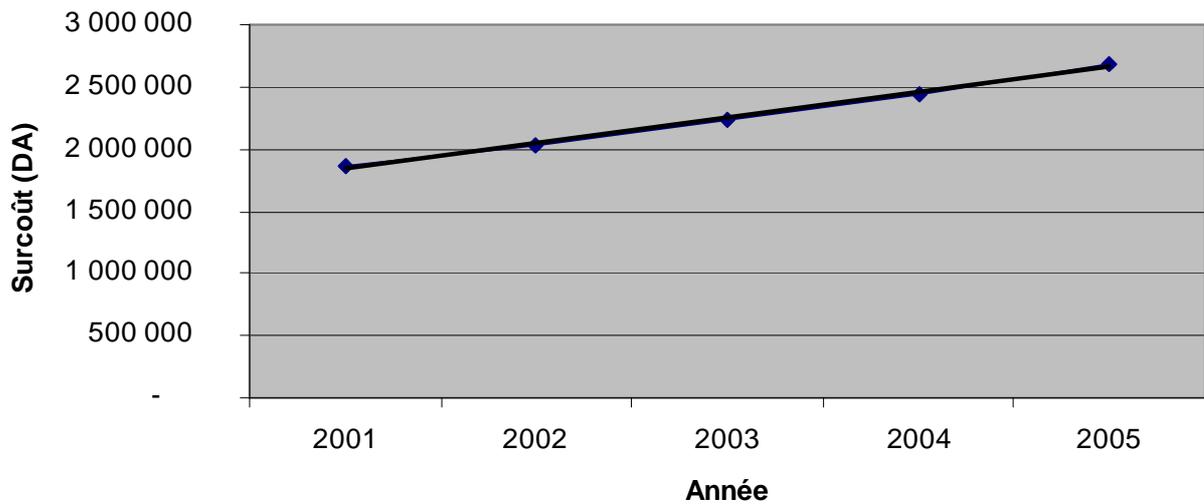
1- PRODUCTION

Année	Coût d'unité d'œuvre (DA)	Coût heures Sup. (DA)	Coût de reprise (DA)	Coût de rebut (DA)	Coût de réglage (DA)	Coût de S/Trait. (DA)
2001	910	233 000	136 500	72 800	163 800	299 410
2002	910	253 000	182 000	81 800	191 100	309 410
2003	910	273 000	209 300	91 000	218 400	319 410
2004	1 024	307 200	235 520	122 880	270 336	340 000
2005	1 024	357 200	256 000	174 080	307 200	360 000

2- MAINTENANCE

Coût d'arrêt (DA)	Coût Main d'œuvre (DA)	Coût PR (DA)	Total surcoût (DA)	Coût prévu Prod (DA)	Taux des surcoûts %
856 310	99 244	4 142	1 865 206	2 853 760	65,36%
938 210	51 448	25 633	2 032 601	2 939 300	69,15%
1 014 650	77 172	38 449	2 241 381	2 953 860	75,88%
1 147 904	14 976	6 212	2 445 028	3 196 928	76,48%

V.6.4. Courbe des surcoûts



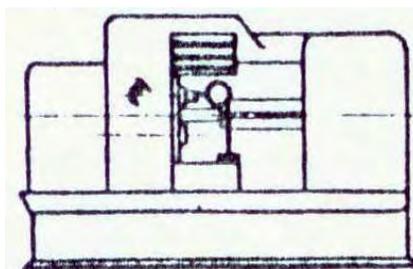
Graphe V-7 : Courbe des surcoûts.

L'analyse de cette courbe (présentée par le graphe V-5), indique une croissance rapide des surcoûts, un manque à gagner des rebuts et des reprises importants.

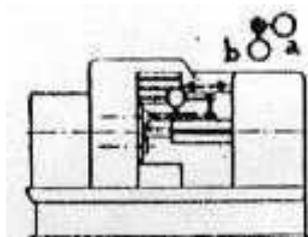
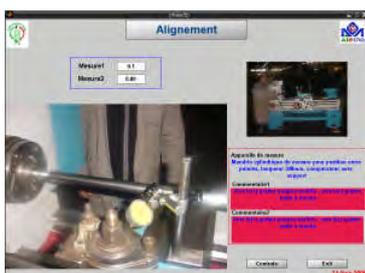
V.6.5. Vérifications géométriques

Au début, un contrôle géométrique de l'équipement doit être effectué. Nous allons simuler ce contrôle à l'aide de CALICONTROLE ; comme nous allons le montrer, tous les résultats du protocole de contrôle seront hors normes, ce qui nécessiterait une correction géométrique. Les différentes phases du contrôle sont les suivantes :

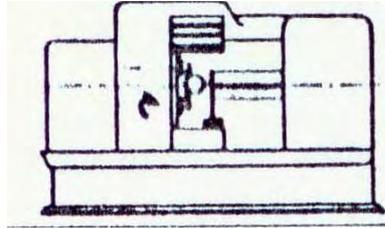
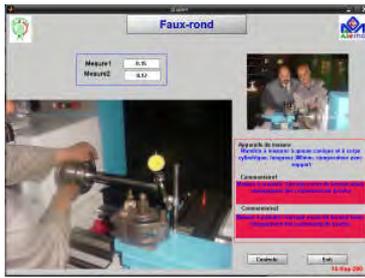
1- Rectitude du déplacement



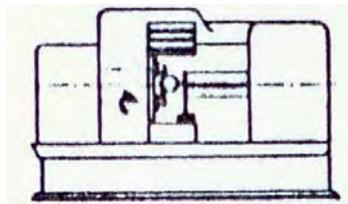
2- Alignement



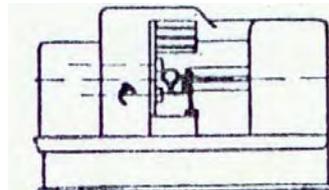
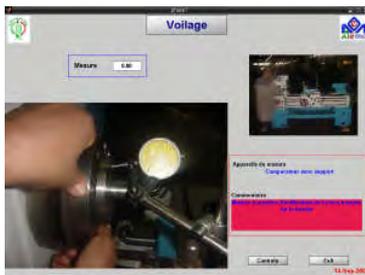
3- Faux rond



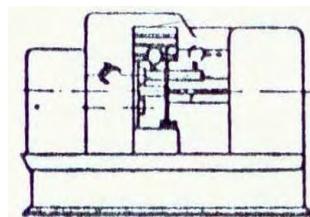
4- Faux rond du logement du manchon de serrage



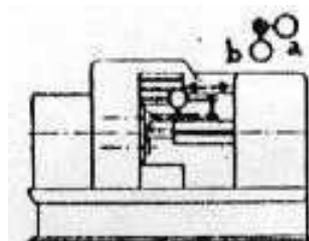
5- Déplacement dû au voile



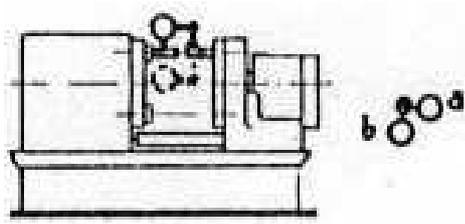
6- Faux rond de l'axe du manchon



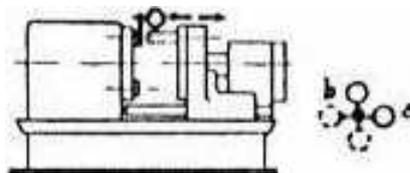
7- Parallélisme du déplacement longitudinal du bloc porte outils



8- Coïncidence axes broches portes pièces et axes logements outils



9- Parallélisme des axes des logements outils avec déplacement



10- Récapitulation du diagnostic et des mesures à prendre

recapitulation							
Nom Superviseur	PreNom Superviseur	Type de Machine	N° Fabrication	Client	Date Commande	Controleur	Date Opération
aih	smain	Tour PITLER	1971	CMT	Convention	CHAOUA	1er Trimestre 2008
<p>Mise à Niveau</p> <p>Mise à niveau de la machine dans le sens longitudinal</p> <p>mise à niveau de la machine dans le sens transversal</p>		<p>Rectitude de Déplacement</p> <p>Mesure à prendre : Régler la poupée mobile</p>		<p>Alignement</p> <p>Vers le(+) gratter poupée mobile , vers le(-) gratter boîte à broche</p> <p>Vers le(+) gratter poupée mobile , vers le(-) gratter boîte à broche</p>		<p>Faux Rond</p> <p>Mesure à prendre: Serrage ecrou de broche sinon changement des roulements de broche</p> <p>Mesure à prendre: Serrage ecrou de broche sinon changement des roulements de broche</p>	
<p>Parallélisme</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation par grattage de la boîte à broche</p> <p>Mesure à prendre: Selon conception, réglage de la boîte ou son grattage</p>		<p>Faux rond du Cone</p> <p>Mesure à prendre: Rectification du nez de broche pour avoir la circonférence demandée</p>		<p>Voilage</p> <p>Mesure à prendre: Rectification de la face frontale de la broche</p>		<p>Faux rond de la pointe</p> <p>Mesure à prendre: Rectification de l'intérieur de la broche</p>	
<p>Parallélisme du Guidage</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation et grattage du palier de guidage de la vis mère et barre de chariotage</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation et grattage du palier de guidage de la vis mère et barre de chariotage</p>		<p>Parallélisme du Canon</p> <p>Mesure à prendre: Alésage poupée mobile raté donc confection d'un autre canon</p> <p>Mesure à prendre: Alésage poupée mobile raté donc confection d'un autre canon</p>		<p>Guidage Canon</p> <p>Mesure à prendre: Adaptation par grattage du prisme de guidage de la semelle</p> <p>mesure à prendre: Adaptation par grattage de la semelle de la poupée mobile</p>		<p>Retour au menu</p> <p>Imprimer</p> <p>Quiter</p>	

Figure IV-18 : Récapitulation du diagnostic

V.6.6. Correction géométrique

Les phases de correction géométrique de cet équipement (Tour PITTER PD250R) comprendront la correction par grattage des points suivants [20] :

- Rectification des deux chariots ;
- Conception et réalisation de lardons au nombre de quatre ;
- Adaptation par grattage de la base avec semelle ;
- Adaptation par grattage de lardons coniques au nombre de deux ;
- Adaptation par grattage de la 2ème base avec semelle ;
- Adaptation par grattage de lardons coniques au nombre de deux ;
- Adaptation par grattage des coussinets au nombre de deux ;
- Grattage de finition.

V.7. 2^{EME} EXEMPLE : TOUR A VILEBREQUIN DORRIES

Dans ce 2^{ème} exemple, nous allons essayer de montrer l'impact économique de l'opération de correction géométrique.

V.7.1. Introduction

Le Tour DORRIES de vilebrequin, est un tour qui assure la troisième opération dans la chaîne d'usinage, après le centrage et le tournage des extrémités. La chaîne vilebrequin totalise y compris le centrage 19 machines outils.

Le DORRIES usine par tournage, les premières côtes d'ébauche des paliers et des manetons. Son année de fabrication remonte à 1970 et sa mise en service à 1971.

Ce tour a permis jusqu'à 1989, l'usinage du vilebrequin 3 cylindres, 4 cylindres et 6 cylindres, après ces années, l'usinage du vilebrequin a connu des dérives fonctionnelles importantes jusqu'à l'abandon de l'usinage du vilebrequin 6 cylindres.

V.7.2. Présentation du projet

La réflexion sur un investissement dans une fraiseuse CNC pour vilebrequin a germé au début des années 2000, en vue d'augmenter les capacités de production du vilebrequin tous types confondus, l'intégration de l'usinage de l'arbre à cames moteur ainsi que la réduction du

nombre de machines entrant dans le processus de production du vilebrequin et l'arbre à cames.

Le coût du projet d'investissement est 100.000.000 DA (offre de la firme autrichienne GFM coût 903 840 Euros).



Figure V-8: Tour DORRIES avant réhabilitation.

Entre temps, compte tenu des évolutions technologiques des moteurs diesel, les restrictions des normes environnementales et l'exigence du marché national, a fait que les moteurs à refroidissement à air et notamment le moteur FL912 ne sont plus d'actualités. Alors la nouvelle approche est la rénovation et la réhabilitation de la machine DORRIES.

Une expertise a été établie par la firme Allemand ISQ spécialisée dans le domaine et une offre de service ouverte fût établie. Le coût de rénovation demandé était de 40.000.000 DA (401.402,47 Euros ouvert) et un délai de quatre semaines [21].

A retenir que le diagnostic présenté par la firme ISQ comportait des insuffisances techniques importantes, et les actions proposées ne sont que des opérations de maintenance préventive connues et maîtrisées par le collectif du CMT.

Compte tenu de ce qui précède, une situation a été présentée à la Direction Générale afin de faire avancer le projet « DORRIES ».

La décision éminente du Président Directeur Général est de faire confiance au collectif de Maintenance d'entreprise avec les moyens existants pour l'opération de rénovation et l'apport de ALEMO en matière de correction géométrique et lifting, en mettant comme objectif la remise en marche du tour à tourbillonner « DORRIES » avec les conditions optimales requises à savoir, l'usinage de tout type de vilebrequin (3,4 et 6 cylindres).

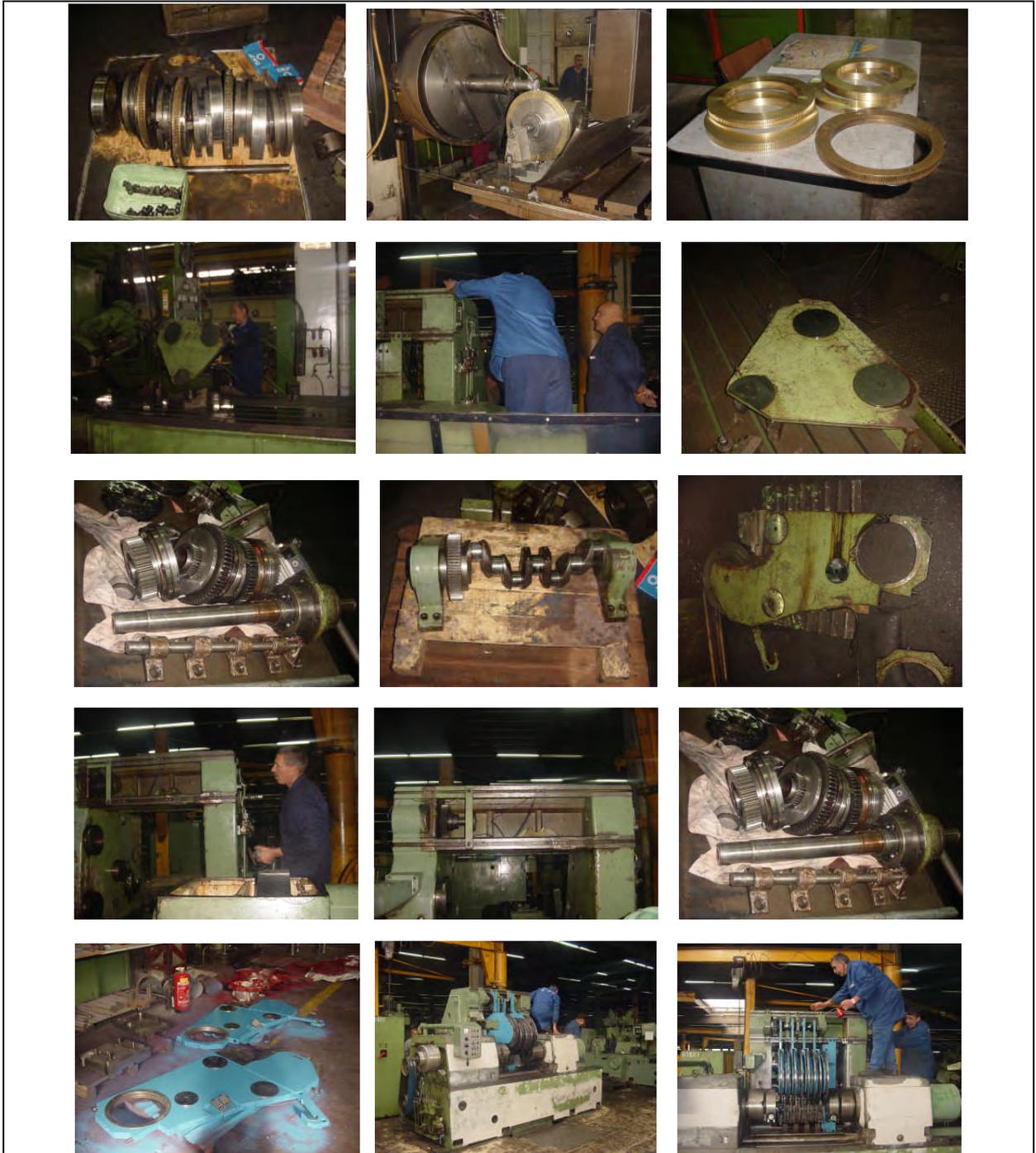


Figure V-9 : Tour DORRIES en cours de réhabilitation.

Le temps réalisé par la Maintenance CMT et Montage ALEMO est de deux mois y compris coulée, débitage, confection de pièces d'usure ainsi que le l'opération de correction géométrique et lifting assurée par ALEMO.

Le tableau suivant rassemble les coûts des différentes opérations effectuées.

Coût correction géométrique et lifting (DA)	Coût PR Achat	Coût PR confectionnées (DA)	Total des Coûts (DA)	Heures d'intervention (H)
600.000,00	287.269,28	1.421.652,48	2.308.921,76	2086 dont 245 HS



Figure V-10 : Tour DORRIES après réhabilitation.

V.8. BILANS DES TRAVAUX DE LA CORRECTION GEOMETRIQUE DES EQUIPEMENTS DE PRODUCTION DE CMT PAR ALEMO

ANNEE 2006 : (Début de l'opération en Juillet 2006)

- Correction de 12 Machines conventionnelles et 01 machine spécifique.
- Montant Global en HT de la prestation : 2 214 968,39 DA.

ANNEE 2007 : (Convention de correction géométrique 2006/2007)

- Correction de 16 Machines conventionnelles et 08 machines spécifiques.
- Montant Global en HT de la prestation : 7 660 894,59 DA.

ANNEE 2008: (Convention de correction géométrique 2007/2008)

- Correction de 28 Machines conventionnelles et 17 machines spécifiques.
- Montant Global de la prestation : 11 259 800,00 DA.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour conclure, par vérification et correction géométrique, on veut aboutir à une précision parfaite de la machine-outil, or le mot “ précision ” est un mot complexe, parce que trop “ imprécis ”, il suppose l’atteinte d’objectifs de qualité souvent différents. C’est pourquoi, l’opération de base dans une fabrication est de maîtriser la position relative d’un objet « outil » et d’un objet « pièce ».

On vise à réaliser le plus parfaitement possible cette position, par contre dans une action de vérification ou de contrôle, on peut être conduit à se contenter de « constater » simplement cette position relative, mais en général avec un niveau d’incertitude plus fin. Cet exposé ne cherche pas à présenter d’une façon exhaustive tout le savoir-faire qui existe dans le contrôle et la vérification des machines-outils, mais se contentera de développer l’importance de l’aspect « information » dans la récupération des performances géométriques des machines-outils.

Cet outil d’aide au diagnostic permettra, dans un esprit de continuité à la correction géométrique par grattage des machines-outils, d’aboutir à traiter des erreurs de position géométrique. Il est intéressant d’esquisser un inventaire de ces causes d’erreurs, il sera ensuite possible de minimiser ou de corriger l’effet de ces causes ou encore mieux d’éliminer leur influence.

Nous avons choisi de traiter un sujet qui touche le monde industriel, parce que les équipements installés dans la plupart des usines algériennes sont très vieux et datent des années 70 et le problème de précision des pièces usinées fait toujours surface à cause de l’état de ces équipements.

L'expérience avec CMT a suscité beaucoup de réactions suite à l'amélioration de l'outil de production qui a pu généré une capacité de production avérée par rapport aux exercices précédents.

Beaucoup de consultations ont été demandées à ALEMO par les grandes entreprises comme le cas de SNVI ROUIBA, CMA Sidi Bel Abbès, SNTF Alger et autres.

Notre contribution dans ce travail se résume au développement d'un outil d'aide au diagnostic qui pourra sans ambiguïté permettre à n'importe quel utilisateur de manier cet outil sans pour autant avoir l'obligation de connaître à fond la norme des vérifications géométriques et déceler les défauts de géométrie. Ces derniers pourront être corrigés par la technologie de grattage.

Le grattage est un procédé d'enlèvement de minutieux copeaux. Dans le chapitre III, nous avons développé cette technologie afin de permettre aux techniciens de rénovation de machines-outils de se familiariser avec cette technique qui n'est qu'un art associé à un savoir faire de maniement d'un grattoir et auxquels, il faudra s'initier grâce à un encadrement du personnel dûment bien établi.

Enfin dans le dernier chapitre, nous avons présenté un cas pratique englobant l'essentiel des quatre chapitres : à savoir les vérifications géométriques, correction géométriques par grattage application de l'outil d'aide au diagnostic sur des exemples de machines-outils corrigées pour le compte de CMT sous l'aspect technique et aussi son impact financier.

En perspective et recommandation, nous espérons dans le court terme élargir notre outil pour traiter encore les autres types de machines à savoir les fraiseuses, rectifieuses,..ensuite le mettre en application dans le monde industriel pour mesurer son degré de fiabilité et pourquoi pas l'homologuer et le breveter.

Notre outil traite de la norme de la réception des machines-outils, aide et oriente à la prise de décision, toutefois il reste ouvert et peut être enrichi pour essayer de répondre au maximum aux attentes de la maintenance et suivre l'évolution de la vie active des équipements.

Notre travail a fait l'objet de participation à quatre communications internationales :

1^{ère} communication internationale au Caire en Egypt

en date du 4au 6 janvier 2009 intitulée :

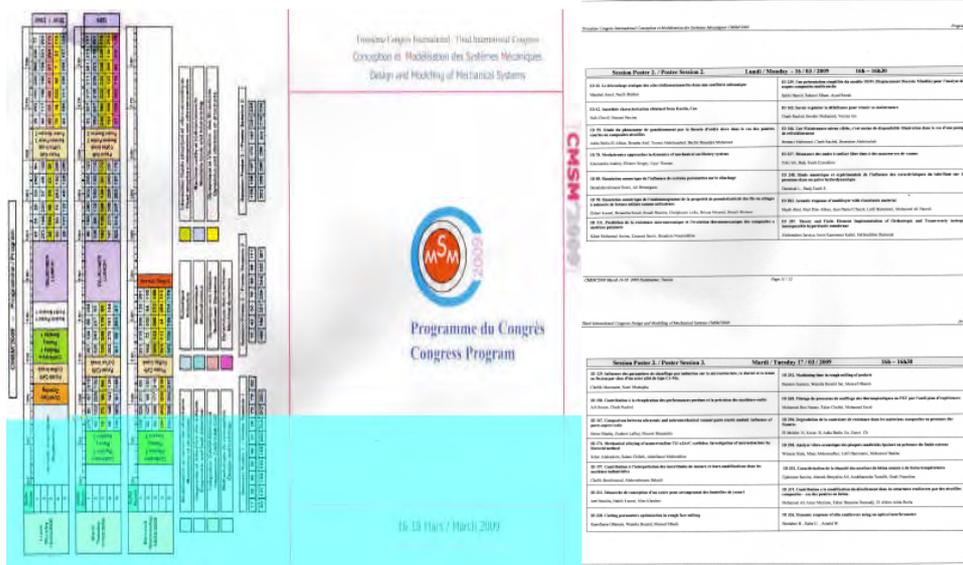
**INFLUENCE OF SCRAPING OPERATIONS ON MACHINE
GEOMETRICAL CORRECTION AND QUALITY**



2^{ème} communication internationale au CMSM'2009 à TUNIS :

Du 16 au 18 Mars 2009

**INFLUENCE DE L'OPERATION DE GRATTAGE SUR LA QUALITE DE LA
CORRECTION GEOMETRIQUE**



3^{ème} communication magrébine au C2MSI'09 à Souk Ahras :

en date le 28 et 29 Avril 2009 intitulée :

CONTRIBUTION A LA RECUPERATION DES PERFORMANCES PERDUES ET LA PRECISION DES MACHINES-OUTILS



4^{ème} communication internationale C2MSI'09 à l'université du 20 Août 1955 SKIKDA : le 09 et 10 MAI 2009 intitulée :

DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE AU DIAGNOSTIC ET RECUPERATION DES PERFORMANCES GEOMETRIQUES PERDUES DES MACHINES-OUTILS



RESUME

La problématique, aujourd'hui avec l'ouverture des marchés, les chances de succès d'une entreprise dépendent, en effet, pour une bonne part de sa capacité à mieux communiquer avec ses clients et à mieux les servir, car il n'existe pas de qualité en soi, il s'agit toujours d'une qualité pour quelqu'un qui a des attentes : attentes qu'il faut bien comprendre et satisfaire.

Les sociétés sont confrontées à une concurrence de plus en plus rude, où l'entreprise devra être compétitive dans les conditions de qualité, au moindre coûts et meilleurs délais de réalisation.

De nombreuses entreprises, dans la compétition mondiale, offrent des produits qui ont des performances comparables : les asiatiques, les américains, les européens, tout le monde sait fabriquer des voitures, des téléviseurs, des produits cosmétiques ...etc.

Percevoir le premier les évolutions du marché, développer rapidement des produits et des services adaptés...sont autant d'enjeux qui, au départ, dépendent de notre capacité d'écoute et d'analyse.

Etant donné que les machines outils de génération ancienne se prêtent parfois mieux, pour certaines tâches, que celles récentes et modernes de génération nouvelle. Leur construction robuste offre l'avantage d'investissements minimisés par une remise à neuve complète, en dépit d'un état d'usure global souvent avancé.

Dans l'industrie, les équipements de production sont affaiblies dans le processus de réalisation durant leur vie active, par des dysfonctionnements (usure, dérèglement, pertes de performance, de précision, etc....) qui affectent les conditions citées ci-dessus, voir amputer lourdement la capacité de production et donc accroître le prix de revient.

C'est pourquoi dans ce travail, nous proposons au service de maintenance, un outil d'aide au diagnostic des défauts géométriques des machines outils et une démarche ou méthodologie de correction géométrique par grattage qui permet la reconstruction de la géométrie de la machine et rétablit la précision de travail, voire retrouver les performances perdues. Ainsi, l'exécution des étapes de la correction géométrique optimise les délais, les rebus, les coûts totaux et ce en minimisant le nombre, le coût et le délai de chaque phase de travail.

La démarche, à suivre pour aboutir à ce résultat, est basée principalement sur l'analyse d'un grand nombre de cas de machines rénovées afin de trouver les liens et les chemins possibles (critiques) entre les symptômes (défauts sur la pièce finie) et les sources (défauts géométriques sur les organes de la machine).

Mots clés : Grattage, Correction géométrique, Précision, Planéité, Portage, Grattoirs, Outil d'aide au diagnostic, Epreuves pratiques.

ABSTRACT

CONTRIBUTION TO RECOVER LOST PERFORMANCE AND PRECISION OF MACHINES-TOOLS

Today with the opening of the market, most companies' problem is how to be competitive when offering to their customers services at the best quality, delay and lowest cost. Old generation machine tools sometimes suits best the performance of particular machining operations, compared to newly built machines. Their solid construction and castings allow a complete renewing at low cost even if geometrical surfaces are often very used.

In practice machine tools are used in a disturbed manner, some areas are more solicited then others therefore subject to more wear, and dysfunction such as loss of geometrical leveling, loss of performance and precision which inevitably leads to a raise in production costs. That is why we will present in this paper the scraping method and its influence on geometrical correction and then elaborate a procedure or method of scraping in the form of a chart or diagnosis program for geometrical corrective actions which optimizes delay and global cost by minimizing the number of scraping actions and the cost of each one of them.

Therefore in this work, we propose that the maintenance department, a tool for diagnosis of geometric imperfections of machine tools and a methodology or approach to geometric correction by scratching which allows the reconstruction of the geometry of the machine and restores precision work, or find the lost performance. Thus, the execution stage of the geometric correction optimizes timing, rebus, total costs and minimizing the number, cost and time of each phase of work.

The method of doing to reach these results is basically based on analysis of a bigger number of reconditioned machines- tools to find out the links and the possible ways between the symptoms (defects on machined parts) and the causes (geometrical defects on machines organs).

Key words: Scraping, Geometrical correction, Precision, Planning, Portage, Scrapers, Practical trials.

ملخص

مساهمة لاستعداد تأدية الكاملة المفقودة و دقة الآلات الصناعية

في ظل اقتصاد السوق و المنافسة الحادة، فان الإشكالية التي تواجهها كل شركة أو مؤسسة اقتصادية، تظل محصورة فيما مدى قدرتها على المنافسة و البقاء في السوق و مضاعفة بذلك جودة منتوجها بقله كلفته و سرعة إنتاجه، عناصر ثلاثة سر انجذاب و إرضاء كل متعامل اقتصادي، هذا من جهة.

و من جهة أخرى، فلقد لاحظنا أن الآلات قديمة الصنع (أي من الجيل القديم)، بالإضافة أنها تفضل بكثير عن الآلات الجديدة الصنع (أي من الجيل الجديد) في تحقيق بعض الأعمال، فهي تسمح كذلك من حيث متانة صنعها، بإعادة تحديثها كلية و بكلفة زهيدة رغم حالة قدم متقدمة.

ففي الواقع و الممارسة اليومية، فان التجهيزات الصناعية معرضة كما هو معروف، لجملة من الإختلالات : القدم، فقدان الدقة، انعدام التحكم و الضبط.... مما يؤثر سلبا على عناصر المنافسة السابقة الذكر و بالتالي على قدرة الإنتاج و كلفة المنتج.

ولذلك في هذا العمل، فإننا نقترح على إدارة الصيانة، وهي أداة لتشخيص العيوب الهندسية للآلات و منهجية أو لنهج التصحيح الهندسي من الخدش الذي يسمح للتعمير هندسة الجهاز و يعيد دقة العمل، أو العثور على الأداء فقدت. وبالتالي ، فإن مرحلة التنفيذ للتصويب الهندسي يحسن التوقيت ، وبقاء الظروف على حالها ، فإن مجموع التكاليف و التقليل من عدد و التكلفة و الوقت في كل مرحلة من مراحل العمل.

لهذا، ارتأينا في بحثنا هذا، تقديم و اقتراح طريقة (أو منهجية) معروفة بطريقة الكشط نبين من خلالها على برنامج فحص و تنفيذ خاص بكل المراحل المتعلقة بهذا التصحيح الهندسي و الذي من شأنه تقليل عدد و كلفة و أجل كل مرحلة من مراحل الإنتاج.

لذا، و للوصول إلى هاته النتيجة، فإننا انتهجنا طريقة عمل تعتمد أساسا على تحليل أكبر عدد من الآلات التي خضعت إلى التجديد قصد إيجاد الروابط (أو المسالك) المحتملة بين الأسباب (عيوب ملحوظة على قطعة منتهية الصنع) و المسببات (عيوب هندسية تطرأ على أعضاء مختلفة من الآلة).

الكلمات المفتاحية: كشط ، تصحيح هندسي، دقة، مسطاحية، محملة، أدوات الكشط، تطبيقات.

REFERENCES

- [1]. Conversion réussie –usine de tracteurs de Minsk – Johan ANDERSON 2007
- [2]. Amélioration continue en maintenance Yves LAVINA Dunod, Paris 2005
- [3]. Micro et nano précision Jean David, Stephane Leleu L2MA-ENSAM Lille
BNM-LNE, Paris 2003
- [4]. J.M David « Cours de métrologie et de précision des machines » école
nationale supérieure d'arts et métiers C.E.R de Lille ; 1982
- [5]. Hale, Layton C. « Friction Based Design of Kinematic coupling » proceeding of
American Society for Precision Engineering, 1998
- [6]. Kalker J.J « Rolling with slip and spin in the Presence of Dry Friction » ; 1966
- [7]. M. Dubois, J.L Grzesiak « Etude du phénomène des 'raies fantômes' lié à la
rectification des engrenages » projet de fin d'études ENSAM 1995
- [8]. S.Leleu, J.M David « Mesures exhaustives des défauts d'une rectifieuse 4 axes
dans la génération de surfaces complexes optiques » ENSAM de Lille, 1996
- [9]. Domnez, Bloomquist ; Hocken « A General Methodology for machine tool
accuracy Enhancement by error compensation » Precision Engineering 1986
- [10]. Mostafa A. Foda Chiang C. Mei « A boundary Layer Theory for Rayleigh
waves in a porous, fluid filled half space » International Journal of Soil Dynamics
and Earthquake Engineering, 1983
- [11]. Bryan, J.B and McClure, E.R « Heat & tolerances » American Machinist, 1967
- [12]. Histoire de la machine outil
- [13]. ISO – E60-001: Organisation Internationale de Normalisation, 1986

- [14]. Joël Koenig, François Geiskopf & Ammanuel Caillaud « Amélioration de performance par analyse de tests de qualification machine » INSA de Strasbourg, 2005
- [15]. Code de réception des machines outils Partie 1 : Précision géométrique des machines, première édition 1986-9-01
- [16]. Théorie- cours élémentaire – usinage des métaux DIAG 1973
- [17]. Sûreté du fonctionnement des systèmes industriels – Alain Villemeur Préfaces de Paul Caseau
- [18]. Catia V5 R15, Dassault système
- [19]. Environnement MAATLAB 7.1, Mathworks incorporation 2005
- [20]. Convention de correction géométrique des équipements entre ALEMO et CMT ; juillet 2006.
- [21]. Quote and proforma invoicez Refurshing Dorriës KD 16 ; 2007

ANNEXES

- CERTIFICAT ISO 9001 :2000 pour l'Algérienne des équipements et machines-outils
- Quote and Proforma Invoice Refurbishing Dörries KD16
- Procès verbal de réunion CMT
- Questionnaire satisfaction client
- Langage de programmation sous MAATLAB

