

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE, CONCENTRATION EN AÉROSPATIAL
M. Sc. A.

PAR
Jean Christian BAKENA MBOUA

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU PROCESSUS D'USINAGE:
CAS DU TOURNAGE CHEZ APN INC.

MONTRÉAL, LE 04 MARS 2016

©Tous droits réservés, Jean Christian BAKENA MBOUA, 2016

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Victor Songmene, directeur de mémoire
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mohammad Jahazi, président du jury
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, membre du jury
Département du génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Agnard, membre du jury
APN INC.

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 19 FÉVRIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le travail de recherche qui est présenté dans ce mémoire a été réalisé à l'entreprise APN Inc. qui se trouve à la ville de Québec. Le financement de ce mémoire a été possible grâce à la bourse en milieu pratique (BMP) innovation.

La gestion des entreprises d'usinage des pièces aéronautiques complexes et de hautes précisions est une tâche bien difficile. Usiner les pièces de qualité supérieure à moindre prix et les livrer dans les délais du client n'est pas toujours une chose facile surtout pour une entreprise qui n'a fait que du prototypage (usinage des pièces unitaires sans répétition). Pour y arriver, il est nécessaire de mettre sur pieds des moyens de rendre facile, rapide et précise le cycle allant de la soumission à l'expédition des pièces. L'un des moyens les plus fiables de nos jours est l'optimisation des processus d'usinage. Elle nous permet de trouver la meilleure façon selon des critères préétablis, la manière dont tout le cycle sera exécuté.

De nos jours, la puissance d'une entreprise ne se compte seulement plus qu'à la qualité et la quantité de son parc machines et des outils utilisés, mais à leur bonne gestion. Ceci fait appel à l'implémentation d'une optimisation de toutes les actions dans la ligne de production.

L'implémentation d'une politique d'optimisation du processus de fabrication permet à l'entreprise d'avoir un gain en coût de fabrication, une fluidité dans la chaîne de production, une standardisation des procédés et une livraison des produits à temps.

REMERCIEMENTS

Pour l'encadrement magnifique à l'accomplissement de ce travail de recherche, je tiens à remercier mon directeur de mémoire, M. Victor Songmene. Je remercie Stéphane Agnard et Joel Lessard. Je n'oublie pas de remercier les co-présidents de la compagnie APN inc., Jean Proteau et Yves Proteau, pour la facilité de la réalisation de mon stage. Pour les conseils à la bonne marche de cette recherche, je remercie Jules Kouam et Arsène Missanda.

Pour la motivation et le support, je remercie tous mes frères et sœurs, Étobe Mboua Jean Marc, Bayiha Mboua Paul Francis, Mben Mboua Augustine Liliane, Mben II Martin, Ngo Mboua Mben Ernestine, pour leur support incommensurable et leur amour sempiternel. Je n'oublie pas de remercier ma tendre et adorable fille Bakena Maria Ogustina pour sa présence dans ma vie. Je remercie mon oncle Etobe Émmanuel pour les conseils précieux et sa présence auprès de moi.

Pour l'encadrement linguistique à la rédaction de ce mémoire, je remercie grandement ma belle-sœur Ngo Ngue Débora Merveille. Pour la volonté de terminer ce travail scientifique, je remercie ma conjointe Kpoumie Mefire Carine, tu es adorable merci.

Je remercie le Fonds de recherche du Québec - nature et technologies (FRQNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour l'obtention de la bourse en milieu pratique (BMP) innovation qui m'a permis de réaliser ce projet.

Je dédie ce travail scientifique à ceux qui m'aiment et qui malheureusement ne sont plus de ce monde. Je pense particulièrement à mon très cher père Mben Mboua Ernest, à ma tendre et adorable mère Etobe Augustine, sans oublier ma petite sœur Ngo Mboua Cecile Arlette. Recevez ici le signe que nous ne vous oublierons jamais.

À toutes les personnes citées, par ce modeste travail je vous transmets toute ma reconnaissance pour tout ce que vous faites et aviez fait pour moi.

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU PROCESSUS D'USINAGE: CAS DU TOURNAGE CHEZ APN INC.

Jean Christian BAKENA MBOUA

RÉSUMÉ

La concurrence assez rude dans le domaine de l'usinage mécanique, amène les entreprises à travailler pour l'optimisation de leurs processus de fabrication et de leurs pratiques industrielles pour arriver à usiner plus facilement les pièces de bonne qualité à moindre prix quelle que soit leur complexité. Pour être plus concurrentiel et compétitif, l'entreprise APN Inc. qui œuvre dans le domaine de l'usinage haute précision des pièces aéronautiques a orienté ce projet de maîtrise dans l'optimisation de ses processus de fabrication.

Pour y arriver, une étude globale des pratiques industrielles a été faite pour mieux comprendre les besoins de l'entreprise. Ceci a permis l'élaboration des recommandations et des propositions pour améliorer certains aspects du processus.

Par la suite, une analyse des pratiques d'usinage a été réalisée afin d'établir une base de données résumant les conditions d'usinage par caractéristique. Une comparaison des conditions de coupe utilisées à celles des catalogues a été faite. Des recommandations d'amélioration des pratiques d'usinage ont été élaborées.

Pour une visualisation plus nette et claire, une élaboration des conditions de coupes optimales pour des caractéristiques à haut volume de production a été faite. L'élaboration d'une façon optimale de réaliser certaines opérations d'usinage a été proposée ainsi que le calcul du gain réalisable. Une base de données des meilleurs parcours d'outils se basant sur le débit de copeau et du temps d'usinage théorique a été créée.

Mots clés: Processus de fabrication, procédé d'usinage, condition de coupe, optimisation, base de données.

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DU PROCESSUS D'USINAGE: CAS DU TOURNAGE CHEZ APN INC

Jean Christian BAKENA MBOUA

ABSTRACT

The rather rough competition in the field of manufacturing brings companies to improve or optimise their practices and manufacturing processes to manufacture cost effectively quality parts independently of their complexity. To be more competitive APN Inc, a company specialised in manufacturing high precision aeronautical parts, directed this master's degree project on the optimization of his manufacturing process.

To achieve the objectives, a study of the industrial practices was made to better understand the needs for the company. This allowed elaborating recommendations and proposals to improve certain aspects of the process.

Afterward, an analysis of the industry's manufacturing practices was realized to establish a data base which summarizes the conditions of manufacturing by characteristics. A comparison of the cutting conditions used as compared to those recommended by tool manufacturers was made. Recommendations of improvement of the manufacturing practices were developed.

For a better visualization, an elaboration of optimal cuttings conditions for high volume production characteristics was made. The elaboration of optimal route to realize certain manufacturing operations was proposed, and the associated gain was calculated. A data base of the best toolpath based on the material removal rate and manufacturing time was created.

Keywords: Manufacturing process, machining method, cutting condition, data base.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Généralités	5
1.2 Amélioration des procédés d'usinage	7
1.3 Amélioration du processus de fabrication	14
1.3.1 Énumération des sources de pertes de temps	19
1.4 Méthode TRIZ	20
1.4.1 Présentation de ARIZ	23
1.4.2 Structuration de ARIZ-85B	25
1.5 Conclusion	26
CHAPITRE 2 ANALYSE DES PRATIQUES INDUSTRIELLES CHEZ APN Inc	29
2.1 Présentation de l'entreprise	29
2.2 Étapes du processus de fabrication des pièces chez APN Inc.	31
2.2.1 La soumission	31
2.2.2 La revue de contrat	31
2.2.3 La présentation du projet à l'équipe de conception	31
2.2.4 La présentation pré-développement	32
2.2.5 La présentation pré-production	32
2.2.6 La présentation post-production	32
2.3 Observations des postes de travail chez APN Inc	33
2.3.1 Faiblesses d'un poste de travail	34
2.3.2 Forces d'un poste de travail	34
2.4 Étude et analyse du travail des programmeurs CNC	35
2.4.1 Interaction programmeur-machiniste	35
2.5 Flux de travail	36
2.6 Conclusion	38
CHAPITRE 3 CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES DES MEILLEURS PARCOURS D'OUTILS	39
3.1 Collecte des informations	39
3.1.1 Structure de la collecte des données	40
3.1.2 Justification des informations de la structure de collecte des données	40
3.2 Exploitation de la collecte des données	41
3.2.1 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques A	41
3.2.2 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques B et D	50
3.2.3 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques C	61

3.2.4	Analyse des différences entre les paramètres programmés des caractéristiques ou des pièces semblables.....	74
3.3	Choix des meilleurs parcours d'outils.....	74
3.3.1	Calcul du taux d'enlèvement de matière et du temps théorique d'usinage.....	75
3.3.2	Tableau récapitulatif des parcours optimaux	78
3.4	Conclusion	80
CHAPITRE 4 AMÉLIORATION DU PROCESSUS DE FABRICATION.....		81
4.1	Généralités	81
4.2	Identification des cibles	81
4.3	Mode opératoire.....	82
4.4	Propositions d'amélioration.....	82
4.4.1	La chaîne de développement de produit	83
4.4.2	Interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur.....	85
4.4.3	Poste de machiniste.....	89
4.4.4	Poste de polissage ébavurage.....	90
4.4.5	Chaîne décisionnelle – traitement de l'information.....	90
4.4.6	Gestion des non-conformités	93
4.5	Conclusion	94
CHAPITRE 5 ÉTUDE ET AMÉLIORATION DE LA PROGRAMMATION DES OPÉRATIONS À HAUT VOLUME DE PRODUCTION		97
5.1	Choix des pièces et des opérations.....	97
5.1.1	Choix des pièces à analyser pour l'amélioration	97
5.1.2	Choix des opérations à analyser pour optimisation	98
5.2	Étude de l'amélioration des opérations de filetage extérieur.....	102
5.2.1	Calcul du gain théorique de l'optimisation des opérations de filetage extérieur au tour numérique	108
5.3	Étude de l'amélioration de l'usinage des formes hexagonales et du perçage sur plan incliné	109
5.4	Calcul du gain théorique avec l'utilisation d'une barre hexagonale.....	112
5.4.1	Présentation de la caractéristique à étudier.....	113
5.4.2	Calcul de la quantité de matière brute nécessaire	114
5.4.3	Présentation des pratiques actuelles de programmation	114
5.4.4	Étude de l'utilisation de la matière brute avec une forme hexagonale	117
5.4.5	Étude comparative	119
5.5	Étude expérimentale.....	122
5.5.1	Guide pour perçage sur plan incliné	122
5.5.2	Test sur l'amélioration des opérations de filetage	123
5.6	Étude des types d'usure des plaquettes pour outils de coupe	127
5.6.1	Analyse des usures sur les plaquettes d'ébauche (80°).....	128
5.6.2	Analyse des usures sur les plaquettes de finition (35°).....	129
5.7	Conclusion	132

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	135
RECOMMANDATIONS	137
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	138

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Propriétés physiques de l'acier inoxydable 347.....	12
Tableau 1.2	Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 347.....	12
Tableau 1.3	Propriétés chimiques de l'acier inoxydable 347	12
Tableau 3.1	Analyse des vitesses d'avance programmées des forets par rapport à celles du catalogue.....	42
Tableau 3.2	Analyse des vitesses de coupe programmées des forets par rapport à celles du catalogue.....	43
Tableau 3.3	Analyse des vitesses d'avance programmées des barres à aléser par rapport à celles du catalogue.....	46
Tableau 3.4	Analyse des vitesses de coupe programmées des barres à aléser par rapport à celles du catalogue.....	47
Tableau 3.5	Analyse des vitesses d'avance programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue.....	51
Tableau 3.6	Analyse des vitesses de coupe programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue.....	53
Tableau 3.7	Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue.....	55
Tableau 3.8	Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue.....	57
Tableau 3.9	Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de filetage extérieur par rapport à celles du catalogue	59
Tableau 3.10	Analyse des vitesses d'avance programmées des fraises en bout par rapport à celles du catalogue.....	62
Tableau 3.11	Analyse des vitesses de coupe programmées des fraises en bout par rapport à celles du catalogue.....	63
Tableau 3.12	Analyse des vitesses d'avance programmées des forets à centrer par rapport à celles du catalogue.....	66
Tableau 3.13	Analyse des vitesses d'avance programmées des forets à centrer par rapport à celles du catalogue.....	67

XVIII

Tableau 3.14	Analyse des vitesses d'avance programmées des forets dimensionnels par rapport à celles du catalogue.....	70
Tableau 3.15	Analyse des vitesses d'avance programmées des forets dimensionnels par rapport à celles du catalogue.....	71
Tableau 3.16	Tableau récapitulatif des programmes qui ont le meilleur parcours d'outils.....	79
Tableau 5.1	Volume annuel par caractéristique pour la NAK 6.....	100
Tableau 5.2	Volume annuel par caractéristique pour la NAK 3.....	101
Tableau 5.3	Résultats des calculs du prix de la matière brute de forme cylindrique	116
Tableau 5.4	Coût des outils de coupe et temps théorique d'usinage avec l'utilisation du matériel brut en forme cylindrique	117
Tableau 5.5	Résultats des calculs du prix de la matière brute de forme hexagonale	118
Tableau 5.6	Coût des outils de coupe et temps théorique d'usinage avec l'utilisation du matériel brut en forme hexagonale	119
Tableau 5.7	Tableau comparatif du prix des deux formes de la matière brute.....	119
Tableau 5.8	Tableau comparatif du coût des outils de coupe et du temps d'usinage des deux formes de la matière brute	121
Tableau 5.9	Résultats des tests avec le code G76.....	126
Tableau 5.10	Résultat des tests avec le code G92	127

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Centre de tournage-fraisage CNC Nakamura-Tome WT-150	5
Figure 2.1	Organigramme APN Inc. (APN, 2015).....	30
Figure 2.2.	Interaction programmation – usine	37
Figure 3.1	Représentation des caractéristiques d'une pièce (APN, 2015a)	40
Figure 3.2	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forets.	44
Figure 3.3	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forets.	45
Figure 3.4	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les barres à aléser. ...	48
Figure 3.5	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les barres à aléser.	49
Figure 3.6	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les outils de 80 et 55 degré.	52
Figure 3.7	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de 80 et 55 degré.	54
Figure 3.8	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les outils de finition 35 degré.	56
Figure 3.9	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de finition 35 degré.	58
Figure 3.10	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de filetage extérieur.....	60
Figure 3.11	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les fraises en bout.....	64

Figure 3.12	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les fraises en bout.....	65
Figure 3.13	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forets à centrer.....	68
Figure 3.14	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forets à centrer.....	69
Figure 3.15	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forets dimensionnels.	72
Figure 3.16	Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forets dimensionnels.	73
Figure 4.1	Organigramme d'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur pour les pièces en développement.....	87
Figure 4.2	Organigramme d'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur pour les pièces en production.....	88
Figure 4.3	Chaine décisionnelle	92
Figure 5.1	Exemple de profil de filet pour les applications aéronautiques	103
Figure 5.2	Description schématique de la quantité	107
Figure 5.3	Comparaison de deux procédés de perçage sur plan incliné (Nachi, 2015).....	112
Figure 5.4	Caractéristique C1 des pièces	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

APN	Atelier de Précision Neufchatel
ARIZ	Algorithme de résolution des problèmes inventifs
BMP	Bourse en Milieu pratique
C	Carbone
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Computer numerical control
Cr	Chrome
CT	Temps théorique d'usinage
FAO	Fabrication assistée par ordinateur
Mn	Manganèse
MOCN	Machine-outil à commande numérique
MRR	Material removal rate
NAK3	Tour Nakamura numéro 3
NAK6	Tour Nakamura numéro 6
Nb	Niobium
NC	Non-conformité
Ni	Nickel
NTJX	Type de tour à commande numérique
P	Phosphore
S	Soufre
Si	Silicium
Ta	Tantale

XXII

TCN Tour à commande numérique

TRIZ Théorie de la résolution des problèmes inventifs

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

a	Profondeur de passe (in)
a_p	Première profondeur de passe pour filet (in)
A	Distance de sécurité (in)
b	Longueur de sortie (in)
b_1	hauteur de la première passe (micron)
d	profondeur de la dernière passe (micron)
D	Diamètre de l'outil (in)
e	le nombre de passe à vide
f_a	Vitesse d'avance (IPR)
g_1	première profondeur de passe (in)
g_2	profondeur de la passe suivante (in)
g	diamètre mineur du filet (in)
h	Longueur de l'équerre (in)
H	Hauteur totale du filet (in)
j	longueur du filet (in)
k	Constante
K	Constante dépend de la nuance de l'outil de coupe et du matériau à usiner
l	Longueur (in)
l_1	pas du filet
L	La longueur de coupe (in)
L_0	La distance de sortie sécuritaire (in)
L_A	La distance d'approche (in)

XXIV

L_1	Longueur totale de la pièce (in)
m	Masse (lb)
N	Vitesse de rotation (RPM)
n	Coefficient de Taylor
r	Rayon de coin de l'outil (in)
R_a	Rugosité – écart moyen arithmétique du profil (micro-inches)
S	Surface (in ²)
s	l'angle de pénétration
S_s	Somme annuelle sauvée (dollars canadien)
t	la valeur du chanfrein
T	Temps de coupe de l'outil (s)
T_s	Temps annuel sauvé (s)
$T_{s/p}$	Temps annuel sauvé par pièce (s)
$T_{s/c}$	Temps annuel sauvé par caractéristique (s)
v	Volume (in ³)
V_c	Vitesse de coupe (SFM)
w	hauteur du filet (micron-pouce)
W	Largeur de coupe (in)
x	Exposant dépendant de la nuance de l'outil de coupe
y	Exposant dépendant de la nuance de l'outil de coupe
z	type de filet
ρ	Masse volumique (lb/in ³)
Δd	la profondeur de passe minimale (micron-pouce)

INTRODUCTION

Problématique

Le domaine de l'usinage des pièces de haute précision devient de plus en plus concurrentiel grâce non seulement à la mondialisation qui entraîne l'ouverture d'autres marchés comme la Chine, l'Inde, le Mexique, etc., mais aussi aux besoins grandissants des clients. Les entreprises se doivent donc de fournir des pièces de haute qualité à moindre coût. Pour ce faire, certaines entreprises investissent dans l'achat des équipements dispendieux, croyant pour cela résoudre le problème de la difficulté de fabriquer des pièces de grandes complexités à moindre coût. Les équipements dispendieux ne peuvent fournir le résultat escompté que s'ils sont utilisés au meilleur de leur capacité avec des procédés stables et optimisés. Les équipements jouent un rôle important dans un processus de fabrication. Les équipements ne représentent qu'une étape du processus de fabrication d'une pièce.

Pour avoir des procédés stables et optimisés, il faut faire une étude et une analyse de ceux-ci. L'analyse et l'étude des procédés passent par une bonne compréhension du fonctionnement du processus de fabrication. C'est la raison pour laquelle l'analyse des pratiques industrielles de l'entreprise est primordiale. Elle permet de mieux comprendre la chaîne d'écoulement ou les étapes d'usinage des produits tout en ressortant les maillons faibles et les endroits ou domaines d'optimisation.

Améliorer veut dire obtenir le meilleur, selon un ensemble de critères, d'une chose ou d'une situation. Au vu de cette définition, on peut dire que l'amélioration en général est une chose assez complexe car il faut savoir non seulement ce qu'il faut optimiser mais comment y arriver. L'amélioration des procédés d'usinage requiert une connaissance des procédés d'usinage, car elle passe soit par l'augmentation du taux d'enlèvement de matière, encore appelé débit du copeau, soit par l'amélioration de l'état de surface, ou encore par l'augmentation de la durée de vie des outils de coupe. L'étude des trois paramètres cités est nécessaire pour bien optimiser un procédé d'usinage.

Une bonne amélioration des procédés va non seulement permettre une certaine stabilité dans le processus, mais va aussi améliorer les cycles de fabrication (de la soumission à l'usinage en passant par la programmation). Au vu des nombreux avantages et opportunités qu'offre l'optimisation des procédés d'usinage, nous pouvons affirmer que son étude dans un milieu manufacturier de haute précision est non seulement scientifique mais d'actualité.

Objectifs

L'étude est motivée par le fait que le temps de cycle d'usinage et de programmation est très long, ainsi que le manque de standardisation de la programmation des pièces ou des caractéristiques similaires. L'objectif premier est de faire une analyse des pratiques d'usinage chez APN Inc. Pour cela il faut établir une base de données qui résume les gammes d'usinage de l'entreprise, comparer les conditions de coupe à celles des catalogues et faire des recommandations pour l'amélioration future. Le second objectif est de proposer un plan d'optimisation des gammes d'usinage des caractéristiques à haut volume de production.

Pour mener à bien ce projet de recherche, le travail a été organisé et structuré comme suit.

Présentation du mémoire

Ce projet de maîtrise comporte cinq chapitres structurés comme décrit ci-dessous:

- au premier chapitre la revue de littérature est faite;
- au deuxième chapitre une présentation de l'entreprise et l'analyse de ses pratiques industrielles a été réalisée. Un accent particulier est mis sur le fonctionnement de la chaîne de production;
- au troisième chapitre une présentation des informations nécessaires pour la création de la base de données est élaborée ainsi que l'étude comparative de la programmation des caractéristiques semblables, l'étude comparative des conditions de coupe programmées et celles des catalogues et la sélection des meilleurs parcours d'outil;

- au quatrième chapitre, une présentation de l'optimisation du processus de fabrication est faite;
- au cinquième chapitre, une présentation de l'optimisation des méthodes de programmation des opérations redondantes est faite ainsi qu'une étude des types d'usures trouvés sur les plaquettes des outils de coupe.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Généralités

La concurrence rude sur le marché de l'usinage haute précision pousse les entreprises à utiliser les meilleures méthodes de fabrication. Le but recherché est la réduction des pertes de temps (les temps morts) et des variations du procédé tout en usinant des pièces de grandes qualités à moindre coût. La méthode la plus employée est l'optimisation des processus utilisés. Dans cette étude, il s'agit du processus de fabrication des pièces aéronautiques de hautes précisions qui sont usinées sur les centres de tournage-fraisage CNC figure 1.1.



Figure 1.1 Centre de tournage-fraisage CNC Nakamura-Tome WT-150

Les centres de tournage-fraisage CNC sont des machines-outils à commande numérique capable d'effectuer des opérations d'usinage par rotation soit de la pièce, soit de l'outil de coupe suivant un programme effectué manuellement (conversationnel) ou avec l'aide des programmes de fabrication assistée par ordinateur (FAO). Les centres de tournage-fraisage CNC réalisent principalement les opérations de tournage. Néanmoins ils effectuent aussi

quelques opérations de fraisage et de perçage. Ce sont les machines-outils les plus sollicités dans l'entreprise pour l'usinage automatique des pièces. L'avantage principal des centres de tournage-fraisage CNC est la possibilité d'usiner une pièce en un montage avec l'utilisation de plusieurs opérations complexes (chariotage – contournage – perçage sur angle etc.). Si le centre de tournage-fraisage CNC offre la possibilité de transfert de la pièce d'une broche à une autre, la pièce peut être entièrement usinée dans une seule machine-outil; ce qui en est un avantage significatif. La fonction principale des centres de tournage-fraisage CNC est la réalisation des opérations de tournage.

Le tournage est considéré comme l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans les industries de fabrication (Chibane et al., 2011). Le tournage est un procédé d'usinage qui se caractérise par l'enlèvement de copeau sur une pièce qui est animé d'un mouvement de rotation avec un outil de coupe animé d'un mouvement de translation. L'utilisation optimale même d'un centre tournage-fraisage CNC passe par un bon processus de fabrication.

Un processus de fabrication représente l'ensemble des étapes nécessaires à la production d'une pièce. Le processus de fabrication débute par la soumission et se termine par l'obtention des pièces selon les requis du client. Un bon ordonnancement du processus de fabrication permet de détecter, d'éliminer ou de réduire une partie significative des temps morts.

La réduction ou l'élimination des temps morts (quelle que soit leur proportion) dans un processus de fabrication a une importance significative selon le volume des pièces à usiner (Pierrette, 1968). Gagner un temps, aussi minime qu'il soit sur une opération ou un geste répété sur des milliers en fonction du volume de production, représente une économie considérable de temps (Pierrette, 1968). Debongnie (1993) remarque que depuis des décennies les efforts se sont concentrés vers la réduction des temps morts d'usinage, mais qu'on assiste de nos jours à un regain d'intérêt pour les procédés d'usinage. Il faudrait donc optimiser les procédés d'usinage utilisés.

1.2 Amélioration des procédés d'usinage

L'amélioration, selon le dictionnaire Larousse, est le fait d'améliorer c'est-à-dire de donner à quelque chose, à une machine, à une entreprise, etc., le progrès en créant les conditions les plus favorables ou en tirant le meilleur parti possible. Pour améliorer, il faut savoir quoi et avec quoi améliorer. L'amélioration du processus de fabrication est l'essence de cette étude. L'élément essentiel dans un processus de fabrication est le procédé d'usinage utilisé.

Un procédé d'usinage est une méthode ou une technique d'obtention d'une pièce par enlèvement du copeau. Les procédés d'usinage utilisés dans l'entreprise sont: le fraisage, le tournage, le perçage et la rectification. Cette étude s'est limitée sur les opérations de tournage, de fraisage et de perçage réalisées sur un centre de tournage-fraisage CNC. L'optimisation d'un procédé d'usinage passe par un choix optimal des conditions de coupes utilisées.

Le choix optimal des conditions de coupe est basé sur les capacités de la machine-outil utilisée, les caractéristiques du matériau à usiner, et de l'outil de coupe utilisé et le type d'opération à réaliser. Le choix optimal des conditions de coupe permet d'obtenir les conditions idéales d'usinage qui sont:

- le moindre coût d'usinage;
- le temps d'usinage court;
- la bonne durée de vie de l'outil de coupe;
- la haute précision d'usinage.

Les principaux paramètres qui influencent la formation du copeau sont (Université, 2014):

- la vitesse de coupe;
- la profondeur de passe;
- la vitesse d'avance;
- l'utilisation du liquide de coupe;

- la géométrie de l'outil de coupe;
- les matériaux de l'outil et de la pièce.

1. La vitesse de coupe

Elle est définie comme l'espace parcouru par l'extrémité de l'outil de coupe en une minute. Elle affecte la durée de vie de l'outil de coupe. Augmenter la vitesse de coupe accroît la température et réduit ainsi la durée de vie de l'outil de coupe (Mitsubishi, s.d.). La valeur de la vitesse de coupe varie selon:

- la nature de l'opération;
- le type de matériau à usiner;
- le type de matériau de l'outil de coupe;
- les conditions de lubrification.

Généralement, une augmentation de 20% de la vitesse de coupe diminue de moitié la durée de vie de l'outil de coupe et une augmentation de 50% de la vitesse de coupe réduit de 80% la durée de vie de l'outil de coupe (Mitsubishi, s.d.). L'usinage avec des vitesses de coupe basse (65-130 SFM) tend à provoquer le phénomène de chatter ce qui provoque la réduction de la durée de vie de l'outil de coupe (Mitsubishi, s.d.).

2. La vitesse d'avance

C'est la vitesse avec laquelle l'outil de coupe se déplace pour le procédé de tournage. Sa valeur influence la qualité du fini de surface de la pièce à usiner. Sa valeur est souvent grande pour les opérations d'ébauche; ce qui permet d'augmenter la productivité, et faible pour les opérations de finition pour obtenir la qualité.

3. La profondeur de passe

Elle est déterminée en fonction de:

- la quantité de matière à enlever;
- la forme de la pièce à usiner;
- la puissance et la rigidité de la machine;
- la rigidité de l'outil de coupe.

Lorsque la profondeur de passe est faible (le plus souvent inférieure au rayon de bec de l'outil de coupe), l'outil ne coupe pas mais écroute le matériau. Il en résulte la compression du matériau et la création d'une pression de contact outil-pièce qui provoque l'usure prématurée de l'outil de coupe et entraîne un mauvais état de surface et des mauvaises dimensions. Il est recommandé de choisir une profondeur de passe optimale en se basant sur celle donnée par le fabricant de l'outil de coupe utilisé. Il est conseillé de prendre la profondeur de passe maximale supportable par la puissance de la machine pour éviter que l'usinage se fasse par la pointe de l'outil de coupe lorsqu'on usine une surface brute. Ceci permet d'éviter l'usure prématurée.

4. L'utilisation du liquide de coupe

Les liquides de coupe sont principalement composés de l'eau, huiles minérales et additifs chimiques; ils permettent d'assurer les fonctions suivantes (Université, 2014):

- le refroidissement de l'outil;
- la diminution du coefficient de frottement;
- l'amélioration de l'état de surface;
- l'évacuation des copeaux et de la chaleur.

5. La géométrie de l'outil de coupe (Mitsubishi, s.d.)

L'outil de coupe est choisi en fonction de la matière du matériau à usiner et des capacités de la machine-outil utilisée. La géométrie de l'outil de coupe est la caractéristique principale d'outil de coupe. La géométrie de l'outil de coupe est composée de:

- angle de coupe;
- angle de dépouille;
- angle d'attaque;
- angle de direction d'arête;
- inclinaison de l'arête de coupe;
- géométrie d'arête de coupe;
- le rayon de bec de l'outil de coupe.

a) Angle de coupe

L'angle de coupe est l'angle de l'arête de coupe qui influe principalement sur la résistance et la température de coupe, la formation du copeau, et la durée de vie de l'outil de coupe.

b) Angle de dépouille

L'angle de dépouille est l'angle qui permet d'éviter la friction entre la face de dépouille de l'outil et la surface qui vient d'être usinée. Son augmentation permet de réduire les risques d'usure de dépouille et l'effort de coupe.

c) Angle d'attaque

L'angle d'attaque et l'angle de pointe influent sur l'effort d'avance, l'effort radial et l'épaisseur de copeaux (Mitsubishi, s.d.). L'augmentation de l'angle d'attaque accroît la longueur de contact avec le copeau et diminue l'épaisseur de ce dernier.

d) Angle de direction d'arête

L'angle de direction d'arête évite l'interférence entre la pièce et l'outil. Il est habituellement de 5 à 15°.

e) Inclinaison de l'arête de coupe

L'inclinaison de l'arête de coupe est encore appelée inclinaison de l'angle de coupe. Son inclinaison négative dirige les copeaux vers la pièce alors que sa valeur positive dirige les copeaux à l'opposé de la pièce.

f) La géométrie d'arête de coupe

La géométrie de l'arête de coupe permet à l'outil d'être plus résistant aux efforts de coupe. Les géométries les plus utilisées sont le chanfrein et l'arrondi.

g) Le rayon de bec

Le rayon de bec influence l'effort de coupe et l'état de surface. L'augmentation du rayon de bec de l'outil de coupe améliore l'état de surface et renforce sa résistance.

6. L'usinabilité du matériau à usiner

Le matériau à usiner est l'acier inoxydable 347. C'est un acier inoxydable austénitique qui est un alliage de fer à base de 18% chrome et 8% nickel. La teneur en chrome et en nickel peut être augmentée pour améliorer la résistance à la corrosion. Les aciers austénitiques sont amagnétiques et ne peuvent subir de traitement thermique. Leur qualité inoxydable est obtenue par l'intermédiaire de la formation d'un film invisible et adhérent d'oxyde riche en chrome (Acier inoxydable, s.d.). L'alliage 347 est un acier inoxydable austénitique d'usage général avec une structure cubique à faces centrées (Acier inoxydable, s.d.).

L'acier inoxydable 347 est un matériau qui est souvent utilisé pour les raffineries de pétrole, les tiges de suspension, dans les milieux où les températures dépassent 550⁰ F et où une résistance à la sulfuration est nécessaire, surtout dans la fabrication des pièces aéronautiques.

Les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du matériau à usiner (l'acier inoxydable 347) sont présentées aux figures 1.1 et 1.2 respectivement (Stainless steel 347, s.d.).

Tableau 1.1 Propriétés physiques de l'acier inoxydable 347

Densité (lb/in ³)	0.286
Point de fusion (°F)	2550 à 2635
Module d'élasticité, dynamique (lb/in ² x10 ⁶)	28

Tableau 1.2 Propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 347

Résistance à la traction, ksi	75
Limite d'élasticité 0.2%, ksi	30
Allongement, %	40
Dureté brinell max	201

Tableau 1.3 Propriétés chimiques de l'acier inoxydable 347

	Cr	Ni	Nb+Ta	C	Si	Mn	P	S	Fe
Min	17.0	9.0	Cb 10xc Cb 8xc	0.04					
Max	19.0	13.0	1.0	0.08	0.75	2.0	0.045	0.03	Reste

Le choix optimal des outils de coupe à utiliser a une grande influence sur la stabilité du procédé. Le choix optimal des outils de coupe nous guide vers des outils de coupe qui possèdent une durée de vie plus grande.

La durée de vie des outils de coupe est liée aux types d'usure qui apparaissent sur celui-ci. Il est donc nécessaire de prévoir les types d'usure qui peuvent apparaître sur l'outil de coupe. Plusieurs études (Choudhury et Srinivas, 2004; Chungchoo et Saini, 2002; Clancy et Shin, 2002; Dan et Mathew, 1990; Özel et Karpaz, 2005; Poulachon et al., 2004; Sandvik, 2015b; Scheffer et al., 2003; Sick, 2002), ont été faites sur la prévention, la détection et le contrôle à temps des types d'usure qui peuvent apparaître sur les outils de coupe lors de certaines opérations d'usinage. L'usure des outils de coupe affecte la qualité des pièces usinées.

La qualité d'une pièce usinée est le respect de tous les requis du client. Un des critères importants de la qualité d'une pièce usinée est son état de surface. L'obtention d'un meilleur état de surface pour les opérations de tournage peut se faire par le choix optimal du rayon de bec de l'outil de coupe et des vitesses d'avance utilisées. Les paramètres évoqués sont importants pour déterminer l'état de surface d'une pièce usinée mais, il faudrait connaître le comportement du matériau usiné lors des opérations de coupe.

L'acier inoxydable 347 est considéré comme un acier dur. Son usinabilité n'est pas toujours connue par les entreprises d'usinage. Choisir les paramètres de coupe pour ce type de matériau devient un casse-tête pour les programmeurs CNC. Lan (2009); Hassan et al (2012) propose d'utiliser la méthode de Taguchi pour faire un choix optimal des paramètres de coupe.

Le gain de temps obtenu par une optimisation des procédés d'usinage se réduit ou s'évapore par la mauvaise organisation de la production qui est une partie importante du processus de fabrication. La connaissance du matériau à usiner influence le choix des outils de coupe à utiliser.

1.3 Amélioration du processus de fabrication

Pour débiter un processus d'amélioration, il faut avoir un but à atteindre. Les entreprises doivent avoir un regard sur l'amélioration du coût et de la qualité de leurs produits. La nécessité primordiale est d'optimiser les procédés pour pouvoir survivre dans la compétition rude du marché de l'usinage haute précision. L'entreprise se doit de mettre sur pieds une politique d'amélioration continue des processus de fabrication qu'elle utilise. Nash, Poling et Ward, (2006) souligne que « *good enough today is never good enough for tomorrow* ».

L'identification de l'objet à améliorer est une étape importante dans le processus d'optimisation. Il faut donc clairement identifier l'objet à améliorer. L'identification de l'objet à améliorer passe par l'observation de ce qui est important pour le succès voire la survie de l'entreprise. Dans le cadre de la société APN Inc., la priorité majeure est la production des pièces de haute qualité à moindre coût de fabrication afin d'avoir le plus grand bénéfice possible. L'identification de la priorité première de l'entreprise oriente cette étude vers l'amélioration de tout le processus de fabrication car, un bon processus de fabrication entraîne une production stable en flux tendu, par conséquent génère des pièces bonnes et à moindre coût de fabrication. Une méthode d'amélioration des processus par élimination des pertes est l'utilisation du Lean.

Le Lean permet de déterminer et d'éliminer les pertes à travers une amélioration continue. L'important dans le Lean n'est pas de regarder ce qui est à ajouter pour améliorer le procédé, mais ce qui est enlevé (Nash, Poling et Ward, 2006). L'identification des pertes est un exercice à faire lorsqu'on utilise le Lean pour optimiser un procédé, car on a souvent tendance à penser qu'éliminer les pertes observées va résoudre le problème (Nash, Poling et Ward, 2006). Voilà pourquoi, pour identifier les causes des pertes, il faut chercher à remonter aux causes principales et non supposées. Certaines causes sont comme un iceberg et d'autres comme une bougie magique. Les causes iceberg sont celles qui cachent les principales raisons des pertes de temps et les causes bougie magique sont celles qui reviennent même quand elles sont éliminées. Il existe de nombreuses étapes qui sont des sources de perte de

temps, mais qui ne sont détectables qu'avec de bonnes méthodes de gestion et d'organisation du processus de fabrication (Pierrette, 1968). Les actions à mener pour l'identification et l'élimination des temps morts sont les suivantes:

- identifier les pertes et les actions qui n'ont pas de valeur ajouté;
- classer chaque perte;
- explorer les racines des causes des pertes et explorer les solutions probables et potentielles;
- rationaliser et simplifier le travail;
- éliminer le plus possible des gestes inutiles.

L'identification des pertes implique aussi une bonne connaissance tenue à jour, des postes de travail, de leur place et importance dans le processus de la fabrication, des capacités réelles du parc des machines-outils et de l'usinabilité des matériaux utilisés.

Il a été démontré par les allemands que les gains de productivité les plus considérables que l'on pouvait attendre n'étaient pas obtenus à longue échéance, grâce à des normes de rendement trop élevées, mais essentiellement par une amélioration des méthodes, par la réduction des gaspillages et par la formation du personnel aussi bien celle des cadres supérieurs que celle des ouvriers (Pierrette, 1968).

La figure 1.2 montre une décomposition de la durée totale d'une fabrication ou d'une opération (Pierrette, 1968). La figure 1.3 montre les temps improductifs imputables à la direction ou aux travailleurs.

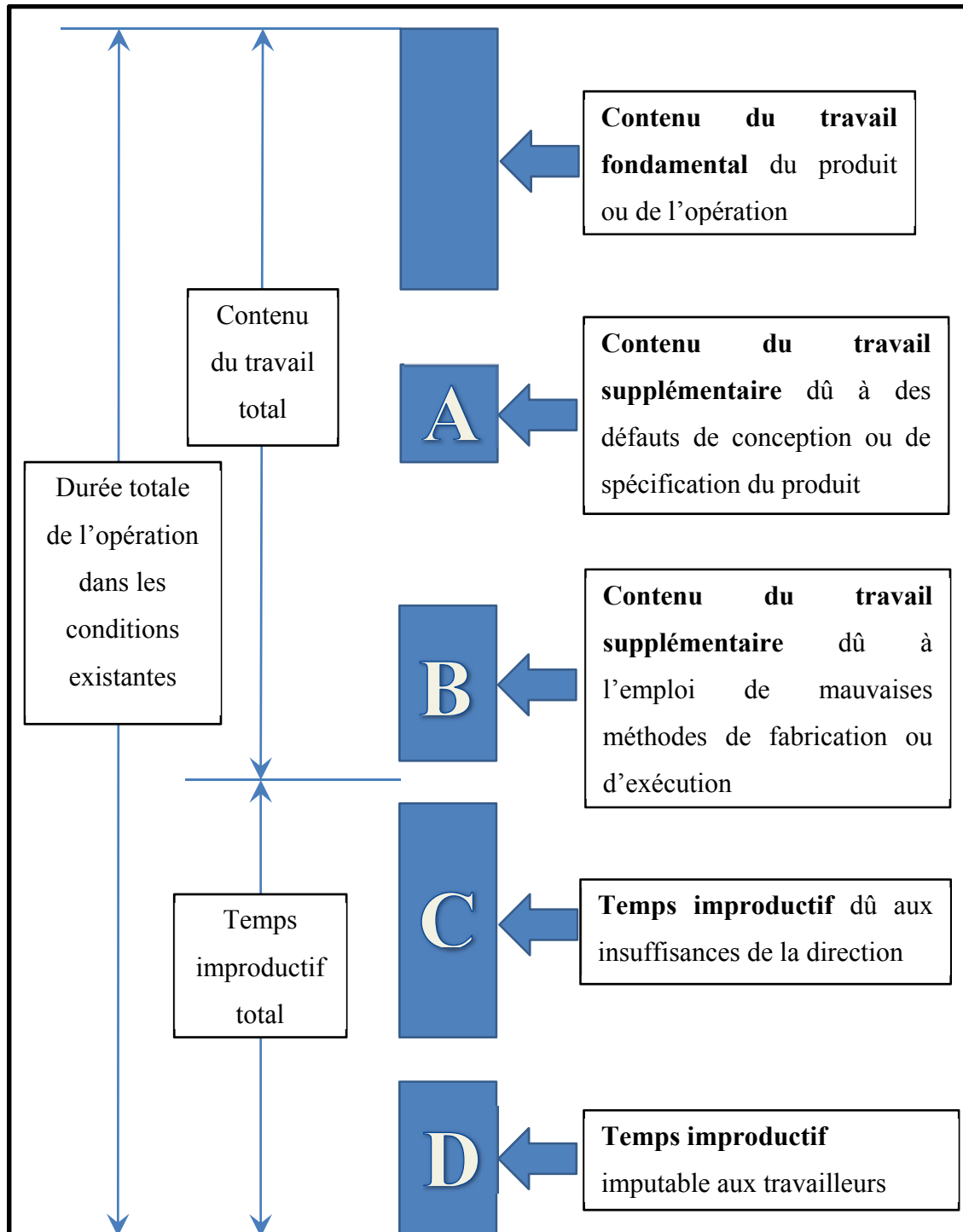


Figure 1.2 Décomposition de la durée totale de fabrication ou d'une opération (Pierrette, 1968)

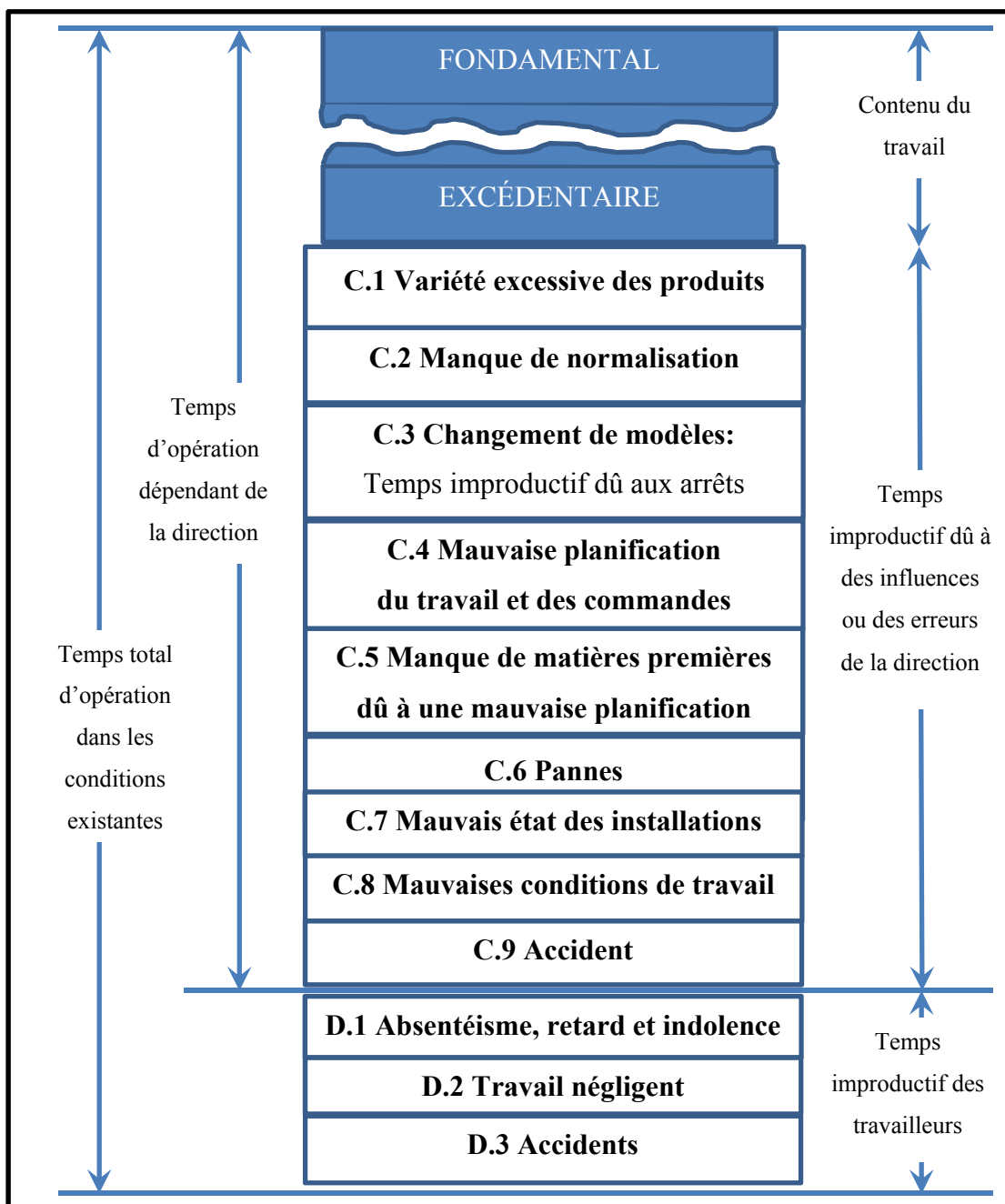


Figure 1.3 Temps improductif imputables à la direction ou aux travailleurs
(Pierrette, 1968)

Les figures 1.2 et 1.3 sont d'un appui important et les entreprises peuvent adapter ces figures à leur réalité pour aider à l'identification des différents temps morts observés dans le processus de fabrication. Après l'identification des temps morts, les figures 1.2 et 1.3 permettent de localiser les sources des pertes de temps. L'identification et la localisation des pertes de temps et de leurs sources guident sur le choix des cibles pour une optimisation future et une réalisation significative du gain de temps.

Le gain de temps obtenu par une optimisation des procédés d'usinage se réduit ou se dissout rapidement par une mauvaise organisation de la production. Le constat est vite fait par la portion importante des temps improductifs due à l'influence des cadres qui n'est rien d'autre que l'organisation de la production. Cette organisation influence largement le temps de production.

Le temps d'une production est l'addition du temps fondamental et du temps excédentaire. Le temps fondamental est encore appelé temps réel de travail. Il est celui utilisé si une organisation optimale de la production était employée. Le temps excédentaire est encore appelé temps supplémentaire dû à une mauvaise planification de la production. Pour obtenir le temps d'une production, il faut identifier, quantifier et mesurer le travail de chaque étape du processus de fabrication. Ce qui mène à la réflexion sur une optimisation du processus par les réponses aux questions de savoir si la quantité et la qualité des tâches à un niveau donnée ainsi que le temps alloué sont optimaux.

Il a été constaté que, sur une journée de travail de huit heures, 62 à 73 % du temps est réellement employé à la production pour les entreprises organisées et 32 à 42% dans celles qui sont moins bien organisées (Pierrette, 1968).

La réduction voire l'élimination des pertes de temps passe par une étude de celles-ci. Une bonne analyse des pertes de temps passe par une bonne énumération de leurs sources.

1.3.1 Énumération des sources de pertes de temps

Très souvent, les pertes de temps représentent presque un tiers du temps effectivement passé à fabriquer le produit ou à réaliser l'opération. Toutes ces pertes de temps allongent et ralentissent sans aucun profit la durée de production. Elles augmentent les coûts de fabrication et diminuent la productivité générale de l'entreprise.

Les sources de perte de temps sont:

- le travail supplémentaire ou retouche (*rework*);
- mauvaise conception du produit;
- mauvaise conception des opérations;
- diversité trop grande des modèles;
- manque de normalisation des produits;
- manque ou non-respect des méthodes de travail;
- norme de qualité incorrecte;
- mauvaise politique d'approvisionnement;
- mauvaise méthode d'exécution;
- mauvaise étude des méthodes;
- temps morts;
- mauvaises conditions de travail;
- mauvaise politique de vente;
- arrêts volontaires;
- surproduction;
- sur qualité;
- manque d'outillage;
- pause;
- les retards et les absences;
- l'indolence au travail;
- manque de prise en compte de la psychologie du travailleur.

Avant de lancer la fabrication d'un produit, il faut s'assurer à la fois que le travail a été bien préparé, c'est-à-dire que les machines ont été bien réglées, que les outils choisis sont adéquats et que le procédé de fabrication est bien celui qui convient. La réduction des pertes de temps ne doit pas être poussée à l'extrême.

Trouver les solutions à un problème posé n'est pas toujours une action facile. Parmi les méthodes qui existent, la théorie de la résolution des problèmes inventifs (TRIZ) a été choisie pour mener à bien cette étude.

1.4 Méthode TRIZ

TRIZ est un acronyme russe de "Théorie de la Résolution des Problèmes Inventifs". Elle a été inventée en Union Soviétique vers les années soixante par Genrikh Saulovich Altshuller. L'auteur définit son invention comme une alternative aux nombreuses et moins effectives méthodes de recherche du choix des variantes qui permettent de simplifier la résolution des problèmes d'invention. Elle peut aussi être définie comme une méthodologie dédiée à l'analyse et à la résolution des problèmes techniques nécessitant des solutions innovantes, ainsi qu'une théorie sur l'évolution technologique des produits (Altshuller et Shulyak, 1996).

TRIZ est une recherche de solution complexe, qui consiste à rassembler différentes solutions susceptibles de répondre aux conditions imposées, à les concrétiser, à simuler leur comportement, pour au final en choisir la meilleure. Dans cette optique, cette méthode a permis pendant cette étude de rassembler toutes les données de l'entreprise pour mieux comprendre ses besoins par détection de ses maillons faibles.

Une limite renaît avec la quantité et la qualité des solutions proposées et les connaissances acquises dans le domaine spécifique de recherche, on parle alors d'inertie psychologique. Une solution de réponse à cette limite réside dans un principe essentiel de TRIZ qui propose d'utiliser ou de s'inspirer des solutions utilisées dans d'autres domaines pour résoudre les problèmes similaires posés. Ainsi dans l'optimisation du processus de fabrication, l'étude ne

s'est pas seulement obstinée à ne prendre que les données et hypothèses d'optimisation des processus de fabrication des pièces aéronautiques de hautes précisions, mais dans divers domaines qui nécessitent une bonne organisation de la production. Il est nécessaire de citer quelques exemples des bases de TRIZ.

TRIZ se base sur:

- la similarité des principes de la majorité des inventions;
- la résolution des problèmes inventifs est souvent issue des contradictions entre certaines exigences;
- la loi de l'évolution des technologies;
- le principe de résolution des contradictions sans l'utilisation du compromis.

TRIZ ne génère pas de nouvelles idées. Elle suggère des idées issues d'une analyse et d'une modélisation de l'existant, idées auxquelles les concepteurs n'auraient pas forcément pensé. Elle propose de généraliser l'observation selon laquelle lorsque l'on rencontre un problème technique pouvant se ramener à l'action qui a un effet secondaire néfaste, une voie de solution possible est d'effectuer l'action rapidement (Altshuller, Shulyak et Rodman, 1997). Dans la recherche des solutions, l'originalité de TRIZ repose dans le refus du compromis. Pour éviter le compromis elle agit sur les causes profondes du problème.

Avantages de TRIZ:

- la capacité d'identifier la nature des problèmes;
- la capacité de bien orienter la recherche des solutions sans oublier celles auxquelles l'on pense très peu;
- la connaissance de la manière de synthétiser la recherche de l'information nécessaire selon les problèmes spécifiques et la recherche des solutions adéquates;
- la possibilité de trouver des solutions autres que celles qu'on utilise le plus souvent;
- la capacité d'avoir une pensée logique, analogique et systématique;

- l'augmentation efficace de la capacité de penser;
- la réduction du temps de résolution;
- le regard des problèmes d'une façon différente;
- l'augmente des perspectives de solutions.

Les difficultés d'utilisation de TRIZ:

- la difficile de cerner précisément où limiter l'analyse;
- l'absence des mécanismes clairs de passage de la formulation des contradictions à leur résolution pratique;
- l'évidence de choisir le modèle le mieux adapté au problème posé.

La démarche de TRIZ se résume selon les trois étapes suivantes:

- La modélisation du problème;
- La recherche des solutions semblables dans les catalogues;
- La concrétisation de la meilleure solution.

La figure 1.4 résume bien cette démarche (TRIZ: une méthodologie d'aide à l'invention).

Pour la résolution des problèmes techniques, TRIZ utilise les instruments suivants:

- le tableau de résolution des contradictions techniques;
- les normes de résolution des problèmes;
- l'indice des effets physiques;
- les méthodes de développement de l'imagination créative;
- l'identification et la classification des options possibles pour les connexions entre les composants des systèmes techniques.

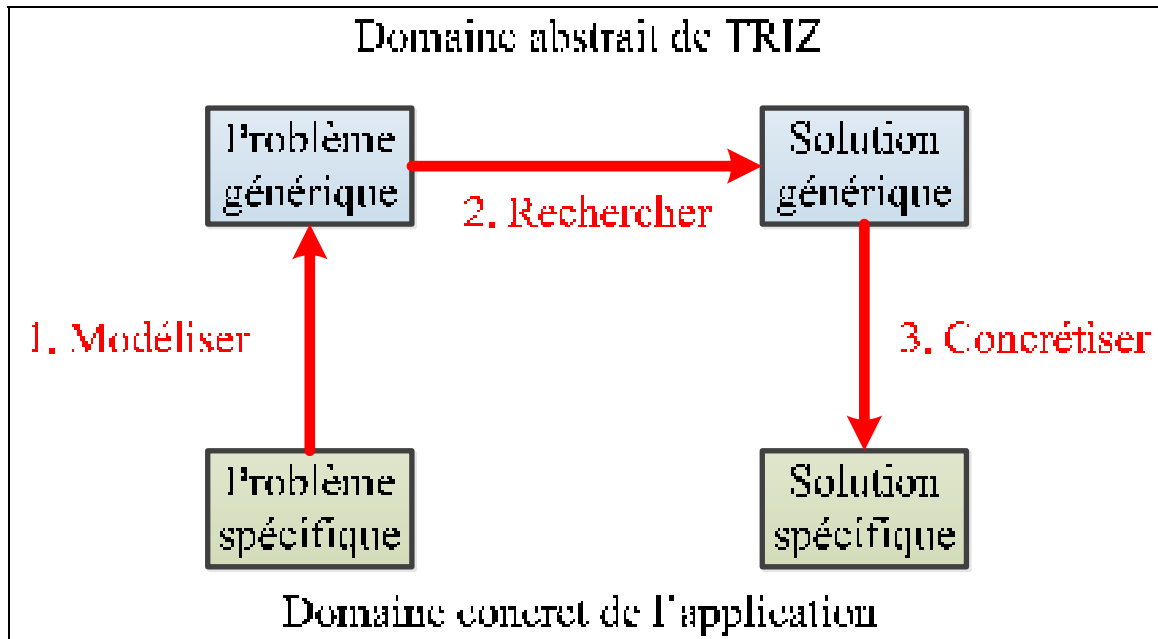


Figure 1.4 Le cœur de la démarche de TRIZ : modéliser le problème, rechercher une voie de solution et la concrétiser (TRIZ, s.d.).

TRIZ distingue deux types de contradictions qui sont les contradictions techniques et les contradictions physiques. On parle de contradictions techniques lorsqu'il n'est pas possible d'améliorer l'une des performances du produit sans en dégrader une autre de façon inacceptable. On parle de contradictions physiques lorsqu'une partie du produit doit avoir deux propriétés incompatibles, c'est-à-dire lorsque le même produit physique est soumis à deux exigences contradictoires.

Afin de surmonter ces difficultés, Alshuller a mis au point l'algorithme de résolution des problèmes inventifs (ARIZ) qui est l'instrument principal de TRIZ.

1.4.1 Présentation de ARIZ

ARIZ est méthodologie industrielle détaillée basée sur les outils de TRIZ, visant à bien cerner le problème, à l'analyser de différentes façons, et à s'assurer de la viabilité des solutions obtenues. ARIZ peut aussi être définie comme une suite logique et consécutive des

étapes, ayant pour but la détection et la résolution des contradictions qui existent dans les systèmes techniques et qui entravent à leur amélioration.

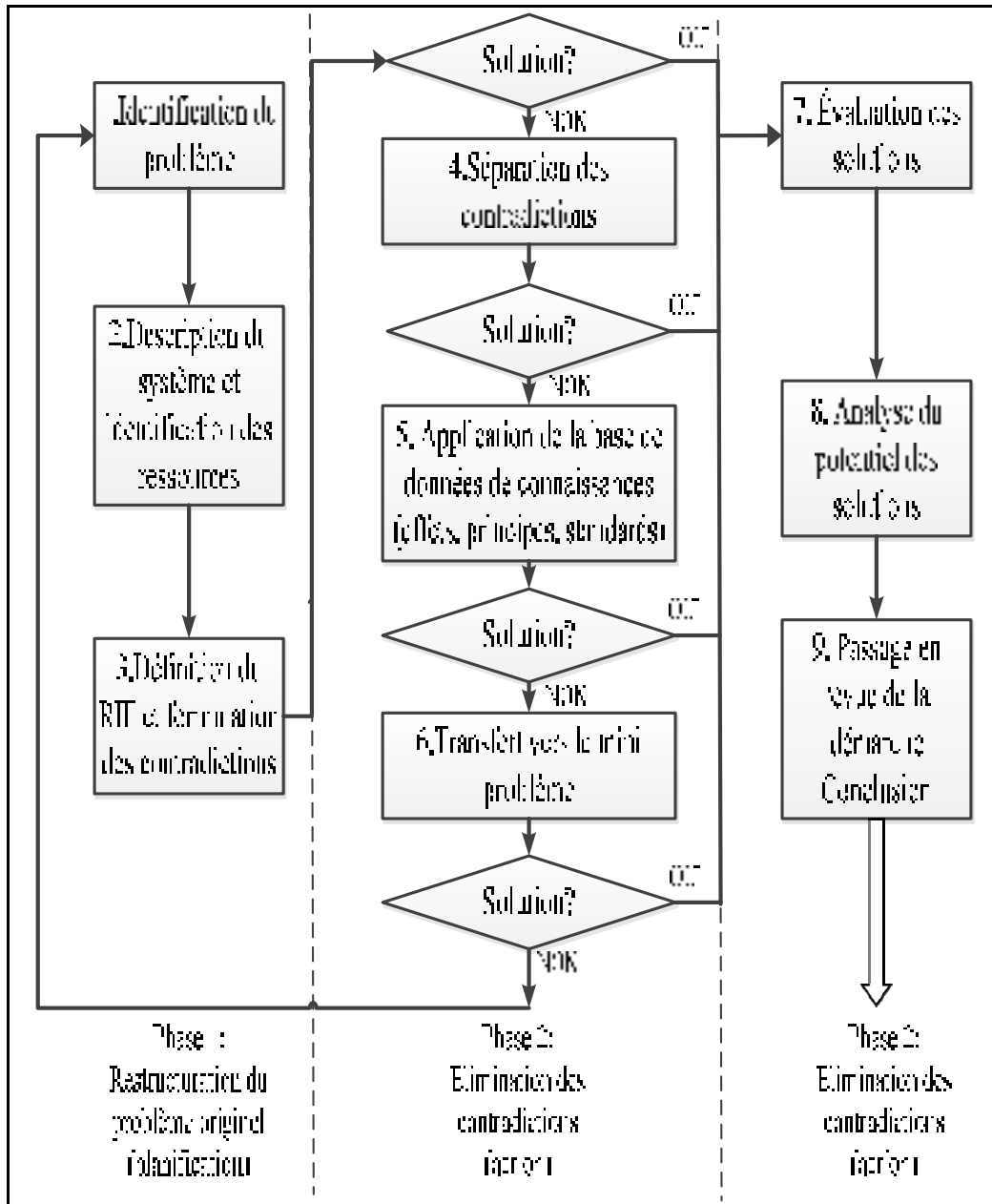


Figure 1.5 Vue d'ensemble de l'algorithme ARIZ (TRIZ, s.d.).

Les applications techniques d'ARIZ ont connu les modifications ARIZ-77 et ARIZ-85B. Dans le cadre de notre étude, ARIZ-85B a été utilisé.

1.4.2 Structuration de ARIZ-85B

ARIZ-85B est divisé en neuf étapes qui sont présentées comme suit (Altshuller, 1997):

Étape 1. L'analyse du problème

L'objectif principal de la première étape d'ARIZ est le passage d'une situation innovante peu claire vers un schéma bien défini et relativement simple du modèle de problème.

Étape 2. L'analyse du modèle de problème

La deuxième étape d'ARIZ a pour but d'analyser toutes les ressources pouvant être utilisées pour résoudre le problème.

Étape 3. La détermination du résultat final idéal et des contradictions physiques

L'application de la troisième partie d'ARIZ doit conduire à une vision générale **du résultat final idéal (RFI)**. Elle permet également de mettre en évidence les contradictions physiques (CP), empêchant l'obtention du RFI. Elle indique le chemin vers la solution idéale.

Étape 4. La mobilisation et utilisation des SFR (*Substance-Fields Rescues*)

La quatrième étape d'ARIZ consiste à appliquer une série d'opérations visant à augmenter le nombre de ressources.

Étape 5. L'utilisation de la base de données

La cinquième étape d'ARIZ est d'utiliser les bases de données. Elle permet ainsi d'obtenir directement une solution.

Étape 6. Le changement ou remplacement du problème

La sixième étape se base sur le fait que la résolution des problèmes difficiles se fait souvent par le changement du sens dudit problème. Il faut donc chercher à enlever l'inertie psychologique pour l'ouverture vers d'autres sources d'idées.

Étape 7. L'analyse du mode de suppression des CP

La septième étape d'ARIZ a pour but la vérification de la qualité des réponses obtenues. La contradiction physique doit être supprimée d'une manière presque idéale. Il est préférable de dépenser 2 ou 3 heures de plus pour trouver une meilleure réponse que de se battre avec l'introduction d'une solution faiblarde

Étape 8. Le développement de l'usage maximum de la solution obtenue

La huitième étape d'ARIZ a pour but de maximiser l'utilisation de la solution obtenue.

Étape 9. L'analyse du chemin emprunté pour produire la solution

La neuvième étape d'ARIZ a pour but l'accroissement du potentiel inventif du chercheur. Pour cela l'analyse des chemins utilisés pour enregistrer une solution finale est nécessaire.

1.5 Conclusion

Il a été relevé plus haut que même quand la réussite de l'optimisation des procédés d'usinage est atteinte, d'autres sources de pertes de temps énormes subsistent et ne peuvent être détectées, éliminées ou diminuées que par de bonnes méthodes de gestion et d'organisation de la production.

Dans la littérature il n'existe plusieurs méthodes pour usiner les filets aéronautiques et pour les opérations de fraisage des hexagones. Mais aucune des méthodes présentées ne prend en compte les capacités opérationnelles réelles de la machine outils utilisée. De même pour l'attribution des tâches, la qualité des intervenants et les temps alloués pour chaque étape dans l'amélioration du processus de fabrication ne sont définis.

Au vu de toutes les théories énoncées il en ressort une nécessité de faire une étude combinée entre une bonne organisation de la production et des procédés d'usinage améliorés pour obtenir un gain significatif. Une amélioration de l'organisation de la production et des procédés d'usinage donne naissance à une amélioration du processus de fabrication. Pour arriver au but escompté, la méthode du TRIZ a été employée. Elle permet de regrouper les solutions possibles et d'en faire un choix optimal sans compromis pour obtenir le meilleur résultat attendu.

CHAPITRE 2

ANALYSE DES PRATIQUES INDUSTRIELLES CHEZ APN Inc

2.1 Présentation de l'entreprise

APN Inc. est une entreprise qui œuvre dans l'usinage des pièces aéronautiques et militaires complexes et de très haute précision, mais aussi des pièces de hautes technologies. C'est une société fondée dans les années 1970. Elle connaît une ascension fulgurante dans les années 1990 avec l'arrivée de l'actuel président Jean Proteau comme président. Mais une autre dimension plus grande et prestigieuse sera donnée à l'entreprise vers 2004 avec l'arrivée du co-président actuel Yves Proteau. APN Inc. va voir son chiffre d'affaire ainsi que le nombre de ses employés augmenter à grande vitesse, tout comme la qualité et la quantité de son parc des machines-outils à commande numérique (MOCN).

APN Inc. compte à ce jour plus de 65 employés, plusieurs tours et fraiseuses à commande numérique, des CMM, des comparateurs optiques, bref tout l'équipement haut de gamme nécessaire pour être compétitif dans le domaine de l'usinage des pièces aéronautiques complexes et de haute précision.

APN Inc. est structuré comme la figure 2.1. (APN, 2015)

Les différents secteurs de l'entreprise APN Inc. sont:

- Secteur tours;
- Secteur fraiseuses;
- Secteur conventionnelle – assemblage;
- Secteur polissage – ébavurage;
- Secteur laser – découpe.

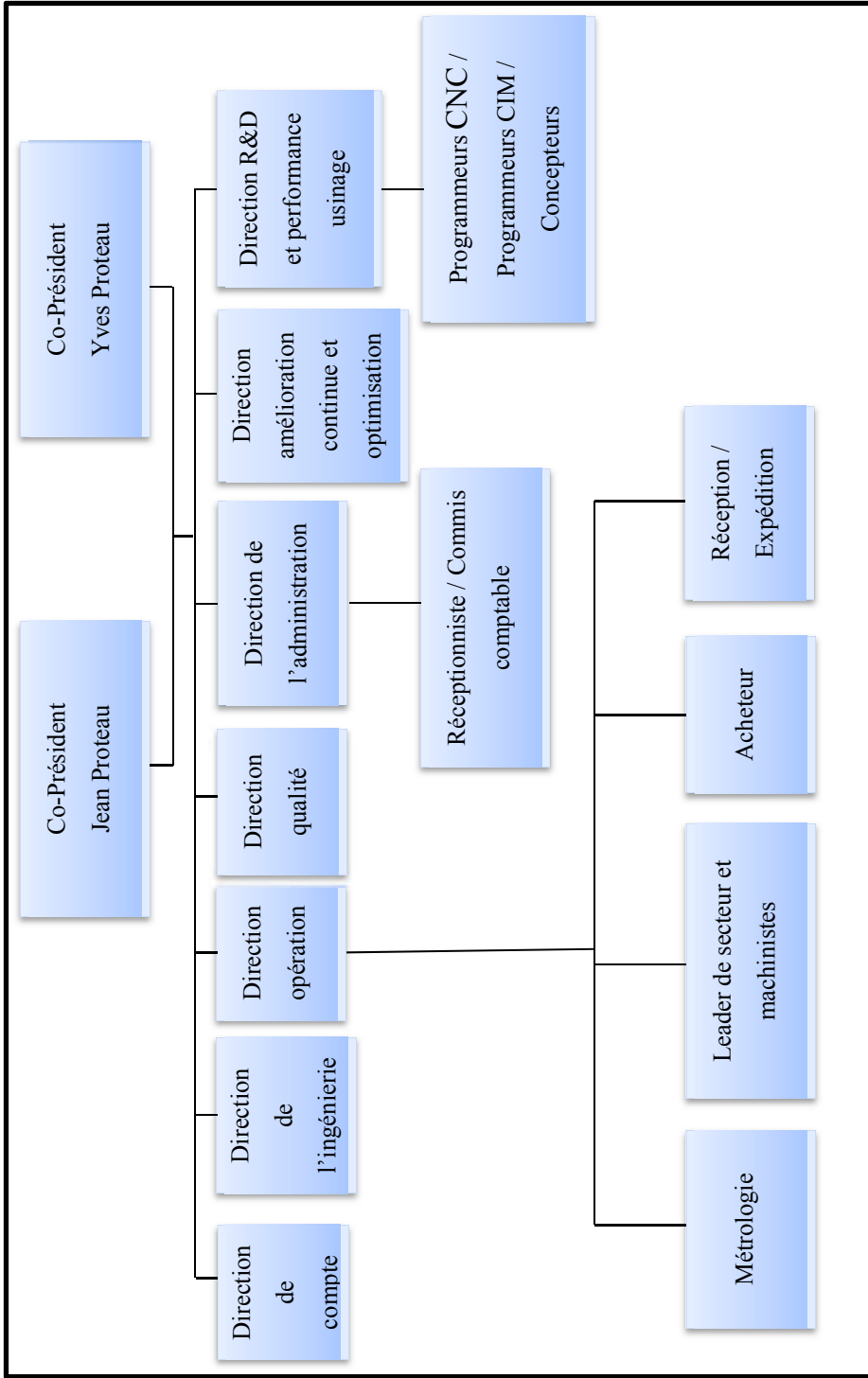


Figure 2.1 Organigramme APN Inc. (APN, 2015)

2.2 Étapes du processus de fabrication des pièces chez APN Inc.

La fabrication d'une pièce de haute précision en aéronautique suit un cheminement bien élaborée. Ce cheminement permet une bonne traçabilité des méthodes et des personnes utilisées pour l'usinage de la dite pièce. En ce qui concerne l'entreprise APN Inc., les différentes étapes qui aboutissent à l'usinage de la pièce sont (APN, s.d.):

- la soumission;
- la revue de contrat;
- la présentation du projet à l'équipe de conception;
- la présentation pré-développement;
- la présentation pré-production;
- la présentation post-production.

2.2.1 La soumission

La soumission se fait par le directeur de comptes. Il fait une estimation du prix de revient de la pièce, choisit la machine qui va usiner la pièce et définit les temps d'usinage. C'est ici que l'orientation première des défis à relever est donnée, car rentrer dans les temps fixés n'est pas toujours facile.

2.2.2 La revue de contrat

La revue de contrat est une étape complémentaire à la soumission. Elle permet de ressortir toutes les similarités et les différences par rapport aux pièces déjà usinées. Elle permet d'apporter une correction sur les temps alloués à la fabrication de la pièce.

2.2.3 La présentation du projet à l'équipe de conception

Cette étape permet de montrer à tous les intervenants principaux à l'usinage de la pièce, les similarités et les différences majeures par rapport aux pièces usinées, de spécifier les grandes

lignes de la manière dont la pièce sera usinée. Le programmeur, à partir de ce moment, se charge d'obtenir les capacités de l'usine pour l'usinage de la pièce.

2.2.4 La présentation pré-développement

La présentation pré-développement est une étape de mi-parcours. Elle donne l'occasion au programmeur de présenter la gamme d'usinage choisie, tout en justifiant ses choix. Elle permet aussi de vérifier l'état des opérations annexes comme les méthodes et moyens d'inspection choisis, l'isostatisme des pièces lors de l'usinage ou de l'inspection et la norme d'échantillonnage de l'inspection des dimensions. Cette étape permet aussi d'identifier les sources probables de complications et d'anticiper sur celles-ci.

2.2.5 La présentation pré-production

L'étape de présentation pré-production permet un réglage et un contrôle final avant la production. Elle permet de valider tous les paramètres qui interviennent dans la bonne marche de tout le processus d'usinage. Cette étape est importante car elle est la dernière avant le lancement de la production à l'usinage. Plutôt une erreur est trouvée moins elle coûte à l'entreprise; raison pour laquelle cette étape est importante.

2.2.6 La présentation post-production

L'étape de présentation est cruciale pour l'usinage prochaine des pièces similaires ou ayant des caractéristiques semblables. Ici on fait l'évaluation des performances du procédé, on compare les différents temps d'usinage et on fait les ajustements nécessaires.

L'ordonnancement de la fabrication des pièces suit l'étape de l'usinage dans l'atelier par des machinistes chevronnés. L'observation de leur poste de travail et des activités menées pendant l'usinage a fait partie de notre étude.

2.3 Observations des postes de travail chez APN Inc.

La recherche commence par l'observation, c'est la raison pour laquelle ce projet débute par l'observation des postes de travail. Durant ce projet, au moins un poste de travail de chaque secteur de fabrication de l'entreprise a été observé. Les critères d'observation sont les suivants:

- préparation de la production;
- préparation du Setup;
- déroulement d'un Setup;
- aménagement du poste de travail;
- standardisation des procédures dans un poste de travail;
- les actions menées pendant la production et pendant un Setup;
- disponibilité et repérage des outils;
- fiabilité du procédé;
- fiabilité du programme;
- les difficultés rencontrées par les machinistes;
- chronométrage de certains temps de cycle;
- déplacements des machinistes pendant la production ou pendant le Setup;
- le système de transfert de quart.

Cette observation a permis de mieux comprendre la raison du gaspillage de temps et pouvoir faire des propositions et des suggestions. Pour ce qui est de la préparation de la production ou des Setup, des questions ont été posées et les réponses reçues ont guidé les études, analyses et propositions. Des propositions ont été faites suite à l'observation des postes de travail. Elles sont mentionnées plus loin.

2.3.1 Faiblesses d'un poste de travail

Un poste de travail est un endroit où le machiniste opère. Il inclut tout l'espace alloué au machiniste pour mener à bien l'usinage d'une pièce. Après observation, nous avons remarqué deux faiblesses majeures qui sont:

- disponibilité, rangement, repérage et accessibilité de l'outillage;
- propreté et ordre sur la table.

Ces deux faiblesses engendrent des pertes de temps incommensurables lors de l'usinage des pièces. Il incombe donc de remédier à cette situation qui apportera des gains significatifs en terme de temps et donc d'argent.

2.3.2 Forces d'un poste de travail

APN Inc. est une entreprise qui vise à devenir une entité majeure voire incontournable dans le domaine de l'usinage de divers matériaux et des pièces complexes de très grandes précisions. Pour y arriver, l'entreprise est équipée des machines et de l'outillage à la fine pointe de la technologie. Son parc machine est constitué des tours et des fraiseuses numériques haut de gamme, des CMM ultras modernes, des outils de mesure tout comme un système de suivi de l'usinage très sophistiqué. La santé et la sécurité des employés ne sont pas laissées pour compte.

Les dirigeants de l'entreprise APN Inc. ont un souci pour la santé et la sécurité de leurs employés. Pour cela, un système de ventilation pour l'évacuation des micros et nano particules est implanté. L'espace de travail est assez grand pour faciliter les mouvements du machiniste.

Les machines travaillent avec des programmes CNC reçus. Les programmes viennent de la direction de recherche, développement et performance d'usinage.

2.4 Étude et analyse du travail des programmeurs CNC

La programmation des parcours d'outils est faite par des programmeurs CNC hautement qualifiés. Dans leur fonction, ils doivent:

- choisir la gamme d'usinage;
- programmer l'usinage de la pièce selon la gamme choisie;
- choisir et programmer l'usinage du bridage de la pièce, lors de l'usinage CNC;
- programmer l'usinage du bridage de la pièce lors de l'inspection à la CMM;
- remplir certaine paperasse liée au comportement de la pièce;
- faire le support pour l'amélioration des programmes;
- etc.

La programmation CNC est faite automatiquement avec l'aide d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) appelé FeatureCam. Ce logiciel possède plusieurs avantages et des limites majeures. Comme limite, on peut citer – l'impossibilité de simuler la machine réelle, ou encore l'impossibilité de connaître l'emplacement d'un outil donné, monté sur la machine réelle. La difficulté à avoir les informations citées plus haut rend assez difficile le travail d'optimisation des programmes par les programmeurs et la réduction considérable du temps de calibration en ne montant qu'un nombre minimal d'outils.

2.4.1 Interaction programmeur-machiniste

Dans la bonne marche de toute entité dans laquelle interagissent plusieurs membres, une bonne synergie doit être élaborée pour permettre d'être plus productif. En ce qui concerne l'interaction entre les programmeurs et les machinistes à APN Inc., la ligne de conduite est la suivante: le programmeur est chargé de programmer les pièces. Ensuite le machiniste reçoit le programme, le télécharge dans sa machine et essaye d'usiner les pièces avec ce programme. Si le machiniste trouve des erreurs de programmation, il se réfère à son leader de secteur qui vérifie avec lui la véracité des faits. S'il advient qu'il y'a nécessité de changements, le machiniste rempli une feuille de changements avec tous les changements

voulus et transmet la feuille à son leader de secteur. C'est au leader de secteur de remettre la feuille de changements soit au programmeur, soit au directeur recherche, développement et performance d'usinage. Si la conception trouve les changements pertinents, le programme est changé puis reposté au poste du machiniste. Mais si la conception ne trouve pas les changements nécessaires, une séance d'explication est faite pour éclairer le machiniste des raisons de la programmation telle que faite. La figure 1.2 schématise bien tout ce processus.

Vu que le logiciel FAO utilisé ne permet pas une simulation réelle de la machine, il revient au machiniste d'assigner le numéro d'outil et le numéro de l'offset qui seront utilisés. Il lui revient aussi de faire une optimisation du programme. Le plus souvent, cette optimisation se limite à la synchronisation des opérations qui seront faites sur les broches principales et secondaires.

Les programmeurs travaillent en fonction des priorités de travail. Cette priorité est définie par le directeur recherche, développement et performance d'usinage. Tout ceci se fait pour maintenir un flux optimal des travaux sur les machines.

2.5 Flux de travail

La maîtrise du flux du travail permet une occupation optimale des machines de la ligne de production. Dans l'entreprise, c'est le directeur de production qui détermine les priorités des pièces à usiner. À chaque jour ou à chaque semaine, une feuille de priorité est remise au leader de secteur qui l'affiche sur la machine concernée. La feuille de priorité numérise l'ordre des pièces à usiner. Elle permet au machiniste de connaître les pièces qu'il va usiner – donc d'avoir une meilleure préparation. Il peut monter les outils dans une logique optimisant le temps de changement lors du démarrage de l'usinage de la pièce suivante.

Les pièces sont entièrement usinées sur la même machine-outil à commande numérique (dans le cas précis Tour à Commande numérique (TCN)). Les opérations d'ébavures et de polissage sont les seules qui sont effectuées dans un autre poste.

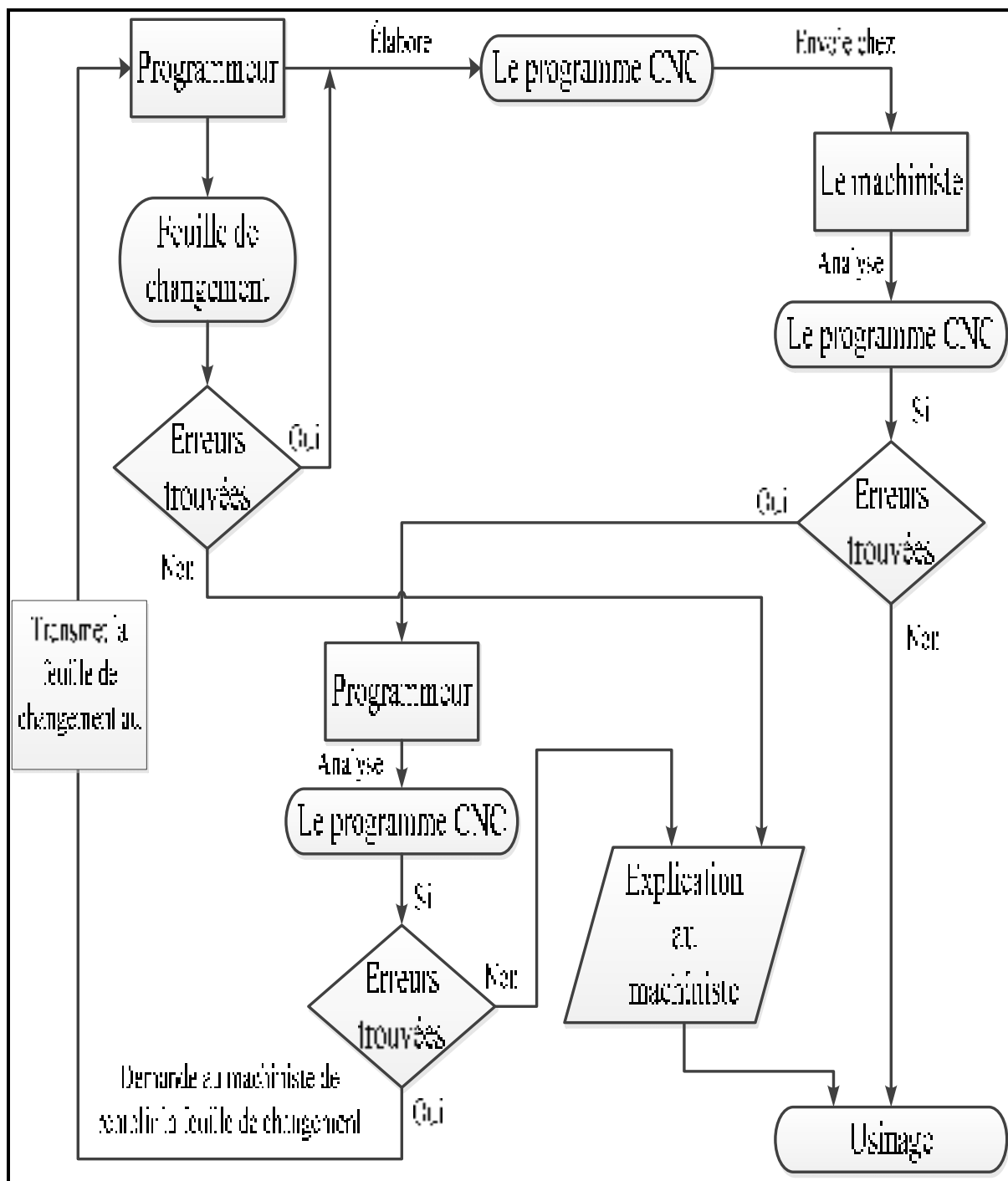


Figure 2.2. Interaction programmation – usine

2.6 Conclusion

La présentation et l'analyse des pratiques industrielles de l'entreprise APN Inc., permet de non seulement situer le contexte dans lequel la société opère, mais aussi de mieux comprendre les besoins et les attentes de celle-ci. La principale faiblesse de la société reste dans l'optimisation du processus d'usinage. Les manquements au niveau du processus de production augmentent le temps de mise en production du produit, les erreurs pendant la production et rendent difficile le contrôle du procédé.

Pour atteindre un résultat positif escompté et arriver à avoir une chaîne de production à flux continu, l'entreprise doit revoir la qualité des tâches à chaque étape, la qualité des différents intervenants dans tout le processus et créer des outils d'aide à la décision. Comme outil d'aide à la décision, nous avons élaboré une base de données qui reflète non seulement la manière actuelle de programmer les pièces, mais aussi ressorti les meilleures pratiques.

CHAPITRE 3

CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES DES MEILLEURS PARCOURS D'OUTILS

3.1 Collecte des informations

La société APN Inc. a opté pour une étude et une programmation des pièces par caractéristique. Une caractéristique représente une forme spécifique, ayant certains éléments particuliers et se trouvant à une certaine position par rapport à un centre d'orientation donné. On distingue ainsi les formes qui nécessitent des opérations d'usinage intérieur (trou central) ou extérieur. Les formes qui nécessitent des opérations d'usinage intérieur comme le centrage, le perçage, l'alésage et le chanfreinage constituent les caractéristiques A. On distingue différentes caractéristiques A selon les particularités de forme du trou central. Comme toutes les pièces usinées ont un hexagone, les formes se trouvant à gauche de l'hexagone sont les caractéristiques B, celles se trouvant à droite de l'hexagone les caractéristiques D et les formes qui constituent l'hexagone sont les caractéristiques C. Une représentation graphique est illustrée à la figure 3.1. Selon les particularités de forme (exemple présence ou absence du filet, du chanfrein ou de la gorge), on distingue plusieurs caractéristiques B et D. Notre étude s'est appuyée sur la base de données des différentes caractéristiques existantes dans le catalogue de l'entreprise APN Inc. Nous avons simplement participé à l'améliorer. La collecte des données s'est faite sur la manière de programmer chaque caractéristique.

Notre étude a été restreinte aux productions ayant un volume de plus de 100 pièces par an. L'organisation de la collecte des données doit avoir une assez grande précision et une énorme fiabilité. Pour obtenir une collecte des données fiables et précise, notre travail a été orienté vers l'obtention des informations capitales à l'optimisation d'un procédé d'usinage. L'obtention des informations recherchées s'est faite grâce à une bonne structuration de la collecte des données.

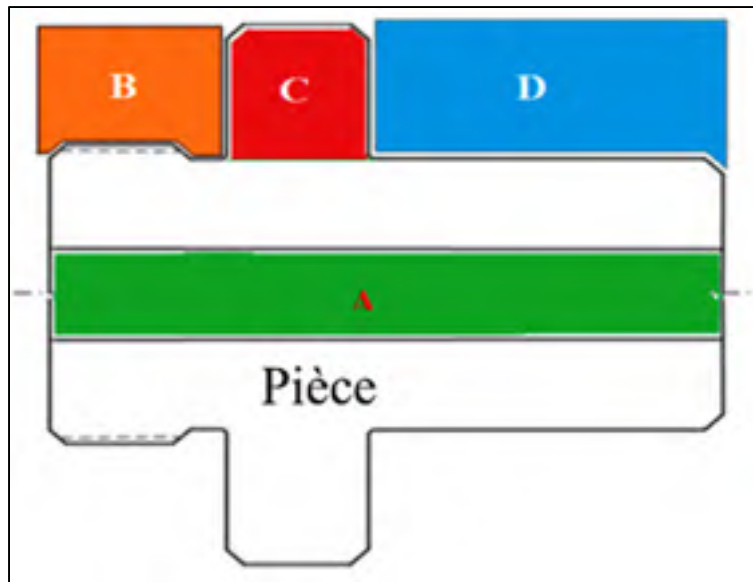


Figure 3.1 Représentation des caractéristiques d'une pièce (APN, 2015a)

3.1.1 Structure de la collecte des données

La structure de collecte des données nous a permis d'avoir les informations suivantes:

1. Le nom de la pièce;
2. La liste des outils:
 - a. Les paramètres de l'outil de coupe;
 - b. Usinage réalisé;
 - c. Les paramètres de coupe programmés et du catalogue;
 - d. Taux d'enlèvement de matière (calculé);
 - e. Pression du lubrifiant;
 - f. Temps d'usinage théorique.

3.1.2 Justification des informations de la structure de collecte des données

La pertinence des informations inscrites dans la structure de collecte des données est motivée par l'utilisation future des dites données.

1. Le nom de la pièce – permet l'identification de la manière dont les pièces ou les caractéristiques semblables sont programmées.
2. Les paramètres des outils de coupe utilisés – permettent de faire une étude si l'outil utilisé respecte les conditions optimales pour effectuer la tâche désignée.
3. L'usinage réalisé par l'outil permet d'avoir la suite des étapes d'usinage et voir si l'ordonnement est optimal.
4. Les paramètres de coupe programmés et ceux du catalogue – permettent de se situer par rapport au comportement de l'outil suite aux prescriptions du fabricant des outils.
5. Le taux d'enlèvement de matière – permet de conclure sur la productivité de l'opération.
6. La pression du lubrifiant – permet de mieux déterminer les causes des usures des plaquettes.
7. Le temps théorique d'usinage – permet de choisir le parcours d'outils optimal.

3.2 Exploitation de la collecte des données

L'analyse des données collectées nous a permis de faire deux études et analyses à savoir:

- une analyse sur les différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue;
- une analyse sur la différence entre les paramètres programmés des caractéristiques semblables ou des pièces semblables.

3.2.1 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques A

Les caractéristiques A ont une particularité d'être le trou centrale. Les outils de coupe les plus utilisés pour usiner les différentes caractéristiques A sont:

- le foret à centrer pour faire un avant trou de guidage;
- le foret à la dimension du trou à percer ou pour faire un avant trou;

- un outil à aléser – l'entreprise utilise le plus souvent la barre à aléser et les Piccos.

Notre étude comparative s'est faite en regroupant les outils de coupe en deux groupes à savoir les forets et les outils à aléser.

3.2.1.1 Étude comparative des conditions de coupe programmées vs celles du catalogue – forets

- Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des forets par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés sur le tableau 3.1 suivant:

Tableau 3.1 Analyse des vitesses d'avance programmées des forets par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	49,44%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	34,83%
égales aux vitesses minimales du catalogue	15,73%
Total	100,00%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	83,1%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	13,5%
égales aux vitesses maximales du catalogue	3,4%
Total	100,0%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.2.

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des forêts par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.2 suivant:

Tableau 3.2 Analyse des vitesses de coupe programmées des forêts par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses de coupe du catalogue	60,34%
supérieures aux vitesses de coupe du catalogue	39,66%
égales aux vitesses de coupe du catalogue	0,00%
Total	100,00%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.3.

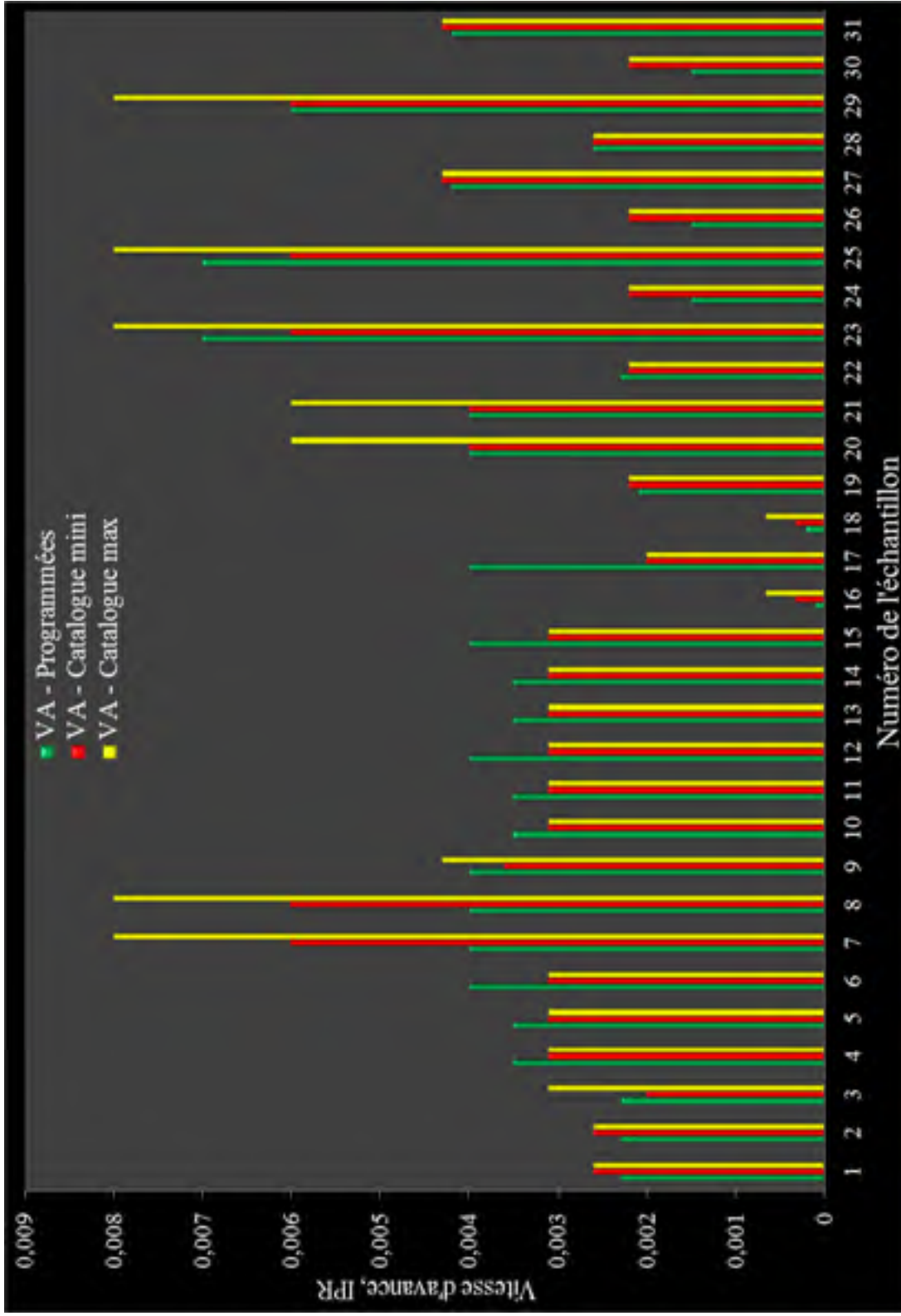


Figure 3.2 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forêts.

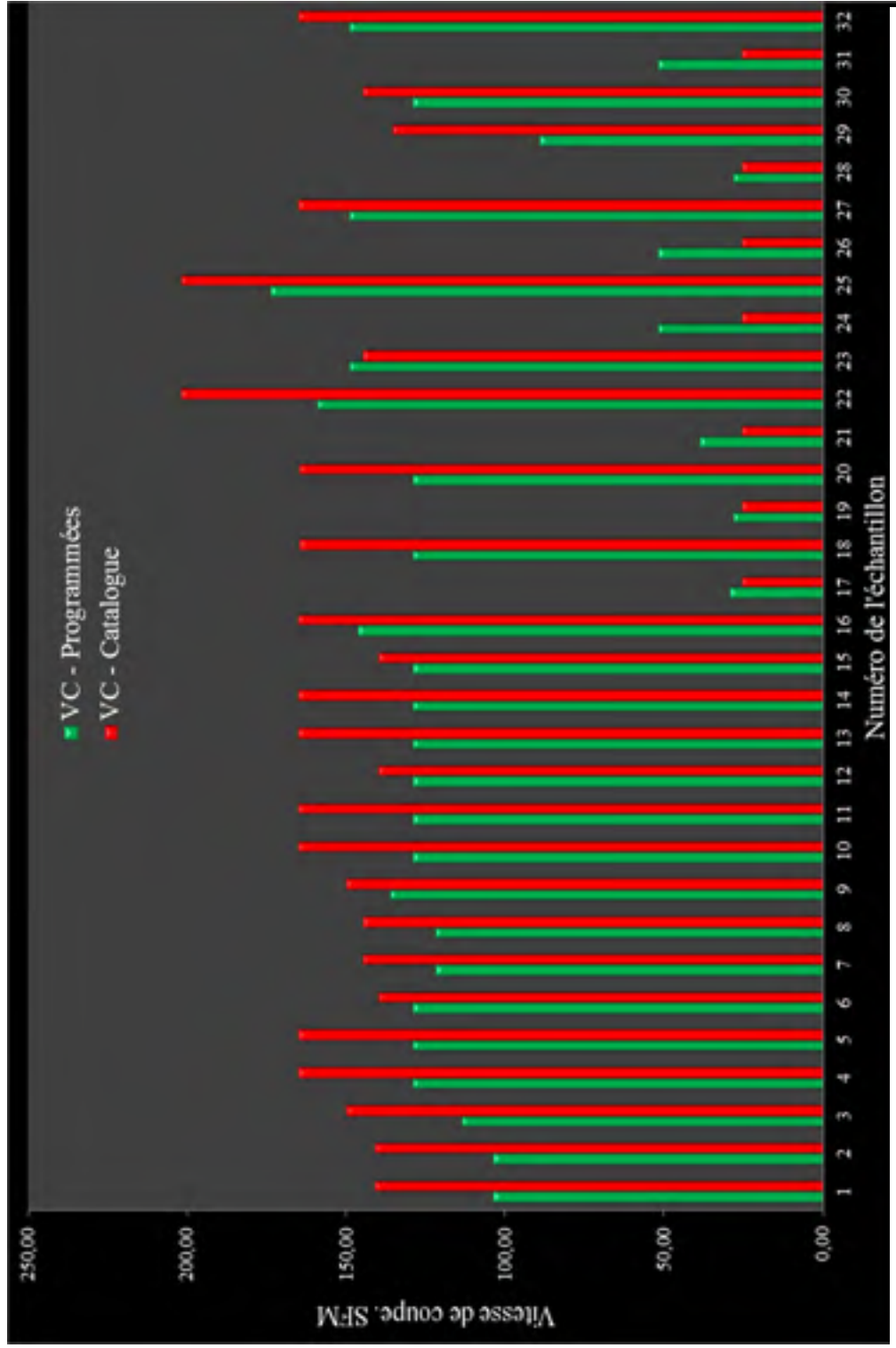


Figure 3.3 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forêts.

3.2.1.2 Étude comparative des conditions de coupe programmées vs celles du catalogue – barre à aléser

➤ Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des barres à aléser par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.3 suivant:

Tableau 3.3 Analyse des vitesses d'avance programmées des barres à aléser par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	55,06%
égales aux vitesses minimales du catalogue	11,24%
Total	66,29%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	18,0%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	48,3%
égales aux vitesses maximales du catalogue	0,0%
Total	66,3%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.4

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des barres à aléser par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.4 suivant:

Tableau 3.4 Analyse des vitesses de coupe programmées des barres à aléser par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses de coupe minimales du catalogue	87,67%
supérieures aux vitesses de coupe minimales du catalogue	12,33%
égales aux vitesses de coupe minimales du catalogue	0,00%
Total	100%
inférieures aux vitesses de coupe maximales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses de coupe maximales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses de coupe maximales du catalogue	0,00%
Total	100%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.5

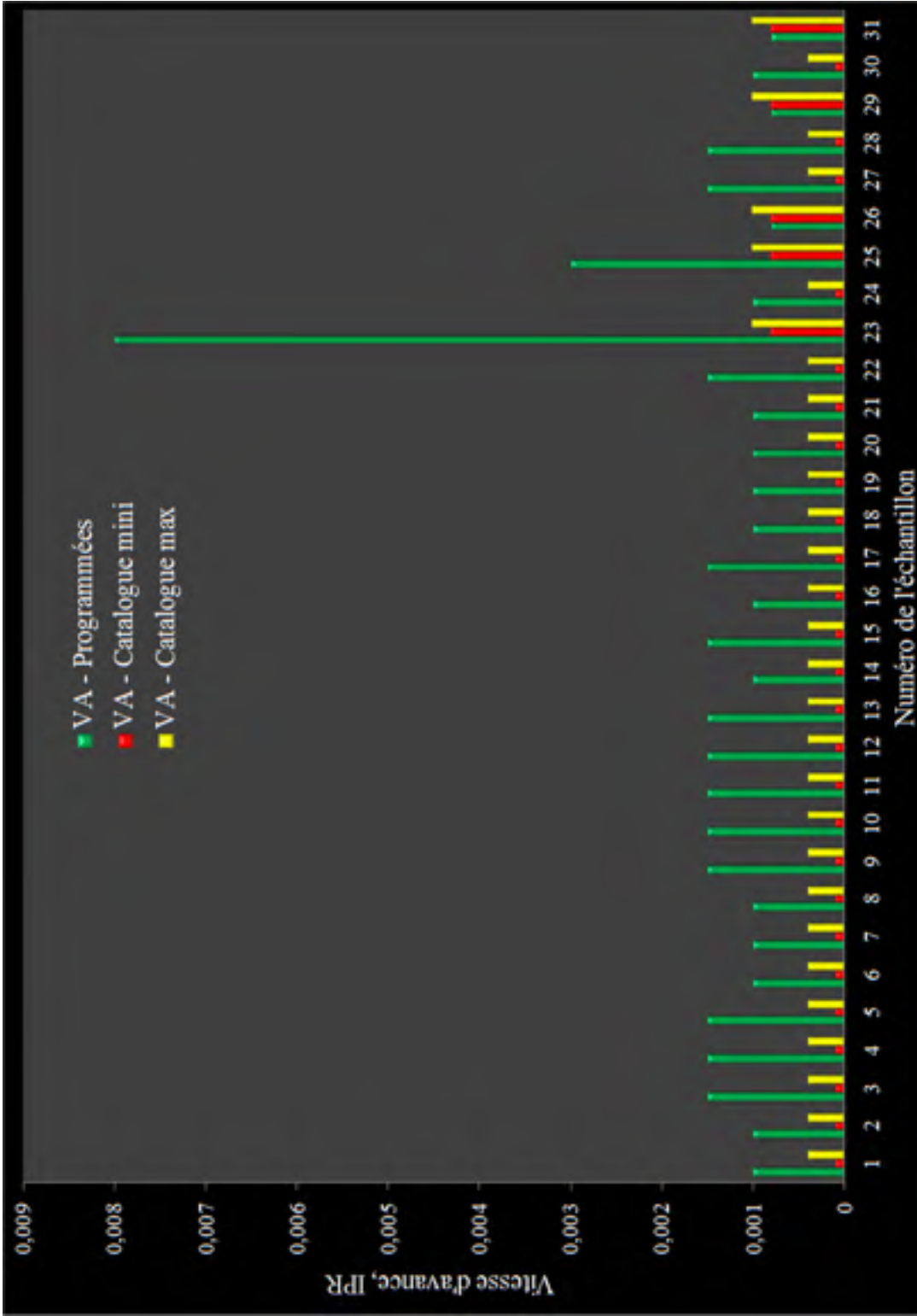


Figure 3.4 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les barres à aléser.

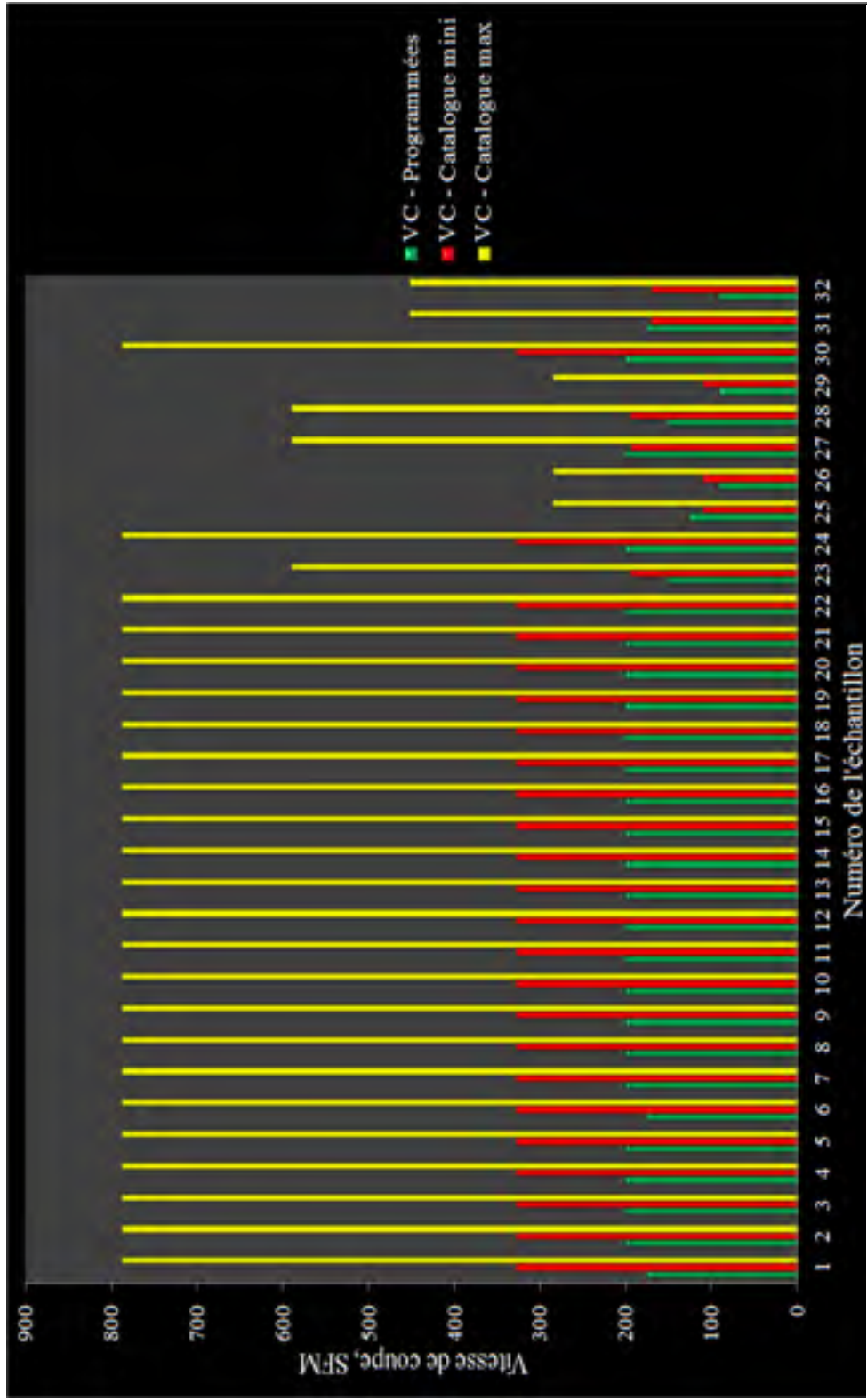


Figure 3.5 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les barres à aléser.

3.2.2 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques B et D

Les caractéristiques B et D se distinguent par le fait qu'ils représentent le tournage extérieur. Les particularités des caractéristiques B et D sont marquées par la présence ou l'absence de certaines formes. Les outils les plus utilisés pour usiner les caractéristiques B et D sont:

- les outils de tournage d'ébauche (appelés outils de 80 et 55 degré);
- les outils de tournage de finition (appelés outils de 35 degré);
- les outils de filetage extérieur.

3.2.2.1 Outils d'ébauche de tournage extérieur (80 et 55 degré)

Les outils d'ébauches servent le plus souvent à enlever le plus de matériaux le plus rapidement possible. Ils servent à augmenter la productivité d'un procédé d'usinage. Notre étude s'est limitée aux vitesses d'avance et de coupe.

Ils sont appelés outils de 80 et 55 degré car ces chiffres représentent leur angle de pointe.

- Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.5 suivant:

Tableau 3.5 Analyse des vitesses d'avance programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont:	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	100,00%
égales aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
Total	100,00%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	75,9%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	20,4%
égales aux vitesses maximales du catalogue	3,7%
Total	100,0%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.6

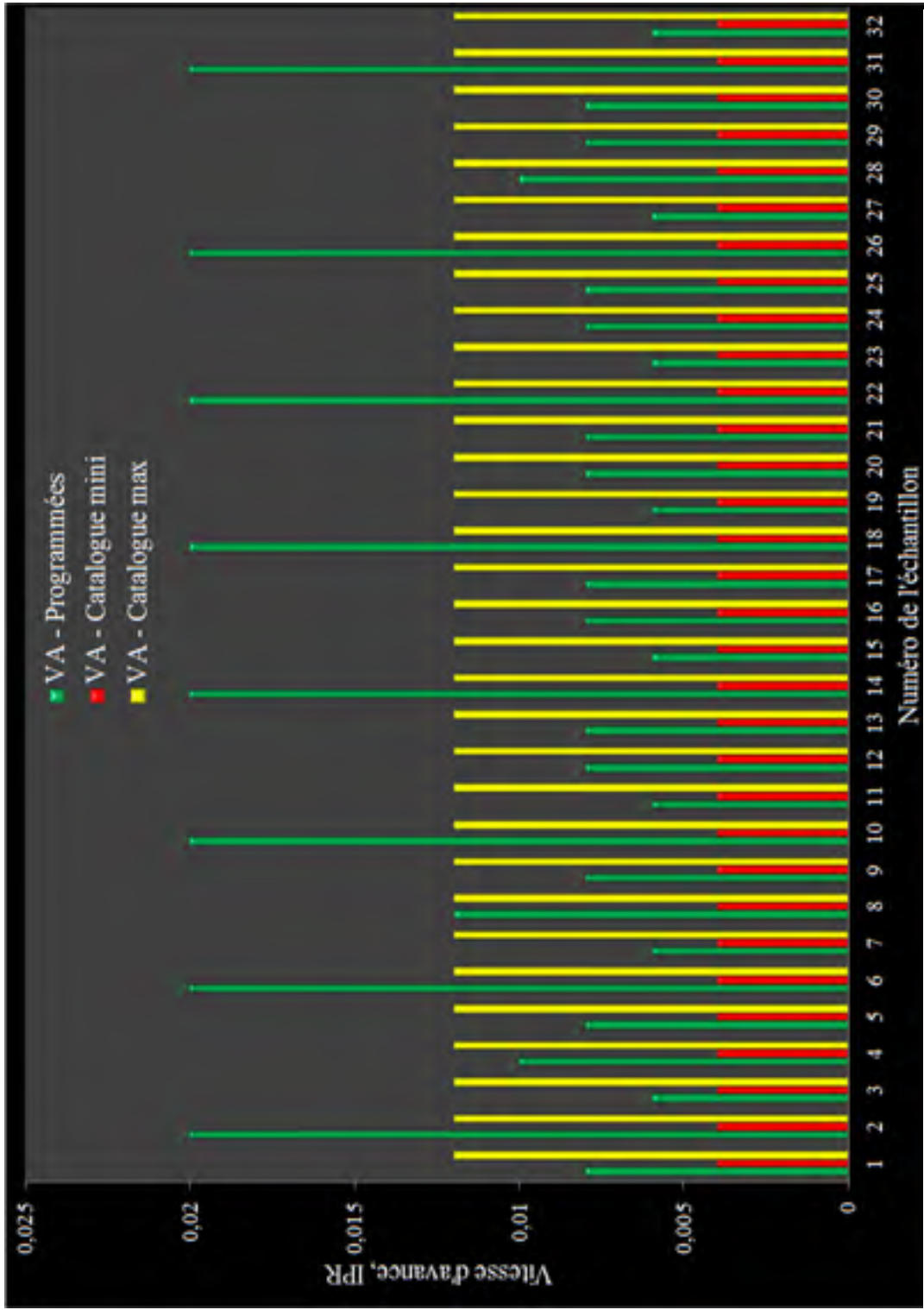


Figure 3.6 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les outils de 80 et 55 degré.

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés sur le tableau 3.6 suivant:

Tableau 3.6 Analyse des vitesses de coupe programmées des outils d'ébauche de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
Total	100%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
Total	100%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.7.

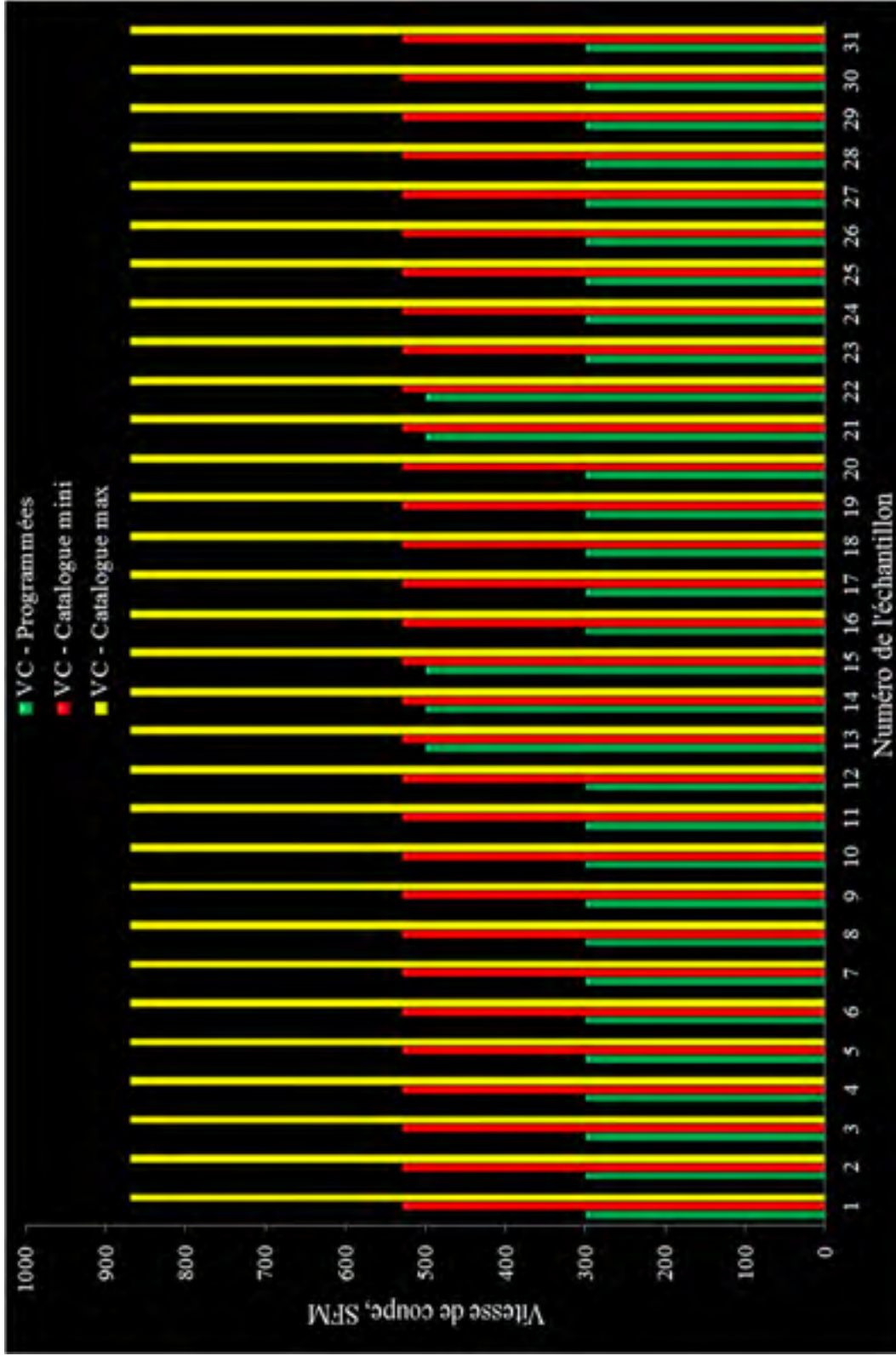


Figure 3.7 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de 80 et 55 degré.

3.2.2.2 Outils de finition (35 degré)

Les outils de tournage extérieur appelés outils de 35 degré (valeur de son angle de pointe) sont le plus souvent utilisés pour les opérations de finition, quand on veut respecter les contraintes dimensionnelles et d'état de surface. Comparativement aux outils d'ébauche qui agissent plus sur la productivité, celles-ci agissent sur la qualité des produits. Notre étude s'est limitée aux les vitesses d'avance et de coupe.

➤ Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.7 suivant:

Tableau 3.7 Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont:	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	72,91%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	25,12%
égales aux vitesses minimales du catalogue	1,97%
Total	100,00%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	100%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	0%
égales aux vitesses maximales du catalogue	0%
Total	100%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.8.

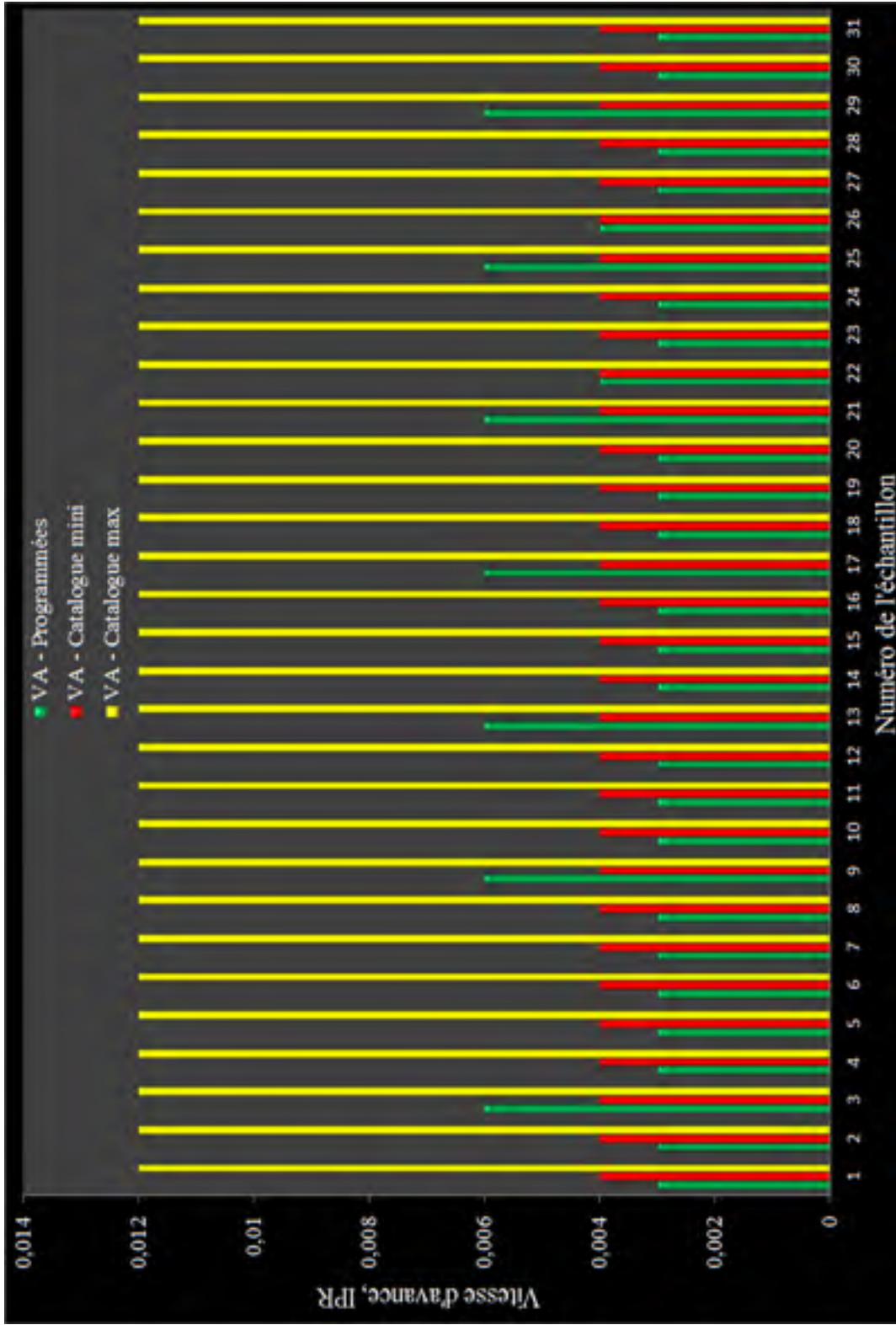


Figure 3.8 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les outils de finition 35 degré.

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.8 suivant:

Tableau 3.8 Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de finition de tournage extérieur par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont:	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	88,31%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	11,69%
égales aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
Total	100,00%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
Total	100,00%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.9.

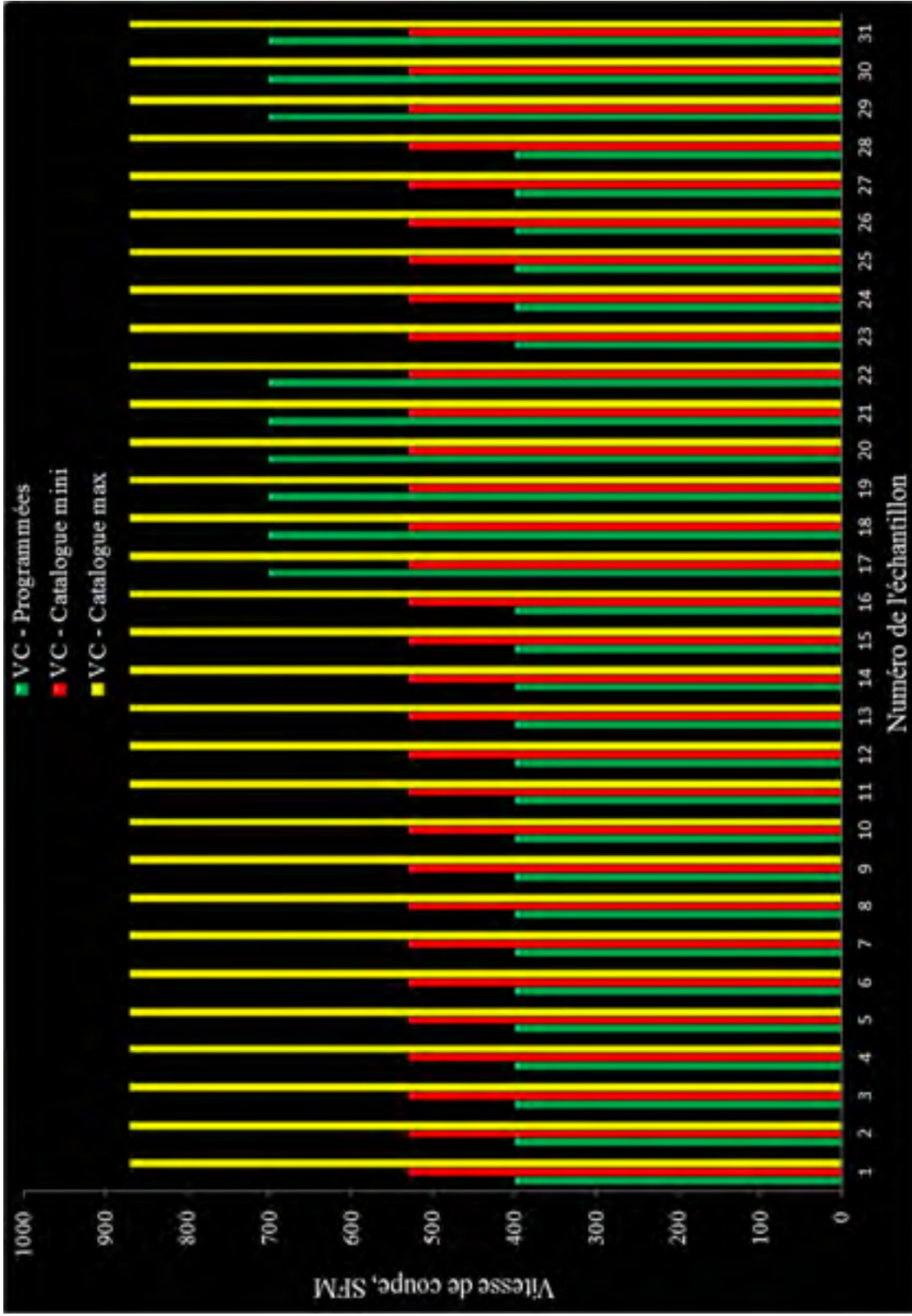


Figure 3.9 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de finition 35 degré.

➤ Outils de filetage extérieur

Les outils de filetage servent à usiner les différents filets. L'usinage du filet est une opération qui nécessite beaucoup de temps à cause du nombre de passes à réaliser pour avoir le filetage voulu.

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des outils de filetage extérieur par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.9 suivant:

Tableau 3.9 Analyse des vitesses de coupe programmées des outils de filetage extérieur par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses minimales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses minimales du catalogue	0,00%
Total	100,00%
inférieures aux vitesses maximales du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
égales aux vitesses maximales du catalogue	0,00%
Total	100,00%

La représentation graphique de l'étude comparative est montrée à la figure 3.10.

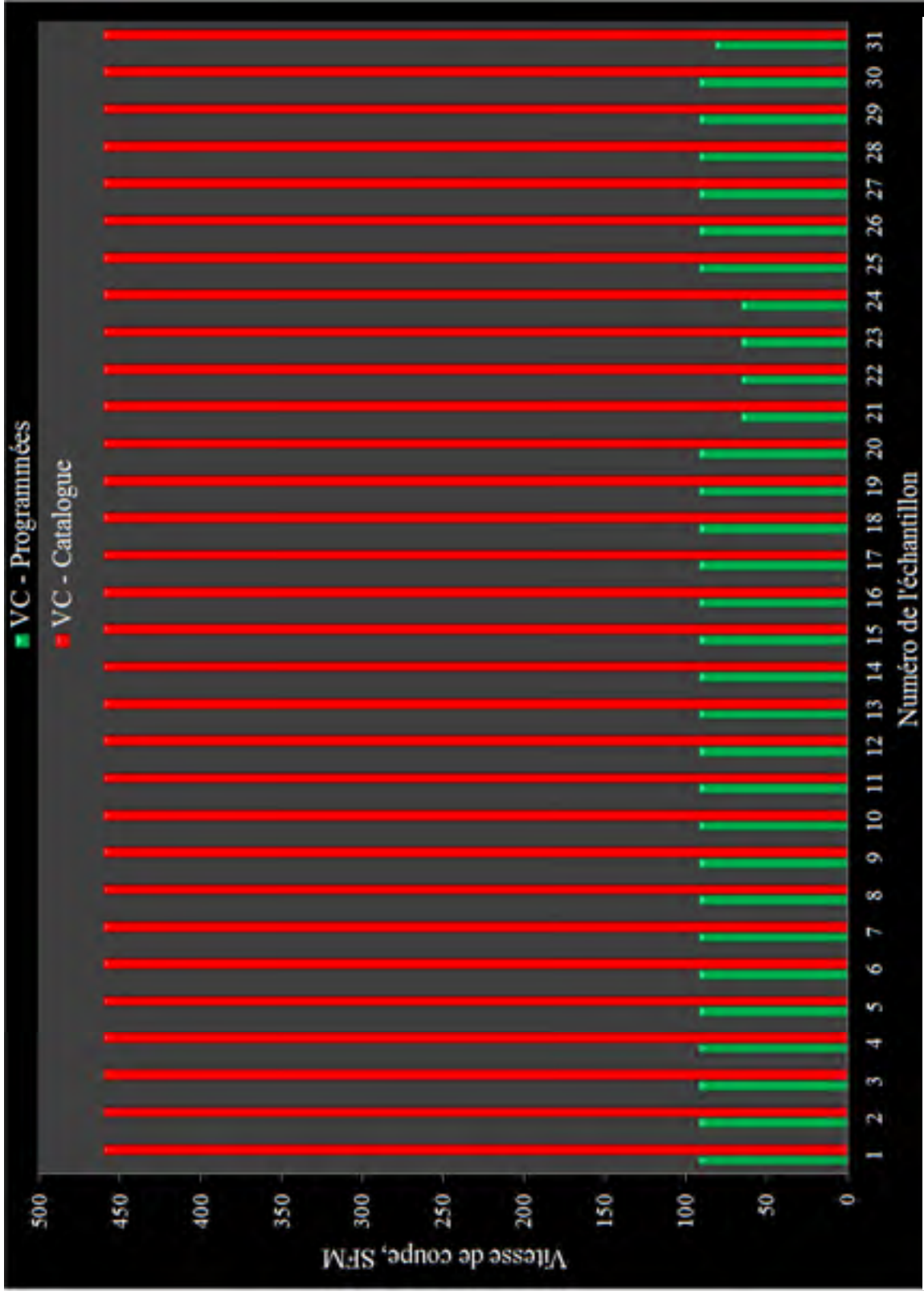


Figure 3.10 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les outils de filetage extérieur.

- Le nombre de passes

Le nombre de passe à effectuer pour obtenir un filet influence largement la productivité et la qualité du filet. Il est primordial de choisir une méthode productive qui réalise un filet de très grande qualité. Dans notre étude et analyse, nous avons constaté que le nombre de passes utilisées est en moyenne trois fois supérieur à celui proposé par le catalogue.

3.2.3 Analyse des différences entre les paramètres programmés et ceux du catalogue – caractéristiques C

Pour usiner les caractéristiques C (elles sont représentées par la forme hexagonale), il faut réaliser principalement une opération de contournage avec une fraise en bout. Les opérations d'usinage de méplats sont réalisées pour pouvoir centrer et percer les trous. Cette opération est réalisée s'il y a la présence des trous. Les opérations d'usinage de méplats sont réalisés avant le perçage des trous car l'entreprise a des difficultés à percer des trous sur un plan ou une surface inclinée.

Les outils étudiés pour l'usinage des caractéristiques C sont:

- les fraises en bout;
- les forets à centrer;
- les forets au diamètre voulu.

3.2.3.1 La fraise en bout

La fraise en bout est un outil de coupe utilisé pour les opérations de fraisage. Sa spécificité est qu'elle peut usiner dans toutes les directions grâce aux arêtes tranchantes qui se trouvent sur les surfaces longitudinales et inférieures.

Les conditions de coupe étudiées sont les vitesses d'avance et de coupe.

➤ Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des fraises en bout par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.10 suivant:

Tableau 3.10 Analyse des vitesses d'avance programmées des fraises en bout par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	26,88%
supérieures aux vitesses du catalogue	73,12%
égales aux vitesses du catalogue	0,00%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.11

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des fraises en bout par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés sur le tableau 3.11 suivant:

Tableau 3.11 Analyse des vitesses de coupe programmées des fraises en bout par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	97,14%
supérieures aux vitesses du catalogue	2,86%
égales aux vitesses du catalogue	0,00%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.12.

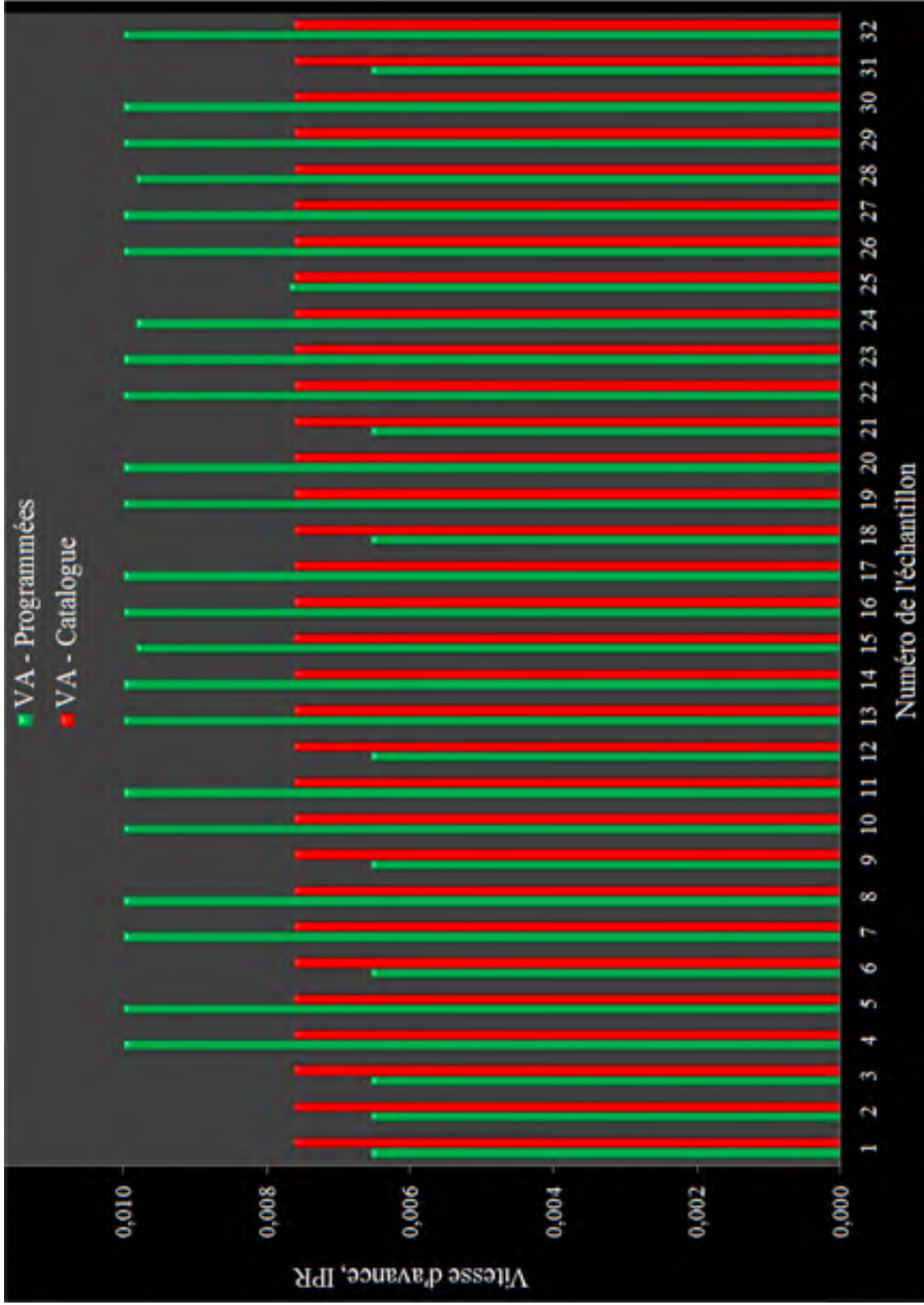


Figure 3.11 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les fraises en bout.

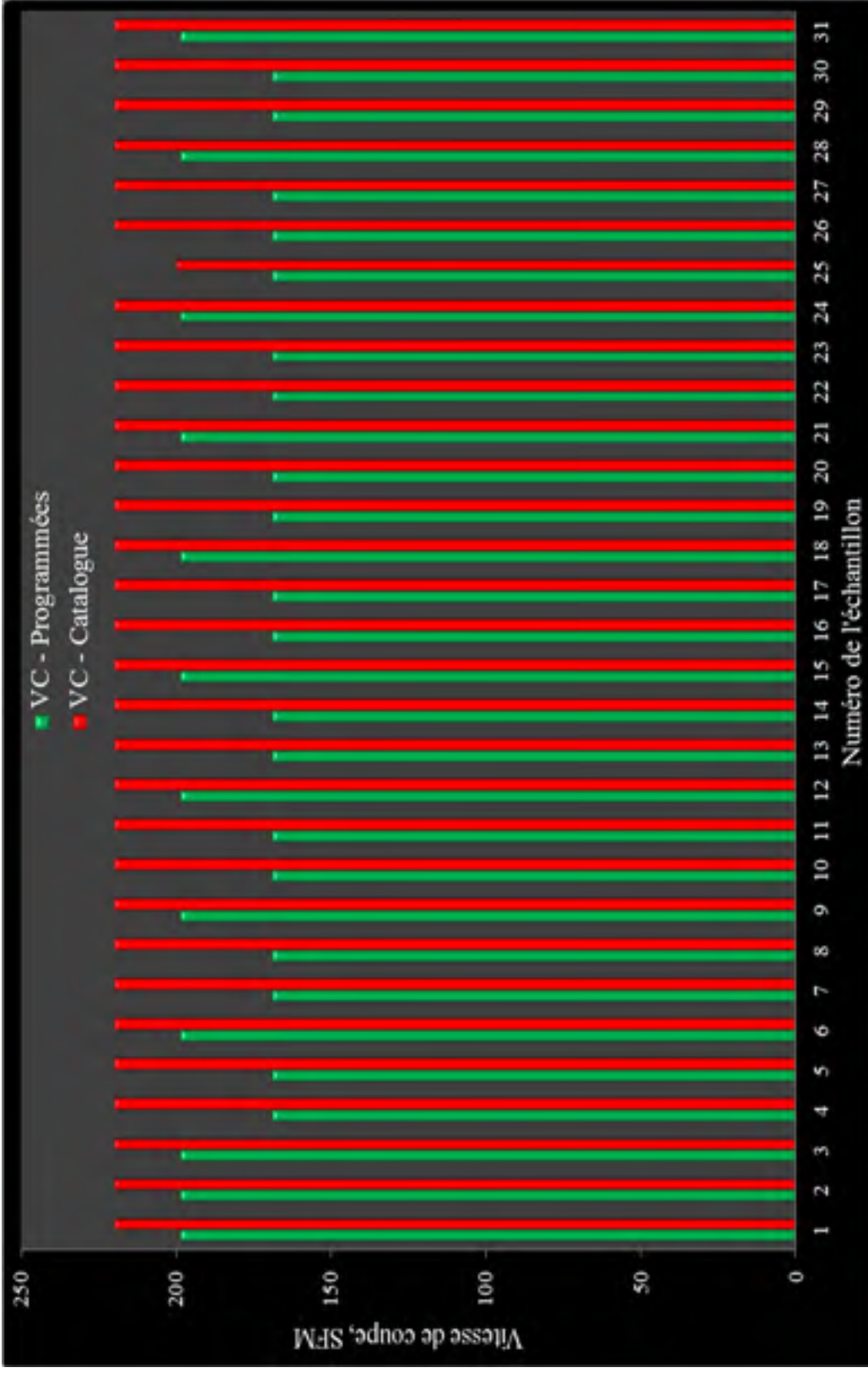


Figure 3.12 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les fraises en bout.

3.2.3.2 Les forets à centrer

Les forets à centrer est un outil de coupe qui sert à usiner des trous de guidage avec une très grande précision.

Les conditions de coupe étudiées sont les vitesses d'avance et de coupe.

➤ Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des forets à centrer par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés sur le tableau 3.12 suivant:

Tableau 3.12 Analyse des vitesses d'avance programmées des forets à centrer par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	12,90%
supérieures aux vitesses du catalogue	87,10%
égales aux vitesses du catalogue	0,00%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.13

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des forets à centrer par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.13 suivant:

Tableau 3.13 Analyse des vitesses d'avance programmées des forets à centrer par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	0,00%
supérieures aux vitesses du catalogue	87,10%
égales aux vitesses du catalogue	12,90%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.14.

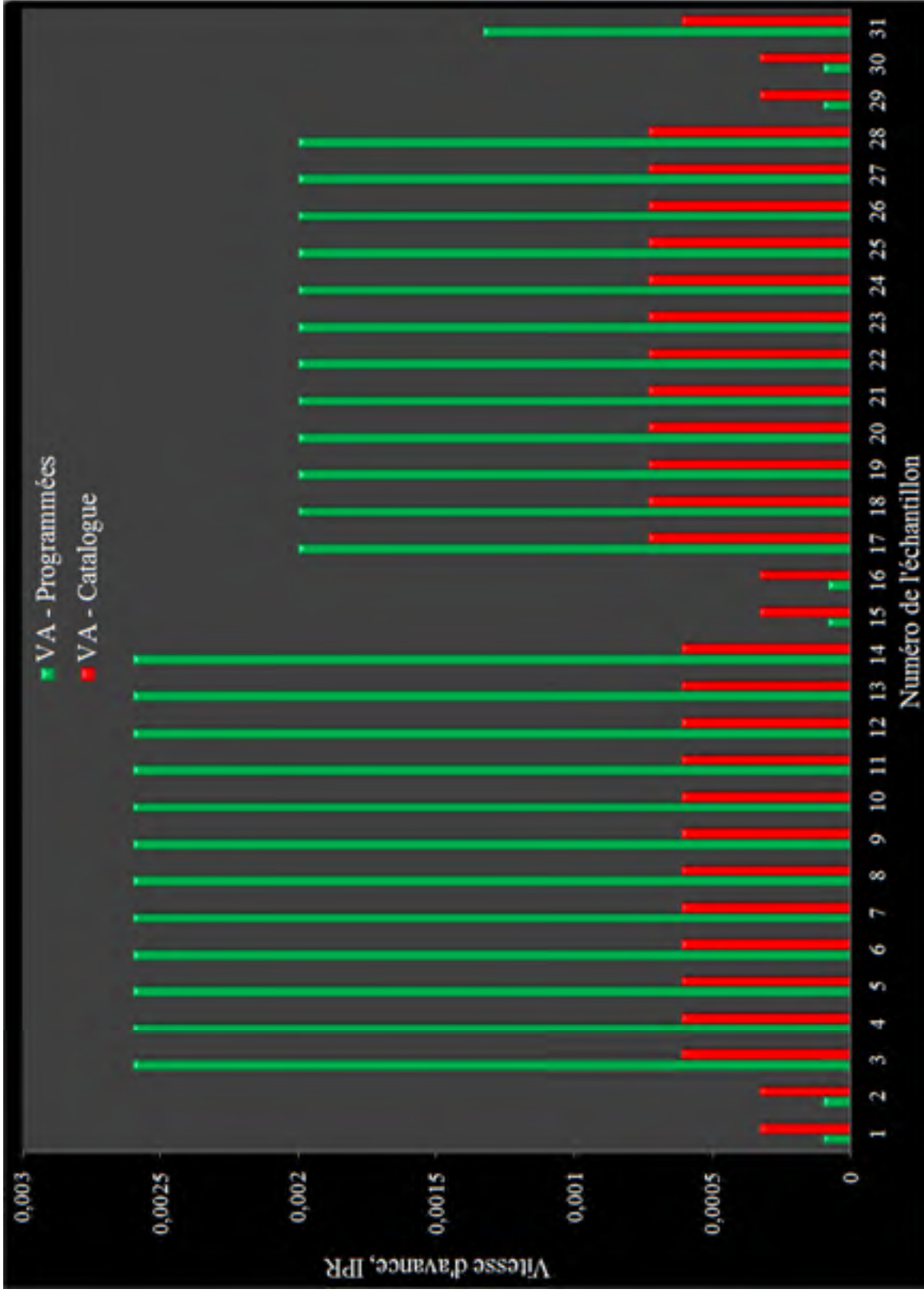


Figure 3.13 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forets à centrer.

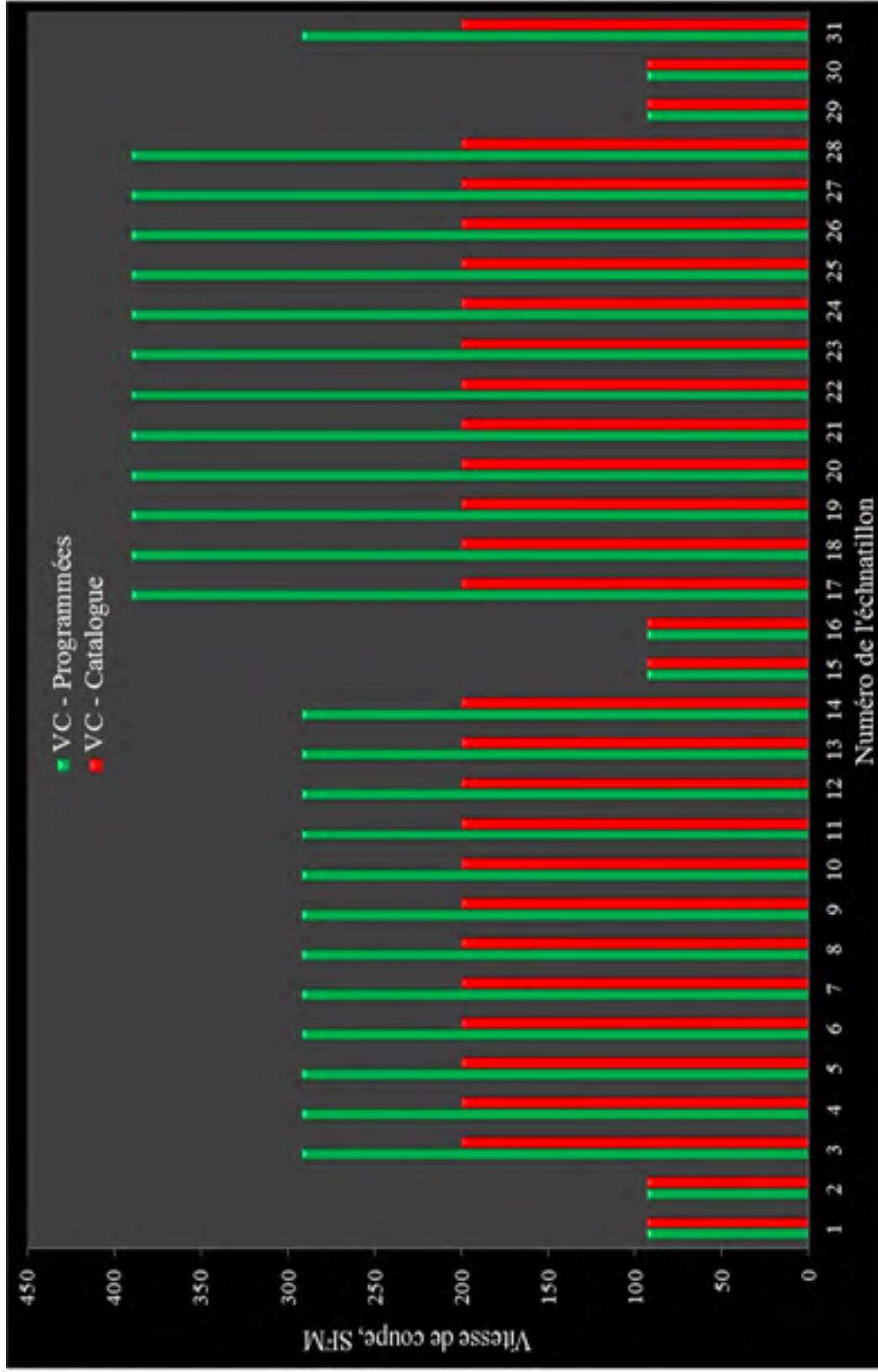


Figure 3.14 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forêts à centre.

3.2.3.3 Les forets

Les forets sont des outils de coupe utilisés pour des opérations de perçage. Chaque foret ne peut percer un trou qu'à la dimension spécifique qui est celle du diamètre de celui-ci. Ils sont aussi appelés outils de forme.

Les conditions de coupe étudiées sont les vitesses d'avance et de coupe.

➤ Vitesse d'avance

L'analyse et l'étude des vitesses d'avance programmées des forets dimensionnels par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés sur le tableau 3.14 suivant:

Tableau 3.14 Analyse des vitesses d'avance programmées des forets dimensionnels par rapport à celles du catalogue

Les vitesses d'avance programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	96,15%
supérieures aux vitesses du catalogue	3,85%
égales aux vitesses du catalogue	0,00%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.15

➤ Vitesse de coupe

L'analyse et l'étude des vitesses de coupe programmées des forets dimensionnels par rapport à celles proposées par le catalogue nous ont donné les résultats présentés dans le tableau 3.15 suivant:

Tableau 3.15 Analyse des vitesses d'avance programmées des forêts dimensionnels par rapport à celles du catalogue

Les vitesses de coupe programmées sont	Pourcentage
inférieures aux vitesses du catalogue	100,00%
supérieures aux vitesses du catalogue	0,00%
égales aux vitesses du catalogue	0,00%
Total	100,00%

Le graphique représentant les différents écarts est présenté à la figure 3.16.

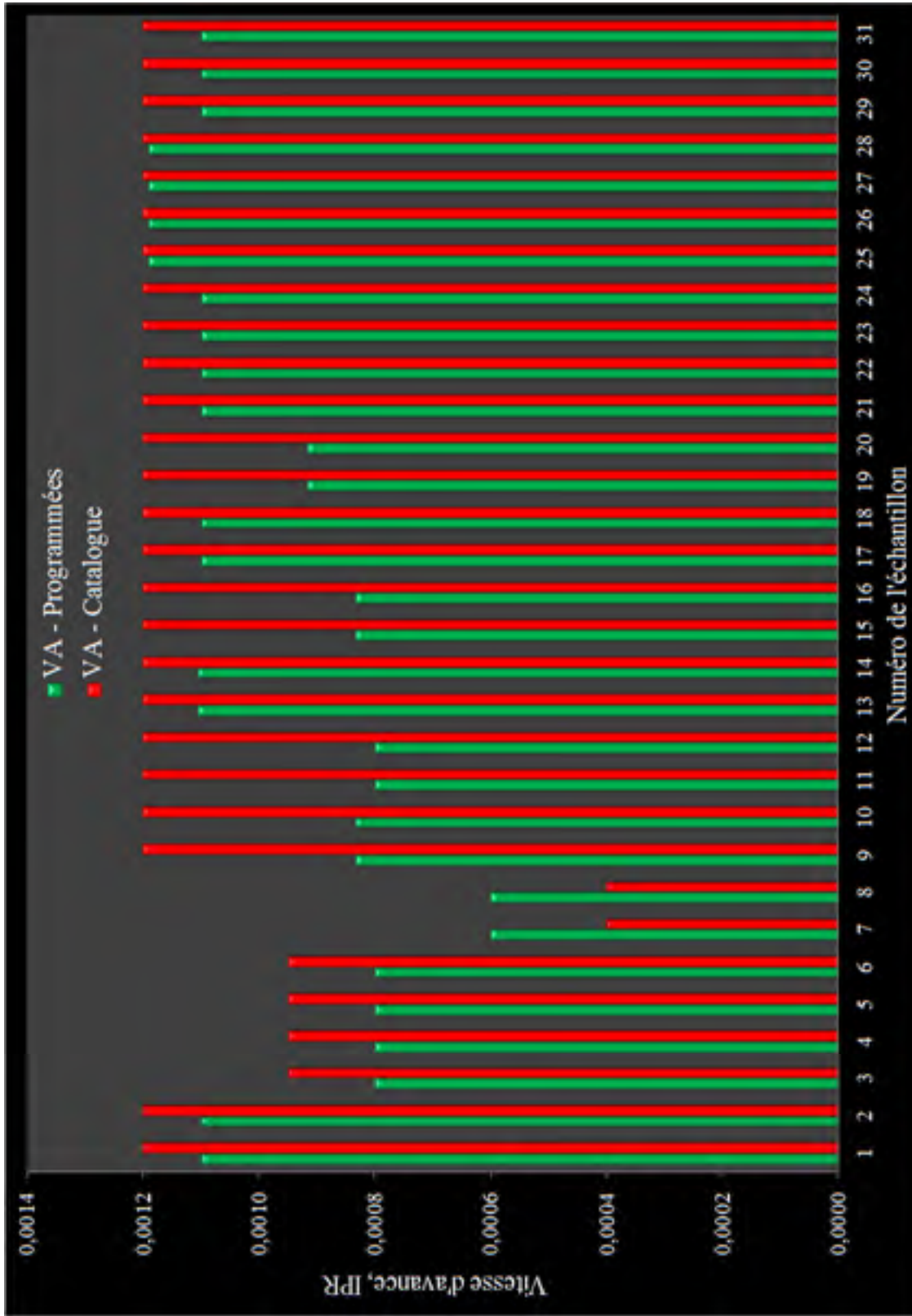


Figure 3.15 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses d'avance programmées et celles du catalogue pour les forêts dimensionnels.

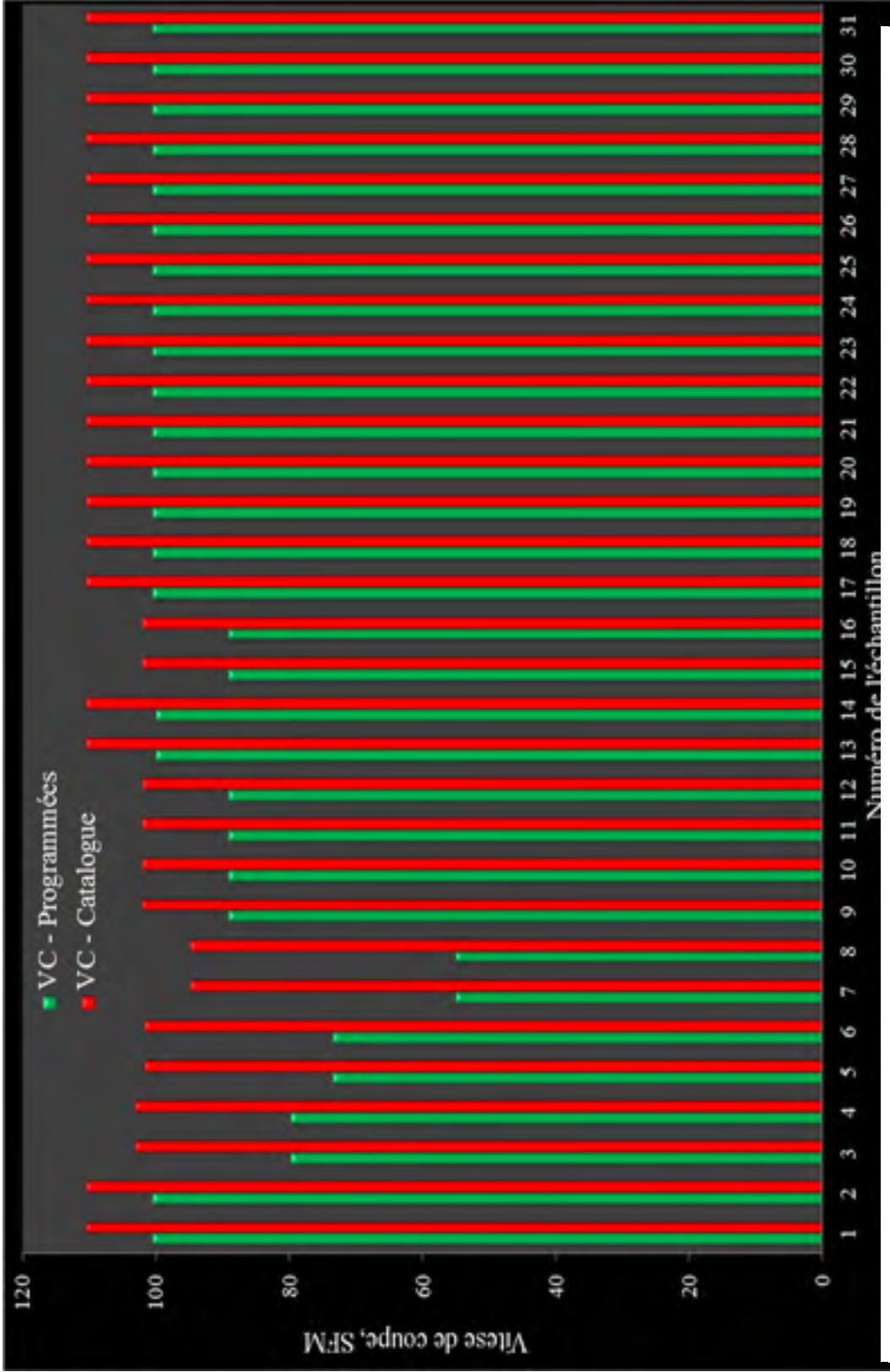


Figure 3.16 Représentation graphique de l'étude comparative des vitesses de coupe programmées et celles du catalogue pour les forets dimensionnels.

3.2.4 Analyse des différences entre les paramètres programmés des caractéristiques ou des pièces semblables

Dans cette étude, il est question de standardiser la méthode de programmer les pièces. Le but principal de cet exercice est de mettre en place une manière propre à l'entreprise pour faciliter la programmation des pièces complexes. Cette standardisation permettra aux personnes qui n'ont pas de grandes connaissances en programmation d'arriver à sortir des programmes fiables, car un des objectifs de l'entreprise est de banaliser la programmation des pièces quelle que soit leur complexité.

Pour arriver à standardiser la méthode de programmation des pièces, une étude et une comparaison de la manière dont les pièces ou les caractéristiques semblables sont programmées ont été faites.

L'étude nous a montré des différences souvent énormes au niveau des paramètres de coupe (vitesses d'avance et de coupe) pour les pièces identiques et caractéristiques identiques, des différences sur les types et le nombre des outils de coupe utilisés et enfin les différences sur l'ordonnement des opérations d'usinage.

3.3 Choix des meilleurs parcours d'outils

L'entreprise APN Inc. est une société qui a pour but d'usiner les pièces aéronautiques, civiles et militaires complexes et de très grandes qualités. Elle n'est donc pas un centre de recherche. Pour cette raison, il a été impossible de réaliser tous les essais possibles pour obtenir les parcours d'outils optimaux; c'est la raison pour laquelle la mission a été orientée pour choisir les meilleurs parcours parmi ceux qui usinent pour le moment dans l'entreprise.

Les critères suivants ont orienté notre choix à savoir:

- le taux d'enlèvement de matières;
- l'ordonnement des opérations d'usinage;

- le temps théorique d'usinage de chaque opération;
- le manque ou la présence de parcours d'outils inutiles.

De tous les critères cités, ceux qui influencent et définissent mieux la productivité du procédé sont le taux d'enlèvement de matières et le temps d'usinage.

3.3.1 Calcul du taux d'enlèvement de matière et du temps théorique d'usinage

Le calcul du taux d'enlèvement de matière et du temps théorique d'usinage dépend largement du type d'opération effectuée. Ainsi le calcul du taux d'enlèvement de matière et du temps théorique d'usinage a été effectué pour les opérations d'usinage.

3.3.1.1 Dressage

Le dressage est une opération d'usinage (de tournage) qui a pour but d'usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche.

Le taux d'enlèvement de matière encore appelé débit du copeau définit le volume de matériel enlevé par unité de temps. La formule utilisée pour le calcul du taux d'enlèvement de matière pour les opérations de dressage est la suivante:

$$MRR \approx \frac{k}{2} \times f_a \times a \times V_c \quad (3.1)$$

Le temps théorique d'usinage désigne l'unité de temps que l'outil met pour usiner toute une surface cible. La formule utilisée pour le calcul du temps théorique d'usinage est la suivante:

$$CT = \frac{(L + A)}{f_a \times N} \quad (3.2)$$

3.3.1.2 Chariotage

Le chariotage est une opération de tournage extérieur qui a pour but d'usiner une surface le long de l'axe de la broche.

Le taux d'enlèvement de matière encore appelé le débit du copeau pour les opérations de chariotage est calculé par la formule 3.3 suivante:

$$MRR \approx k \times f_a \times a \times V_c \quad (3.3)$$

Le calcul du temps théorique d'usinage pour les opérations de chariotage est effectué par la formule 3.2.

3.3.1.3 Perçage

Le perçage est une opération qui a pour but l'obtention d'un trou dans la pièce. Le trou peut être débouchant ou borgne.

Le calcul du taux d'enlèvement de matière pour les opérations de perçage est effectué avec la formule 3.5 suivante:

$$MRR \approx \frac{\pi \times D^2 \times f_a \times N}{4} \quad (3.4)$$

Le calcul du temps théorique d'usinage pour les opérations de perçage est effectué avec la formule 3.2.

3.3.1.4 Contournage

Le contournage sur un tour à commande numérique est une opération d'usinage qui utilise la fonction fraisage de cette machine-outil. Les outils utilisés sont généralement des fraises en bout.

Le calcul du taux d'enlèvement de matière pour les opérations de contournage est effectué avec la formule 3.7 suivante:

$$MRR \approx W \times a \times f_a \quad (3.5)$$

Le calcul du temps théorique d'usinage pour les opérations de contournage est effectué avec la formule 3.8 suivante:

$$CT = \frac{(L + L_A + L_0)}{f_a} \quad (3.6)$$

3.3.1.5 Rainurage

Le rainurage est une opération d'usinage qui consiste à réaliser une rainure dans une pièce.

Le calcul du taux d'enlèvement de matière pour les opérations de rainurage est effectué avec la formule 3.1.

Le calcul du temps théorique d'usinage pour les opérations de rainurage est effectué avec la formule 3.2.

3.3.2 Tableau récapitulatif des parcours optimaux

Au vu de tous les paramètres étudiés ci-dessus, un tableau sous forme de base de données des parcours d'outils optimaux par rapport à ce qui existe pour le moment au sein de l'entreprise a été élaboré. Ce tableau donne pour chaque caractéristique particulière le programme qui offre un parcours d'outils optimal.

Le côté secret entreprise de cette information ne permet pas la divulgation du tableau récapitulatif créé. Mais une version qui ne montre pas les détails classés secrets entreprise est présentée au tableau 3.16 suivant.

Tableau 3.16 Tableau récapitulatif des programmes qui ont le meilleur parcours d'outils

CARACTÉRISTIQUE A		CARACTÉRISTIQUE B/D				CARACTÉRISTIQUE C					
Caractéristique	Travail référence	Caractéristique	Côté	Filet	Travail référence	Caractéristique	Position	Nombre de trous	Travail référence		
A1		B1/D7	Gauche			C1	Milieu				
A2											
A3											
A4			Droit				C4	Milieu			
A5									Début		
A6									C5	Milieu	
A7											
A8					B2	Gauche			C3	Milieu	
A9					B3	Droit					

3.4 Conclusion

La création de la base de données des meilleurs parcours d'outils par caractéristique est une originalité propre à l'entreprise APN Inc. Cette base de données a pour but essentiel de mettre sur pied une plateforme pour arriver à banaliser la programmation des pièces complexes. Pour créer la base de données attendue, il a fallu collecter les données.

La collecte des données s'est faite par une étude et une analyse des pratiques de programmation des pièces à l'entreprise. La collecte des données a été bien structurée et une justification de la nature et de la qualité des informations retenues a été apportée. Pour une meilleure analyse des données collectées, une comparaison entre les conditions de coupe utilisées et celles programmées a été faite.

L'étude comparative des différences entre les conditions de coupe programmées et celles du catalogue a été faite pour tous les outils de coupe impliqués dans l'usinage des caractéristiques étudiées. Une représentation graphique de l'étude comparative est présentée. L'étude comparative s'est faite essentiellement sur les vitesses d'avance et de coupe et le nombre des passes pour l'usinage d'un filet. Une étude comparative sur les pratiques de programmation des caractéristiques semblables et des pièces similaires a été faite. Des différences significatives ont été remarquées entre les conditions de coupe programmées et celles du catalogue. Après les études comparatives, le choix des meilleurs parcours d'outils devait être fait.

Le choix des meilleurs parcours d'outils s'est fait selon les critères suivants: le taux d'enlèvement de matières, l'ordonnancement des opérations, le temps théorique d'usinage et la qualité des parcours d'outils. Le calcul du taux d'enlèvement de matières et du temps théorique d'usinage a été fait pour toutes les opérations qui sont effectuées pour l'usinage de chaque caractéristique. Au vu de toutes les informations recueillies une base de données des meilleurs parcours d'outils a été proposée.

CHAPITRE 4

AMÉLIORATION DU PROCESSUS DE FABRICATION

4.1 Généralités

Les recherches sur l'amélioration des procédés d'usinage remontent à Taylor, qui voulait minimiser le temps de production (Debongnie, 1993).

L'amélioration d'un processus de fabrication est la recherche rendre celui-ci meilleur. Un processus de fabrication regroupe toutes les étapes nécessaires à la fabrication d'une pièce. Les étapes nécessaires à la fabrication d'une pièce sont toutes les actions de la réception du cahier des charges du client à l'expédition des pièces bonnes vers le client. L'amélioration d'un processus de fabrication permet l'élimination de tous les temps morts dans la chaîne de production. Beaucoup d'études ont été faites concernant la réduction des temps morts d'usinage (Debongnie, 1993). Une étude démontre que les temps morts d'usinage ont sensiblement diminué et que les temps d'usinage proprement dit reprennent une part significative dans les coûts (Merchant, 1993).

En premier l'étude de l'amélioration du processus de fabrication a été orientée vers l'identification des cibles, c'est-à-dire des étapes à améliorer.

4.2 Identification des cibles

L'identification des cibles s'est faite sur les objectifs que l'entreprise APN Inc. veut atteindre. Ses objectifs principaux sont:

- l'élimination ou la réduction des pertes dans toute la chaîne de fabrication;
- l'obtention d'une production en flux continu.

Pour atteindre les objectifs cités, les cibles suivantes, au vu de leur influence sur le procédé, ont été retenues:

- les tâches effectuées dans chaque étape du procédé;
- l'organisation d'un poste de travail;
- le rôle et l'organisation du département de polissage ébavurage;
- le rôle et la qualité du transfert de quart;
- l'organigramme de la chaîne décisionnelle;
- la gestion des non-conformités.

4.3 Mode opératoire

L'amélioration paraît le plus souvent comme une action facile au vu du nombre important des méthodes et des moyens comme le Lean, Kanban, etc. L'option d'une combinaison de plusieurs méthodes et moyens a été retenue.

L'amélioration d'une cible ne doit pas rester sur les papiers. Elle doit être implémentée. Pour y arriver, le rôle de l'opérateur ou l'utilisateur de la cible ne doit pas être négligé.

Au vu de ce qui précède, l'approche basée sur les critères de gain en temps (élimination des pertes), la standardisation des pratiques industrielles et des besoins des opérateurs et des machinistes a été choisie. Cette approche permet de créer une symbiose entre les nouvelles pratiques industrielles et les machinistes (opérateurs).

4.4 Propositions d'amélioration

L'analyse et l'études des cibles cités plus haut nous a permis de faire des propositions voire de recommandations. Il faut savoir ici que l'entreprise subit actuellement une mutation à très grande vitesse. Il y'a quelques années APN Inc. n'opérait que dans les travaux d'ajustage c'est-à-dire qu'elle usinait des pièces unitaires qui ne se répétaient pas. Maintenant elle doit usiner des pièces complexes à haut volume et de très grande qualité. Au vu de la mutation

que subit l'entreprise, l'organisation des pratiques industrielles à chaque étape de la chaîne de production doit être appropriée.

4.4.1 La chaîne de développement de produit

La chaîne de production est définie ici comme les étapes principales pour l'usinage d'une pièce à savoir:

- l'étape 1 – la soumission;
- l'étape 2 – la revue de contrat;
- l'étape 3 - présentation à l'équipe de conception;
- l'étape 4 – présentation pré-développement;
- l'étape 5 – présentation pré-production;
- l'étape 6 – présentation post-production.

La première amélioration faite a été d'invertir la position de la première et de la deuxième étape. Ce qui revient à faire la revue de contrat avant la soumission. Les autres améliorations qui concernent les tâches et la qualité des intervenants à chaque étape ont été faites.

4.4.1.1 Étape 3 – Présentation à l'équipe de conception

Les actions suivantes ont été préconisées:

- ajouter le responsable de l'ébavurage/polissage comme participant – car la manière dont la pièce sera ébavurée doit être étudiée. D'après Gillespie (1979), l'ébavurage est une étape qui coûte en moyenne 30% du prix de la pièce, elle consomme souvent beaucoup de temps et n'est pas considérée comme une étape d'usinage. La manière dont une pièce doit être ébavurée ne doit pas être prise à la légère car la méthode d'ébavurage dépend du type et de la taille de la bavure. Or le type et la taille de la bavure dépendent des conditions de coupe et aussi du parcours de l'outil. C'est la raison pour laquelle dépendamment du type et de la taille de bavure désirée, le chargé

de l'ébavurage doit discuter avec le programmeur pour minimiser le temps d'ébavurage en maximisant l'ébavurage machine et en réduisant la forme et la taille des bavures par des conditions de coupe et des parcours d'outils optimaux.

- définir les pièces de référence pour ce travail.

4.4.1.2 Étape 4 – présentation pré-développement

Les actions suivantes ont été préconisées:

- ajouter le responsable de l'ébavurage/polissage comme participant – il doit présenter en commun accord avec le programmeur, la façon optimale d'ébavurer la pièce.
- définir les rôles de tous les intervenants
- ressortir les améliorations faites dans les travaux de références, ou les caractéristiques semblables.

4.4.1.3 Étape 5 – présentation pré-production

Les actions suivantes ont été préconisées:

- le programmeur peut simuler le programme si celui-ci n'est pas très long;
- proposer des actions d'optimisation suite au démarrage de production – ici on se trouve en pré-production;
- valider le niveau d'avancement ou de préparation de chaque étape;
- valider si les améliorations faites antérieurement qui affectent le travail actuel sont prises en considération;
- quantifier le temps restant avant la mise en production.

4.4.1.4 Étape 6 – présentation post-production

Les actions suivantes ont été préconisées:

- élaborer les critères de performance du procédé;
- lister les problèmes rencontrés;
- lister les améliorations apportées;
- valider les optimisations et ressortir toutes les caractéristiques et jobs afférentes;
- mettre en éveil toutes les jobs que cette optimisation affecte;
- classer le procédé selon une norme APN en stable, instable, en développement, etc;
- revue des normes d'échantillonnage d'inspection;
- garantir une mise à jour de toutes les améliorations apportées au procédé.

Toutes les étapes de planification jouent un rôle nécessaire pour la création d'une production en flux. Une bonne planification détecte plutôt les problèmes et détermine les solutions durables opportunes. Il a été prouvé que plutôt un problème est détecté moins sera son coût sur la production. Cette bonne planification va aussi influencer positivement les multiples sollicitations du programmeur CNC soit par les machinistes ou les leaders de secteur.

4.4.2 Interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur

Une étude empirique faite à l'entreprise montre qu'une réorganisation de l'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur permettra d'éliminer beaucoup de temps morts. Les différents temps morts que cette réorganisation peut éliminer sont:

- rallongement du temps d'occupation du programmeur CNC;
- rallongement du temps d'arrêt des machines-outils à commande numérique;
- rallongement des mouvements inutiles pour les machinistes / leader de secteur;
- etc.

Le but principal étant l'amélioration fiable des pratiques industrielles et suite aux résultats de l'étude empirique faite sur l'interaction programmeur CNC – machiniste / leader de secteur, nous avons proposé des chemins différents selon l'étiquette de la pièce.

L'amélioration première proposée est d'étiqueter chaque pièce à la fin de sa production. L'étiquette doit remplir les règles propres à l'entreprise soit par exemple pièce en production stable, instable etc. Selon l'étiquette que portera une pièce, celle-ci va prendre un chemin optimal pour son usinage et évitera par conséquent des confusions qui entraînent des importants temps morts.

Les deux grands groupes de pièce à APN Inc. sont les pièces en production et celles en développement. Nous avons donc proposé des chemins particuliers pour les deux grands groupes cités. À la figure 4.1 nous avons le chemin pour une pièce en développement et à la figure 4.2 pour une pièce en production.

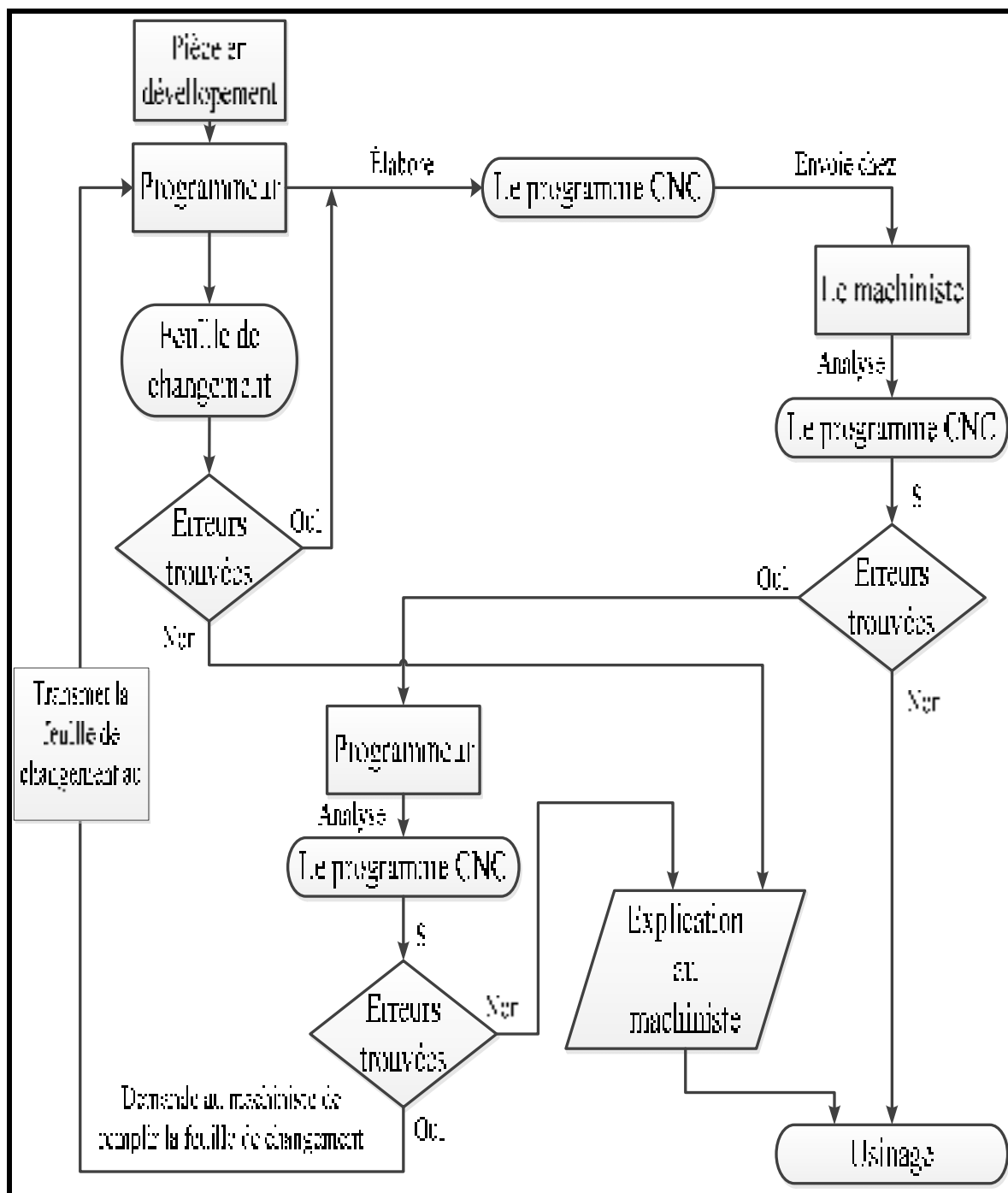


Figure 4.1 Organigramme d'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur pour les pièces en développement

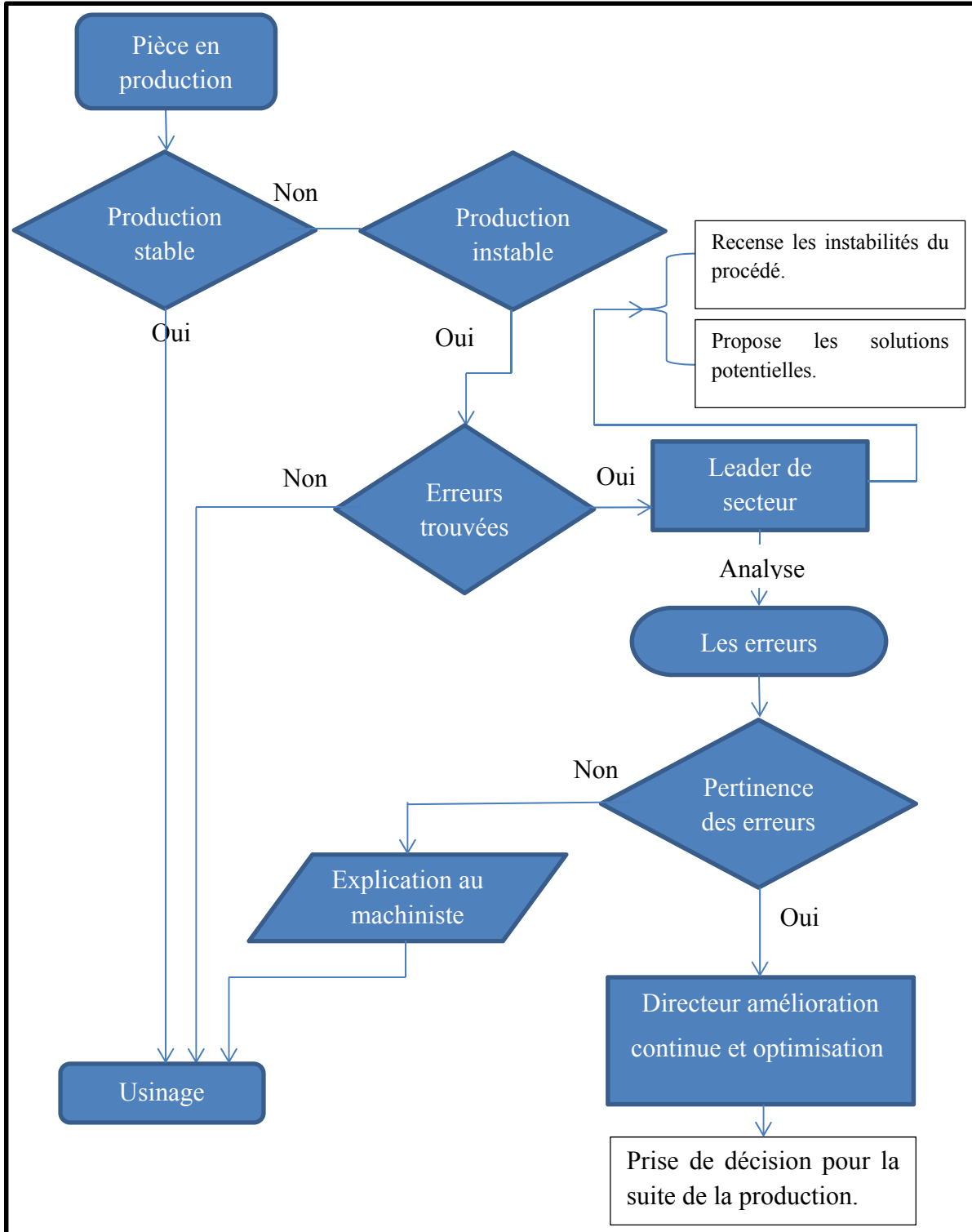


Figure 4.2 Organigramme d'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur pour les pièces en production

La mauvaise organisation de l'interaction programmeur CNC avec le machiniste / leader de secteur n'est pas la seule source de nombreux temps morts observés dans les procédés d'usinage. L'organisation du poste de travail des machinistes peut être citée en exemple.

4.4.3 Poste de machiniste

Le poste de machiniste est l'aire de travail du machiniste. L'amélioration de cette aire de travail permet d'obtenir un gain important en limitant les mouvements inutiles lors des opérations d'usinage. Pour arriver à réaliser un résultat optimal, plusieurs méthodes comme le Lean, le 5S, le kanban, le kaizen etc. sont souvent utilisées

Comme il a été dit plus haut, cette étude tient aussi compte de l'implication des utilisateurs pour faciliter non seulement l'implémentation des améliorations à apporter mais aussi leurs perfectionnements. Les propositions faites sont les suivantes:

- répertorier les outils fréquemment et ceux rarement utilisés;
- nettoyer et mettre la propreté et l'ordre sur le poste à la fin du quart de travail;
- permettre l'accès et le repérage facile des outils (autres que les outils de coupe);
- opter pour la politique selon laquelle une machine usine seulement les pièces d'une même famille;
- standardiser les procédures lors des actions importantes pendant l'usinage;
- mettre un accent sur l'obligation et la qualité du transfert de quart.

Il est important d'améliorer un poste de travail aussi important que celui des machinistes, il s'agit du poste des ébavureurs / polisseurs.

4.4.4 Poste de polissage ébavurage

Les opérations de polissage et d'ébavurage représentent près de 30% du coût d'une pièce (Gillespie, 1979). Une observation de la fluidité de la production montre que c'est à ce niveau qu'on retrouve un énorme goulot d'étranglement. Ce goulot d'étranglement se justifie par le fait que plusieurs entreprises négligent l'importance de l'ébavurage/polissage, l'abandonnant aux personnes souvent sans qualification et sans formation. Le plus difficile est souvent l'aire de travail des ébavureurs /polisseurs. Ils se retrouvent souvent en train de travailler dans un endroit non approprié et pas optimisé à l'importance de la tâche à réaliser.

Les propositions faites sont les suivantes:

- disposer d'une aire de travail spécifique;
- former les ébavureurs/polisseurs sur les requis clients;
- comprendre les types de bavures et les moyens pour ébavurer;
- acheter les outils adaptés;
- pour les opérations à haut volume non standards, concevoir un moyen optimisé.

4.4.5 Chaîne décisionnelle – traitement de l'information

La chaîne décisionnelle est définie ici comme l'organigramme des personnes ressources en cas de questionnement. L'organigramme décisionnel est d'une importance capitale car son absence engendre la majorité des attentes qui sont une source énorme de perte de temps. Les pertes de temps sont dues au fait que l'attente des réponses ou la redirection à une autre personne est plus souvent plus longue. Cette lenteur est le résultat soit d'un manque de prise de responsabilité, soit par le fait qu'on aimerait se débarrasser d'une personne jugée «encombrante» ou le fait de ne pas savoir à qui s'adresser lorsqu'une situation quelconque se présente. Les machinistes ou les employés du plancher se retrouvent souvent à «tourner en rond» ne sachant à qui s'adresser ou le plus souvent à chercher la personne qui leur a été référée. Cette pratique génère un manque de confiance envers la chaîne hiérarchique de

l'entreprise de la part des employés du plancher et oblige ces derniers à se recroqueviller sur eux même.

Pour pallier à ce manquement et apporter des améliorations, nous avons proposé la mise en place d'un organigramme vertical pour poser des questions et prendre des décisions. Cet organigramme fonctionne comme suit – le machiniste se réfère à son leader de secteur pour toutes les questions ou éclaircissements. Pour les questions et problèmes des machinistes dont il ne peut trouver la ou les solutions, le leader de secteur se réfère au directeur de production. Il incombe au directeur de production de chercher la personne source à répondre aux questions reçues.

L'information utilise le chemin inverse pour redescendre. Le directeur de production se charge de transmettre les réponses au leader de secteur. S'il est indisponible, il devrait s'assurer que le leader de secteur a obtenu les réponses à temps voulu. La figure 4.3 montre une forme graphique de la chaîne décisionnelle.

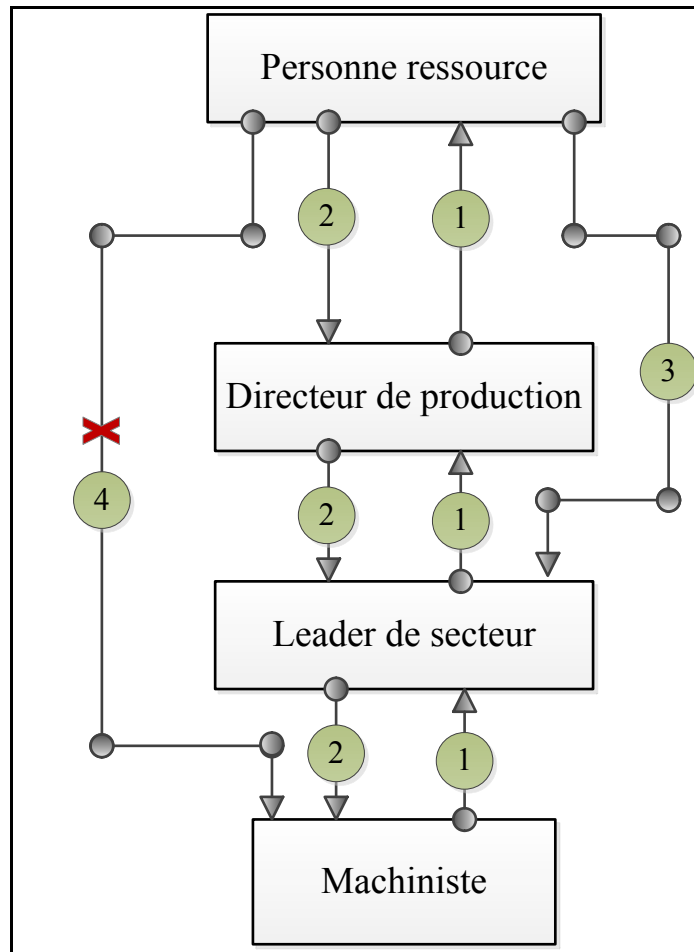


Figure 4.3 Chaîne décisionnelle

Les chiffres sur la figure 4.3 représentent les différentes voies ou chemins que peuvent emprunter le questionnement ou les réponses apportées. La voie 1 représente le chemin du questionnement alors que les voies 2 et 3 représentent le chemin des réponses apportées. Le chemin 4 est souvent utilisé mais il est à bannir car il brise non seulement la ligne directionnelle ou la chaîne hiérarchique de l'entreprise mais il remet en cause le rôle du leader de secteur.

La bonne organisation de la chaîne décisionnelle apporte beaucoup d'efficacité dans les pratiques de l'entreprise au niveau de la communication et de l'interaction entre certains employés. Elle peut permettre de mieux identifier et gérer les non-conformités.

4.4.6 Gestion des non-conformités

Une non-conformité est le non-respect des caractéristiques comme demandé par le cahier de charges du client. Les non-conformités doivent être détectées à temps et des actions préventives ou correctives doivent être prises pour remédier à la situation.

Les non-conformités donnent souvent des informations cachées. On distingue ainsi les types de non-conformités suivants:

- les non-conformités occasionnelles;
- les non-conformités dites de bougie magique;
- les non-conformités dites d'iceberg.

Les non-conformités occasionnelles sont celles qui arrivent avec des causes apparentes. Elles sont facilement détectables. Les actions curatives et préventives pour remédier à ce type de non-conformité sont souvent faciles.

Les non-conformités dites de bougie magique sont celle avec des causes apparentes qui ne sont pas celles réelles. Elles resurgissent souvent même après des actions curatives ou préventives sur les causes présumées. Dans ce cas de figure il faut faire une véritable étude pour détecter les causes primaires des non-conformités. Ce type de non-conformité est souvent difficile à diagnostiquer donc à remédier.

Les non-conformités dites d'iceberg sont celles qui révèlent un problème plus profond dans le procédé d'usinage. Elles attirent l'attention sur tout le dispositif d'usinage. Distinguer ce type de non-conformité sans étude profonde n'est pas facile.

Au vu de l'étude et de l'analyse des types de non-conformités citées, nous avons élaboré des propositions pour une gestion optimale de celles-ci:

- étude réelle de l'interaction – machine-outil – porte outil – outils de coupe et pièce à usiner;
- chaque non-conformité doit être bien documentée pour faciliter une étude préventive future;
- regrouper les non-conformités par catégorie et répertorier celles qui sont plus récurrentes;
- investiguer sur les causes réelles des non-conformités et non sur les causes supposées;
- ne jamais fermer une production qui a eu des non-conformités non élucidées.

Les propositions faites permettent de réduire les pertes en temps de réusinage des pièces non-conformes. Elles permettent de prédire certaines non-conformités récurrentes; donc elles donnent une possibilité de les éviter.

4.5 Conclusion

L'amélioration de toute la chaîne de production est un travail nécessaire. Elle permet de visualiser les maillons faibles en perte de temps. La connaissance des zones à haut risque de perte de temps permet de mieux orienter l'étude et les énergies pour réaliser un gain optimal sur le temps total de production d'une pièce.

Au vu de tout ce qui a été dit plus haut, l'affirmation selon laquelle l'identification des cibles à améliorer a été faite est vérifiée. Cette identification permet d'agir sur les maillons sensibles et fragiles du procédé. Agir sur les maillons faibles permet d'obtenir le meilleur gain en temps sauvé en utilisant peu de moyen. Parmi les cibles citées, la chaîne de production qui représente tout le travail fait en amont qui aboutit à l'expédition des pièces pour leur usinage. Son étude a permis de mieux expliquer le rôle et l'importance de certains secteurs qui participent à la fabrication d'une pièce mais aussi des tâches à réaliser pour obtenir une production en flux tendu. Cette étude a permis de ressortir les comportements qui

peuvent nuire plus tard à la production en créant des perturbations dans le procédé. Ces comportements sont:

- la mauvaise connaissance, prévention et élimination des bavures;
- la mise en production prématurée de certaines pièces;
- le manque d'étude fiable lors de la fin de l'usinage;
- le manque de notion de stabilité d'un procédé d'usinage;
- l'occupation non optimisée du programmeur CNC.

Le procédé d'usinage passe aussi par l'interaction entre les différents intervenants. L'élaboration d'une pratique de communication optimale et efficace entre le plancher et l'ingénierie a été proposée. Le mode de communication évite les attentes trop longues des réponses aux questions et rend plus pratiques les échanges entre les différents acteurs.

L'étude de l'organisation du plancher (ici on parle de l'usine), plus précisément du poste de machiniste a permis de proposer une organisation pratique qui s'aligne avec les attentes des machinistes pour non seulement pas faciliter leur travail, mais aussi éliminer les temps morts qui persistaient à ce niveau. Il ne nous restait que la gestion des non-conformités.

Une méthode optimale de gestion et de suivi des non-conformités a été faite. Elle permet de prévenir l'apparition de certaines non-conformités.

Une étude des caractéristiques avec un grand volume de production a été faite dans le but d'améliorer les pratiques industrielles en apportant un gain significatif en temps économisé.

CHAPITRE 5

ÉTUDE ET AMÉLIORATION DE LA PROGRAMMATION DES OPÉRATIONS À HAUT VOLUME DE PRODUCTION

5.1 Choix des pièces et des opérations

L'étude et l'analyse de toutes les étapes de fabrication des pièces nous a permis de mieux comprendre les besoins de l'entreprise. Les besoins principaux se situent au niveau de l'amélioration de toutes les étapes de fabrication. L'amélioration de toutes les étapes de fabrication permet d'obtenir un gain significatif en temps sauvé. La sauvegarde du temps a été démontrée dans l'étude et l'analyse des pratiques industrielles au niveau de la programmation CNC de l'usinage des pièces. L'entreprise usine un très grand nombre de pièces aéronautiques, militaires et civiles en utilisant des pratiques propres à elle. Les pratiques utilisées sont à améliorer. Vu le nombre important des pièces à programmer, il est impossible d'analyser et d'étudier toutes les méthodes de programmation utilisées pour leur usinage. Il est donc nécessaire de faire un choix optimal des pièces à étudier et à analyser. Chaque pièce à usiner possède en moyenne trois caractéristiques. Ce qui donne un nombre très important de caractéristiques à étudier. Il nous revient donc de faire un choix optimal des caractéristiques à retenir pour notre étude.

5.1.1 Choix des pièces à analyser pour l'amélioration

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans l'industrie mécanique (Chibane et *al*, 2011). La grande sollicitation du tournage comme procédé d'usinage explique la très grande quantité des pièces usinées par cette méthode de fabrication. Les moyens ne permettent pas d'étudier et d'analyser toutes les pièces usinées par tournage. Nous avons réalisé un choix optimal des pièces dont la méthode de programmation sera optimisée. Le but principal est l'obtention d'un gain important en temps sauvé.

Pour obtenir un gain important en agissant sur un nombre restreint de pièce, nous avons utilisé la loi de Pareto du 80-20. Par définition la loi de 80-20 de Pareto stipule que 20% des causes sont responsables de 80% des effets. La loi de Pareto propose une politique dans laquelle la gestion des efforts est concentrée à l'optimisation du coût de fabrication des pièces usinées qui génèrent la grande partie du bénéfice (Borthwick, 1970).

L'entreprise APN Inc. usine des pièces qui ont des complexités différentes. Les pièces usinées ont aussi un volume de production qui diffère selon les besoins du client. Les pièces usinées par tournage sont en trois catégories:

- celles qui sont usinées sur un centre de tournage-fraisage CNC dénommé NAK3;
- celles qui sont usinées sur centre de tournage-fraisage CNC dénommé NAK6;
- et celles qui sont usinées sur centre de tournage-fraisage CNC dénommé NTJX.

Notre étude s'est limitée sur les pièces usinées sur la NAK 3 et la NAK 6 qui ont un volume annuel de production qui varie entre 95 et 4 122 pour la NAK 3 et de 1 795 à 100 pour la NAK 6.

Se référant à la loi de Pareto et au temps imparti, nous avons étudié et analysé les pièces usinées sur la NAK 3 et la NAK 6 qui ont un volume annuel de plus de 100 unités. Le volume total des pièces analysées pour la NAK 3 est de 20 797 unités et 6 994 pour la NAK 6.

Toutes les pièces usinées ont en moyenne trois caractéristiques. Il nous reste à choisir les caractéristiques à analyser.

5.1.2 Choix des opérations à analyser pour optimisation

Une caractéristique représente une forme spécifique, ayant certaines particularités et se trouvant à une certaine position par rapport à un centre d'orientation donné. L'usinage d'une

caractéristique est un ensemble d'opérations à réaliser. Le choix des opérations à optimiser la programmation a été fait selon les critères suivants en fonction des caractéristiques dans lesquelles elles se trouvent:

- la loi du 80-20 de Pareto;
- le temps imparti à la recherche;
- le volume annuel d'usinage;
- les aberrations trouvées et la pertinence d'optimisation.

La loi du 80-20 de Pareto nous oriente vers les opérations dont l'usinage consomme beaucoup de temps, d'outils et d'énergie. Les opérations qui répondent à ce critère pour la NAK 3 sont:

- l'usinage des filets pour les caractéristiques B et D;
- le contournage et le perçage des trous sur plan incliné pour les caractéristiques C.

L'étude et l'analyse des opérations d'usinage des caractéristiques B et D de la NAK 3 indiquent que près de 49,15% du temps d'usinage est occupé par les opérations de filetage. Ce résultat a été obtenu après analyse des temps d'usinage des caractéristiques B et D de toutes les pièces usinées sur la NAK 3.

La société utilise l'opération de contournage pour usiner un hexagone. Elle le fait à cause de la difficulté à percer des trous de petits diamètres sur un plan incliné. Si la société parvenait à maîtriser la technologie de perçage sur plan incliné, elle sauverait beaucoup de temps en éliminant beaucoup d'opérations d'usinage.

Le temps imparti à la recherche dicte aussi la grosseur ou la taille des échantillons à analyser. La durée du stage effective de quelques mois ne permettait pas de faire une analyse de toutes les caractéristiques. L'effectivité de l'étude de toutes les caractéristiques n'était pas évidente. L'évidence vient du fait que l'étude des pièces qui ne respectent pas la loi du 80-20 de Pareto

et qui n'ont pas un volume de production élevé n'apporte pas de plus-value à l'entreprise. Néanmoins l'ossature de l'analyse a été faite et elle peut simplement être utilisée pour les autres caractéristiques.

Le volume annuel de production oriente les choix des opérations à étudier. Une production unitaire ne peut être gérée comme une production de masse. Ainsi pour la NAK 6 et la NAK 3, le volume de production annuelle recensé de toutes les caractéristiques est présenté dans les tableaux 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1 Volume annuel par caractéristique pour la NAK 6

Caractéristique	Volume annuel		Caractéristique	Volume annuel
E1	1749		G1	2644
E2	1795		G2	1795
E12	980		G3	356
E3	695		G6	147
E4	360		G7	189
E6	287		G10	278
E13	270		G11	294
E9	147		G12	270
E10	136			
E19	134		H1	2172
			H3	1795
F1	2010		H4	498
F4	473		H5	360
F5	596		H9	600
F7	287		H13	136
F8	147		H14	134
F9	242		H16	106
F10	294		H18	302
F12	102		H20	120
F14	134			
			I3	775
			I7	361

Tableau 5.2 Volume annuel par caractéristique pour la NAK 3

Caractéristiques	Volume annuelle
A1	9699
A2	5085
A5	2797
A7	1590
A3	496
A13	318
A15	105
A12	95
B7/D1	16135
B1	11770
B2	5581
B4/D6	2185
B3	1166
B10	95
C1	19633
C4	751
C5	318
C3	95
D2	1019
D5	95

Lors de l'élaboration de la base des données des pratiques actuelles de programmation, une analyse a été faite. Les aberrations et les bonnes pratiques ont été soulignées. Parmi les aberrations remarquées, on peut citer:

- les différences trop grandes entre les conditions de coupe recommandées par le catalogue et celles programmées;
- la pertinence du nombre de passe à vide pour l'usinage d'un filet;
- la pertinence de certains parcours d'outils;
- l'utilisation optimale des outils de coupe;
- etc.

Après avoir déterminé les pièces et les caractéristiques à optimiser les pratiques de programmation, nous avons proposé une méthode bénéfice à l'entreprise.

Après avoir identifié les pièces et les caractéristiques à analyser, nous avons commencé l'étude de l'optimisation de celles-ci.

L'entreprise APN Inc. est une société qui se doit d'usiner des pièces complexes et de haute précision dans les délais du client. Elle n'a pas le profil d'un centre de recherche et n'applique pas de politique d'occupation des machines et des employés pour réaliser des expériences. Il est donc difficile dans ce cas de faire des tests pour déterminer de façon empirique les coefficients nécessaires pour le calcul de la durée de vie d'un outil de coupe. L'entreprise se trouve en mode d'implémentation d'un outil qui permettra de quantifier le nombre d'outils de coupe nécessaires pour l'usinage d'un volume de production d'une pièce précise. C'est la raison pour laquelle toutes les propositions d'optimisation sont faites sur la base de l'utilisation d'un outil. Cette politique explique pourquoi lors des analyses d'optimisation, la durés de vie des outils de coupe n'est pas considérée.

5.2 Étude de l'amélioration des opérations de filetage extérieur

Le dictionnaire français Larousse définit le filetage comme une opération qui consiste à creuser une rainure hélicoïdale le long d'une surface cylindrique. L'opération de filetage extérieur est l'action de tailler un ou plusieurs filets sur la surface extérieure d'un cylindre.

Les filets sont classés selon les principales fonctions qu'elles assurent (Sandvik, 2015a) qui sont:

- l'accouplement mécanique;
- la transmission d'un mouvement en convertissant un mouvement de rotation en un mouvement linéaire et vice-versa;
- la démultiplication convertissant un effort faible en un effort plus important.

Les filets sont aussi classés selon leur profil. Les filets usinés à APN Inc. sont pour les pièces du domaine aéronautique. Les types de filet utilisés en aéronautique sont MJ et UNJ. La figure 5.1 suivante montre le profil des filets en aéronautique.

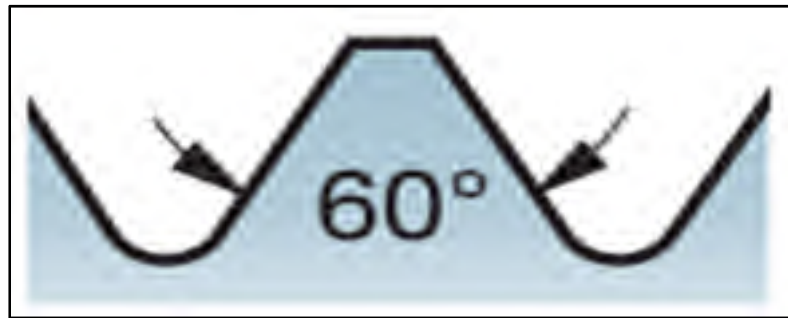


Figure 5.1 Exemple de profil de filet pour les applications aéronautiques

Il existe trois méthodes de fabrication de filet:

- l'usinage;
- le moulage;
- le roulage.

La méthode de fabrication qui donne un résultat qui respecte les normes aéronautiques est l'usinage. Dépendamment de plusieurs facteurs, il existe différentes méthodes pour usiner un filet:

- le filetage au tour;
- le filetage à la fraise;
- le filetage par utilisation des tarauds;
- le tourbillonnage;
- le meulage.

Les méthodes utilisées à APN Inc. pour l'usinage des filets sont le filetage au tour pour les filets extérieurs et le filetage à la fraise pour les filets intérieurs. Ces deux méthodes sont utilisées car ils offrent plusieurs avantages qui sont (Sandvik, 2015a):

1. Pour le filetage au tour

- c'est normalement la meilleure méthode de filetage;
- elle couvre le plus grand nombre de profils de filets;
- procédé d'usinage facile et bien connu;
- meilleurs états de surface;
- convient aux trous profonds avec barres antivibratoires;
- existence de programmes de filetage dédiés dans les machines CNC.

2. Pour le filetage à la fraise

- filetage de pièces statiques;
- les coupes interrompues donnent un bon contrôle des copeaux dans les matières à copeaux longs;
- les forces de coupe plus faibles permettent d'usiner des filets avec de longs porte-à-faux et des filets sur des pièces à parois minces;

- possibilité d'usiner un filet à proximité d'un épaulement ou au fond d'un trou sans gorge de dégagement;
- possibilité d'usiner de grandes pièces impossibles à monter facilement dans un tour.

Le filetage des filets dans le domaine aéronautique est une opération délicate et longue à cause des tolérances à respecter mais aussi du nombre des passes à réaliser. Pour obtenir un ratio optimal temps d'usinage/qualité du filet, plusieurs étapes sont à respecter. Les étapes à respecter guident nos choix des outils et des conditions de coupe. Les choix des outils et des conditions de coupe à faire sont les suivants:

1. Type de plaquette

- a. profil complet;
- b. profil partiel;
- c. multi-dents.

2. Géométrie des plaquettes

- a. géométrie A;
- b. géométrie F;
- c. géométrie C.

3. Type de pénétration

- a. oblique modifiée;
- b. radiale;
- c. incrémentale.
- d.

4. Profondeur de pénétration par passe
 - a. décroissante;
 - b. constante.

5. La vitesse de coupe

Une quantité importante de l'usinage du filetage extérieur à APN Inc. se fait sur le tour à commande numérique. C'est la raison pour laquelle notre étude portera essentiellement sur ce type d'usinage des filets. Le filetage au tour est la méthode d'usinage la plus courante pour la réalisation des filets.

L'analyse des pratiques de l'entreprise sur la programmation de l'usinage des filets nous a montré des inquiétudes sérieuses au niveau du nombre de passes et de passe à vide pour usiner un filet. Le nombre des passes représente la quantité de fois que l'outil travaillera pour usiner un filet. Il est donc primordial que, pour l'obtention d'un gain significatif de temps sauvé, utiliser un nombre de passe optimal. La passe à vide n'a pour rôle que de corriger les petites imperfections laissées par les passes normales.

Nous avons constaté que pour usiner un filet, le programmeur utilisait non seulement un nombre de passe en moyenne trois supérieur à celui demandé par le catalogue, mais utilisait aussi le même nombre de passes à vide. Ce qui est une aberration flagrante.

Le nombre de passe à effectuer pour obtenir un filet influence largement la productivité et la qualité du filet. Il est primordial de choisir une méthode productive et qui réalise un filet de très grande qualité. La cause principale est due au fait que les programmeurs CNC de l'entreprise utilisent une profondeur de passe constante. Ils justifient cette méthode par le fait que le logiciel utilisé pour la programmation (FeatureCam) ne peut sortir le code G pour la réalisation du filet avec des profondeurs de passes décroissantes.

En utilisant les prises de passes constantes, les programmeurs CNC ne savent pas que la quantité de matière enlevée à chaque passe n'est pas la même, elle croît de manière exponentielle à chaque passe suivante.

Par exemple, lorsque l'on taille un filet à 60° avec une profondeur de passe constante lors de la seconde passe on enlève trois fois plus de métal qu'à la première. Et, à chaque passe suivante, le volume de métal enlevé continue d'augmenter linéairement (Sandvik, 2015a). La figure 5.2 décrit bien le phénomène.

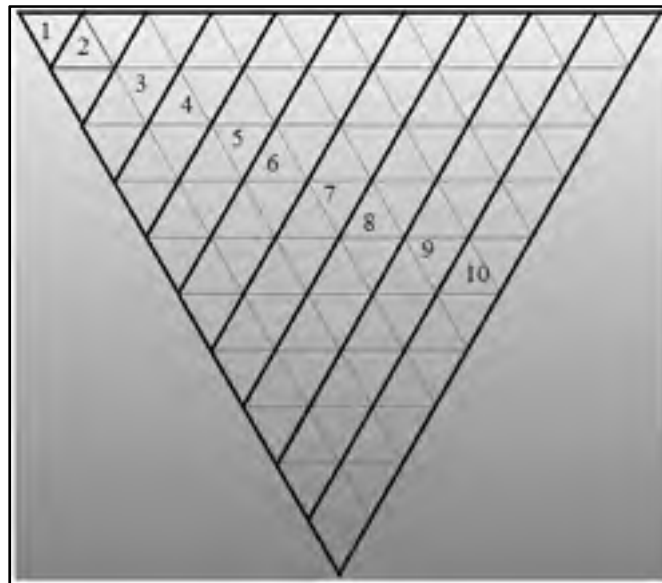


Figure 5.2 Description schématique de la quantité de matière enlevée à chaque passe successive pour l'usinage des filets avec une profondeur de passe constante

Pour diminuer le nombre de passe d'usinage, nous proposons d'utiliser la profondeur de pénétration par passe décroissante.

La méthode d'utilisation de la profondeur par passe décroissante est la plus courante. La première passe est toujours la plus profonde. La première passe est une fraction de la

profondeur du filet. La fraction souvent utilisée par les programmeurs à qui la question a été posée, est de un quart voir formule 5.1. Pour une étude optimisée, elle doit être trouvée de façon empirique donc expérimentale.

$$a_p \approx \frac{1}{4} \times H \quad (5.1)$$

5.2.1 Calcul du gain théorique de l'optimisation des opérations de filetage extérieur au tour numérique

Le but premier d'une entreprise est de faire le maximum de bénéfice. Pour avoir le maximum de bénéfice il faut réduire les coûts de fabrication. Pour produire à faible coût il faut avoir tous les outils nécessaires d'optimisation des procédés utilisés. L'optimisation des procédés utilisés génère un gain qui peut être quantifié. Il est primordial de faire le calcul du gain réalisable car toute optimisation n'apporte toujours pas des résultats positifs. La nécessité d'implémentation de certaines améliorations passe par leur efficacité en augmentation du bénéfice réalisable par l'entreprise. Nous avons fait une étude sur le gain théorique réalisable si nos propositions étaient appliquées.

L'analyse des pièces usinées sur la NAK 3 et qui ont un volume annuel de production de plus de 100 unités a été faite. Les résultats suivants ont été obtenus:

- 14 différents types de filets à usiner;
- 33 829 filets à usiner;
- temps moyen théorique approximatif pour usiner un filet \approx une minute;
- temps moyen approximatif sauvé en réduisant le nombre de passes à vide et des passes d'usinage \approx 35 secondes/filets.

Le temps total sauvé en secondes est donné par la formule 5.2.

$$T_s \approx 35 \times 33\,829 \approx 1\,184\,015 \text{ s/an} \quad (5.2)$$

L'entreprise chiffre une minute de temps machine à un dollars, ce qui permet de dire que l'entreprise sauverait la somme suivante en dollars formule 4.3:

$$S_s \approx \frac{1\,184\,015}{60} \approx 19\,733.58 \text{ dollars canadiens/an} \quad (5.3)$$

5.3 Étude de l'amélioration de l'usinage des formes hexagonales et du perçage sur plan incliné

L'entreprise APN Inc. est spécialisée dans l'usinage des pièces complexes militaires et aéronautiques. L'usinage des pièces complexes demande une grande ingéniosité de tous les intervenants dans la chaîne de fabrication mais aussi des outils, des stratégies et des moyens adaptés. Dans le but de réduire les coûts de fabrication, nous avons opté pour revoir les pratiques industrielles utilisées pour l'usinage de l'hexagone et du perçage des trous qui s'y trouvent.

La loi du 80-20 de Pareto a été utilisée et le volume annuel de production pour choisir l'usinage de l'hexagone et le perçage des trous qui s'y trouvent comme des caractéristiques à optimiser. Toutes les pièces usinées sur la NAK 3 ont un hexagone. Plus de 82% des pièces usinées sur la NAK 3 ont des trous sur l'hexagone.

Pour usiner l'hexagone, l'entreprise utilise une fraise en bout qui a son axe parallèle à celui de la pièce à usiner. Elle utilise une passe d'ébauche et une autre de finition. Mais avant d'usiner l'hexagone, elle perce les trous qui s'y trouvent. Elle perce les trous en plusieurs étapes. Premièrement elle usine un méplat.

Le méplat sert à préparer le perçage des trous. Il permet d'avoir une surface plane qui sera perpendiculaire à l'axe du foret qui viendra réaliser l'opération de perçage. Le méplat est usiné avec une fraise en bout. Il doit être fait pour tous les trous à percer. Après l'usinage du méplat, le trou est centré.

Le centrage sert à usiner un avant trou peu profond qui a pour fonction principal le guidage du foret. Les opérations de centrage sont souvent nécessaires lorsque le ratio "longueur / diamètre du trou à percer" est assez grand. Après l'usinage de l'avant trou, il faut percer le trou.

Les méthodes de perçage du trou diffèrent selon les tolérances de celui-ci. Si le foret peut respecter toutes les contraintes dimensionnelles et géométriques, on perce au diamètre final sinon on usine un avant trou pour permettre une opération d'alésage. Dans notre cas d'étude, tous les trous sont obtenus par des opérations de perçage. Après le perçage des trous, l'opération d'usinage est effectuée pour obtenir l'hexagone.

L'entreprise se retrouve en train de faire plusieurs opérations qui consomment beaucoup de temps. Le temps annuel théorique nécessaire pour ne réaliser que les opérations de centrage et d'obtention de l'hexagone a été calculé.

Ne considérant que les pièces qui ont un volume annuel de plus de 100 unités sur la NAK 3 les résultats suivants ont été obtenus:

- 20 979 formes hexagonales à usiner;
- 43 359 trous à percer et à centrer;
- le temps annuel théorique pour centrer les trous et d'usinage pour l'obtention des formes hexagonales est de 1 821 573.8 secondes environ.

Le centrage des trous et l'usinage pour l'obtention des formes hexagonales ont retenu notre attention car les deux opérations citées peuvent être éliminées. L'élimination de ses opérations passe par l'achat des barres hexagonales.

Si l'entreprise achetait les barres hexagonales, elle couperait directement le temps d'usinage pour l'obtention des formes hexagonales sans aucun effort. Le temps moyen d'usinage pour l'obtention d'une forme hexagonale est d'une minute. Ce qui implique un gain théorique de

20 979 minutes théoriques hypothétiquement à sauver. L'utilisation d'une barre engendre les difficultés de perçage sur un plan incliné sans oublier la différence de prix du brut cylindrique et celui en forme hexagonale.

L'utilisation d'une barre hexagonale nous impose la maîtrise des opérations de perçage sur plan incliné. Pour maîtriser cette technique, il faut avoir les mécanismes ou les outils de coupe adaptés.

Les mécanismes adaptés sont les guides de perçages amovibles. Le problème des guides de perçage est qu'ils ne sont majoritaires utilisés que pour l'usinage sur les machines-outils conventionnelles. Leur utilisation sur les machines-outils à commande numérique cause un problème au niveau de la précision de positionnement. La précision de positionnement du guide ne pourra pas toujours suivre celle du brut. Ce qui pose un problème majeur pour l'implémentation des guides de perçage pour l'usinage des trous sur un plan incliné. Il nous reste à trouver des outils de coupe qui peuvent percer sur un plan incliné.

Les outils de coupe adaptés sont ceux qui respectent toutes les contraintes selon le requis des clients. Ils doivent pouvoir percer des trous de petits diamètres sur une longue distance. Le ratio "longueur/diamètre" se situe entre huit et dix. Les seuls outils trouvés sur le marché sont les forets Aqua Ex Flat Drill du fabricant Nachi. Nachi-Fujikoshi corp est un des pionniers dans la fabrication des outils de coupe de haute précision au Japon et dans le monde. Les forets Aqua Ex Flat Drill qui ont les diamètres désirés ne peuvent usiner lorsque le ratio "longueur/diamètre" est aussi grand que le nôtre, c'est la raison pour laquelle nous avons opté d'utiliser les outils de coupe Nachi comme foret pour usiner le guide. Ainsi, pour percer un trou sur un plan incliné, nous utilisons les forets Aqua Ex Flat Drill pour réaliser le guide, et après nous insérons le foret régulier pour percer jusqu'au bout.

Les outils Aqua Ex Flat Drill permettent de percer sur des plans inclinés et réduit considérablement la bavure à la sortie (Nachi, 2015). Un exemple comparatif entre procédé de perçage des trous sur plan incliné est montré à la figure 5.3.

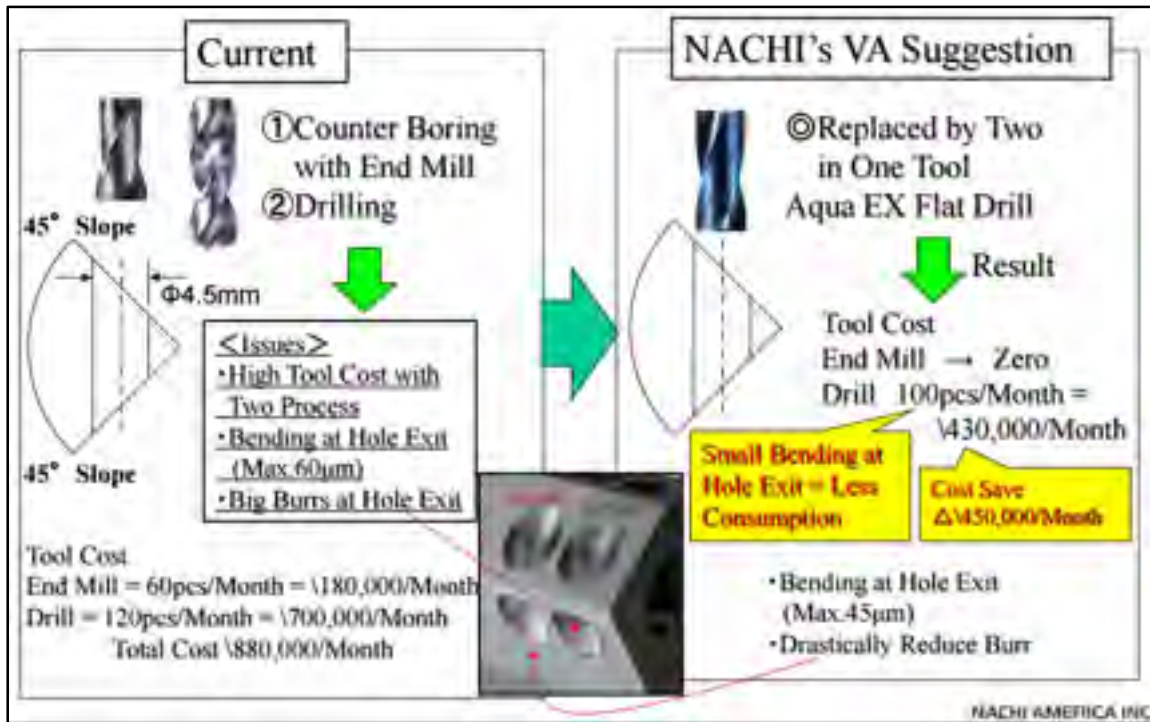


Figure 5.3 Comparaison de deux procédés de perçage sur plan incliné (Nachi, 2015)

L'implémentation d'un nouveau système passe par l'étude de faisabilité et du plus valu que celui-ci apporte à l'entreprise. Il est donc nécessaire de faire une étude du gain théorique que le remplacement d'une barre cylindrique par une barre hexagonale comme brut pour l'usinage d'une certaine gamme des pièces peut apporter à l'entreprise.

5.4 Calcul du gain théorique avec l'utilisation d'une barre hexagonale

L'étude du gain réalisable est un travail nécessaire. Il permet non seulement de justifier les améliorations mais aussi de motiver les dirigeants à y mettre un accent particulier. L'entreprise a toujours utilisé les barres cylindriques pour usiner toutes les pièces qui ont les caractéristiques C en forme hexagonale. L'entreprise n'a jamais réalisé des études sur les gains réalisables par l'utilisation des barres hexagonales à la place des barres cylindriques. Une étude comparative de l'utilisation des deux types de formes de brut a été réalisée pour démontrer le gain réalisable par l'utilisation d'une barre hexagonale.

Dans le but de rester dans l'objectivité, l'étude comparative s'est faite sur la base de la pièce qui a le plus haut volume de production. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons donner ni l'appellation exacte de la pièce ni les dimensions de celle-ci.

5.4.1 Présentation de la caractéristique à étudier

L'ensemble des caractéristiques C est composé de C1, C2, C3, C4 et C5. La différence entre les caractéristiques est établie par une norme interne à l'entreprise. Cette norme est basée sur la présence de certaines formes. La caractéristique qui fait l'objet de cette étude est C1 car elle est celle qui a le plus haut volume de production annuelle de tout l'ensemble des caractéristiques C. L'entreprise usine en moyenne 19 528 caractéristiques C1 chaque année. La caractéristique C1 se retrouve dans plus de 86% des pièces usinées par l'entreprise. L'étude complète s'est faite pour la pièce qui est composée de la caractéristique C1 et qui a le plus haut volume annuel de production. Le volume annuel de production de cette pièce est de 4 122 unités. La caractéristique C1 est représentée par la figure 5.4.

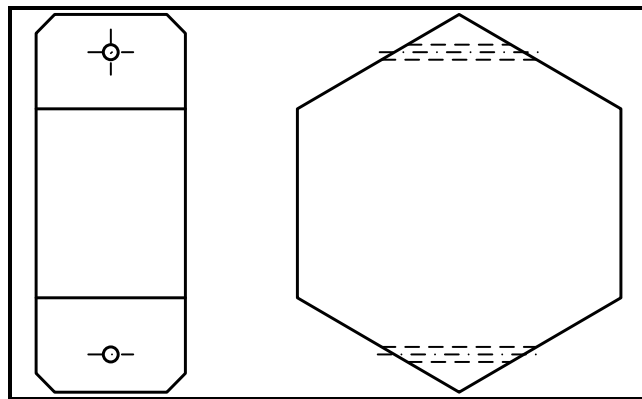


Figure 5.4 Caractéristique C1 des pièces

La présentation des pratiques industrielles actuelles de programmation de cette pièce fait l'objet de cette section.

5.4.2 Calcul de la quantité de matière brute nécessaire

La quantité de matière brute nécessaire pour usiner la production annuelle de 4 122 unités de la pièce sélectionnée ne diffère pas selon que l'entreprise utilise une barre de forme cylindrique ou de forme hexagonale. La formule utilisée pour le calcul de la quantité de matière brute nécessaire pour l'usinage d'une pièce est la suivante:

$$L = l_1 + h + b \quad (5.4)$$

Pour des raisons de confidentialité, une interdiction de diffusion des données dimensionnelles de la pièce a été faite. C'est la raison pour laquelle seuls les résultats du calcul seront présentés. Les calculs effectués ont donné le résultat suivant. L'entreprise a besoin de 42 barres de 144 pouces pour l'usinage de la production totale annuelle de la pièce étudiée. Le choix des barres de 144 pouces est fait pour des raisons de standard sur le marché de la vente des matières brutes.

La matière brute utilisée pour l'usinage est l'acier inoxydable 347. La matière brute est la matière à partir de laquelle la pièce finale sera usinée. Le choix du matériau de la matière brute est donné par le client. La forme de la matière brute est déterminée par le fabricant (l'entreprise). L'entreprise se base sur ses capacités techniques et technologiques pour le choix de la forme du brut. Le choix optimal de la forme et des dimensions de la matière brute a une influence sur le temps d'usinage de toute la pièce donc sur le coût d'usinage.

La présentation des pratiques actuelles de programmation avec l'utilisation d'une matière brute à la forme cylindrique est nécessaire.

5.4.3 Présentation des pratiques actuelles de programmation

La programmation d'une pièce pour son usinage débute par la connaissance du dessin du client. Le dessin reçu doit avoir tous les requis du client. Le programmeur CNC élabore le programme d'usinage du dessin de la pièce reçu selon les informations liées aux capacités

techniques et technologiques de l'entreprise. La forme et les dimensions du brut sont définies par le directeur de compte. Celui-ci le fait lors de la soumission.

Il a été décidé d'utiliser une barre cylindrique comme brut pour l'usinage de la pièce dont cette étude fait l'objet. Le choix de la forme du brut a été motivé par la non maîtrise du perçage des trous sur plan incliné par l'entreprise. Pour combler cette incapacité technique et technologique, l'entreprise a opté pour l'usinage des trous avant celui de l'hexagone. L'entreprise utilise les étapes suivantes pour l'usinage de la caractéristique C1:

- usinage du méplat;
- centrage des trous;
- usinage de l'hexagone;
- le chanfreinage de l'hexagone.

L'usinage du méplat sert à la préparation du perçage du trou de centrage. Cette préparation se fait par la création d'une surface perpendiculaire à l'axe du foret à centrer. L'usinage du méplat est réalisé par une fraise en bout.

Le centrage des trous est une opération qui sert au guidage du foret à percer. Son rôle premier est de permettre au foret de percer selon son axe. Cette contrainte permet d'usiner un trou qui respecte les tolérances géométriques et dimensionnelles.

Le perçage des trous au diamètre désiré se fait par l'utilisation d'un foret. Le mode opératoire utilisé par l'entreprise pour percer les trous est le perçage direct.

L'usinage de l'hexagone se fait par une fraise en bout. Cette opération se fait en deux étapes. La première est une passe d'ébauche et la deuxième une passe de finition. L'axe de la fraise en bout lors de l'usinage de l'hexagone est parallèle à celui de la pièce.

5.4.3.1 Calcul du coût de la matière brute avec la méthode actuelle de programmation

Le calcul effectué est celui du coût de la matière brute nécessaire pour l'usinage de la production totale annuelle. La matière brute se vend par livre. L'entreprise achète le livre de barre de forme cylindrique à 4.4 dollars canadien. La connaissance de la densité de l'acier inoxydable qui est de 0.286903 lb/in³ a permis de calculer la masse de la matière brute nécessaire selon la formule suivante:

$$m = \rho \times v \quad (5.5)$$

La formule du volume est la suivante:

$$v = s \times l \quad (5.6)$$

Le tableau 5.3 présente tous les résultats obtenus.

Tableau 5.3 Résultats des calculs du prix de la matière brute de forme cylindrique

Matériel brut	Surface (in ²)	Densité (lb/in ³)	L (in)	Volume (in ³)	Masse (lb)	Prix unitaire (\$ CAD/lb)	Prix/Barre (\$ CAD)	Nombre de barres	Coût total (\$ CAD)
Cylindrique	1,227	0,2869	144	176,688	50,691	4,4	223,043	42	9367,842

5.4.3.2 Présentation du coût des outils de coupe et des temps théoriques d'usinage avec la méthode actuelle de programmation

Le coût des outils de coupe a été pris dans la base de données de l'entreprise. L'étude a été faite sur la quantité unitaire des outils de coupe car l'entreprise n'est pas encore outillée pour pouvoir quantifier les outils de coupe utilisés pour une production spécifique.

Les temps théoriques d'usinage sont obtenus de la base de données des pratiques industrielles de programmation de l'entreprise. Le temps théorique d'usinage est celui que le logiciel de fabrication assisté par ordinateur propose à la fin de la simulation ou de la programmation. Le temps d'usinage théorique permet d'avoir une idée des différents temps d'usinage pour mieux synchroniser la ligne de production.

Le tableau 5.4 représente le récapitulatif du coût des outils de coupe et du temps d'usinage théorique.

Tableau 5.4 Coût des outils de coupe et temps théorique d'usinage avec l'utilisation du matériel brut en forme cylindrique

Matériel brut	Opérations	Outils utilisés	Coût des outils (\$ CAD)	Temps usinage théorique (secondes)
Cylindrique	Méplat	Fraise en bout	63,36	10
	Centrage	Foret à centrer	45	11
	Perçage	Foret	72,97	14
	Ébauche hexagone	Fraise en bout	63,36	38
	Finition hexagone			39
	Total			244,69

5.4.4 Étude de l'utilisation de la matière brute avec une forme hexagonale

L'utilisation d'une matière brute de forme hexagonale est motivée par l'élimination directe de certaines opérations d'usinage. Il s'agit des opérations d'ébauche et de finition de l'usinage de la forme hexagonale. Le grand défi à relever lorsqu'on utilise une matière brute de forme hexagonale est le perçage des trous sur le plan incliné.

La connaissance du prix de la matière brute est nécessaire.

5.4.4.1 Calcul du coût de la matière brute

Le calcul de la masse et du volume de la matière brute de forme hexagonale respecte les mêmes formules 5.5 et 5.6. Ce calcul permet de quantifier le coût de la matière selon les formes choisies. Le tableau 5.5 est un récapitulatif du calcul du prix de la matière brute de forme hexagonale.

Tableau 5.5 Résultats des calculs du prix de la matière brute de forme hexagonale

Barre	Surface (in ²)	Densité (lb/in ³)	L (in)	Volume (in ³)	Masse (lb)	Prix unitaire (\$ CAD/lb)	Prix/Barre (\$ CAD)	Nombre de barres	Coût total (\$ CAD)
Hexagonale	1,014	0,2869	144	146,016	41,891	5,65	236,684	42	9940,728

5.4.4.2 Présentation du coût des outils de coupe et des temps théoriques d'usinage

Le coût des outils de coupe a été pris dans la base de données de l'entreprise et des catalogues des fabricants qui proposent des outils qui peuvent percer des trous de petit diamètre sur un plan incliné. La seule entreprise trouvée qui fabrique les outils recherchés est Nachi. L'étude a été faite sur la quantité unitaire des outils de coupe.

Les temps théoriques d'usinage sont obtenus à partir du logiciel de fabrication assistée par ordinateur FeatureCam.

Le tableau 5.6 représente le récapitulatif du coût des outils de coupe et du temps d'usinage théorique.

Tableau 5.6 Coût des outils de coupe et temps théorique d'usinage avec l'utilisation du matériel brut en forme hexagonale

Matériel brut	Opérations	Outils utilisés	Coût des outils (\$ CAD)	Temps usinage théorique (secondes)
Hexagonale	Pilot	Aqua Ex Flat Drill	57,31	11
	Perçage	Foret	72,97	14
	Total		130,28	25

5.4.5 Étude comparative

L'étude comparative nous permet de faire un choix optimal selon des critères établis entre deux méthodes, objets, procédés, etc. L'étude comparative effectuée porte sur l'utilisation d'une matière brute de forme cylindrique par rapport à celle de forme hexagonale. L'étude comparative du coût de la matière première passe s'est faite par juxtaposition des tableaux 5.3 et 5.5 comme le montre le tableau 5.7.

Tableau 5.7 Tableau comparatif du prix des deux formes de la matière brute

Matériel brut	Surface (in ²)	Densité (lb/in ³)	L (in)	Volume (in ³)	Masse (lb)	Prix unitaire (\$ CAD/lb)	Prix/Barre (\$ CAD)	Nombre de barres	Coût total (\$ CAD)
Cylindrique	1,227	0,2869	144	176,688	50,691	4,4	223,043	42	9367,84
Hexagonale	1,014			146,016	41,891	5,65	236,684		9940,72
Différence						-1,25			-572,88

Les résultats du tableau 5.7 montrent que l'entreprise devra dépenser plus d'argent si elle décide de changer la forme cylindrique par celle hexagonale de la matière brute. La différence est chiffrée à 572,88 dollars canadiens. La différence de prix entre la matière brute de forme cylindrique et celle de forme hexagonale est influencée par la complexité des méthodes d'obtention des différentes formes.

L'étude comparative du prix unitaire des outils de coupe et du temps théorique d'usinage a été faite. Cette étude comparative s'est faite par juxtaposition des tableaux 5.4 et 5.6 comme le montre le tableau 5.8. Cette étude sous la forme de juxtaposition des tableaux permet d'avoir une représentation visuelle des résultats. Cette méthode de présentation des données permet une interprétation et compréhension facile des résultats.

Le coût des outils de coupe est calculé sur la base de l'utilisation d'un outil. L'étude se base sur la supposition selon laquelle l'usinage de toute la production est fait avec un seul outil. Cette supposition est faite parce l'entreprise ne maîtrise pas encore le nombre d'outils nécessaires pour l'usinage complet de toute une production. L'impossibilité de quantifier le nombre des outils nécessaires pour l'usinage de toute la production ne permet pas de calculer le coût réel des outils de coupe utilisés ou à utiliser. La quantité totale des outils de coupe nécessaire à l'usinage de toute la production peut être connue par définition du critère de durée de vie des outils de coupe.

Le critère de durée de vie des outils de coupe est considéré comme la valeur limite préétablie de l'usure de l'outil de coupe. C'est ce critère qui détermine la durée de vie d'un outil de coupe. La durée de vie d'un outil de coupe est le temps d'usinage nécessaire pour satisfaire à la condition du critère de durée de vie de cet outil de coupe. La durée de vie d'un outil de coupe doit être déterminée de façon empirique. Le modèle de Gilbert est préconisé pour estimer la durée de vie utile des outils. Ce modèle est présenté par la formule 5.7.

$$T = K \times a^x \times f^y \times V^n \quad (5.7)$$

Tableau 5.8 Tableau comparatif du coût des outils de coupe et du temps d'usinage des deux formes de la matière brute

Matériel brut	Opérations	Outils utilisés	Coût des outils (\$ CAD)	Temps usinage théorique (secondes)
Cylindrique	Méplat	Fraise en bout	63,36	10
	Centrage	Foret à centrer	45	11
	Perçage	Foret	72,97	14
	Ébauche hexagone	Fraise en bout	63,36	38
	Finition hexagone			39
	Total			244,69
Hexagonale	Pilot	Aqua Ex Flat Drill	57,31	11
	Perçage	Foret	72,97	14
	Total			130,28
Différence			+114,41	+87

Les résultats du tableau 5.8 montrent que l'utilisation de la matière brute de forme hexagonale permet à l'entreprise de faire un gain sur l'achat des outils de coupe. L'étude s'est limitée à ne démontrer que la réduction du coût unitaire des outils de coupe. Le tableau présente aussi les résultats en temps sauvé.

L'utilisation de la matière brute de forme hexagonale réduit le nombre des opérations d'usinage. Pour obtenir la pièce finale à partir de la matière brute de forme cylindrique, il faut réaliser cinq opérations alors que si l'entreprise utilise une forme hexagonale elle n'aura besoin que de deux opérations pour usiner la pièce selon le requis du client. La réduction des opérations d'usinage entraîne une diminution considérable des temps d'usinage. Les résultats du tableau ci-dessus montrent que l'entreprise sauverait 87 secondes par pièces usinée. La production annuelle de la pièce étudiée est de 4 122 unités. Le calcul du gain annuel en temps pour la pièce étudiée est présenté par le résultat de la formule 5.8.

$$T_{s/p} = 87 \times 4\,122 = 358\,614 \text{ secondes/an} \quad (5.8)$$

L'entreprise usine en moyenne 19 528 caractéristiques C1 par année. Ce qui implique un gain en temps qui est calculé par la formule 5.9. Le résultat représente le gain annulé en temps pour l'usinage de toutes les caractéristiques C1.

$$T_{s/c} = 87 \times 19\,528 = 1\,698\,936 \text{ secondes/an} \quad (5.9)$$

Le calcul du gain en temps a permis de démontrer la pertinence du changement de la forme de la matière brute à utiliser. Le gain en temps sauvé peut être plus important si une bonne optimisation des conditions de coupe des outils est faite.

L'optimisation des conditions de coupe ne peut se faire que de manière indirecte. L'optimisation se fait de manière indirecte car la philosophie de l'entreprise est plus orientée vers la production que vers la recherche. L'utilisation des machines et des employés est utilisée pour produire des pièces à un instant donné. La manière directe est de réaliser des tests sur les effets des conditions de coupe sur la productivité et la qualité, alors que la manière indirecte passe par l'étude et l'analyse des résultats des conditions de coupe. L'étude indirecte utilisée est l'analyse de l'usure des plaquettes des outils de coupe.

5.5 Étude expérimentale

5.5.1 Guide pour perçage sur plan incliné

La réalisation d'une opération de perçage sur un plan incliné est bien difficile. La difficulté majeure se trouve au niveau du respect de la précision du trou à percer. La position du trou a tendance à dévier de son axe souhaité. La déviation de la position du trou augmente si l'angle entre la surface de la pièce et celle de l'axe du foret est autre que 90^0 (Kaminski et Craford, 1994). La déviation de la position du trou est principalement causée par les forces de coupe qui ont tendance à faire fléchir le foret. Il est primordial de trouver un foret qui possède une géométrie qui limite voire élimine la déviation du trou lorsqu'on perce sur un plan incliné.

Il existe des facteurs qui influencent grandement la qualité du perçage sur un plan incliné (Sakuma *et al*, 1983) a démontré l'importance de la géométrie du foret utilisé. Kaminski et Crafoord, (1994) ont démontré l'influence de la vitesse d'avance sur la déviation de la position du trou à percer. L'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation des forces donc augmente la déviation de la position du trou. (Lin, 2002) a prouvé l'importance d'utiliser une vitesse d'avance variable sur la durée de vie du foret, la hauteur de la bavure et de l'état de surface.

Pour rallonger la durée de vie des forets et diminuer la grosseur de la bavure qui sera créée après le perçage, une méthode consiste à usiner un pilot des deux côtés du trou avec un foret aqua ex flat de Nachi et de percer avec un foret régulier. Cette méthode paraît plus longue mais réduit le temps d'ébavurage. Il faudrait réaliser des tests afin de choisir la méthode optimale entre le perçage avec une vitesse d'avance variable le perçage par usinage des pilotes les deux côtés du trou.

Une pratique courante en usinage est de réduire les vitesses de rotation de 70% et d'avance de 30% lorsqu'on perce des trous sur un plan incliné.

Les tests préliminaires réalisés ont prouvé l'influence de la vitesse d'avance sur la durée de vie du foret qui réalise le pilote sur le plan incliné. Les données de la pièce ne peuvent être dévoilées pour cause de confidentialité. La seule information qui peut être divulguée est l'inclinaison du plan qui est de 60° .

5.5.2 Test sur l'amélioration des opérations de filetage

L'optimisation des opérations de filetage a pour but principal, l'usinage rapide des filets selon les requis du client. L'usinage des filets se fait sur un centre d'usinage tournage-fraisage CNC Nakamura Tome WT-150. Le contrôleur utilisé est un FANUC. L'usinage des filets se fait par un programme d'usinage.

Les programmes d'usinage pour l'usinage des filets utilisent trois types de code:

- le code G32;
- le code G76;
- le code G92.

Chacun de ces codes a ces avantages et ces inconvénients. Dans le cadre de notre étude expérimentale, seuls les codes G76 et G92 ont été utilisés.

5.5.2.1 Le code G76

Le code G76 est celui généralement utilisé par les contrôleurs de certaines MOCN. Il permet l'usinage du filet en utilisant une syntaxe qui possède deux lignes comme suit:

$$\begin{aligned} &G76 P\{(e) (t) (s) \} Q(\Delta d) R(d) \\ &G76 X(g) Z(j) R(z) P(w) Q(b) F(l1) \end{aligned} \quad (5.10)$$

L'avantage principal du code G76 est qu'il se programme en deux lignes, alors que son inconvénient majeur est qu'il n'offre pas plusieurs possibilités de choix de l'angle de pénétration.

5.5.2.2 Le code G92

Le code G92 utilise plusieurs variantes; une variante qui s'écrit avec une ligne et une autre qui s'écrit avec plusieurs lignes. La variante utilisée pour faire les tests est celle avec plusieurs lignes. La syntaxe s'écrit comme suit:

$$\begin{aligned} &G92 X(g1) Z(j) F(l1) \\ &X(g2) \end{aligned} \quad (5.11)$$

L'avantage principal du code G92 est qu'il permet plusieurs choix de l'angle de pénétration de l'outil de coupe. Son inconvénient majeur est le fait que plusieurs programmes de FAO ne le supportent pas, donc il faut faire tous les calculs manuellement.

5.5.2.3 Mode opératoire des tests

Les tests ont été réalisés avec un outil de filetage de forme du fabricant Sandvik. Le grade de l'outil est de 1125. Les variables d'entrées sont:

- le nombre de passes;
- la profondeur de la première passe;
- la vitesse de rotation;
- l'angle de pénétration.

Les valeurs de sortie contrôlées sont:

- le diamètre majeur;
- le diamètre mineur;
- le vérificateur fileté «entre» et «n'entre pas»;
- le pas;
- le temps d'usinage;
- le rayon de fond.

5.5.2.4 Analyse des résultats

L'analyse des résultats démontrent que la vitesse de rotation influence largement les diamètres majeurs, mineurs et le pas. Lorsque les vitesses de rotation sont grandes, le pas n'est pas respecté ainsi que le diamètre mineur des derniers filets. Cette influence est due au fait que le centre d'usinage de tournage-fraisage CNC Nakamura tome WT 150 n'arrive non seulement à synchroniser les mouvements de rotation et d'avance, mais commence à sortir avant la fin de l'usinage du dernier filet.

La réalisation des tests avec des vitesses de rotations plus lentes a justifié la thèse selon laquelle la MOCN utilisée n'arrive non seulement à décélérer a temps opportun pour réaliser les derniers filets avant sa sortie, mais n'arrive pas aussi à synchroniser les vitesses d'avance et de rotation pour obtenir le pas recherché.

Le meilleur filet a été réalisé avec l'utilisation du code G76, avec une vitesse de rotation de 1 000 RPM, une première profondeur de passe qui est égale au tiers de la hauteur totale du filet et un angle de pénétration de $2,5^{\circ}$. Le temps d'usinage est de 13,1 secondes. Le temps d'usinage obtenu permet un gain de près 62% de temps par rapport à la méthode précédemment utilisée par l'entreprise. Pour obtenir la qualité du filet qui respecte les requis du client, il a fallu baisser la vitesse de rotation. Les tests n'ont pas été réalisés sur l'influence de la vitesse de rotation sur la durée de vie de l'outil de coupe à la vitesse de rotation optimale.

Les tableaux 5.9 et 5.10 présentent les résultats des tests.

Tableau 5.9 Résultats des tests avec le code G76

Contrôle du filet / G76											
Paramètres d'entrée					Paramètres à contrôler						
										Temps d'usinage (s)	
N° de la pièce	Profondeur 1re passe (in)	Nombre de passes	RPM	Angle de pénétration (degré)	∅ majeur (in)	∅ mineur (in)	Entre	N'entre pas	Pas	contact	total
20	0.0068 P/5	10	2241	55	0,5600	0,4955	0	1	0,0554	2,5	10,8
21		10	2241	60	0,5590	0,4941	0	1	0,0551	2,5	10,8
22	0.0113 P/3	8	2241	55	0,5600	0,4945	0	1	0,0551	1,8	10
23		8	2241	60	0,5592	0,4950	0	1	0,0553	1,8	10
24		8	1000	60	0,5577	0,4871	1	1	0,0556	4,6	13,1
25		8	1000	55	0,5580	0,4872	1	1	0,0556	4,6	13,1

Tableau 5.10 Résultat des tests avec le code G92

Contrôle du filet / G92												
Paramètres d'entrée				Paramètres à contrôler								
N ^o de la pièce	Nombre de passes	RPM	Angle de pénétration (degré)	ø majeur (in)	ø mineur (in)	Entre	N'entre pas	Rayon de fond	Pas	Temps d'usinage / s		
										contact	total	
1	4	2241	3	0,5620	0,4990	0	1	0,007	0,0551	0,8	6,5	
2	4	2241	3	0,5620	0,4990	0	1	0,007	0,0551	0,8	6,5	
3	4	2648	3	0,5614	0,4975	0	1	0,007	0,0548	0,8	6,5	
4	4	2648	3	0,5610	0,4980	0	1	0,007	0,0584	0,8	6,5	
5	4	2241	5	0,5607	0,4963	0	1	0,007	0,0551	0,9	6,5	
6	4	2241	5	0,5607	0,4963	0	1	0,007	0,0551	0,9	6,5	
7	4	2648	5	0,5598	0,4964	0	1	0,007	0,0551	0,9	6,5	
8	4	2648	5	0,5598	0,4964	0	1	0,007	0,0551	0,9	6,5	
9	8	2241	3	0,5591	0,4932	0	1	0,007	0,0551	1,8	8,7	
10	8	2241	3	0,5591	0,4932	0	1	0,007	0,0551	1,8	8,7	
11	8	2648	3	0,5580	0,4975	0	1	0,007	0,0547	1,8	8,7	
12	8	2648	3	0,5580	0,4975	0	1	0,007	0,0547	1,8	8,7	
13	8	2241	5	0,5588	0,4934	0	1	0,007	0,0550	1,8	8,7	
14	8	2648	5	0,5590	0,5062	0	1	0,007	0,0548	1,8	8,7	
15	5	2241	3	0,5600	0,4980	0	1	0,007	0,0551	0,8	6,5	
16	5	2241	5	0,5602	0,4952	0	1	0,007	0,0551	0,8	6,5	
17	5	1000	5	0,5591	0,4881	0	1	0,007	0,0556	2,5	8,5	

5.6 Étude des types d'usure des plaquettes pour outils de coupe

L'étude et l'analyse des plaquettes des outils de coupe est une pratique nécessaire pour une entreprise comme APN Inc. Cette étude permet de juger de manière indirecte les conditions de coupe utilisées pour usiner les pièces. L'étude directe de l'effet des conditions de coupe sur la productivité peut être faite par réalisation des tests avec un plan d'expérience bien défini. L'entreprise APN Inc. n'est pas un centre de recherche mais une société qui doit usiner des pièces dans les délais du client. Elle n'a pas de politique d'occupation des machines et des employés pour réaliser des expériences. La méthode idéale de contrôle des conditions de coupe pour ce type d'entreprise est de faire des analyses indirectes. Cette

méthode d'analyse indirecte identifie les types d'usures qui sont repérées sur les plaquettes des outils de coupe, sélectionne les sources probables et les compare avec les données du comportement pendant l'usinage. Le contrôle est fait sur l'utilisation optimale des plaquettes des outils de coupe employés.

L'utilisation optimale des plaquettes des outils de coupe est nécessaire pour la programmation des conditions de coupe optimales. La plaquette d'un outil de coupe comporte des informations nécessaires à prendre en compte lors de l'assignation des conditions de coupe.

L'étude et l'analyse des plaquettes ne s'est pas faite sur tous les outils de coupe utilisés. Les outils de coupe sélectionnés pour l'analyse sont les plaquettes d'ébauche, de finition et de filetage. Les plaquettes ont été différenciées selon les critères suivants:

- l'angle de pointe;
- le grade de la plaquette;
- le type de filets à usiner.

5.6.1 Analyse des usures sur les plaquettes d'ébauche (80°)

Les plaquettes d'ébauche servent le plus souvent pour les opérations de dégrossissage. Elles ont pour but principal la productivité. Les opérations liées demandent beaucoup de puissance de la machine avec de grandes profondeurs de passe et des avances élevées. Les plaquettes d'ébauche utilisées par l'entreprise possèdent un angle de pointe de 80 degré.

L'analyse de près de 50 plaquettes usées a donné les résultats suivants:

- 46% des coins inspectés ont une usure en dépouille;
- 10.5% des coins inspectés présentent une rupture;
- 9.2% des coins inspectés présentent une déformation plastique.

En se basant sur les causes probables et les solutions potentielles selon le guide du fabricant des plaquettes (Sandvik, 2015b), l'interprétation des résultats de l'analyse indique que pour mieux prévenir l'usure des outils d'ébauche (80^0), il faudrait augmenter l'angle de dépouille ou la vitesse d'avance et contrôler l'usure initiale de la plaquette.

5.6.2 Analyse des usures sur les plaquettes de finition (35^0)

Les plaquettes de finition servent le plus souvent pour les opérations de respect dimensionnel et d'état de surface. Elles ont pour but principal la qualité. Les opérations liées aux plaquettes de finition demandent une faible puissance de la machine, une faible force de coupe, une faible profondeur de passe et une faible avance. Les plaquettes de finition utilisées par l'entreprise possèdent un angle de pointe de 35 degré.

L'une des caractéristiques majeures des plaquettes de finition est le rayon de bec. Plusieurs fabricants des outils de coupe comme Sandvik recommandent de prendre une profondeur de passe qui doit être au moins égale à $2/3$ du rayon de bec de la plaquette. Le rayon de bec influence entre autre l'état de surface par la formule 5.10 suivante:

$$R_a = 0,0321 \frac{f^2}{r} \quad (5.12)$$

La nuance des plaquettes est une caractéristique importante pour le choix d'une plaquette. La gamme des nuances de plaquettes utilisée par l'entreprise comprend:

- GC 1115;
- GC 1125;
- S05F.

5.6.2.1 Plaquettes de finition (35⁰) S05F

Parmi les critères de choix des plaquettes de finition il existe la nuance appropriée. S05F est une nuance utilisée pour la meilleure durée de vie qu'elle offre à la plaquette et elle est un choix prioritaire pour les superalliages réfractaires.

L'analyse de près de 50 plaquettes usées a donné les résultats suivants:

- 37% des coins inspectés ont une rupture;
- 27.5% des coins inspectés ont une usure en dépouille;
- 22.5% des coins inspectés présentent un écaillage en dehors de la zone de coupe;
- 11.35% des coins inspectés présentent un écaillage de l'arête;
- 10% des coins inspectés présentent une usure d'arête rapportée.

En se basant sur les causes probables et les solutions potentielles selon le guide du fabricant des plaquettes (Sandvik, 2015b), l'interprétation des résultats de l'analyse indique que pour mieux prévenir l'usure des outils de finition (35⁰) S05F, il faudrait contrôler l'usure initiale de la plaquette, augmenter la vitesse d'avance. La profondeur de passe ne doit pas aussi être moins que le rayon de bec de l'outil.

5.6.2.2 Plaquettes de finition (35⁰) GC1115 et GC1125

Les nuances de plaquettes GC 1115 et GC 1125 sont utilisées comme deuxième choix pour les opérations de semi-finition et de finition. La nuance GC 1115 possède une bonne résistance aux arêtes rapportées, idéales pour les conditions instables. La nuance GC 1125 possède une bonne résistance thermique et à l'usure en entaille (Sandvik, 2015b).

L'analyse de près de 50 plaquettes usées a donné les résultats suivants:

- près de 56% des coins inspectés présentent un écaillage de l'arête;
- près de 35.7% des coins inspectés présentent une usure en dépouille;

- près de 11.97% des coins inspectés présentent une usure en cratère;
- près de 9.5% des coins inspectés présentent une rupture;
- près de 9.5% des coins inspectés présentent une arête rapportée.

En se basant sur les causes probables et les solutions potentielles selon le guide du fabricant des plaquettes (Sandvik, 2015b), l'interprétation des résultats de l'analyse indique que pour mieux prévenir l'usure des outils de finition (35^0) de grade 1115 et 1125, il faudrait mieux orienter le copeau, augmenter l'angle de dépouille ou la vitesse d'avance ou contrôler l'usure initiale de la plaquette.

5.6.2.3 Analyse des usures sur les plaquettes de filetage extérieur

Les plaquettes de filetage extérieur permettent d'usiner des formes de filets complexes. L'étude s'est faite principalement selon le type de filet UNJ qui trouve son application dans l'aéronautique. Le type de filet UNJ est composé d'autres sous types de filets à savoir NJ et UN. Toutes les plaquettes analysées ont pour nuance GC 1125.

1. Plaquettes de filetage NJ

L'analyse de près de 50 plaquettes usées a donné les résultats suivants:

- près de 58.5% des coins inspectés présentent une usure en dépouille;
- près de 22.5% des coins inspectés présentent une usure d'arête rapportée.

En se basant sur les causes probables et les solutions potentielles selon le guide du fabricant des plaquettes (Sandvik, 2015b), l'interprétation des résultats de l'analyse indique que pour mieux prévenir l'usure des plaquettes de filetage NJ, il faudrait réduire le nombre de passe (le faire tendre à celui du catalogue) et vérifier le réglage de l'outil.

2. Plaquettes de filetage UN

L'analyse de près de 50 plaquettes usées a donné les résultats suivants:

- près de 43% des coins inspectés présentent une usure en dépouille;
- près de 28.5% des coins inspectés présentent une usure d'arête rapportée.

En se basant sur les causes probables et les solutions potentielles selon le guide du fabricant des plaquettes (Sandvik, 2015b), l'interprétation des résultats de l'analyse indique que pour mieux prévenir l'usure des plaquettes de filetage UN, il faudrait réduire le nombre de passe (le faire tendre à celui du catalogue) et vérifier le réglage de l'outil ou augmenter la vitesse de coupe.

L'analyse des types d'usure sur les plaquettes des outils de coupe démontre une utilisation de mauvaises conditions de coupe. Cette analyse donne les orientations des paramètres à améliorer pour augmenter la productivité de l'entreprise. Cette analyse ressort les vitesses d'avance et parfois de coupe trop basse ainsi que les profondeurs de passe.

5.7 Conclusion

L'étude et l'amélioration des opérations d'usinage les plus redondantes sur les pièces qui ont un haut volume annuel de production est une nécessité pour l'entreprise. La partie étude permet de recenser les opérations d'usinage les plus effectuées par les procédés d'usinage, de quantifier les différents temps d'usinage, d'identifier les faiblesses des méthodes utilisées par l'entreprise. La partie optimisation permet tout simplement de proposer la méthode optimale d'effectuer les opérations d'usinage identifiées par le chapitre précédent.

L'étude a permis d'identifier l'usinage des filets, le contournage pour l'obtention de l'hexagone et le perçage des trous sur le plan incliné comme étant les opérations d'usinage

les plus effectuées et les plus longues lors de l'usinage des pièces qui ont le plus haut volume de production annuelle.

La manière optimale de programmer les opérations de filetage a été présentée dans cette section. Les avantages de l'usinage des filets par profondeurs de passes décroissantes ont été démontrés, et le calcul du gain réalisable par l'entreprise en temps sauvé a été calculé. Le calcul du gain en temps sauvé s'est effectué sur la base d'une étude comparative entre la méthode actuellement employée qui est basée sur la profondeur de passe constante et celle basée sur les profondeurs de passes décroissantes. Une étude sur le contournage pour l'obtention de l'hexagone ainsi que le perçage des trous sur le plan incliné a été faite.

L'amélioration des opérations de contournage et de perçage des trous sur le plan incliné a été faite. L'amélioration des deux opérations citées passe par le changement de la forme de la matière brute à utiliser. L'amélioration de ces deux opérations passe par l'utilisation d'une matière brute de forme hexagonale à la place de la forme cylindrique actuellement utilisée. Le calcul du gain réalisable par l'entreprise a été fait pour mieux justifier les changements. La méthode de perçage optimal sur plan incliné a été présentée. L'optimisation des conditions de coupe a aussi été faite.

L'incapacité de faire des tests directs sur l'influence des conditions de coupe utilisées a orienté l'étude vers l'analyse des usures des plaquettes des outils de coupe. Les résultats de l'analyse des usures des outils de coupe démontre qu'il y'a un gain réalisable en changeant les vitesses d'avance, de coupe et les profondeurs de passe.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'amélioration du processus de fabrication est une opération très délicate. C'est une opération qui doit être réalisée avec beaucoup de tact surtout pour une société en pleine mutation de la production unitaire (prototypage) à la production de masse des pièces complexes. L'amélioration d'un processus de fabrication doit répondre aux besoins de l'entreprise. Arriver à proposer une amélioration louable à une entreprise passe par plusieurs actions dont la première est l'analyse des pratiques industrielles de celle-ci au moment donné.

L'analyse des pratiques industrielles actuelles de l'entreprise a permis de présenter un reflet de l'état des lieux. Cette analyse s'est soldée par la création d'une base des données qui récapitule la manière dont les pièces sont programmées. L'analyse des pratiques industrielles n'est qu'une introduction à l'élaboration d'un processus de fabrication optimisé.

L'amélioration de tout le processus de fabrication commence par la réception du cahier de charges du client et se termine par l'expédition des pièces finies et bonnes au client. L'analyse de toutes les étapes de fabrication de l'entreprise a été étudiée. Le résultat de cette amélioration a permis d'améliorer les étapes du processus de fabrication par ajout des actions et des intervenants nécessaires. Une description claire du rôle de tous les intervenants (surtout pour les polisseurs / ébavureurs) dans tout le processus de fabrication a été faite. Les actions prises peuvent permettre l'élimination de la boucle des échanges interminables entre les machinistes et le programmeur. Les conditions de coupes ont aussi été étudiées de manière indirecte.

L'amélioration des conditions de coupe s'est faite de manière indirecte par l'analyse des usures qui se trouvent sur les plaquettes usées. L'analyse des usures des plaquettes a orienté les programmeurs sur les paramètres à optimiser pour augmenter la productivité à savoir les vitesses d'avance et de coupe ainsi que les profondeurs de passes.

RECOMMANDATIONS

L'amélioration d'un processus de fabrication passe par l'étude et l'analyse des besoins spécifiques de l'entreprise. Pour atteindre un résultat significatif, les propositions ont été faites. Mais pour le maintien et l'amélioration continue, les recommandations suivantes ont été proposées:

- assurer le contrôle des procédés car toute chose qui n'est pas contrôlée se dérègle; on appelle cela l'entropie;
- mettre un accent sur les critères APN Inc. de stabilité d'un procédé. Ne pas oublier qu'un bon procédé ne fournit pas toujours de bons résultats, et qu'un mauvais procédé ne fournit pas toujours des mauvais résultats. Le drame d'un mauvais procédé qui fournit des bons résultats est qu'on a tendance à le réutiliser (Collins et T, 2012);
- concevoir un ensemble de stratégies écrites définissant les étapes à suivre afin de maintenir un procédé en contrôle;
- mettre un accent sur la formation et le suivi des machinistes sur l'usure des outils de coupe;
- mettre un accent sur le respect des procédures, car l'utilisation des outils sans méthode est vouée à l'échec, l'important n'est pas l'outil mais la méthode;
- faire une étude fiable des capacités pratiques des machines;
- faire une recherche des causes réelles des problèmes d'usinage;
- élaborer une norme APN Inc. sur l'usure des outils de coupes;
- assurer une formation des responsables de l'ébavurage sur les types de bavures en fonction des conditions de coupe;
- approfondir les tests pour maîtriser les opérations de perçage sur plan incliné;
- maîtriser l'usinage des opérations de filetage avec profondeurs de passes décroissantes.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abouelatta, OB, et J Madl. 2001. « Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations ». *Journal of materials processing technology*, vol. 118, n° 1, p. 269-277.

Goodfellow. [s.d.]. Acier inoxydable. En ligne. < <http://www.goodfellow.com/F/Acier-inoxydable-AISI-347.html> >. Consulté le 10 juillet 2015.

Altshuller, Genrich. 2004. *And suddenly the inventor appeared: TRIZ, the theory of inventive problem solving*. Worcester, M.A.: Technical Innovation Center, Inc., 174 p.

Altshuller, Genrich. 2002. *40 Principles: TRIZ keys to technical innovation*. Volume 1. Worcester, M.A.: Technical Innovation Center, Inc., 135 p.

Altshuller, Genrich. 2000. *The innovation algorithm: TRIZ, systematic innovation and technical creativity*. Worcester, M.A.: Technical Innovation Center, Inc., 311 p.

APN, Inc. 2015. Manuel qualité: Organigramme APN Inc., DAPN 046. Rev11.

APN, Inc. 2015a. « Catalogue ».

APN, Inc. [s.d.]. DAPN 121 .

Borthwick, CJ. 1970. « Economic batch quantities of machined items ». *Production Engineer*, vol. 49, n° 12, p. 513-516.

Brouwers, Isabelle. 1997. *Management humain et contexte de changement: pour une approche constructiviste*. Bruxelles: De Boeck université, 145 p.

Chibane, Hicham, Roger Serra et René Leroy. 2011. « Optimisation des paramètres de coupe en tournage ». Aux 3^{èmes} Journées Identification et Modélisation Expérimentale (JIME). (Douai, France, Avril 6-7 2011), p. 1-7.

Choudhury, SK, et P Srinivas. 2004. « Tool wear prediction in turning ». *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153, p. 276-280.

- Chungchoo, C, et D Saini. 2002. « On-line tool wear estimation in CNC turning operations using fuzzy neural network model ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n° 1, p. 29-40.
- Clancy, Bason E, et Yung C Shin. 2002. « A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, n° 9, p. 1035-1044.
- Collins, Jim, et Hansen Morten T. 2012. *Choisir l'excellence*. 324 p.
- Dan, Li, et Joseph Mathew. 1990. « Tool wear and failure monitoring techniques for turning—a review ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 30, n° 4, p. 579-598.
- Debondgnie, J.F. 1993. *Optimisation des opérations de tournage: La méthode de la puissance disponible*. Rapport LMF/D31. Université de liège, 42 p.
- Gillespie, L.K., 1979. « Deburring precision miniature parts ». *Precision Engineering*, vol 1, n° 4, p. 189-198.
- Hassan, Kamal, Anish Kumar et MP Garg. 2012. « Experimental investigation of Material removal rate in CNC turning using Taguchi method ». *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 2, n° 2, p. 1581-1590.
- Kaminski, J, et R Crafoord. 1994. « Positional accuracy of holes when drilling in inclined workpiece surfaces Part 1: experimental results ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 208, n° 2, p. 129-139.
- Lan, Tian-Syung. 2009. « Taguchi optimization of multi-objective CNC machining using TOPSIS ». *Information Technology Journal*, vol. 8, n° 6, p. 917-922.
- Lin, T-R. 2002. « Cutting behaviour using variable feed and variable speed when drilling stainless steel with TiN-coated carbide drills ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 19, n° 9, p. 629-636.

Mehdi, remadna. 2001. « Le comportement du système usinant en tournage dur: Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de bore cubique) ». Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 243 p.

Merchant, M Eugene. 1993. « Some observations on the past and present of research on machining and grinding ». *Applied Mechanics Reviews*, vol. 46, n° 3, p. 72-73.

Mitsubishi, carbide. [s.d.]. Données techniques. En ligne.
<https://www.mitsubishicarbide.com/EU/fr/product/pdf/c_n_other/c006f_n.pdf>.
Consulté le 10 juillet 2015.

Nachi. 2015. Aqua Dril Ex Flat. En ligne.
<http://www.nachiamerica.com/index.cfm?pageID=20&prodID=1#tab_3-tab>.
Consulté le 01 juin 2015.

Nash, Mark A., Sheila R. Poling et Sophronia Ward. 2006. *Using lean for fast six sigma results : a synchronized approach* (2006). Coll. « Using lean for faster six sigma results: a synchronized approach ». New York: Productivity Press, xiv, 161 p.

Özel, Tuğrul, et Yiğit Karpat. 2005. « Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, n° 4, p. 467-479.

Pierrette, Sartin. 1968. « Les cadres et les directions devant les temps improductifs ». *Relations industrielles*, vol. 23, p. 201-220.

Poulachon, Gérard, BP Bandyopadhyay, IS Jawahir, Sébastien Pheulpin et Emmanuel Seguin. 2004. « Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels ». *Wear*, vol. 256, n° 3, p. 302-310.

Sakuma, Keizo, Hiroshi Kiyota et Hidenori Morita. 1983. « Positional Accuracy of Hole in Drilling: Effect of Rigidity and Point Geometry of Drill ». *Bulletin of JSME*, vol. 26, n° 214, p. 659-666.

Sandvik. 2015a. Filetage. En ligne.
<<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/fr-fr/c-2920-031.pdf>>. Consulté le 07 avril 2015.

Sandvik, Catalogue. 2015b. Usure des outils. En ligne. <http://www.sandvik.coromant.com/fr-r/knowledge/general_turning/troubleshooting-/tool-wear>. Consulté le 07 avril 2015.

Scheffer, C, H Kratz, PS Heyns et F Klocke. 2003. « Development of a tool wear-monitoring system for hard turning ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, n° 10, p. 973-985.

Sick, Bernhard. 2002. « On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research ». *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 16, n° 4, p. 487-546.

Rolled Alloys. [s.d.]. Stainless steel 347. En ligne. <<http://www.rolledalloys.ca/alloys/stainless-steels/347/fr/>>. Consulté le 10 juillet 2015.

TRIZ. [s.d.]. Une méthodologie d'aide à l'invention. En ligne. < http://www.si.ens-cachan.fr/scripts_php/print.php?id=22>. Consulté le 15 juillet 2015.

Université, Lille1. [s.d.]. Les paramètres de coupe. En ligne. < http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/res/F6_Les_param_coupe.pdf>. Consulté le 10 juillet 2015.