Amélioration du procédé de fabrication des plaquettes de filetage pour le secteur pétrolier

Ing. G. WEGNEZ
Ing. P. HENQUET
GRAMME – Liège

Cet article présente un projet réalisé au sein de l'entreprise CERATIZIT et dont le but est l'étude d'actions visant l'amélioration du procédé de fabrication des plaquettes de filetage pour le secteur pétrolier. Afin de mener à bien l'objectif, une méthode d'amélioration de la qualité mondialement reconnue a été utilisée : « la méthode Six Sigma ».

Mots-clefs : métaux durs, carbure de tungstène, coupe, filetage, dureté, coating, rebut, aspérité, Six Sigma, qualité.

This paper focuses on a project carried out at the company CERATIZIT. Its purpose consists in the improvement of the manufacturing process of threading inserts for the petroleum industry. In order to reach this objective, the project is based on an internationally well-known method to improve quality: "the six sigma method".

Keywords : hard metal, tungsten carbide, cutting, threading, hardness, coating, scrap, asperity, Six Sigma, quality.

1. Introduction

Cet article présente le travail réalisé durant quatre mois au sein de l'entreprise CERATIZIT implantée au Luxembourg. Cette entreprise exerce principalement son activité dans le secteur de la fabrication de pièces mécaniques pour des opérations de coupe des métaux.

L'étude réalisée avait comme principale mission l'amélioration du procédé de fabrication des plaquettes de filetage, réalisées en métal dur, afin de réduire le taux des rebuts dus aux défauts.

Des actions de gestion ont été mises en place avec comme référence la méthode « Six Sigma ». Cette méthode structurée de management vise une amélioration de la qualité et de l'efficacité des procédés ; elle est basée sur le calcul d'une moyenne et d'un écart type, suivis de l'analyse du problème grâce à la méthode DMAIC.

2. Le métal dur fritté

2.1. Présentation

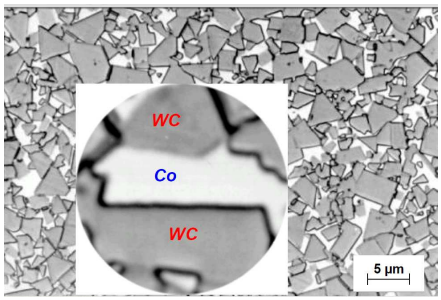

Figure 1 : Microstructure du métal dur WC/Co

Le métal dur fritté utilisé chez CERATIZIT est un mélange de carbure de tungstène et de cobalt. Le métal dur fritté est produit suivant la filière de la métallurgie des poudres[1] qui n'implique, par opposition à la métallurgie classique, jamais la fusion complète des constituants.

[1] La métallurgie des poudres est un processus permettant de réaliser des pièces aux cotes finies, sans usinage et donc sans perte de matière.

Les deux éléments principaux du métal dur fritté étudié au cours de ce projet sont le tungstène, plus précisément le carbure de tungstène et le cobalt.

2.2. Données techniques

Ci-dessous, un tableau reprenant toutes les caractéristiques physico-chimiques des éléments du métal dur fritté utilisé chez CERATIZIT.

Eléments / Caractéristiques	Carbure de tungstène	Tungstène	Cobalt
Formule moléculaire	WC	W	Co
Masse molaire (g/mol)	195,9	183,85	58,93
Densité (g/cm^3)	15,8	19,3	8,9
Point de fusion (°C)	2870	3422	1495
Point d'ébullition (°C)	6000	5555	2870
Structure cristalline	hexagonale	cubique centrée	cubique face centrée
Dureté Vickers (Hv)	1550	500	320
Module de Young (GPa)	720	407	290
Module d'élasticité (GPa)	550	410	210
Conductivité thermique (W/mK)	84,02	174	100
Résistance à la traction (GPa)	0,3448	1,510	0,8
Couleur	gris métallique	gris acier	argenté

2.3. Composition est caractéristiques

Les métaux durs se distinguent par une très grande dureté et une résistance à la rupture. Ces caractéristiques sont obtenues grâce au carbure de tungstène pour la dureté (résistance à l'usure et rigidité) et au cobalt pour la résistance à la rupture (ténacité et ductilité).

Les principaux paramètres permettant d'optimiser les caractéristiques relatives à l'application voulue sont donc la teneur en cobalt et la taille de grain du carbure de tungstène.

La dureté augmente quand la teneur en cobalt et la taille des grains de WC diminuent. La dureté d'un matériau est définie comme sa résistance à la pénétration d'un autre matériau plus dur (HV : dureté de Vickers qui se mesure avec une pyramide en diamant). Le graphique ci-dessous illustre ce comportement.

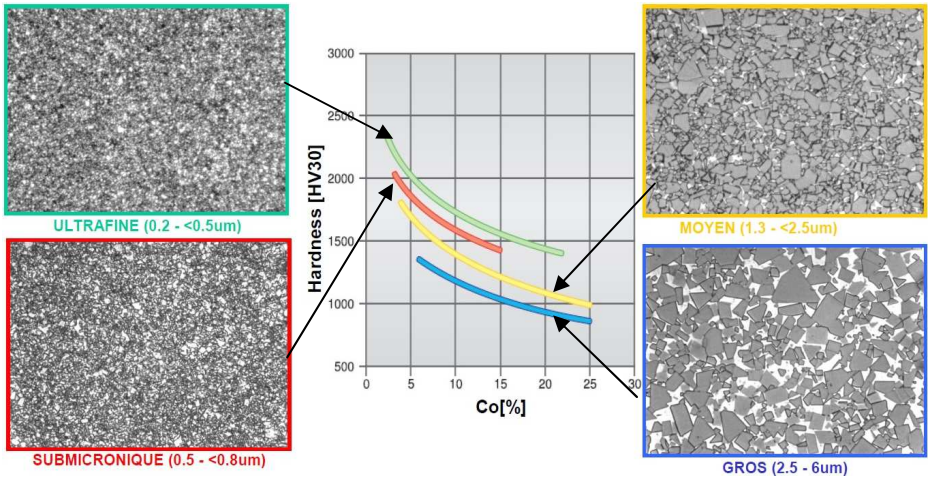

Figure 2 : Relation entre la dureté, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure

La ténacité[2] augmente quand la teneur en cobalt et la taille des grains augmentent. La teneur en cobalt peut monter jusqu'à 30 % pour obtenir une ténacité de 20 MPa$\sqrt{m}$. Le facteur racine de m vient d'une relation empirique déterminé par Griffith A. qui relie la contrainte à la racine de la longueur de l'entaille.

[2] La ténacité caractérise le comportement d'un matériau à la rupture en présence d'une entaille.

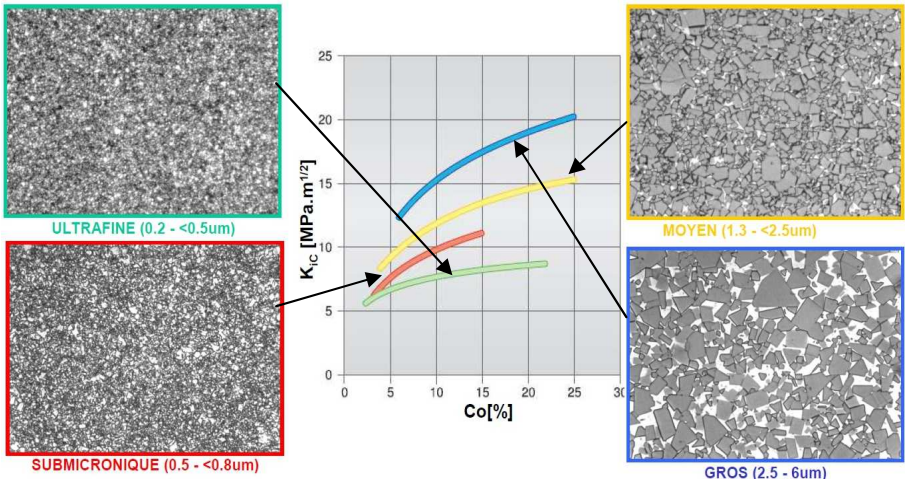

Figure 3 : Relation entre la ténacité, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure

3. Les peignes de filetage

Le peigne de filetage est l'un des produits les plus problématiques chez Ceratizit car il est à la fois l'un des plus chers, l'un des plus fabriqués et l'un des plus longs à fabriquer. Un peigne est caractérisé par sa géométrie, son type de poudre et son recouvrement.

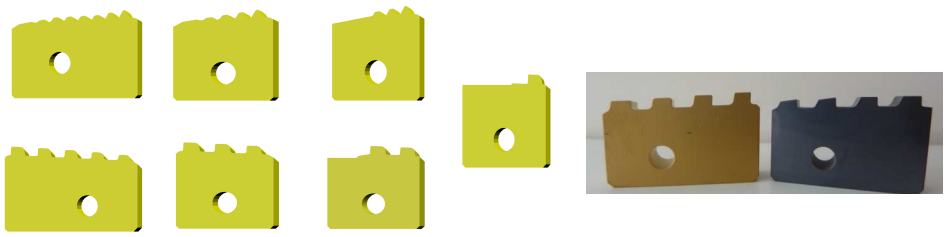

Figure 4 : Représentation de différentes géométries et recouvrement

Un peigne de filetage est une plaquette en métal dur, qui associée à un outil, permet de réaliser un filetage.

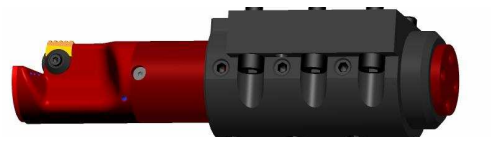

Figure 5 : Outil utilisé pour fixer un peigne et fileter

Les peignes de CERATIZIT permettent de fileter les tubes servant à récolter le pétrole. Certaines réserves de pétrole se situent à des profondeurs telles (plusieurs km) qu'il est impossible de les extraire à l'aide d'un seul tube. Afin d'extraire ce pétrole, il est donc nécessaire d'assembler des tubes entre eux. Pour cela, il existe différentes techniques, mais qui toutes recourt au filetage.

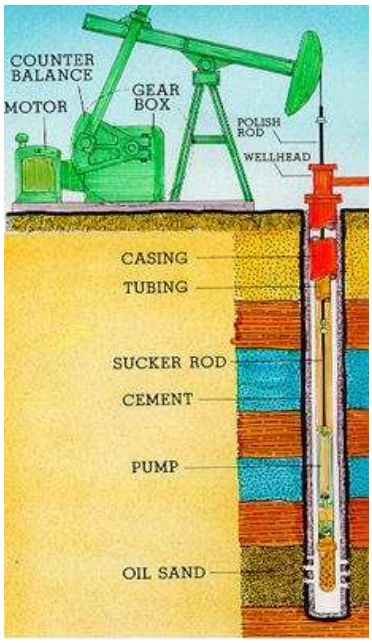

Figure 6 : Système d'extraction du pétrole

Ci-dessous, deux représentations d'assemblage : à gauche, deux tubes réunis à l'aide d'un troisième tube dit de raccord et à droite, deux tubes assemblés directement entre eux.

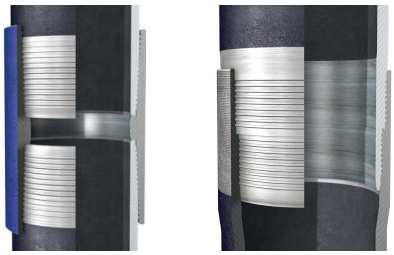

Figure 7 : Tubes filetés

Le filetage des tubes pétroliers est réalisé par la partie dentée des peignes, plus précisément par l'arête de coupe du profil. La dent la plus haute, dite dent de finition, pénètre la dernière dans la matière. La dent de finition est donc la plus importante, car elle termine le filetage.

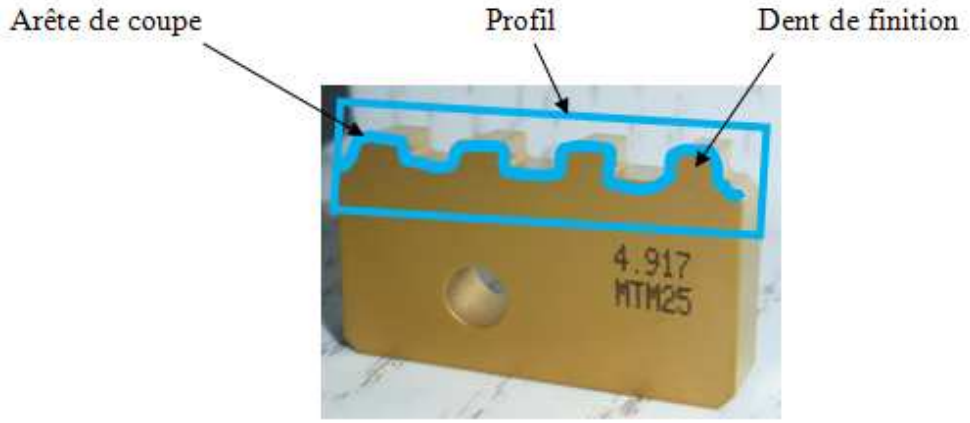

Figure 8 : Peigne de filetage

4. Processus de fabrication des plaquettes de coupe, cas particulier des peignes de filetage

CERATIZIT produit entre quatre-vingts et cent mille références de pièces en métaux durs, par la métallurgie des poudres, ce qui implique une grande variété de produits demandant des processus de fabrication avec des étapes différentes. La représentation des opérations suivantes s'applique donc uniquement à la fabrication des peignes de filetage.

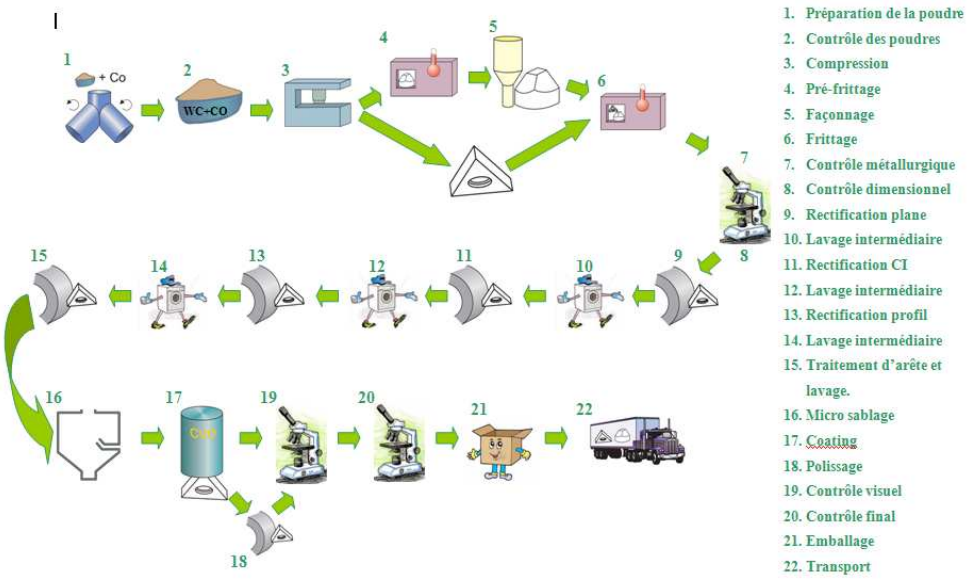

Figure 9 : Représentation du cycle de fabrication

5. Principe de la méthode des « Six Sigma »

La méthode « Six Sigma » est une méthode d'amélioration de la qualité, de l'aptitude d'un processus de production et de la profitabilité reposant sur la maîtrise statistique des procédés, mais c'est aussi un mode de management qui repose sur une organisation très encadrée, dédiée à la conduite de projet. Elle est basée sur deux principales notions de statistique, la loi normale et l'écart type ou sigma, et sur une démarche d'amélioration continue de projet, la méthode DMAIC (évolution de la méthode PDCA).

La méthode « Six Sigma » est souvent utilisée pour concilier plusieurs objectifs :

- doter l'organisation d'actions mesurables et efficaces,
- réduire les pertes et coûts de la qualité.

Il est évident que tout processus de production, manufacturier ou administratif, est incapable de produire exactement le même résultat sur la durée. Malheureusement, cette variabilité est incontournable.

La première étape de la méthode sert à déterminer quelle valeur nominale il est souhaitable d'obtenir, soit la moyenne et quelles limites de variation sont acceptables par rapport à cette valeur, soit l'intervalle de variation. La deuxième étape sert à déterminer la dispersion des valeurs autour de leur moyenne soit l'écart type (ou sigma). L'écart type est donc égal à une fraction de l'intervalle de variation. La dernière étape est la mise en place de la méthode DMAIC afin d'obtenir un écart type égal à l'intervalle de variation divisé par six soit l'intervalle de variation égal à six fois l'écart type (« Six Sigma »).

La mise en place d'un projet d'amélioration « Six Sigma » suit la série d'étapes DMAIC qui n'est qu'une évolution de la roue de Deming, «Define, Measure, Analyze, Improve et Control ».

6. Application de la méthode des « Six Sigma » au projet

Dans le cas présent, chez Ceratizit, les défauts connus impliquant le plus de rebuts sont des défauts attributifs, c'est-à-dire des imperfections physiques telles que : aspérités, ébrèches avant ou après coating, fissures, écaillages. Ces défauts impliquent un rejet de la pièce, ce qui rend le calcul d'une moyenne, d'un intervalle de variation ou d'un écart type impossible. Le nombre de rebuts dus à des cotes hors tolérance est minime et n'a pas été abordé dans le cadre de ce projet. Néanmoins, la suite de la méthode a été appliquée pour réduire le taux de rebuts dus à ces défauts attributifs. Ci-dessous, les étapes de la méthode DMAIC appliqué au projet.

6.1. Définir

- Le problème : pourcentage élevé de rebuts lors de la fabrication des plaquettes chez CERATIZIT.
- Le produit : les peignes de filetage pour les tubes d'extraction de pétrole.
- Les défauts : ébrèche avant coating, ébrèche après coating, aspérité, écaillage, fissure.
- Le champ de travail : les observations et les tests limités aux étapes suivantes : rectification plane, rectification CI[3], rectification profil,

[3] Rectification du cercle inscrit

lavages intermédiaires et final, coating, contrôle visuel - car c'est à partir de ces étapes que les pièces prennent le plus de valeur ajoutée.

- L'objectif : trouver des solutions pouvant réduire le taux de rebuts à 5 %.

6.2. Mesurer

Collecter les informations disponibles à propos de la situation courante

Afin de déterminer les taux de rebut engendrés par la fabrication des plaquettes, des données ont été récoltées et traitées auprès de la production.

Les graphiques suivants montrent en détails le pourcentage des types de défauts en fonction du recouvrement des peignes de filetage pour le mois de janvier et de février au contrôle visuel.

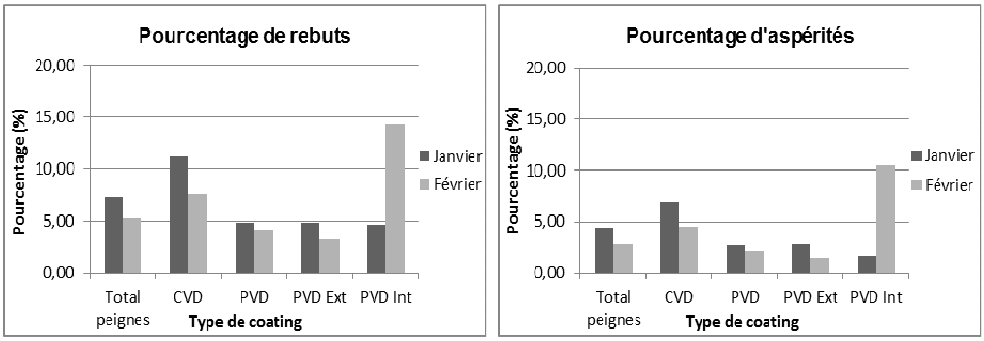

Figure 10 : Taux de rebuts et d'aspérités des mois de janvier et février 2012 lors du contrôle visuel par type de recouvrement

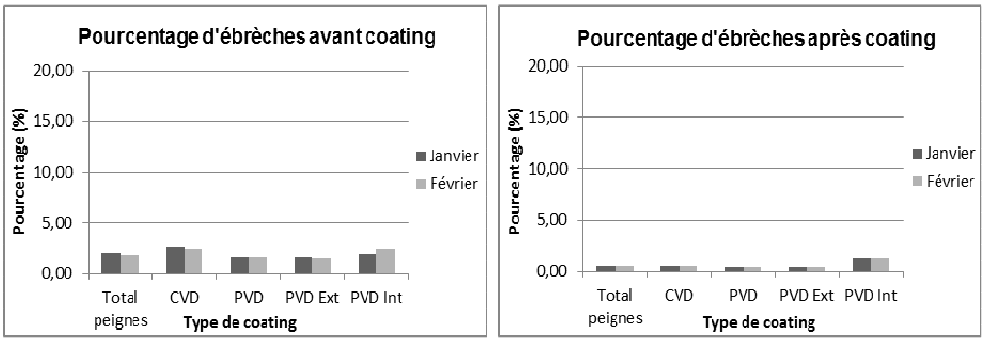

Figure 11 : Taux de rebuts dus aux ébrèches avant et après recouvrement en janvier et février 2012 lors du contrôle visuel par type de recouvrement

L'observation de ces graphiques a permis de constater que les taux de rebuts dus aux aspérités pour les recouvrements CVD[4] et PVD[5] interne étaient problématiques et qu'ils demandaient une analyse car ils étaient largement supérieurs à 5%. De même, si les taux d'ébrèches avant ou après coating étaient relativement faibles ; il était néanmoins intéressant d'y consacrer une analyse étant donné que l'objectif total était l'obtention d'un taux de rebuts inférieur à 5% ; dès lors, le gain de quelques pièces à chaque étape importait.

Rassembler et classer les données collectées par type de défaut

Afin d'obtenir des données chiffrées pour chaque étape du processus, un suivi de sept OFs[6] constituant un échantillon des différents types de peignes produits chez CERATIZIT a été réalisé.
Ci-dessous, le graphique représentant le taux de rebuts global de l'entrée de l'atelier à la sortie du contrôle visuel, dans l'atelier et au coating pour chaque OF observé.

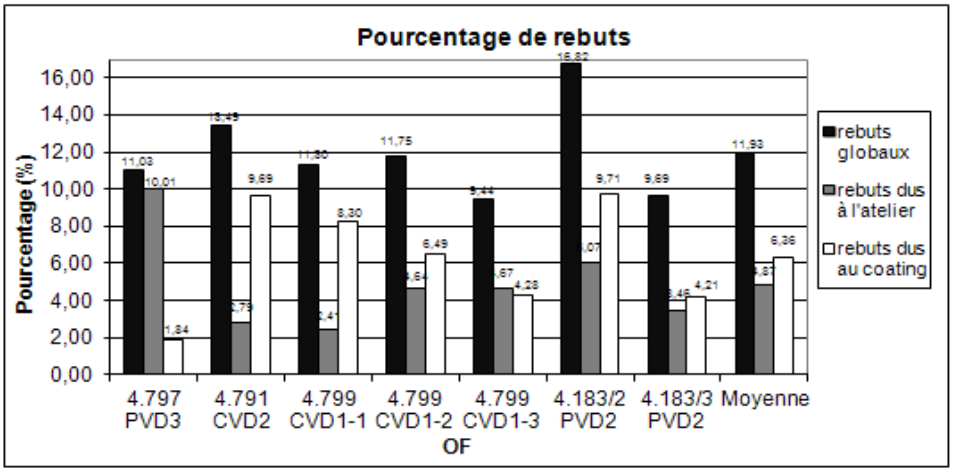

Figure 12 : Taux de rebuts globaux, dus à l'atelier et dus au coating

L'étape créant le plus de rebuts est le coating ; néanmoins, l'atelier n'est pas à négliger dans l'amélioration du taux de rebuts.

---

[4] Dépôt chimique en phase vapeur
[5] Dépôt physique en phase vapeur
[6] Ordres de fabrication.

A l'aide de ces données, il a été mis en évidence les étapes problématiques mais surtout les types de défauts.

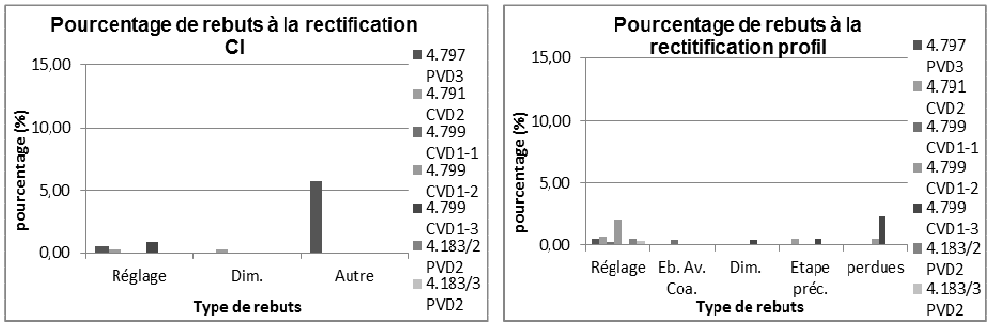

Figure 13 : Taux de rebuts suivant les défauts, à la rectification CI et profil, pour tous les peignes

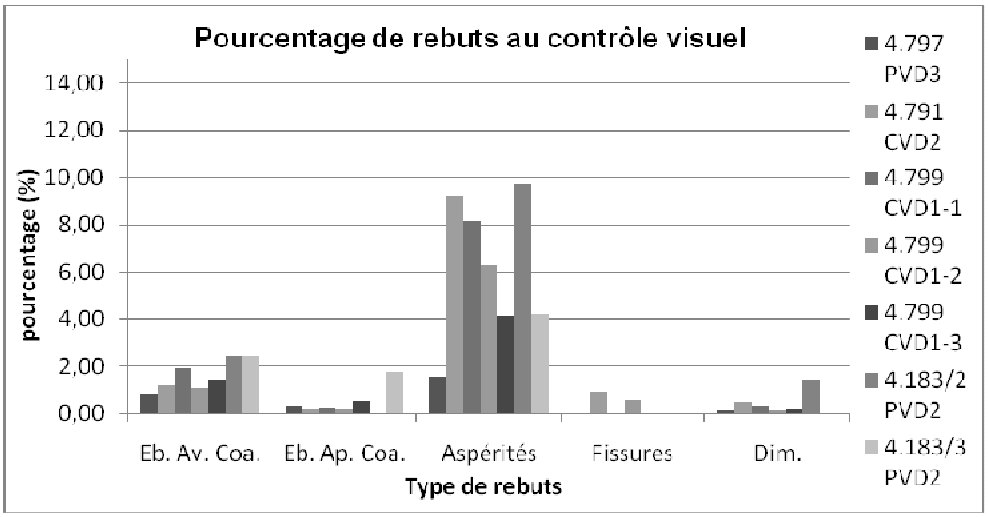

Figure 14 : Taux de rebuts de chaque défaut au contrôle visuel pour tous les types de peignes

Les aspérités sont la première cause de rebut pour les peignes de filetage même si les quantités rebutées restent très variables d'un OF à l'autre.

Ces observations ont permis de classer les défauts provoquant les rebuts par fréquence d'apparition chez CERATIZIT. Les aspérités sont les défauts majeurs avec un taux allant de 4,18 à 9,26 %, suivies des ébrèches avant

recouvrement avec un taux allant de 1,19 à 2,46 %, et des ébrèches après recouvrement pour un taux de 0,24 à 1,75 %. Il convient maintenant d'identifier les causes des défauts et d'y trouver des solutions.

6.3. Analyser

Etudier l'ampleur des défauts

Le processus de fabrication des peignes de filetage est composé d'environ vingt étapes, ce qui engendre une augmentation de la valeur ajoutée à chacune de ces étapes.

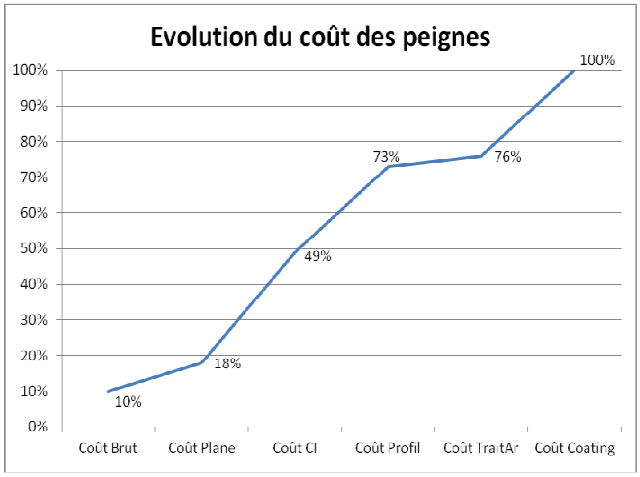

Figure 15 : Evolution du coût des peignes (pourcentage par rapport au coût final des peignes) durant les étapes de l'atelier

À l'entrée de l'atelier, le coût moyen d'un peigne est estimé à moins d'1 € tandis qu'à la sortie, il est estimé à 6 €.

Les rebuts des peignes de filetage sur l'ensemble de l'atelier engendrent un manque à gagner de 639268,2 €/an et les rebuts des peignes de filetage détectés lors du contrôle visuel engendrent un coût de 317697,6 €/an. Ces chiffres mettent en évidence l'importance de la réduction des rebuts.

Rechercher les causes probables des différents défauts

A cette étape de la méthode, une liste des causes probables des défauts a été réalisée grâce aux observations précédentes mais aussi grâce à l'expérience des opérateurs, acquise durant des années de travail :

- causes provoquant des aspérités pour le coating CVD : le lavage (trace de séchage et particules en suspension dans les bains) et les poussières ;
- causes provoquant des aspérités pour le coating PVD : le sable ;
- causes provoquant des aspérités communes pour les deux coating : les fours et les supports ;
- causes provoquant des ébrèches avant recouvrement : les manipulations, le transport et les machines ;
- causes provoquant des ébrèches après recouvrement : les manipulations.

Confirmer ou infirmer les hypothèses de départ

Toute une série de tests a été réalisée pour confirmer ou infirmer ces hypothèses de départ et ont permis d'imaginer des solutions concrètes à mettre en place.

6.4. Améliorer

Rechercher, proposer et faire appliquer des solutions adaptées

Des solutions ont été proposées pour remédier au problème. Certaines d'entre elles ont été appliquées et d'autres non. Voici la liste des domaines sur lesquels ont été appliquées ou non des nouvelles mesures.

Solutions appliquées	*Solutions non appliquées*
Nettoyage et entretien plus strict des cuves de la machine à laver	Modification du programme de la machine à laver
Transport des pièces plus soigneux	Sablage de tous les peignes
Entretient des supports de four	Séparation entre les différents emplacements de travail sensibles
Sensibilisation des opérateurs	Installation de système de filtration de l'air
Information sur la fragilité des pièces	Installation d'une salle blanche pour une pièce sensible

6.5. Contrôler

Les nouvelles procédures, citées ci-dessus, ont été appliquées directement à l'ensemble des OFs. Voici les graphiques reprenant l'évolution du taux de rebuts durant la période de stage.

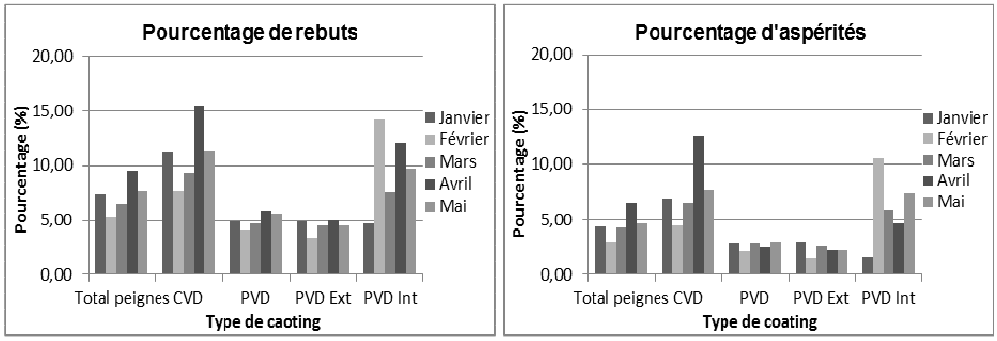

Figure 16 : Taux de rebuts et d'aspérité des cinq derniers mois au contrôle visuel

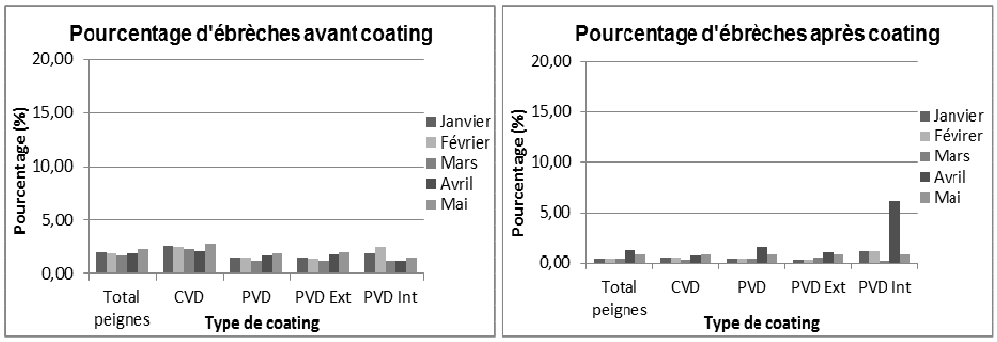

Figure 17 : Taux de rebuts dus aux ébrèches avant et après recouvrement

7. Conclusion

Le projet s'est automatiquement dirigé vers de la gestion de qualité et a eu un caractère très pratique et concret.

Le métal dur utilisé par CERATIZIT, un mélange de carbure de tungstène et de cobalt, étant considéré comme un matériau robuste et donc incassable, sa manipulation n'est pas effectuée avec assez d'égards ce qui engendre de gros dégâts sur les plaquettes.

L'application de la méthode « Six Sigma » a permis de structurer le projet, de déterminer les défauts et leur causes, de trouver des solutions à court et long terme. Il existe trois défauts observés, les aspérités, les ébrèches avant et après coating. Les fissures et les écaillages ne dépassant pas les 0,05 % de rebuts ne sont pas considérés comme problématiques. Les aspérités sont dues à des impuretés résiduelles sur le substrat avant montage dans les fours et aux particules présentes sous forme de poussières dans les fours. Ces dernières étant incontournables, le projet se base sur l'amélioration de la propreté et la protection des substrats avant le montage dans les fours.
Les ébrèches sont dues aux manipulations des opérateurs et aux machines elles-mêmes. Cette deuxième catégorie est traitée instantanément grâce au système de non-conformité existant au département qualité. Le projet est donc basé sur l'amélioration des manipulations.

Afin de remédier aux causes, une série d'actions a été mise en place telles que l'amélioration des conditions de lavage et de transport, l'application d'une nouvelle instruction sur l'entretien des supports de fours PVD, la sensibilisation au fonctionnement d'un peigne de filetage et la formation sur les manipulations créatrices d'ébrèches.

Les effets de ces actions ne sont pas encore tous observables. Pour des résultats à plus long terme, des études théoriques ont été entreprises et des demandes de devis sont actuellement en cours. Par exemple on peut citer l'installation d'une salle blanche pour la pièce de montage de charges CVD, d'un système de ventilation pour la pièce four PVD, la séparation de ces deux pièces et la commande de nouvelles armoires hermétiques. Les effets ne seront observables que d'ici la fin de l'année.

L'objectif chiffré de diminuer le taux de rebuts de moitié sur l'ensemble des peignes de filetage n'est pas atteint car les actions déterminantes n'ont pas encore abouti et que les effets de celles mises en place ne sont pas encore

mesurables. Si le projet n'a pu avoir les effets concrets et pratiques espérés dans le court temps qui lui était imparti, il aura éclairé la problématique de la situation et jeté les bases des actions à long termes à entreprendre.

Une autre piste de diminution du rebut dû aux ébrèches serait d'introduire plus d'automatisation dans ce procédé long et manuel. Typiquement les chargements, déchargements et transports pourraient être automatisés pour un gain de productivité et de rentabilité. Cette option est sérieusement envisagée pour les années à venir.

8. Sources

ASSOCIATION POUR LE DEVELOPPEMENT DES ENTREPRISES DE SOUS-TRAITANCE (page consultée le 14 février 2012), *La méthode Six Sigmas*
Adresse URL : http://www.e-ades.org/upload/Article_Six_Sigma.pdf

Equipe d'employés de CERATIZIT, *Champ de pétrole*
Cycle de formation, Mamer, 2010.

LA GOUVERNANCE DES TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION (page consultée le 14 février 2012), *La méthode Six Sigmas*
Adresse URL :
http://www.it-governance.net/2011/04/la-methode-six-sigma/

LES MATIERES PREMIERES MINERALES (page consultée le 15 mars 2012), *Propriété physico-chimique du cobalt*
Adresse URL :
http://www.mineralinfo.org/Substance/Coalt/PhysChimie.htm

MUSTY'S CAFARNAEUM (page consultée le 19 mars 2012), *Le frittage et la métallurgie des poudres*
Adresse URL :
http://musty-s-cafarnaeum.chez-alice.fr/infosciences/mdp/ifmdpacceuil.htm

USELDINGER R., *Analyse de la résistance à la flexion des métaux durs*
Champagne-Ardennes, Université de Reims, Champagne-Ardennes, mémoire inédit présenté en vue de l'obtention du grade de maître en chimie, 2004.

VALSIDER (page consultée le 8 février 2012), *Présentation du carbure de tungstène*
ADRESSE URL : http://www.valsider.com/fr/tungsten.php