

Version française de l'article pour 12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing

# Gammes et cotation de fabrication pour le réglage des usinages : La méthodologie Copilot-Pro®

Éric Pairel<sup>a</sup>, Benjamin Vayre<sup>b</sup>, Ephraïm Goldschmidt<sup>c</sup>, Boukar Abdelhakim<sup>a</sup>, Maurice Pillet<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université de Savoie, Polytech Annecy-Chambéry, SYMME lab., BP 80439, 74944 Annecy Cedex, France

<sup>b</sup> Grenoble INP Génie industriel, G-SCOP lab., 46, avenue Félix Viallet - 38031 Grenoble Cedex 1 - France

<sup>c</sup> Centre Technique des industries du Décolletage (Ctdec), 750 avenue de Colomby, BP 65, 74301 Cluses, Cedex, France

**Résumé :** L'un des problèmes quotidiens des régleurs sur machine-outils d'usinage est de corriger la forme et la position des outils coupant pour que les pièces usinées respectent les tolérances spécifiées par le bureau d'étude qui les a conçues. La technique couramment utilisée consiste à usiner une première pièce, à la sortir de la machine-outil pour la mesurer, et à en déduire les corrections à faire sur les outils. En général les régleurs mesurent les cotes entre une face posée de la pièce et chaque face usinée. Ainsi ils ont une correspondance directe entre l'écart constaté sur la cote mesurée et la correction à faire sur l'outil réalisant la face usinée. Néanmoins ces cotes de fabrication sont en général très différentes des cotes fonctionnelles indiquées sur le dessin de définition de la pièce. Elles ont, de ce fait, des tolérances beaucoup plus petites que ces dernières. Sur un exemple de processus de décolletage faisant intervenir six opérations de fabrication, nous présentons la première étape de la méthodologie Copilot-Pro®. Elle consiste à déterminer les groupes d'opérations de fabrication qu'il faut faire avant de sortir la pièce de la machine pour mesurer les surfaces réalisées. Ainsi le nombre de pièces sorties de la machine est minimisé ce qui permet de réduire les temps de réglage, qui comprennent les temps de mesurage, de réduire le nombre de pièces de réglage rebutées et de choisir des cotes de fabrication ayant de plus grandes tolérances, voire les tolérances des cotes de définition.

**Mots clés :** décolletage, tour automatique, gamme de fabrication, cotes de fabrication, correction outil, Copilot-pro

## 1. Introduction

L'un des problèmes quotidiens des régleurs sur machine-outils d'usinage est de corriger la forme et la position des outils coupant pour que les pièces usinées respectent les tolérances spécifiées par le bureau d'étude qui les a conçues.

La technique couramment utilisée consiste à usiner une première pièce, à la sortir de la machine-outil pour la mesurer, et à en déduire les corrections à faire sur les outils.

Les cotes qui sont mesurées sur la pièce usinée ne sont pas forcément les cotes spécifiées par le bureau d'étude. Par exemple, pour corriger la position finale de l'outil 1 (voir figure 1), le régleur mesurera la cote de fabrication CF1 plutôt que les cotes CE1 et CE2 spécifiées par le bureau d'étude. C'est en effet plus simple de calculer la correction de l'outil 1 en mesurant CF1 plutôt qu'en mesurant CE1 et CE2 qui dépendent aussi de la position de l'outil 2.

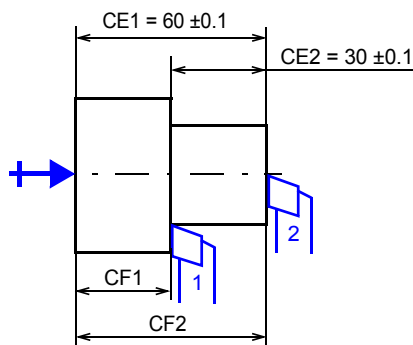


Fig. 1. Cotes spécifiées par le bureau d'études, CEi, et cotes de fabrication utilisées par le régleur, CFi.

Cependant cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- Le régleur aura tendance à mesurer CF1 avant de réaliser la face 2. Il va donc monter et démonter la pièce

deux fois : Une fois pour CF1 et une deuxième fois pour CF2, ce qui allonge les temps de réglage.

- Les tolérances sur ces cotes de fabrication peuvent être beaucoup plus petites que celles des cotes-études CE<sub>i</sub>. Sur cet exemple CF1 et CF2 doivent avoir une tolérance 0,1mm (±0,05mm) pour que la tolérance de 0,2mm (±0,1mm) de CE2 soit garantie, soit une division par deux des tolérances pour cet exemple.
- La conformité des pièces ne peut pas être déclarée à partir de ces cotes de fabrication car on prendrait alors le risque de refuser des pièces qui respectent pourtant les cotes-études. Par exemple, CF1 et CF2 peuvent avoir un écart de 0,07 mm et donc être en dehors de la tolérance de ±0,05mm, alors que ni CE1, ni CE2 ne sont en dehors de leurs tolérances. En effet, dans ce cas, CE1 a un écart de 0,07mm et CE2 aucun.

Pourtant cette méthode, historiquement attribué à Wade [2], [3], a largement été développée [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

L'objectif principale de la méthodologie Copilot-Pro® [15], que nous présentons dans cet article, est de minimiser le nombre de sorties de la pièce de la machine. Sur cet exemple, la pièce ne sera sortie de la machine et mesurée qu'une fois les deux usinages réalisés. Cet objectif présente plusieurs intérêts :

- Les temps de réglage, qui comprennent les temps de mesurage, sont réduits au minimum.
- Le nombre de pièces de réglage est fortement diminué notamment lorsque la pièce sortie de la machine ne peut plus y être ré-introduite. C'est en particulier le cas en décolletage qui nécessite le tronçonnage de la pièce dans la barre dans laquelle est usinée (voir figure 5).
- Les cotes de fabrication à mesurer ont des tolérances plus larges que celles de la méthode de Wade. Elles peuvent même, dans certains cas, correspondre aux tolérances des cotes-études ce qui permet alors de se prononcer sur la conformité des pièces sans risque de rejeter des pièces bonnes [16].

Sur cet exemple, la pièce sera sortie une seule fois après l'usinage des faces 1 et 2. Le régleur pourra alors mesurer directement les cotes-études CE1 et CE2 ce qui permettra de se prononcer sur la conformité de la pièce et de calculer les corrections  $c_i$  à effectuer sur les outils grâce aux relations suivantes, dans lesquelles  $e_{CEi}$  sont les écarts des cotes CE<sub>i</sub> :

$$c_2 = -e_{CE1} \quad (1)$$

$$c_1 = e_{CE2} - e_{CE1} \quad (2)$$

Ces relations sont difficiles à déterminer mentalement devant la machine à régler, mais elles peuvent l'être au préalable et fournies au régleur qui n'a alors plus qu'à les utiliser.

Nous ne détaillerons pas, dans cet article, cet aspect de la méthodologie Copilot-Pro® qui a déjà été présenté [17], mais plutôt la technique qui est utilisée pour regrouper ainsi les opérations d'usinage avant de sortir la pièce de la machine pour mesurer les cotes de fabrication qui permettront de corriger les outils.

Les conditions qui permettent de regrouper les opérations de fabrication, avant de sortir la pièce de la machine pour mesurer des cotes et pouvoir régler les outils, ne sont pas triviales. Elles sont liées à l'encours de pièces dans le flux de production et aux contraintes temporelles entre opérations notamment lorsqu'il y a des ébauches à mesurer avant les opérations de finition.

Nous étudions ces différentes conditions dans les sections qui suivent pour aboutir finalement à la méthode manuelle permettant de déterminer ces regroupements d'opérations de fabrication et les cotes de fabrication à mesurer pour le réglage des outils.

## 2. Phases et étapes de fabrication des gammes de réglage et de surveillance Copilot-Pro

Nous considérons le cas général d'un **processus de fabrication** constitué de **postes de fabrication**, à l'issue desquels les pièces sont stockés ou convoyés et à l'intérieur desquels il y a une ou plusieurs **prises-de-pièces** permettant la réalisation d'une ou de plusieurs **opérations de fabrication** (voir figure 2) <sup>1</sup>.

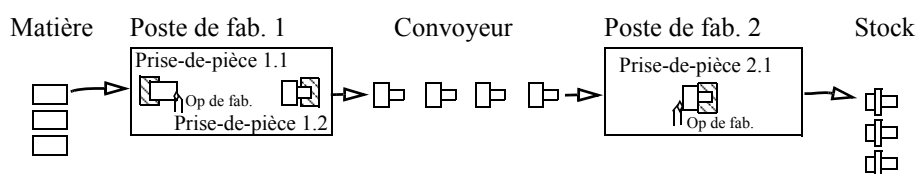


Fig. 2. Schéma général d'un processus de fabrication suivant le modèle hiérarchique «Postes/Prises-de-pièces/Opérations» de Copilot-Pro.

Pour régler les outils de fabrication, il est nécessaire de mesurer au démarrage de la production, puis régulièrement au cours de celle-ci, une pièce venant d'être usinée (ou quelques unes pour diminuer les écarts

1. La description du processus suivant le modèle hiérarchique «Processus/Postes/Prises-de-pièces/Opérations de fabrication» est la donnée d'entrée formatée de la méthode Copilot-Pro. Les stocks et les convoyeurs sont associés aux postes qui les précèdent.

aléatoires par moyennage des écarts mesurés). Le moins coûteux est de la mesurer et de régler en conséquence les outils, juste avant son entrée dans un stock, de manière à le faire en temps masqué par rapport à la production.

Cependant si la pièce ainsi mesurée, présente un écart géométrique trop important pour être accepté, c'est toutes les pièces en cours de production, depuis l'opération de fabrication responsable de cet écart, qui ont très probablement le même écart géométrique et qui devront donc être rebutées.

C'est la première des deux raisons pour lesquelles il n'est pas possible, en général, d'attendre la fin du processus de fabrication, pour mesurer une pièce et régler en conséquence les outils.

La deuxième raison est qu'à la fin du processus, le régleur des dernières opérations de fabrication, peut ne pas avoir la maîtrise du réglage des premières opérations, soit parce-qu'elles sont réalisées par une autre personne, soit parce-qu'elles ont déjà été réalisées sur toutes les pièces.

Nous devons donc «découper» chronologiquement le processus de fabrication, en **phases de fabrication**, à la fin desquelles le mesurage des pièces permettra de régler les opérations de fabrication qu'elles contiennent.

Nous définissons la **phase de fabrication Copilot-Pro** comme étant le regroupement d'un ensemble d'opérations de fabrication, réalisées sur une ou plusieurs prises-de-pièces consécutives, et dont on peut maîtriser conjointement les réglages.

Le regroupement d'une prise-de-pièce, et des opérations de fabrication qu'elle permet de réaliser, dans une phase contenant déjà les prises-de-pièces précédentes, devra se faire en tenant compte des deux critères suivants :

- Peut-on maîtriser conjointement le réglage des nouvelles opérations avec celui des opérations déjà dans la phase ?
- Peut-on accepter l'augmentation de l'encours de pièces qui va en résulter <sup>1</sup>?

En fait, même si toutes les opérations de fabrication d'une phase peuvent être réglées, il faudra pour cela prévoir des **étapes de mesurage** avant la fin de la phase car certaines surfaces alors auront disparues. C'est tout particulièrement le cas des surfaces ébauchées dont le réglage est pourtant important car il détermine la qualité de la surface finie et la durée de vie de l'outil de finition.

Cependant l'introduction d'étapes de mesurage intermédiaires conduira, dans la plupart des cas, à une augmentation du temps de cycle de la pièce ainsi mesurée. Pour que cela ne soit pas le cas, il faudrait que le mesurage intermédiaire se fasse au moment du stockage ou du convoyage de la pièce entre deux prises-de-pièces. Or, le regroupement dans une même phase, de deux prises-de-pièces séparées par un convoyage ou un stockage, est rarement envisageable. C'est donc dans le flux tendu des opérations de fabrication que ces étapes de mesurage devraient, la plupart du temps, être introduites pour mesurer les surfaces qui disparaissent. L'augmentation du temps de cycle qui en résulterait n'est souvent pas acceptable en industrie.

Ceci nous a donc conduit à définir deux gammes de fabrication Copilot-Pro pour tout processus de fabrication :

- La **gamme de surveillance** pour laquelle une seule étape de mesurage est définie à la fin de chaque phase de fabrication et qui ne permet donc pas de régler les outils des surfaces qui disparaissent au cours de la phase. Cette gamme sera utilisée lors de la production normale des pièces avec une fréquence importante.
- La **gamme de réglage**, dans laquelle des **étapes de mesurage intermédiaires** sont définies de manière à pouvoir régler aussi les outils des surfaces qui disparaissent, notamment les surfaces ébauchées. Ces étapes de mesurage intermédiaires conduisant, en général, à une augmentation du temps de cycle, la gamme de réglage sera utilisée avec une périodicité moindre que la gamme de surveillance et nécessitera la plupart du temps un arrêt de la production pour avoir le temps d'extraire la pièce de la machine et de la mesurer. Elle sera également utilisée pour le réglage initial de tous les outils avant le démarrage de la production.

Afin de limiter le nombre et la durée des étapes de mesurage intermédiaires de la gamme de réglage, nous

---

1. Dans les productions classiques, notamment en flux poussé, les phases de fabrication Copilot-Pro correspondront aux postes de fabrication car ceux-ci se terminent par des stocks. Nous retrouverons alors le sens communément admis du terme de phase de fabrication. Mais la définition Copilot-Pro, plus générale et plus précise, permet d'envisager des regroupement d'opérations plus importants, notamment dans les flux tirés.

chercherons à réaliser le plus d'opérations de fabrication possible avant de devoir introduire une étape de mesurage.

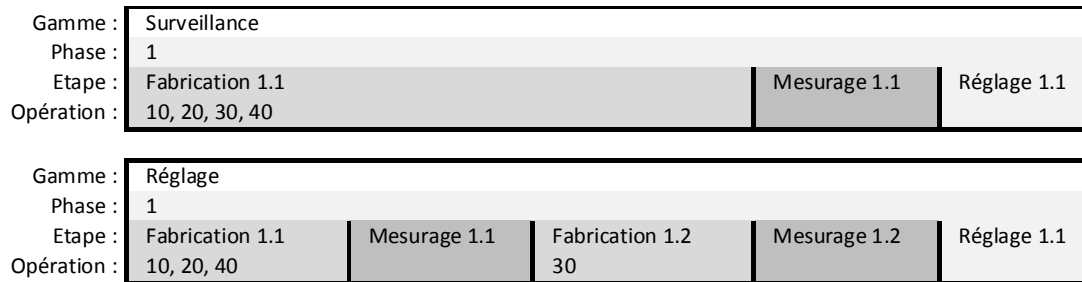


Fig. 3. Organisation hiérarchique des gammes Copilot-Pro et déroulement chronologique typique des phases, étapes et opérations de fabrication.

Ces regroupements d'opérations, précédant les étapes de mesurage, sont appelés les **étapes de fabrication**. Dans le cas de la gamme de surveillance, il n'y a qu'une seule étape de fabrication, suivie d'une seule étape de mesurage et d'une seule étape de réglage par phase de fabrication, alors que pour la gamme de réglage, on pourra avoir plusieurs étapes de fabrication, suivies chacune d'une étape de mesurage, et terminées, à la fin de la phase, par une étape de réglage. La figure 3 permet d'illustrer cette organisation hiérarchique d'une gamme, en phases, étapes et opérations de fabrication, et leurs déroulements chronologiques.

### 3. Exemple de processus de fabrication

Nous considérons l'exemple d'une pièce, dont le dessin de définition est donné à la figure 4, usinée dans une barre sur une machine de décolletage suivant le processus de fabrication présenté sur la figure 5.

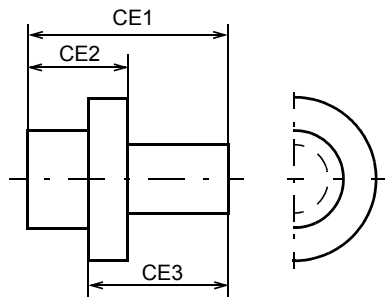


Fig. 4. Dessin de définition de la pièce.

Les cotes de définition de la pièce sont nommées CE1, CE2 et CE3 (Voir figure 4. Les cotes de diamètres n'ont pas été indiquées pour simplifier la présentation). Ces cotes ont des intervalles de tolérance même s'ils ne sont pas indiqués ici.

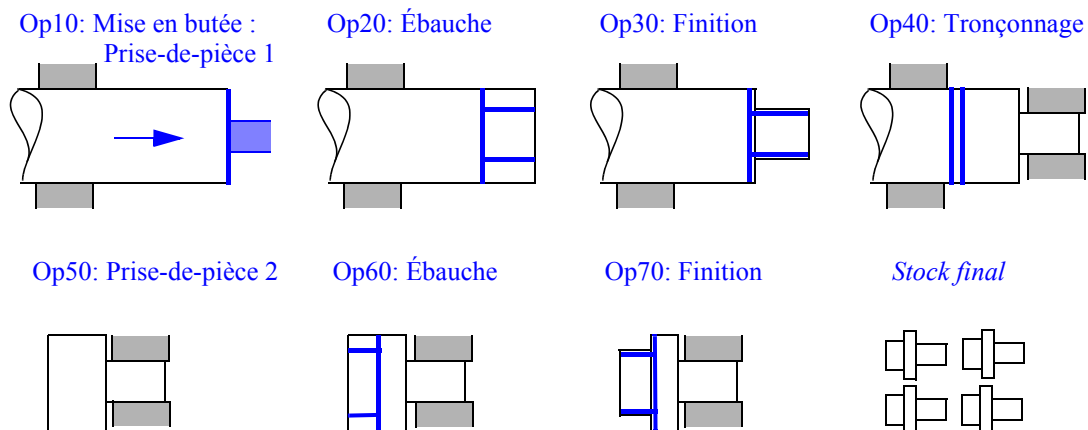


Fig. 5. Processus de fabrication : Un seul Poste de fabrication qui est un tour automatique avec une contre-broche.

La position de la seconde prise-de-pièce (Opération 50), réalisée par la contre-broche de la machine, est connue à chaque instant par rapport à celle de la première prise-de-pièce, réalisée par la broche principale de la machine. C'est pourquoi la pièce n'est pas appuyée sur sa surface plane (Voir Opération 50 sur la figure 5). La contre-broche vient pincer la pièce avant l'opération 40 de tronçonnage, puis recule (Op50 : Prise-de-pièce 2), pour permettre aux

outils la réalisation des opérations 60 et 70.

#### 4. Gamme de réglage du processus exemple

Sur le procédé présenté à la section précédente, le régleur peut maîtriser simultanément l'ensemble des réglages des outils. De plus l'encours de pièces est acceptable. S'il s'agit d'un tour monobroche, il est de deux pièces usinées simultanément: Une sur la broche principal, l'autre sur la contre-broche. Les deux prises-de-pièces et les opérations qu'elles permettent de réaliser, peuvent donc être placées dans la même phase.

Néanmoins, à la fin de cette unique phase de fabrication, les surfaces ébauchées auront disparues (Opérations 20 et 60). La gamme de surveillance, ne permettra pas de régler la position de ces surfaces.

Nous allons donc déterminer les étapes de fabrication et les étapes de mesurage de la gamme de réglage nécessaires au réglage de toutes les opérations.

Afin de regrouper le plus grand nombre d'opérations de fabrication avant de réaliser une étape de mesurage, nous allons étudier les contraintes, entre opérations, vis-à-vis de leur regroupement dans une même étape de fabrication.

La plus évidente des contraintes est qu'aucune opération d'une étape de la gamme de réglage, ne doit supprimer une surface déjà réalisée dans l'étape car alors l'opération ayant réalisée cette dernière ne serait pas réglable. En particulier une opération d'ébauche devra réalisée dans une étape de fabrication **antérieur** à celle contenant l'opération de finition. Cette contrainte est la première du tableau 1. Les étapes de fabrication n'étant pas encore constituées, cette contrainte sera introduite entre les deux opérations. Graphiquement, nous la représentons par un arc en trait fort, orienté depuis chaque opération d'ébauche vers chaque opération de finition (Cf arcs entre les opérations 20 et 30 d'une part et 60 et 70 d'autre part sur la figure 6).

D'autre part, il y a des contraintes technologiques qui imposent un ordre chronologique entre les opérations (certaines opérations ne pouvant être réalisées que si d'autres l'ont été avant). Ces contraintes, au nombre de trois, sont explicitées dans tableau 1, sous les numéros 2, 3 et 4. Elles imposent que la première opération, dans l'ordre chronologique, soit dans une étape **antérieure ou identique** à celle contenant la seconde. Ces contraintes sont représentées graphiquement par un arc en pointillé orienté depuis la première opération vers la deuxième opération suivant l'ordre chronologique (voir arcs en pointillé sur la figure 6).

Enfin une dernière contrainte est liée à la méthode Copilot-Pro® de détermination des cotes de fabrication que nous présenterons plus loin. Si dans une phase, une prise-de-pièce utilise une surface non réalisée et non posée dans la phase alors elle doit ouvrir une nouvelle étape de fabrication. C'est évidemment le cas de la première prise-de-pièce de la phase mais cela peut aussi être le cas de prises-de-pièces ultérieures dans la phase bien que cela ne soit pas courant. Pour que cette prise-de-pièce déclenche automatiquement l'ouverture d'une nouvelle étape, nous introduirons des contraintes entre les dernières opérations de fabrication des prises-de-pièces précédentes et cette nouvelle prise-de-pièce pour indiquer que ces opérations devront être dans des étapes **antérieures** à celle contenant cette nouvelle prise-de-pièce. Cette contrainte porte le numéro 5 dans le tableau. Elle ne se rencontre que très rarement et n'est pas présente sur le processus présenté dans cet article.

Le tableau ci-dessous liste les cinq contraintes qui, à ce jour, semblent nécessaires et suffisantes pour le regroupement des opérations en étapes de fabrication<sup>1</sup>.

---

1. Ces contraintes sont dites automatiques. D'autres contraintes, qui ne peuvent pas se déduire automatiquement de la description du processus, peuvent être introduites. Par exemple pour indiquer qu'il n'est pas possible de réaliser une gorge dans un alésage tant que cet alésage n'a pas été réalisé. Ces contraintes seront du type «antérieur ou identique». En effet la gorge pourra être réalisée dans la même étape que l'alésage.

Tableau 1: Contraintes entre opérations vis-à-vis de leur regroupement en étapes de fabrication.

#	Contraintes entre opérations	Représentation sur le graphe des opérations et des prises-de-pièces
1	Si une opération (une finition) supprime la surface réalisée par une autre (l'ébauche), cette dernière doit être dans une étape <b>antérieure</b> à celle qui contient la première <sup>a</sup> .	<b>Arc fort</b> depuis l'ébauche vers la finition.
2	Toute prise-de-pièce doit être réalisée dans une étape <b>antérieure ou identique</b> à celles qui contiennent les opérations de fabrication réalisées dans cette prise-de-pièce <sup>b</sup> .	<b>Arc en pointillé</b> depuis la prise-de-pièce vers les opérations de fabrication réalisées dans cette prise-de-pièce.
3	L'usinage d'une surface doit être réalisé dans une étape <b>antérieure ou identique</b> à celles qui contiennent une prise-de-pièce utilisant cette surface <sup>c</sup> .	<b>Arc en pointillé</b> depuis l'opération d'usinage de la surface vers les prises-de-pièces utilisant cette surface.
4	Le tronçonnage doit être réalisé dans une étape <b>antérieure ou identique</b> à celle qui contient la prise-de-pièce suivante, s'il y en a <sup>d</sup> .	<b>Arc en pointillé</b> depuis le tronçonnage vers la prise-de-pièce qui suit.
5	Les dernières opérations de fabrication réalisées dans les premières prise-de-pièces d'une phase de fabrication doivent être réalisées dans des étapes <b>antérieures</b> à celle qui contiendra la prise-de-pièce utilisant une surface réalisée ou posée dans une phase de fabrication précédente <sup>e</sup> .	<b>Arcs forts</b> depuis les dernières opérations de fabrication réalisées dans les premières prises-de-pièce de la phase vers la prise-de-pièce utilisant une surface réalisée ou posée dans une phase précédente.

- Cette règle a été mise en évidence par Ephraïm Goldschmidt [15]. Nous l'avons simplement généralisée à toute opération supprimant une surface réalisée par une autre opération.
- Cette règle a été mise en évidence par Ephraïm Goldschmidt [15].
- Cette règle a été exprimée par B. Vayre [18].
- Cette règle n'avait été introduite dans aucun des travaux précédant cet article. Si elle n'est pas respectée, il y a un risque d'obtenir une étape contenant des opérations d'usinage réalisées avant et après le tronçonnage alors que celui-ci est dans une étape ultérieure. Or c'est techniquement impossible.
- Cette règle a été mise en évidence par B. Vayre [18]. Si elle n'est pas respectée, il y a un risque de placer la nouvelle prise-de-pièce dans l'étape contenant les prises-de-pièces précédentes et d'introduire ensuite des cotes de fabrication entre, d'une part, les surfaces réalisées par les opérations de fabrication des précédentes prises-de-pièces et, d'autre part, la surface utilisée par la nouvelle prise de pièce. Or la position de cette dernière surface est inconnue et non maîtrisée dans les premières prises-de-pièces.

En appliquant systématiquement ces contraintes aux opérations du processus de fabrication pris en exemple, nous obtenons le graphe de la figure 6 qui permet alors de déterminer les regroupements des opérations en étapes de fabrication<sup>1</sup>.

En effet, on constate que l'opération 40 peut être faite sans avoir fait l'opération 30 (puisque'il n'y a pas d'arc entre elles). La première étape sera donc constituée des opérations 10, 20 et 40 qui sont reliées entre elles par une contrainte de type «étape antérieure ou identique». La pièce ainsi usinée aura la forme présentée sur le premier dessin de la figure 9.

L'opération 30 devra être réalisée dans une seconde étape avec les opérations 50 et 60 qui ne sont reliées entre elles que par des contraintes de type «étape antérieure ou identique». La pièce issue de la première étape ne peut pas être réutilisée pour cette seconde étape. Il faudra donc en faire une seconde, sur laquelle on réalisera d'abord les opérations 10, 20, 30, 40, 50 et 60. Autrement dit les nouvelles étapes de fabrication ajoutent des opérations aux opérations faites dans les précédentes étapes.

Enfin une troisième étape sera nécessaire pour réaliser l'opération 70.

1. Bien que cela ne soit pas utile pour déterminer les étapes, nous avons repéré le numéro de la contrainte de chaque arc.

Les pièces issues de ces trois étapes de fabrication, sont représentées à la figure 9.

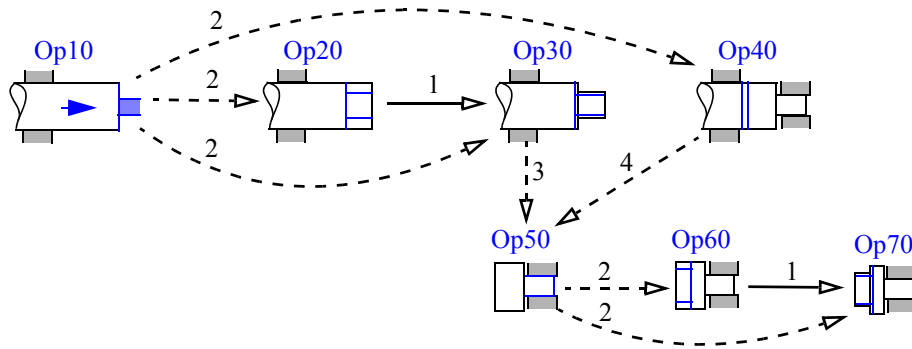


Fig. 6. Graphe des contraintes entre opérations de fabrication.

### 5. Cotes de fabrication de la gamme de réglage

Pour la suite, nous devons identifier chaque surface. L'identifiant d'une surface commence par une lettre majuscule, correspondant à la direction de la cote qui la positionne, suivi d'un numéro d'ordre et d'une lettre minuscule s'il s'agit d'une ébauche (Cf figure 7).

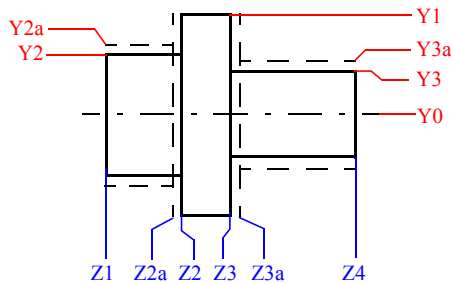


Fig. 7. Identification des surfaces.

Afin de déterminer les cotes de fabrication, nous créons un tableau dans lequel, pour chaque étape en ligne, nous plaçons un caractère X pour chaque surface usinée et O pour chaque surface posée (ou les deux si la surface est d'abord usinée puis posée. Cf figure 8).

	Z1	Z2a	Z2	Z3	Z3a	Z4	Y0	Y1	Y2a	Y2	Y3a	Y3	Operations
Stage 1.1	X				X	O	I	O			X		Op10, 20, 40
Stage 1.2	I	X		X		I	I	I	X			XO	Op30, 50, 60
Stage 1.3	I		X	I		I	I	I		X		I	Op70

CE1	<					>
CE2	<			>		
CE3			<			>
CM1		<	>			
CM2				<	>	

Fig. 8. Étapes de la gamme de réglage et tableau des cotes-études et des cotes-méthodes.

Étant donné qu'à chaque nouvelle étape, le réglage aura réalisé les opérations de l'étape précédente, les surfaces de ces dernières subsisteront à l'issue de la nouvelle étape (sauf si c'était une ébauche de la finition réalisée dans l'étape). Cette information est indiquée par le caractère I. Par exemple, Z1 est réalisée dès l'étape 1.1 et n'est supprimée par aucune autre opération ultérieure. Donc cette surface est présente sur les pièces issues des étapes 1.2 et 1.3. Cela est indiqué par le caractère I dans ces étapes (voir figure 8).

Les cotes de fabrication qui peuvent être mesurées et maîtrisées par le réglage des outils, sont celles qui relient deux surfaces présentes dans une même étape, c'est-à-dire des surfaces repérées par les caractères X, O ou I. Ainsi, à l'issue de l'étape 1.1, toute cote entre Z1, Z3a et Z4 peut être mesurée et maîtrisée par le réglage. A contrario, la cote entre Z2a et Z2, par exemple, n'est jamais mesurable (Dans aucune ligne ces deux surfaces ne sont présentes simultanément).

Pour rechercher les cotes de fabrication à mesurer à l'issue de chaque étape, nous dressons un second tableau, sous le premier, pour représenter les surfaces reliées par les cotes-études ou les cotes-méthodes (Cf figure 8). Les



cotes-méthodes correspondent aux sur-épaisseurs laissées pour les finitions. Elles sont, elles aussi, tolérancées.

Dans le premier tableau, nous recherchons le chemin le plus court entre les surfaces que relie chaque cote-étude ou cote-méthode. Ainsi, pour les cotes-études CE1, CE2 et CE3 nous obtenons les cotes de fabrication  $CF_{Z1Z4}$ ,  $CF_{Z1Z3}$  et  $CF_{Z2Z4}$  mesurables à l'issue de l'étape 1.3 (ou bien même avant pour  $CF_{Z1Z4}$ ,  $CF_{Z1Z3}$ ).

Pour les cotes-méthodes CM1 et CM2, les surfaces qu'elles relient ne sont jamais présentes simultanément dans les étapes. Elles devront donc être mesurées indirectement par une chaîne d'au moins deux cotes de fabrication.

On peut par exemple utiliser les cotes de fabrication précédentes,  $CF_{Z2Z4}$  et  $CF_{Z1Z3}$  :

$$CM1 = -CF_{Z2Z4} + CF_{Z4Z2a} \quad (3)$$

$$CM2 = -CF_{Z1Z3} + CF_{Z1Z3a} \quad (4)$$

Ce choix peut avoir pour conséquence de diminuer les tolérances des cotes  $CF_{Z2Z4}$  et  $CF_{Z1Z3}$ , notamment si les tolérances sur les cotes-méthodes sont du même ordre de grandeur que celles des cotes-études. D'autres chaînes seraient possibles pour éviter cette diminution, néanmoins elles introduiraient des cotes de fabrication supplémentaires. Donc, en retenant cette solution, nous pouvons spécifier, l'état des pièces à l'issue de chaque étape de fabrication et les cotes de fabrication à mesurer, sur trois dessins de fabrication (figure 9).

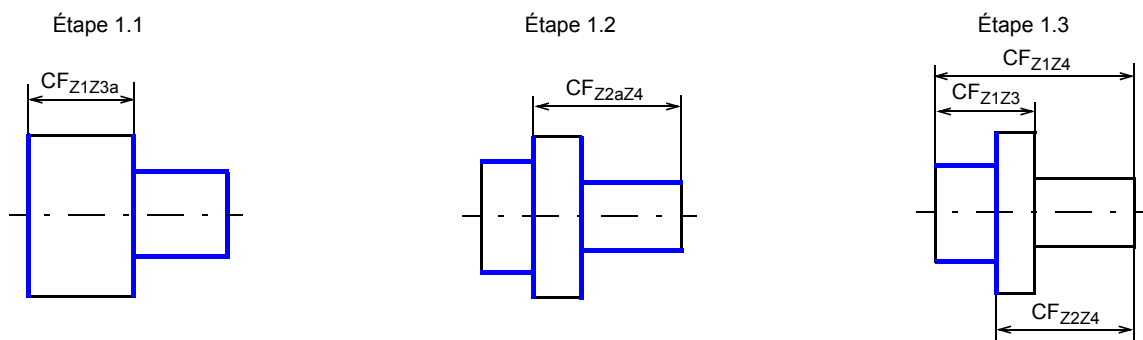


Fig. 9. Dessins de fabrication pour la gamme de réglage avec les cotes de fabrication à mesurer (les usinages sont en trait fort bleu).

Le mesurage des écarts sur ces cotes de fabrication permettra de corriger l'ensemble des outils [17]. L'un des outils devra être figé, c'est-à-dire considéré sans écart, pour pouvoir calculer les écarts sur les autres. Sinon une infinité de solutions serait possible. En général, en décolletage, on choisit de figer la position de l'outil de tronçonnage car il est très proche de la broche.

## 6. Gamme de surveillance du processus exemple

La gamme de surveillance est celle utilisée lors de la production des pièces (voir "Phases et étapes de fabrication des gammes de réglage et de surveillance Copilot-Pro"). Le mesurage des pièces est effectué uniquement à la fin des phases de fabrication. Certaines surfaces ayant alors disparues, certaines cotes de fabrication de la gamme de réglage ne sont plus mesurables. Pour notre exemple, il s'agit des cotes de fabrication  $CF_{Z1Z3a}$  et  $CF_{Z2aZ4}$ . Seules resteront les cotes de fabrication des surfaces subsistant à l'issue de la phase de fabrication, c'est-à-dire, sur l'exemple, les cotes  $CF_{Z1Z4}$ ,  $CF_{Z1Z3}$  et  $CF_{Z2Z4}$  qui correspondent, dans cet exemple, aux cotes-études (ce n'est pas toujours le cas). Cependant leurs tolérances doivent être re-calculées car elles ne sont plus utilisées pour maîtriser les cotes-méthodes CM1 et CM2. Elles auront, dans cet exemple, directement les tolérances des cotes-études.

Les cotes de fabrication à mesurer dans la gamme de surveillance sont donc une partie seulement des cotes de fabrication de la gamme de réglage. Ceci présente l'intérêt de pouvoir utiliser le même procédé de mesure à la fin de la phase de fabrication pour la gamme de réglage comme pour la gamme de surveillance.

## 7. Influence des stocks intermédiaires sur les gammes et les cotes de fabrication

A titre de comparaison et d'explicitation de la méthode Copilot-Pro®, nous allons à présent déterminer la gamme de réglage et les cotes de fabrication d'une variante du processus de fabrication précédent.

Cette variante consiste à produire cette pièce en deux temps : D'abord on réalise les opérations de 10 à 40, puis, après un stockage intermédiaire, on réalise les opérations de 50 à 70. Pour cette variante, la prise-de-pièce 2 est



différente : La pièce doit être appuyée sur la surface plane Z2 (voir figure 10).

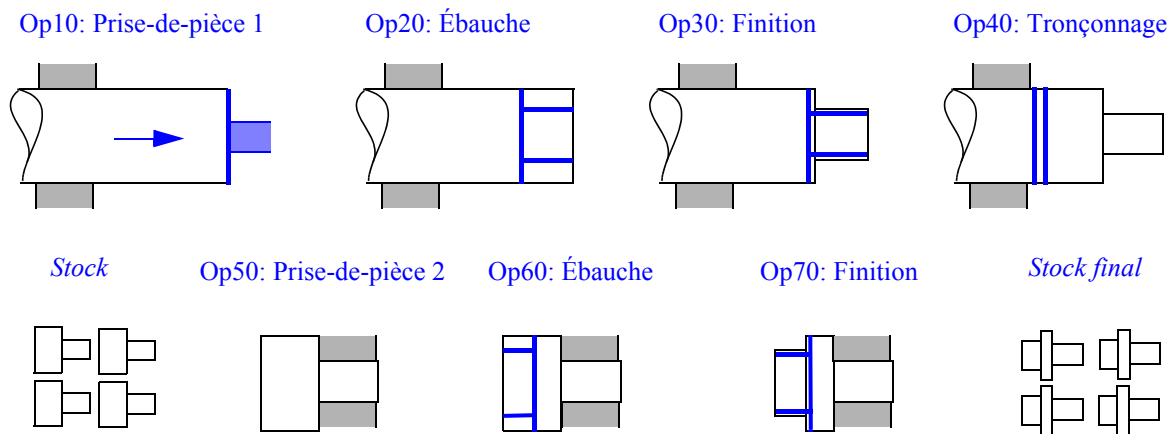


Fig. 10. Processus de fabrication avec un stock intermédiaire.

En raison du stockage intermédiaire, nous considérons qu'il n'est plus possible d'attendre la fin du processus pour régler les outils. L'encours qui risque d'être rebuté est trop important. Les gammes de réglage et de surveillance seront donc constituées de deux phases de fabrication, chacune se terminant sur un stock.

En réalisant le graphe des contraintes comme nous l'avons présenté à la section "Gamme de réglage du processus exemple", il est possible de déterminer que chaque phase sera composée des deux étapes de fabrication.

Nous aurons donc, pour cette variante, deux phases de fabrication, et donc deux étapes de réglage au lieu d'une seule, et quatre étapes de fabrication suivies chacune d'une étape de mesurage, au lieu de trois (voir "Phases et étapes de fabrication des gammes de réglage et de surveillance Copilot-Pro").

De plus, en représentant les cotes-études et les cotes-méthodes sous le tableau des étapes de fabrication (voir figure 11), nous observons que la cote-étude CE3 ne peut plus être mesurée directement car les surfaces qu'elle relie ne sont présentes simultanément dans aucune étapes de fabrication.

	Z1	Z2a	Z2	Z3	Z3a	Z4	O	Y1	Y2a	Y2	Y3a	Y3	Operations
Stage 1.1	X				X	O	I	O			X		Op10, 20, 40
Stage 1.2	I			X		I	I	I				X	Op30
Stage 2.1		X		O			I		X			O	Op50, 60
Stage 2.2			X	I			I			X		I	Op70
CE1	<					>							
CE2	<			>									
CE3			<			>							
CM1		<	>										
CM2				<	>								

Fig. 11. Gamme de réglage de la variante du processus de fabrication : Deux phases de fabrication de deux étapes chacune.

Plusieurs jeux de cotes de fabrication sont possibles. En cherchant un jeu ayant un nombre minimum de cotes de fabrication, on peut obtenir les cotes de fabrications suivantes, qui, pour la plupart, passent par la surface Z3, commune aux deux phases de fabrication :

$$CE1 = CF_{Z1Z3} + CF_{Z3Z4}$$

$$CE2 = CF_{Z1Z3}$$

$$CE3 = CF_{Z2Z3} + CF_{Z3Z4}$$

$$CM1 = CF_{Z2aZ3} - CF_{Z2Z3}$$

$$CM2 = CF_{Z3Z4} - CF_{Z3aZ4}$$

Ces cotes de fabrication peuvent alors indiqués sur les dessins de fabrication (voir figure 12).

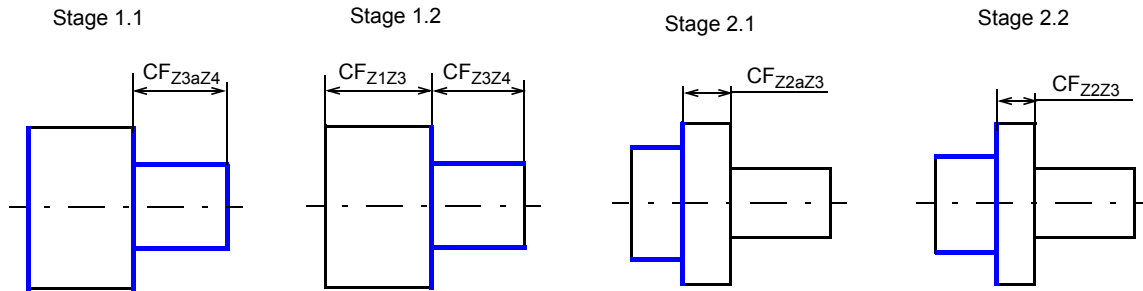


Fig. 12. Dessins de fabrication de la gamme de réglage du processus avec un stock intermédiaire (les usinages sont en trait fort bleu).

Par comparaison avec le processus initial, on voit qu'il est préférable de n'avoir qu'une seule phase de fabrication plutôt que deux, c'est à dire un encours minimal et une maîtrise conjointe du réglage de tous les outils. En effet la cote-étude CE3 ne peut plus être mesurée, même dans la gamme de surveillance. Les tolérances des deux cotes de fabrication qui la remplacent auront des tolérances plus faibles, surtout si les cotes-méthodes ont des tolérances du même ordre de grandeur que les cotes-études.

## 8. Conclusion

Nous avons présenté une méthode qui permet d'ordonner les opérations de fabrication de manière à minimiser le nombre d'étapes de mesurage pour régler les outils de coupe d'une pièce en cours de fabrication. Cette méthode fait partie d'une méthodologie complète de préparation de la fabrication et de réglage des outils en cours de production ou en arrêt de production, appelée Copilot-Pro®. Elle permet de rationaliser les opérations de mesurage des pièces et de réglage des outils trop souvent laissées à l'initiative des régleurs dans les entreprises avec pour conséquence des rebuts de pièces, des temps d'arrêt de production longs et une qualité de lot moindre.

Si la préparation manuelle, telle qu'elle a été présentée dans cet article, peut être envisagée sur des pièces ayant peu de surfaces usinées, l'utilisation d'un logiciel pour des pièces plus complexes semble indispensable. C'est l'objectif que nous nous sommes fixé à présent sur la base d'un premier prototype.

## Références bibliographiques

- [2] Wade, O.R., 1967. Tolerance control in design and manufacturing. New York: Industrial Press.
- [3] Wade, O.R., 1983. Tolerance control. In: Tool and manufacturing engineering handbook, volume 1: machining. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 2/1–2/60. [Chapter 2].
- [4] Johnson, A, 1954. Index tolerance chart simplifies production. *The Tool Engineer*, 32 (2), 53–62.
- [5] Mooney, C.T., 1955. How to adjust tolerance charts. *The Tool Engineer*, 35 (4), 75–81.
- [6] Gadzala, J.L., 1959. Dimensional control in precision manufacturing. New York: McGraw-Hill.
- [7] Ngoi, B.K. A. and Cheong, K.C., 1998. The apparent path tracing approach to tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14 (8), 580–587.
- [8] Irani, S.A., Mittal, R.O., and Lehtihet, E.A., 1989. Tolerance chart optimization. *International Journal of Production Research*, 27 (9), 1531–1552.
- [9] Whybrew, K., et al., 1990. A graph-theoretic approach to tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5 (2), 175–183.
- [10] Britton, G.A., Whybrew, K., and Tor, S.B., 1996. An industrial implementation of computer-aided tolerance charting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12 (2), 122–131.
- [11] Britton, G.A. and Whybrew, K., 1997. CATCH: Computer-aided tolerance charting. In: H.C. Zhang, ed. *Advanced tolerancing techniques*. New York: John Wiley & Sons, 461–489.
- [12] Ngoi, B.K.A. and Tan, C.K., 1995. Computer-aided tolerance charting: a ‘black box’ approach. *International Journal of Production Research*, 33 (4), 1117–1134.
- [13] Xue, J. and Ji, P., 2002. Identifying tolerance chains with a surface-chain model in tolerance charting. *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (1), 93–99.
- [14] Ji, P. and Xue, J., 2006. CAATC – a computer-aided angular tolerance charting system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220 (6), 883–892.
- [15] Ephraïm Goldschmidt, «Gammes et cotation pour le réglage des machines-outils de décolletage», mémoire de Doctorat de l’Université de Savoie, 2009.
- [16] Éric Pairel, Ephraïm Goldschmidt, Pierre-Antoine Adragna, Pascal Hernandez & Maurice Pillet «The pilot dimensions method: reconciling steering and conformity in workshops», *International Journal of Production Research*, Vol. 49, No. 19, October 2011, 5943–5956.
- [17] Éric Pairel, Ephraïm Goldschmidt, Benjamin Vayre, Pierre-Antoine Adragna & Maurice Pillet, «Copilot Pro®: A full method for the steering of the machining», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 2, No. 1, 2011, 51–60.
- [18] Benjamin Vayre, «Algorithme de génération des étapes de mesurage et de réglage pour Copilot-Pro®», Mémoire de Mater recherche, Université de Savoie, 2010.