
Introduction générale à la conception automatique de gammes d'usinage

Pierre BOURDET

*Professeur des Universités à l'E.N.S. de CACHAN
Directeur du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée*

RESUME : La génération automatique de gammes d'usinage est plus que jamais à l'ordre du jour au sein des entreprises qui veulent tendre vers le concept C.I.M. Après avoir montré l'intérêt de la gamme automatique dans trois domaines d'application : production de pièces en série non renouvelable, ordonnancement d'un atelier, conception de pièces mécaniques, il est fait état des résultats d'un travail mené au sein d'un groupe de réflexion, réunissant depuis quatre ans universitaires et industriels. Les définitions de l'opération, de la séquence, du processus, de la sous-phase, de la phase et de la gamme d'usinage sont proposées. Le nouveau concept d'entité d'usinage permet de mieux formuler le mécanisme de conception d'un processus d'usinage. Il est fait mention des différentes approches, apportant actuellement des éléments de solution, à la génération automatique de gammes d'usinage.

L'amélioration conjuguée de l'outil de coupe et des machines-outils permet d'enlever du copeau dans un temps toujours plus court ; l'utilisation systématique de magasins d'outils et de systèmes de palettisation permet de supprimer les temps improductifs ; la nécessité économique de rentabiliser l'investissement financier impose un fonctionnement ininterrompu des unités de production, et dans certains cas, comme dans les systèmes flexibles de production (FMS) un fonctionnement en trois huit. La quantité et par suite la variété des pièces produites se trouve augmentée.

En grande série, le taux de charge des machines est une donnée stable; l'outil de production est adapté dès sa conception à la production de pièces différentes, mais parfaitement identifiées. Les gammes d'usinage sont établies manuellement par l'homme de l'art, elles tiennent compte, une fois pour toutes, des problèmes survenus à la mise au point de la production. Le temps nécessaire à l'élaboration d'une gamme d'usinage est négligeable devant le temps passé à la conception et à la mise au point de l'outil de production. La rentabilité économique d'une génération automatique des gammes d'usinage n'est pas dans ce cas justifiée. Par contre en petite et moyenne série, le taux de charge est assuré par une diversification des pièces produites, et impose une adaptabilité rapide de l'outil de production à de nouvelles pièces. La préparation du travail et la programmation jouent ici un rôle essentiel, l'objectif est d'obtenir, dans un délai raisonnable, une gamme d'usinage suffisamment fine, capable de contribuer à supprimer les temps improductifs de mise au point et de réglage sur machine. Face à cet objectif et devant la complexité et la diversité des pièces produites, le

préparateur se trouve aujourd'hui confronté à de nouveaux choix techniques que l'homme de métier traditionnel ne peut plus maîtriser simplement. En effet l'utilisation systématique de centres d'usinage réalisant le maximum d'opérations sans démontage de la pièce, l'utilisation de machines aux performances cinématiques et mécaniques améliorées et l'apparition quotidienne sur le marché de nouveaux outils de coupe, de nouveaux lubrifiants, etc... offrent pour une même opération d'usinage une diversité de solutions que le gammiste faute de temps ne peut raisonnablement ni dénombrer ni expérimenter. Son choix s'appuie essentiellement sur l'expérience professionnelle et ne tient compte que d'un nombre limité de paramètres technologiques : trouver une solution qui "marche" dans un temps raisonnable, est un objectif difficile à atteindre. La génération automatique de gammes d'usinage trouve ici une justification économique par le gain de temps qu'elle peut apporter dans la phase de préparation et par la prise en compte simultanée de toutes les contraintes. Le système de génération de gammes doit, dans ce cas, parfaitement maîtriser le moindre détail, être capable d'élaborer automatiquement les programmes de commande numérique des machines outils et des robots, être capable d'effectuer tous les choix d'outils, de conditions de coupe, de trajectoires outils et de prises de pièces.

Dans l'ordonnement d'un atelier, la gamme d'usinage joue un rôle très différent, en effet seul l'ordre des surfaces usinées et l'estimation précise des temps de fabrication (temps de préparation, d'approvisionnement et d'usinage) sont nécessaires. La gamme d'usinage est succincte, elle joue un rôle prévisionnel pour établir le plan de charge des machines, les délais de livraison, les devis et l'acceptation des commandes. Utilisée en production, cette gamme peut proposer également les prises de pièces et donner aux professionnels des recommandations sur les difficultés qu'ils pourraient rencontrer telles que les tolérances serrées, les surépaisseurs nécessaires aux traitements thermiques, etc.... Le professionnel définit lui-même, sur site, sa méthode de travail ; le seul impératif imposé est de fabriquer des pièces bonnes dans le temps imparti. Si les pièces produites sont pour la plupart des nouvelles pièces (cas des ateliers d'outillage et de sous-traitance), les gammes établies ne sont jamais réutilisables ; créées spécialement pour chaque pièce, elles ont une vocation de gestion et restent éloignées des problèmes techniques de l'atelier.

En conception de pièces mécaniques, des théories traduites dans des logiciels de calcul et de simulation, proposent au concepteur une assistance au choix des formes et au dimensionnement des pièces. Les théories actuellement formalisées sont essentiellement liées à la cinématique des mécanismes, au comportement vibratoire des pièces, aux calculs de déformations et de résistance des matériaux. Les théories liées à la production telles que la cotation, le tolérancement, le contrôle géométrique, l'assemblage et la fabrication sont peu nombreuses et seule une expérience pratique individuelle permet de résoudre ces différents problèmes. La création de modèles, et par suite de logiciels capables de générer automatiquement des gammes d'usinage et de contrôle permettra au

concepteur non seulement de concevoir des formes économiquement réalisables (dépouilles, arrondis de raccordement, dimensions liées au standard des outils ...etc...) mais également de porter sur les documents des spécifications géométriques "contrôlables".

Les domaines d'application tels que la production de pièces en série non renouvelable, l'ordonnancement d'un atelier et la conception de pièces mécaniques, montrent la nécessité d'une génération automatique de gammes d'usinage. Les approches du problème sont nombreuses et les solutions apportées diffèrent d'une application à l'autre. Des produits issus de la recherche sont en production dans différents ateliers. A l'initiative de l'ENS de CACHAN un groupe de réflexion et d'échanges (groupe GAMA⁰) composé d'universitaires et d'industriels s'est réuni régulièrement pour confronter l'avancement de leurs travaux. Le groupe désire par cette publication formaliser dans un même document l'état de ses principaux travaux sur la génération automatique de gamme d'usinage ; il espère par cette initiative regrouper les équipes désirant travailler sur ce thème⁰ et par suite coordonner une activité de recherche commune.

Il nous semble important, pour une meilleure compréhension des différents articles, de préciser dans cette introduction, les principaux résultats de nos réflexions.

Quelques définitions

Les cultures techniques et scientifiques des industriels et universitaires étant très diversifiées il est indispensable de définir un vocabulaire commun. Les définitions sont le fruit des différentes approches du problème de la gamme automatique. Ainsi nous proposons :

Opération d'usinage : l'opération d'usinage est le travail d'un outil qui produit une et une seule forme géométrique (figure 1).

Par exemple, un perçage simple au foret, une passe de surfaçage sont des opérations d'usinage.

Séquence d'usinage : La séquence d'usinage est une suite ordonnée ininterrompue d'opérations d'usinage (figure 2).

Par exemple un cycle d'ébauche paraxial en tournage, un perçage avec débourrages sont des séquences d'usinage.

Processus d'usinage : un processus d'usinage est une suite ordonnée ininterrompue de séquences d'usinage.(figure 3).

⁰ Ont participé au groupe GAMA par ordre alphabétique les universités et industries suivantes : Aérospatiale Chatillon ; Citroën-Meudon ; CGE-Laboratoire de Marcoussis ; Dassault-Systèmes Suresnes ; ENI de Metz ; ENSM de Nantes ; IM de Grenoble ; ITMI Grenoble ; IUT d'Evry ; Kadetech-Recherche Lyon ; Knowledge Paris ; LURPA-ENS Cachan ;

⁰ Secrétariat du groupe GAMA - LURPA-ENS CACHAN - 61 Av. du Président Wilson 94235 CACHAN CEDEX - Tél: (1) 47 40 22 15

Il représente l'enchaînement des séquences d'usinage conduisant à la réalisation d'une forme géométrique connue du fabricant. L'ordre des séquences d'usinage d'un processus est impératif, par exemple une séquence d'ébauche doit se placer avant une séquence de finition. Il est possible d'imbriquer des séquences d'usinage appartenant à différents processus d'usinage.

Sous-phase d'usinage : une sous-phase d'usinage est un processus d'usinage réalisé sans démontage de la pièce, ni transfert du couple "pièce porte-pièce" d'une broche de machine à une autre.

Phase d'usinage : une phase d'usinage est une succession de sous-phases réalisées sur une même cellule ou un même îlot de fabrication.

Gamme d'usinage : ce terme très général regroupe l'ensemble des informations, plus ou moins détaillées, relatives à la réalisation d'une pièce.

Entité d'usinage

L'*entité d'usinage* est l'expression d'une démarche fondamentale rencontrée dans toute génération de gamme. Elle permet de structurer une logique de conception du processus d'usinage d'une pièce. En effet l'expert peut difficilement déterminer directement l'ordonnancement de toutes les opérations d'usinage ; il "reconnait" au préalable des groupements de formes géométriques, que nous appelons *entités d'usinage*.

L'*entité d'usinage* est choisie en respectant deux conditions :

- une condition *d'existence* du processus d'usinage :

Défini par un expert ou par tout autre moyen, le processus d'usinage de l'entité existe et ne sera plus remis en cause par le système de génération de gamme d'usinage.

L'expert tiendra compte de toutes les variantes d'usinage possibles, et devra en conséquence judicieusement paramétrer l'*entité d'usinage* (état géométrique initial, dimensions significatives, matériaux, état de surface etc...). A chaque jeu de valeurs des différents paramètres de l'entité correspondra un processus d'usinage de l'entité. Ce dernier est également dépendant de la base de données qui caractérise les outils de coupe, les montages d'usinage, et les machines-outils.

- une condition *d'indépendance* entre les processus d'usinage :

tout processus d'usinage d'une *entité d'usinage* doit-être exécutable indépendamment des autres processus d'usinage des différentes entités. Il ne doit pas exister de contrainte d'usinage

imposant une relation d'ordre d'exécution entre les entités. Ainsi, une pièce étant constituée d'*entités d'usinage*, toute combinaison des processus d'usinage des différentes *entités d'usinage*, et par suite, toute imbrication de séquences d'usinage est techniquement réalisable et constitue le seul point de vue de l'usinage, un processus possible de la pièce (figure 5).

On remarque que les paramètres d'une *entité d'usinage* peuvent prendre un jeu de valeurs en fonction de l'ordonnement général des processus. Par exemple un trou percé en pleine matière sera réalisé par des séquences d'usinage différentes suivant l'état initial de la face d'attaque du trou : un état "brut" de fonderie nécessitera la réalisation d'un trou de centre, un état fraisé (obtenu par surfacage) admettra un perçage direct du trou. Si les processus d'usinage restent dans tous les cas indépendants les uns des autres, le processus d'élaboration d'une entité peut n'être défini qu'après l'ordonnement général des séquences d'usinage.

Aussi nous proposons la définition suivante de l'entité :

Une <i>entité d'usinage</i> est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités (figure 4).
--

Remarques :

- a) cette définition permet de créer une nouvelle *entité d'usinage* (indépendante des autres *entités d'usinage*), par l'usinage ordonné d'une suite d'entités (figure 6). Les entités d'usinage composant la nouvelle *entité d'usinage* perdent leur indépendance et deviennent des séquences d'usinage auxquelles peuvent être éventuellement adjointes des séquences d'usinage particulières.
- b) une pièce ou un ensemble de pièces est considéré désormais comme un assemblage d'*entités d'usinage*. Libéré de toutes contraintes d'usinage, l'ordonnancement général des séquences d'usinage est un problème d'optimisation sous contraintes multiples capable de prendre en compte des critères de choix proche de la gestion des moyens. Par exemple choisir le nombre de sous-phases, le nombre de changements d'outils en fonction des temps de cycle automatique de la cellule, ..etc...

La définition de l'*entité d'usinage* que nous proposons doit être expérimentée sur de nombreux cas, elle devrait renforcer les approches des solutions proposées dans les différentes thèses soutenues par les participants au groupe de travail GAMA [DES.81], [ANS.85], [MAT.86], [TSA.87], [DUR.88], [VIL.90].

Le nombre d'*entités d'usinage* est lié à la capacité qu'a l'expert de formaliser son expertise. Il est plus simple de créer une nouvelle entité pour chaque cas particulier rencontré, plutôt que de remettre en cause la formalisation déjà exprimée. On assiste dans ce cas à une profusion d'*entités d'usinage* difficilement compatibles avec une bonne fiabilité du résultat obtenu. Une recherche systématique des différentes *entités d'usinage* est actuellement menée ; l'objectif est d'en limiter le nombre et de leur associer une génération automatique du processus d'usinage. Cet effort est fondamental, il doit permettre de définir les caractéristiques nécessaires à l'extraction des *entités d'usinage* des bases de données CAO.

Génération automatique du processus d'usinage d'une entité d'usinage

Les problèmes liés à la génération automatique du processus d'usinage d'une entité d'usinage peuvent être classés en sept catégories, chacune définissant un type de problèmes caractéristiques.

- tournage (contournage intérieur et extérieur) [ANS.85]
- perçage - alésage (axe de l'outil confondu avec l'axe du trou) [LEF.86] [VIL.90]
- fraisage de surfaces canoniques simples obtenues par déplacement relatif de l'outil et de la pièce suivant un vecteur vitesse constant (surfaçage, rainurage etc...).

- usinage de poches à fond plan et de forme quelconque.
- fraisage de surfaces 3D obtenues par enveloppe d'un outil à bout torique, sphérique ou plan [BER.89]
- rectification cylindrique et plane.
- procédés spéciaux tels que le brochage etc...

Le choix d'un outil de coupe, et la détermination des conditions de coupe est un problème général commun aux différents types d'usinage. Il s'appuie sur de nombreux essais répertoriés dans des bases de données de coupe et sur des caractéristiques géométriques de la partie active de l'outil, de la composition modulaire du corps de l'outil et de son attachement. L'apparition d'un nouvel outil, d'un nouveau matériau à usiner, ou d'une nouvelle conception technologique de l'outil doit être prise en compte par simple mise à jour de la base de données outils. Si le choix optimal des conditions de coupe est dans de nombreux cas bien maîtrisé, le choix optimal d'un outil de coupe [MAT.86] reste un problème complexe non résolu : on se réfère en général au choix éclairé de l'expert .

Solutions apportées à la gamme automatique

Compte tenu de la complexité du problème à résoudre, il n'existe pas une, mais des solutions à la gamme automatique.

Lorsque le problème à résoudre est spécialisé une solution fiable existe. Par exemple la réalisation, sur centre d'usinage, d'outillages de presse à poinçonner, consiste à percer et à aléser des trous dans une plaque métallique. Dans le cas où le bureau des méthodes ne conçoit les outillages qu'à l'aide d'un nombre limité d'entités "trou" parfaitement identifiées, la génération automatique du processus d'usinage des outillages est maîtrisée par un simple algorithme. On fait cependant deux hypothèses :

- les outils de coupe prévus sont toujours disponibles dans le magasin-outils du centre d'usinage,
- les conditions de coupe initialement choisies restent constantes.

Lorsque le problème posé est général, c'est à dire dans un contexte de production de pièces très variées, quatre approches sont possibles :

Une approche T.G.A.O. (Technologie de Groupe Assistée par Ordinateur) :

Cette approche consiste à rassembler dans un premier temps les gammes d'usinage les plus représentatives de la production de l'entreprise. Ces gammes sont établies par les experts de la production, elles servent dans un deuxième temps à élaborer un système de codage liant les caractéristiques significatives de la pièce aux processus d'usinage utilisés. Grâce au système de codage ainsi mis en place, l'élaboration d'une gamme d'usinage consiste

à retrouver des pièces présentant des similitudes de formes avec la pièce à étudier, et à reprendre le processus d'usinage correspondant.

Une approche par variantes [SAU.85] :

Il s'agit de retrouver parmi les pièces répertoriées dans l'entreprise, une ou plusieurs pièces qui "ressemblent" à la pièce à étudier. Après avoir choisi la gamme d'usinage qui convient, l'expert apporte les corrections nécessaires. Cette méthode nécessite la présence de l'expert. Le système apporte essentiellement une aide efficace à la rédaction de la gamme d'usinage.

Une approche générative "académique" [ANS.85]

Cette approche consiste à générer automatiquement le processus d'usinage d'une entité d'usinage pris sous sa forme la plus générale possible. Par exemple l'entité d'usinage " formes de révolution obtenues en tournage " permet à elle seule de décrire toute pièce de révolution. Le nombre infini de variétés de pièces traitées ne permet pas de faire appel à un archivage préalable de pièces ou de gammes connues et nécessite de recréer à chaque pièce un nouveau processus d'usinage.

Le processus d'usinage obtenu est suffisamment précis pour permettre une mise en production immédiate. La génération du processus s'appuie sur des bases de données de coupe, d'outils, de portes-outils, de plaquettes, de portes- pièces et des caractéristiques machines-outils. Très documentées ces bases de données peuvent être mise à jour en temps réel. Cette méthode nécessite une formalisation scientifique de l'expertise, elle s'appuie sur de nombreuses expérimentations, et sur la mise en oeuvre de modèles mathématiques capables de prendre en compte toutes les contraintes de la production. Les mécanismes de décision reconnus par l'ensemble des experts sont programmés sous forme d'algorithmes et les principaux choix de condition de coupe , d'outils, de trajectoire .etc.. sont optimisés. Des options de décision non fondamentales pour le bon déroulement du processus sont accessibles sous forme de règles ou de paramètres et permettent ainsi de personnaliser le système de génération automatique du processus.

Un tel système propose des solutions de processus conformes aux règles de l'art, prenant systématiquement en compte toutes les contraintes réelles de la production. La fiabilité des résultats est supérieure à celle obtenue par un gammiste.

Le processus de la pièce nécessite pour être généré une reconnaissance des entités d'usinage constituant la pièce. L'entité étant dans ce cas prise sous sa forme la plus générale (une seule entité d'usinage pour toutes les pièces de révolution), le problème de la reconnaissance automatique des entités (et par suite de la gamme automatique) reste entier et fait l'objet des recherches actuellement menées dans nos laboratoires.

Une approche générative par expertise, [TSA.87],[DUR.88],[VIL.90]

La génération automatique de la gamme d'usinage s'effectue en deux étapes distinctes : une génération de l'association entité-processus, une génération du processus de la pièce.

Cette approche permet de personnaliser et d'adapter les gammes d'usinage aux habitudes "métier" de l'atelier de production. L'expert définit naturellement, par expérience, les entités telles qu'elles lui apparaissent dans les fabrications. L'*entité* n'a pas ici le sens précis de l'*entité d'usinage* que nous proposons dans le chapitre des définitions, elle peut prendre toute forme géométrique et ne nécessite pas une obligation d'indépendance entre les processus d'usinage des différentes entités. L'expert associe à chaque entité un ou plusieurs processus d'usinage. La description des processus se fait sous forme de règles établies à partir de cas typiques d'usinage que l'expert connaît par expérience.

La difficulté de formaliser par règles un problème d'usinage amène l'expert à multiplier les nombres d'entités et par suite le nombre de règles. En effet l'expérience montre que l'expert trouve toujours un cas particulier en contradiction avec les règles déjà préétablies. Il peut dans ce cas soit ajouter ou modifier des règles, avec le risque de modifier les résultats déjà acquis, soit créer une nouvelle entité.

Les outils et les cycles d'usinage sont classés et associés par l'expert aux différentes entités. La fiabilité de l'usinage dépend donc uniquement de l'expérience de l'expert.

Dans cette approche, les entités sont essentiellement liées à des formes géométriques typiques, la reconnaissance des entités composant une pièce mécanique s'en trouve ainsi simplifiée. Des règles permettent ensuite de planifier l'ordre d'exécution des entités. Cette approche aboutit à une génération automatique du processus d'usinage de la pièce.

Conclusion

Les recherches menées en gamme automatique montrent que la mise en forme du savoir faire en usinage reste un problème d'actualité. Des éléments de solution existent et le concept d'*entité d'usinage* tel que nous l'avons défini devrait les améliorer.

L'objectif à atteindre est d'obtenir automatiquement le processus optimal d'usinage d'une pièce ou de plusieurs pièces produites en panoplie. Le niveau de détail demandé doit permettre une mise en route immédiate de la cellule de production. Le processus doit s'adapter aux évolutions des outils, portes-outils, portes-pièces, machines, robots ...etc.

L'approche générative académique est une solution à la détermination du processus de l'*entité d'usinage*. En effet cette approche très coûteuse en années de recherche est la seule à prendre en compte l'ensemble des paramètres, et à donner une solution fiable et reproductible avec tous les détails souhaités. Par contre elle est trop générale pour permettre une reconnaissance des entités : le nombre de combinaisons d'entités capables de

représenter une pièce est trop grand, et ne permet pas de générer simplement le processus complet d'une pièce.

L'approche par expertise répond bien au besoin exprimé par les bureaux de méthodes. Elle permet une adaptation et une personnalisation des processus. Néanmoins, l'interaction entre les règles de description du processus des entités et celles du processus de la pièce, ainsi que l'apparition de contradictions avec de nouvelles règles, ne permettent pas une maîtrise suffisante (même par un seul expert) de l'outil logiciel proposé.

En conclusion, l'axe de recherche que nous désirons mener doit permettre :

- l'approfondissement du concept d'*entité d'usinage* proposé au chapitre précédent
- l'expérimentation d'une solution où sera utilisée l'approche par expertise pour décrire les *entités d'usinage*, pour planifier l'ensemble des *entités d'usinage* et par suite l'ensemble des séquences d'usinage.
- l'utilisation de l'approche académique pour générer le processus d'usinage des différentes entités prises sous leur forme la plus générale.

Références Bibliographiques :

- [ANS.85] Bernard ANSELMETTI
"Automatisation du tournage en commande numérique"
Thèse de troisième cycle. LURPA-ENS de CACHAN juin 1985
- [BER.89] Alain BERNARD
Usinage tridimensionnel d'outillages de topologie complexe : analyse des contraintes de production et contribution à l'optimisation du processus d'usinage.
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris - LURPA-ENS CACHAN juin 1989
- [DES.81] Yannick DESCOTTE
"Représentation d'exploitation de connaissances expertes en génération de plans d'action.- Application à la conception automatique de gamme d'usinage.
Thèse de troisième cycle. - INPG GRENOBLE , déc.1981
- [DUR.88] Philippe DURAND
Contributions à la génération et à l'amendement de plans d'actions. Application à la génération automatique de Gammes d'Usinage dans un contexte CIM.
Thèse de doct-Ingénieurs de l'INPG, Grenoble, decembre 1988
- [LEF.86] E. LEFUR, F. VILLENEUVE, P.BOURDET
Génération automatique de processus d'usinage
Matériaux Mécanique Electricité n°418 - nov. - dec. 1986
- [MAT.86] Luc MATHIEU
"Etude des limites des paramètres de coupe en vue d'un choix automatique des outils et des conditions de coupe"
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris - LURPA-ENS CACHAN avril 1986
- [SAU.85] C. SAUVAIRE, D. MORIN
"A three steps approach in computer aided process planning"
1er CIRP working seminar on computer aided process planning jan.1985
- [TSA.87] Jean Patrick TSANG
Planification par Combinaison de Plans : Application à la Génération de Gammes d'usinage.
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 7 juillet 1987.
- [VIL.90] François VILLENEUVE
Génération ascendante d'un processus. Proposition d'une formalisation de l'expertise. Application aux entités alésages.
Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris - LURPA-ENS CACHAN Février 1990

Figure 1 *Opération d'usinage*



suite ordonnée
ininterrompible
d'opérations
d'usinage

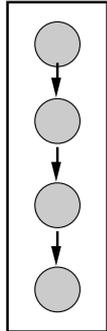


Figure 2 *Séquence d'usinage*

suite ordonnée
interruptible de
séquences
d'usinage SX_i

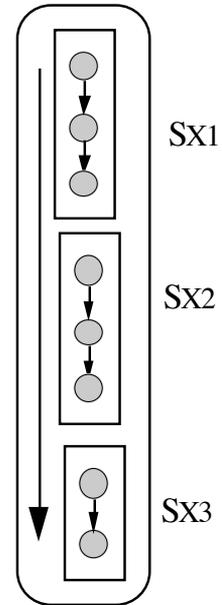


Figure 3 *Processus d'usinage PX*

Entité d'usinage EA :
processus d'usinage
PA { SA1, SA2, SA3, SA4 }

Entité d'usinage EB :
processus d'usinage
PB { SB1, SB2, SB3 }

Entité d'usinage EC :
processus d'usinage
PC { SC1, SC2 }

Il y a indépendance entre les processus d'usinage de chaque entité.
Toute combinaison entre les entités, c'est à dire entre les processus, (avec imbrication des séquences d'usinages) est techniquement réalisable du seul point de vue de l'usinage.

Figure 4 *Entité d'usinage*



Figure 5 *Solution d'un processus d'usinage de la pièce {EA, EB, EC} (toutes les combinaisons de séquences sont possibles) :*

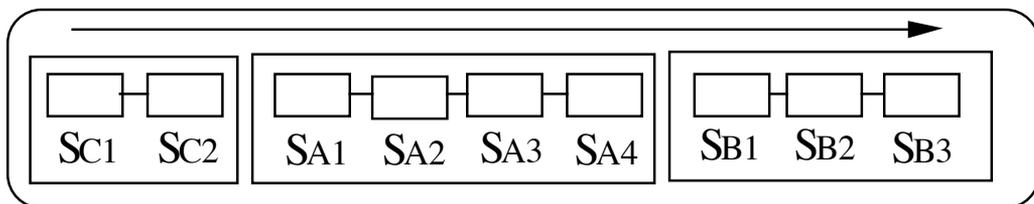


Figure 6 *Création d'une nouvelle entité E à partir des trois entités EA EB EC (une seule combinaison de séquences est possible)*

Figure 1 *Opération d'usinage*

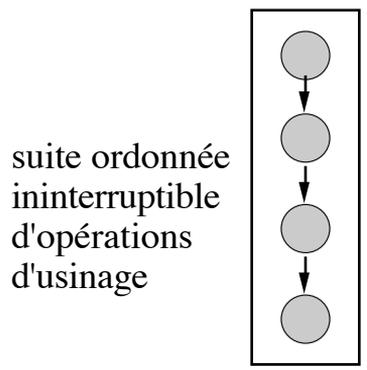


Figure 2 *Séquence d'usinage*

suite ordonnée
interrompible de
séquences
d'usinage SXi

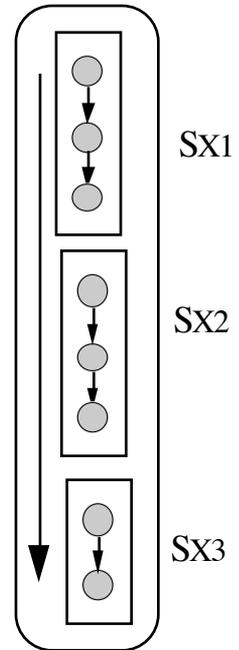


Figure 3 *Processus d'usinage PX*

Entité d'usinage EA :
processus d'usinage
PA { SA1, SA2, SA3, SA4 }

Entité d'usinage EB :
processus d'usinage
PB { SB1, SB2, SB3 }

Entité d'usinage EC :
processus d'usinage
PC { SC1, SC2 }

Il y a indépendance entre les processus d'usinage de chaque entité.
Toute combinaison entre les entités, c'est à dire entre les processus, (avec imbrication des séquences d'usinages) est techniquement réalisable du seul point de vue de l'usinage.

Figure 4 *Entité d'usinage*



Figure 5 *Solution d'un processus d'usinage de la pièce {EA, EB, EC} (toutes les combinaisons de séquences sont possibles) :*

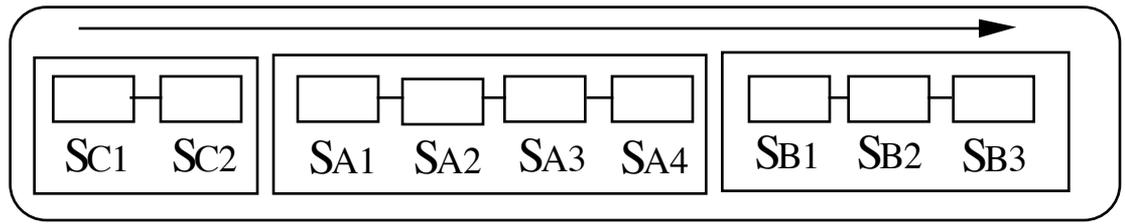


Figure 6 *Création d'une nouvelle entité E à partir des trois entités EA EB EC (une seule combinaison de séquences est possible)*