

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE COLONAL HADJ LAKHDAR
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
MAGISTERE

Spécialité : Construction Mécanique

Présenté par :
FEDAOUI Kamel

Automatisation de la détermination de l'ordre d'usinage des pièces mécaniques

Travail effectué au sein du Laboratoire de Recherche en Productique (LRP)

La commission d'examen composée du jury :

Dr. H. MAZOUZ	M.C Université de Batna	Président
Dr. M. ASSAS	M.C Université de Batna	Encadreur
Dr. M. HECINI	M.C Université de Biskra	Examineur
Dr. B. BENMOHAMMED	M.C Université de Batna	Examineur
Dr. R. MANAA	C.C Université de Batna	Examineur

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sentiments de gratitude et de reconnaissance au Dr. Hamoudi MAZOUZ pour m'avoir fait le grand honneur de présider le jury.

J'adresse ma reconnaissance au Dr. Mabrouk HECINI ainsi qu'au Dr. Brahim BENMOHAMMED et au Dr. Rabeh MANAA qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de ce travail et de consacrer du temps pour sa lecture et son évaluation.

Il m'est agréable d'exprimer mon grand estime et ma profonde reconnaissance envers Dr. Assas Mekki, qui a été d'un grand concours par une réelle contribution et un encadrement effectif et qui n'a cessé de me prodiguer les conseils et de me fournir le temps et le savoir nécessaires pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier tous les membres de l'équipe système de production intégré du laboratoire de recherche en productique (LRP).

Enfin je remercie toute ma famille pour son soutien.

Kamel FEDAOUI

Table des matières

Table des matières	
Index des figures	
Index des tableaux	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1. LE PROCESSUS DE FABRICATION

1	LE PROCESSUS DE FABRICATION.....	4
1.1	Processus de fabrication.....	4
1.2	La gamme d'usinage.....	5
1.2.1	Définitions.....	6
1.3	Les objectifs de la gamme d'usinage.....	7
1.4	Techniques de réalisation de la gamme d'usinage.....	7
1.4.2	Méthode classique.....	8
1.4.3	Méthode automatique.....	9
1.5	Composition d'un système CAPP.....	10
1.6	Principaux approches.....	11
1.6.1	La technologie de groupe.....	13
1.6.2	L'approche générative	14
1.7	Conclusion	14

CHPITRE 2. METHODES DE DETERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE

2.1	Etat de l'art.....	16
2.2	Techniques de détermination de l'ordre d'opérations d'usinage.....	17
2.2.1	Les Réseaux de Petri temporisées stochastiques.....	17
2.2.2	Travelling Sales Person	18
2.2.3	Les colonies de fourmis.....	19
2.2.4	Algorithme génétique	20
2.2.5	Méthode RTSS	23
2.2.6	Le système expert.....	25
2.3	Conclusion.....	28

CHAPITRE 3. LES RESEAUX DE PETRI POUR LA MODELISATION

3.1	Un peu d'histoire.....	30
3.2	Notions de base des RdP	31
3.2.1	Définition de l'état d'un réseau de Petri.....	32
3.2.2	Evolution temporelle d'un réseau de Petri.....	33
3.2.3	Les règles générales d'évolution temporelle d'un réseau de Petri.....	33
3.3	Description des RdP par l'algèbre linéaires	33
3.3.1	Matrices d'incidences	33
3.3.2	Equation Fondamentale.....	33
3.4	Ensemble des extensions des RdP	34

3.4.1	Les RdP Temporisés	35
3.4.1.1	Définition d'un RdP T-temporisé	36
3.4.1.2	Principe de fonctionnement	36
3.4.2	Les RdP stochastiques (RdPS)	37
3.4.2.1	Définition et Notions	37
3.4.2.2	Durée de sensibilisation stochastique.....	39
3.4.2.3	Analyse d'un RdP stochastique	39
3.4.2.4	Probabilité d'état en régime stationnaire	40
3.4.2.5	Fréquence moyenne de franchissement.....	40
3.4.2.6	Nombre moyen de marque dans une place	40
3.4.2.7	Temps moyen de séjour	40
3.4.3	Les RdP continus.....	41
3.4.3.1	Définition et notions	41
3.4.3.2	Le modèle de base (RdPCC)	41
3.4.3.3	Principe de fonctionnement	42
3.4.4	Les RdP hybrides	44
3.4.4.1	Définitions et notions.....	44
3.4.4.2	Principe de fonctionnement et Graphe d'évolution	45
3.4.5	Les RdP colorés (RdPC)	47
3.4.5.1	Définition des RdPC	47
3.4.5.2	Notion de fonction	48
3.4.6	Conclusion.....	49

CHAPITRE 4. DETERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE

4.1	Modèle de la gamme d'usinage.....	51
4.2	Première Partie.....	53
4.2.1	Phase 1. Définition du problème.....	53
4.2.2	Phase 2. Définition des Contraintes.....	54
4.2.3	Phase 3. Construction du réseau de PETRI.....	55
4.2.4	Phase 4. Traçage du graphe de marquage.....	55
4.2.5	Méthode graphique.....	55
4.2.6	Méthode analytique.....	57
4.3	Deuxième Partie.....	58
4.3.1	Ordre optimal d'usinage.....	58
4.4	Description du programme élaboré et du support matériel.....	59
4.5	Exemple d'application.....	61
4.5.1	Définition de la pièce	61
4.5.2	Définition des opérations.	63
4.5.3	Les outils.....	63
4.5.4	Tableau d'antériorités.....	64
4.6	Construction du réseau de Petri.....	65
4.6.1	Traçage du réseau de Petri.....	67
4.6.2	Construction du Graphe de Marquage.....	67
4.7	Exemples.....	69
4.8	Conclusion.....	71

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Conclusions et Perspectives.....	73
----------------------------------	----

Bibliographie.....	81
Annexe A.....	85

Index des figures

Figure.1	Processus de conception d'un produit	4
Figure.2	Exemple machine outil	5
Figure.3	Outil pour surfaçage	5
Figure.4	Système de fixation (a)Etau, (b) mandrin	6
Figure.5	Processus d'usinage	8
Figure.6	Génération de la gamme d'usinage	9
Figure.7	Méthodes de génération de la gamme d'usinage	10
Figure.8	Concepts de génération automatique de gammes	14
Figure.9	La technologie de groupe	15
Figure.10	Algorithme général du système PROPEL	16
Figure.11	La TSP	21
Figure.12	Les colonies de fourmis	22
Figure.13	Pièce de forme prismatique	24
Figure.14	Oganigramme des algorithmes génétiques	25
Figure.15	Architecture d'un système expert	29
Figure.16	RdP modélisant un système de production	34
Figure.17	Evolution temporelle d'un réseau de Petri	36
Figure.18	Marquage	37
Figure.19	Graphe de marquage	37
Figure.20	Fonctionnement d'un RdP temporisé	39
Figure.21	(a) –RdP stochastique – (b)- graphe des marquages accessible (c) chaîne de markov	40
Figure.22	RdP continu modélisant le système d'écoulement d'un liquide	44
Figure.23	Evaluation du marquage du RdP continu	45
Figure.24	RdP hybride	47
Figure.25	Graphe d'évolution	48
Figure.26	RdP colorée avec fonction identité	49
Figure.27	Modèle de réseau de Petri modélisant la gamme d'usinage	52
Figure.28	Méthode utilisée	53
Figure.29	Organigramme de traçage du graphe du Marquage	56
Figure.30	Algorithme de détermination de l'ordre optimal	59
Figure.31	Programme élaboré	60
Figure.32	Dessin de définition de la pièce	61
Figure.33	Surfaces et tableau d'antériorités	65
Figure.34	Caractéristiques techniques des opérations	65
Figure.35	Réseau de Petri	66
Figure.36	Graphe de marquage	67
Figure.37	Graphe de marquage (suite)	67
Figure.38	Pièce de fixation	69
Figure.39	Données techniques	69
Figure.40	Tableau d'antériorités	70
Figure.41	Réseau de Petri	71
Figure.42	Graphe de marquage	71
Figure.43	Dessin de définition	72
Figure.44	Données techniques	72

Figure.45 Tableau d'antériorités	72
Figure.46 Réseau de Petri	73
Figure.47 Graphe de marquage	73
Figure.48 Graphe de marquage (suite)	73
Figure.49 Graphe de marquage (suite)	73
Figure.50 Dessin de définition (Thèse T. Dereli)	74
Figure.51 Données techniques	74
Figure.52 Table d'antériorités	75
Figure.53 Réseau de Petri	75
Figure.54 Graphe de marquage	75
Figure.55 Graphe de marquage (suite)	76
Figure.56 Graphe de marquage (suite)	76
Figure.57 Graphe de marquage (suite)	76

Index des Tableaux

Tableau.1 Matrice Outil	26
Tableau.2 Matrice de priorités	27
Tableau.3 Traitement des UM et RM	27
Tableau.4 Ordres opération optimaux trouvé	27
Tableau.5 Définition des opérations	54
Tableau.6 Contraintes d'antériorités	55
Tableau.7 Choix des outils	63
Tableau.8 Opérations et caractéristiques	64
Tableau.9 Contraintes d'antériorités	65
Tableau.10 Données des opérations	68
Tableau.11 Gamme d'usinage CPG	68

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de la Conception et de l'élaboration de produits et de systèmes est de satisfaire les besoins des utilisateurs et usagers, tous en garantissant le respect de la législation et de la rentabilité de l'entreprise. Dans le contexte économique actuel, cet objectif se traduit généralement par des baisses des prix, des raccourcissements de délais de développement de la mise sur le marché, avec des performances et une qualité de produit imposé. Le client devient pratiquement le donneur d'ordre.

Ces changements profonds remettent en cause les méthodes et les outils de travail de la conception existant, c'est alors la naissance de « DESIGN FOR X ». Chaque métier entrant dans le cycle de conception du produit est représenté par un système d'aide. Parmi ces outils, on note la place très importante qu'occupe le processus d'usinage dans la phase de conception d'un produit.

Le but de ce travail est de formaliser une méthode de détermination de l'ordre d'opérations d'usinage d'une pièce mécanique en utilisant les réseaux de Petri comme outil de modélisation du processus de préparation à la fabrication ; et le développement d'une application informatique pour automatiser l'opération de détermination de l'ordre d'usinage avec une vérification de cet outil sur une application industrielle.

Le premier chapitre est une introduction générale sur les processus de fabrications et les méthodes utilisées pour la rédaction d'une gamme d'usinage d'un produit ainsi que sur les définitions des approches automatiques et d'intelligence artificielle pour la génération d'un processus d'usinage.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des différentes méthodes et techniques d'optimisation et d'intelligence artificielle argumentées par des exemples d'application.

Le troisième chapitre traite d'une manière générale les réseaux de Petri, ainsi qu'un petit rappel théorique sur les réseaux de Petri RDP et leur emploi pour la résolution des problèmes industriels.

Le quatrième chapitre est réservé à la description de la démarche que nous avons proposé pour la construction du modèle d'ordre d'usinage par RDP. Un développement de logiciel réalisé pour la validation de la méthode.

La validation de la méthode est faite sur un exemple industriel issu du complexe pelles et grues de constantine (CPG).

On termine le travail par une conclusion générale sur les différents résultats avec des propositions de futures améliorations.

CHAPITRE 1. LE PROCESSUS DE FABRICATION

1 LE PROCESSUS DE FABRICATION

1.1 Processus de fabrication [1, 2]

Le processus d'élaboration d'un produit industriel est défini par un ensemble d'étapes qui permettent, à partir d'un besoin ou d'une idée, la réalisation d'un produit. A chacun de ces étapes, des informations de types très divers contribuent à la définition du produit. Ceci concerne plusieurs domaines. Schématiquement cette élaboration comporte les phases suivantes :

- L'étude prospective.
- La validation des spécifications initiales.
- Le développement et la validation du produit (définition d'une structure fonctionnelle).
- La vérification du respect des spécifications initiales et des contraintes technologiques (poids, dimensions,...).
- La définition détaillée des constituants du produit (nomenclature, des plans et dessins d'exécution).La préparation à la fabrication qui définit la gamme de fabrication, l'outillage, les opérations de contrôle et l'établissement éventuel des programmes des machines à commande numérique et des robots.
- La fabrication et le contrôle de fabrication.
- L'exploitation commerciale du produit.

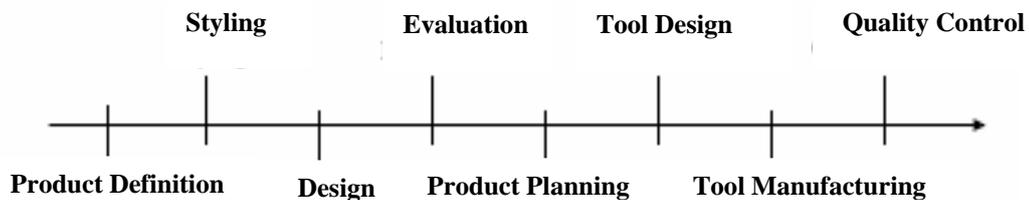


Figure.1 Processus de conception d'un produit (ISO 214)

1.2 Élément d'un processus d'usinage [3]

Le cycle de vie d'un produit passe par plusieurs phases de sa définition jusqu'à son passage par le service de control de qualité et respect des consignes.

Les éléments principaux conditionnent la qualité d'un produit sont : la machine-outil, l'outillage et le montage d'usinage (set-up). Ils jouent un rôle très important dans le processus de fabrication d'une pièce mécanique.

1.2.1 La machine-outil

Le choix d'une machine outil est très important pour garantir une qualité de surface satisfaisante. On trouve plusieurs configurations et modèles de machine, on peut les classer suivant :

- Le travail à effectuer
- Les dimensions
- La puissance
- Les degrés de libertés
- Qualité et technologie (automatique, conventionnelle)

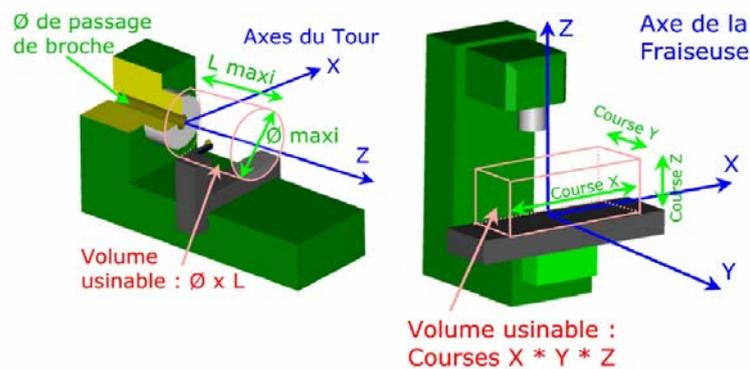


Figure.2 Exemple machine-outil

1.2.2 L'outil

C'est un élément clé de qualité, c'est l'élément qui est en contact direct avec la pièce. Son état se répercute sur la qualité de surfaces qu'on aura comme résultat à la fin de l'opération d'usinage.



Figure.3 Outil pour surfacage

On les classe les outils suivant plusieurs éléments :

- Morphologie
- Travail à effectuer (ébauche, finition,...)
- Matière à usiner
- Matière de fabrication
- Nombres d'éléments constituant (fraise)

1.2.3 Le montage d'usinage [4]

Pendant son usinage, une pièce est mise en position et maintenue dans le référentiel de la machine-outil à l'aide d'un appareillage appelé montage d'usinage. Nous appelons prise de pièce le modèle associé à ce montage d'usinage. La prise de pièce assure la fonction de mise en position de la pièce, appelée posage, et la fonction de maintien de cette pièce, appelée bridage, pendant son usinage.

La mise en position assure le respect des tolérances de position des différentes entités fonctionnelles, définies et placées dans le référentiel de la pièce par le concepteur. Le maintien sur cette position permet d'assurer l'équilibre de la pièce pendant toute la durée de son usinage. Généralement les pièces sont réalisées en série. La prise de pièce doit alors garantir une position dans une plage admissible pour l'ensemble des pièces de la série dans le référentiel de la machine-outil.

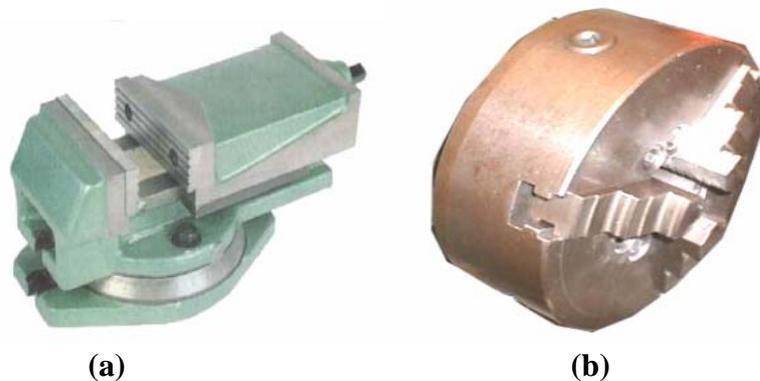


Figure.4 Système de fixation (a)Etau, (b) mandrin

Parmi les principales causes de non-qualité des pièces mécaniques obtenues par usinage, une prise de pièce mal adaptée est très souvent citée. Les principales causes de rebut dues à la prise de pièce proviennent soit d'un mauvais réglage de la mise en position de la pièce dans le référentiel de la machine-outil, soit d'un mouvement inconvenant de la pièce dans son ensemble en cours d'usinage, soit des déformations de la pièce ou des dispersions sur la position de la pièce dans le référentiel de la machine-outil.

Un mauvais réglage conduit à une mauvaise position des surfaces usinées dans le référentiel de la pièce : la pièce n'est alors pas conforme aux spécifications du concepteur, elle doit être mise au rebut. L'augmentation accidentelle des paramètres de coupe génère des efforts incompatibles avec le bridage prévu. Le mouvement intempestif de la pièce qui en résulte se termine généralement par une collision outil pièce : la sécurité de l'opérateur et du poste de travail est alors compromise et la durée de l'arrêt de production est souvent très longue.

Les dispersions dues aux défauts des surfaces de mise en position et aux déformations de la pièce pendant l'usinage induisent une mauvaise qualité et une mauvaise position des usinages dans le référentiel de la pièce suite à la libération des contraintes générant ces déformations. La qualité des usinages n'est plus assurée, la pièce doit alors être mise au rebut.

Ces problèmes, dus à un mauvais choix de prise de pièce, apparaissent pendant la production. Le site de production est alors immobilisé et donc improductif. Sa remise en route passe par l'identification de la cause de non-qualité de l'usinage et la résolution du problème. Généralement ces arrêts de production sont longs et coûteux : ils impliquent une modification du montage d'usinage. Pour éviter ces problèmes, il est primordial de maîtriser les choix de prise de pièce pour l'usinage.

Les deux premières causes de non-qualité peuvent être minimisées par un choix judicieux de la mise et du maintien en position de la pièce. Elles peuvent être annulées si le concepteur conçoit la pièce en étudiant particulièrement les diverses surfaces allant servir de prise de pièce.

La troisième cause peut, elle aussi, être minimisée par un choix adapté de la prise de pièce, mais surtout par une conception raisonnée de la pièce. Elle ne peut pas être annulée entièrement car elle dépend du contact entre la pièce et le montage d'usinage.

1.3 La gamme d'usinage

1.3.1 Définitions

Les définitions suivantes sont issues du séminaire organisé par le groupe de travail GAMA. Elles sont consignées dans les actes de ce séminaire [5]. Depuis, les définitions ont légèrement évolué [6].

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

Par exemple, un perçage au foret, une passe de surfacage à l'aide d'une fraise, sont des opérations d'usinage.

Processus d'usinage : un processus d'usinage est une suite ordonnée sécable d'opérations d'usinage. Il représente l'enchaînement des opérations d'usinage. L'ordre des opérations d'usinage est impératif mais il est possible d'intercaler des opérations d'usinage appartenant à d'autres 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, montage d'usinage) d'une broche machine à une autre. Une sous-phase représente l'enchaînement des opérations d'usinage réalisées sur une machine-outil donnée avec une prise de pièce identique pendant toute la durée de l'usinage correspondant à la sous-phase.

Le gammiste établit la gamme d'usinage à partir d'une description de la pièce à l'aide d'entités d'usinage.

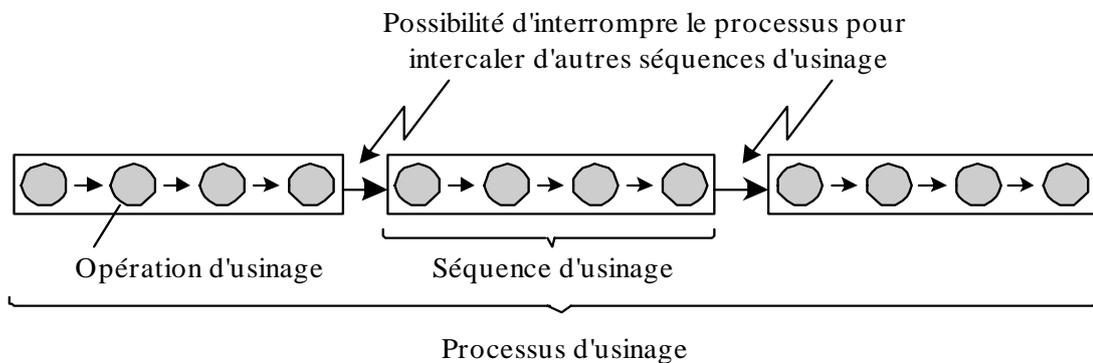


Figure.5 Processus d'usinage

Entité d'usinage : une entité d'usinage 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.

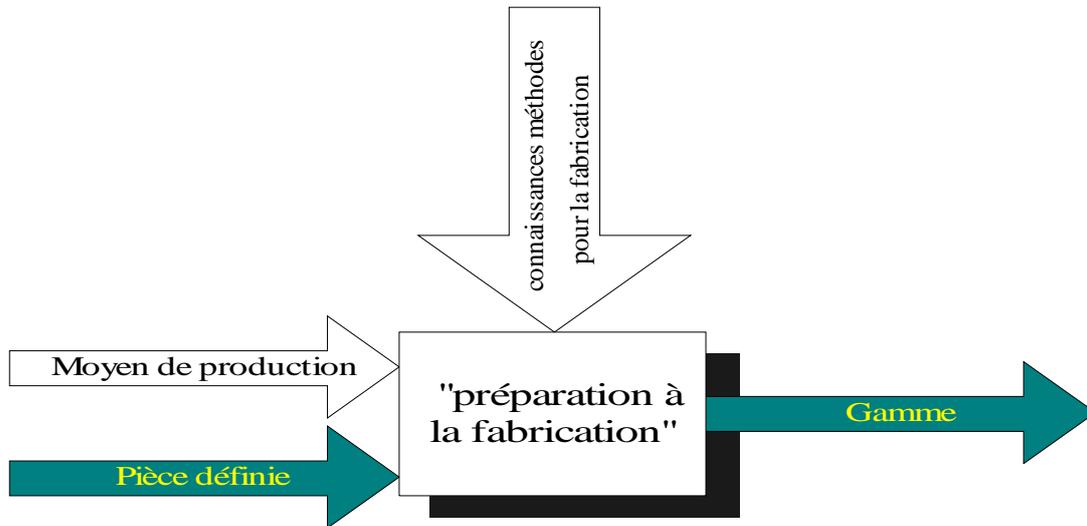


Figure.6 Génération de la gamme d'usinage

1.4 Les objectifs de la gamme d'usinage [4]

Avant d'usiner une pièce, il est nécessaire de concevoir une gamme d'usinage. Il s'agit de déterminer la suite chronologique des opérations d'usinage permettant de passer d'une pièce brute à une pièce usinée de qualité désirée. Ce travail est effectué au bureau des méthodes, par un (ou plusieurs) expert appelé gammiste, à partir des données suivantes :

✚ Les données relatives à la pièce. Il s'agit généralement d'un dessin représentant la pièce finie d'usinage ou d'un modèle CAO de cette pièce et d'informations complémentaires sous forme de texte qui sont :

- La qualité des différentes surfaces de la pièce et leur positionnement,
- Le matériau constituant la pièce,
- La présence éventuelle de traitement thermique ou de surface,
- Le procédé d'obtention de la pièce brute.

✚ Les données économiques. Il s'agit du nombre de pièces à fabriquer, de la taille des lots et des délais de fabrication.

✚ Les données technologiques. Il s'agit des machines-outils, des outils et des outillages disponibles, les possibilités des machines-outils (cinématique, courses maximales et la qualité garantie pour la série de pièces) et des outils (volume de copeau maximal, direction de travail).

Pour concevoir la gamme d'usinage, le gammiste recherche l'ensemble des opérations d'usinage puis il organise les opérations d'usinage en sous-phase en choisissant les prises de pièce et les machines-outils. Il dispose alors des éléments permettant d'estimer le coût de la fabrication de l'ensemble des pièces de la série. Il étudie ensuite chaque sous-phase. Il s'agit de déterminer précisément les outils et les conditions de coupe associées, de calculer les trajectoires des outils, de concevoir les outillages comme les outils spéciaux et le montage d'usinage, de créer les programmes de commande numérique et de contrôle de la pièce en cours et en fin d'usinage.

Les différentes tâches réalisées par le gammiste pendant la conception de la gamme d'usinage sont assez délicates et nécessitent une bonne connaissance sur les moyens disponibles (machines-outils et les outils) et les actions à réaliser sur la pièce (opérations d'usinage, choix de prises de pièce, placement des traitements thermiques ...). Son principal travail consiste à prédire le processus d'usinage avec suffisamment de fiabilité de manière à garantir une production avec le minimum d'incidents. Cette fiabilité est garantie grâce au savoir-faire du gammiste qui travaille de manière intuitive à partir de sa propre expérience et à partir des données techniques et technologiques des différents constructeurs d'équipements.

1.5 Techniques de réalisation de la gamme d'usinage

Les professionnels utilisent deux types de procédés pour l'élaboration de la gamme d'usinage, une méthode classique, ancienne basé sur une analyse simple des données techniques de la pièce et une autre méthode plus élaborée et plus productive utilisant des analyses et des traitements informatique des données obtenues à partir du dossier de chaque pièce.

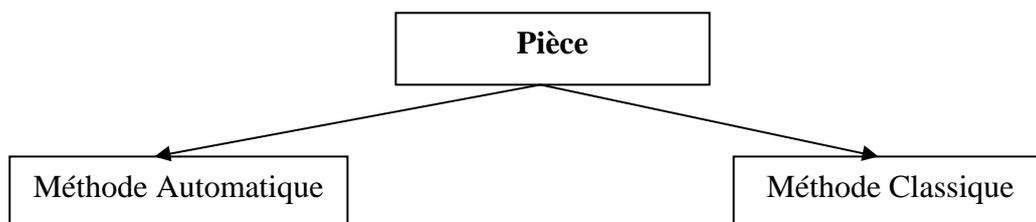


Figure.7 Méthodes de génération de la gamme d'usinage

L'établissement de la gamme d'usinage est le travail préparatoire au lancement de la production. Il se fait généralement au bureau des méthodes et non pas dans l'atelier. Concevoir une gamme d'usinage consiste à prévoir à la fois les actions à réaliser sur la pièce et les moyens matériels nécessaires pour passer de la pièce brute à la pièce finie. Un (ou plusieurs) expert appelé gammiste est chargé de ce travail. Il doit proposer les actions et leurs enchaînements qui garantiront le bon déroulement de l'usinage pour l'ensemble des pièces de la série.

1.5.1 METHODE CLASSIQUE

L'élaboration de la gamme d'usinage en fabrication mécanique consiste à déterminer la suite logique des opérations à exécuter sur les différentes machines en tenant compte de l'ensemble des pièces à produire. Pour cela on utilise les informations du dessin de définition issu du bureau d'études pour la détermination de toutes les données nécessaires à la production. La préparation à la fabrication nécessite beaucoup de savoir et d'informations de plusieurs domaines de natures extrêmement divers.

- Informations liées au produit à réaliser (formes, dimensions,)
- Matériaux (caractéristiques mécanique,...)
- Machines-outils et systèmes de fixation....
- Ets...

La méthodologie qui a été utilisée jusqu'à maintenant conduit à :

1. Recenser et repérer les surfaces usinées de la pièce.
2. Etablir un graphe ordonné défini par les liaisons dimensionnelles entre les surfaces.
3. Analyser et coder les opérations successives à réaliser sur les surfaces élémentaires.
4. Associer ou grouper les opérations élémentaires.
5. Définir un processus d'usinage et rédiger un projet de gamme.

Les graphes ordonnées

L'établissement du graphe ordonné, consiste à classer par niveau, toutes les surfaces usinées de la pièce en partant des surfaces brutes de références qui forment le premier niveau. Un niveau N est constitué d'un ensemble de surfaces (ou groupe de surfaces associées), telles que chacune réponde à la définition suivante :

Une surface appartient à un niveau N lorsqu'elle est liée directement par la cotation à d'autres surfaces de niveaux inférieurs à N et, dont une au moins, est de niveau (N-1).

La notion de classement par niveau implique pour chacune des surfaces des notions de prédécesseurs et de successeurs (à l'exception du premier et dernier niveau).

Les prédécesseurs d'une surface sont les surfaces de niveaux inférieurs qui la définissent directement. Les successeurs d'une surface sont les surfaces de niveaux supérieurs qu'elle contribue à définir directement.

1.5.2 METHODE AUTOMATIQUE [1]

La prise en compte des contraintes de fabrication dans la conception des pièces est une préoccupation qui a émergé explicitement dans les années 80 tant dans le milieu industriel que dans celui de la recherche.

L'approche industrielle, en particulier dans les grands groupes, essentiellement consisté en une réorganisation des services visant à rapprocher les concepteurs de produit des concepteurs de processus afin de coordonner les points de vue dès la préconception du produit, on parle là de **l'approche produit process**.

Les objectifs en recherche sont plutôt orientés vers l'assistance à la conception des produits ou son automatisation partielle en prenant en compte les contraintes de fabrication. On utilise souvent le Terme de **DESIGN FOR MANUFACTURING "DFM"**.

La plupart des travaux de recherche sur ce thème exploitent les connaissances et l'expérience acquise par les équipes en génération assistée ou automatique de gamme de fabrication, les technologies de fabrication étudiées étant essentiellement l'usinage, la forge et le pliage des tôles.

Les approches existantes en génération de gammes de fabrication sont regroupées sous l'appellation Computer Aided Process Planning (CAPP) qui consiste à déterminer les processus nécessaires à la production d'une pièce ou d'un produit et mettre ces processus dans une suite logique. Plusieurs processus peuvent être obtenues pour la même pièce (produit), qui tient compte de quelques critères comme l'usinabilité et la sécurité.

L'ultime but d'un système CAPP est de réduire le temps globale de production avec un premier objectif de donner la manière de produire le maximum de produits fonctionnels avec une qualité supérieur dans un temps optimal.

1.6 Composition d'un système CAPP

Un système CAPP se compose de modules. Chaque module a une fonction qu'il assure. La coopération entre ces modules résulte par un processus de fabrication d'un produit. Les résultats d'un module sont exploités par les autres modules.

Parmi les modules qui composent un système CAPP on trouve :

- Module de sélection de pièce.
- Module de sélection des opérations et leurs ordres.
- Module de sélection des outils.
- Module de sélection des systèmes de fixation.
- Module de génération du Programme CNC.

En plus de ces modules les systèmes CAPP peuvent avoir des modules avec des moyens d'optimisation pour un meilleur résultat et des temps de traitements plus courts.

L'automatisation de la gamme d'usinage implique une multitude de critères conflictuels et d'objectifs contradictoires et requiert une grande quantité d'expertises et des connaissances qui ne sont pas simples à modéliser et à codifier.

L'approche de planification, les données et les connaissances utilisées, les techniques de modélisation et d'analyses, permettant de distinguer des types de génération de gamme appelés par variante, semi-génératif, génératif, intelligente, automatique ou interactif. Sur le terrain on observe beaucoup de produits et d'outils de ce système comme les outils tel que PROPEL et OMEGA qui prennent en compte tous les éléments nécessaires à un produit (caractéristiques, fabrication, assemblage, maintenance, recyclage,...) durant le processus de conception de ce produit. Les tâches d'un système **CAPP " Computer Aided Process Planning "** peuvent être résumées comme suit:

- Interprétation du dessin pièce (papier ou CAO)
- Sélection des procédés de fabrication
- Sélection des machines-outils
- Détermination des surfaces d'appui et des bridages
- Détermination et séquençement des opérations
- Détermination de la cotation de fabrication
- Détermination des conditions de coupe
- Calcul des temps et des coûts
- Génération des feuilles de gammes, d'opérations, des programmes CN.

La première voie qui à été développée est basée sur la technologie du groupe assistée par ordinateur (TGAO). Elle consiste essentiellement en un codage des pièces, ce code est associé à une gamme type qui peut être personnalisée. Une deuxième évolution a consistée en la création de systèmes génératifs qui reconstruisant la gamme à partir d'une expertise décrite de manière procédurale. Les années 80 on vu l'émergence des techniques de l'intelligence Artificielle (LISP ou PROLOG) pour tenter de modéliser le savoir humain sous forme de systèmes experts. Enfin les travaux les plus récents s'appuient sur les potentialités des systèmes offrant une approche mixte basée à la fois sur l'utilisation de règles de production et de techniques de programmation par contraintes.

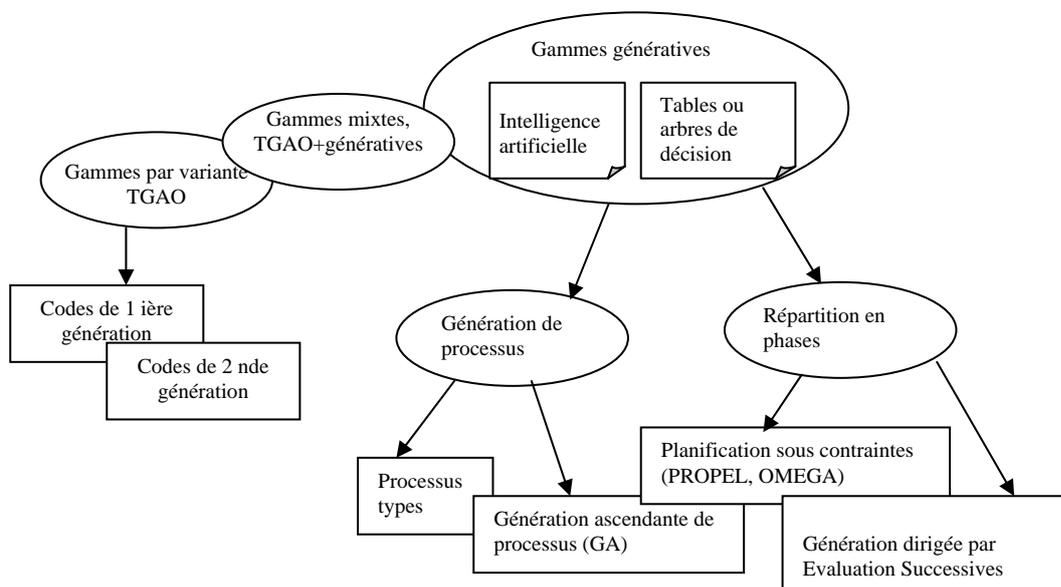


Figure.8 Concepts de génération automatique de gammes [1]

1.7.1 La technologie de groupe [7, 8]

Venant de l'anglais *Group Technology*, cette méthode est née dans l'industrie manufacturière, (production discontinue de composants élémentaires destinés à être assemblés).

Cette méthode est basée sur la codification morfo-dimensionnelle de pièces, permettant d'en extraire des groupes, des familles, destinés à être fabriqués dans un même îlot (ou cellule).

La technologie de groupe s'est principalement développée dans les métiers de la fabrication mécanique:

- l'usinage par enlèvement de copeaux: tournage, fraisage, perçage.
- la tôlerie: découpe, formage, emboutissage.
- l'assemblage de sous ensembles: soudure, rivetage.

Les entreprises réalisant de nombreuses pièces primaires ont découvert que nombre d'entre elles avaient la même forme ou bien étaient si proches, qu'il était intéressant de mettre en place des normes internes, des standards qui évitaient de redessiner des composants qui existaient déjà:

- on lançait en production des pièces qui existaient déjà en stock,
- on créait des références inutiles pour un même article,

Les circuits de production faisaient passer des pièces d'un atelier à un autre ce qui générait des en-cours importants, des délais plus longs, une gestion plus complexe. Pourquoi ne pas simplifier les flux en regroupant les machines en îlots ? Ainsi naquit le concept de cellules ou d'îlots hétérogènes, associant plusieurs métiers à une famille de pièces. Il suffisait donc d'identifier ces familles et de calculer le nombre de machines (ou de postes) à **regrouper** en un même lieu, l'îlot.

Certaines entreprises ont alors développé un code permettant d'effectuer des classifications, des tris, des mises en famille. Ces codes ont conservé un usage privé, ou, s'ils ont été étudiés en communauté avec d'autres entreprises et des organismes de recherche, ont pu profiter à d'autres entreprises.

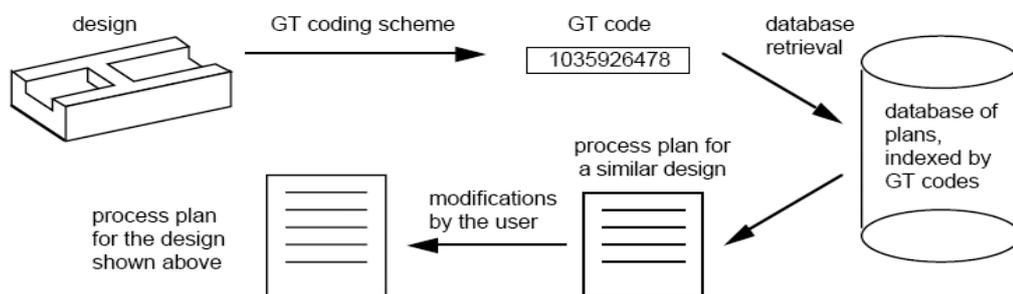


Figure.9 la technologie de groupe

Étant donné un nouveau produit **D** pour qui on a besoin d'un nouveau processus de fabrication, l'approche générative tente de synthétiser un processus de fabrication pour le produit **D**. Pour les parties usinées, l'approche typique est d'établir le processus sur une base d'entité par entité en rapportant des processus candidat à partir de la connaissance industriel, sélectionner les processus faisables sur les bases géométriques et les contraintes de fabrication, et combiner les processus choisis dans une séquence adéquate [12].

Cependant, l'approche générative a rencontré des difficultés. Les difficultés surviennent d'interaction parmi plusieurs aspects du problème, tel que le montage d'usinage, la sélection du processus et la séquence d'opérations. Comme résultat, les systèmes les plus existants travaillent dans des domaines restreints seulement. Comme produit de ce système on peut citer le système **PROPEL** [6] et **OMEGA** [12].

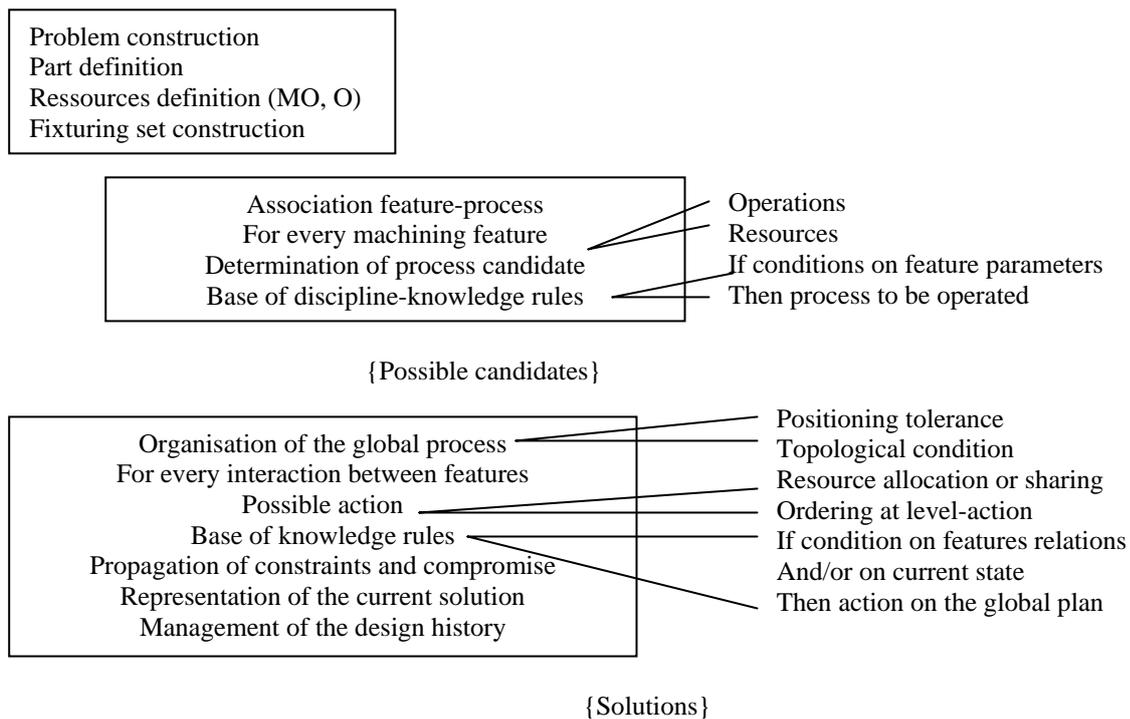


Figure.10 Algorithme général du système **PROPEL**

1.8 Conclusion

Ce chapitre contient quelques généralités sur les processus de fabrication et l'importance des étapes de préparation de fabrication. Quelques définitions et techniques de construction des gammes d'usinage sont données. La méthode classique est lente et par conséquent coûteuse. Elle nécessite un grand savoir faire du gammiste et devient très délicate

Chapitre 1----- le processus de fabrication
pour les pièces de forme complexes. Des systèmes modernes avec des connaissances et des métiers intégrés pour permettre une meilleure prise en compte des influences des paramètres qui entrent en usinage des pièces.

Des outils informatique de plus en plus utilisées associés aux systèmes de CAO sont d'ores et déjà disponibles et permettent de valider les solutions proposées. Plusieurs systèmes ont prouvés leur efficacité dans les milieux pratique.

CHAPITRE 2. METHODES DE DETERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE

2. METHODES DE DETERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE

2.1 Etat de l'art

Plusieurs travaux sur la détermination de l'ordre d'opérations ont été réalisés. Depuis le premier modèle, presque 200 systèmes ont été proposés. Chaque système utilise une méthode de résolution différentes et des critères de sélection d'opérations propres.

La détermination d'un ordre optimal d'opération dépend à la base de l'ordre des entités est l'objectif du processus de planification pour la réduction des coûts. La fonction d'optimisation de cet ordre est définie par un arrangement des processus pour aboutir à une pièce fini avec un ordre optimal en appliquant un standard de relations de différents types.

Presque tous les travaux sont basés sur l'utilisation des techniques de *l'arbre de décision* et de *planification séquentiel d'opération (SOP)*. Ces deux techniques ont montré leur efficacité à résoudre des problèmes diverses [13].

Parmi les systèmes réalisés, le système *OPPSROT* [14] est basé sur la méthode *SOP* qui considère qu'une seule entité « surface » a une seule opération d'usinage. *ICAPP* [15] est un système conçu pour les pièces de forme prismatique tous en paramétrant les dimensions et les tolérances de la pièce.

Joshi [16] a proposé un système expert qui se base sur la fixation des entités de la pièce. *Kusiak* [17] utilise la décomposition et le classement des volumes usinables pour aboutir à un classement des opérations. Cette technique de classement des entités des pièces de forme prismatique en 3D est à la base du système expert *EPPSU* [18].

Ssemakula [19] est un pionnier par son travail sur un système systématique de détermination de l'ordre d'opération. *Rho et Kayacan* [20] ont analysés les aspects techniques et économiques des opérations d'usinages et ont implantés un système basé sur une

heuristique qui utilise des matrices pour déterminer l'ordre optimal d'opération. Cet ordre est donné en garantissant la minimisation des coûts des machines et d'outillage.

Le recours aux techniques de l'intelligence artificielle a permis d'avoir un ordre d'usinage plus performant surtout avec l'utilisation des techniques des systèmes experts et des algorithmes génétiques. Vosniakos et Davis [21] proposent un système à base de connaissances pour la minimisation des changements d'outils afin de réduire le temps d'usinage. Kamhawi [22] propose une approche basée sur les algorithmes génétiques pour déterminer l'ordre d'opérations dans un système de conception rapide. Ce système permet d'avoir sous la main un bon planning d'usinage de la pièce malgré qu'il ne soit pas optimal.

2.2 Techniques de détermination de l'ordre d'opérations d'usinage

2.2.1 Les Réseaux de Petri temporisées stochastiques [23, 24]

La méthode qui a été utilisée est basée sur les réseaux de Petri stochastique temporisée, elle a été appliquée sur un modèle de pièce au sein du CPG de Constantine.

La modélisation de la gamme d'usinage de la pièce a été faite avec des réseaux de Petri stochastique temporisés, tous les éléments entrant dans la fabrication de la pièce ont été pris en compte.

Le traitement de données se fait manuellement ce qui rend cette méthode lente et coûteuse.

Les caractéristiques de cette technique sont :

- Elle n'est pas automatique
- Elle n'est pas valable pour toutes les pièces

2.2.2 Travelling Sales Person [25, 26]

Un voyageur de commerce doit visiter n villes données en passant par chaque ville exactement une fois. Il commence par une ville quelconque et termine en retournant à la ville de départ. Les distances entre les villes sont connues. Quel chemin faut-il choisir afin de minimiser la distance parcourue ? La notion de distance peut-être remplacée par d'autres notions comme le temps qu'il met ou l'argent qu'il dépense : dans tous les cas, on parle de coût, du temps ou les deux.



Figure.11 La TSP

A partir d'une matrice $C = (C_{ij})$

Où C_{ij} représente le coût du déplacement entre la ville i et la ville j ($1 \leq i, j \leq n$), il faut trouver une permutation

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

Qui minimise la somme des coûts : $C_{\sigma(1)\sigma(2)} + C_{\sigma(1)\sigma(3)} + \dots + C_{\sigma(n-1)\sigma(n)} + C_{\sigma(n)\sigma(1)}$

L'apport principal de cette technique est qu'elle nous donne un ordre d'opérations qui n'est pas optimal, puisque les données prises en compte sont seulement de type temps.

2.2.3 Les colonies de fourmis [27, 28]

Il existe un algorithme s'inspirant du comportement des fourmis inventé en 1996 par Marco Dorigo à l'Université Libre de Bruxelles. Il se base sur quelques observations :

- les fourmis déposent des phéromones sur leur chemin
- elles suivent le chemin marqué par cette substance
- le chemin le plus marqué est préféré
- les phéromones s'évaporent avec le temps
- si on pose un obstacle coupant un chemin de phéromones, les fourmis le contournent par un côté au hasard.

A un instant donné, une plus grande quantité de phéromones sera déposée sur le chemin le plus court. Ceci est dû au fait que les fourmis ayant choisi ce chemin auront déposé leur phéromone en premier. Celles qui traversent le passage dans l'autre sens y trouveront plus de phéromones à cet instant. L'algorithme peut être décrit de la manière suivante :

- on crée un ensemble de fourmis
- la quantité de phéromones déposée est stockée dans un tableau de taille $n*n$, chaque indice correspondant à une ville
- pour chaque fourmi :
 - on place la fourmi sur une ville au hasard
 - elle choisie une ville parmi celles qui n'ont pas encore été visitées
 - elle s'y rend en suivant le chemin le plus marqué par les phéromones
 - elle dépose des phéromones sur le chemin
- on fait évaporer une certaine quantité des phéromones sur l'ensemble des chemins

L'efficacité de cet algorithme dépend de la quantité de phéromones déposées par une fourmi et la vitesse à laquelle elles s'évaporent. Ces deux paramètres sont réglés arbitrairement.

Le nombre de surfaces à usiner et les contraintes résultant de l'étude de la pièce vont rendre cette technique coûteuse en temps de traitement.

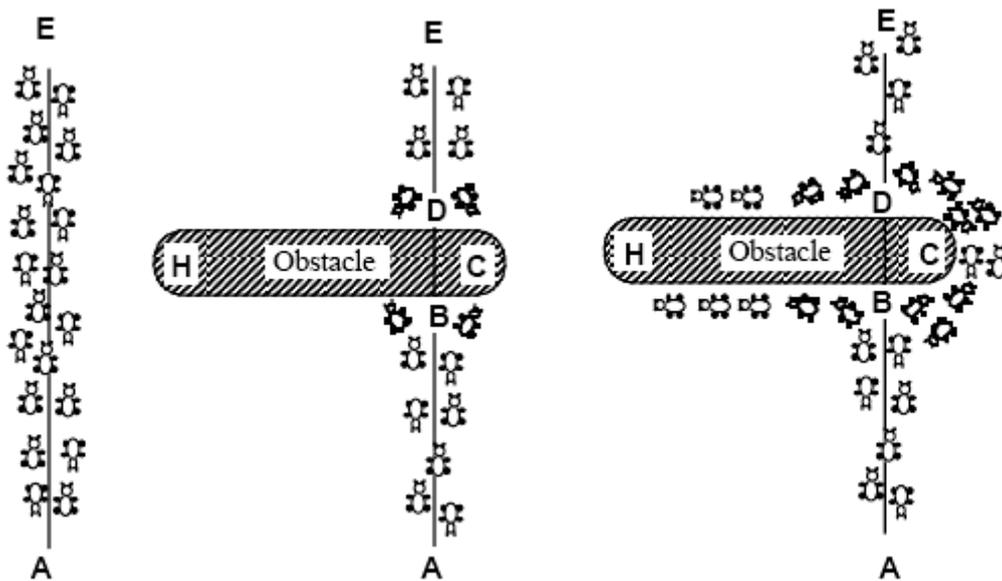


Figure.12 Les colonies de Fourmis

2.2.4 Algorithme génétique [29]

Cette technique utilise plusieurs critères pour trouver l'ordre d'opération optimal. Après avoir trouvé un ordre avec la technique de TSP, quelques paramètres sont utilisés pour

résoudre ce problème d'optimisation. On utilise MTC « Minimum Tool Change » ou « minimum de distance parcouru par l'outil » MTTD ou bien un choix basé sur la sécurité qui prend en compte des contraintes géométriques. En plus une méthode qui utilise une combinaison de ces méthodes peut être aussi utilisé. L'utilisation du système MTTD seul ne convient pas à ce type de problème.

Les données liées à la pièce sont obtenues à partir du modèle CAO ou par une technique de reconnaissance « définition » des entités utilisés à partir des modeleurs. La figure 11 résume la méthode proposée.

Pour chaque entité « surface » à usiner, des paramètres caractéristiques sont attachés tel que :

- La machine.
- Le système de fixation.
- L'outil.
- Les paramètres de coupe.

Les intersections ou bien les relations entre surfaces sont déterminées et classées. En plus une association de surfaces est établie lorsque deux ou plusieurs surfaces sont de la même famille sur la même pièce. [25]

Ensuite des règles de chaque critère sont implantées. Pour les méthode MTC et MTTD c'est simple et facile. Mais pour le critère de sécurité on note les règles suivantes :

Règle1 : si « deux surfaces sont en intersection partielle », alors « usiner en premier la petite surface ».

Règle2 : si « deux surfaces sont a coté d'une autre », alors « usiner en premier la plus importante surface »

Règle3 : si « il y a un coté coupé dans la pièce », alors « usiner la en dernier »

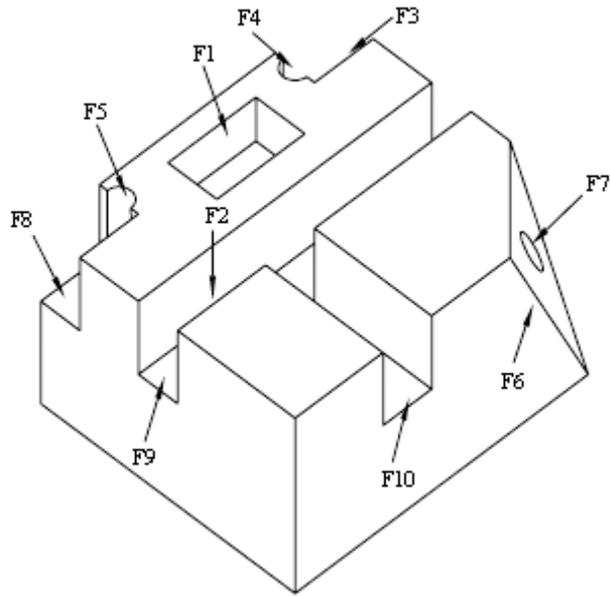


Figure.13 Pièce de forme prismatique

Les résultats obtenus avec les algorithmes génétiques [25] pour cette pièce sont donnés pour un nombre d'itérations égale à 40.

L'ordre optimal obtenu est; [F1-F10-F7-F4-F2-F9-F8-F6-F3-F5] ou [F1-F6-F3-F5-F9-F8-F10-F7-F4-F2].

Le nombre de surfaces à usiner et les contraintes résultant de l'étude de la pièce vont rendre cette technique coûteuse en temps de traitement.

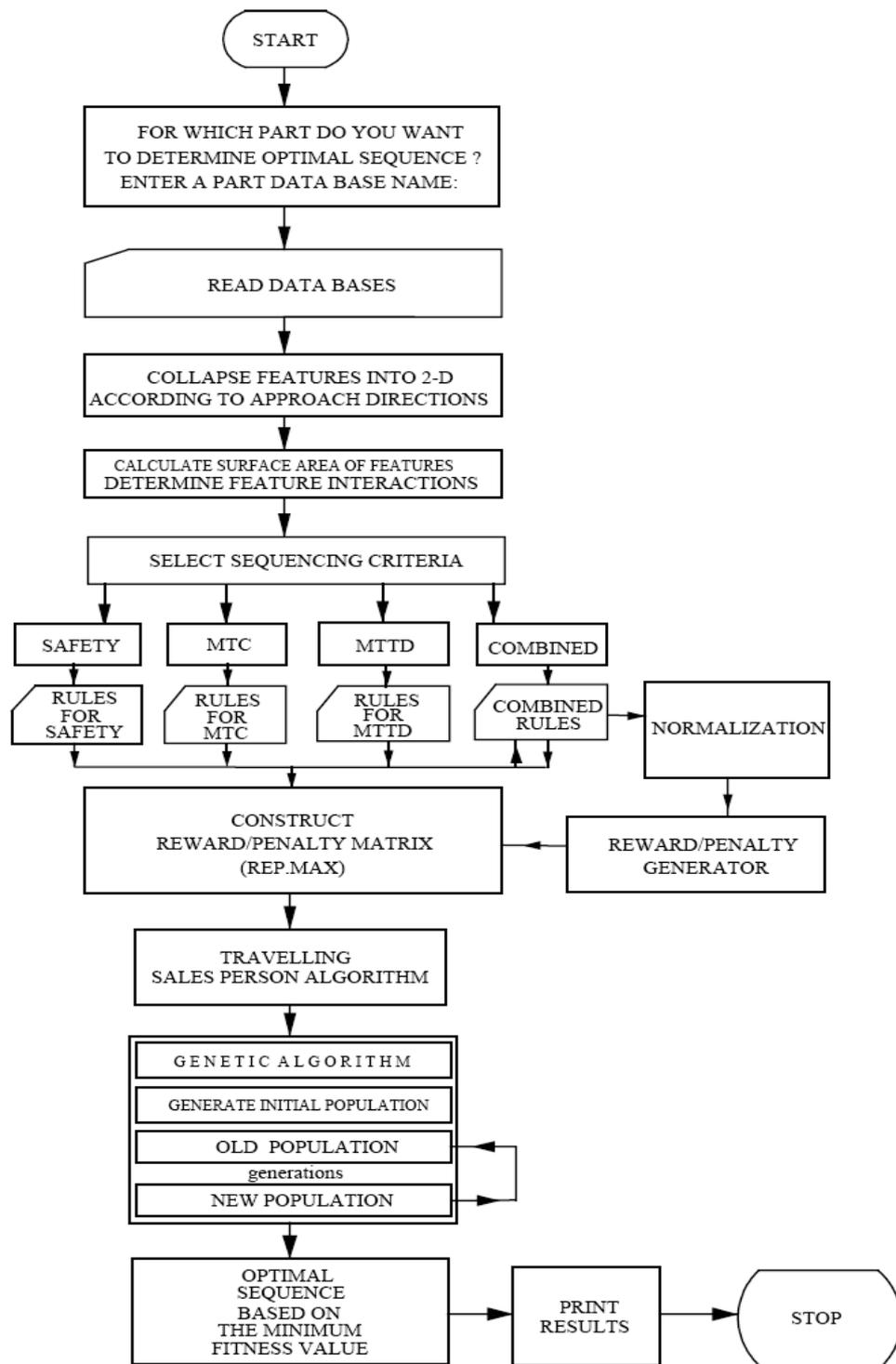


Figure.14 Organigramme des algorithmes génétiques

2.2.5 Méthode RTSS [30]

Le temps de traitement de ce problème que prennent les algorithmes génétiques est très grand surtout lorsque on a une pièce avec un très grand nombre de surfaces usiner. L'effet du remplacement des outils n'affecte pas l'ordre d'opération mais l'affectation des outils par contre à un grand intérêt pour trouver une solution globale à ce problème d'optimisation dans le cycle d'usinage d'une pièce pour minimiser les temps morts « pas de coupe ». Le but du RTSS est de trouver un ordre optimal caractérisé par un changement minime d'outil dans le même système de fixation.

Lorsque la spécification des outils candidats est déterminée, elles sont placées dans une matrice nommée Matrice Outil (tableau 1), pour exprimer les relations entre outils et opération. Verticalement on met outils et Horizontalement les opérations. L'exemple traité est la pièce de la figure10.

Operations→ Tools ↓	1	6	9	10	2	3	8	4	5	7
1	1					1				
2		1	1			1		1	1	
3		1								
4				1			1			1
5			1	1	1					1
6		1	1					1	1	
7							1			

Tableau.1 Matrice Outil

Par cette méthode il est possible de voir si il est possible d'usiner plusieurs opérations avec un seul outil et que pour une seule opération on aura plusieurs alternatives d'outils existants. Des règles sont appliquées pour que le système assure sa fonction.

Règle 1 : sélection l'outil utilisé par le plus grand nombre d'opérations successives.

Règle 2 : s'il y a alternative, choisir l'outil utilisé pour une surface avant

Règle 3 : s'il y a encore alternative, choisir un outil qui peut être utilisé pour le plus grand nombre d'opérations

UM et RM sont utilisées pour le classement des opérations et leurs outils vers le haut et vers la droite

Operations→ Tools ↓	1	6	9	10	2	3	8	4	5	7	UM	RM
1		1			1						1	1
6				1				1			2	3
9				1	1						1	3
10							1			1	4	6
2						1				1	4	5
3							1		1		6	6
8								1	1		7	7
4											8	10
5											8	10
7											6	10

Tableau.2 Matrice de priorités

Operations→ Tools ↓	1	6	9	10	2	3	8	4	5	7
1	1					1				
2										
3										
4							1			
5			1	1	1					1
6		1						1	1	
7										

Tableau.3 Traitement des UM et RM

Operations→ Tools ↓	1	6	9	10	2	7	3	8	4	5
1	1						1			
4								1		
5			1	1	1	1				
6		1							1	1

Tableau.4 Ordre opération optimal trouvé

Le résultat trouvé par cette méthode est l'ordre des opérations suivant (F1, F6, F9, F10, F2, F7, F3, F8, F4, F5). Cet ordre minimise le changement d'outils pour réaliser la pièce. Ces changements étaient de (6) changements au début pour avoir (5) changements après l'utilisation de la méthode RTSS.

L'efficacité de cette méthode réside dans le fait qu'il y a plusieurs changement d'outils sinon elle inefficace.

2.2.6 Système expert [31, 32, 33]

En 1965, une équipe de l'université de Stanford travaille sur la résolution d'un problème pour lequel on ne connaît pas de solution algorithmique : il s'agit de trouver la correspondance entre le spectre de masse et la formule développée d'un corps chimique. Le premier système expert est né. L'idée fut d'introduire la connaissance des experts dans les ordinateurs en les rendant des sortes intelligentes. De plus ce qui fonde le concept de système expert, c'est le fait que cette connaissance des experts n'est pas noyée dans un algorithme, elle est *explicite*. L'expertise se traduit le plus souvent par un ensemble de règles. Le programme va lire ces règles et il va *raisonner* en tentant de les enchaîner.

L'idée qui naît à partir de là est de transférer l'expertise de l'homme à la machine. Il suffit d'une expertise humaine pour soutirer l'ensemble des règles à utiliser dans son expertise. On fait alors une liste de ces règles et il ne reste plus qu'à les enchaîner en simulant le raisonnement de l'expert humain.

La démarche qui consiste à simuler ce dernier par un enchaînement de règles préstockées a paru d'un simplisme bien naïve. Pour un expert humain chevronné, des connaissances bien plus complexes et plus riches qui se passent qu'un simple enchaînement de règles.

Toutefois, les chercheurs en intelligence artificielle ont eu raison car les systèmes experts, D'abord ce sont des adjuvants à l'expert humain qui le déchargent des expertises simples et répétitives, et lui permettent de concentrer sur les problèmes inédits et complexes. Cela sert aussi pour transmettre une expertise. Pour cela il est nécessaire d'atomiser celle-ci en un ensemble de règles logiques.

En effet tout n'est pas de recenser ces règles et d'en faire une base, il faut pouvoir ensuite mener des raisonnements sur cette base de règles. L'entité dans le système qui va mener ces raisonnements, est le **MOTEUR D'INFERENCE**.

Il va enchaîner les règles à plusieurs reprises. Il existe plusieurs types de chaînages, c'est-à-dire plusieurs types de raisonnements. Le chaînage avant qui permettra de déduire les faits découlant de données initiales (*data oriented*). Pour le chaînage arrière, on cherchera à atteindre un ou plusieurs buts (*goal oriented*). Le chaînage mixte qui est ce que l'on pourrait appeler un mélange des deux.

Architecture générale d'un système expert

Celle-ci consiste en trois composantes interactives: une base de connaissances, un moteur d'inférences et une interface.

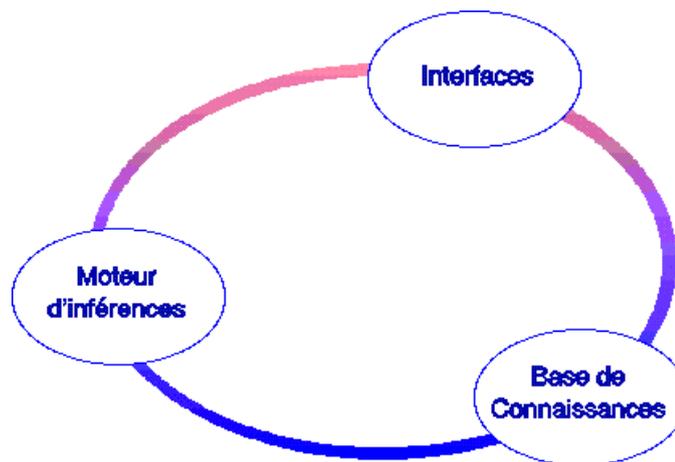


Figure.15 Architecture d'un système expert

La base de connaissances contient toute l'information dont un expert humain aurait besoin pour s'acquitter de son travail, ceci dans un domaine donné. Cette base de connaissances est elle-même divisée en deux composantes.

La première contient des faits spécifiques du domaine (par exemple, "Lisp est un langage de l'Intelligence Artificielle"). Ce sont les connaissances factuelles de la base ou encore *base de faits*.

La seconde contient des principes plus généraux, des règles, des heuristiques de résolution de problèmes qui représentent les modes de raisonnement propres au domaine

considéré (par exemple, "Toute personne âgée de plus de 28 ans est déchargée des obligations militaires"). Ce sont les connaissances déductives souvent représentées par ce qu'on appelle des *règles de production*. La connaissance de ces heuristiques peut provenir, de la part de l'expert humain, soit d'une accumulation d'observations empiriques, soit de connaissances techniques propres au domaine.

Afin de favoriser une plus grande maniabilité de la connaissance, il est fréquent de la stocker déclarativement dans un langage clair, proche du langage naturel, et non noyée dans des pages de code informatique. Grâce à ce type de représentation, la connaissance du système sera facilement accessible à l'utilisateur qui pourra ainsi aisément la modifier ou l'agrandir.

Pour exploiter cette connaissance, un moteur d'inférences est nécessaire pour relier la description d'un problème aux capacités d'analyse d'une situation donnée. De façon générale, le moteur d'inférences sera capable de répondre à des questions, de raisonner et de tirer les conséquences impliquées par la connaissance incluse dans le système.

Le troisième composant d'un système expert contient des interfaces utilisateur [15,34]. Les deux plus importantes sont une interface grâce à laquelle les utilisateurs pourront obtenir une consultation du système expert et une interface permettant l'acquisition des connaissances. Cette dernière est utilisée par l'expert humain pour mettre à jour et vérifier ses connaissances.

Une particularité majeure dans l'architecture d'un système expert réside en une nette séparation entre la base de connaissances et le moteur d'inférences, mécanisme d'exploitation de cette connaissance.

2.3 Conclusion

Les techniques d'optimisation combinatoire utilisant les algorithmes génétiques et la TSP (Travelling Sales Person) et des heuristiques sont utilisées comme des outils d'optimisation. En plus de ces techniques un approche nommé RTSS basé sur la détermination de l'ordre des opérations avec une fonction objectif de garantir un minimum de changement d'outils a fait ses preuves. Les réseaux de Petri ont données aussi de bonnes résultats.

Toutes ces méthodes et techniques nous montrent que les caractéristiques des opérations jouent un rôle très important dans la détermination de la séquence des opérations d'usinage d'une pièce. Donc la prise en compte des changements d'outils, de changement de set-up et de machine a un très important impact sur l'ordre optimal d'opérations et nous garantie un coût et un temps globale d'opération minimum.

Toutes ces techniques sont limitées dans leurs objectifs, on ne trouve pas de méthode qui aboutisse à un résultat qui satisfait tous les exigences technique et technologiques et même économiques mais ils restent fiables.

CHAPITRE 3. LES RESEAUX DE PETRI POUR LA MODELISATION

CHAPITRE 3. LES RESEAUX DE PETRI POUR LA MODELISATION

3 LES RESEAUX DE PETRI POUR LA MODELISATION

3.1 Un peu d'histoire [24, 35]

Les réseaux de Petri sont un outil graphique et mathématique qui s'applique à un grand nombre de domaines où les notions d'événements et d'évolutions simultanées sont importantes. Cette théorie est née de la thèse, intitulée *communication avec des automates*, que Carl Adam Petri a présentée en 1962 à l'université de Darmstadt. Carl Adam Petri est né en 1926 à Leipzig, il est professeur à l'université de Bonn. Anatol W. Holt fut séduit par ce travail et sous son impulsion un groupe de chercheurs de *Massachusetts institute of technology* (MIT) jeta les bases, entre 1968 et 1976, de ce qui devint le réseau de Petri. Parmi ces pionniers on peut citer F. Commoner et M. Hack.

La recherche en Allemagne et en France fut très active à la fin des années 70 alors que le groupe du MIT se dispersait. Progressivement des groupes de recherche se formèrent sur le sujet en Europe et dans le monde. Après un premier symposium de 1975 au MIT qui n'eut pas de suite, il y eut des conférences chaque année à partir de 1980. La première eut lieu symboliquement à Strasbourg, puis ensuite à Bad Honnef (RFA), Varenna (Italie), Toulouse, Aarhus (Danemark), Espoo (Finlande), Oxford, Zaragoza (Espagne), Venise, Bonn, Paris et Aarhus.

Parmi les applications on peut citer : l'évaluation des performances des systèmes discrets, les protocoles de communication, la commande des ateliers de fabrication, la conception de logiciel temps-réel et/ou distribué, les systèmes d'information (organisation des entreprises), les interfaces homme-machine [36].

En ce qui concerne la conduite des ateliers de fabrication automatisés, l'application des réseaux de Petri s'est effectuée d'abord en France sous la forme un peu altérée de la norme Grafset pour la programmation des automates programmables industriels.

Le premier modèle appelé RdP CE (conditions- événements) reposait sur l'utilisation des valeurs booléennes, vrai et faux. Les RdP PT (places- transitions) généralisent les RdP CE en manipulant des valeurs entières.

3.2 Notions de base des RdP [37,38]

Un Réseau de Pétri (RdP) est un graphe biparti constitué de deux types de nœuds : **les places et les transitions**. Des **Arcs** orientés relient places et transitions. Un arc ne relie jamais deux nœuds de même nature. Généralement, les places sont représentées par des cercles et les transitions par des barres. Chaque place peut contenir un ou plusieurs **jetons** ou **marques**.

Ces jetons permettent de modéliser la dynamique du système. Le marquage d'un RdP est un vecteur à composantes entiers positifs ou nuls. Pour illustrer les définitions qui précèdent, considérons le RdP de la figure (16). Ce RdP comporte quatre places notées : P1, P2, P3 et P4 et deux transitions notées T1 et T2, il modélise un système de la production telle que (P1 et P2) représentent des stocks. (P3 et P4) représentent la disponibilité des machines. Les transitions représentent l'exécution des pièces sur les machines. Chaque place contient un nombre entier de marques ou jetons. Le nombre de marques contenues dans la place « **Pi** » est noté « **mi** ».

Le marquage du réseau, noté **M**, est défini par le vecteur de ces marquages. Le marquage initial de cet RdP est $M_0 = (0,4,1,1)$

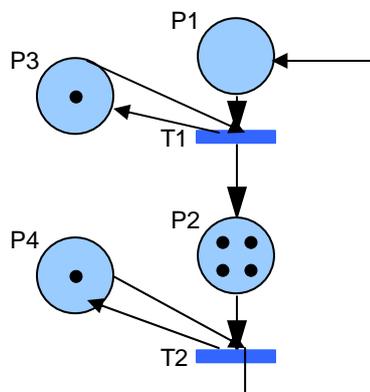


Figure.16 RdP modélisant un système de production

A chaque arc est associé un **poinds** donné par un entier positif, par défaut il est égale à « 1 ».

Si tous les poids des arcs sont égaux à « 1 » le RdP est dit **ordinaire**.

De manière plus formelle on dira qu'un RdP est un quintuplet.

$$\mathbf{R} = (\mathbf{P}, \mathbf{T}, \mathbf{Pré}, \mathbf{Post}, \mathbf{Mo}) \text{ ou:}$$

- P et T sont respectivement. Les ensembles finis et non vides des places et des transitions, tel que $P \cap T = \emptyset$

- pré est l'application **d'incidence avant**. telle que :

$$\text{pré} : P \times T \longrightarrow N$$

$$(P_i, T_j) \longrightarrow \text{pré}(P_i, T_j) = \text{poids de l'arc reliant la place } P_i \text{ à la transition } T_j .$$

- Poste est l'application **d'incidence arrière** .telle que :

$$\text{Post} : P \times T \longrightarrow N$$

$$(P_i, T_j) \longrightarrow \text{post}(P_i, T_j) = \text{poids de l'arc reliant la transition } T_j \text{ à la place } P_i$$

- Mo est le marquage initial.

3.2.1 Définition de l'état d'un réseau de Petri

Pour définir l'état d'un système modélisé par un réseau de Petri, il est nécessaire de compléter le réseau de Petri par un marquage. Ce marquage consiste à disposer un nombre entier (positif ou nul) de marques où jetons dans chaque place du réseau de Petri. Le nombre de jetons contenus dans une place P_i sera noté m_i . Le marquage du réseau sera alors défini par le vecteur $M = \{m_i\}$.

3.2.2 Evolution temporelle d'un réseau de Petri [39]

L'évolution de l'état du réseau de Petri correspond à une évolution du marquage. Les jetons, qui matérialisent l'état du réseau à un instant donné, peuvent passer d'une place à une autre par franchissement ou tir d'une transition. Dans le cas des réseaux dits à arcs simples ou de poids 1, la règle d'évolution s'énonce de la manière suivante :

Le franchissement d'une transition consiste à retirer un jeton dans chacune des places en amont de la transition et à ajouter un jeton dans chacune des places en aval de celle-ci.

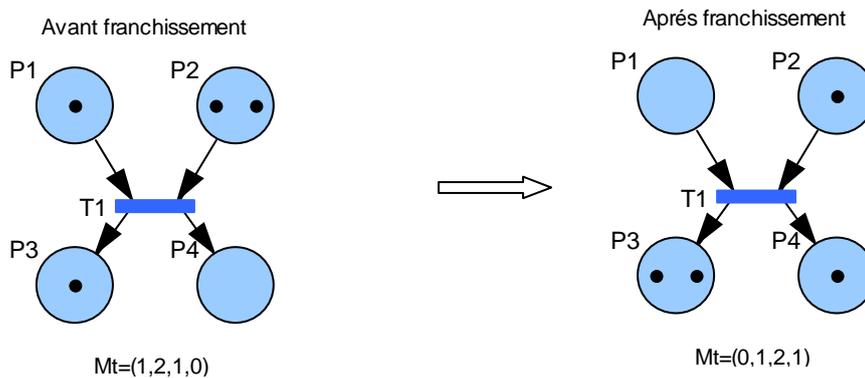


Figure.17 Evolution temporelle d'un réseau de Petri

3.2.3 Les règles générales d'évolution temporelle d'un réseau de Petri

Les règles générales d'évolution des réseaux de Petri marqué simple sont les suivantes :

- une transition est franchissable ou sensibilisée ou encore validée lorsque chacune des places en amont possède au moins un jeton,
- le réseau ne peut évoluer que par franchissement d'une seule transition à la fois, transition choisie parmi toutes celles qui sont validées à cet instant,
- le franchissement d'une transition est indivisible et de durée nulle.

Remarque :

Si une transition est validée, cela n'implique pas qu'elle sera immédiatement franchie. Ces règles introduisent en effet un certain indéterminisme dans l'évolution des réseaux de Petri, puisque ceux-ci peuvent passer par différents états dont l'apparition est conditionnée par le choix des transitions tirées. Ce fonctionnement représente assez bien les situations réelles où il n'y a pas de priorité dans la succession des événements.

Les nœuds du graphe de marquage sont formés des différents marquages de M_i . On démarre avec un seul marquage initial M , et l'on va construire les différents arcs et nœuds progressivement.

Pour chaque nouveau marquage on détermine l'ensemble des transitions franchissables et pour chaque transition de cet ensemble on ajoute un arc vers le nouveau marquage. Si un marquage est déjà présent dans le graphe, on se contente de tracer l'arc.

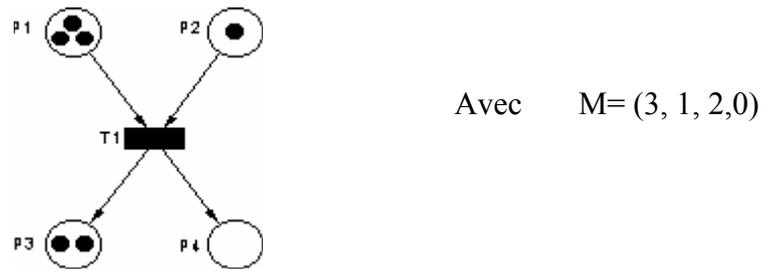


Figure.18 marquage

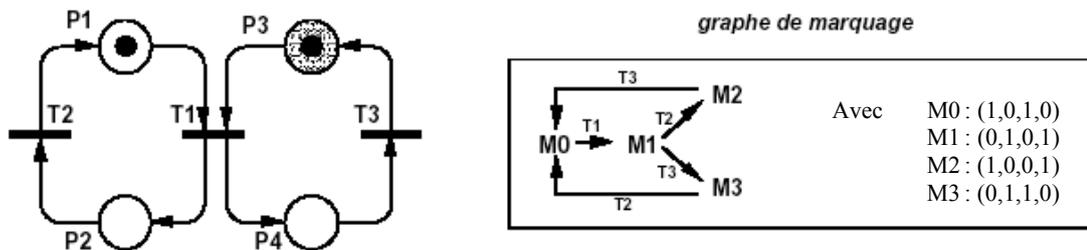


Figure.19 Graphe de marquage

3.3 Description des RdP par l’algèbre linéaire :

Les RdP doivent leur description analytique à la théorie de l’algèbre linéaire [36]. Dans cette théorie l’évolution du marquage est exprimé par une équation fondamentale.

3.3.1 Matrice d’incidences :

On appelle matrice d’incidence **Avant**, la matrice :

$$W^- = [W_{ij}^-] ; \text{ où } W_{ij}^- = \text{pré} (P_i, T_j)$$

On appelle matrice d’incidence **arrière**, la matrice

$$W^+ = [W_{ij}^+] ; \text{ où } W_{ij}^+ = \text{post} (P_i, T_j)$$

On appelle **matrice d’incidence** la matrice W telle que :

$$W = [W_{ij}] = W^+ - W^-$$

3.3.2 Equation Fondamental :

Soit “ S ” une séquence de franchissement réalisable à partir d’un marquage M_i , ce qui peut s’écrire $M_i [S \rightarrow$. Le vecteur caractéristique de la séquence S noté \underline{S} , est le vecteur de dimension m dont la composante numéro “ j ” correspond au nombre de franchissements de la transition T_j dans la séquence S . Si la séquence de franchissements est telle que $M_i [S \rightarrow M_k$, le marquage M_k est obtenu à partir de l’équation fondamentale :

$$M_k = M_i + W \cdot \underline{S}$$

Si le RdP doit être replacé dans un contexte d'utilisation industrielle, la représentation du système peut ne pas être exprimée uniquement en terme de séquençement logique des tâches, mais aussi par la prise en compte de durée d'opérations et d'événements extérieurs non descriptibles par un formalisme. D'autre part, l'équation fondamentale ne garantit pas que \underline{S} soit franchissable, elle nous permet simplement de trouver le nouveau marquage lorsqu'on connaît le marquage \mathbf{M}_i et la séquence franchissable \mathbf{S} .

3.4 Ensemble des extensions des RdP :

Depuis la publication de la thèse de «Carl Adam Petri » dans les années 60, les RdP ont reçu une attention qui ne cesse de croître. Ceci est dû au fait qu'ils permettent de modéliser, spécifier et évaluer des systèmes différents (systèmes de production / Réseau et communication / perturbations de type Panne- machine etc.).

Cette diversité des systèmes a permis l'apparition de plusieurs classes de modèles, selon la nature des attributs pertinents, et les règles d'évolution requises.

3.4.1 Les RdP Temporisés :

Un RdP temporisé permet de décrire un système dont le fonctionnement dépend du temps. C'est à dire qu'il peut s'écouler une certaine durée entre le début d'une opération et la fin de celle-ci, les RdP temporisés sont utilisés pour rendre compte de cette durée. Les RdP temporisés sont utiles pour l'évaluation de performances des systèmes.

Il y a principalement deux façons de modéliser la temporisation d'un RdP [40], soit la temporisation est associée aux places : c'est un **RdP P-temporisé** [41]. Dans le cas où la temporisation est associée aux transitions, on parle d'un **RdP T-temporisé**. On utilisera le mot **RdP temporisé** pour désigner un RdP T-temporisé.

3.4.1.1 Définition d'un RdP T-temporisé :

Un RdP temporisé est un doublet $\langle R, \text{tempo} \rangle$ tel que :

- R est un RdP marqué
- Tempo est une application de l'ensemble **T** des transitions dans l'ensemble des nombres rationnels positifs ou nuls.

Tempo (T_j) = d_j = temporisation associée à la transition T_j .

3.4.1.2 Principe de fonctionnement :

Le RdP de la figure (20), modélise le système de production où le temps opératoire d'une pièce sur la première machine est $d_1 = 1/2$ unité de temps, l'exécution d'une pièce sur la deuxième machine nécessite $d_2 = 1/3$ unité de temps. Les temporisations d_1 et d_2 associées aux transitions T_1 et T_2 correspondent aux deux temps opératoires.

Dans un RdP temporisé, une marque peut avoir deux états : Elle peut être **réservée (o)** pour le franchissement d'une transition T_j ou **Non réservée (.)**.

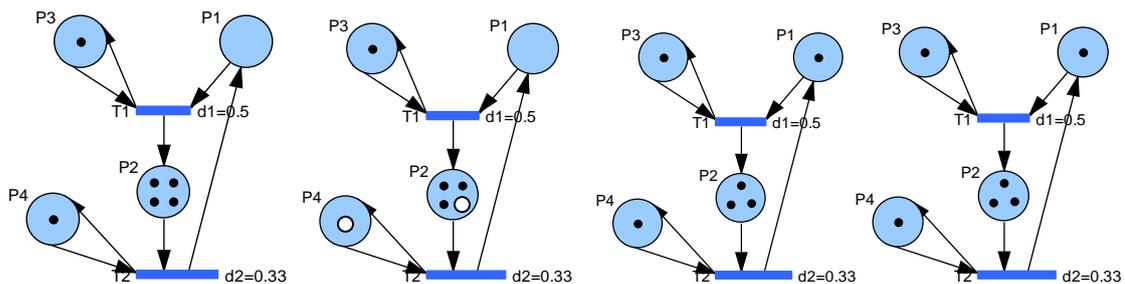


Figure.20 Fonctionnement d'un RdP temporisé

A tout instant t , le marquage présent M est la somme de deux marquage M^R et M^N , tel que M^R est le marquage constitué des marquage réservées et M^N est le marquage constitué des marquages non réservées. Une transition est validée pour le marquage $M = M^R + M^N$ si elle est validée pour le marquage M^N .

3.4.2 Les RdP stochastiques (RdPS) :

Les RdP stochastiques ont été définis pour répondre à certains problèmes d'évaluation quantitative des systèmes industriels. Il s'agit par exemple des calculs de sûreté de fonctionnement ou des performances d'un processus de fabrication qui doivent faire l'objet d'une évaluation prévisionnelle.

Dans un RdP temporisé, une durée fixe est associée à chaque place ou à chaque transition du Réseau. On obtient des modèles qui sont bien adaptés pour étudier des systèmes où les durées opératoires sont fixes. Cependant, il existe des phénomènes qui ne peuvent pas être bien modélisés avec des durées constantes.

Les RdPS introduit par G. Florin et S. Natkin [42] constituent un outil capable de modéliser des phénomènes aléatoires dans les domaines d'applications les plus variés :

- Arrivée de tâche dans l'unité centrale d'un ordinateur ;

- Occurrence d'accidents dans une entreprise ;
- Attente de clients se présentant de manière aléatoire devant un serveur ;
- Apparition de pannes dans un parc de machines,...etc.

3.4.2.1 Définition et Notions :

Dans un RdPS un temps aléatoire est associé au franchissement d'une transition. L'hypothèse la plus couramment utilisée est que les durées de franchissement sont distribuées selon des lois exponentielles. Ces lois sont très intéressantes pour plusieurs raisons :

- Elles sont très imprévisibles tout en restant centrées autour d'une valeur moyenne ;
- Elles sont sans mémoire, c'est à dire que la probabilité qu'un événement arrive dans l'intervalle de temps $[t, t+ dt]$ ne dépend que de la longueur (dt) de cet intervalle et non pas de sa position relative sur l'axe des temps.

Les RdP stochastique se définissent formellement comme étant un sextuplet $(P, T, \text{Pré}, \text{Post}, \text{Mo}, F)$ où $(P, T, \text{Pré}, \text{Post}, \text{Mo})$ est un RdP marqué et F la fonction de franchissement. F associe à chaque transition T_j une variable aléatoire continue, représentant le taux de franchissement. Ces variables aléatoires sont indépendamment distribuées [43] figure [21(a)].

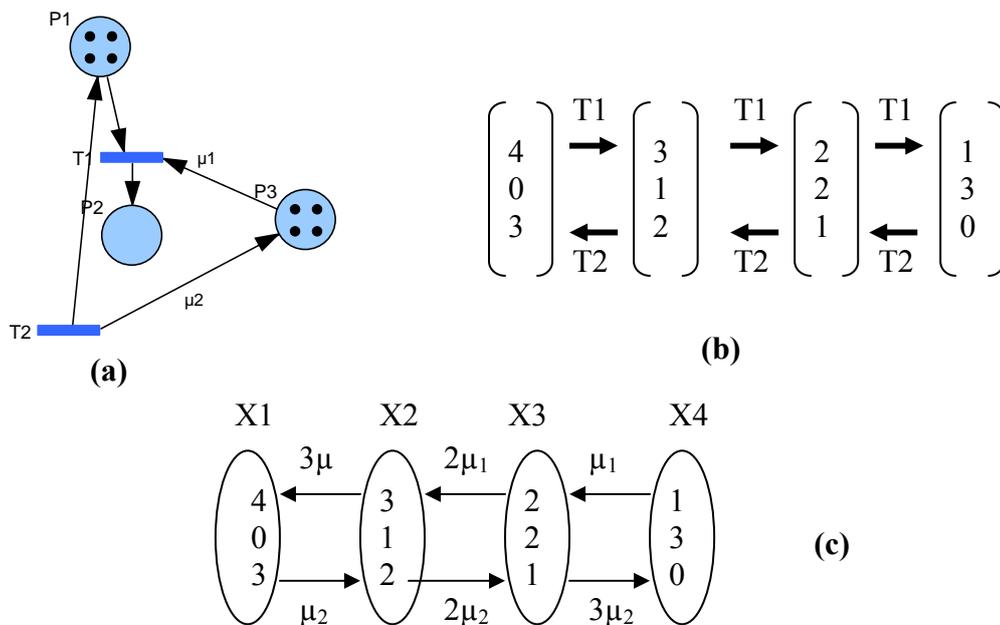


Figure.21 (a) –RdP stochastique – (b)- graphe des marquages accessible (c) chaîne de markov

Les RdPS peuvent être utilisés pour obtenir des résultats théoriques sous des hypothèses très générales. Par contre, la seule exploitation numérique de tels réseaux qui semble à l'heure actuelle possible est la simulation. Pour obtenir des modèles exploitables par un calcul numérique, il est nécessaire de considérer des sous-ensembles de RdPS (par exemple : les RdPS **Markoviens**).

Grâce aux RdPS, il est possible de réunir en un même modèle des RdPS et des modèles probabilistes. Par ailleurs les RdPS offrent l'avantage (par rapport aux **chaîne de Markov**) de permettre à des personnes non familiarisées avec les phénomènes stochastiques d'étudier le comportement du système au quel ils s'intéressent puisque ces calculs leurs sont transparents.

3.4.2.2 Durée de sensibilisation stochastique :

Au lieu de prendre, de façon égale, toutes les variables d'un intervalle [O min, O max] on peut supposer que la durée de franchissement est une variable stochastique O avec une distribution de probabilité exponentielle :

$$\Pr [O \leq t] = 1 - e^{-\lambda t}$$

La fonction $\Pr [\theta (t)]$ décrit la probabilité pour que le franchissement ait lieu avant t c'est-à-dire pour que la durée de sensibilisation soit inférieure à t.

On en déduit que la valeur moyenne de la durée de sensibilisation est :

$$\bar{\theta} = \int_0^{\infty} (1 - \Pr \theta(t)) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1 / \lambda$$

λ est appelé **taux de transition**.

3.4.2.3 Analyse d'un RdP stochastique :

Pour analyser un RdPS, deux approches complémentaires peuvent être utilisées. La première, celle de conservation dans un RdP, on obtient alors des relations de conservation du marquage et du taux de franchissement.

La deuxième approche consiste à l'utilisation **des chaînes de Markov**, qui s'obtiennent par la construction du graphe des marquages accessibles en associant à chaque arc, un taux de franchissement dépendant du taux associé à la transition que l'on franchie

et de marquages des places d'entrées de celle ci. La figure (24) donne le graphe de marquages accessibles du RdPS et la chaîne de Markov correspondante.

Pour évaluer les performances d'un RdPS, on procède au calcul des paramètres quantitatifs à l'aide du vecteur des probabilités stationnaires parmi les principaux paramètres [44, 45] on a :

- La probabilité d'état en régime stationnaire.
- La fréquence moyenne de franchissement.
- Le nombre moyen de marque dans un place (Marquage moyens des places).
- Le temps moyen de séjour des marques dans chaque place.

3.4.2.4 Probabilité d'état en régime stationnaire :

Le générateur du processus markovien associé au RdPS est une matrice carrée « **A** » de dimension (L×L). D'ou « L » est le nombre fini d'états de la chaîne de Markov correspondante.

Après avoir construit le générateur **A** du processus markovien, la résolution du système linéaire homogène :

$$\begin{cases} \text{Pr}^* \cdot A = 0 \\ \sum_{k=1}^l \text{Pr}_k^* = 1 \end{cases}$$

Permet d'obtenir les probabilités d'états en régime permanent (Si le régime d'un système se stabilise après un temps fini).

3.4.2.5 Fréquence moyenne de franchissement :

La fréquence moyenne de franchissement d'une transition T_j est donnée par la relation suivante :

$$f_j^* = \sum_{k=1}^l \mu_j(k) \cdot \text{Pr}_k^*$$

Pour : T_j franchissable pour M_k

Ou $\text{Pr}^* \cdot k$: la probabilité d'état en régime stationnaire.

l : le nombre d'états de la chaîne de Markov.

3.4.2.6 Nombre moyen de marque dans une place :

Le nombre moyen de marque d'une place P_i en régime stationnaire est M^* tel que :

$$M^*(P_i) = \sum_{k=1}^l M_j(k) \cdot \text{Pr}_k^*$$

Ou $M_j(k)$: est le nombre de marque de P_i pour le marquage M_j .

3.4.2.7 Temps moyen de séjour :

Le temps moyen de séjour d'une marque dans une place est obtenu par la formule de

Little :

$$D^*(P_i) = \frac{M^*(P_i)}{Post_i F^*}$$

3.4.3 Les RdP continus :

Les réseaux de Petri sont largement utilisés pour modéliser différents systèmes. Dans un RdP, le marquage d'une place peut correspondre, soit à l'état booléen d'un dispositif (un ressource est disponible ou pas), soit à un nombre entier (nombre de pièces dans un stock).

Mais quand un RdP contient un grand nombre de jetons, le nombre d'états atteignables explose. C'est une limitation pratique à l'utilisation des RdP.

3.4.3.1 Définition et notions :

Les RdP continus sont une extension des RdP discrets. Un RdP continu est RdP dans lequel le nombre de marques de chaque place est un nombre réel positif. Cette notion de nombre réel représentant les marquages des places. Ce marquage à l'aide d'un nombre réel positif à permis la modélisation par RdP de système nécessitant la représentation d'un nombre important de marque dans un place ou des processus continu (Stockage de gaz, gestion de la distribution d'eau, etc..). Il est possible de démontrer que le comportement d'un RdP continu est un cas limite de RdP discret, obtenu lorsque chacune des marques du réseau est divisée en "k" jetons et que "k" tend vers l'infini [45].

De la même façon que pour les RdP discret temporisé, une temporisation est introduite pour le RdP continu. Ainsi à chaque transition est associé un taux de franchissement U_j , si " d_j " est la temporisation associé à la transition T_j , alors $U_j = 1/d_j$. Ce taux de franchissement de U_j est homogène à une vitesse.

Remarque :

Pour la représentation d'un modèle d'un RdP continu on utilise un double cercle pour identifier une place continue, et un rectangle pour une transition continu [figure (22)].

3.4.3.2 Le modèle de base (RdPCC) :

Il y a deux types des RdP continu, qui sont les RdP continu à vitesse constantes (le modèle de base) et les RdP Continu à Vitesse Variables (RdPCV).

Un RdPCC est un sextuplet, $R = \langle P, T, \text{Pré}, \text{Post}, V, Mo \rangle$ tel que :

- $(P, T, \text{Pré}, \text{post}, Mo)$ garde la même définition que pour un RdP marqué.
- V : est une application qui associe une vitesse maximale à chaque transition.

Le marquage initial Mo est un vecteur de nombres réels positifs ou nuls. Sachant que $M(t)$ représente le marquage du RdP à l'instant t . L'évolution du marquage d'un RdP continue est donnée par la relation fondamentale suivante :

$$dM / dt = W \cdot v(t)$$

Ou : W : Matrice d'incidence

$v(t)$: est le vecteur des vitesse instantanées de franchissement.

Cette relation montre que le variation du marquage par unité de temps est égale aux flux entrant moins le flux sortant.

3.4.3.3 Principe de fonctionnement :

Reprenons un exemple pour expliquer comment évolue un RdP continu. Les temporisations associées aux transitions sont remplacées par des vitesses de franchissement maximal. On suppose qu'un liquide s'écoule d'un réservoir (1) à un réservoir (2) par gravité (3 litres/seconde). Et remonté du réservoir (2) au réservoir (1) par une pompe (2 litres/seconde) ; à l'état initial , il y a 180 litres dans le réservoir (1) et le réservoir (2) est vide. Le comportement de ce système est modélisé par le RdP continu temporisé de la figure (22), ou les marquage des places P_1 et P_2 représentent les quantités de liquide dans les réservoirs (1) et (2) ; respectivement ; les vitesses V_1 et V_2 associées aux transitions T_1 et T_2 correspondent aux vitesses d'écoulement du liquide.

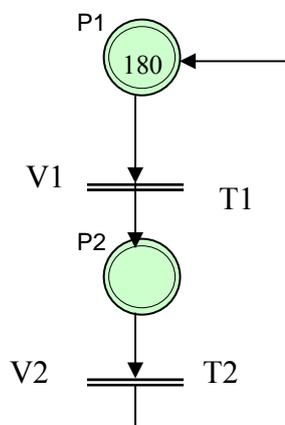


Figure.22 RdP continu modélisant le système d'écoulement d'un liquide

Dans ce modèle ; quand $m_1 > 0$, la transition T_1 est franchie à la vitesse $V_1 = 3$ l/s. Quand $m_2 > 0$ (pour tout $t > 0$ puisque $V_1 > V_2$) la transition T_2 est franchie à la vitesse $V_2 = 2$ l/s. On en déduit.

$$m_1(t + dt) = m_1(t) - (V_1 - V_2) dt = m_1(t) - (3-2) dt$$

$$m_2(t + dt) = m_2(t) + (V_1 - V_2) dt = m_2(t) + (3-2) dt$$

Or : $m_1(0) = 180$ et $m_2(0) = 0$, on obtient :

$$m_1(t) = 180 - t$$

$$m_2(t) = t$$

Les équations précédente restent vérifiées tant que $m_1 > 0$.

Au temps $t = 180$, $m_1 = 0$ et $m_2 = 180$. La transition T_2 peut encore être franchie à sa vitesse maximale puisque $m_2 > 0$, mais pas T_1 ; en effet $m_1 = 0$ (réservoir (1) est vide). Cependant m_1 est alimenté à la vitesse V_2 par franchissement de T_2 (le réservoir (1) est alimenté par le pompage).

Donc, la transition T_1 peut être franchie à la vitesse $V_2 = 2$ l / qui n'est plus la vitesse maximale.

Donc :

Pour $0 < t < 180$

$$v_1(t) = V_1 = 3$$

$$v_2(t) = V_2 = 2$$

Pour $t \geq 180$

$$v_1(t) = V_2 = 2$$

$$v_2(t) = V_2 = 2$$

Les marquages correspondants sont illustrés par la figure (23) suivante :

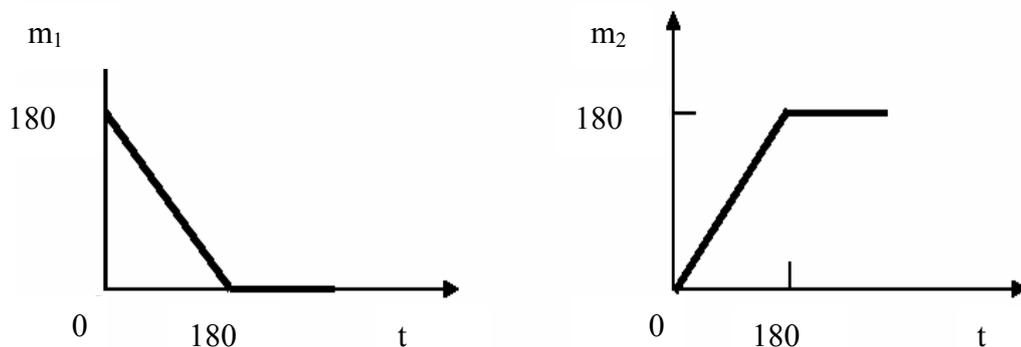


Figure.23 Evaluation du marquage du RdP continu

3.4.4 Les RdP hybrides :

Dans le but de fournir un modèle basé sur les RdP et permettant la modélisation homogène des systèmes physiques réunissant à la fois une partie continue et une partie discrète, un nouveau type de RdP a été développé : **les RdP hybrides**.

Un RdP hybrides comporte des places et des transition continues et des places et transition discrètes [46].

Un modèle autonome a été défini, mais cette notion n'est pas suffisante pour des systèmes réels, car le variable temps intervient toujours dans le fonctionnement de ces systèmes. Donc l'ajoute de cette variable est nécessaire. Ainsi les RdP hybrides temporisés ont été définis.

3.4.4.1 Définitions et notions :

A°/ Un RdP hybride temporisé, appelé simplement RdP hybride, est un septuplet

$R = \langle P, T, h, \text{Pré}, \text{Post}, \text{tempo}, \text{Mo} \rangle$ tel que :

- P et T : sont respectivement, les ensembles finis des places et des transitions.
- h : PUT C,D ,appelé **fonction hybride**, indique pour chacun des nœud s'il s'agit d'un nœud discret (D) ou continu (C).
- Pré et Post : sont respectivement ; l'application d'incidence avant et d'incidence arrière, telle que :

Si : h (P) =D

Et Si : h (P) = C

Pré : $P \times T \rightarrow N$

Pré : $P \times T \rightarrow R^+$

Post : $P \times T \rightarrow N$

Post : $P \times T \rightarrow R^+$

- Tempo : c'est l'application qui associe à chaque transition T_j un nombre réel positif d_j tel que :

- La temporisation associée à une D-transition T_j vaut d_j .

- La vitesse maximale de franchissement associée à une Ctransition

T_j vaut $V_j = 1/d_j$.

- Mo : est le marquage initial.

B°/ On définit la matrice d'incidence associée à un RdP hybride de la manière suivante :

$W = [W_{ij}]$, tel que : $W_{ij} = \text{post} (P_i, T_j) - \text{Pré} (P_i, T_j)$

Il est possible de numéroter les places et les transitions du réseau de façon à ce que toutes les D- places aient un indice plus petit que celui des C- places; de même pour les D-transitions. De cette façon la matrice d'incidence peut être représentée par :

$$W = \begin{pmatrix} W_D & 0 \\ W_{CD} & W_C \end{pmatrix}$$

C°/ Le marquage M (t) à un instant t donné peut être déduit à partir du marquage initial M0 en utilisant l'équation fondamentale suivante :

$$M(t) = \begin{pmatrix} M_D(t) \\ M_C(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_D(0) \\ M_C(0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_D & 0 \\ W_{CD} & W_C \end{pmatrix} \cdot \left\{ \begin{pmatrix} \delta(t) \\ 0 \end{pmatrix} + \int_0^t \begin{pmatrix} 0 \\ V(\mu) \end{pmatrix} du \right\}$$

- $M_D(t)$ et $M_C(t)$ sont respectivement, le marquage discret et le marquage continu à l'instant t.
- $M_D(0)$ et $M_C(0)$ sont respectivement, le marquage initiale des D- places et des C-places.
- $\delta(t)$; représente le nombre de fois que chaque D- transitions est franchie, les composantes associées aux C- transitions sont nulles.
- Les composantes du vecteur $V(\mu)$ représentent les vitesses instantanées associées aux C- transitions, les composantes associées aux D- transitions sont nulles.

3.4.4.2 Principe de fonctionnement et Graphe d'évolution :

Pour la détermination du principe de fonctionnement d'un RdP hybride, on considère l'exemple d'un système de production modélisé par un RdP hybride. La figure (24) présente un RdP hybride, la partie continue est interprétée comme un RdPCC. Ce modèle représente le fonctionnement suivant. Une machine est affectée périodiquement à une opération (1) (transition T_3) pendant une unité de temps, puis à une opération (2) (transition T_4) pendant une unité de temps. Alors que P_1 et P_2 représentent la disponibilité des ressources.

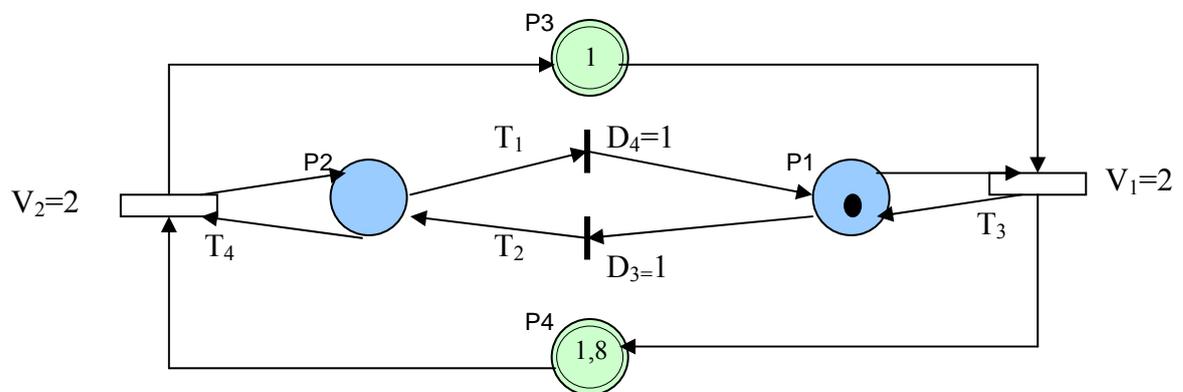


Figure.24 RdP hybride

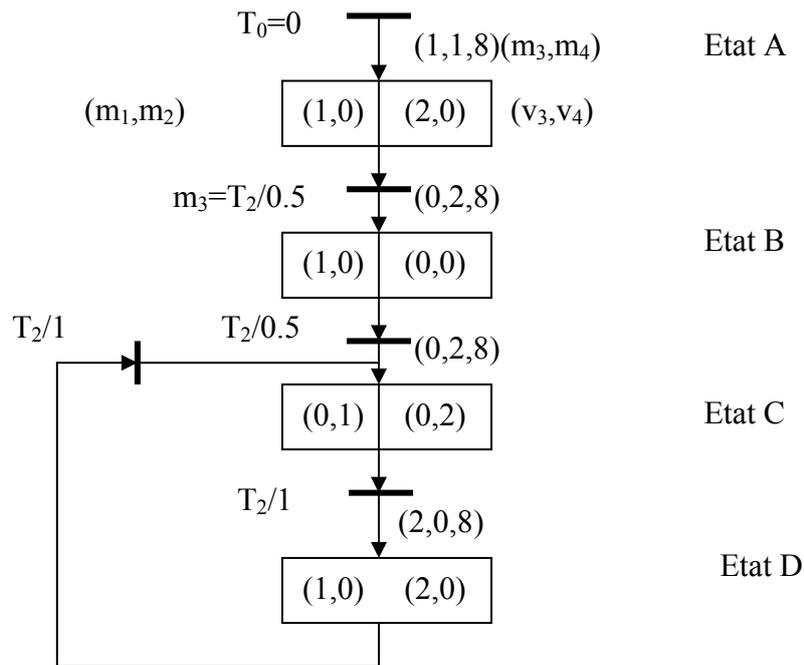


Figure.25 Graphe d'évolution

Pour le marquage continu, il est possible de déterminer des phases pendant les quelles le marquage des D- places ainsi que le vecteur des vitesse instantanées restent constants. Chaque phase est appelée **état comportemental invariant [IB- état (Invariant Behavior)]**. Le graphe d'évolution d'un RdP hybride est composé d'une suite d'IB- états (figure 25).

3.4.5 Les RdP colorés (RdPC) :

Quels sont les modèles qui permettent une identification facile des produits ?

Les RdP, dits de Haut niveau [47], donnent une description compacte, structurée et permettent d'attacher une partie des données aux jetons ce qui autorise l'identification. C'est le cas des réseaux de pétri colorés.

Les RdP colorés sont une voie possible pour obtenir des modèles de traitement largement inférieure du point de vue nombre de places et nombre de transition aux modèles équivalents que l'on obtiendrait avec les RdP généralisés. Ils sont donc souvent utilisés pour modéliser des systèmes de production.

Dans un RdPC on associe à chaque marque d'une place **un identificateur** ou **une couleur**. Chaque transition peut être franchie de différentes manières représentées par les différentes couleurs de franchissement associées à la transition. La relation entre les

couleurs de franchissement et le marquage coloré concerné est définie par des fonctions associées aux arcs [45].

3.4.5.1 Définition des RdPC :

Un RdP colorée R est un sextuplet ; $R = \langle P, T, Pré, Post, Mo, C \rangle$ tel que :

- $(P, T, Pré, Post, Mo)$: garde la même définition que pour un RdP généralisé.
- C : est l'ensemble des couleurs.

Dans le cas général, une couleur est représentée par un N-Uplet $C_K = \langle C_{K1}, C_{K2}, \dots, C_{Kn} \rangle$. Ce N-uplet est nécessaire lorsqu'une marque doit porter une information complexe. Par exemple dans un système de production, le triplet $\langle O, P, M \rangle$ peut représenter : la nature d'un Objet, sa Position dans une file d'attente et la Machine sur la quelle il doit passer.

3.4.5.2 Notion de fonction :

Une fonction est associée à chaque arc pour traduire la relation qu'il y a entre la couleur associée à la transition et choisie pour franchir cette transition et la couleur associée à la place correspondante. La **Fonction identité (id)** elle n'introduit aucun changement de couleur par exemple $[f(\langle b \rangle) = \langle b \rangle = id]$ (figure 26).

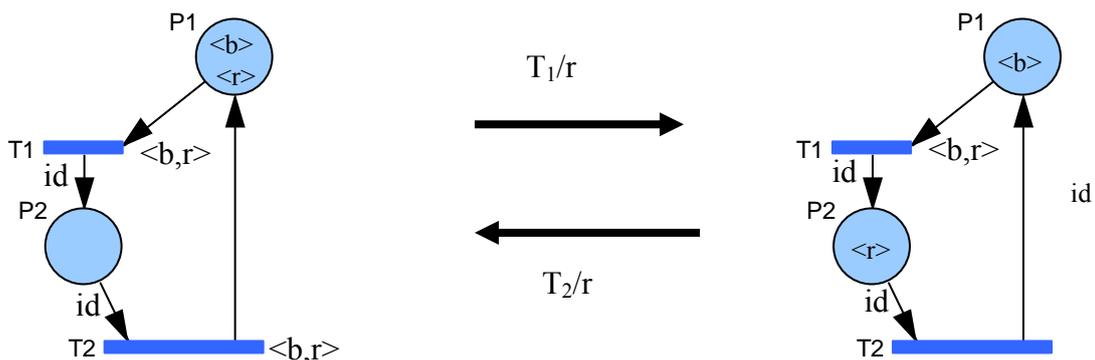


Figure.26 RdP colorée avec fonction identité

Il existe plusieurs autres fonction tel que : Décoloration : **déc**, incrémentation : **succ**, décrémentation : **Préc**,...etc.

3.4.6 Conclusion

On a vu qu'un RdP pouvait être vu sous l'un des deux aspects suivants :

- Un graphe avec deux types de noeuds et un comportement dynamique.
- Un ensemble de matrices dont le comportement dynamique est décrit par un système linéaire (équation fondamentale).

Il peut également être considéré comme un système de production de connaissance sous la forme (condition Action). D'une façon générale, les RdP sont considérés comme l'outil le mieux adapté à la modélisation de la dynamique des systèmes de production, d'une part et d'autre part à leur représentation graphique. La nature des informations à considérer et à intégrer aux modèles est diverse, les objectifs assignés à ces modèles également, d'où une prolifération de familles de RdP, chacune d'elles tentant de répondre à une vue des systèmes de production, de sa conception et de sa conduite.

CHAPITRE 4. DETERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE PAR RDP

4 DÉTERMINATION DE L'ORDRE D'USINAGE

4.1 Modèle de la gamme d'usinage

Etant donné que le réseau de Petri est un graphe d'état action – résultat, en plus réaliser une pièce mécanique on doit passer par plusieurs étapes afin de réaliser une surface ensuite une autre tout en respectant des critères techniques et technologiques qu'on nomme contraintes d'antériorité.

Le modèle est formé d'une place d'entrée qu'est une surface à usiner (P1) et d'une place de sortie qu'est une contrainte (PC). Cette contrainte sera activée après la réalisation de la première surface (P1). Entre ses deux places se trouvera une transition qui est naturellement l'opération d'usinage à appliquer pour obtenir la première surface [26].

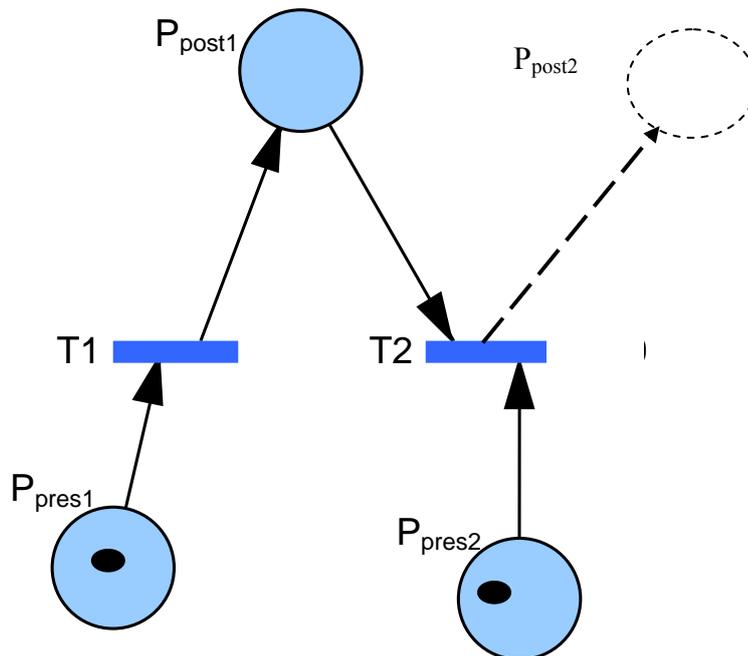


Figure.27 Modèle de réseau de Petri modélisant la gamme d'usinage

Toutes les places d'entrée sont marquées avec un seul jeton et le poids de chaque arc est égal à un. Pour chaque surface et chaque contrainte, on fait la même chose. C'est avec cette manière que le modèle est construit pour chaque nouvelle pièce.

La méthode est partagée en deux parties :

1. Partie de détermination de tous les ordres possibles d'usinage.
2. Partie de détermination de l'ordre optimal d'usinage

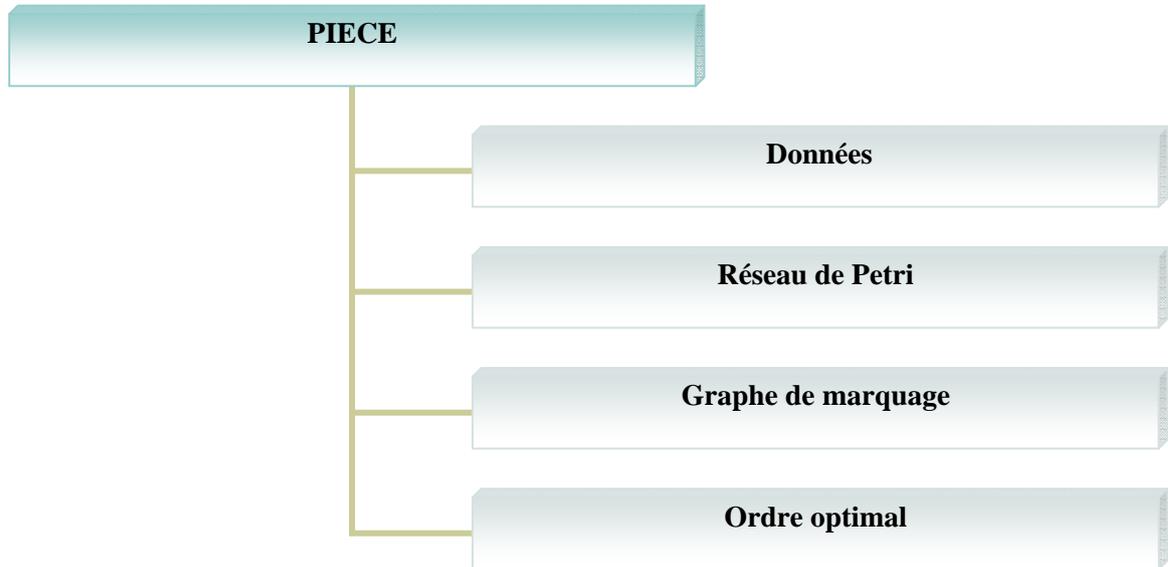


Figure.28 Méthode utilisée

4.2 Première Partie

4.2.1 Phase 1. Définition du problème

Chaque pièce est définie par un ensemble de données de différents types regroupés sur un dessin de définition. Pour faire une gamme d'usinage cela nécessite l'analyse et la compréhension de toutes les exigences du dessin de définition, leur traduction en langage technique de réalisation (moyens existants) puis la mise au point d'un ordre d'intervention des moyens retenus. L'ordonnement des interventions est imposé par un certain nombre de contraintes (contraintes d'antériorité, temps et coût) qui définissent l'ordre de réalisation des surfaces.

Le dessin de définition précise, pour chaque surface élémentaire, les dimensions et les tolérances entre surfaces. Le repérage des surfaces se fait comme suite :

- Surface Brute par SB_i avec $i (1, m)$.
- Surface à usiner par SU_j avec $j (1, n)$.

L'étude de dessin de définition nous permet de faire sortir comme informations :

- Surfaces brutes,
- Surfaces usinées,

- Etats de surfaces,
- Dimensions
- Contraintes techniques et technologiques
- Différentes tolérances
 1. Tolérances dimensionnelles
 2. Tolérances géométriques

En plus, on a besoin aussi d'une étude technologique pour déterminer les différentes machines et outils à utiliser. On utilisera comme notation :

- M_i pour les machines,
- T_i pour les outils.

Le tableau suivant regroupe toutes les données déduites du dessin de définition de la pièce à usiner.

Opération (O _i)	Groupement	Machine (M _i)	Outil (T _i)	Temps d'usinage
F1	F1	M1	T1	S1
F2	F2	M2	T2	S2
F3	F3	M3	T3	S3
F4	F4	M4	T4	S4
F5	F5	M5	T5	S5

Tableau.5 Définition des opérations

4.2.2 Phase 2. Définition des Contraintes

Après avoir fait le repérage de toutes les surfaces à partir du dessin de définition, l'étape suivante c'est l'analyse des relations dimensionnelles et géométriques entre les surfaces de la pièce, en plus d'une étude technologique des antériorités entre elles. Les résultats seront regroupés dans un tableau qui va nous faciliter le travail après.

En conclusion les principales contraintes d'antériorité sont d'ordre :

1. Les Tolérances Dimensionnelles (tolérances de forme, de position et d'orientation)

2. Les Tolérances Techniques et technologiques (reprises, traitement thermiques, non existence de bavures, utilisation rationnel des moyens, ets...)

Il faut

	F1	F2	F3	F4	F5
F1					
F2					
F3					
F4					
F5					

Pour faire

Tableau.6 Contraintes d'antériorités

4.2.3 Phase 3. Construction du réseau de PETRI

Chaque opération d'usinage sera représentée par une transition T_i ($i=1, n$) et pour chaque transition T_i elle a une place d'entrée avec un jeton. Après franchissement de la transition T_i la place correspondante PE_i perd son jeton pour garantir que la transition T_i ne peut être franchie une autre fois (opération réaliser).

Les contraintes sont représentées par des places de contraintes PC_k entre deux transitions. PC_k est une place de sortie pour la transition T_i et elle est aussi une place d'entrée par la transition T_{i+1} .

4.2.4 Phase 4. Traçage du graphe de marquage :

Parmi les méthodes utilisées pour étudier l'évolution du réseau de Petri, on trouve deux grandes familles, Graphique ou basée sur l'algèbre linéaire.

A partir du graphe de marquage, il est très simple de déterminer les ordres d'usinage possibles pour la réalisation de cette pièce et de donner tous les chemins acceptables.

Tous ces ordres sont valables et respectent les contraintes technologiques, dimensionnelles et géométriques imposées sur le cahier des charges

4.2.5 Méthode graphique

Elle est basée sur le traçage du graphe de marquage accessible. Pour cela nous proposons un organigramme pour le calcul des marquages et le traçage des arcs.

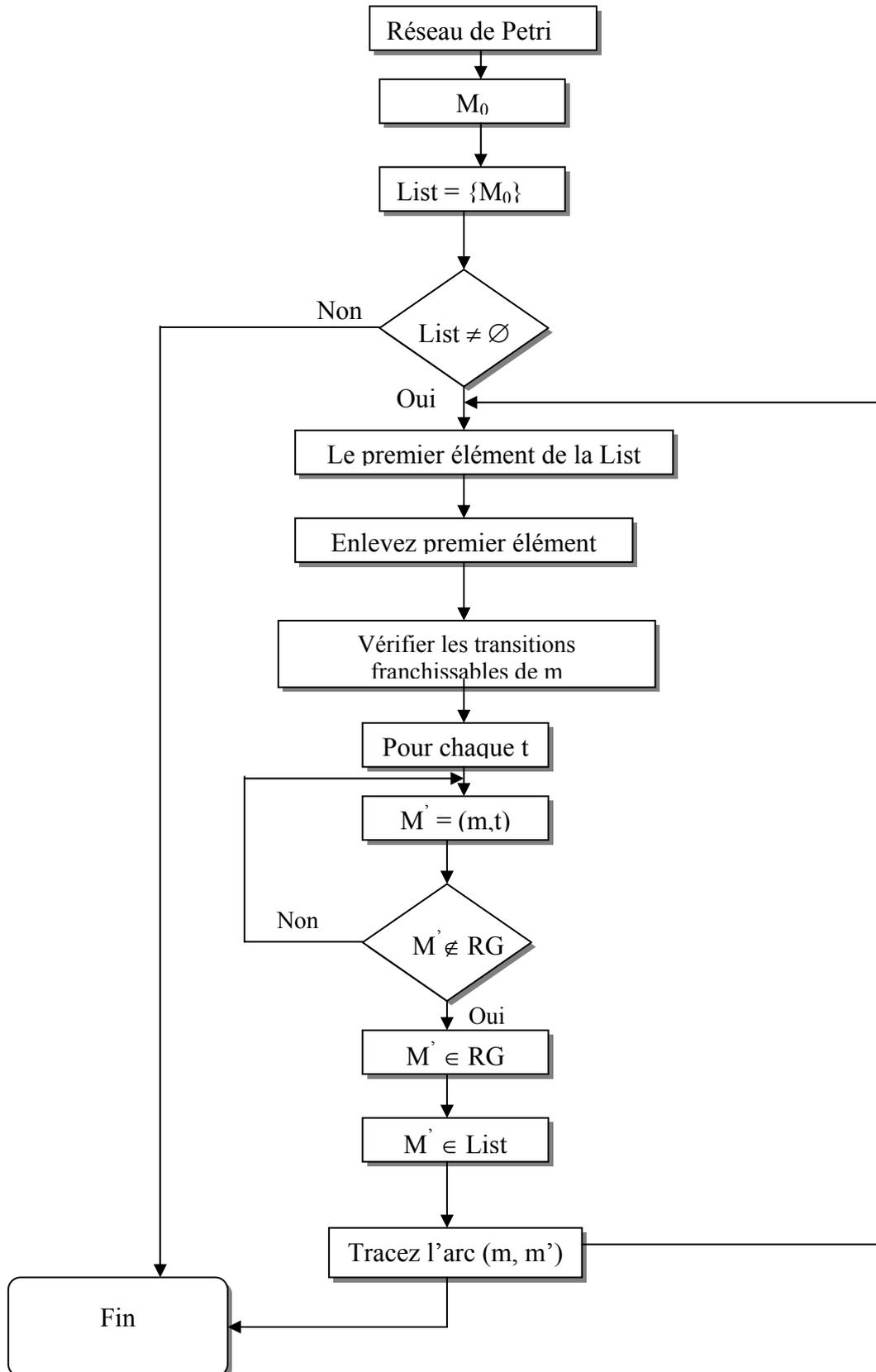


Figure.29 Organigramme de traçage du graphe du Marquage

4.2.6 Méthode analytique

La méthode analytique est basée sur l'utilisation des matrices caractérisant le réseau de Petri. Comme il est défini avant, un réseau de Petri est défini par un quadruplet :

$$R = \langle P, T, Pre, Post \rangle$$

Ou :

- P est un ensemble fini de places,
- T est un nombre fini de transitions,
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application places précédentes,
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application places suivantes.
- On utilise également la notation :

$$C = Post - Pre$$

C est en général appelée *Matrice d'incidence* du réseau de Petri.

A un réseau de Petri on peut associer un graphe qui possède deux types de nœuds : les places et les transitions. Un arc relie une place p à une transition t si et seulement si

$$Pre(p, t) \neq 0.$$

Un arc relie une transition t à une place p si et seulement si $Post(p, t) \neq 0$.

Les valeurs non nulles des matrices *Pre* et *Post* sont associées aux arcs comme étiquettes (par défaut on prend la valeur 1).

Le marquage M peut être représenté par un vecteur ayant pour dimension le nombre de places ; Pre, Post et C seront alors des matrices dont le nombre de lignes est égal au nombre de places et le nombre de colonnes est égal au nombre de transitions.

Si t est franchissable pour un marquage M, le franchissement de t donne le nouveau marquage M' tel que :

$$\forall p \in P \quad M'(p) = M(p) - Pre(p, t) + Post(p, t)$$

Remarque

Pour des besoins de programmation, la simplicité d'implantation des réseaux de Petri par la description matricielle, la méthode utilisée pour les calculs et le traçage du graphe de marquage est la méthode analytique.

4.3 Deuxième Partie

Pour trouver l'ordre optimal d'usinage d'une pièce, après avoir tracé le graphe de marquage correspondant à partir du réseau de Petri déjà construit. Le moyen le plus logique est de comparer des paramètres liés à la réalisation de la pièce.

Les paramètres technologiques qu'on peut citer sont :

- Temps total
- Coût d'usinage
- Disponibilité d'un parc des machines-outils
- Le changement possible des machines, outils et le montage d'usinage

4.3.1 Ordre optimal d'usinage

Les paramètres utilisés pour comparer les différents ordres possibles des séquences d'usinage d'une pièce, sont de nature différents.

Afin de déterminer l'ordre optimale d'usinage, deux méthodes de comparaison entre les différents ordres trouvés, basée sur l'emploi des paramètres caractérisant le processus de réalisation de chaque surface de la pièce.

La première est basée sur la recherche de la séquence optimale par l'utilisation des temps globaux.

Temps total :

Le temps total d'usinage d'une pièce, TM , est défini par :

$$TM = t_M + t_{POS} + t_{TC}$$

D'où :

t_M : est le temps d'usinage.

t_{POS} : est le temps total des mouvements d'approches d'outil ou de changement de machine.

t_{TC} : est le temps total de changement d'outils.

On peut définir l'importance relative des coûts machine, outil et dispositif de montage suivant des normes propres établies au sein des entreprises industrielles. Par exemple en ce qui concerne le complexe CPG elles sont évaluées de la manière suivante. On donne un coût à chaque opération de changement d'outils, le montage d'usinage ou bien de machine. On choisira la séquence qui aura la somme des coûts la plus petite.

- Le coût de changement d'outil est égal à 100 unités
- Le coût de changement de fixation est égal à 400 unités
- Le coût de changement de machine est égal à 600 unités

H : ordre des opérations trouvées

For ordre (j), j=1, h faire

Si Outil (i) = Outil (i-1)

P = P+100

Sinon

P=P+0

Si montage d'usinage (i) = montage d'usinage (i-1)

P = P+400

Sinon

P=P+0

Si Machine (i) = Machine (i-1)

P = P+600

Sinon

P=P+0

Trouver ordre (j) avec somme (P) minimal

Figure.30 Algorithme de détermination de l'ordre optimal

Remarques

1. Pour des raisons de simplification, on a considéré que l'usinage d'une surface se fait en une seule opération.
2. après recherche, le manque de données concernant les paramètres temps nous a poussé à utiliser la deuxième méthode seulement.

4.4 Description du programme élaboré et du support matériel

Le programme est réalisé sous C++ Builder, avec un interface graphique facilitant à son utilisateur une meilleure maîtrise de différentes parties qu'ils composent.

Cette application de compose de :

1. Partie Entrée des données
2. Partie traçage du réseau de Petri RDP
3. Partie traçage du graphe de marquage
4. Partie détermination des ordres possible d'usinage
5. Partie détermination de l'ordre optimal

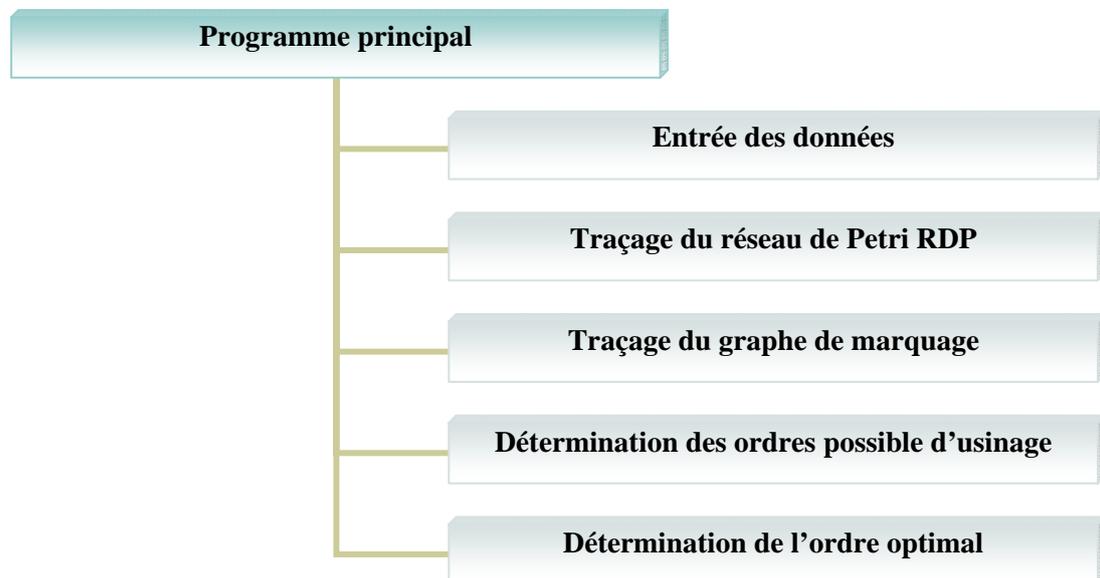


Figure.31 programme élaboré

4.5 Exemple d'application

4.5.1 Définition de la pièce :

L'exemple choisi pour la validation de notre méthode est une pièce réalisée aux ateliers du complexe Pelles et Grues CPG a constantine. C'est une BRIDE obtenue à partir d'une brute de forme prismatique, découpée par oxycoupage.

La fabrication de cette bride passe par deux postes d'usinage, un tour et un banc de perçage. Pour simplifier, on a choisi de rechercher la séquence des opérations sur une seule machine (le tour) sur lequel on réalise 9 opérations des 11 de la pièce. On supposera que tous les outils et machines et le montage d'usinage sont disponibles.

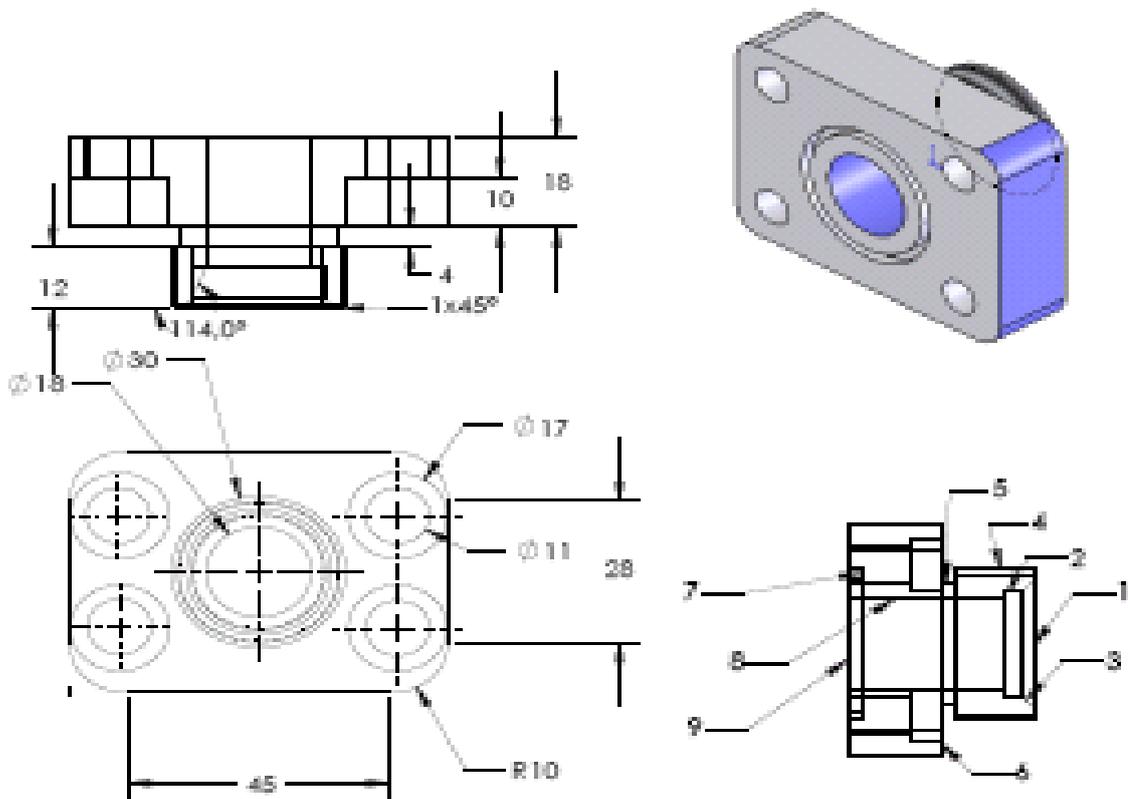


Figure.32 Dessin de définition de la pièce

4.5.2 Définition des opérations:

- Dressage surface 1,
- Réaliser un alésage surface 2,
- Réaliser un conne 3,
- Filetage 4,
- Réaliser une gorge 5,
- Chariotage 6,
- Réaliser une ruinure 7,
- Réaliser un perçage 8,
- Dressage 9.

Regroupement des opérations :

- D'après le dessin de définition, il n y a pas de surfaces qu'on peut regrouper

Donc on peut ensuite définir les opérations comme suite :

F1: surface 1
 F2: surface 2
 F3: surface 3
 F4: surface 4
 F5: surface 5
 F6 : surface 6
 F7 : surface 7
 F8 : surface 8
 F9 : surface 9

4.5.3 Les outils

Designation	Rôle
T1	Outil de dressage
T2	Outil pour alésage
T1	Outil de dressage
T3	Outil de filetage
T4	Outil pour gorge 4mm
T1	Outil de dressage
T6	Foret Ø 18
T1	Outil de dressage
T7	Outil pour gorge 5.1 mm

Tableau.7 Choix des outils

Opération	Groupement	Machine (Mi)	Outil (Ti)	Système de montage	Temps d'usinage
F1	F1	M1	T1	S1	
F2	F2	M1	T2	S1	
F3	F3	M1	T1	S1	
F4	F4	M1	T3	S1	
F5	F5	M1	T4	S1	
F6	F6	M1	T1	S1	
F7	F7	M1	T6	S1	
F8	F8	M1	T1	S2	
F9	F9	M1	T7	S2	

Tableau.8 Opérations et caractéristiques

4.5.4 Tableau d'antériorité

Pour des raisons de complexité de la détermination des contraintes Techniques et Technologiques et pour simplifier le problème, on se contente dans cette application de travailler seulement avec les tolérances dimensionnelles et géométriques entre les surfaces de la pièce a usinée. Le résultat est donné dans le tableau qui suit :

Il faut

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1									
F2	1						1		
F3		1							
F4	1				1	1			
F5	1					1			
F6	1								
F7	1								
F8	1								
F9								1	

Pour faire

Tableau.9 Contraintes d'antériorités

4.6 Construction du réseau de Petri

Le tableau d'opérations et la matrice d'antériorité nous permettent de construire le réseau de Petri correspondant à notre exemple d'application.

Les opérations d'usinage seront représentés par :

- F_i avec $i=1, 9$

Les surface à usiner seront donnés par :

- PE_j avec $j=1,9$ (chaque place est marquée par un jeton)

Les contraintes d'antériorités seront donnés par :

- PC_k avec $k=1, m$ (chaque place n'est pas marquée par un jeton)

Les Données

Entrer le nombre d'opérations:

Remplir la table d'antériorité:

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
F1	0								
F2	1	0					1		
F3		1	0						
F4	1			0	1	1			
F5	1				0	1			
F6	1					0			
F7	1						0		
F8	1							0	
F9								1	0

Figure.33 surfaces et tableau d'antériorités

Les Données

	Machines	Outils	Setup	Temps Usinage
F1	1	1	1	10
F2	1	2	1	10
F3	1	1	1	10
F4	1	3	1	10
F5	1	4	1	10
F6	1	1	1	10
F7	1	6	1	10
F8	1	1	2	10
F9	1	7	2	10

Figure.34 Caractéristiques techniques des opérations

4.6.1 Traçage du réseau de Petri

En partant du nombre de surfaces à usiner et des données techniques de chaque opération, le traçage du réseau de Petri se fait automatiquement par le programme réalisé. Ce réseau modélise la gamme d'usinage de la pièce défini par le dessin de définition.

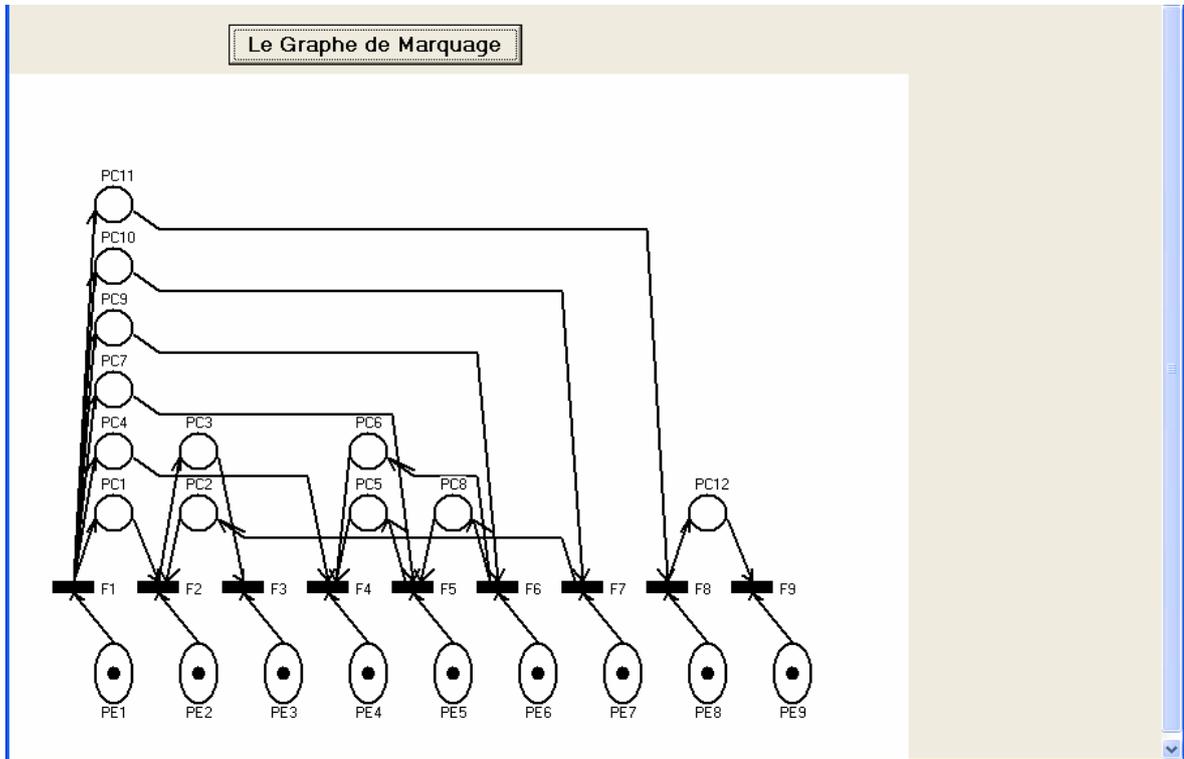


Figure.35 Réseau de Petri

4.6.2 Construction du Graphe de Marquage

A partir de la méthode analytique déjà mentionné avant on trace Le graphe de marquage pour l'exemple d'application comme suit.

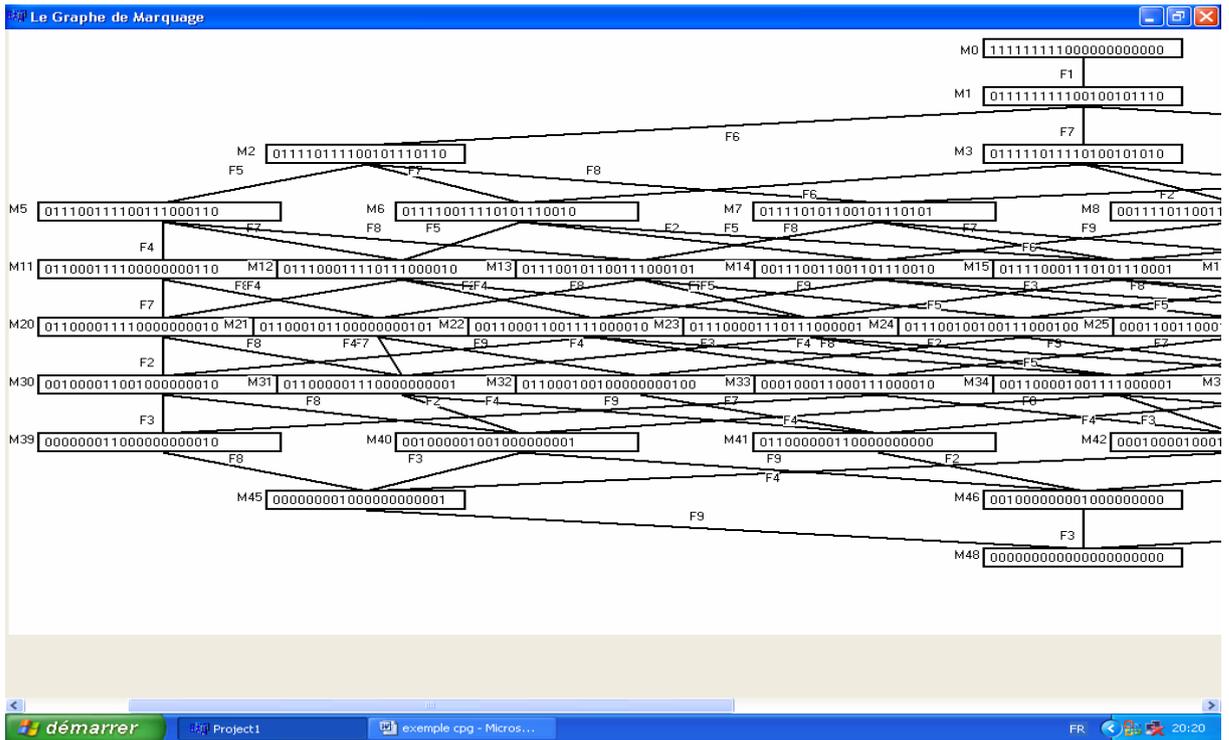


Figure.36 Graphe de marquage

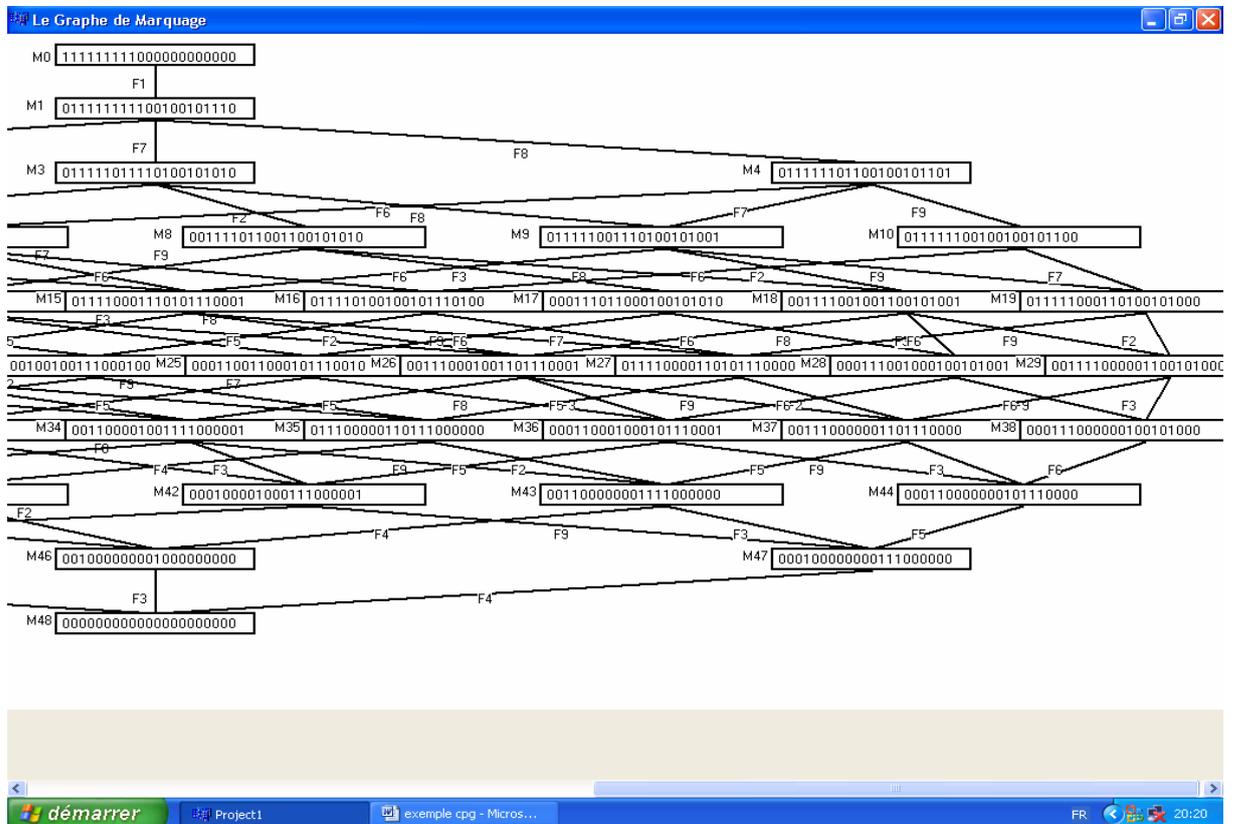


Figure.37 Graphe de marquage (suite)

Comme résultat, le programme affiche en plus du graphe de marquage, les ordres d'opérations d'usinage possibles et l'ordre optimal trouvé.

Les possibles ordres d'usinage de cette pièce: 560

L'ordre optimal est le: F1 F6 F5 F4 F7 F2 F3 F8 F9

Cet ordre correspond aux données suivantes :

F1: surface 1	M1	T1	S1
F6 : surface 6	M1	T1	S1
F5: surface 5	M1	T4	S1
F4: surface 4	M1	T3	S1
F7 : surface 7	M1	T6	S1
F2: surface 2	M1	T2	S1
F3: surface 3	M1	T1	S1
F8 : surface 8	M1	T1	S2
F9 : surface 9	M1	T7	S2

Tableau.10 Données des opérations

La comparaison de cet ordre avec celui utilisé au sein du CPG nous a permis de voir que c'est le même ordre (**Annexe. A**). Donc on peut dire que la méthode avec réseau de Petri place-transition (RDP) et le programme qu'on a élaborer sont valable et donnent de bonnes résultats en temps de calcul et en séquences logique des opérations.

	Matière RST 37-2	BRIDE	Code 930099603
Phase	Opération	Description	Instrum de control
10	Oxycoupage	Découpage de la pièce brute	
20	Tournage	1- Dressage de la face (1) 2- Chariotage diamètre 29,9mm (6) 3- Gorge de dégagement (5) 4- Filetage (4) 5- Perçage diamètre 10mm (8) 6- Alésage diamètre 23mm (2) 7- Cône angle 23° (3) 8- Tourner la pièce 9- Dressage de la face (9) 10- Rainure profondeur 2 mm (7)	

Tableau .11 Gamme d'usinage CPG

4.7 Exemples

EXEMPLE 1

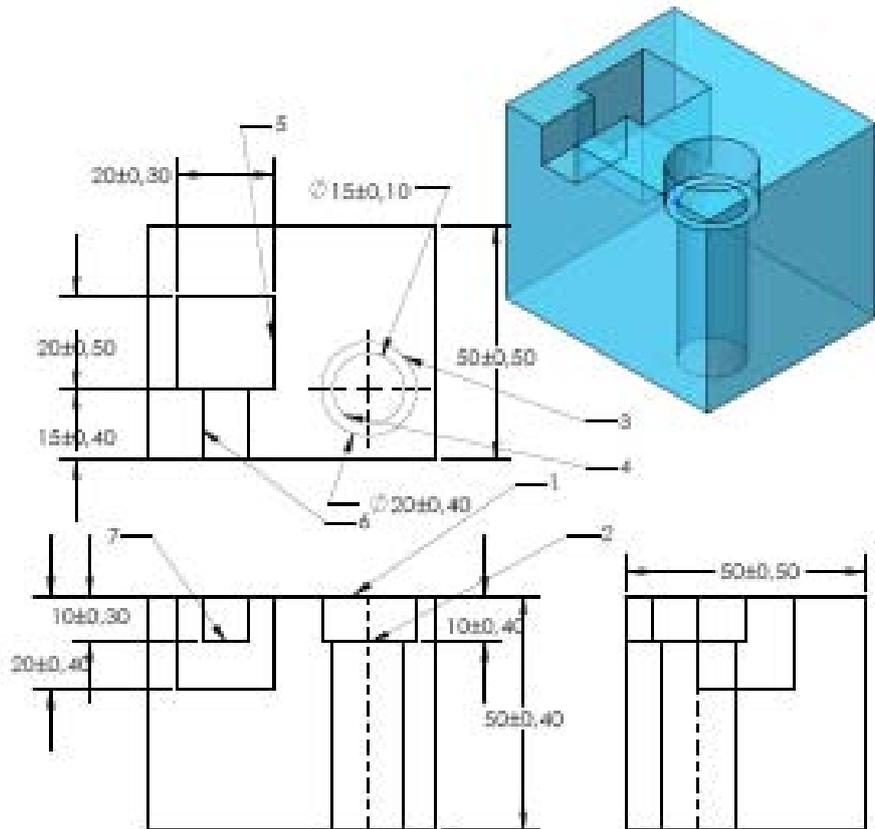


Figure.41 Pièce pour fixation

Les Données

Tracer le RDP

	Machines	Outils	Setup	Temps Usinage
F1	1	1	1	10
F2	2	2	2	2
F3	2	3	2	4
F4	1	4	1	12
F5	2	4	3	10

Figure.43 Données techniques

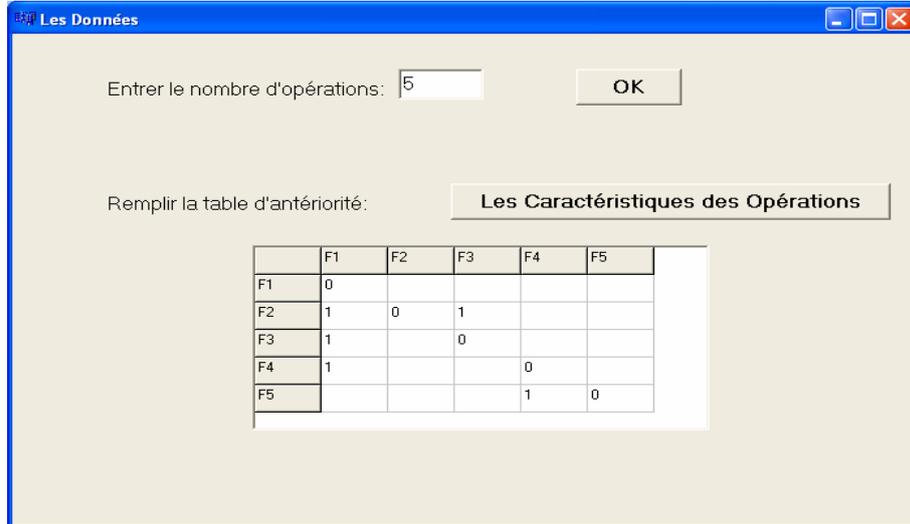


Figure.42 Tableau d'antériorités

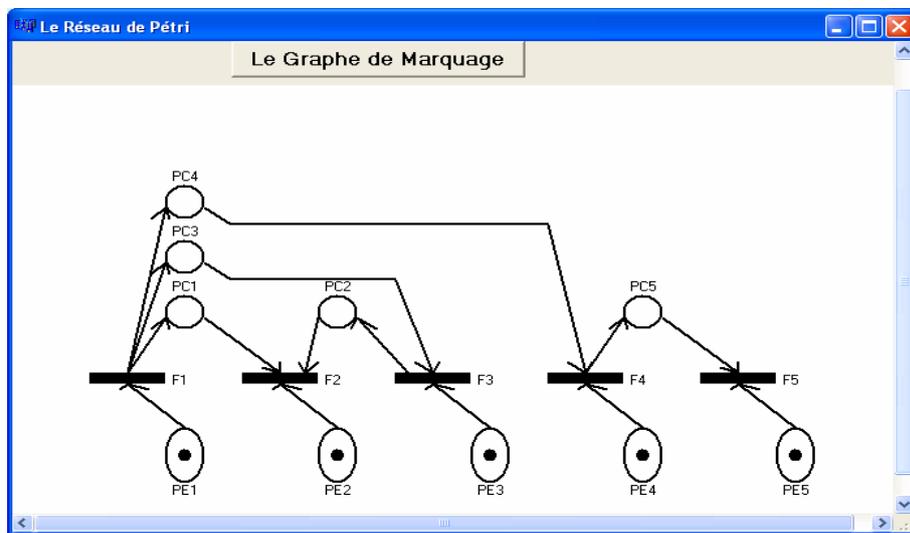


Figure.44 Réseau de Petri

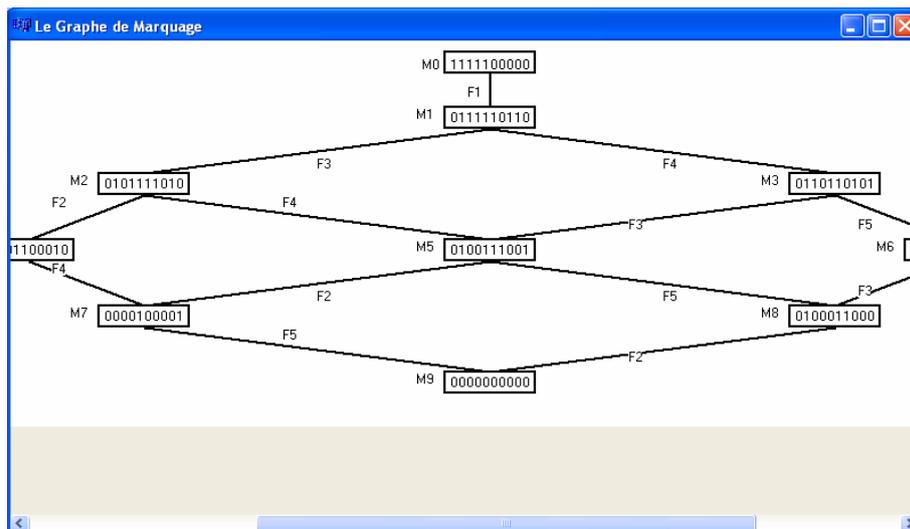


Figure.45 Graphe de marquage

Les ordres possibles sont: 6 ordre
L'ordre optimal est: F1 F4 F3 F2 F5

EXEMPLE 2

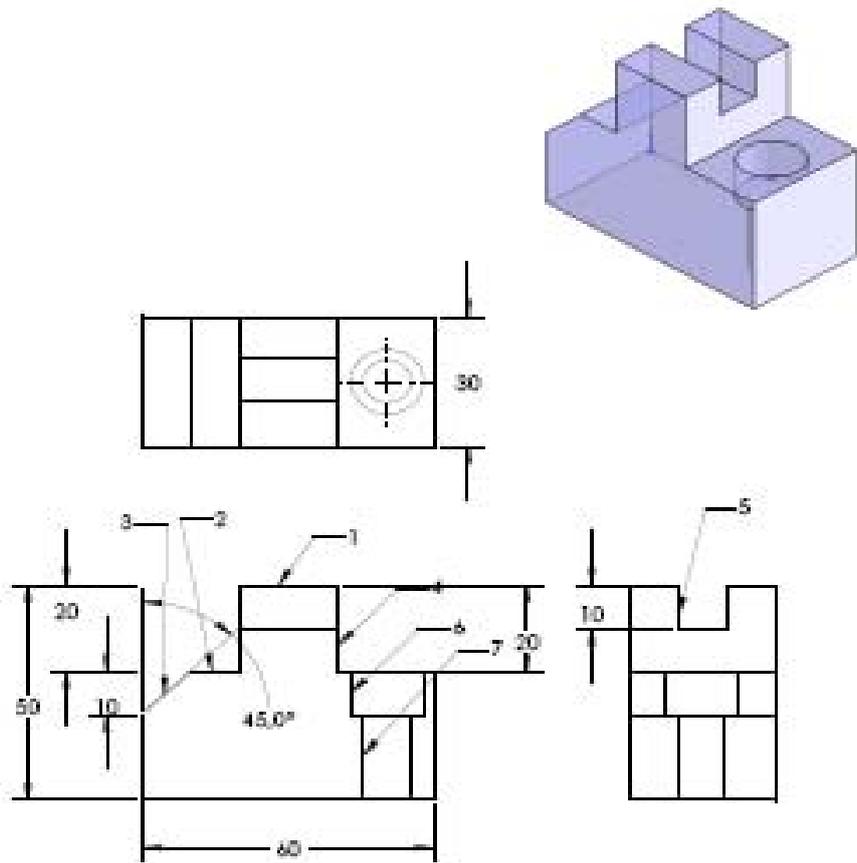


Figure.54 Dessin de définition

Les Données

Tracer le RDP

	Machines	Outils	Setup	Temps Usinage
F1	1	1	1	8
F2	1	1	1	12
F3	1	1	1	5
F4	1	1	1	14
F5	1	2	1	10
F6	1	5	1	10
F7	1	4	1	11

Figure.56 Données

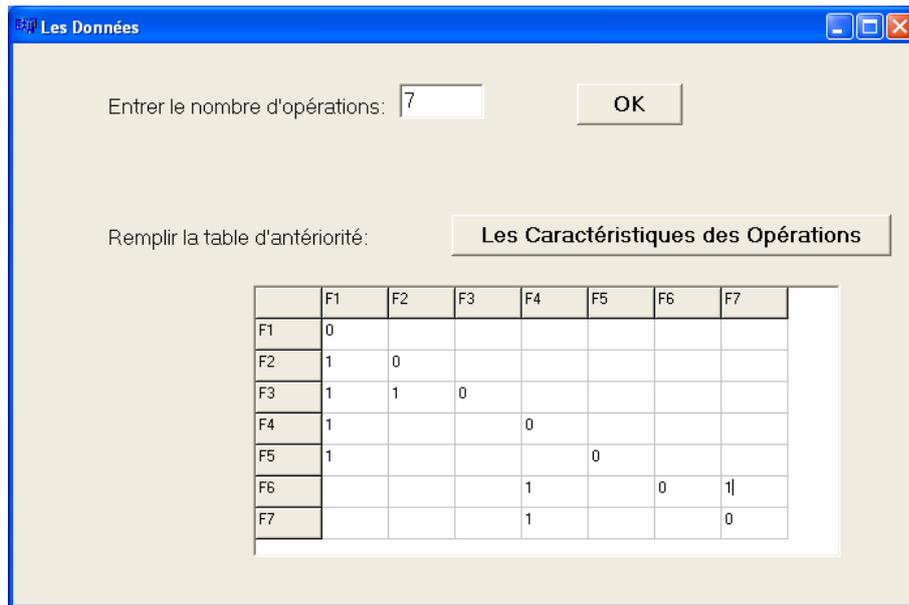


Figure.55 Table d'antériorités

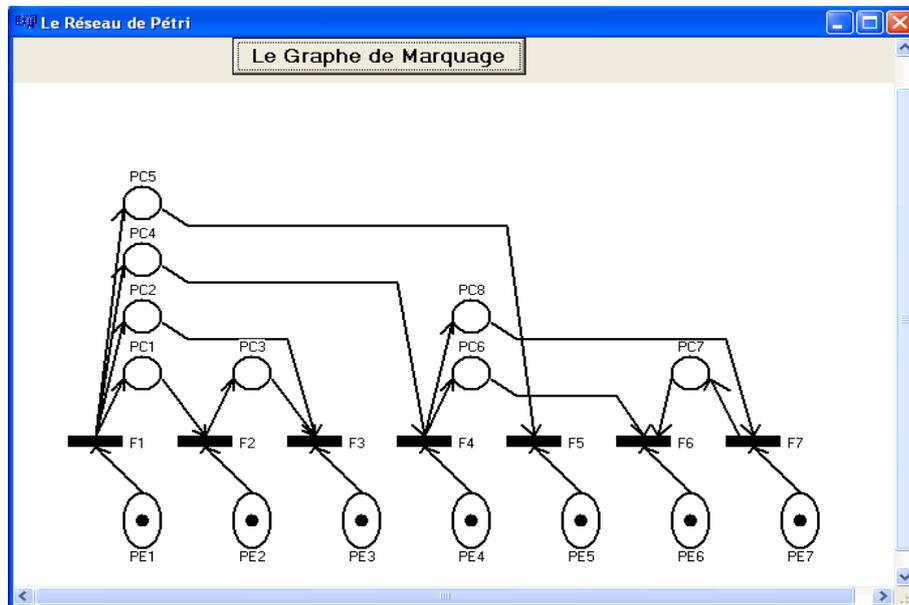


Figure.57 Réseau de Petri

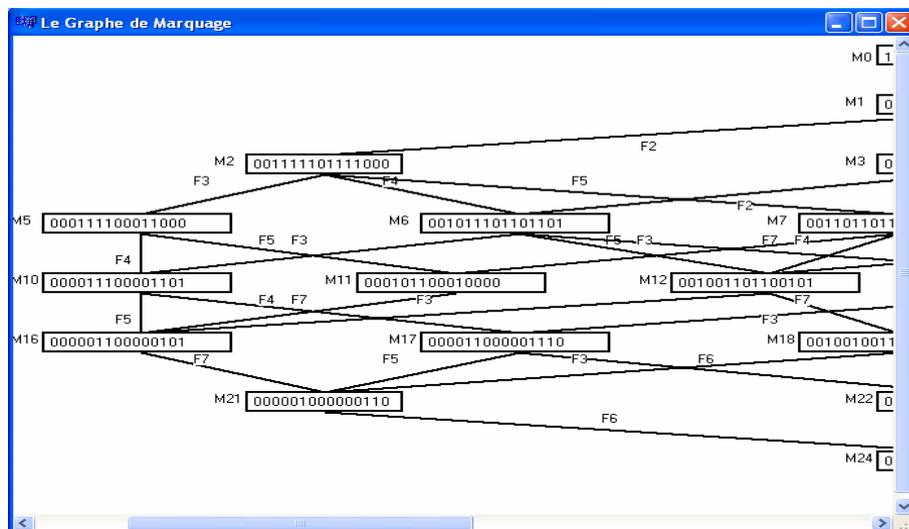


Figure.58 Graphe de marquage

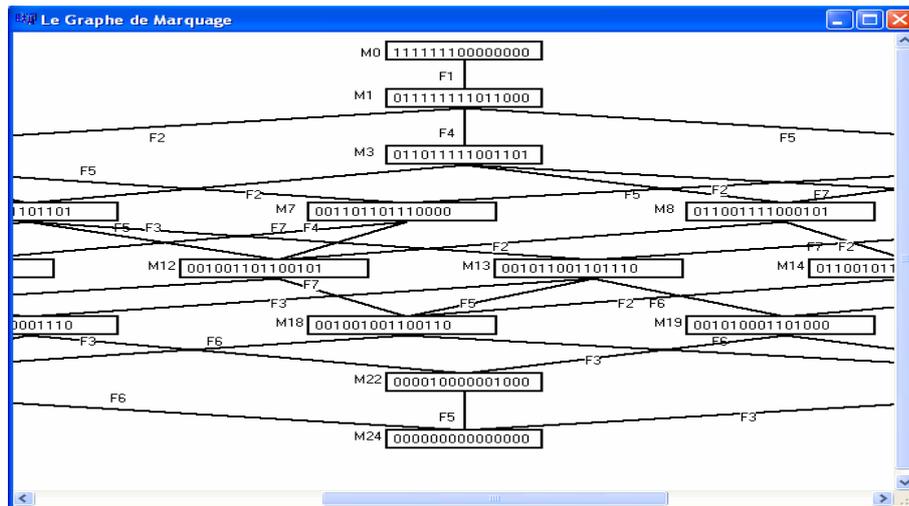


Figure.59 Graphe de marquage (suite)

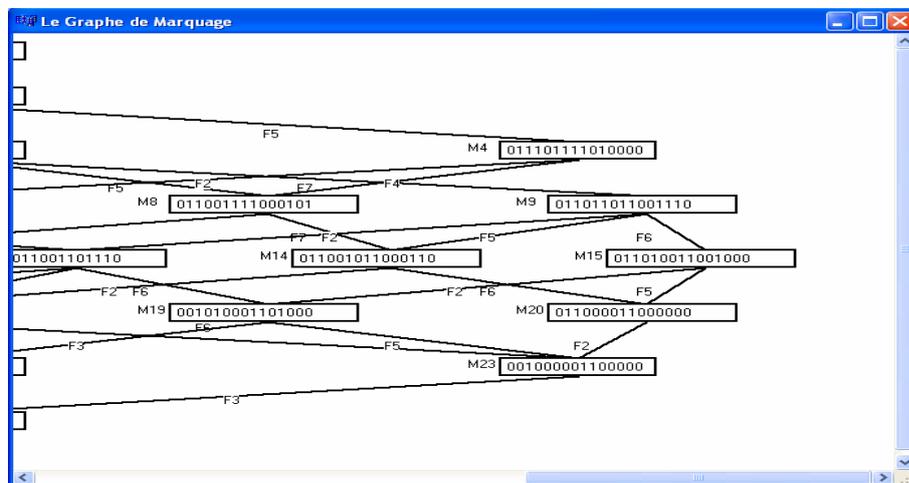


Figure.60 Graphe de marquage (suite)

Les ordres possibles sont: 60 ordre
 Le ordre possible c'est: F1 F2 F3 F4 F5 F7 F6

EXEMPLE 3. [13]

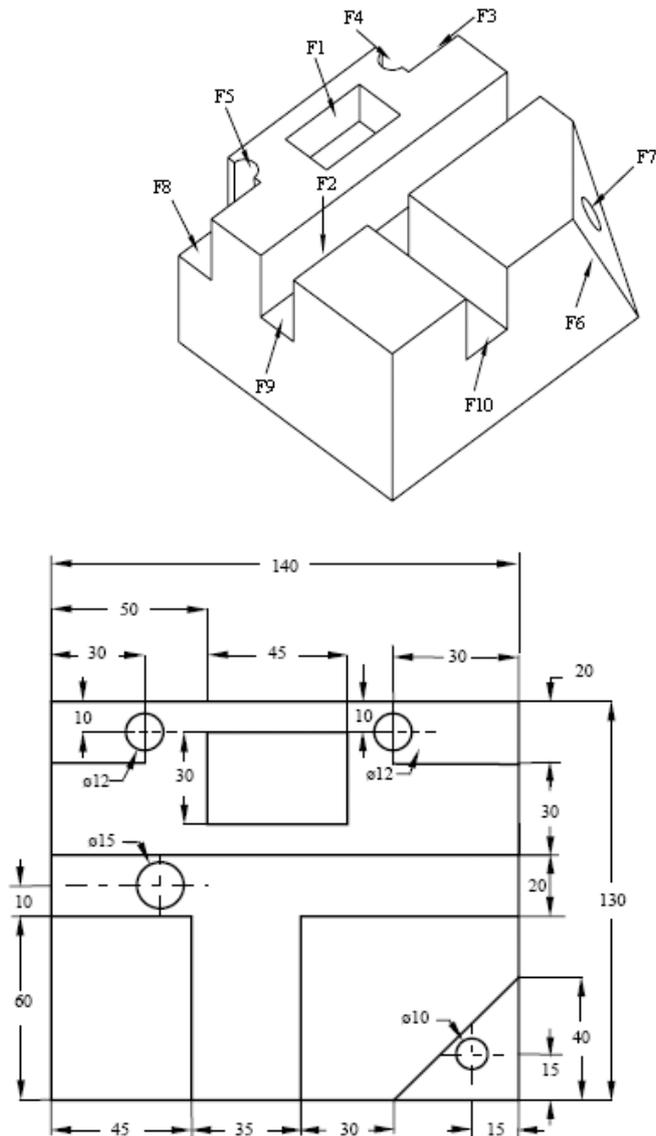


Figure.46 Dessin de définition (thèse DERELI .T)

Les Données

Tracer le RDP

	Machines	Outils	Setup	Temps Usinage
F1	1	2	1	10
F2	1	5	1	12
F3	1	2	1	5
F4	1	1	1	14
F5	1	1	1	12
F6	1	4	1	10
F7	1	3	1	10
F8	1	2	1	10
F9	1	2	1	9
F10	1	2	1	8

Figure.48 Données techniques

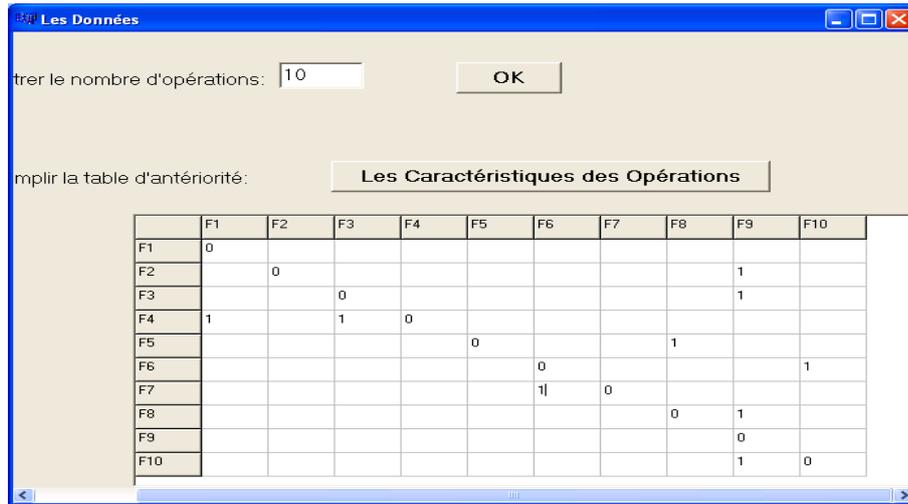


Figure .49 Tableau d'antériorités

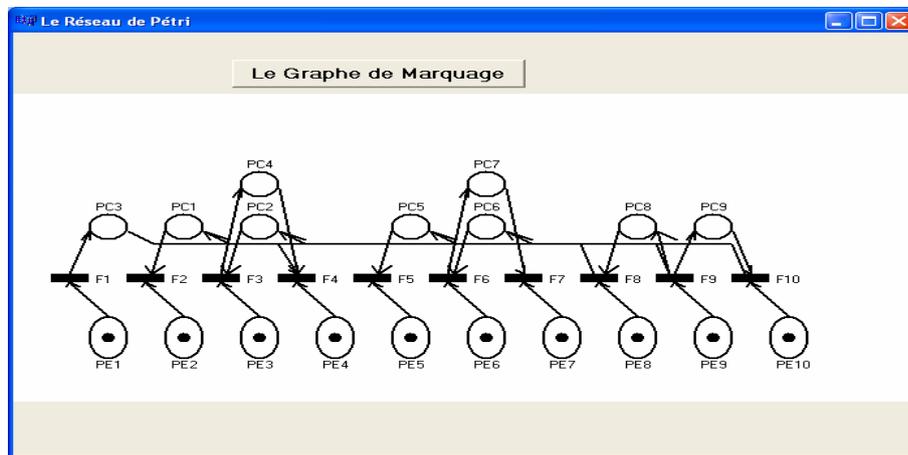


Figure.49 Réseau de Petri

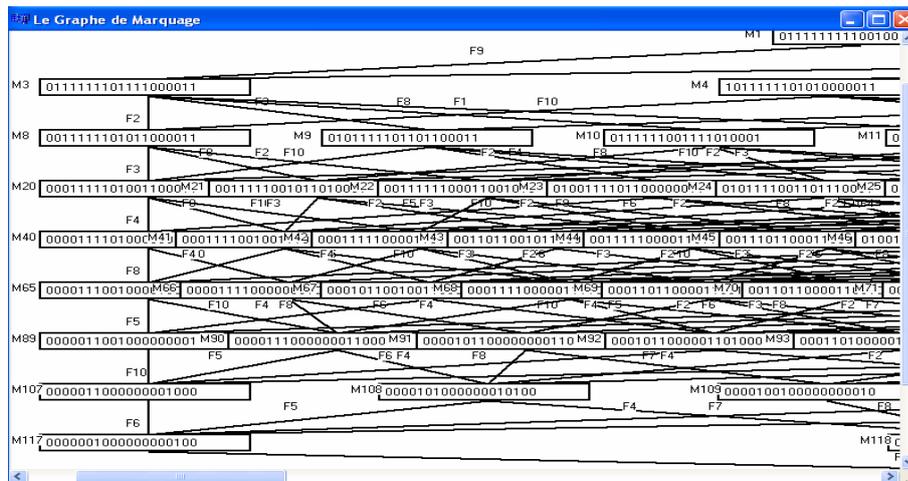


Figure.50 Graphe de marquage

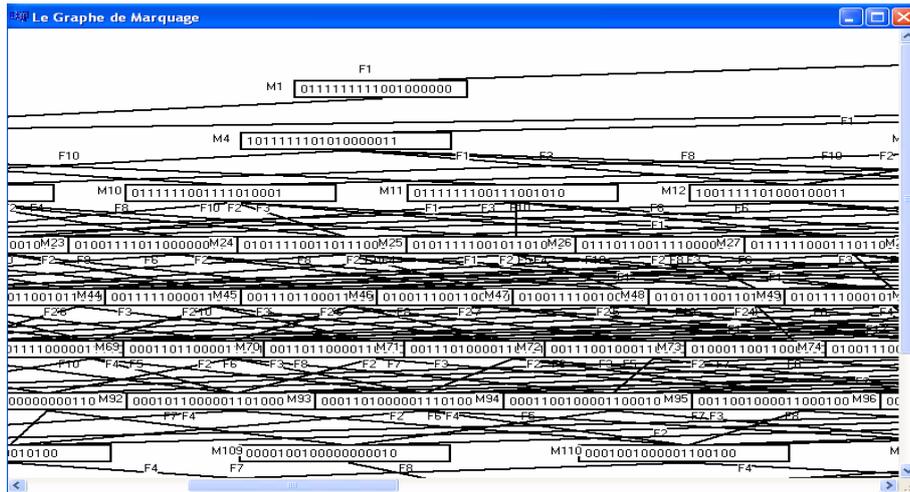


Figure.51 Graphe de marquage (suite)

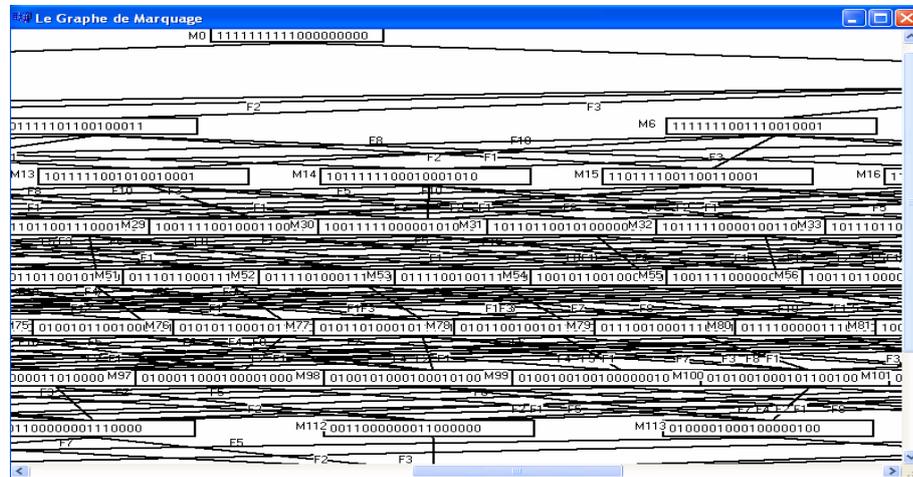


Figure.51 Graphe de marquage (suite)

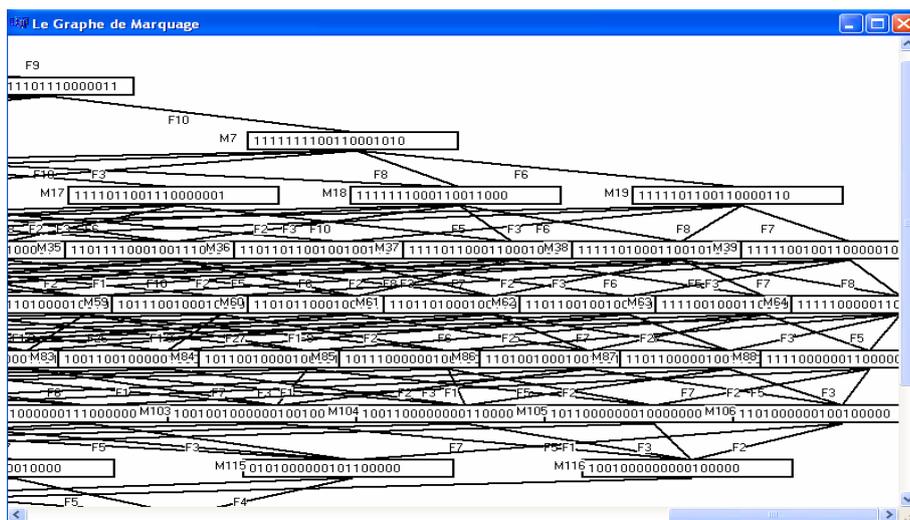


Figure.53 Graphe de marquage (suite)

Les ordres possibles : 11760

L'ordre optimal: F9 F3 F8 F10 F1 F2 F4 F5 F6 F7

L'ordre optimal obtenu par la méthode des algorithmes génétiques GA est;

[1-10-7-4-2-9-8-6-3-5] ou [1-6-3-5-9-8-10-7-4-2]

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté un outil de génération de l'ordre optimal des opérations d'usinage d'une pièce mécanique **BRIDE** fabriqué au **CPG** (complexe pelles et grues de Constantine). L'ordre résultant est le même proposé par la gamme d'usinage du **CPG**. Ce qui valide notre programme et les choix qu'on a faits au niveau des contraintes et les données techniques.

Le programme est élaboré sous C++ Builder, il permet de tracer le réseau de Petri correspondant aux contraintes liées à la pièce, de tracer le graphe de marquage et de faire des calculs pour déterminer l'ordre optimal des opérations.

Les temps de traitement des données et de traçage varient en fonction du nombre de surfaces à usiner et des contraintes d'antériorités. Avec un ordinateur Pentium(R) 4 CPU 2.80GHZ, 248 Mo de RAM), Pour des nombres de surfaces inférieurs à 9 surfaces le temps de traitement est inférieur à 2 minutes tandis que pour un nombre supérieur à 9 on peut aller jusqu'à 10 minutes.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La détermination de l'ordre d'usinage d'un composant d'un système mécanique permet de définir avec précision le coût et de jouer sur des paramètres comme le temps de réalisation pour la réduction des coûts. L'*objectif* de notre travail est de générer ces séquences qui seront à la base de la détermination de l'ordre optimal d'usinage d'une pièce mécanique.

L'outil mathématique utilisé pour formaliser et représenter ces ordres d'usinage est les réseaux de Petri. Après un bref rappel théorique sur les réseaux de Petri, un modèle est proposé sur cette base mathématique afin de déterminer une suite logique de l'ordre des opérations d'usinage d'une pièce mécanique.

L'algorithme de recherche de l'ordre optimal développé sert à déterminer en fonction des critères choisis (temps d'usinage, poids, ...) la suite logique des opérations d'usinage sur des critères technique et technologique bien déterminer sur une base de connaissances des experts en élaboration de processus de fabrication (usinage).

Les *résultats* obtenus par notre application sur des exemples industrielle est académiques confirment la thèse que l'ordre obtenu d'usinage est optimal. Le modèle présenté est compact et peut être adapté à la détermination des séquences d'usinage possibles d'une pièce mécanique. Concernant le nombre (N) de surfaces à usiner, nous nous sommes limité a un nombre inférieur à 100 pour la simplification du modèle et réduire le temps de calcul.

En ce qui concerne les *améliorations*, nous pouvons étendre l'approche dans le but de rajouter des paramètres tel que lui donné plus d'autonomie dan les choix des différentes paramètres (outils, set-up et machines) lorsque on est dans le cas de plusieurs alternatives, ajouter dans ce programme une partie qui fait la reconnaissance des surfaces (entité) a partir d'un modèle CAO du produit et une automatisation de la détermination des antériorités entres les surfaces a usinées. L'utilisation d'un algorithme de recherche de plus court chemin par parcourir le graphe de marquage, en plus de ce déjà étudiées afin de proposer un modèle plus général, le plus compact possible, concernant la génération de la séquence d'usinage de différents composants d'un mécanisme.

Ce travail m'a permis de montrer l'intérêt des réseaux de Petri et les systèmes CAPP, ces outils qui ne cessent de faciliter le travail des concepteurs et les différents agents de métiers tel que l'usinage et les gammistes. En plus de l'importance des connaissances propres à chaque métier et leurs rôles dans le développement des systèmes intelligents.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **M. Tollenaere** «Conception de produits mécaniques », Hermès, Paris, 1998.
- [2] **H. Ramy** « Entités d'usinage pour la C.F.A.O. : Identification et spécifications des faces réglées quasi-développables pour l'usinage en flanc ». DEA Université Henri Poincaré, Nancy I, 2001.
- [3] **Cahier Métier** « Usinage au 1er Cycle », INSA Lyon, 2007
- [4] **H. Paris** « Contribution a la conception automatique des gammes d'usinage : le problème du posage et du bridage des pièces », rapport préparé au laboratoire 3S, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, 2003
- [5] **Bourdet** «Engineering Technical Conferences» September 14-17, 1997, Sacramento, California
- [6] **D. Brissaud** « Système de conception automatique de gamme d'usinage pour les industries Manufacturières » Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, Grenoble, 1992
- [7] **M.H. Opitz** « La production par familles de pièces : application d'une classification et résultats de rationalisation », Mécanique Electricité, N°215, 1967.
- [8] **A. Benammar** « Automatisation de l'ordonnancement des opérations d'ébauche en gamme d'usinage » laboratoire de recherché technologique en fabrication mécanique, Oran Algérie 2001.
- [9] **G. Draghici** «integrated approach in computer aided process planning » university of timisoara Romania.
- [10] **E. Benoit** « Gestion du cycle de vie du produit et dynamique des connaissances industrielle en conception intégré », HDR 2005- Université de technologie de Troyes
- [11] **E. Alexei et al** « Toward hybrid variant/generative process planning » Proceedings of DETC'97: 1997 ASME Design
- [12] **Groupe GAMA** « La gamme automatique en usinage » Hermès, 1990
- [13] **D. Türkay** «Development of a process planning system for prismatic parts »a PhD. thesis, June 1998
- [14] **M. Kayacan et al** «OPPS-ROT: An Optimised Process Planning System for Rotational Parts», Computers in Industry, Vol.32, pp. 181-195, 1996.
- [15] **H. Eskicioğlu et al** «An Interactive Process Planning System for Prismatic Parts (ICAPP) », International Journal of Machine Tools and Design Research, Vol. 21, No. 3/4, pp. 193-206, 1981.

- [16] **S. Joshi** «Expert Process Planning System with Solid Model Interface», International Journal of Production Research, Vol. 26, No. 5, pp. 863-885, 1988.
- [17] **A. Kusiak** «Process Planning: A Knowledge-Based and Optimization Perspective», IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 3, pp. 257-266, 1991.
- [18] **M. Gülesin et al** «Operation Sequencing in an Expert Process Planning and Fixturing System», Proceedings of the ICES.93: The International Conference on Engineering Software, pp.45-50.
- [19] **M.E. Ssemakula** «Optimal Process Sequencing in CAPP Systems», Proceedings of the Autofact.1988 Conference, Vol. 22, pp. 15-27.
- [20] **M. Rho** «An Integrated Cutting Tool Selection and Operation Sequencing Method», Annals of the CIRP, Vol.41, No.1, pp.517-520 1992.
- [21] **L.C. Vosniakos et al** «Knowledge-Based Selection and Sequencing of Hole-Making Operations for Prismatic Parts», International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag Ltd., Vol. 8, pp. 9-16, 1993.
- [22] **H.N. Kamhavi** «Feature Sequencing in the Rapid Design System using a Genetic Algorithm», Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 7, pp. 55-56, 1996.
- [23] **A. Benbouaziz et al** « Utilisation des méthodes PERT & RDP pour l'ordonnancement de la production mécanique cas Pratique CPG » Mémoire d'ingénieur, Génie industriel. Université de Batna, Algérie, 2007.
- [24] **R. Fritas** «Modélisation et analyse par réseaux de Petri d'un système de production gère en kanban application a l'entreprise BAG » thèse de magistère université de Batna, 2005
- [25] **Y. Coueque et al** « Algorithmes génétiques pour résoudre le problème du commis voyageur ». 2005
- [26] **S. Lin et al** «An Effective Heuristic Algorithm for the Travelling Salesman Problem », Operations Research, pp. 498-516, 1973.
- [27] **W.L. Price et al** «Optimisation par colonie de fourmis pour un problème d'ordonnancement industriel avec temps de réglage dépendants de la séquence ». 3^{em} conférence francophone de modélisation et simulation “conception analyse et gestion des systèmes industrielles” MOSIM'01 Troyes France
- [28] **F. Benbouzid et al** «Résolution du problème de l'ordonnancement conjoint production/maintenance par colonies de fourmis » 6^{em} conférence francophone de modélisation et simulation “modélisation, optimisation et simulation des systèmes: défis et opportunités ” MOSIM'06 rabat Maroc.

- [29] **T. Dereli** «Determining Optimal Sequence of Machining Operations Using Conflicting Processing Criteria and A Genetic Algorithm », Proceedings of the 13th ISPE/IEE, 1997
- [30] **T. Dereli** «Selection Of Alternative Cutting Tools For Part Features Of Prismatic Components And Their Effects On Operation Sequence », Proceedings of the 5th International Conference: Factory 2000, UK, pp. 170-177.
- [31] **J. P. Norback et al** «Geometric Approaches to Solving the Travelling Salesman Problem », Management Science, pp. 1208-1223, 1977.
- [32] **E. MUKASA et al** «CAD/CAPP integration using IGES » Mechanical engineering department and system Research Centre, university of Maryland college Park, MD, 20742.USA
- [33] **E. MUKASA et al** «The prospects of process planning sequence optimization in CAPP systems»Department of Mechanical Engineering. University of Maryland. College Park, MD 20742. U.S.A (1988)
- [34] **T.N. Wong** «Development of a knowledge-based , Automated process planning system » industrial engineering 1992-1993, university of Hong Kong
- [35] **M. Diaz** «Les Réseaux de Petri – Modèles fondamentaux », Hermès Science Publications : Paris. International Conference on CAD/CAM, ROBOTICS & Factories of the Future, Vol. 1, pp. 319-326, Colombia 2001.
- [36] **J.I. Peterson** « Petri Nets theory and modeling of systems. Prentice Hall. Englewood. 1981.
- [37] **C. Michel et al** «Commandes à réseau de Petri – mise en oeuvre et application » - S 7 573 - technique de l'ingénieur
- [38] **C. Michel et al** «Commandes à réseau de Petri – Modélisation » - S 7 572 – technique de l'ingénieur
- [39] **ROBERT. V** «Les réseaux de Petri LAAS » – CNRS Toulouse septembre 2000.
- [40] **C. Ramchandani** «Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri Nets». Combridge, MA. MIT. Project MAC. Feb 1974.
- [41] **J. Sifakis** « Le contrôle des systèmes asynchrones: concepts, propriétés, analyse statique ». Thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble (France, 1979).
- [42] **G. Florin et al** « Les réseaux de Petri stochastiques ». Vol 4 n°1-1990.
- [43] **M. Mars** « Réseaux de Petri et algèbre (max, +) : deux approche pour l'étude des systèmes à événements discrets ». APII, vol. 28 n°4. 1989.

- [44] **R. David et al** « Du Grafset aux Réseaux de Petri ». Hermès, Paris 1989.
- [45] **R. David et al** « Du Grafset aux Réseaux de Petri ». Hermès, Paris, France 1992.
- [46] **J. le bail et al** « Hybrid Petri Nets ». Proceeding of the European control conference, Grenoble (France, Juillet 1991).
- [47] **Robert Valette** «Cours Réseaux de Petri » (Internet)

ANNEXE A

```

PRO7  PRO721  PIECE: 930099683 IX 00 IM A GA LB DATE 07/03/07 HEURE 13.22
CREAT 6. 1. 7 GA SAMODIF 27. 2. 7 GA LBI.MOD. A DOCU. CDF 175LIEUST 6024
TAP 12 DESIGNATION BRIDE 240 7700 00 083 000

SEL S.O G E SE CDF P.TR C T.E TE/PCE L T TEXTE ABR. E M DM CAT S QF QLL Q.M. I
-01- 010 9 3 228 7120 0 030 3,00 0 C OXYCOUPER. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-02- 010 9 4 01 AVEC 06BRULEURS 0
-03- 010 9 5 50 0930099683 SCHE.COUPÉ 0
-04- 020 9 3 227 7711 0 020 1,80 0 C EBAVURER. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-05- 020 9 4 01 LES BAVURES D'OXYCOUPAGE 0
-06- 030 9 3 323 1230 0 120 8,00 0 G TOURNER 1 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-07- 030 9 4 01 DRES.FACE,TOURNER DIAM.FILETAGE29,90 0
-08- 030 9 4 02 AVEC GORGE DEG.,FILETER M30X2,PERCER 0
-09- 030 9 4 03 DIAM.18,ALES.DIAM.23 ET CONE 24DEG. 0
-10- 030 9 5 50 *060062283 LIST.D'OUT 0
-11- 030 9 5 51 0062141380 MORS SPEC. A
-12- 030 9 5 52 0064011883 BAND PROGR 0
-13- 040 9 3 323 1230 0 120 6,50 0 G TOURNER 2 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-14- 040 9 4 01 DRES FACE ACOTE FINIE 34,SAIGNER 0
1-14(SELECTION), NN (ENR.SUITE), SS PAGES, FF (NOMEN.), ** (NOUV.IDENT)
e

PRO7  PRO721  PIECE: 930099683 IX 00 IM A GA LB DATE 07/03/07 HEURE 13.24
CREAT 6. 1. 7 GA SAMODIF 27. 2. 7 GA LBI.MOD. A DOCU. CDF 175LIEUST 6024
TAP 12 DESIGNATION BRIDE 240 7700 00 083 000

SEL S.O G E SE CDF P.TR C T.E TE/PCE L T TEXTE ABR. E M DM CAT S QF QLL Q.M. I
-15- 040 9 4 02 GORGE EPAIS.2,55 PROF.2,CAS.ANGLES 0
-16- 040 9 5 50 *060062383 LIST.D'OUT 0
-17- 040 9 5 51 0062141380 MORS SPEC. A
-18- 040 9 5 52 0064011983 BAND.PROGR 0
-19- 050 9 3 325 0110 0 010 4,40 0 G EBAVURER. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-20- 050 9 4 01 DES DEUX COTES CONTOURS EXT.DE TOUR. 0
-21- 060 9 3 325 2220 0 035 18,00 0 G PERCER. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-22- 060 9 4 01 4XDIAM.11,LAM.4XDIAM.17 PROF.10EB. 0
-23- 060 9 5 50 *060062483 LIST.D'OUT 0
-24- 060 9 5 51 *062079683 PLQ.D.PERC 0
-25- 070 9 3 326 9410 0 005 0,20 0 G NETTOYER. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-26- 070 9 4 01 LAVER ET SOUFLER A L'AIR COMPRIME 0
-27- 080 9 3 531 0000 0 000 0 0 I CONTR.FIN. 0 0 00 000 0 00 000 0000 0
-28- 080 9 5 50 0065043883 GAMM.CONT. 0
15-28(SELECTION), NN (ENR.SUITE), SS PAGES, FF (NOMEN.), ** (NOUV.IDENT)
e

```

Figure.40 Gamme d'usinage CPG

ملخص:

ايجاد الترتيب المثالي و المنطقي لانجاز قطعة ميكانيكية يعتمد على وسائل و معارف عديدة، من بينها خبرة المختص في اعداد ترتيب و طريقة التشغيل و نظام عمله. الهدف من استعمال هنا النظام تخفيض زمن التحليل الى جانب خفض التكلفة. نقدم دراسة و تحليلا عميقا لمراحل تشغيل قطعة ميكانيكية لكي نعرف العناصر الأساسية في نظام استنتاج ترتيب العمليات. نعرض طريقة اوطوماتيكية للحصول على الترتيب المثالي لتصنيع القطع الميكانيكية باستعمال شبكة بيتري كما نعرض ايضا برنامجا للاعلام الالي قمنا بأعداده مع بعض الامثلة عن التطبيقات الصناعية.

الكلمات المفتاحية: شبكة بيتري، طريقة اوطوماتيكية، الترتيب المنطقي، ترتيب العمليات

RÉSUMÉ. *L'optimisation de la gamme d'usinage en fabrication mécanique consiste à déterminer la suite ordonnée des opérations à exécuter sur les différentes machines en tenant compte de plusieurs paramètres. L'étude présentée est consacrée à la définition et à la réalisation d'un prototype de système d'optimisation de l'ordonnancement des opérations d'usinage par enlèvement de matière.*

On a présenté une analyse du processus d'élaboration d'un produit industriel afin de déterminer les exigences d'un système de génération de gammes d'usinage. On a décrit ensuite une méthode automatique de détermination de l'ordre d'usinage que nous avons formulé. On a présenté également le programme mis au point, ainsi que quelques résultats de traitement pour des exemples industriels.

MOTS-CLÉS : *automatisation / CAPP/ gamme d'usinage automatique / technologie de groupe / réseau de Petri.*

ABSTRACT. *The optimization of the process planning in mechanical manufacture consists in determining the operation sequences to execute on the different machines, taking into account many element. This work is consists on the definition and realization one prototype of a process planning optimization system in the realization of pieces by abduction of matter. We have first analyzed the elaboration process of an industrial product in order to determine the functionalities and the requirements of a generation system for the planning process. We have also described a currently used manual method of planning process that we have formulated. We have also given a software and an application of the carried-out program.*

KEY-WORDS: *automation / planning process / constraints / CAP / group technology/Petri net.*