**Introduction Générale**

Avec la mondialisation et la globalisation des échanges marchands, l’unité de production doit  
aujourd’hui faire face à plusieurs contraintes, comme les délais, la qualité et la complexification des produits, etc. Ces différentes contraintes rendent les systèmes de productions très complexes. Face a ces contraintes, les études d’évaluation des performances des systèmes de production est devenue obligatoire pour les industriels et ceci pour des raisons aussi bien de coût que de productivité. Ces études doivent être réalisées dès la phase de conception. Aussi, l'évaluation des performances est une étape clé dans n'importe quelle étude de conception. En se basant sur les résultats de l'évaluation des performances, il est possible de prendre des décisions et de réaliser des compromis pour l'optimisation du système de production global (**BENFARHI A**)

L’influence de cette métamorphose dans l’industrie se traduit par la nécessité d’avoir des systèmes capables de s’adapter aux changements de production. Ces systèmes doivent se révéler flexibles et robustes afin de répondre aux exigences en diversité, productivité et notamment en assurant la qualité exigée. Les coûts d’exploitation doivent aussi être optimisés tout en diminuant les risques des défaillances.

Maintenant que l'offre est supérieure à la demande dans plusieurs secteurs de production, les entreprises doivent être capables de s'adapter le plus rapidement possible aux changements de la production afin de satisfaire les exigences des consommateurs. L'évolution des technologies, comme l'informatique ou la robotique, a permis la naissance de nouveaux types de systèmes de production qui répondent bien à ces exigences : les systèmes flexibles de production (SFP). L'objectif principal de ces derniers est de concilier à la fois efficacité et flexibilité qui sont généralement considérées comme des critères contradictoires.

Le cycle de développement d'un atelier flexible est un processus extrêmement complexe constitué d'un ensemble d'étapes parmi lesquelles on trouve la spécification des produits à fabriquer, la conception et la mise en marche du système. Le principal problème, lorsque l'on se place dans le contexte des systèmes de production, est d'être capable de proposer une méthodologie complète de spécification, de modélisation, d'analyse et de contrôle de ces systèmes. L'utilisation d'une telle méthodologie permet de réduire, voire éviter, les coûts supplémentaires induits par la remise en cause ou la correction de la conception lors de la phase de mise en œuvre.

Aussi pour réaliser une étude d’évaluation des performances, Il est nécessaire de posséder une  
représentation du système à étudier, c'est-à-dire un modèle. L’extraction des paramètres de  
performances se fait alors soit par simulation, soit par analyse. Dans notre travail, nous ne nous intéressons qu’aux méthodes analytiques, qui sont des outils d’évaluation des performances permettant une simplification du modèle et proposant des solutions dans des délais très courts Même si l’industrie dispose d’un système de production flexible et robuste qui peut répondre aux besoins du marché, la négligence du facteur temps aura des conséquences sur les performances et par conséquent sur la rentabilité.

Dans la littérature, plusieurs outils correspondant à ces exigences. Parmi eux on trouve, les Réseaux de Pétri Stochastique (RdPS) ces derniers sont largement utilisés dans la Système de production (SdP). En effet, ils offrent à la fois une puissance de description des systèmes et une richesse de traitement et d’interprétation des modèles résultants. De plus, comme ils intègrent un aspect stochastique, ils permettent de prendre en compte des notions aussi aléatoires tel que les taux de panne d’une machine.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a comme objectif de présenter les aspects aléatoires sur les systèmes de production et de développer un modèle stochastique considérant ces aspects aléatoires fixés afin d’exploiter le modèle généré pour l'analyse de performances des systèmes de production étudiés.

En effet ce mémoire est divisé en quatre chapitres:

En premier lieu, nous réalisons un état de l’art cernant le fonctionnement des systèmes de production et particulièrement l'impact de l'aspect aléatoire sur ces derniers

En deuxième lieu, nous allons introduire un nouveau modèle formel permettant la spécification d’une large classe des systèmes flexibles de production en tenant en compte de l'aspect aléatoire.

En troisième lieu, nous allons développer un modèle stochastique considérant les aspects aléatoires fixés.

En dernier lieu, nous allons exploiter le modèle généré pour l'analyse de performances des systèmes de production étudiés

**LES ASPECTS ALEATOIRES DANS LES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES**

1-introduction

Ce premier chapitre est consacré, dans une première partie, à la présentation d'un état de l'art concernant le fonctionnement des systèmes de production et particulièrement l'impact des aspects aléatoires sur ces derniers. Dans une deuxième partie, ce chapitre présente différentes approches de modélisations proposées dans la littérature pour représenter les différents aspects du fonctionnement des systèmes flexibles de production. La synthèse des travaux existants permettra de justifier le choix de notre approche de modélisation.

2-Système de production

Un système de production est un système artificiel composé d’un ensemble des éléments matériels et immatériels qui interagissent et interfèrent à la production de biens ou de services par une entreprise.

2.1 Domaine d’application des systèmes de production

Les systèmes de production couvrent plusieurs domaines d’application tels que : les systèmes informatiques, les systèmes manufacturiers, les systèmes hospitaliers et les services.

Le tableau 1 donne quelques exemples de type de ressources et de type d’opérations choisies pour être de nature très différentes pour chaque domaine (Caumond, 2006).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Domaine d’application | Type de ressource | Type d’opération |
| Système informatique | Microprocesseur, bus, interface homme/machine, console,… | Traitement, sauvegarde sur disque, lecture d’un fichier |
| Système manufacturier | Machine, opérateur, outils, moyen de transport,… | Transformation, assemblage, transport, maintenance,… |
| Système hospitalier | Docteurs, infirmières, lits, bloc opératoire, équipements,… | Opération chirurgicale, accueil du patient, diagnostic … |
| Service | Guichetier, hôtesse d’accueil,… | Traitement de la demande, redirection vers un autre service … |

**Tableau 1:Exemples de domaines d’applications, de leurs ressources et de leurs opérations**

Le domaine le plus utilisée en système de production est celle des systèmes industriels (les systèmes manufacturiers). Nous nous intéresserons dans la suite de ce mémoire, en particulier, aux domaines manufacturiers pour représenter les systèmes de production flexible.

***2.2. Présentation des systèmes de production***

D’après (Danø, 1966), la production est définit par une succession d’opérations en passant de l’état de matières premières (composants entrant dans le système) à l’état de produits finis ; les opérations peuvent être de différents types : opérations de transformation, d’assemblage, de désassemblage, de transfert etc. Selon (Askin & Standridge, 1993), « la production est le passage d’une conception à un produit fini». Un système de production est un espace constitué de :  
•Moyens de production (ressources) : les ressources du système de production sont l’ensemble des moyens mis en œuvre capables de réaliser diverses opérations pour transformer les entités (il peut s’agir de matières premières, de composants, de produits semi-finis ou de produits finis) et passer de la matière première au produit fini. Ces ressources peuvent être des machines (stations), zones de stockage, moyens de transport, palettes, outils etc.,  
•D’opérateurs (OP) : les opérateurs sont les types d’opérations que les ressources peuvent être réalisées. Les opérations peuvent être de différents types : opérations de transformation, d’assemblage, de stockage, de transport etc.

De plus, un système de production est soumis à une charge qui définit l’ensemble des biens ou des services que le système doit réaliser. Pour écouler cette charge, le système utilise une ou plusieurs ressources et doit respecter certaines contraintes temporelles (Caumond, 2006). La charge d’un système de production est constituée des travaux. Un travail (Job) suit la réalisation d’un produit fini dans toutes les étapes de production (de la matière première jusqu’au produit fini). Chaque travail a une gamme qui décrit la suite des opérations qu’il doit réaliser puisqu’elle est constituée d’une séquence d’opérations. La gamme décrit les opérations à réaliser en donnant:  
•Les produits consommés (les produits entrants et les produits sortants).  
•L’ordre entre les opérations à réaliser.

Mais la gamme ne donne pas:  
•La ou les ressources qui doivent réaliser les opérations (on ne connaît pas les ressources à l’avance).  
•Leur durée (on ne connaît pas la durée de la gamme et des opérations à l'avance).

Les systèmes de production sont qualifiés comme étant des « systèmes de production à partage de ressources » puisqu’ils sont limités et ne peuvent pas écouler une charge illimitée de travail, ce qui limite, ce sont des ressources présentes en quantités limitées.

***2.3. Classifications des systèmes de production***

Les systèmes de production peuvent se classer en tenant compte des aspects de productivité et de flexibilité en :  
•Systèmes Manufacturiers Dédiées (SMD),  
•Systèmes Manufacturiers Cellulaires (SMC),  
•Systèmes Manufacturiers Flexibles (SMF),  
•Système Manufacturiers Reconfigurables (SMR).

***2.3.1. Systèmes Manufacturiers Dédiées (SMD)***   
Les lignes de fabrication sont conçues pour la fabrication en grande série d’un type de produit unique selon une gamme linéaire (ne contenant aucune opération d’assemblage). Dans ce type de système, les machines sont organisées suivant la gamme de fabrication. Ce type de système a un avantage et un inconvénient. Son avantage se résume au fait que les lignes de fabrication ont un taux de production très élevé. L’inconvénient est qu’un seul type de produit ou une famille de produits, qui se diversifient légèrement les uns des autres, peut être fabriquée dans ces systèmes.  
***2.3.2. Les systèmes Manufacturiers Cellulaires (SMC)***   
Les systèmes de production cellulaires fabriquent les produits dans des zones dédiées appelées cellules. Toute cellule regroupe les différents équipements nécessaires pour la fabrication d’un type de produit.

***2.3.3. Systèmes Manufacturiers Flexibles (SMF)***

Les SMF ont été introduits dans les années 1980, pour répondre non pas aux volumes et aux variétés de production, mais pour répondre également aux nouvelles technologies de production et aux besoins des marchés. Ils sont donc des systèmes intégrés de moyens de production performants et de haute précision qui interagissent et interfèrent dans le but de réaliser un ensemble de types de produits, qui peut changer avec le temps (types, quantités), tout en assurant le compromis coût/performance et en respectant la qualité de la production (Berruet & Kanso, 2010). L’obstination (robustesse) de ce type de système a été remarquable grâce à la flexibilité introduite, néanmoins leur coût est trop élevé. Dans les années 1990, l'agilité, la réduction des déchets, la qualité de production et la production sans gaspillage ont été identifiées et introduites comme objectifs de la production (Berruet & Kanso, 2010). Les SMF visent à rendre flexible l’ensemble de l’outil de production. C'est-à-dire, le préparer à s’adapter aux divers changements de son environnement, sans qu’il y ait besoin d’engager de nouveaux investissements en biens d'équipement, ou d’engendrer de longues pertes de temps. Sa finalité est de réaliser une multitude d’opérations hétérogènes à partir d’un nombre très limité de ressources. Cette vision desdits systèmes (SMF) est très fréquente dans l’industrie manufacturière où une installation est constituée d’un ensemble de stations (machines de production) reliées par des zones de stockage et des moyens de transport. Le produit est acheminé d’une zone (machine ou zone de stockage) à une autre en subissant des transformations réalisées dans un temps prédéfini. Un FMS est un système de production avec une flexibilité générale.

***2.3.4. Systèmes Manufacturiers Reconfigurables (SMR)***

Ce nouveau concept de système de fabrication apparaît dans les années 2000 dans le but de fournir la productivité et la flexibilité, au bon moment et au meilleur coût (coût réduits) en intégrant de nouveaux principes (Aladad, 2009) comme :

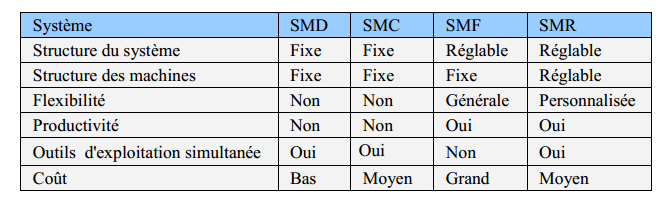
•La modularité tant sur le plan de la conception mécanique que les logiciels et matériels par l’intégration des nouvelles technologies d’aujourd’hui et de demain ;  
•La convertibilité, par l’aptitude de mise en course rapide ;  
•La diagnosticabilité, permet de mesurer l'état d'un système à fin diagnostiquer toute faute du système dans un délai fini et de rendre le système de fabrication disponible à la production ;  
•La personnalisation en fonction des produits.

Ce nouveau paradigme concernant les systèmes manufacturiers « reconfigurables » sont conçus pour répondre efficacement aux changements rapides du marché, en tenant compte des contraintes à priori contradictoires telles que la haute flexibilité, la haute productivité, le coût et la qualité.

Un SMR est un système de production avec une flexibilité mesurée.

***2.4. Caractéristiques des systèmes de production***

Le tableau suivant présente une comparaison des différents types de systèmes de production en fonction d'un certain nombre de contraintes.



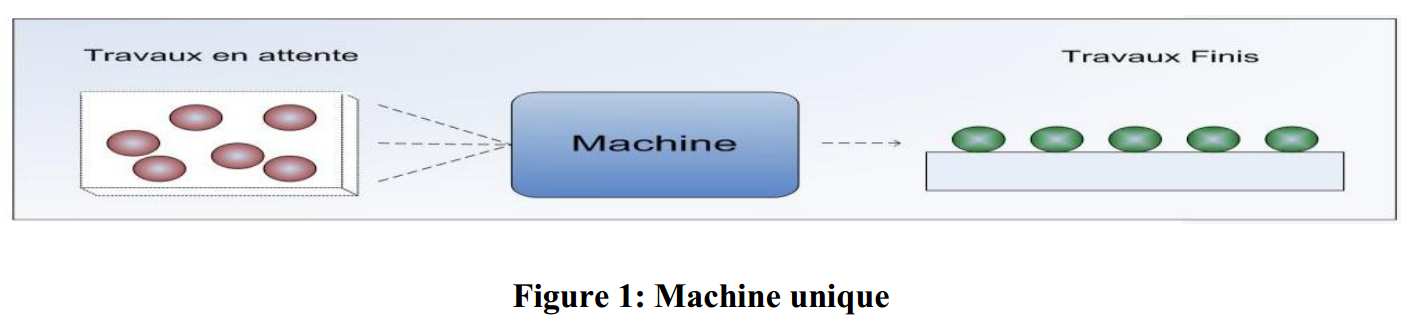
**Tableau 2: une comparaison entre les différents types des systèmes manufacturiers**

Dans la suite de ce mémoire, nous nous intéresserons, en particulier, aux Systèmes Manufacturiers Flexibles (SMF).  
***3. Organisation des Systèmes de production flexible***

Les systèmes de production flexible sont classés en fonction du volume de production et du nombre des pièces produites. Une grande variété de produits traités provoque une diminution de volume de produits

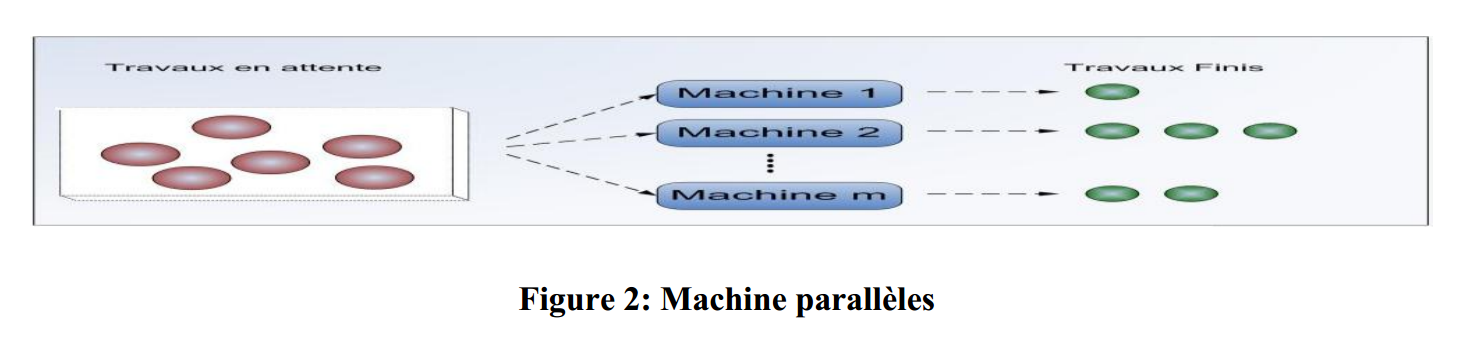
***3.1. Le système de production à Machine unique***

Dans ce cas, les tâches (jobs) sont mono-opération et il existe une seule ressource pour leur exécution. La figure 1 montre un exemple d’un atelier à machine unique avec six travaux et une machine.



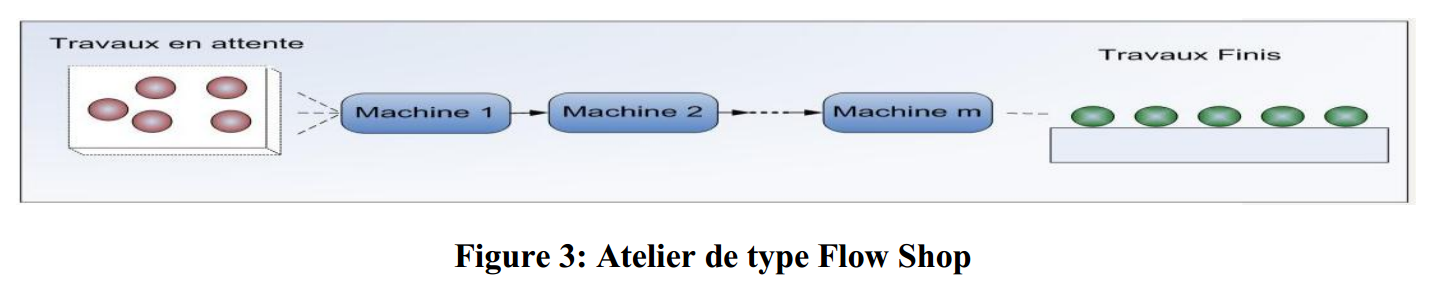
***3.2. Le système de production à Machine parallèles***

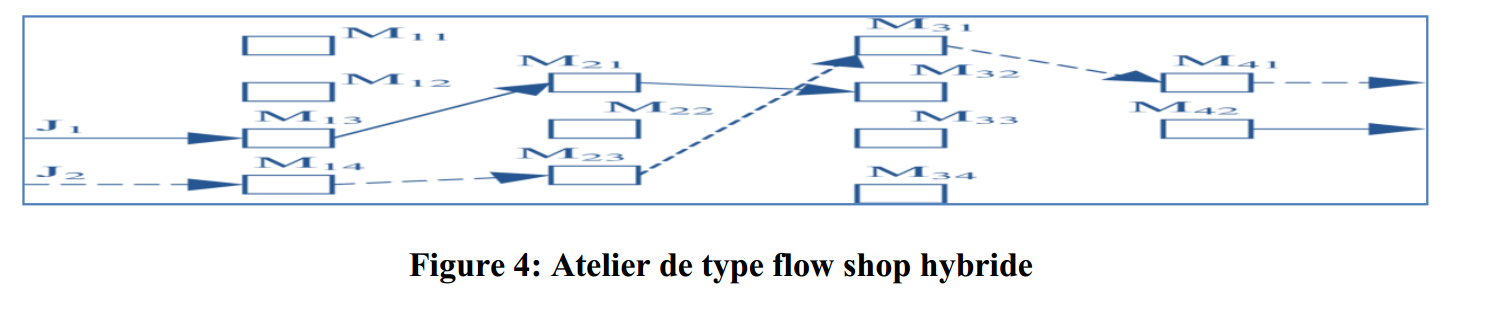
Les tâches sont mono-opération et il existe plusieurs ressources susceptibles de les exécuter. La figure 2 montre un exemple d’un atelier à cheminements unique avec six travaux et m machines.



***3.3. Le système de production à cheminement unique (flowshop)***

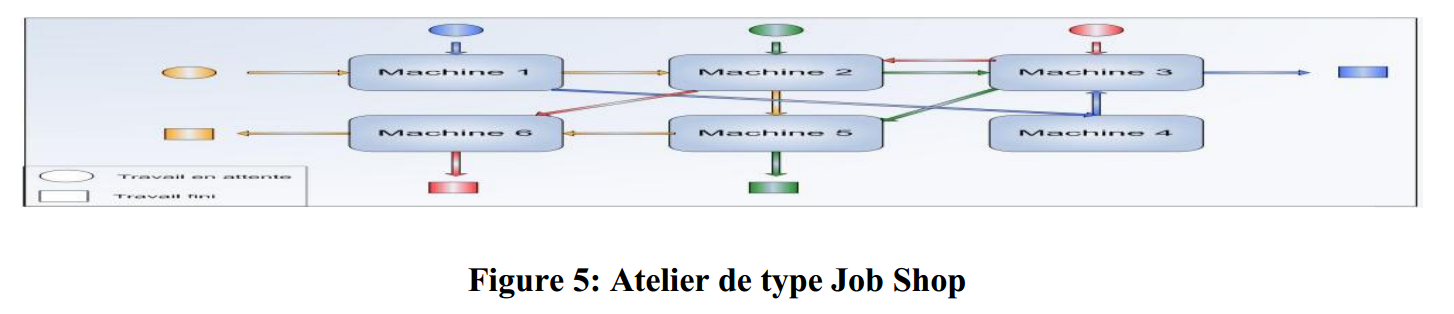
Les tâches sont multi-opération et leur exécution nécessite l’utilisation de plusieurs ressources dans le même ordre. Chaque ressource n’existant qu’en un seul exemplaire. La figure 3 montre un exemple d’un atelier à cheminements unique avec cinq travaux et m machines.

**Flow Shop hybride** : Se dit lorsque les ateliers, composés de ressources parallèles, sont organisés en flow shop. Les tâches sont multi-opération, chaque opération étant réalisée sur une des machines de chaque atelier. La figure 4 montre un exemple d’un atelier flow shop hybride avec deux travaux et quatre machines, chaque machine existe en plusieurs exemplaires.



***3.4. Le système de production à cheminements multiples (Job Shop)***

Les tâches sont multi-opération et l’exécution d’une tâche nécessite l’utilisation de plusieurs ressources dans un ordre qui lui est propre. Chaque ressource n’existant qu’en un seul exemplaire. La figure 5 montre un exemple d’un atelier à cheminements multiples avec quatre travaux et six machines.



**Job Shop hybride** : Se dit lorsque les ateliers, composés de ressources parallèles, sont organisés en job shop. Les tâches sont multi-opération, chaque opération étant réalisée sur une des machines de chaque atelier.

***3.5. Le système de production à cheminement libre (open shop)***

Les tâches sont multi-opération et leur exécution nécessite l’utilisation de plusieurs ressources dans n’importe quel ordre(les opérations des tâches sont indépendantes). Chaque ressource existe en un seul exemplaire. Plus précisément, chaque produit à traiter doit subir un ensemble d’opérations sur un ensemble de machines, mais dans un ordre totalement libre.

Dans les ateliers de type **open-shop hybride**, une machine peut exister en plusieurs exemplaires identiques fonctionnant en parallèle. Pour une grande demande, le système flow-shop est le plus adopté, mais avec une variété réduite de produits. Pour une grande gamme, le système de production job-shop est plus efficace pour un volume de production réduit. Dans ce qui suit nous travaillons sur les ateliers les plus complexes qui sont les ateliers job shop hybride. Nous allons supposer que les ressources ne sont pas uniquement les machines comme s’est présenté précédemment dans la littérature ,mais peuvent être aussi des moyens de transport et des zones de stockage.

***4- Aspect aléatoires dans les systèmes de production***

***5-Modelisation***

D’après (Boimond & Jean-Louis) l’étape de modélisation est une phase essentielle à la simulation (expérimentation), et à la validation. La modélisation consiste à créer une représentation simplifiée d'un système pour résoudre un problème le concernant: le modèle. Grâce au modèle il est possible de représenter simplement un système, un concept et de le simuler.

***5.1. Outils de modélisation***

Dans le but de justifier le choix de l’outil que nous avons adopté pour représenter les systèmes de production, nous allons montrer les principales caractéristiques des outils les plus utilisés dans ce domaine : les machines à états, les automates, les statecharts, les réseaux de file d’attente et les réseaux de Petri. Nous préciserons les points forts et faibles de chacun et nous les comparerons à nos besoins. Cette procédure nous permet de mettre en évidence les raisons de nos choix et les contraintes que nous devrons imposer pour respecter les limites de l’outil choisi (Esteban, Nketsa, & Combacau, 2005) :

**Les machines à états** : les machines à états sont fréquemment utilisées pour décrire les systèmes à événements discrets car il est possible de découper ce type de système en plusieurs processus séquentiels. Ils permettent de capturer sans difficulté le comportement séquentiel d’une application. Parmi les désavantages des machines à états nous pouvons citer le problème de l’explosion combinatoire quand le système devient plus complexe et la difficulté qu’il existe à représenter des évolutions simultanées (Esteban, Nketsa, & Combacau, 2005).

**Statechart** : d’après (Harel, 1987) et (Esteban, Nketsa, & Combacau, 2005), les statecharts sont présentés comme une extension du concept de machine à états adapté à la spécification des systèmes à événements discrets complexes. Ils incluent les concepts de parallélisme, d’abstraction, de hiérarchie, d’orthogonalité et de synchronisation des états. Les statecharts permettent de modéliser simplement les mécanismes de préemption sur un groupe d’états et comportent un mécanisme d’historique permettant de replacer le modèle dans le dernier état qui avait été atteint avant une préemption. Les statecharts sont à considérer pour des applications comportant ces mécanismes, mais il faut savoir que la mise en œuvre d’un statechart est un problème non résolu à l’heure actuelle, aussi il y a une difficulté de la validation des synchronisations.

**Réseaux de Petri** : d’après (Chemla), les réseaux de Petri (RdP) permettent de modéliser des systèmes séquentiels. Ils sont reconnus comme étant un outil puissant de modélisation des parallélismes, des conflits et des partages de ressources en présence de synchronisation. Parmi les désavantages des RdP, nous pouvons citer le problème de l’explosion combinatoire quand le système devient plus complexe, par conséquent, sa représentation graphique peut devenir peu lisible.

**Réseaux de files d'attente** : la motivation première de ces modèles, était la modélisation des systèmes informatiques. Ensuite, ils ont été adaptés pour les systèmes de production. Les réseaux de Files d’attente permettent de modéliser et d’analyser les systèmes de type client/serveur, c’est un réseau de stations interconnectées. D’après (Nana, Legrand, Singhoff, & Marce, 2003), il peut toutefois être difficile de représenter certains systèmes à l’aide de files d’attente. Le développement de modèles hiérarchiques avec différents niveaux de détail n’est pas simple avec cette approche.

**Réseaux d’automates stochastiques :** introduit au début des années 80 par Brigitte Plateau. Ces réseaux sont basés sur l'idée que le système modélisé peut se décomposer sous la forme de  
plusieurs sous-systèmes. Chacun de ces sous-systèmes peut évoluer indépendamment et peut  
interagir avec les autres en se synchronisant ou en faisant varier la valeur de ses transitions en  
fonction des états des autres sous-systèmes, ce comportement étant typiquement celui d'un  
système parallèle. Ils sont appliqués principalement dans les systèmes informatiques et de télécommunication parallèles

**Les approches existant :**

***5.2 Choix de l’approche de modélisation***

Les réseaux de Petri stochastiques colorés constituent un modèle fondamental pour la modélisation de systèmes discrets. Ils sont utilisés dans des nombreux domaines, y compris dans les milieux industriels.

Le travail demandé dans ce stage est de développer un modèle stochastique considérant les aspects aléatoires fixés pour un système de production flexible, à fin d’exploiter ce modèle généré pour l'analyse de performances des systèmes étudiés.

Pour cela, notre choix s’est porté sur les réseaux de Petri stochastique colorés (RDPSC) pour différentes raisons :

* Leur nature graphique qui offre la convivialité souhaitée, puisqu’ils disposent d’une représentation graphique attrayante, qui accroit la lisibilité et facilite la compréhension des modèles,
* Ils permettent de modéliser les systèmes complexes exemple : chaines de montage, réseaux de communication, architectures clients–serveurs etc. Pour analyser non pas seulement les disfonctionnements éventuels mais aussi les performances telque les nombres des pièces fabriquées, temps d’attente, les probabilités du fonctionnement etc.
* Ils permettent de représenter les aspects aléatoires ainsi les performances de système
* Ils présentent un grand pouvoir d’expression, puisqu’ils sont notamment très adaptés à décrire des comportements complexes, réactifs ou concurrents,
* Ils permettent de représenter relativement simplement les différents concepts de l’algorithmique et de la programmation (séquence, itération, conditionnelle, parallélisme, mécanismes de synchronisation, etc.). Les RdPSC permettent de modéliser l’affectation générale, les structures de données ou les conditions booléennes pouvant apparaître dans les synchronisations,
* Ils permettent de représenter relativement simplement les différents concepts de l’algorithmique et de la programmation (séquence, itération, conditionnelle, parallélisme, mécanismes de synchronisation, etc.). Les RdPSC permettent de modéliser l’affectation générale, les structures de données ou les conditions booléennes pouvant apparaître dans les synchronisations,
* La disponibilité d’outils pour la simulation et la vérification,
* Leur potentiel pour l’analyse mathématique qui permet de vérifier certaines propriétés du système (atteignabilité d’un état, blocages, etc.),
* Le modèle de RdPSC est à objectifs multiples. Il peut servir à la fois pour l’évaluation de propriétés comportementales et pour d’autres besoins tels que la génération systématique de code ou encore l’évaluation de performances**.**
* Les RDPS disposent de nombreuses techniques de vérification automatiques des modèles, il est possible de rechercher des propriétés génériques telles que le caractère borné, vivant, ou des propriétés spécifiques telles que l’existence d’invariants.

***6 RdPS***

***6.1 types de RdPS***

Réseaux de Petri Stochastiques (Stochastic Petri Nets (SPN))

RdP temporisé dans lequel les temps d’exécution des transitions sont représentés par des variables aléatoires de distributions exponentielles.

Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés (Generalized Stochastic Petri Net (GSPN))  
RdP dans lequel le franchissement de certaines transitions est immédiat, et les temps d’exécution des autres transitions sont représentés par des variables aléatoires de distributions exponentielles.

Réseaux de Petri Stochastiques et déterministes (Deterministic and Stochastic Petri Net (SPN))  
C’est une extension des GSPN dans laquelle les temps d’exécution des transitions temporisées sont déterministes ou représentés par des variables aléatoires de distributions exponentielles.

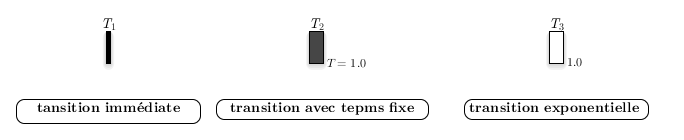
***6.2 RdPS***

Depuis la sémantique d'un réseau de Petri stochastique (SPN) est un processus stochastique à événements discrets (DESP), nous rappelons brièvement ce qui est un DESP. Un DESP est donnée par un espace S de l'Etat et deux familles de variables aléatoires {Sn} et {Tn} indexés par IN.  
S0 est l'état initial et T0 = 0 est le temps initial. Pour chaque n> 0, Sn ∈ S est l'état après l'apparition du n-ième événement et Tn ∈ IR≥0 est le moment de survenue de cet événement

Un RDPS se compose d’un ensemble de places représentés par des cercles, d’un ensemble de transitions représentés par des traits et d’un ensemble d’arcs orientés, chaque arc connectant une place à une transition ou une transition à une place.

Les places servent à représenter les états du système : un état est représenté par une distribution de marque (on dit aussi jetons) entre les places. À tout instant une place peut contenir zéro, une ou plusieurs marques représentées par des points Les transitions et les arcs décrivent les possibilités d’évolution entre états.

Ces évolutions se traduisent par le franchissement de transition : une transition est dite validée que si chacune des places qui lui sont connectées en entrée (places d’entrée), contient au moins une marque. Une transition ne peut être franchie que si elle est validée. Il existe 3types de transitions: **transition immédiate** (le temps de franchissement est zéro) cette transition est plus priorité par rapport aux autre transitions et elle peut avoir une valeur de priorité pour les transitions de même types et un poids pour calculer ses probabilités de franchissement, **transition avec temps fixe** le temps de franchissement de cette transition est fixé, et **transition exponentielle** cette transition a un temps aléatoire qui dépend de la variable λ qui est le taux associé à la transition (paramètre de la  
loi exponentielle).



Le franchissement de la transition consiste à retirer une marque de chaque place d’entrée et à déposer une marque dans chacune des places qui lui sont connectées en sortie (places de sortie). En effet de point de vue de la modélisation, les RdPS ont la possibilité de modéliser aisément des comportements très divers ; synchronisation, parallélisme, partage de ressources, et d’autres mécanismes similaires. Cependant cette modélisation souffre d’une limitation. En effet, la modélisation des systèmes réels mène parfois à des RdPS de taille ingérable, ce qui diminue leur lisibilité et rend leur manipulation et même leur analyse difficile (problème d’explosion combinatoire) (Haiouni, 2010).

Pour apporter des solutions à cette limitation et augmenter la puissance de modélisation, des extensions du modèle RdPS dites des RdPS de haut niveau ont été proposées dans lesquelles d’autres aspects ont été pris en compte, tels que ; la modularité, la colorisation, la temporisation, et autres. Dans ce qui suit nous examinons les principales extensions des RdPSC

**6.3 RdPSC**

Comme nous l’avons mentionné plus haut, les réseaux de Petri stochastique colorés (RDSPC) constituent une abréviation des RDP ordinaires. Grâce à l’introduction de la notion « couleur» pour les marques (on dit aussi jetons), ils permettent la représentation des systèmes plus complexes. Les RdPSC sont plus adaptés à modéliser les systèmes paramétrés dont les comportements dépendent de la structure de base du modèle plutôt que des cardinalités des domaines de couleurs. Les idées de base sont les suivantes :

On attache à chaque place ainsi qu’à chaque transition un domaine de couleur. Chaque jeton contenu dans une place est coloré par l’une des couleurs du domaine de la place. Chaque couleur d’une transition représente une manière différente de franchir la transition.

L’évaluation d‘un arc n’est plus un entier (nombre de jetons à retrancher ou à ajouter) mais une fonction dont l’ensemble de départ est le domaine de la transition adjacente et l’ensemble d’arrivée est le multi-ensemble (car dans une place peut avoir plusieurs jetons ayant la même valeur) associé au domaine de la place adjacente.

Lors du franchissement d’une transition, on instancie la transition par l’une des couleurs de son domaine, puis on évalue les fonctions qui étiquettent les arcs d’entrée de la transition. Cette évaluation fournit le nombre de jetons de chaque couleur à retrancher à chaque place d’entrée. Si le marquage courant dispose d’assez de jetons on les retire et l’on évalue alors les arcs de sortie de la transition pour déterminer le nombre et la couleur des jetons à déposer dans chaque place de sortie.

Les principales raisons justifient l’appel aux RdPSC :

La possibilité de transporter une information structurée car les places ne contiennent pas que des jetons uniformes.

Ce type de réseaux s’utilise pour éviter le problème de taille importante des RdPSC ordinaires dans le cas où des entités différentes présentent des comportements similaires ce qui condense le modèle.

Evaluer et optimiser les performances du système

Formellement soit RdPSC= (P, T, Pre, Post, C, M0, Λ) un réseau de Petri stochastique coloré où :   
P est un ensemble fini de places   
T est un ensemble fini de transitions  
Pre et Post sont, respectivement, les matrices d’incidence avant et après  
C = (C1,C2,…) l’ensemble des classes de couleurs  
M0 est le marquage initial  
Λ = (λ1, .., λ|T|) où λi est le taux associé à la transition ti (paramètre de la loi exponentielle)

***6-conclusion***

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons présenté les systèmes de production et particulièrement l’aspect aléatoire dans ces derniers.  
Dans une deuxième partie et suite à une études des différentes approches de modélisation existantes des systèmes de production, notre choix de modélisation s’est porté sur les RdPSC pour différentes raisons citées plus haut. Le modèle généré sera utilisé comme support pour la détermination, de manière formelle, les aspects aléatoires (panne, retard,…) pour générer les performances du système. Comme l’étape de modélisation à base de RdPSC n’est pas évidente pour les utilisateurs, nous avons développé un modèle formel permettant à l’utilisateur d'un système de production de décrire et de spécifier les informations relatives à son atelier. Le deuxième chapitre décrira le modèle formel proposé.

**APPROCHE ET SPECIFICATION FORMELLE DES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLE**

1. ***Introduction***

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle formel qui permet la spécification d’une large classe des systèmes flexibles de production. Ce modèle permet une description simple et complète de la partie architecturale ainsi que de la partie procédurale du système étudié. La partie architecturale décrit les composants physiques de l’atelier (machines, moyens de transport, etc.) ainsi que leurs capacités fonctionnelles. La partie procédurale prend en compte les différentes gammes de fabrication.

1. **Présentation de l’approche**
2. ***Fonction de production***

Les entreprises industrielles sont des systèmes complexes, décomposables en plusieurs fonctions essentielles, toutes interdépendantes. Parmi toutes ces fonctions, la fonction production occupe, du moins dans les entreprises de transformation, une place essentielle. La fonction de production, que l'on pourrait également désigner sous le nom de gestion des opérations, concerne l'agencement et la conduite des flux physiques entre poste de transformation d'inputs en outputs de façon à atteindre des objectifs mesurables exprimés en terme de quantité, qualité, délais et coûts.

Cette définition englobe la fabrication proprement dite des produits et les activités associées d'approvisionnement en matières premières et composantes, de gestion des stocks, de contrôle de la qualité des produits.

Comme c’est présenté dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressées à la fonction de production au sein des ateliers de type « job shop hybride », en particulier, dans le but d’évaluer les performances du système. Pour ça notre choix de résolution est basé sur une modélisation utilisant les RdPSC. Vu que l’étape de modélisation à base de RdPSC n’est pas compréhensible et connue par l’utilisateur (qui est supposé ne pas être spécialiste en RdPSC), nous avons défini dans ce chapitre un modèle formel permettant de spécifier l’atelier flexible à base d'éléments maîtrises par l'utilisateur des ateliers de production. En effet, à travers ce modèle l’utilisateur à la possibilité de décrire les différents composants physiques formant l’atelier (machines, moyens de transport et zones de stockage) et de spécifier les différentes gammes de fabrication permettant la satisfaction des commandes. L'outil d'aide que nous voulons offrir aux utilisateurs des systèmes de production possède deux entrées et une sortie :

* L’entrée :  
  ⮚Une commande de production que l’atelier reçoit à chaque fois,  
  ⮚La spécification de l’atelier : les informations introduites par l’utilisateur à travers le modèle formel (spécification du niveau procédural et architectural de l’atelier) sont introduites dans le système une seule fois lors du chargement (mise en place) de l’atelier, ces informations seront modifiés que si on ajoutera des nouvelles modifications ou si on chargera un autre atelier, sinon ces informations restent comme des entrées statiques dans le système.
* Sortie :  
   l’évaluation de la performance du système

Dans ce qui suit on va présenter le modèle de spécification formel que nous avons développé.

1. ***Niveaux de spécification des systèmes flexibles de production***

La spécification du problème est un préliminaire indispensable et d'une grande importance. Puisque c'est dans cette étape que l'on doit définir précisément ce que l'on veut mettre en évidence avec la simulation et la modélisation et à quelle précision on attend. On détermine aussi les indicateurs de performance qui vont permettre de vérifier si l'on a atteint les objectifs fixés. Enfin, il faut pouvoir fournir des données au modèle. Celles-ci sont relatives à tous les éléments utilisés dans la simulation, comme par exemple :

* Données sur les produits à fabriquer : gammes de fabrication, loi d'arrivée dans le modèle,
* Données sur les moyens de production : nombre et types de machine, nombre et types de ressource complémentaire de production (outils, palettes, etc.),
* Données sur les systèmes de manutention : nombre et types de convoyeur ou de chariot, capacité en nombre d'articles, vitesse/temps d’exécution de déplacement, etc.,
* Données sur les stocks et les magasins : types et capacités, règles d'entrée et de sortie, temps minimal et maximal du séjour des pièces dans le stock (s’il doit être soumis à des contraintes temporelles), etc.,

Aussi bien d’autres données qui sont en relation avec le temps, qu’on va les détailler par la suite. Pour la spécification des systèmes flexibles de production, nous distinguons deux niveaux :

* Un niveau architectural : décrit les caractéristiques fonctionnelles des différents composants physiques (machines, moyens de transport, zones de stockage) et leurs interaction au sein du système.
* Un niveau procédural : décrit les aspects de production. En effet, il représente les différentes gammes de fabrication permettant la réalisation des produits finis. Chaque gamme est décrite par l’ensemble des opérations qui la forment.

***4.1 Le niveau architectural***

Le niveau architectural de l’atelier flexible de production décrit les caractéristiques fonctionnelles des différents composants physiques, il est constitué d'un :

* **l'unité de charge :**

L'unité de charge (LU) classe représente le processus par où les matières premières sont chargés, les paramètres de Lu sont:

* ensemble de matériaux chargés: le type de matières premières du système de production
* la taille des tampons
* les temps de chargement: la distribution du temps de charge pour chaque type de matériau.
* **Machine**:  
  Machine est ensemble fini, noté M, de m machines différentes qui permet d’exécuter un ensemble d’opérations.

Les informations associées aux machines sont :

Toute machine est capable d’exécuter un ou plusieurs opérations,  
Les machines sont indépendantes les unes des autres,

Les tailles des buffers d’entrées et de sorties,  
le temps d’exécution

* **Moyens de transport**

Le moyens de transport est un ensemble fini, noté T qui permet de transporter les pièces vers les machines.

Les informations associées aux moyens de transport sont :

* Un moyen de transport est caractérisé par sa mobilité et par sa capacité.
* le niveau de la liberté de l'unité, en précisant si la trajectoire est fixe ou susceptibles de changer en fonction des besoins
* le délai de livraison en fonction des matériaux à être livré et l'emplacement (initiale ou de destination).

***4.2 Le niveau procédural***

Le niveau procédural représente les différentes gammes de fabrication permettant la réalisation des produits finis.

* Toute gamme de fabrication est une séquence ordonnée d’opérations,
* Chaque produit est fabriqué selon une ou plusieurs gammes de fabrication,
* Chaque opération est exécutée par une ou plusieurs machines,
* Chaque opération a un ensemble de produits entrants et un ensemble de produits sortants,
* Le temps d’exécution d’une opération diffère d’une machine à une autre.

Et, les contraintes intrinsèques au système de production flexible sont les suivantes :

* La préemption n'est pas permise (l’exécution d'une opération en cours sur une machine ne peut être interrompue),
* Une machine ne peut effectuer qu'une seule opération à la fois,
* Deux opérations d'une même tâche ne peuvent être exécutées simultanément (contraintes de précédence),
* Chaque tâche possède un ordre spécifique,
* Les tâches sont indépendantes les unes des autres.

1. ***Un modèle formel pour la spécification des systèmes flexibles de***  
   ***production***

Dans cette section, nous introduisons un modèle formel permettant la spécification d’une classe de systèmes flexibles de production. Dans ce modèle, la spécification formelle d’un tel système est composée de deux niveaux : le niveau architectural et le niveau procédural.

* 1. ***Modèle formel du niveau architectural***

Formellement, le niveau architectural de la spécification est un triplé <LU, M, T> tel que :

LU : l’unité de charge représente le processus où les matières premières sont chargées

M : un ensemble fini de machines  
T : est un ensemble fini de moyens de transport.

Nous associons, à ces composants, des informations relatives à leurs capacités Opérationnelles. Ces derniers représentent les propriétés caractéristiques du niveau architectural de l’atelier flexible. Ces informations décrivent les opérations exécutées dans l’atelier, les opérations exécutées par chaque machine, le temps nécessaire pour l’exécution de ses opérations, les capacités des zones de stockage, les pièces (opérations) stockés par chaque zone de stockage, la mobilité de chaque moyen de transport (quel composant est atteignable à partir de quel autre), et le temps nécessaire pour transporter les pièces d’une zone à une autre zone.

* + 1. modèle formel d’une machine

On commence par la représentation d’un modèle formel d’une machine ces informations sont décrites à travers un ensemble d’applications, à savoir M, Mp-produit, O, T\_M , Capacité définies comme suit :

L’unité de ressource présentée dans l’atelier est définie comme suit:   
M : Machine 🡪 1

L’application « Mp\_produit » représente la (les)matière(s) première(s) nécessaire pour la production de chaque produit:  
Mp\_produit : IN\*

L’ensemble des opérations exécutées dans l’atelier est défini comme suit:  
O : Atelier →2op

L’application « T-M » fournit, pour la machine, l’ensemble des opérations qu’elle exécute et le temps d’exécution nécessaire pour chaque opération ainsi le temps de panne et de réparation de cette machine. Notons que le temps d’exécution, de panne et de réparation sont des temps aléatoire n’est pas un temps statique, il varie d’une opération à une autre, de plus il diffère de type d’opération. En effet, si une machines (M1) exécute deux (O1) et (O2), le temps d’exécution d’O1 n’est pas forcement égal au temps nécessaire à O2. Par conséquent, le temps d’exécution d’une opération est en fonction de la machine et de l’opération.

L’application « Capacité » représente la capacité du stock (d’entrée ou/et de sortie) dédié à la machine :

Capacité: C 🡪 IN\*

* + 1. modèle formel global des machines

Notre but est de minimiser le modèle pour plusieurs machines alors le modèle formel global des machines est définit par les applications suivantes :

L’ensemble des ressources présentées dans l’atelier est définie comme suit:   
M : Machine 🡪 IN\*

L’application « Mp\_produit \_M» représente la (les)matière(s) première(s) nécessaire pour la production et les machines qui peuvent l’exécutées:  
Mp\_produit\_M : IN\*

L’ensemble des opérations exécutées dans l’atelier est défini comme suit:  
O : Atelier →2opL’application « T-M » fournit, pour chaque machine, l’ensemble des opérations qu’elle exécute et le temps d’exécution nécessaire pour chaque opération ainsi le temps de panne et de réparation de la machine. Notons que le temps d’exécution, de panne et de réparation sont des temps aléatoire n’est pas un temps statique, il varie d’une opération à une autre, de plus il diffère de type d’opération. En effet, si une machines (M1) exécute deux (O1) et (O2), le temps d’exécution d’O1 n’est pas forcement égal au temps nécessaire à O2. Par conséquent, le temps d’exécution d’une opération est en fonction de la machine et de l’opération.  
T-M →

L’application « Capacité » représente la capacité du stock (d’entrée ou/et de sortie) dédié à la machine :

Capacité: C 🡪 IN\*

* + 1. modèle formel des unités de transport   
       L’ensemble des unités de transport présentées dans l’atelier est définie par l’application :   
       T🡪IN

La propriété caractéristique d’un stock est sa capacité de stockage. Cette propriété est définie par l’application:  
Capacity : B → IN\*

Chaque moyen de transport est caractérisé par deux propriétés : Sa mobilité décrivant sa capacité à transporter les produits d’un composant à un autre, le temps nécessaire pour les transporter et sa capacité. Ces propriétés sont introduites par les applications suivantes :  
Mobilité : T → où Pos = M∪MP Et T\_Capacité : T →IN\*

* 1. ***Modèle formel du niveau procédural***
  2. ***Modèle formel d’initialisation***

Dans notre atelier, nous avons supposé qu’à l’instant zéro, début de production, les moyens de production et les matières premières ne sont pas toutes disponibles, pour cela un modèle formelle permettant de décrire la disponibilité de ces derniers en fonction du temps qui pourra nous aider par la suite lors de l'ordonnancement des opérations.  
L’application « Dispo-M » présente à quel instant les différentes machines sont disponibles:  
Dispo-M : M → Q+   
L’application « Dispo-M\_T » présente à quel instant les matières premiers sont disponibles est quelle machine peux les exécuter.  
Dispo-M\_T : M\_T 🡪 Q+  
L’application « Dispo-T » présente à quel instant les moyens de transport sont disponibles:  
Dispo-T : T → Q+   
L’application « prêt-G » présente les différentes gammes dans le système de production qui sont prêtes à être exécutées :  
Prêt-G : G → Q+   
Cette dernière application est en relation avec l’application « Dispo-MP » qui présente la disponibilité des matières premières sont disponibles :  
Dispo-MP : MP → Q+

1. Exemple de système du production
2. Conclusion

Biblio

1. http://www.trader-finance.fr/lexique-finance/definition-lettre-S/Systeme-de-production.html
2. Caumond, A. (2006). "Le probème de jobshop avec contraintes:modélisation et optimisation". Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal - Clermont Ferrand II.
3. (**BENFARHI A**) Réseaux d’automates stochastiques pour l’évaluation de performances de systèmes de production