



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Genie industriel

Présentée et soutenue par :

Mme GHITA BENCHEIKH

le jeudi 23 janvier 2020

Titre :

Planification conjointe des activités de production et de maintenance en
fonction de l'état de santé des ressources

Ecole doctorale :

Systèmes (EDSYS)

Unité de recherche :

Laboratoire de Génie de Productions de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. XAVIER DESFORGES

MME AGNES LETOUZEY

Rapporteurs :

M. CHRISTOPHE VARNIER, ENSMM BESANCON

M. REMY DUPAS, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

Membre(s) du jury :

M. THIBAUD MONTEIRO, INSA LYON, Président

M. BERNARD ARCHIMEDE, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

Mme AGNES LETOUZEY, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

M. XAVIER DESFORGES, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

Sommaire

Introduction générale	7
1 Gestion de production et de maintenance	13
1.1 Introduction	13
1.2 Systèmes de production	14
1.2.1 Classification des systèmes de production	16
1.2.1.1 Classification selon la relation avec le client	16
1.2.1.2 Classification selon la nature et le volume des flux	18
1.2.1.3 Classification selon le cheminement des flux	19
1.2.2 Gestion de production	19
1.2.2.1 Objectifs de la gestion de production	20
1.2.2.2 Planification des besoins : MRP	23
1.2.2.3 Les niveaux de planification	24
1.3 L'ordonnancement dans les systèmes de production	27
1.3.1 Problèmes d'ordonnancement	30
1.3.2 Complexité des problèmes d'ordonnancement	31
1.3.3 Classification des problèmes d'ordonnancement	32
1.3.4 Méthodes de résolution	34
1.3.4.1 Méthodes exactes	34
1.3.4.2 Méthodes approchées	35
1.3.4.3 Règles de priorité	36
1.3.5 Aléas de l'ordonnancement de la production	37
1.4 La fonction maintenance	38
1.4.1 Types de maintenance	39

1.4.1.1	Maintenance Corrective	39
1.4.1.2	Maintenance Préventive	40
1.4.2	Lien entre diagnostic et pronostic	41
1.4.3	Classification des approches de pronostic	43
1.5	Ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance	44
1.5.1	Cas déterministe	44
1.5.2	Cas stochastique	47
1.6	Conclusion	49

2 Ordonnancement des tâches de production et de maintenance : Problématique et modélisation 51

2.1	Introduction	51
2.2	Description du problème	52
2.2.1	Comment déterminer les OF ?	52
2.2.2	Comment gérer les OF ?	54
2.2.3	Comment déterminer les TM ?	55
2.2.4	Vision globale du problème	56
2.3	Les diagrammes de classes	57
2.3.1	Définition	58
2.3.2	Types d'interactions dans les diagrammes de classes	58
2.4	Description et modélisation des éléments du problème	60
2.4.1	Les ordres de fabrication	60
2.4.2	Les ressources de production	61
2.4.3	Les ressources de maintenance	67
2.5	Conclusion	70

3 SCEMP : un système multi-agent pour la planification conjointe des tâches de production et de maintenance 73

3.1	Introduction	73
3.2	Systèmes multi-agents	74
3.2.1	La coordination dans les systèmes multi-agents	75
3.2.2	La communication dans les systèmes multi-agents	76

3.2.2.1	La communication par partage d'information	77
3.2.2.2	La communication par envoi de messages	77
3.2.3	Apport d'utilisation des SMA pour l'ordonnancement	78
3.3	Le système multi-agent SCEMP	81
3.3.1	Description des agents	83
3.3.1.1	Agent client	83
3.3.1.2	Agent producteur	84
3.3.1.3	Agent mainteneur	85
3.3.2	Protocole de communication	87
3.3.3	Planification des clients	91
3.3.3.1	Hypothèses des clients	91
3.3.3.2	Contraintes des clients	92
3.3.3.3	Résolution du sous-problème d'ordonnancement des clients . . .	92
3.3.4	Planification des producteurs	92
3.3.4.1	Hypothèses des producteurs	93
3.3.4.2	Contraintes des producteurs	94
3.3.4.3	Résolution du sous-problème d'ordonnancement des producteurs	94
3.3.5	Planification des mainteneurs	95
3.3.6	Validation des producteurs	96
3.3.6.1	La nécessité de la validation des TM	96
3.3.6.2	Stratégies de validation des TM	98
3.4	Conclusion	100

4 Implémentation et validation 103

4.1	Introduction	103
4.2	Implémentation du modèle et génération des données	104
4.2.1	Ordres de Fabrication	105
4.2.1.1	Interface	105
4.2.1.2	Génération des OF	106
4.2.2	Machines	106
4.2.2.1	Interface	106

4.2.2.2	Génération des machines	108
4.2.3	Ressources de maintenance	109
4.2.3.1	Interface	109
4.2.3.2	Génération des ressources de maintenance	110
4.3	Évaluation du modèle SCEMP	111
4.3.1	Cas de trois machines	111
4.3.1.1	Critères d'évaluation	114
4.3.1.2	Résultats obtenus	114
4.3.1.3	Variation de la complexité des instances	116
4.3.2	Cas de plusieurs machines avec différentes méthodes d'ordonnancement .	118
4.3.2.1	Critères d'évaluation	118
4.3.2.2	Résultats obtenus	118
4.3.3	Évaluation des méthodes d'ordonnancement	119
4.3.3.1	Critères d'évaluation	120
4.3.3.2	Résultats obtenus	120
4.3.4	Évaluation des stratégies de validation des TM	121
4.3.4.1	Critères d'évaluation	123
4.3.4.2	Résultats obtenus	124
4.4	Apports de l'utilisation du PHM	125
4.4.1	Critères d'évaluation	126
4.4.2	Résultats obtenus	127
4.5	Conclusion	128



Introduction générale

Problématique

Dans un environnement changeant, dans lequel la concurrence est de plus en plus vive, une entreprise doit continuellement améliorer sa compétitivité, en répondant au mieux aux besoins des marchés dans lesquels elle opère. Innover est devenu alors une nécessité pour que les entreprises puissent assurer le succès de leurs produits ou services. Cependant, cette innovation ne doit pas concerner uniquement le développement de produits ou de services mais aussi la fonction de production ainsi que toutes les fonctions ayant un lien direct ou indirect avec cette dernière. En effet, dans un tel environnement, rester continuellement compétitif nécessite un travail coopératif de toutes les fonctions du système. Bien que, souvent dans le monde industriel, les objectifs de réactivité, de coût, de délai et de qualité dominent l'attention des gestionnaires, il est difficile pour d'autres fonctions, en particulier la fonction de maintenance, d'imposer leurs contraintes qui permettraient, malgré tout, d'augmenter la productivité et la compétitivité.

Afin de garantir une productivité élevée, les gestionnaires s'appuient beaucoup sur des plans de production fiables et robustes en supposant que les ressources de production sont toujours disponibles. Cependant, la plupart du temps, ces plans sont exposés à des perturbations. Ces perturbations sont généralement causées par des aléas de natures diverses : absence des opérateurs, retards de livraisons de matières premières, dégradation de la qualité des produits achetés, etc. mais aussi par l'occurrence fortuite de pannes sur les ressources de production. En effet, une panne peut se produire durant l'exécution d'une tâche de production, ce qui peut avoir de désastreuses conséquences sur la chaîne de production et conduire à des accidents mettant en péril l'ensemble des équipements de production, le personnel de l'atelier et l'environnement en général. Il est évident alors que pour améliorer le rendement de l'entreprise et garantir en parallèle la sûreté de fonctionnement et aussi la sécurité, il est nécessaire de mettre en œuvre

une politique de maintenance judicieuse.

C'est pourquoi les politiques de maintenance se sont grandement développées au cours des dernières années allant de la maintenance corrective appliquée après l'occurrence des pannes, à la maintenance préventive systématique réalisée périodiquement sur l'ensemble des équipements en passant par la maintenance préventive conditionnelle qui consiste à surveiller l'état de santé des machines et à intervenir lorsque des dégradations sont observées, ou la maintenance prédictive apparue récemment et qui se base sur les techniques de pronostic pour anticiper les pannes en estimant le temps d'utilisation restant avant leur occurrence et planifier antérieurement les maintenances nécessaires pour les éviter. Cette politique de maintenance permet de réduire ainsi le nombre de pannes imprévues et donc le risque d'accident dans les ateliers.

Cependant, pour de nombreux gestionnaires de production, la maintenance est une source de perturbation car elle a pour conséquence de suspendre la production. En effet, les gestionnaires de production ne se soucient pas de l'état opérationnel des équipements, ils considèrent ainsi que les temps où les ressources ne sont pas engagées peuvent être exploités pour effectuer d'autres opérations de production. En conséquence, ils peuvent avoir tendance à décaler les tâches de maintenance sur des créneaux horaires limitant autant que possible les arrêts de production. Ce procédé peut avoir des conséquences sur la sécurité des équipements car ce décalage des tâches de maintenance augmente le risque de pannes des ressources de production lors des temps opératoires, conduisant généralement à la perte du produit en cours de fabrication. Le traitement de ces pannes inévitables est généralement plus coûteux pour l'entreprise. En effet, il s'agit alors de maintenance corrective immobilisant les ressources généralement plus longtemps que s'il s'agissait de maintenance préventive. Les besoins en maintenance corrective sont soudains et non planifiés immobilisant la ressource dès leur apparition jusqu'à la remise en état opérationnel. L'absence d'anticipation fait que la logistique de l'intervention ne peut pas être organisée lors des temps improductifs de la ressource allongeant ainsi la durée d'immobilisation. De plus, il est possible que les ressources de maintenance soient engagées sur une autre intervention retardant encore plus la remise en état opérationnel de l'équipement de production. Ces délais peuvent être tels qu'ils conduisent à des replanifications de la production et qu'ils peuvent conduire l'entreprise à dédommager ces clients pour les retards.

Malgré l'interdépendance entre les fonctions de production et de maintenance, leurs activités sont très souvent planifiées séparément dans les systèmes de production. Chacune des deux

fonctions planifie ses tâches sans prendre en considération les activités de l'autre, d'une part, la fonction de production suppose que les machines sont toujours disponibles et, d'autres part, la fonction de maintenance ne prend pas en considération l'utilisation des ressources pour la production. Ceci entraîne des conflits entre ces deux fonctions lors de la réalisation de la planification de leurs activités sur les ressources qu'elles partagent.

Dans la littérature, beaucoup d'études ont été réalisées pour traiter le problème de planification conjointe des activités de production et de maintenance. La plupart de ces travaux considèrent le problème dit de planification des tâches de production avec contraintes de disponibilités. Ce type de problème consiste d'abord à trouver un planning des interventions de maintenance puis à planifier les tâches de production en respectant les contraintes d'indisponibilités créées par les tâches de maintenance. Cependant, il n'est pas toujours possible de savoir avec certitude quand est-ce qu'un équipement va tomber en panne. Les pannes arrivent à force d'utiliser les équipements pour la production, il n'est donc pas possible d'estimer l'instant de la panne de celui-ci sans connaître ses futures utilisations et la sévérité de ces utilisations. Pour remédier à ce problème, les planifications de la production et de la maintenance doivent donc être réalisées simultanément.

Bien qu'il semble que l'outil de pronostic soit d'intérêt pour la planification des opérations de maintenance et de production selon l'état de santé actuel et futur de la machine et donc selon la durée et la sévérité de son utilisation, celui-ci ne semble pas être considéré par les travaux issus de la littérature des domaines concernés. De plus, les méthodes développées dans les travaux existants sont très peu déployées dans les systèmes de production réels, du fait de leurs temps d'exécution trop importants et du fait que ces travaux sont très souvent développés pour un problème spécifique propre à un système précis et/ou à des hypothèses trop restrictives. Ceci restreint la portabilité de la méthode et la rend ainsi sensible à tout changement d'environnement. Nous présentons, dans ce manuscrit, une méthode visant une grande généricité pour la planification conjointe des activités de production et des activités de maintenance exploitant les données de pronostic des composants des ressources techniques de production. Afin de garantir cette grande généricité, la méthode proposée est distribuée. En effet, nous avons considéré qu'elle devait pouvoir être adaptée aussi bien à un site de production très intégré disposant de ses ressources propres de production et de maintenance comme à un ensemble d'entreprises de production et de services de maintenance.

Contribution de la thèse

Dans cette thèse la contribution principale porte sur la proposition d'une méthode de planification conjointe des activités de production et des activités de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources de production qui varie en fonction de leur utilisation et en fonction des disponibilités de ressources de maintenance.

Ce travail est une extension d'un modèle de planification "SCEP" (Superviseur, Clients, Environnement et Producteurs), un système multi-agent qui permet de planifier les tâches de production sans prendre en considération les tâches de maintenance. En s'inspirant de SCEP nous proposons un modèle (SCEMP), dans lequel un nouvel agent "Mainteneur" est intégré. Une amélioration des performances et connaissances des agents producteurs est apportée de sorte qu'ils exploitent les données issues des pronostics de composants pour planifier les tâches de production en fonction de l'état de santé des équipements qu'ils gèrent. Ces agents producteurs peuvent aussi communiquer avec les mainteneurs pour exprimer leurs besoins de maintenance. Les mainteneurs peuvent répondre à ces besoins en considérant eux-mêmes leur disponibilité.

Organisation du manuscrit

Afin de présenter nos développements, ce manuscrit est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la description du contexte général dans lequel nos développements s'inscrivent. Pour cela, le rôle, les enjeux, les contraintes de la fonction de production y sont présentés. Nous définissons ce qu'est un système de production et présentons une classification des systèmes de production. Les enjeux, les objectifs, ainsi que les différents niveaux de planification de la production sont abordés ensuite. Nous établissons le constat que la planification de la production ne peut pas être effectuée de façon performante sans considération des besoins et des activités de maintenance. En effet, l'objet majeur de la fonction de maintenance est d'assurer la disponibilité des ressources techniques de production. Nous présentons donc également la fonction maintenance dans ce chapitre dont la récente politique de maintenance prédictive permettant des gains de performance aussi bien pour la fonction de production que pour la fonction de maintenance. Nous mettons ainsi l'accent sur le besoin de coopération entre la fonction de production et de maintenance. Nous considérons alors que ce besoin doit être

traduit par une planification conjointe des activités de production et des activités de maintenance. Comme cette planification requiert l'ordonnancement de leurs activités, nous présentons également dans ce premier chapitre un état de l'art des méthodes développées pour traiter les problèmes de planification des tâches de production et des tâches de maintenance. De l'analyse de ces méthodes, nous établissons le constat que, bien que d'un intérêt certain, la considération des éléments associés à la maintenance prédictive, comme le pronostic, n'est pas faite dans les travaux de la littérature portant sur la planification conjointe des activités de production et celles de maintenance. Les développements présentés dans la suite de ce manuscrit visent à pallier ce manque.

Le deuxième chapitre est dédié à la présentation des fonctions de production et de maintenance, et plus particulièrement aux processus et données qu'elles mettent en œuvre ou exploitent pour organiser leurs activités dans le but de mettre en évidence leurs interactions et de modéliser les entités en jeu dans une planification conjointe de leurs activités en considérant à la fois les besoins de production et les besoins de maintenance induits dus à la sollicitation des équipements de production. Ceci nous a permis d'identifier quatre types d'entités pour lesquels nous présentons une modélisation dans une représentation orientée-objet.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la méthode permettant de faire collaborer ces entités afin d'ordonner conjointement les activités de production et celles de maintenance. Cette méthode fait appel aux systèmes multi-agents dont nous justifions l'intérêt. Les éléments conduisant à une certaine genericité de la méthode y sont également présentés. Enfin, nous décrivons le modèle SCEMP et son fonctionnement.

Le quatrième et dernier chapitre est consacré à l'implémentation et à l'évaluation de la méthode proposée. Afin de valider SCEMP nous réalisons des tests mettant en œuvre notre méthode sur des cas d'études divers. Ce chapitre décrit la procédure avec laquelle nous avons généré ces cas d'études. Nous y présentons aussi les résultats des différents tests que nous avons réalisés, et tirons des conclusions à partir de la comparaison de ces résultats.

Enfin, nous terminons notre manuscrit par une conclusion sur les développements présentés ainsi que des perspectives de travail afin d'accroître, entre autres paramètres, la genericité de la méthode proposée.



Chapitre 1

Gestion de production et de maintenance

1.1 Introduction

Les systèmes de production, tout en visant à être plus rentables, ont pour objectif d'améliorer en permanence la satisfaction des clients. Pour ce faire, ces systèmes doivent assurer la disponibilité en genre et en nombre des biens qu'ils proposent. Ceci permet aux entreprises de montrer qu'elles sont capables à tout moment de répondre aux besoins de leurs clients et leur octroie ainsi une légitimité dans leurs secteurs d'activités. Cependant, ce n'est pas toujours simple pour les ateliers de production de garantir en permanence des stocks suffisants de produits. La raison principale et évidente est la disponibilité des fonctions de production elles-mêmes. En effet, une fonction de production peut être indisponible pour plusieurs raisons, mais la raison principale reste la dégradation inévitable de l'état de "santé" des machines assurant cette fonction. Les dégradations impactent les durées de vie des composants constituant les machines. Chaque composant a une durée de vie au-delà de laquelle il devient inutilisable. Ceci fait que dans un centre de production, les machines sont susceptibles de tomber en panne à tout moment. Pour qu'une entreprise soit capable d'assurer la disponibilité des ressources de production, elle doit répondre aux questions suivantes :

- Comment prédire quand une machine tombera en panne ?
- Quelle gestion de production permettra le moins de pannes possibles ?
- Quelle est la gestion de maintenance à adopter pour un maximum de disponibilité possible des ressources de production ?

Le but de ce chapitre est de donner un repère nécessaire pour comprendre ce qu'est aujourd'hui une fonction de production performante, quelles sont ses contraintes et ses enjeux. Pour ce faire, d'abord nous décrivons ce qu'est un système de production et nous donnons quelques classifications selon lesquelles les systèmes de production se diversifient. Nous abordons ensuite la gestion de production, en commençant par définir ses objectifs, ses enjeux et enfin ses différents niveaux de planification. Nous montrons ensuite l'importance de la fonction de maintenance dans les systèmes de production et la nécessité de la coopération entre elle et celle de production en soulignant les aléas et les particularités du problème d'ordonnancement dans les systèmes de production. Les différents types de problèmes d'ordonnancement sont présentés dans ce chapitre, ainsi qu'un état de l'art sur les différentes méthodes développées dans la littérature traitant le problème de la planification des tâches de production et de maintenance.

1.2 Systèmes de production

Un système de production est un ensemble de ressources réalisant des opérations de transformation qui constituent le processus de production [Gillet-Goinard and Maimi, 2015]. Ces opérations conduisent à la création de biens et de services et peuvent consister en des transformations de formes (modification des produits eux-mêmes), des transformations dans le temps (fonction de stockage), dans l'espace (fonction de transport), etc. Les ressources constituant un système de production peuvent être de quatre types :

- des équipements (machines, outillages, ...),
- des humains (opérateurs, ...),
- des matières (matières premières, composants, sources d'énergie),
- des informations techniques ou procédurales (gammes, nomenclatures, ...).

Différents éléments participent à la réalisation des activités de production. Ces éléments sont classifiés en fonction de la nature et du secteur d'activité du système de production. Selon la théorie des systèmes appliqués, un système de production est décomposé en trois sous-systèmes (figure 1.1) : le système physique de production, le système d'information et le système de décision [Pujo and Kieffer, 2002], [Letouzey, 2001], [Coudert, 2000].

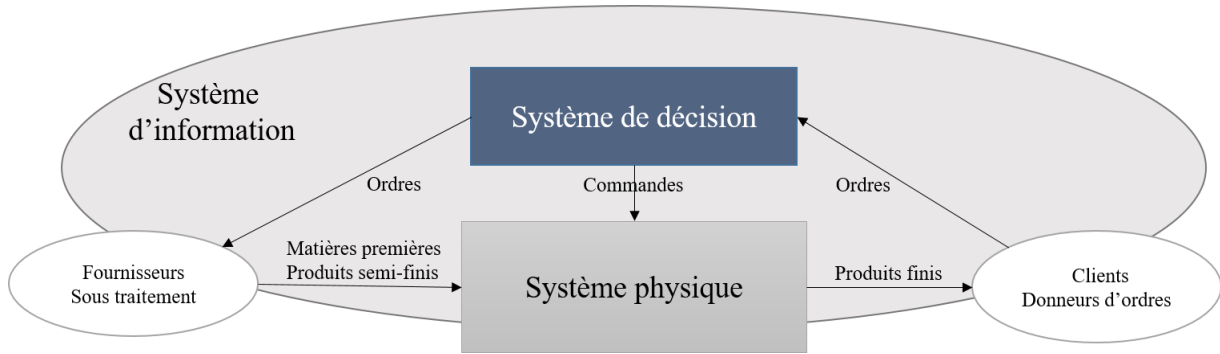


FIGURE 1.1 – Décomposition d'un système de production

Le système physique regroupe l'ensemble des ressources physiques de production. Il est destiné à transformer les matières premières et produits semi-finis en produits finis ;

Le système d'information regroupe les informations qui circulent ou sont mémorisées dans le système de production. Ce système est chargé de créer, collecter, stocker, traiter et distribuer les informations qui transitent dans le système de production. Ces informations peuvent être d'origines externes (provenant de l'environnement) ou d'origines internes (informations liant le système de décision et le système physique, ou internes au système de décision) ;

Le système de décision permet de piloter le système physique. Il a pour but de contrôler l'évolution du système physique en fonction de l'état de ce dernier et de l'état de l'environnement, des objectifs qui lui sont fixés et de la méthode de gestion retenue. Il transmet au système physique des ordres ou commandes résultant de nombreuses prises de décision basées sur les données transmises par le système d'information. Deux niveaux de décisions peuvent être identifiés [Giard, 2003] :

- Niveau 1 : La gestion prévisionnelle, qui anticipe la programmation d'un ensemble de décisions afin de satisfaire les besoins des clients.
- Niveau 2 : Le pilotage, qui développe les décisions en temps réel.

Il est nécessaire de préciser la variété des systèmes de production rencontrés puisque la nature et l'importance des décisions varient largement selon les cas de figure rencontrés.

1.2.1 Classification des systèmes de production

Plusieurs classification des systèmes de production ont été proposées. Dans cette section nous classons les systèmes de productions selon différents critères.

1.2.1.1 Classification selon la relation avec le client

D'après Gilles Hétreux [Hetreux, 1996], le mode de production dans son rapport avec la demande est une caractéristique à prendre en compte dans une typologie des entreprises manufacturières. Selon la stratégie d'une entreprise vis-à-vis de sa clientèle, nous distinguons les systèmes de production dans lesquels la production est déclenchée par les demandes des clients, de ceux dont la production s'effectue sur une anticipation de ces demandes (stockage des produits).

Production sur stock : La production d'un produit est déclenchée lorsque le niveau de stock de ce dernier passe au dessous d'un certain seuil (figure 1.2). L'utilisation de ce type de fonctionnement est justifié lorsque le temps de fabrication des produits est important. Avoir des produits prêts dans le stock permet de réduire la durée entre la date de la commande et la date de livraison du produit. Ce type de fonctionnement est généralement utilisé lorsque la demande est prévisible et que la gamme du produit est peu évolutive.



FIGURE 1.2 – Production sur stock

Production à la commande : La production est déclenchée en fonction de la demande des clients (figure 1.3). Ce type de fonctionnement consiste à ne fabriquer que ce qui a été commandé par le client. Il permet de réduire le stock, mais en revanche, la durée entre la date de la commande et la date de livraison est plus importante. Ce mode de production est généralement utilisé lorsque la demande est peu prévisible, pour des produits à forte valeur ajoutée ou spécifiés par le client.

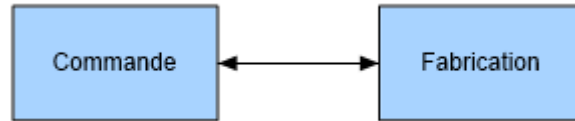


FIGURE 1.3 – Production à la commande

Production sur programme : Ce sont des programmes de production qui déclenchent la fabrication (figure 1.4). Ceux-ci sont déterminés à partir de prévisions de ventes et de commandes fermes.

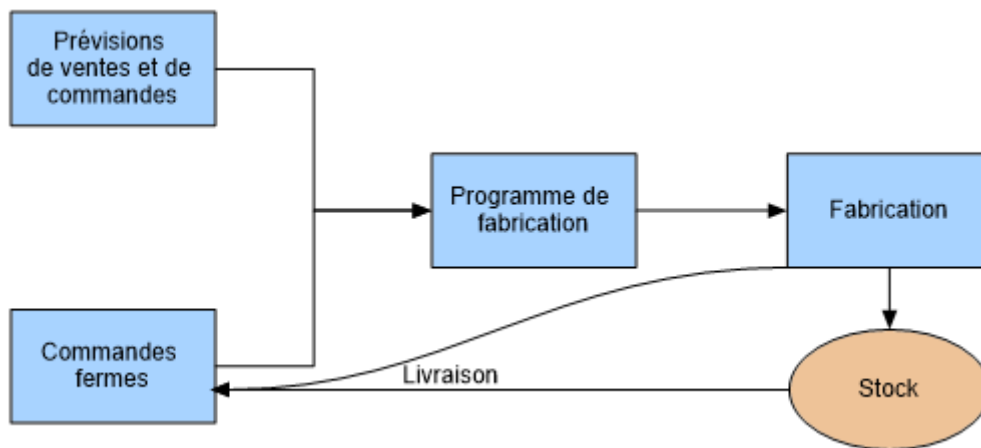


FIGURE 1.4 – Production sur programme

Assemblage à la commande : Ce type de fonctionnement consiste à stocker les produits sous forme d'en cours mais qui ne sont finalisés qu'à la commande effective du client (figure 1.5). Il permet à l'entreprise de personnaliser ses produits à la dernière minute en fonction de la demande du client.

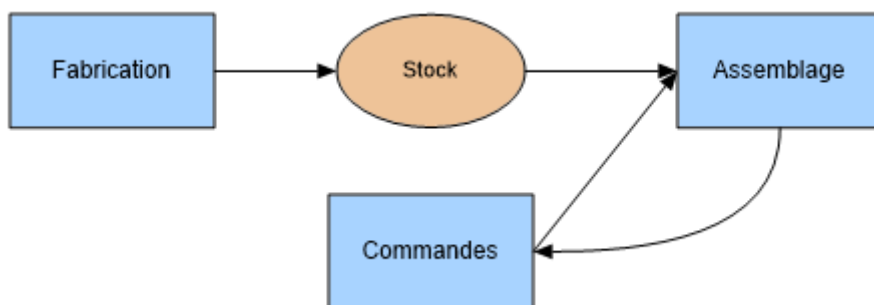


FIGURE 1.5 – Assemblage à la commande

Bien entendu, une entreprise peut combiner plusieurs modes de production : sur stock pour certains produits, à la commande pour d'autres, on parle alors de production hybride. .

1.2.1.2 Classification selon la nature et le volume des flux

Dans un même secteur d'activités, le volume de production est une caractéristique majeure. Il s'agit du volume de production moyen par unité de temps, c'est-à-dire la quantité moyenne de produits réalisés pour une durée donnée (jour, semaine, mois, etc.). Les systèmes de production sont ainsi répartis en plusieurs catégories [Marty, 1997], [Bénassy, 1998], [Hetreux, 1996].

Production à flux continu : La production s'effectue en continu (souvent 24h/24h et 7 jours/7). Dans ces systèmes les produits sont des fluides, à défaut les flux de production sont quasi-continus : production électrique, industries chimiques, pharmaceutiques et certaines productions agro-alimentaires (boissons par exemple).

Production à flux discret : Dans ce genre de systèmes les produits sont fabriqués en discontinu et sont distingués individuellement. Les quantités sont généralement restreintes et les produits sont variés. C'est le cas des industries manufacturières où trois classes peuvent être répertoriées :

- Les systèmes de production en grande série où les produits sont fabriqués en masse. Il s'agit de produits peu diversifiés ou standardisés, fabriqués en grande quantité, pour réaliser des économies d'échelle (réduction des coûts de production du fait des quantités). Les moyens de production sont dédiés sous forme de lignes de production spécifiques à chaque produit. Lorsque la série porte sur de grandes quantités (plus de 100 000 unités), on parle alors de production de masse.
- Les systèmes de production en petite et moyenne série. Il s'agit, contrairement à la classe précédente, d'ateliers dans lesquels la diversité des produits ne permet pas une spécialisation des moyens de production. Les produits sont plus ou moins diversifiés et suivent leur propre chemin sur des ressources communes.
- Les systèmes de production unitaire pour lesquels la taille de produit ou la demande impose une production de très faible quantité avec une grande variété de produits. Les produits se font sur mesure à l'unité. L'activité de conception (ou d'adaptation d'un produit déjà existant) est prédominante et répond à des besoins particuliers qui font l'objet d'un cahier de charges bien détaillé. Ces organisations sont typiques des secteurs de l'aéronautique et du spatial, du bâtiment, des constructions navales, conception des logiciels, etc.

Production par projet : Ce système est conçu pour fabriquer des produits très complexes, volumineux, coûteux et nécessitant une grande personnalisation au point de rendre le produit unique ou presque. Dans ce genre de systèmes, la fabrication est gérée comme projet. La plupart du temps, les produits sont fabriqués sur le site final, par exemple la construction de bâtiments, les chantiers navals, etc.

1.2.1.3 Classification selon le cheminement des flux

D'une manière générale, selon le cheminement des produits à travers l'atelier et l'ordre des opérations, on distingue trois types d'organisations d'ateliers :

Flow-shop : Nous retrouvons ce type de cheminement dans les ateliers de production de masse avec peu de variété de produits. Un tel atelier est aussi appelé "atelier à cheminement unique" où toutes les gammes des produits sont similaires. Ainsi, l'ordre de passage des opérations sur les machines est le même pour toutes les fabrications.

Job-shop : Dans cette classe d'ateliers, chaque produit possède son propre cheminement sur les machines (atelier à cheminement multiple). Ce type d'ateliers est dédié à la production d'une grande variété de produits.

Open-shop : Dans ce cas, le cheminement des produits est multiple, il diffère du job-shop dans le fait que les produits ne possèdent pas de gamme. L'ordre de passage des tâches est ainsi quelconque (atelier à cheminement libre).

Dans notre travail nous nous intéressons à la production à flux discret car ce sont généralement ces flux qui posent le plus de problèmes. En effet, dans cette catégorie, le pilotage des flux et, plus particulièrement, les problèmes d'ordonnancement sont les plus complexes [Nasri, 2013].

1.2.2 Gestion de production

Il fut une époque, avant que les systèmes de production ne soient aussi développés, où la production pouvait s'étudier indépendamment du reste de l'entreprise. La grande demande sur les marchandises faisait en sorte que la production ne dépendait pas des besoins concrets des clients. Les entreprises étaient assurées que leurs produits seraient vendus [Pillet et al., 2011]. Les stocks servaient d'amortisseur entre l'approvisionnement et la production (stocks de matières premières), ou entre la production et la vente (stocks de produits semi-finis voire finis).

Les stocks permettent toujours une meilleure gestion des délais, en améliorant ainsi les niveaux de satisfaction des clients, ils permettent aussi d'établir l'équilibre entre des ateliers qui n'opèrent pas toujours au même rythme. Cependant, une mauvaise gestion de ces stocks peut causer de graves problèmes à l'entreprise. En effet, s'ils n'existent pas, l'entreprise peut être conduite à des difficultés de production et s'ils sont trop importants, ils entraînent de lourdes contraintes financières.

La gestion de production consiste, notamment, à décider ce qu'il faut fabriquer et quand est-ce qu'il faut le fabriquer. La gestion de production est l'ensemble des méthodes et des décisions qui permettent une organisation efficace des moyens de production dans une entreprise [Wolosewicz, 2008]. Elle permet de réaliser les opérations de production en respectant les conditions de qualité, coûts et délais qui résultent des objectifs de l'entreprise en assurant l'équilibre entre le taux d'utilisation des ressources et les délais de livraison. Ces objectifs sont discutés plus en détail dans la section suivante.

1.2.2.1 Objectifs de la gestion de production

Une des premières tâches des responsables de production est de se situer par rapport aux objectifs de l'entreprise et aux contraintes que l'économie de marché induit. Cette sensibilisation est un préalable indispensable à toute action en profondeur, afin que le résultat des efforts multiples et variés soit maximalisé par la convergence vers un même but. Les systèmes de production actuels doivent assurer une meilleure productivité avec un coût moyen optimisé. Pour cela, il est nécessaire de concevoir des systèmes de plus en plus flexibles capables de s'adapter aux changements de la production et de réduire les temps d'arrêt. En effet, les systèmes de production sont soumis à des aléas comme les demandes exceptionnelles des clients, les pannes de machines, les retards de livraison, etc. Ces aléas mettent les systèmes face à des contraintes et des enjeux importants [Mourani, 2006]. Pour cela, outre sa finalité première qui est de produire des biens, la gestion de production cherche à satisfaire d'autres objectifs secondaires. Les objectifs de la gestion de production peuvent être de natures et de sources diverses. Une typologie fréquemment rencontrée distingue les objectifs liés à la satisfaction du client (objectifs externes) de ceux liés à l'optimisation de l'utilisation du système de production (objectifs internes) [Coudert, 2000].

Objectifs externes

Cinq objectifs peuvent être assignés à la satisfaction du client. Il s'agit d'objectifs de volume, de qualité, de délais, de flexibilité ou de coût.

Coût : Afin de garantir sa compétitivité, l'entreprise doit se servir de tous les moyens dont elle dispose pour mettre au point un système de production qui propose les plus faibles coûts de production possibles. La réduction des coûts de production permet à l'entreprise d'améliorer la marge bénéficiaire sur les ventes réalisées.

Qualité : La qualité des produits est le critère qui influence le plus la satisfaction des clients, d'où le grand intérêt que porte les entreprises à la qualité de leurs produits.

Quantité : L'entreprise doit adapter sa capacité de production aux besoins et habitudes de sa clientèle. La production d'une quantité insuffisante risque de faire perdre des clients à l'entreprise, mais aussi une production exagérée risque de nuire grandement à l'entreprise.

Flexibilité : La flexibilité d'un système de production permet d'assurer une production simultanée de plusieurs types de produits différents en même temps, ainsi que de s'adapter aux variations de la demande, mais aussi de tenir compte des changements dans l'environnement de production (nouvelles technologies, nouvelles organisations, nouvelles méthodes, etc.).

Délais : Le délai général contient le délai de fabrication, ainsi que le délai de distribution et de livraison. L'entreprise doit agir pour améliorer ces délais pour réaliser un délai général raisonnable, qui lui permettra de répondre rapidement à la demande de sa clientèle.

Selon [Marty, 1997], ces objectifs ne sont pas indépendants, de sorte que si les quantités produites sont augmentées, ou les délais raccourcis, cela risque de nuire à la qualité. De même, augmenter les quantités produites fait généralement baisser les coûts, alors que ceux-ci augmentent avec la réduction des délais. Cet ouvrage souligne aussi le fait que lorsqu'une entreprise ne travaille qu'avec quelques produits mais les fabrique en grandes quantités, elle met en place en général des lignes de production spécialisées, contrairement à l'entreprise qui fabrique plusieurs produits différents en petites quantités qui aura tendance à opter pour des machines universelles, traditionnelles ou à commande numérique. Pour conclure, l'entreprise fait face à des exigences contradictoires, qu'elle se doit de manipuler et arbitrer afin d'arriver à un compromis qui satisfait la clientèle et qui respecte les objectifs et politiques de l'entreprise.

Objectifs internes

Les objectifs relatifs à l'optimisation de l'utilisation des systèmes de production sont beaucoup plus nombreux. Il peut s'agir par exemple de minimiser les temps de cycle, le niveau des en-cours et des stocks ou encore d'équilibrer la charge des ressources de production. Une structure générale de certains objectifs internes est donné dans [Grabot, 1998] où sont distingués les objectifs internes globaux des objectifs internes locaux (Figure 1.6). Les objectifs globaux concernent en général le procédé de fabrication, comme la gestion des stocks, la gestion des flux de production et l'utilisation des ressources du système de production. Les objectifs locaux quant à eux, concernent une ressource particulière du système de production. Le fait de satisfaire les objectifs locaux ne permet pas systématiquement de satisfaire les objectifs globaux et inversement [Coudert, 2000]. Cette structure permet de souligner le caractère conflictuel de certains objectifs par rapport à d'autres comme l'objectif "Maximiser l'utilisation d'une machine" et "Équilibrer la charge des ressources".

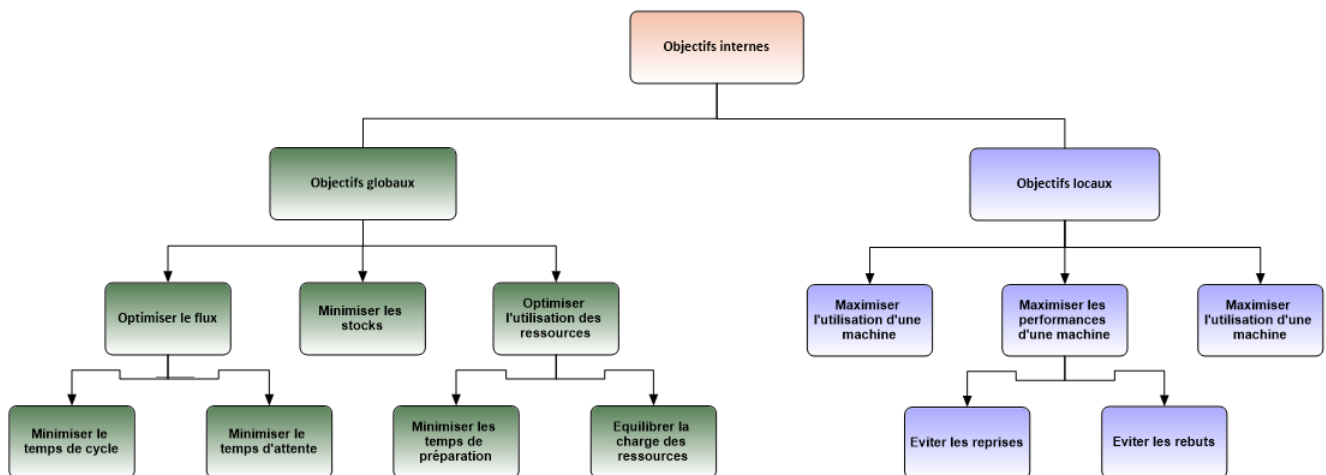


FIGURE 1.6 – Objectifs internes de la gestion de production [Grabot, 1998]

Autant d'objectifs complexes et souvent contradictoires dont l'importance peut varier à tout instant fait de la gestion de production plutôt une gestion de "compromis". Tous ces objectifs énumérés peuvent se formuler par les questions suivantes : Que fabriquer ? Combien ? Quand ? Comment et par qui ? A quel coût ?

La réponse semble pourtant facile : il n'y a qu'à produire des quantités correspondant à ce que nous prévoyons de vendre, des prévisions qui peuvent être faites par une des méthodes énumérées dans le chapitre 1 du livre [Bénassy, 1998] ou plus simplement qui résultent de ren-

seignements collectés auprès des clients. Toutefois, il est rarement indiqué de procéder ainsi, car l'organisation de la production présente une certaine inertie qui rend coûteux des changements trop fréquents dans les cadences. Or la demande n'est pas constante, elle varie d'une période à une autre, parfois du tout au tout, et sa prévision n'est jamais exacte. Il est donc préférable, chaque fois qu'il est possible, de découpler la production de la vente grâce au rôle d'amortisseur joué par le stock.

Les réponses aux questions énoncées précédemment pourraient donc être résumées par : "la prévision et la planification". En tenant compte de toutes les incertitudes, il existe deux logiques dans les méthodes de déclenchement des approvisionnements :

A partir des besoins : Deux méthodes répondent à cette logique, la fabrication à la commande et le MRP (Material Requirement Planning), planification des besoins en composants, permettant la planification de la production en fonction des matières premières et du temps en effectuant un regroupement des divers besoins.

A partir des consommations : Dans ce contexte, deux méthodes existent : la gestion sur stocks (modèle de Wilson) et la méthode Kanban.

Les méthodes basées sur les stocks permettent de réduire les surstockages induits par la consommation. Cependant elles possèdent également un sérieux inconvénient : lorsque la demande est trop forte, la rupture est certaine. Afin d'éviter ce genre de phénomène il est recommandé d'utiliser la méthode MRP.

1.2.2.2 Planification des besoins : MRP

La méthode MRP est une méthode de planification des besoins en composants. Elle est particulièrement adaptée aux entreprises fabriquant des produits constitués de nombreux composants. Joseph Orlicky, créateur de la méthode [Orlicky, 1975] indique qu'il existe deux types de produits : les produits à besoins indépendants qui correspondent aux produits finis ou pièces de rechange et les produits à besoins dépendants qui correspondent à toutes les autres pièces. Les besoins indépendants ne peuvent être, dans la plupart des cas, qu'estimés par prévision, alors que les besoins dépendants doivent être calculés [Javel, 2010], [Marty, 1997]. Ce concept a donné naissance à la méthode MRP (Material Requirement Planning ou Calcul des besoins),

qui vise à définir conjointement, à partir des demandes fermes des clients ou de leurs prévisions de ventes les besoins en composants et les ordres de fabrication et les commandes auprès des fournisseurs (ordres d'achat). En effet, dans la méthode MRP, les commandes des clients, fermes ou prévisionnelles, sont décomposées à travers les nomenclatures de fabrication par un algorithme nommé "calcul des besoins". En prenant en compte les divers délais (de production, d'approvisionnement), le MRP permet de proposer les ordres d'achat à passer aux fournisseurs et les ordres de fabrication (OF) destinés aux ateliers de production. Néanmoins un point faible de la méthode est qu'elle ne prend pas en compte la capacité de production du système dont on cherche à planifier les activités. Dans le cas où le cumul des charges demandées à une ressource de production est supérieur à sa capacité, il est nécessaire de redistribuer une partie de la charge dans le temps de telle façon que le plan de production proposé soit réalisable. Pour remédier à ce problème, la méthode MRP a été complétée par la recherche de l'adéquation charge/capacité des postes de charge créant ainsi la deuxième version de la méthode : MRP II (Management des Ressources de Production ou Manufacturing Resources Planning). MRP II s'ordonne sur plusieurs niveaux en fonction de l'horizon de la production [Higgins et al., 1996].

Définition 1.1 *Un horizon représente l'espace total de temps sur lequel l'entreprise organise ses prévisions et le degré de détail des informations [Javel, 2010]. Les horizons diffèrent en fonction du niveau de planification.*

Définition 1.2 *Une période correspond à un découpage de l'horizon. Un horizon de cinq ans par exemple peut être découpé en cinq périodes d'un an. Ce découpage se fait en général en fonction du temps nécessaire à la fabrication des produits (cycle de production) ou en fonction des changements saisonniers de l'activité (haute saison et basse saison par exemple).*

1.2.2.3 Les niveaux de planification

Le plus souvent, l'architecture décisionnelle d'une entreprise (figure 1.7) est divisée en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel, correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme [Javel, 2010]. Ces trois niveaux ont des caractéristiques communes en considérant le niveau hiérarchique, l'horizon temporel de la décision et enfin le degré de répétition (périodicité). Il est à noter que les niveaux de planification ainsi que les horizons sont interdépendants.

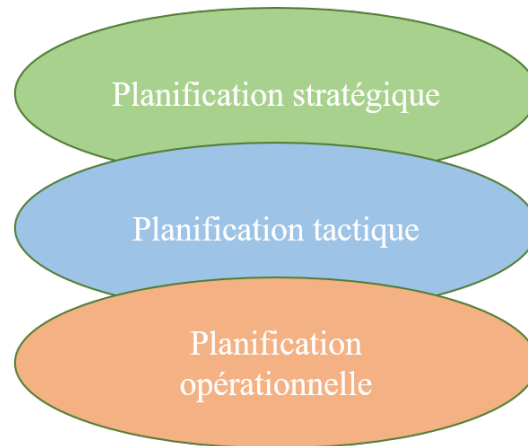


FIGURE 1.7 – Les différents niveaux de planification

La planification à long terme : aussi appelée planification stratégique [Thomas and Griffin, 1996], elle concerne les décisions prises par la direction générale. Les décisions prises à ce niveau influent sur l'avenir de l'entreprise en choisissant les politiques générales, les activités, les marchés à conquérir, et les outils stratégiques à acquérir ou à développer. Elles représentent des stratégies sur le long terme et couvrent en général un horizon de plus de cinq ans avec une périodicité peu fréquente. Les décisions issues de la planification à long terme portent essentiellement sur la gestion des ressources durables, afin d'assurer leur disponibilité permanente. A ce niveau de planification, c'est la direction qui décide de la stratégie d'entreprise à suivre à partir des prévisions commerciales agrégées et en cohérence avec la stratégie de l'entreprise. Ces stratégies se présentent sous la forme de plan stratégique ou global.

La planification à moyen terme : aussi appelée planification tactique, elle couvre un horizon mensuel et s'intéresse aux décisions dont la portée s'étend généralement sur quelques semaines et reflète des stratégies à moyen et long terme [Francois, 2007]. Les décisions issues de ce niveau de planification sont prises par les cadres de la production et les chefs d'ateliers, et portent généralement sur les problèmes liés à la gestion des ressources, plus concrètement sur la planification des activités qui utilisent ces ressources. Dans la planification à moyen terme, le plan industriel et commercial et le plan directeur de production à moyen terme sont réalisés grâce aux prévisions commerciales et en cohérence avec le plan stratégique.

La planification à court terme : aussi appelée planification opérationnelle ou ordonnance-

ment, elle concerne le niveau opérationnel. Les décisions ont une portée plus limitée dans l'espace et dans le temps (décisions sur la journée ou sur la semaine) [Thomas and Griffin, 1996]. Elles organisent les ressources pour produire les quantités fixées au niveau supérieur. A ce niveau, les décisions tactiques génèrent un plan détaillé de production applicable au niveau d'un atelier ou même d'un poste de travail (Plan par unités de production à court terme).

La méthode MRP II permet de gérer la production depuis le long terme jusqu'au court terme. La planification est effectuée par affinages successifs et la matérialisation de ces niveaux de planification est faite par l'intermédiaire de plannings, appelés aussi plans, qui s'articulent de la manière décrite dans la figure 1.8. Elle est constituée de cinq niveaux de planification, à savoir :

1. Plan Stratégique (PS) : il regroupe les décisions prises au niveau stratégique (à long terme). Les informations nécessaires pour son établissement proviennent principalement de variables externes au système industriel.
2. Plan Industriel et Commercial (PIC) : il permet de mettre en œuvre les objectifs enregistrés dans le plan stratégique. Il représente le lien entre la planification des ventes et de la production. Le PIC permet de mettre en œuvre les différents programmes directeurs de production.
3. Programme Directeur de Production (PDP) : ce plan représente le lien entre la planification tactique et la planification opérationnelle. Sa construction s'appuie sur les prévisions de vente et sur les propositions de production issues du PIC. Le PDP prend en considération la charge des ressources. Il contient ainsi les quantités de produits à fabriquer par période.
4. Calcul des Besoins Nets (CBN) : ce calcul est effectué à partir du nombre de produits déduit du PDP et de leurs nomenclatures. Le calcul des besoins en termes de composants et de matière première est réalisé et transmis aux ateliers sous forme d'Ordres de Fabrication (OF) et au service d'achat sous forme d'Ordres d'Achat (OA) tout en fixant des délais pour chacun.
5. Pilotage d'atelier : son objectif principal est de piloter les activités et leur mise en œuvre pour atteindre les objectifs de quantités et de délais fixés au niveau précédent. En effet,

les décisions de fabrication définies par le PDP et le CBN sont transformées sous forme d'instructions d'exécution détaillées destinées à piloter et contrôler à court terme l'activité des postes de travail dans l'atelier appelé "ordonnancement".

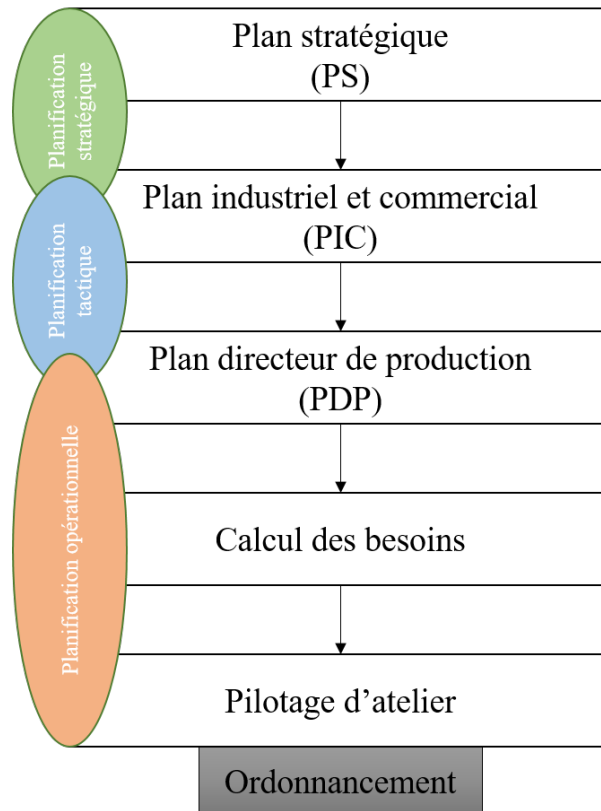


FIGURE 1.8 – Enchaînement des plannings dans MRP II [Javel, 2010]

1.3 L'ordonnancement dans les systèmes de production

Dans le cadre de la planification opérationnelle, une vision globale à cinq couches est illustrée sur la figure 1.9 [Nasri, 2013]. Le rôle de chaque couche est le suivant :

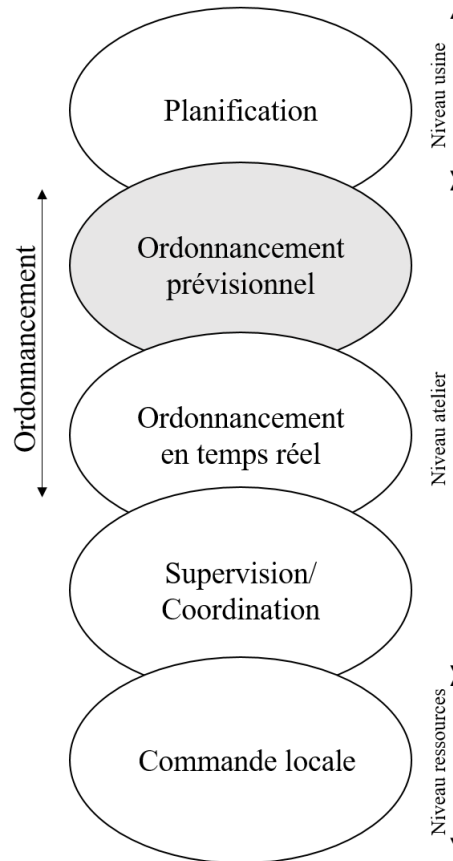


FIGURE 1.9 – La conduite hiérarchisée des systèmes de production

La planification au niveau de l'usine, consiste à réaliser un ordonnancement à capacité infinie permettant d'obtenir un plan de charge détaillé sur un horizon de temps bien défini. Ce plan fait apparaître des valeurs comme la quantité, la qualité, les délais de production et également une pré-allocation des ressources. Cette tâche consiste à transformer les informations du PDP et CBN en OF.

L'ordonnancement prévisionnel consiste, en fonction de ces *OF* et de la disponibilité des ressources consommables (matières premières, composants, ...) et partageables (postes de travail), à déterminer le calendrier prévisionnel de fabrication (cela revient à transformer les prévisions de fabrication à court terme en ordres d'exécution à très court terme). Il permet de déterminer un ensemble d'ordres partiels de passage des produits à transformer sur les diverses ressources du système. Cette allocation tient compte de la pré-allocation des ressources, des délais, des contraintes de capacité et de disponibilité des ressources, des contraintes de séquençement des opérations et enfin des critères à optimiser tels que le temps de production, les coûts, etc. Cette étape, étant l'objet principal de notre travail,

elle est détaillée dans la suite de ce manuscrit.

L'ordonnancement temps réel assure la cohérence entre les décisions prévisionnelles et les contraintes temps réel issues du comportement réel du système. Ce niveau est souvent qualifié de « charnière » puisqu'il permet de gérer au mieux, en fonction de l'état réel des ressources, les degrés de liberté non encore précisés par les niveaux supérieurs.

La supervision/coordination permet de gérer de manière cohérente les interactions entre les différentes ressources du système en fonction des contraintes telles que les ressources partagées, les séquencements obligatoires, les synchronisations diverses ou les parallélismes, etc. De par sa vision globale du système, la supervision permet d'introduire des informations globales au niveau de la commande locale afin d'optimiser les différentes opérations du système physique.

La commande locale correspond au niveau le plus bas de la structure décisionnelle. C'est la jonction entre le procédé et le système de commande. La commande locale consiste en un enchaînement déterministe d'opérations à effectuer sur les ressources du système physique. Ainsi, la commande locale intègre des fonctions de suivi et de régulation.

Le schéma de la figure 1.9 peut être scindé en deux classes. La première classe regroupe les deux couches supérieures (la planification et l'ordonnancement prévisionnel). La deuxième classe englobe les trois couches inférieures (ordonnancement en temps réel, supervision et commande locale) et concerne une gestion en temps réel où la proximité avec le système physique impose la prise en compte des contraintes réelles.

Dans le cadre de notre travail, nous nous limitons à la première couche, plus précisément à l'ordonnancement prévisionnel. Si l'établissement d'une planification est une tâche relativement aisée [Marty, 1997], il n'en est pas de même de l'ordonnancement qui, pour être efficace, doit satisfaire plusieurs objectifs précis :

- parvenir au cycle de réalisation le plus court,
- synchroniser la mise à disposition des composants d'un ensemble,
- éviter ou minimiser les retards,
- minimiser le nombre de tâches en retard,
- minimiser les en-cours.

Les contraintes sont aussi multiples :

- contraintes de capacité, comme une machine exécutant au plus une opération à la fois,
- contraintes techniques, comme une fonctionnalité spécifique,
- contraintes temporelles, comme les temps opératoires et de lancement, les temps d'attente entre les opérations, les temps de transport, etc.
- contraintes de disponibilité, comme la disponibilité des machines, des opérateurs, etc.

Nous rappelons que dans l'ordonnancement prévisionnel, la structure, le séquençage et les délais des OF dans le système de production sont connus. Notre objectif est de définir en détail le planning d'exécution des tâches sur les machines, pour cela il faut déterminer l'instant où ces tâches doivent commencer ainsi qu'identifier la machine sur laquelle chaque tâche sera exécutée. Autrement dit, il faut résoudre un problème d'ordonnancement.

1.3.1 Problèmes d'ordonnancement

La théorie de l'ordonnancement appartient à la classe des problèmes d'optimisation et relève de la recherche opérationnelle et de l'optimisation combinatoire [GOThA and Picouleau, 2004]. Elle consiste à planifier l'exécution de tâches et l'allocation de ressources avec comme objectif l'optimisation d'une ou de plusieurs mesures de performance [Deppner, 2004]. Un problème d'ordonnancement est composé, de façon générale, d'un ensemble de tâches soumises à certaines contraintes et dont l'exécution nécessite des ressources.

Définition 1.3 *Résoudre un problème d'ordonnancement consiste à organiser ces tâches, c'est-à-dire à déterminer leurs dates de début et à leur attribuer des ressources, de telle sorte que les contraintes soient respectées et que cela satisfasse au mieux l'objectif d'optimisation [Lopez, 1991], [GOThA and Picouleau, 2004].*

Une tâche est un travail dont la réalisation nécessite un nombre d'opérations élémentaires.

Souvent, l'exécution d'une tâche ne peut débuter avant une date de disponibilité et doit être achevée avant une date échue. Chaque opération élémentaire peut être interrompue ou pas (contrainte de préemption). Elle nécessite un certain nombre d'unités de temps (sa durée) et doit être exécutée sur une ressource qui dispose de certaines fonctionnalités. Les opérations sont souvent liées entre elles par des relations d'antériorité. Si ce n'est pas le cas, on dit qu'elles sont indépendantes.

Une ressource est un moyen, technique ou humain, permettant la réalisation des tâches et dont la disponibilité est limitée ou non. Les ressources peuvent être renouvelables (la quantité de ressource ne change pas à la fin d'une tâche), consommables (l'utilisation de la ressource fait diminuer la quantité de ressource disponible), disjonctives (non partageables, elles ne peuvent exécuter qu'une seule tâche à la fois) ou cumulatives (peuvent être utilisées simultanément par plusieurs tâches).

1.3.2 Complexité des problèmes d'ordonnancement

La théorie de la complexité [Rardin, 1998], [Cook, 1971] a pour but d'analyser les coûts de résolution, notamment en terme de temps de calcul, des problèmes d'optimisation combinatoire. Il s'agit souvent d'une estimation du nombre d'itérations à exécuter pour résoudre les instances d'un problème, cette estimation étant un ordre de grandeur par rapport à la taille de l'instance. Parmi les estimations possibles, celle du pire des cas, considérant l'instance la plus difficile du problème à traiter, est souvent retenue permettant ensuite d'évaluer le temps de calcul maximal nécessaire à l'obtention du résultat du problème. Cette théorie de la complexité permet d'établir une classification des problèmes en plusieurs niveaux de difficulté. Il existe un très grand nombre de classes de complexité différentes, mais nous nous limiterons ici à une présentation succincte nous permettant de caractériser seulement les problèmes combinatoires.

Les classes de complexité ont été introduites pour les problèmes de décision¹, pour lesquels deux classes ont été définies :

- la classe des problèmes polynômiaux P est la classe des problèmes pouvant être résolus par un algorithme polynomial déterministe c'est-à-dire que le temps de calcul de l'algorithme est fini et s'écrit sous forme d'un polynôme. On note la complexité polynomiale d'ordre k d'un problème de taille n $O(n^k)$ avec k et n entiers. C'est la classe des problèmes les plus "faciles".
- La classe des problèmes NP (pour Non déterministe Polynomial) est la classe des problèmes de décision pouvant être résolus par un algorithme polynomial non déterministe, c'est-à-dire que la résolution des problèmes NP peut nécessiter l'examen d'un grand nombre (éventuellement exponentiel) de cas, mais que l'examen de chaque cas doit pouvoir

1. Un problème de décision est un énoncé auquel la réponse peut être uniquement "oui" ou "non".

être fait en temps polynomial.

Il existe une variété de problèmes dans la classe NP, cependant, certains problèmes apparaissent plus difficiles à résoudre que d'autres. Ainsi la classe des problèmes les plus difficiles de la classe NP est appelée NP-complet.

La complexité d'un problème combinatoire est liée à celle du problème de décision qui lui est associé. En effet, pour chaque problème d'optimisation nous pouvons associer un problème de décision dont le but est de déterminer s'il existe une solution de valeur supérieure (respectivement inférieure) à une valeur donnée. Un problème combinatoire est dit :

NP-Complet s'il est dans la classe NP et si le problème de décision qui lui est associé est dans la classe P. C'est-à-dire que la résolution d'un problème NP-complet nécessite un nombre exponentiel de cas mais le traitement de chaque cas se fait par une procédure polynomiale.

NP-difficile si le problème de décision qui lui correspond est NP-complet. C'est-à-dire que la résolution d'un problème NP-difficile nécessite un nombre exponentiel de cas mais le traitement de chaque cas ne peut pas être réalisé par une procédure polynomiale.

Quand un problème combinatoire est NP-complet ou NP-difficile, il est difficile de construire un algorithme le résolvant dans un temps polynomial. Mais dans certains cas, il est possible de construire des algorithmes très efficaces, appelés algorithmes pseudo-polynomiaux, pouvant le résoudre. Le problème étudié est alors dit NP-complet (respectivement, NP-difficile) au sens faible. Dans le cas contraire, il est dit NP-complet (respectivement, NP-difficile) au sens fort.

Pour étudier la complexité d'un problème d'ordonnancement, il faut donc prendre en compte la particularité de chaque problème. Mais en général les problèmes d'ordonnancement sont NP-difficiles [Carlier and Chretienne, 1982]. Ceci signifie que le temps nécessaire pour trouver la solution optimale est très grand même pour le plus puissant des ordinateurs [Delahaye, 1993].

1.3.3 Classification des problèmes d'ordonnancement

Une classification des problèmes d'ordonnancement peut être établie en fonction du nombre de machines et leur ordre d'utilisation pour fabriquer un produit (gamme de fabrication) qui dépend de la nature de l'atelier. Un atelier est défini par le nombre de machines qu'il contient et par leur type. Les différents types d'ateliers possibles sont les suivants :

- ateliers à une machine (\emptyset) où chaque tâche est constituée d'une seule opération. Dans ce cas, on appelle indifféremment tâche et opération ;
- ateliers à m machines parallèles où elles remplissent, a priori, toutes les mêmes fonctions. Selon leur vitesse d'exécution, on distingue :
 - les machines identiques (P) où la vitesse d'exécution est la même pour toutes les machines M_j et pour toutes les tâches J_i ;
 - les machines uniformes (Q) où chaque machine M_j a une vitesse d'exécution propre et constante. La vitesse d'exécution est la même pour toutes les tâches J_i d'une même machine M_j ;
 - les machines indépendantes (R) où la vitesse d'exécution est différente pour chaque machine M_j et pour chaque tâche J_i .
- ateliers à machines dédiées où elles sont spécialisées et ne peuvent réaliser que certaines opérations. Dans cette catégorie, chaque tâche est constituée de plusieurs opérations et chaque opération requiert une certaine fonctionnalité de la machine, nous appelons ceci une contrainte d'éligibilité. En fonction du mode de cheminement des opérations sur les différentes machines, nous rappelons les trois types ateliers spécialisés décrits dans la section 1.2.1.3 : flow-shop (F), job-shop (J) et open-shop (O).

Il existe une très grande variété de problèmes d'ordonnancement. Pour leur identification et leur classification nous adoptons la notation proposée dans [Graham et al., 1979]. Cette notation est constituée de trois champs $\alpha|\beta|\gamma$:

- Le premier champ α est constitué de deux éléments : $\alpha = \alpha_1\alpha_2$ et décrit l'environnement des machines utilisées. Le paramètre $\alpha_1 \in \{\emptyset, P, Q, R, F, J, O\}$ décrit le type d'atelier utilisé (voir les notations précédemment décrites). Le paramètre α_2 indique le nombre de machines utilisées. Lorsque α_2 n'est pas précisé, le nombre de machines est quelconque.
- Le deuxième champ β décrit les caractéristiques des tâches et des machines. Il indique si des éléments spécifiques sont à prendre en compte tels que des dates au plus tôt (r_j), des contraintes de priorité (w_j), des contraintes de précédence entre les tâches (q_j), des contraintes de disponibilité (a_i), des contraintes de préemption des tâches ($prem_j$), des contraintes d'éligibilité (M_j), etc.

- Le dernier champ γ indique le critère d'optimisation, qui peut donc prendre de nombreuses valeurs et peut être une combinaison de plusieurs critères. Parmi les critères d'optimisation étudiés nous citons :
 - $\min C_{max}$: minimiser la date de fin d'exécution de toutes les tâches,
 - $\min L_{max}$: minimiser le retard maximal,
 - $\min \sum C_j$: minimiser la somme des dates de fin d'exécution de toutes les tâches,
 - $\min \sum L_j$: minimiser la somme des retards,
 - $\max \sum U_j$: maximiser le nombre des tâches en avance,
 - etc.

1.3.4 Méthodes de résolution

Pour résoudre un problème combinatoire, il existe principalement deux catégories de méthodes : les méthodes exactes (garantissant l'optimalité de la solution trouvée mais avec un temps de calcul très grand) et les méthodes approchées (fournissant une solution de bonne qualité en un temps raisonnable). Nous listons ici quelques méthodes de résolution des problèmes combinatoires exactes et approchées.

1.3.4.1 Méthodes exactes

On peut définir une méthode exacte comme une méthode qui garantit l'obtention de la solution optimale. L'utilisation de ces méthodes s'avère particulièrement intéressante lorsque la complexité de l'instance étudiée n'est pas très élevée. Parmi ces méthodes, on peut citer les méthodes de séparation et d'évaluation, de programmation dynamique et de programmation linéaire et non-linéaire.

Méthodes de séparation et d'évaluation : Ces méthodes sont basées sur une technique implicite énumérative [Méndez et al., 2006]. En effet, elles permettent de trouver une solution optimale, en construisant un arbre de recherche, en examinant systématiquement les sous-chemins qui sont susceptibles d'aboutir à une solution réalisable et en excluant les autres sous-arbres de la recherche.

La programmation dynamique : C'est une méthode d'optimisation qui opère par phases [Held and Karp, 1962]. Son efficacité repose sur le principe d'optimalité de Bellman, à savoir "toute politique optimale est composée de sous-politiques optimales" [Cao and Ho, 1990]. Cette méthode permet une résolution ascendante. La solution optimale d'un problème est obtenue à partir des solutions de tous les sous-problèmes.

La programmation linéaire : C'est une des techniques classiques de la recherche opérationnelle. Cette méthode repose sur la méthode du simplexe [Korte et al., 2010]. Elle consiste à minimiser une fonction coût en respectant des contraintes. Les critères et les contraintes sont des fonctions linéaires des variables du problème.

La programmation non linéaire : Si au moins une contrainte ou la fonction objectif n'est pas une combinaison linéaire de variables d'optimisation, on parle alors de programmation non linéaire. Dans l'article [Kallrath, 2005], différentes applications de cette méthode pour la résolution des problèmes de planification, en particulier dans l'industrie, sont présentées.

Méthodes de décomposition : Plusieurs problèmes pratiques sont modélisés par des programmes en nombres entiers. La difficulté de la résolution de ces modèles réside dans la caractérisation de leurs domaines réalisables. Face à cette difficulté, les chercheurs se sont orientés vers des approximations de ce domaine en décomposant le problème en sous-problèmes plus faciles à résoudre [Touati et al., 2007]. La décomposition entraîne la relaxation de certaines contraintes et permet donc de trouver une borne sur la valeur optimale. Les bornes obtenues sont ensuite utilisées pour guider et accélérer la phase d'exploration par un algorithme de type branch-and-bound par exemple.

1.3.4.2 Méthodes approchées

Les problèmes d'ordonnancement étant en général NP-difficiles, leur résolution par des méthodes exactes nécessite trop de temps de calcul. Pour cela, on cherche à les simplifier pour réduire les temps de calcul au prix d'une dégradation de la qualité de la solution. Il existe plusieurs familles de méthodes qui permettent d'approcher efficacement la solution optimale. Un grand nombre de méthodes produisant des solutions suboptimales ont été développées pour les problèmes d'ordonnancement. La plupart d'entre elles sont adaptées à la résolution d'un type de problème donné et sont appelées heuristiques. D'autres, au contraire, appelées méta-heuristiques, peuvent être adaptés à différents types de problèmes.

Les heuristiques sont des méthodes empiriques, qui donnent généralement de bons résultats, sans être démontrables mathématiquement. Elles sont basées sur des règles simplifiées pour s'approcher d'un optimum selon un ou plusieurs critères tout en ayant un temps de calcul raisonnable [Moller, 1988].

Les métaheuristiques représentent des concepts généraux de résolution. Il faut formuler le problème abordé de telle manière qu'il soit adapté à l'application de ces concepts. Parmi les méthodes métaheuristiques nous distinguons :

- les méthodes à solution unique (recherche tabou, recuit simulé, etc.),
- les méthodes à population (colonies de fourmis, algorithmes génétiques, etc.).

1.3.4.3 Règles de priorité

Les méthodes basées sur les règles de priorité n'ont en général pour ambition l'optimisation mais proposent des solutions acceptables. Quel que soit le problème d'ordonnement traité et le principe de la méthode en œuvre, la règle de priorité va simplement permettre de départager des tâches qui doivent être affectées au même moment sur la même machine. La règle de priorité classe les tâches en conflit, la tâche la mieux classée est affectée sur la machine.

Il est recommandé de choisir les règles à utiliser de façon à respecter au mieux les objectifs assignés à l'ordonnement (respect des dates de livraison, charge maximum sur les machines etc.). Les règles les plus connues sont :

Aléatoire : sélectionné aléatoirement,

FIFO : (First In First Out) premier arrivé premier servi,

LIFO : (Last In First Out) priorité au dernier arrivé,

SPT : (Shortest Processing Time) priorité à la tâche ayant la plus petite durée,

LPT : (Longest Processing Time) priorité à la tâche ayant la plus grande durée,

EDD : (Earliest Due Date) priorité à la tâche ayant la plus proche date de fin souhaitée,

Une liste plus exhaustive des règles de priorité existantes est fournie dans [Haupt, 1989].

Dans le cas d'ordonnement sur une seule machine, toutes les tâches sont en conflits et l'utilisation d'une règle de priorité qui permet de choisir dans quel ordre placer les tâches, devient en soi une méthode d'ordonnement.

1.3.5 Aléas de l'ordonnancement de la production

Après avoir abordé le problème inhérent à la production, le constat établi est que la planification de la production ne considère pas les exigences des autres fonctions, notamment la maintenance. En effet, pendant de nombreuses années, la maintenance a bien souvent été considérée comme un « mal nécessaire » par la production et n'a pas réellement été intégrée dans ses prises de décisions au niveau opérationnel. L'occurrence de défaillances n'induisait pas de coûts de retard trop importants, la maintenance n'intervenait que pour les travaux correctifs. Par conséquent, la coordination des décisions prises par la maintenance avec celles prises par la production n'a reçu qu'une attention limitée. Ainsi, la majeure partie de la littérature dédiée aux problèmes d'ordonnancement se place dans le contexte où les ressources nécessaires à l'exécution des tâches sont disponibles en permanence. Cette hypothèse n'est plus fidèle à la réalité des entreprises d'aujourd'hui. Une situation de conflit s'est instaurée entre les fonctions de production et de maintenance lorsque de nouvelles méthodes de gestion de production telles que le juste-à-temps ont été introduites. Aussi, l'état de santé des machines se détériore en raison de leur utilisation et du vieillissement pouvant entraîner des pannes ou des retards imprévus lors de la réalisation de tâche de production causant ainsi la non qualité des produits. Pour cette raison, le temps de traitement réel d'un travail sera plus long que prévu. Afin de réduire l'effet de la détérioration de la machine, une stratégie optionnelle consiste à effectuer les entretiens des machines aux meilleurs moments, ce qui améliorera l'efficacité de la machine en la faisant revenir à son état opérationnel [Yin et al., 2017]. Cependant, nous observons que la production et la maintenance sont planifiées séparément malgré leurs fortes interactions [Berrichi et al., 2010]. Généralement, les tâches de maintenance sont souvent négligées pour augmenter la productivité, en conséquence, le nombre de pannes augmente et génère des coûts importants (souvent plus conséquents que ceux générés par un arrêt planifié) pour l'entreprise [Sloan and Shanthikumar, 2000]. Ceci diminue la capacité et réduit la disponibilité des moyens de production, entraînant une désynchronisation entre les différents niveaux hiérarchiques, une perturbation de la gestion de production ainsi qu'une désorganisation au sein de la chaîne logistique.

Afin de garantir un plan de production efficace et robuste, il est important d'intégrer la maintenance au niveau de l'ordonnancement prévisionnel pour non seulement planifier l'exécution des

tâches de production mais aussi anticiper les pannes et planifier les activités de maintenance sur les machines. La coopération de la maintenance avec la production doit permettre d'assurer que l'ordonnancement de la production laisse du temps à la maintenance pour intervenir, que le service de maintenance effectue ses activités aux bons moments et réagisse rapidement aux défaillances des machines.

Selon une étude statistique présentée dans [Buzacott and Hanifin, 1978], deux types de pannes de machines sont identifiés :

- les pannes dépendantes du temps qui dépendent du temps écoulé et qui sont indépendantes de la charge de la machine, de sorte qu'une machine peut tomber en panne même si elle n'a pas été utilisée,
- les pannes dépendantes des opérations, aussi appelées pannes progressives qui, dépendent du temps d'utilisation d'une machine.

D'après cette étude, les pannes dépendantes des opérations sont les plus communes et représentent plus de 70% des interruptions de production. En effet, une comparaison analytique entre les deux types de pannes et leur impact sur la productivité du système de production, réalisé par [Mourani, 2006], montre que les pannes d'équipements sont habituellement liées à leur utilisation. Pour cette raison, les modèles de pannes dépendantes des opérations pour les systèmes réels de production sont considérés plus réalistes que ceux des pannes dépendantes du temps. Cependant, les pannes dépendantes des opérations mènent souvent à des modèles délicats plus difficile à étudier. Dans cette étude nous nous concentrons sur ce dernier type de panne.

1.4 La fonction maintenance

Selon la norme AFNOR NF X 60-010, la maintenance est "l'ensemble des activités destinées à rétablir un bien (équipement) dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimum".

La maintenance, bien qu'elle soit souvent associée à la fonction production, est une fonction en elle-même, elle peut être étudiée séparément du reste des fonctions de l'entreprise. La

maintenance prend des formes variées selon le secteur d'activité, les particularités des machines utilisées et les stratégies de production adoptées par l'entreprise. Il existe deux grands types de maintenance : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Le critère permettant de distinguer ces deux types de maintenance est le moment de l'intervention par rapport à la date estimée ou effective de la panne. La maintenance préventive est effectuée avant la panne, alors que la maintenance corrective est réalisée après la panne. Elles sont présentées dans la section suivante.

1.4.1 Types de maintenance

Avant les années 1960, le service maintenance d'une entreprise avait pour principale mission d'intervenir sur les équipements en panne afin de les réparer le plus tôt possible [Diévert, 2010]. Cette approche de maintenance, dite corrective, a ensuite été peu à peu complétée par une approche plus anticipative des phénomènes de défaillance, c'est-à-dire par une maintenance réalisée avant que la défaillance ne se produise. Ces deux grands types de maintenance, corrective et préventive, présentent certaines variantes présentées dans la figure 1.10.

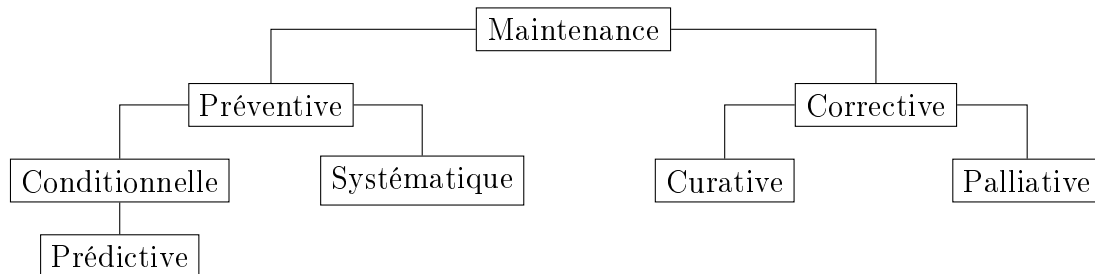


FIGURE 1.10 – Formes de maintenance [Gouriveau et al., 2017]

1.4.1.1 Maintenance Corrective

La maintenance corrective regroupe l'ensemble des activités opérées après la détection d'une défaillance, destinées à remettre le système dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise [Diévert, 2010]. Elle peut être palliative ou curative :

- Palliative : il s'agit de dépannage provisoire de la machine, elle doit être suivie d'une action curative dans les plus brefs délais,
- Curative : il s'agit d'une remise en l'état pleinement opérationnel.

1.4.1.2 Maintenance Préventive

La maintenance préventive a pour objectif d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des procédés [Cocheteux, 2010]. Les actions de maintenance préventive sont exécutées à des intervalles prédéterminés ou selon un critère adaptatif évalué en ligne. Elles sont destinées à réduire la probabilité de défaillance et augmenter la durée de bon fonctionnement d'un système. Une action de maintenance préventive peut être mise en œuvre selon trois types de stratégies : la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle.

- **Systématique** : il s'agit de regrouper des opérations effectuées systématiquement par rapport à un échéancier préétabli, ou une périodicité d'utilisation. Aucune intervention n'a lieu avant l'échéance déterminée à l'avance. Si l'équipement tombe en panne avant la date d'intervention fixée alors une période d'indisponibilité est engendrée. Inversement, un excès d'interventions inutiles est produit si l'équipement est maintenu alors qu'il aurait pu fonctionner encore un certain temps après la date d'intervention.
- **Conditionnelle** : il s'agit de baser la prise de décision sur les informations de surveillance du système obtenues en ligne ou hors ligne. La règle de décision utilise les données de surveillance du fonctionnement du système et des paramètres significatifs de ce fonctionnement (la mesure et l'analyse de données des capteurs). Les dates des interventions de maintenance et la nature de l'intervention sont donc déterminées en fonction de l'état observé du système obtenu par des techniques de diagnostic par exemple.
- **Prédictive** : il s'agit d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'opération de maintenance devra être réalisée. Elle est considérée comme une sous catégorie proche de la maintenance conditionnelle parce qu'elle se base également sur les données de surveillance des paramètres significatifs de la dégradation du système (le diagnostic). Elle nécessite en plus une capacité à prévoir l'évolution de la dégradation selon différents scénarios (le pronostic).

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, la plupart des travaux existants utilisent les informations issues du diagnostic, pour la prise de décision de maintenance (voir par exemple [Deloux et al., 2008], [Grall et al., 2002]). L'idée principale de la maintenance prévisionnelle est de projeter l'état actuel du système dans le futur, en utilisant des outils et techniques de pronostic, afin d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL - Remaining Useful Life) des composants

de la machine et de mieux planifier les tâches de maintenance. Les actions de maintenance étant planifiées avec davantage de précision, la maintenance prévisionnelle permet de faire des économies substantielles par rapport à la maintenance corrective ou préventive et fait actuellement l'objet d'un intérêt grandissant [Jardine et al., 2006].

1.4.2 Lien entre diagnostic et pronostic

Le diagnostic dans les systèmes industriels est une opération permettant de détecter les défauts, de localiser leurs origines et de déterminer leurs causes [Alexandre, 2006]. Le principe est d'utiliser des données relevées durant les utilisations réelles des systèmes et de les comparer aux connaissances sur le fonctionnement normal.

Le pronostic, selon la norme ISO 13381, est défini comme étant l'estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance.

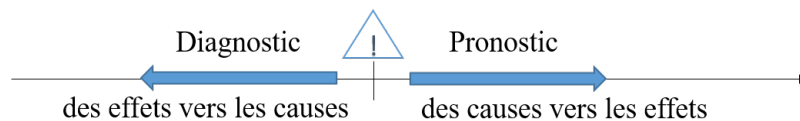


FIGURE 1.11 – Diagnostic vs Pronostic [Tobon-Mejia et al., 2012]

Le processus de diagnostic et de pronostic sont complémentaires (figure 1.12), le premier, comme nous venons de le mentionner, évalue l'état présent du système, puis transmet les informations au second qui effectue une projection dans le futur, avec pour objectif, au lieu de comprendre des phénomènes qui viennent d'arriver, d'anticiper leur apparition afin de recourir à des actions protectrices.

Le pronostic, très souvent associé à l'estimation de la durée de vie résiduelle (RUL) d'un composant [Luo et al., 2003], ne peut être envisagé avec certitude. Les données d'entrée du processus de pronostic sont elles-mêmes souvent entachées d'erreurs. Il est donc indispensable de prendre en compte la notion d'incertitude en sortie du processus de pronostic [Provan, 2003b]. Un résultat numérique exact n'a pas de signification s'il n'est pas encadré par un intervalle de confiance [Muller, 2005]. Le résultat ainsi obtenu donc par les méthodes de pronostic peut correspondre à des fonctions de densité de probabilités de défaillance à chaque instant t . Un exemple de représentation de cette incertitude du pronostic est présenté sur la figure 1.13.

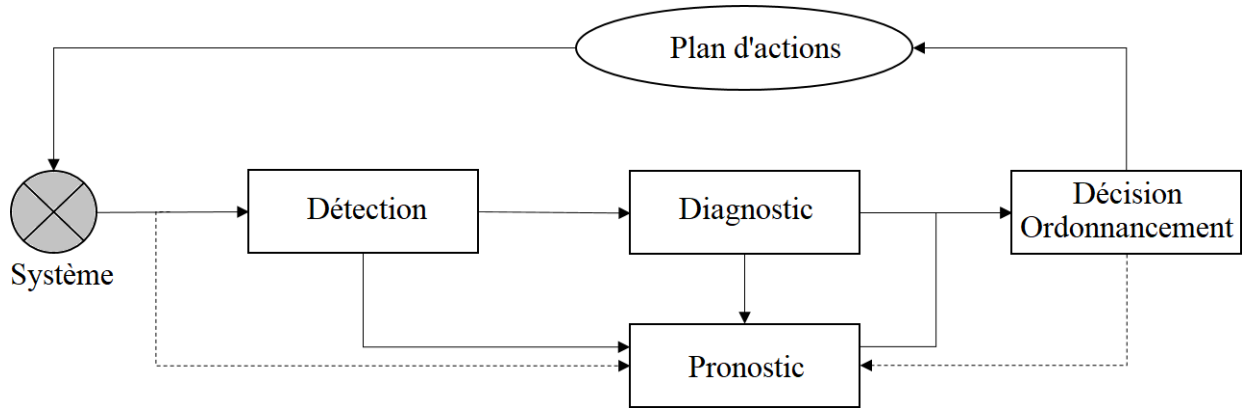


FIGURE 1.12 – Détection, diagnostic, pronostic et ordonnancement dans les systèmes de maintenance intelligente [Gouriveau et al., 2017]

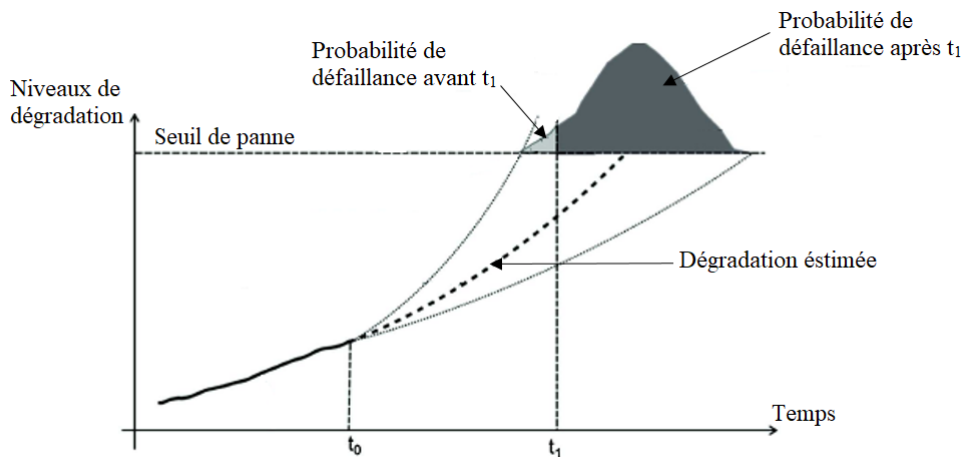


FIGURE 1.13 – Enveloppe d'incertitude associée à un pronostic [Desforges et al., 2017]

Dans la littérature, de nombreux travaux sur l'estimation de RUL de composants ont été développés pour différents types de systèmes et de composants [Nguyen, 2015]. Les travaux réalisés montrent que l'utilisation de l'information de pronostic apporte des bénéfices dans l'aide à la décision de maintenance et à la production. Les coûts de remplacement en cas de défaillance étant très élevés, le pronostic peut aider à réduire la fréquence des actions de maintenance corrective. L'information de pronostic de la santé du système en temps réel peut également être intégrée dans la prise de décision du modèle d'ordonnancement des tâches de production. Cependant, l'utilisation de cet indicateur dans la prise de décision de production dans les systèmes de production reste encore à développer.

1.4.3 Classification des approches de pronostic

Dans l'article [Lebold and Thurston, 2001], une première classification des approches de pronostic a été proposée. Cette classification historique a été reprise de nombreuses fois. Comme le montre la figure 1.14, cette représentation consiste à diviser les approches en trois classes représentées sous forme de pyramide prenant en compte des critères de précision, de coût et de complexité des résultats obtenus par chaque catégorie d'une part et de l'applicabilité des approches d'autre part. Ces méthodes sont :

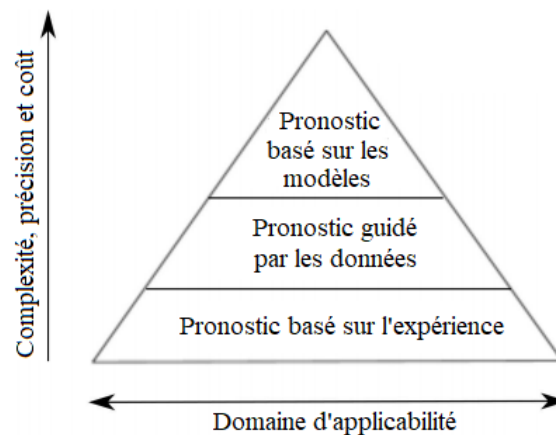


FIGURE 1.14 – Classification des approches de pronostic

Pronostic basé sur les modèles : Les approches basées sur les modèles sont basées sur des modèles issus des lois physiques ainsi que des modèles de dégradation construits par des expérimentations représentant le comportement du système et intégrant le mécanisme de dégradation.

Pronostic guidé par les données : Les approches basées sur les données s'appuient directement sur les données issus des indicateurs de dégradation du système. Ces données issues d'historiques de mesures obtenues lors d'utilisations précédentes ou sur des équipements similaires, représentent l'état actuel et/ou l'état passé du système.

Pronostic basé sur l'expérience : Les approches de pronostic basées sur l'expérience exploitent des formalisations des mécanismes de défaillance des systèmes par modèles probabilistes construits par la connaissance a priori, par retour d'expérience ou par jugement d'experts. Ces méthodes sont principalement utilisées lorsqu'il est trop difficile d'élaborer un modèle physique et qu'aucun dispositif de suivi de l'état de dégradation n'est

opérationnel [Byington et al., 2004].

Bien que les évolutions techniques aient permis aux entreprises d'améliorer leurs systèmes de production en termes de fiabilité et de réduction du nombre de tâches de maintenance, les problèmes d'ordonnancement des tâches de production et l'ordonnancement de la maintenance sont souvent résolus séparément, engendrant la plupart du temps des conflits entre ces deux services. En effet, les interventions de la maintenance sont souvent considérées comme un mal nécessaire par les producteurs, pourtant ce sont ces interventions qui rendent les machines disponibles pour réaliser les tâches de production. Pour cela, ces évolutions doivent s'accompagner d'une bonne gestion à la fois de la production et aussi de la maintenance. Une bonne synchronisation est indispensable entre les services production et maintenance afin d'accroître les revenus et la satisfaction de la clientèle tout en réduisant les coûts de production.

1.5 Ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance

L'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance n'a attiré que récemment l'attention des chercheurs. Nous présentons dans cette section un état de l'art sur ces travaux. Le contexte déterministe où les périodes d'indisponibilité sont connues à l'avance puis le contexte stochastique où les périodes d'indisponibilité arrivent de manière aléatoire sont présentés.

1.5.1 Cas déterministe

Dans le cas déterministe, on suppose connues à l'avance toutes les données concernant les périodes d'indisponibilité sur les machines, à savoir leurs dates de début ainsi que leurs durées. Ces études peuvent être divisées en deux classes : problèmes à une machine et problèmes à plusieurs machines.

Les problèmes à une machine ont un caractère fondamental car ils peuvent former la base de problèmes plus complexes. Ceci peut justifier le grand nombre d'études réalisées sur ces problèmes. Nous pouvons même dire qu'une étude complète de ce problème a été réalisée par différents chercheurs, comme [Lee, 1996], [Sanlaville and Schmidt, 1998], [Adiri et al., 1989], [Lee and Liman, 1992], [Liao and Chen, 2003], [Horn, 1974], [Graves and Lee, 1999], en consi-

dérant différentes mesures de performance (C_{max} , $\sum C_i$, L_{max} , $\sum U_i$, etc.), avec différents types de tâches (préemption des tâches autorisée ou pas) et des hypothèses spécifiques comme, par exemple, le nombre de périodes d'indisponibilité (N_{indisp}). En effet, certains travaux se restreignent au cas où la machine peut être indisponible au plus une seule fois ($N_{indisp} = 1$) pendant toute la période de l'ordonnancement alors que d'autres travaux plus génériques prennent en considération un nombre quelconque de périodes d'indisponibilité (N_{indisp} qlq), c'est-à-dire que la machine peut être indisponible plusieurs fois et ces périodes peuvent être aléatoires. La complexité de ces travaux est étudiée et il a été prouvé que certains problèmes sont de classe P, il est donc possible de les résoudre d'une manière exacte en un temps polynomial, alors que d'autres sont NP-difficiles. Dans le cas où le problème est de classe P un algorithme fournissant la solution optimale dans un temps polynomial est proposé, quant au cas où il est NP-difficile, des modèles de programmation dynamique (pseudo-polynomiale) et des heuristiques pour résoudre le problème de manière efficace, en précisant l'erreur, sont proposées.

Pour les problèmes à plusieurs machines, la majorité des travaux réalisés montre qu'ils sont NP-difficiles. Ceci a incité les chercheurs à ne traiter que la version relaxée² du problème ou de proposer des méthodes approchées pour les résoudre.

Un résumé des différents problèmes, à une machine et à plusieurs machines, étudiés dans la littérature est présenté dans tableau 1.1, où ϵ représente l'erreur relative qui est un paramètre permettant de mesurer la performance des heuristiques, m , n , p_{max} représentent le nombre de machines, le nombre de tâches à planifier et la durée de la tâche la plus longue.

Définition 1.4 Soit $C_H(i)$ la valeur de la fonction objectif obtenue par l'heuristique H pour une instance i du problème de minimisation P , et soit $C_{opt}(i)$ la valeur optimale [Kaabi-Harrath, 2004].

L'erreur relative de H est donnée par $\epsilon = \frac{C_H(i) - C_{opt}(i)}{C_{opt}(i)}$.

La plupart des études sur l'approche déterministe considèrent les périodes de maintenance comme des contraintes lors de l'ordonnancement de la production. En d'autres termes, l'ordonnancement de la production est optimisé en fonction d'un plan d'interventions pour la maintenance préétabli. Dans ces cas, la maintenance est toujours privilégiée par rapport à la production. Il existe des études où c'est la production qui a la priorité, comme [Liao et al., 2005], [Liao et al., 2007]. Toutefois, les services de maintenance et de production doivent collaborer

2. La contrainte qui force les variables à prendre des valeurs entières est appelée contrainte d'intégrité. Lorsque l'on ignore cette contrainte, on parle d'un problème relaxé ou de relaxation continue.

Problème	Hypothèse	Complexité	Méthode de résolution	Erreur
$1 r_j, a_i \sum C_j$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	P	SPT	$\epsilon = 0$ (optimale)
$1 r_j, a_i C_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	P	Aléatoire	ϵ (optimale)
$1 r_j, a_i L_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	P	EDD	ϵ (optimale)
$1 r_j, a_i \sum U_j$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	P	Heuristique de Moore-Hodgson	$\epsilon = 0$ (optimale)
$1 r_j, a_i \sum w_j C_j$	$N_{indisp} = 1$	NP-difficile	Programmation dynamique	$\epsilon = 0$ (optimale)
$1 prem, a, r C_{max}$	$N_{indisp} = 1$	NP-difficile	Séparation et évolution	$\epsilon = 0$ (optimale)
$1 prem, a_i \sum C_j$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	SPT	$\epsilon = \frac{2}{7}$
$1 prem, a L_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	EDD	$\epsilon = p_{max}$
$1 prem, a_i \sum U_j$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	Heuristique de Moore-Hodgson	$\epsilon = 1$
$1 prem, a_j \sum w_j C_j$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	Programmation dynamique	$\epsilon = 0$ (optimale)
$P_m a_i C_{max}$	$N_{indisp} \leq 1$	NP-difficile	LPT	$\epsilon = \frac{1}{2}$
$P_m a_i C_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	Heuristique	—
$P_m a_i, r_j C_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	LPT	$\epsilon = \frac{1}{2} \frac{m-1}{2}$
$P_m a_i, r_j L_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	Programmation linéaire	$\epsilon = 0$ (optimale)
$P_m a_i, prem C_{max}$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	LPT	$\epsilon = \frac{m+1}{2}$
$P_m a_i, prem \sum C_i$	$N_{indisp} \text{ qlq}$	NP-difficile	SPT	optimale quand $n \rightarrow +\infty$
$P_m prem w_i C_i$	$N_{indisp} = 1$	NP-difficile	Séparation et évaluation	$\epsilon = 0$ (optimale)

TABLE 1.1 – Résumé des différents problèmes d’ordonnement avec contraintes de disponibilité dans le cas déterministe étudiés dans la littérature [Kaabi-Harrath, 2004]

pour atteindre un objectif commun, celui de maximiser la productivité du système. Pour ce faire, les objectifs de maintenance et de production doivent être considérés avec le même niveau d'importance. Toutefois, les critères liés à la production sont généralement contradictoires avec ceux de la maintenance : la diminution de l'un élève l'autre et inversement. Par conséquent, une solution au problème de la production et de la maintenance commun doit être un compromis entre les objectifs des deux services.

1.5.2 Cas stochastique

Dans l'approche stochastique (ou intégrée), les dates de début des tâches qu'elles soient de production ou de maintenance sont considérées comme des variables de décision. Les tâches de production et de maintenance sont planifiées conjointement (mais pas séquentiellement). Les études relatives à cette approche ne sont pas très nombreuses dans la littérature. Certains chercheurs utilisent l'idée que les tâches de maintenance doivent être exécutées dans un intervalle de temps prédéfini [Kaabi et al., 2002], [Xu et al., 2008]. Ces études ont l'avantage de diminuer les conflits entre les deux services, cependant, la maintenance est toujours favorisée au détriment de la production. Afin de trouver des compromis entre ces deux services, [Berrichi et al., 2009] proposent un modèle bi-objectif intégré pour les problèmes de machines parallèles en utilisant des modèles de fiabilité pour prendre en compte l'aspect maintenance. Un modèle mathématique pour le problème à une seule machine avec un objectif de minimisation du retard de la production est proposé dans [Cassady and Kutanoglu, 2003]. Ils ont essayé de le résoudre avec une méthode exacte en utilisant une méthode de dénombrement basée sur l'énumération de toutes les solutions possibles puis sur la sélection de la meilleure. Les auteurs ont observé que le temps de calcul devient très grand, voire insupportable, lorsque le nombre de tâches de production est supérieur à huit, ce qui rend la méthode inapplicable pour des cas réels où le nombre de tâches est généralement de l'ordre d'une centaine. Les meilleurs outils pour traiter ces problèmes sont alors les méthodes approchées même si elles ne garantissent pas l'optimum. Plusieurs heuristiques ont été développées pour des cas complexes et plus réalistes. Par exemple, dans l'article [Yin et al., 2017], les auteurs ont étudié ce problème dans un environnement où les machines sont soumises à des détériorations et ont proposé une heuristique qui consiste à planifier les tâches de production et de maintenance. Cependant, les durées d'intervention sont considérées fixes, ce qui n'est pas toujours vrai dans le monde industriel. Dans l'étude

[Li et al., 2017], les chercheurs ont considéré des durées d'intervention variables et dépendantes de la machine qui sera maintenue. Deux modèles mathématiques ont été proposés pour ce problème, ainsi qu'une approche basée sur la règle LPT pour le résoudre.

Le point faible de ces travaux est le fait que toutes les machines sont considérées de même nature. En réalité, les ateliers disposent de machines différentes. Une machine peut avoir plusieurs fonctionnalités lui permettant de réaliser différentes activités avec différentes aptitudes. Il se peut donc qu'une machine ne soit pas en mesure de réaliser une certaine tâche car elle ne possède pas la fonctionnalité correspondante pour la réaliser. Cette contrainte est aussi appelée contrainte d'éligibilité et elle est peu étudiée dans la littérature (un état de l'art de ces travaux est réalisé dans [Mateo et al., 2018]). Une approche basée sur les graphes a été proposée dans [Liao and Sheen, 2008] pour prendre en compte la disponibilité et l'éligibilité des machines en même temps. Chaque machine a un nombre arbitraire d'intervalles de disponibilité tout au long de l'horizon de planification et chaque tâche nécessite un sous-ensemble spécifique de machines. Cette approche est inspirée par les travaux décrits dans [Błażewicz et al., 2000] et [Sanlaville, 1995], où est traité le problème d'ordonnancement avec une contrainte de disponibilité des machines en utilisant les graphes. En effet, il existe une classe de méthodes de résolution basées sur l'utilisation des graphes où l'ordonnancement des tâches est représenté par un graphe dans lequel chaque chemin correspond à un ordonnancement réalisable. Cette procédure a été introduite dans [Bratley et al., 1971] pour résoudre le problème sur une seule machine, puis a été étendue pour résoudre le problème à plusieurs machines [Bratley et al., 1975]. L'idée est de construire un graphe bipartite valué qui a un arc de capacité de 1 entre chaque paire de sommets éligibles. Horn [Horn, 1974] a proposé une méthode similaire pour résoudre les problèmes $1|r, M_j|C_{max}$ et $P|r, M_j|C_{max}$, où M_j fait référence à la contrainte d'éligibilité. La méthode de Horn a été étendue par plusieurs chercheurs, en particuliers, [Błażewicz et al., 2000] et [Sanlaville, 1995] qui ont considéré le problème $P|r, M_j, a|C_{max}$ tenant compte de la contrainte de disponibilité.

Il faut noter aussi que les fonctionnalités des machines peuvent être indépendantes, en terme de disponibilité, c'est-à-dire qu'il se peut qu'une machine ne soit pas en mesure d'utiliser une certaine fonctionnalité, à cause d'une défaillance d'un ou de plusieurs composants contribuant à sa construction, mais reste capable d'utiliser une autre fonctionnalité qui ne nécessite pas le ou les éléments défaillants de la machine. Il convient également de considérer que l'usure d'une ma-

chine dépend du type d'opération effectuée car les forces et les mouvements différents induisent des niveaux de dégradation différents. Dans ce contexte, le problème d'une machine multifonctionnelle soumise à de nombreuses interventions de maintenance prédictive pendant l'horizon de planification a été considéré dans [Ladj et al., 2017b]. La machine est surveillée par un module de pronostic fournissant le RUL après chaque travail. D'autres méthodes génériques ont été développées pour les systèmes complexes multicomposants, où les pronostics locaux des composants sont combinés afin de fournir un outil d'aide à la décision non seulement pour la gestion de la maintenance mais aussi pour la planification de la production [Desforgues et al., 2017], [González et al., 2018]. Dans un contexte d'atelier et afin de trouver une solution optimale pour les petites instances, un programme linéaire de nombres entiers mixtes a été proposé dans [Varnier and Zerhouni, 2012] pour résoudre le problème de flow-shop. Comme déjà mentionné dans ce manuscrit, l'utilisation des méthodes exactes n'est pas très envisageable dans le monde réel. C'est pourquoi, les auteurs ont étendu leurs travaux antérieurs et proposé une méthode heuristique basée sur la recherche de voisinage variable (VNS) où les résultats du pronostic sont transcrits afin d'être traités à l'aide la logique floue [Ladj et al., 2017a].

Bien qu'il semble pertinent d'exploiter les données de pronostic à des fins d'ordonnancement des tâches de production et aussi des tâches de maintenance, ceci ne semble pas être assez traité dans la littérature. Afin de remédier à ce manque, nous estimons qu'une méthode conjointe de planification des activités de production et de maintenance permettrait de contribuer à une réduction des arrêts imprévus des ressources de production mais aussi à réduire le nombre d'arrêts programmés tout en améliorant les performances de production.

1.6 Conclusion

Par ce premier chapitre, nous avons défini ce qu'est un système de production et une classification des systèmes de production a été présentée. Ensuite, les enjeux, les objectifs, ainsi que les différents niveaux de planification de la production ont été abordés. Le constat établi est que la gestion de production ne peut pas être effectuée sans prendre en compte la fonction maintenance, puisque celle-ci garantit la disponibilité des équipements de production. Ainsi il est nécessaire que la production et la maintenance coopèrent conduisant à évoquer la planification conjointe de la production et de la maintenance. Les aléas et les particularités du

problème d'ordonnancement dans les systèmes de production ont été soulignés, conduisant à la problématique générale traitée dans ce manuscrit. Dans ce contexte, une classification des études proposées dans la littérature en deux catégories a été établie : les cas déterministes et les cas stochastiques. La majorité de ces études traitent des cas particuliers de problèmes d'ordonnancement dans les systèmes de production, en considérant à chaque fois des hypothèses spécifiques, réduisant la portabilité des apports réalisés dans l'étude de la planification d'un système de production donné. Ceci réduit la taille de l'ensemble des domaines pour lesquels elles peuvent être appliquées. Aussi, tout changement dans l'environnement peut entraîner une redéfinition générale de la méthode. Afin de remédier à ce problème, il est nécessaire de mettre en œuvre une méthode générique flexible qui peut être facilement adaptée à ces changements de l'environnement. C'est pourquoi, nous proposons dans ce travail une méthode qui dispose d'un outil de modélisation permettant de prendre en compte l'adaptation et l'évolution d'un système de production. Ainsi, notre outil de planification permet de considérer chaque entité de notre problème séparément, tout en conservant les liens entre celles-ci. Cette division du problème en plusieurs sous-problèmes rend la méthode flexible en facilitant son adaptation aux changements qui peuvent survenir dans l'environnement. Chaque entité du problème peut avoir ses propres caractéristiques, ses propres contraintes et objectifs à prendre en considération, ce qui est généralement le cas dans les systèmes de production. Ce traitement du problème en considérant les différentes entités relatives à la production et la maintenance a conduit à ce que l'approche proposée soit distribuée. Ce traitement du problème, consistant à planifier conjointement la production et la maintenance, est abordé dans le chapitre suivant, où différentes méthodes sont décrites orientant notre choix vers une approche distribuée. Dans le chapitre suivant, nous présentons en détails notre problématique et la modélisation que nous proposons pour chacune des entités du problème, en mettant en évidence les liens entre elles.

Chapitre 2

Ordonnancement des tâches de production et de maintenance : Problématique et modélisation

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons présenté l'intérêt à ce que les fonctions de production et de maintenance coopèrent dans le but d'établir un planning conjoint de leurs activités sur les ressources techniques de production. Sans cette coopération, les fonctions de maintenance et de production effectuent indépendamment la planification de leurs activités effectuées généralement sur les mêmes ressources, engendrant ainsi des conflits. Ces conflits, quant à eux, nuisent à la productivité globale de l'entreprise. Des études sur l'efficacité de la gestion en maintenance [Lee, 2000] ont montré qu'un tiers des coûts de maintenance provient d'opérations inutiles ou mal effectuées. Cette inefficacité a pour raison principale l'absence d'informations réelles qui permettraient de développer un modèle de maintenance prédictive capable de réduire voire d'éliminer les interventions inutiles et de limiter les risques de pannes les plus graves des machines. Dans ce contexte, nous avons montré dans le chapitre précédent la capacité des méthodes prédictives issues du PHM (Prognostic and Health Management) à fournir les informations sur l'évolution de l'état de santé des ressources techniques, permettant ainsi une planification prédictive des tâches de maintenance. Ensuite, cette planification prédictive va rendre possible la planification conjointe des tâches de production et de maintenance.

Dans ce chapitre, et afin d'arriver à une planification conjointe adéquate des tâches de production et de maintenance prédictives, nous présentons dans un premier temps les particularités des systèmes de production et de maintenance, ainsi que leur fonctionnement et les liens qui les réunissent. Dans un deuxième temps, et afin d'atteindre une modélisation pertinente du problème considéré, nous représentons celui-ci sous forme de quatre types d'entités qui représentent l'essence du conflit entre la production et la maintenance : les ordres de fabrication, les ressources de production, les ordres de maintenance et les ressources de maintenance. Ensuite, nous proposons et décrivons en détail une modélisation sous forme d'un diagramme de classes UML pour chacune de ces entités.

2.2 Description du problème

Nous avons présenté dans le chapitre précédent le modèle MRP qui, dans sa version originale, consiste à établir un programme directeur de production, à calculer les quantités exactes des composants requis et à définir les lots d'approvisionnement.

2.2.1 Comment déterminer les OF ?

Le Programme Directeur de Production (PDP) est établi à partir des prévisions ainsi que des disponibilités de matières et des ressources. Ce programme regroupe les décisions de production sur un certain nombre de périodes futures en réponse à une demande prévisionnelle. Les produits, étant complexes, sont divisés en sous-ensembles décomposés à leur tour en groupes, puis en sous-groupes jusqu'au stade final qui contient les composants et/ou les matières premières. Cette conception modulaire conduit à définir un produit par une structure arborescente à plusieurs niveaux appelée nomenclature¹. La représentation en nomenclature permet de calculer facilement les quantités nécessaires en composants et matières premières pour chaque produit. A travers l'exemple présenté dans la figure 2.1, nous montrons comment calculer les quantités de composants et de matières premières nécessaires à la fabrication du produit fini à partir de sa nomenclature. Dans cet exemple, pour fabriquer le produit fini, il faut assembler deux

1. la nomenclature est la liste hiérarchisée et exhaustive du type et de la quantité des matières premières des composants et des sous-ensembles qui sont nécessaires à la planification d'un produit

sous-ensembles SE_1 et un sous-ensemble SE_2 . Le sous-ensemble SE_1 est lui-même fabriqué à partir de deux matières M_2 et d'un produit P_1 , ce dernier est obtenu avec une matières M_1 et de deux composants C_1 . Le sous ensemble SE_2 , quant à lui, est fabriqué à partir d'un composant C_1 et de deux produits P_2 , ce dernier est obtenu avec un composant C_1 et 3 composants C_2 . Pour fabriquer le produit final nous avons donc besoins de 7 composants C_1 , de 6 composants de C_2 , de deux matières de M_1 et de quatre matières de M_2 .

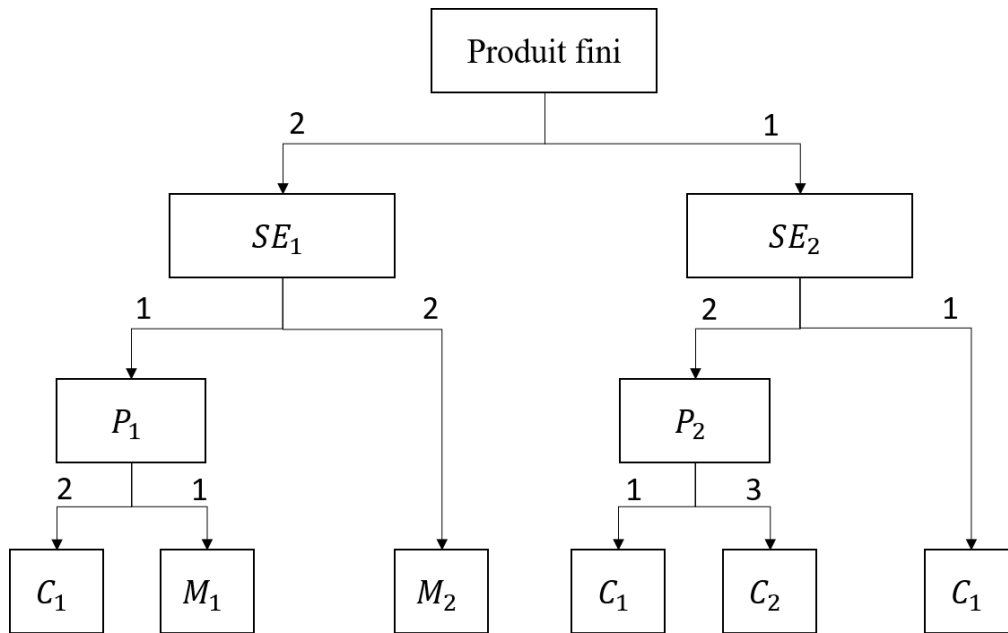


FIGURE 2.1 – Nomenclature d'un produit

En disposant des nomenclatures des produits et du programme directeur de production, nous pouvons déduire, à travers le CBN, les quantités exactes en termes de composants et de matières premières dont il est nécessaire d'assurer l'approvisionnement. Ceci est traduit ensuite en Ordres d'Achat (OA) et/ou de Fabrication (OF) qui seront avancés dans le temps, par rapport au moment où les besoins nets doivent être satisfaits. Cette avancée dans le temps d'ordres de fabrication et d'achat par rapport à la réception du produit est effectuée afin de tenir compte du délai nécessaire pour l'obtention des articles entrants dans la construction du produit fini :

- Pour les articles achetés, il s'agit du délai de livraison du fournisseur ;
- Pour les articles fabriqués, il s'agit du temps nécessaire pour effectuer toutes les opérations d'élaboration d'un lot de produit. Il dépend ainsi de la gamme de fabrication du produit en question.

2.2.2 Comment gérer les OF ?

Les Ordres de Fabrication (OF) sont transmis aux ateliers de production en précisant, pour chacun, la date de début, pour laquelle on s'est assuré de la disponibilité des composants et de matières premières, et la date de délivrance souhaitée, pour la livraison au client ou la fabrication d'un produit de niveau supérieur. Ces ordres de fabrication doivent être réalisés suivant leurs gammes de production, qui listent les séquences de Tâches de Fabrication (TF) ou de production à réaliser pour faire évoluer un produit d'un état initial vers un état final. Ainsi, le traitement de chaque ordre de fabrication consiste à faire circuler le produit dans les ateliers de production en faisant subir à celui-ci à diverses opérations dans un ordre précis afin d'arriver à l'état final souhaité.

Concrètement, les TF se font sur des machines présentes physiquement dans les ateliers de production. Ces machines sont conçues pour réaliser, chacune, un nombre de fonctionnalités comme par exemple du fraisage, perçage, tournage, etc. Plusieurs machines peuvent réaliser une même fonctionnalité mais avec des aptitudes pouvant être différentes. Cette différenciation entre les fonctionnalités des machines incite à ce que les gammes soient constituées de TF demandant une fonctionnalité ou un groupe de fonctionnalités et non des machines comme cela est traditionnellement le cas.

Afin d'optimiser l'utilisation des ressources dans les ateliers de production, une planification opérationnelle est élaborée pour obtenir un ordonnancement des TF dans l'atelier. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre précédent, cette phase de planification opérationnelle est formée de cinq couches (planification, ordonnancement prévisionnel, ordonnancement en temps réel, supervision/coordination et commande locale), mais nous nous concentrons dans ce travail sur celle de l'ordonnancement prévisionnel. A ce niveau de planification, les OF sont déjà définis, leurs structures et leurs délais de livraison sont calculés, il reste à trouver une allocation des opérations des gammes sur les ressources de production. Les composants de ces ressources, qui ont une durée de vie limitée qui se réduit par leurs utilisations, peuvent tomber en panne empêchant ainsi les ressources de production de réaliser les TF. Afin de trouver une allocation adéquate des tâches de production, nous devons tenir compte des pannes potentielles sur les ressources de production et donc de la dégradation de leur état de santé durant la planification. Donc en cherchant l'allocation des opérations de production, il faut aussi penser à l'allocation

des opérations de maintenance, qui proviennent d'Ordre de Travail de maintenance (OT). Ceci consiste à programmer l'exécution des TF des gammes de fabrication des produits ainsi que les tâches de maintenance en leur allouant les ressources de production et de maintenance nécessaires et en leur fixant une date de début et de fin d'exécution. Ceci en tenant compte :

- des contraintes temporelles qu'il s'agisse des durées opératoires ou des dates précises de début et de fin pour chaque OF ;
- des contraintes d'enchaînement des opérations des gammes de fabrication ;
- des contraintes de capacité des équipements de production et de maintenance relative au fait que chaque machine et chaque mainteneur ne peut exécuter qu'une seule opération à la fois, par exemple ;
- des contraintes de disponibilité des ressources de production (attente ou en cours de maintenance) et de maintenance (engagement avec d'autres équipements de production, congés, etc.).

2.2.3 Comment déterminer les TM ?

Afin de réaliser une Tâche de Maintenance (TM), un ensemble de ressources est disponible dans les centres de maintenance. Par analogie avec les ressources de production, une ressource de maintenance ne peut traiter que les TM compatibles avec ses compétences, avec une certaine aptitude. Chaque tâche de maintenance concerne un composant particulier de la machine, et le traitement de celui-ci nécessite une compétence ou un groupe de compétences de la ressource de maintenance chargée de son traitement. Ces opérations de maintenance peuvent être des opérations systématiques qui doivent obligatoirement être faites à des dates précises définies par le constructeur de l'équipement, comme elles peuvent être des opérations de maintenance préventives planifiées pour augmenter la fiabilité de la machine et pour réduire le nombre de tâches de maintenance correctives sur les équipements. Nous nous concentrons dans ce travail sur le type particulier de maintenance préventive qu'est la maintenance prédictive.

La planification de la maintenance prédictive est généralement basée sur la connaissance de l'état de santé des machines, état de santé qui peut être obtenu en utilisant des techniques de diagnostic et de pronostic. En effet, l'implantation de nouvelles technologies et fonctionnalités de détection des fautes, de diagnostic et de pronostic au sein des ressources de produc-

tions permet de détecter et diagnostiquer les défaillances des équipements ainsi que d'analyser et prévoir l'évolution de dégradations entraînant les futures défaillances [Julka et al., 2011], [Sun et al., 2007]. Ces nouvelles fonctionnalités constituent la base des techniques du *Predictive and Health Management* (PHM) qui vise à écarter les actions de maintenance corrective et à ce que les tâches de maintenance préventive ne soient considérées que lorsque le risque de défaillance est trop important [Mobley, 2002].

S'ajoute à ceci le fait que les machines disposent de plusieurs fonctionnalités qui ne sont pas forcément liées entre elles. De ce fait, il se peut qu'une fonctionnalité d'une machine soit en panne sans que les autres fonctionnalités de la machine le soient aussi. Dans de tels cas, la machine peut être utilisée pour réaliser des tâches de production qui ne nécessitent pas les fonctionnalités en panne. A titre d'illustration, prenons comme exemple le cas d'une voiture dont la fonctionnalité de climatisation est en panne, ceci n'empêche pas que la voiture peut toujours effectuer des trajets, surtout si les conditions météorologiques prévues ne nécessitent pas le rafraîchissement de la voiture.

2.2.4 Vision globale du problème

Pour résumer, nous avons trois types d'entités en interaction : les ordres de fabrication, les ressources de production et les ressources de maintenance (voir la figure 2.2). D'une part, il y a une forte interaction entre les ordres de fabrication et les machines, vu que ce sont les machines qui permettent d'exécuter les opérations de production listées dans la gamme de fabrication des OF. D'autre part, il existe une dépendance entre les machines et les mainteneurs, puisque les machines ont besoin d'être maintenues pour assurer leur disponibilité. La question qui se pose alors est comment planifier les tâches de production et de maintenance simultanément compte tenu de tous ces besoins et contraintes.

Avant de répondre à cette question, il faut d'abord passer par une étape importante d'analyse du problème dans laquelle nous chercherons à comprendre et à décrire le problème de façon précise. Afin de faciliter cette étape d'analyse et à cause de la complexité de notre problème, justifiée par les particularités citées des systèmes de production et de maintenance ainsi que des conflits qu'ils présentent, nous avons considéré une division en sous problèmes. Chaque sous problème correspond à un des trois types d'entités principales du problème que sont : les ordres de fabrication, les ressources de production, les ressources de maintenance. Cette

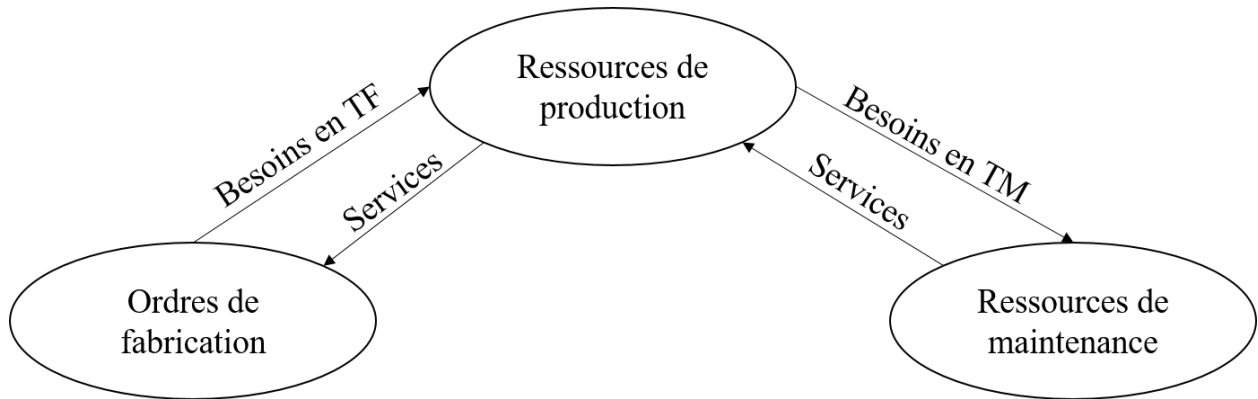


FIGURE 2.2 – Relation entre les OFs, machines et mainteneurs

division est faite de sorte que les liens que les trois entités du problème sont forcées de partager soient conservés. Dans la section suivante, nous présentons une modélisation de ces trois types d'entités séparément en utilisant un formalisme objet : le langage de modélisation unifié (UML - Unified Modeling Language) [Hamilton and Miles, 2006]. En effet, les représentations orientées objet permettent de manipuler des concepts comme l'héritage, le polymorphisme, l'abstraction, l'encapsulation [Odell, 1998]. Ces caractéristiques permettent de considérer en même temps une grande variété de ressources (de production, de maintenance, etc.), tout en permettant de définir des interfaces et des services communs à ces entités même si leurs implémentations diffèrent. Offrant une capacité de généralisation de ces représentations tout en étant adaptables à un grand nombre de cas, UML 2.0 propose 13 types de diagrammes permettant de représenter, entre autres possibilités, les caractéristiques des différents types d'objets (classes) et les relations entre ces types :

- les échanges de messages entre objets ou classes d'objets (diagrammes de séquences) qui sont nécessaires pour la coopération ;
- les comportements dynamiques des classes d'objets (diagrammes d'activités, diagramme états-transition, diagrammes de séquences).

2.3 Les diagrammes de classes

Les diagrammes de classes permettent de décrire les systèmes d'une façon claire et structurée. En effet, un diagramme de classes permet de modéliser les classes des objets du système, leurs attributs, leurs opérations et les relations entre elles indépendamment de toute méthode

et de tout langage de programmation. Ceci correspond exactement à nos besoins, car notre travail implique des systèmes de structures différentes interagissant les uns avec les autres.

2.3.1 Définition

Les diagrammes de classes sont parmi les plus populaires du langage UML et sont conçus pour être simples à utiliser. Un diagramme de classes, comme son nom l'indique, est formé par un ensemble de classes d'objets. Un objet ici ne désigne pas un objet concret mais plutôt un conteneur qui possède et incorpore des données et des mécanismes. Une classe représente un objet ou un ensemble d'objets possédants la même structure et le même comportement et est composée de trois champs : nom, attributs et méthodes.

2.3.2 Types d'interactions dans les diagrammes de classes

Le terme « interaction » désigne les relations et liens qui peuvent exister entre les différents éléments du diagramme. Parmi les interactions les plus courantes nous présentons dans cette section celles présentes dans la modélisation proposée pour notre problématique :

La relation d'héritage est également connue sous le nom de généralisation. Il s'agit d'une relation de liaison entre une classe dite mère et des classes enfants. C'est un processus pour lequel une classe enfant adopte les fonctionnalités d'une classe mère (Figure 2.3(a)).

La relation d'association est une relation structurelle entre deux classes. Si les objets de deux classes d'un modèle ont besoin de communiquer entre eux, il doit y avoir un lien entre eux, et cela peut être représenté par une association. Une relation d'association peut être représentée par une ligne entre ces classes avec une flèche indiquant la direction de navigation. Dans ce type de relations nous parlons de la notion de multiplicité, qui permet de spécifier le nombre d'objets intervenant dans les instanciations des associations. Une multiplicité d'un côté spécifie combien d'objets de la classe du côté considéré sont associés à un objet donné de la classe de l'autre côté. Dans l'exemple de la figure 2.3(b), la multiplicité 1..5 peut être interprétée comme pour chaque objet de la classe B il faut associer au minimum 1 et au maximum 5 objets de la classe A. Le même principe s'applique sur l'autre multiplicité (1..*) avec * signifiant plusieurs sans préciser le nombre.

La relation d'agrégation est un cas particulier de la relation d'association. C'est une relation d'association qui représente une inclusion structurelle ou comportementale d'un élément dans un ensemble. Pour une relation d'agrégation, la classe enfant peut exister indépendamment de l'existence de la classe mère, et n'entraîne aucune contrainte sur sa durée de vie. Graphiquement, elle est représentée par un losange vide du côté de la classe conteneur comme il est montré dans la figure 2.3 (c).

La relation de composition est aussi un cas particulier de la relation d'association. Elle décrit une contenance structurelle entre objets. Ainsi, la destruction de l'objet conteneur implique la destruction de tous ses composants. Graphiquement, elle est représentée par un losange plein du côté de la classe conteneur comme ceci est montré dans la figure 2.3 (c).

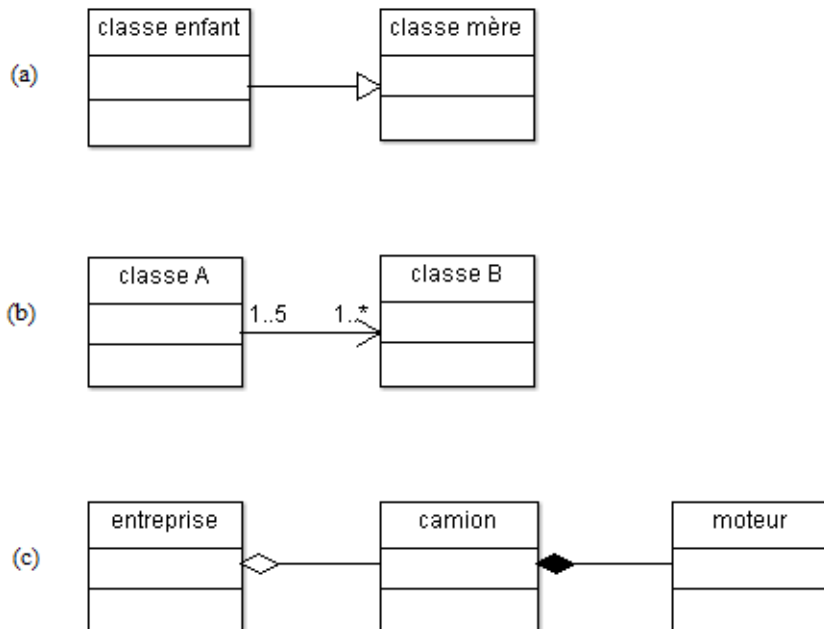


FIGURE 2.3 – Quelques types d'interactions

2.4 Description et modélisation des éléments du problème

2.4.1 Les ordres de fabrication

Comme précisé précédemment, après que les prévisions sur les demandes futures en terme de produits finis soient réalisées pour chaque période sur l'horizon, c'est le Calcul des Besoins Nets (CBN) qui permet de déterminer les commandes à lancer (ordres d'achat et ordre de fabrication). Les OA fournissent les composants ou matières premières achetés requis en fonction de la nomenclature de production, et les OF sont lancés pour produire les composants issus de la nomenclature qui peuvent être produits en atelier ainsi que pour réaliser toute autre opération de production.

Les OF sont des ordres destinés à la production et représentent les éléments centraux de celle-ci. Concrètement, tout ordre de fabrication est caractérisé par un identifiant unique (ID) et affecté d'un dossier de production offrant une vue d'ensemble des informations permettant sa réalisation. Un dossier de production contient les informations suivantes :

- **la gamme de fabrication** qui est un document dans lequel les différentes phases de transformation d'un produit sont listées d'une manière chronologique et globale. Une phase de transformation représente l'ensemble des activités à effectuer sur la même machine pendant une durée estimée et est nommée Tâche de Fabrication (TF).
- **la date de lancement** proposée automatiquement en fonction de la position de l'OF sur la nomenclature et du temps d'attente pour le rassemblement des composants et/ou des matières premières nécessaires pour l'exécution de l'OF.
- **la date de besoin** est la date idéale de fin de fabrication de l'OF pour que le produit soit livré à la date prévue dans le PDP ou disponible à la date de lancement d'un OF d'un produit de niveau supérieur.

Nous représentons le modèle d'un ordre de fabrication sur la figure 2.4.

Le traitement d'un OF passe alors par une séquence de TF listées dans sa gamme de production. Chaque TF est associée à une ou plusieurs activités précises. Chaque activité décrit un travail à réaliser (tournage, perçage, etc.) et a besoin pour être exécutée d'une fonctionnalité précise. Par conséquent, une TF ne peut être exécutée par une machine que si celle-ci possède toutes les fonctionnalités nécessaires pour réaliser toutes les activités qu'elle implique. De plus,

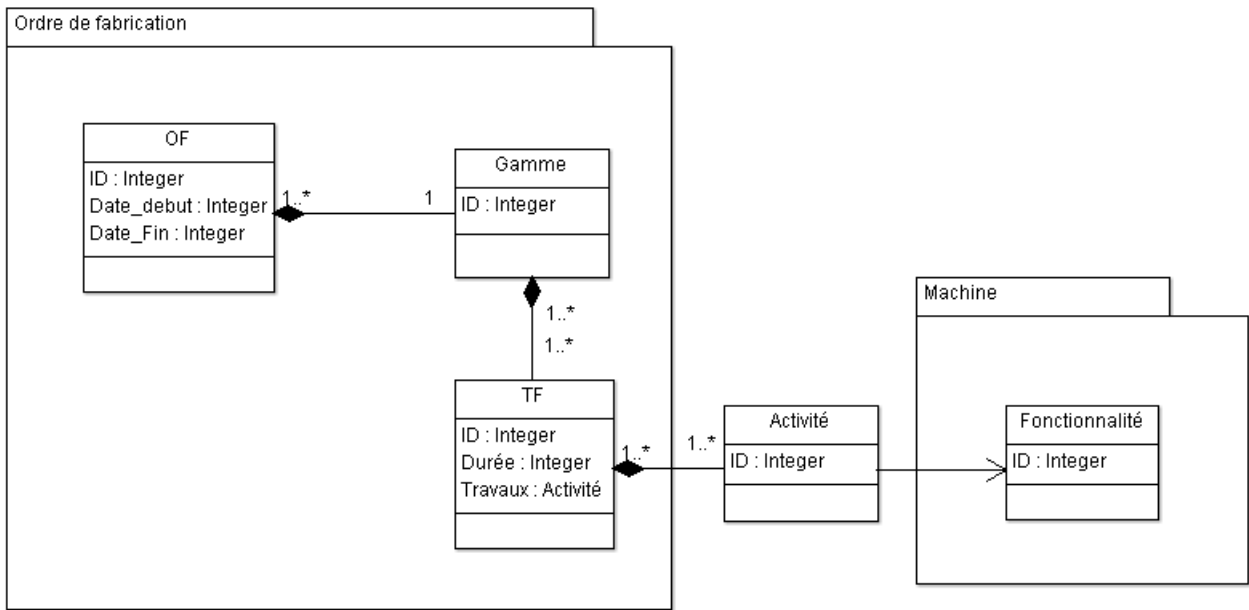


FIGURE 2.4 – Modélisation d’un ordre de fabrication

chaque TF possède une durée opératoire estimée, nous supposons dans ce travail que les temps de réglages des machines et de transport correspondants sont inclus dans cette durée opératoire. Cette estimation se fait en supposant que la TF est exécutée sur la machine la plus performante, ce qui n’est pas toujours le cas. Ainsi, la durée opératoire estimée peut différer de la durée d’exécution réelle.

2.4.2 Les ressources de production

Les ateliers de production disposent de machines conçues pour réaliser les TF. Chaque machine est un système complexe disposant d’une ou plusieurs fonctionnalités. Ces fonctionnalités permettent aux machines de réaliser certains travaux (fraisage, tournage, perçage) ou encore d’assurer des besoins de ces travaux comme la lubrification du processus de coupe, etc. (Figure 2.5). Les fonctionnalités qui sont des fonctions de service de la machine sont associées à une compétence qui indique, entre autres éléments, la performance de la machine pour réaliser cette fonctionnalité (aptitude).

Une machine est constituée d’un ensemble d’éléments (entités) interconnectés mettant en œuvre les fonctionnalités de la machine [Murthy and Krishnamurthy, 2009]. Une entité de la

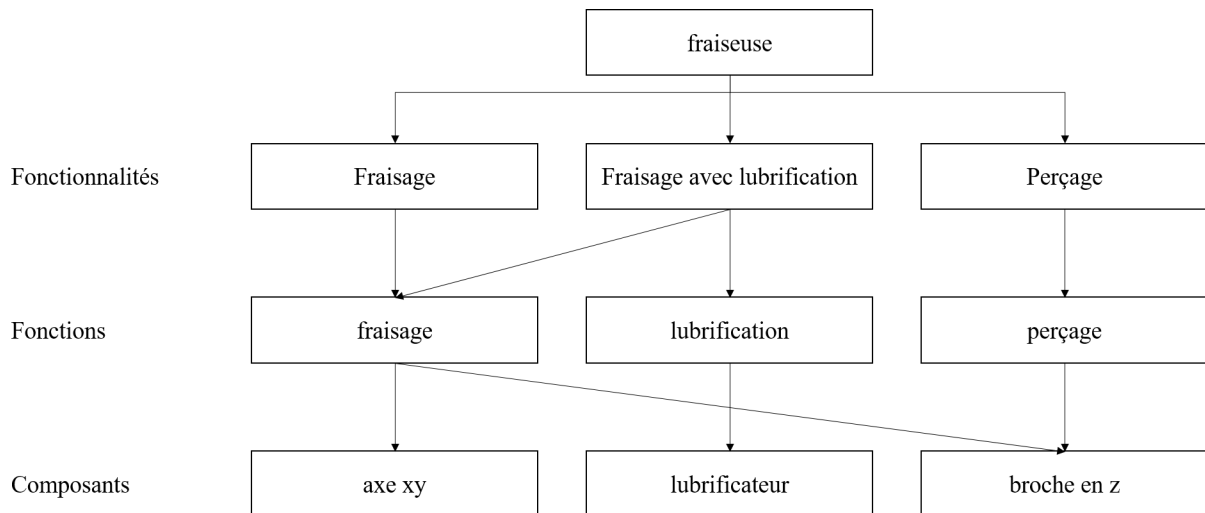


FIGURE 2.5 – Exemple de structure de fraiseuse

machine peut être soit un composant, soit une fonction. Sachant qu'une fonction est un groupe d'entités, une fonction peut donc être un groupe de composants ou un groupe de fonctions ou les deux à la fois. En d'autres termes, les composants de la machine mettent en œuvre des fonctions entières et ces fonctions peuvent mettre en œuvre d'autres fonctions de niveaux supérieurs. Les fonctions de plus haut niveau sont appelées fonctionnalités, et sont associées à des compétences de production. Nous avons formalisé ceci en un diagramme de classes présenté sur la figure 2.6 :

Les composants sont alors les éléments clés qui assurent le fonctionnement des machines. Cependant, ces composants ont une durée de vie limitée après laquelle ils cessent de fonctionner. En effet, chaque composant d'une machine est caractérisé par un état de santé qui se dégrade au fur et à mesure de son utilisation. Si un composant n'est pas entretenu, réparé ou même remplacé il risque de causer une panne de la machine qui l'utilise. Une panne imprévue peut provoquer la non qualité du produit en cours de réalisation, ou même causer un arrêt de production nécessitant une intervention de maintenance non programmée avec des ressources pas nécessairement disponibles. Le tout peut entraîner un retard de production pouvant conduire à des paiements de pénalités de retard aux clients et entraîner des besoins de replanification.

Afin d'augmenter les disponibilités des machines et de réduire le nombre d'arrêts imprévus, nous avons besoin d'un moyen pour estimer l'état de santé des composants afin de pouvoir intervenir à temps pour les entretenir, les réparer ou les remplacer si c'est nécessaire. Dans

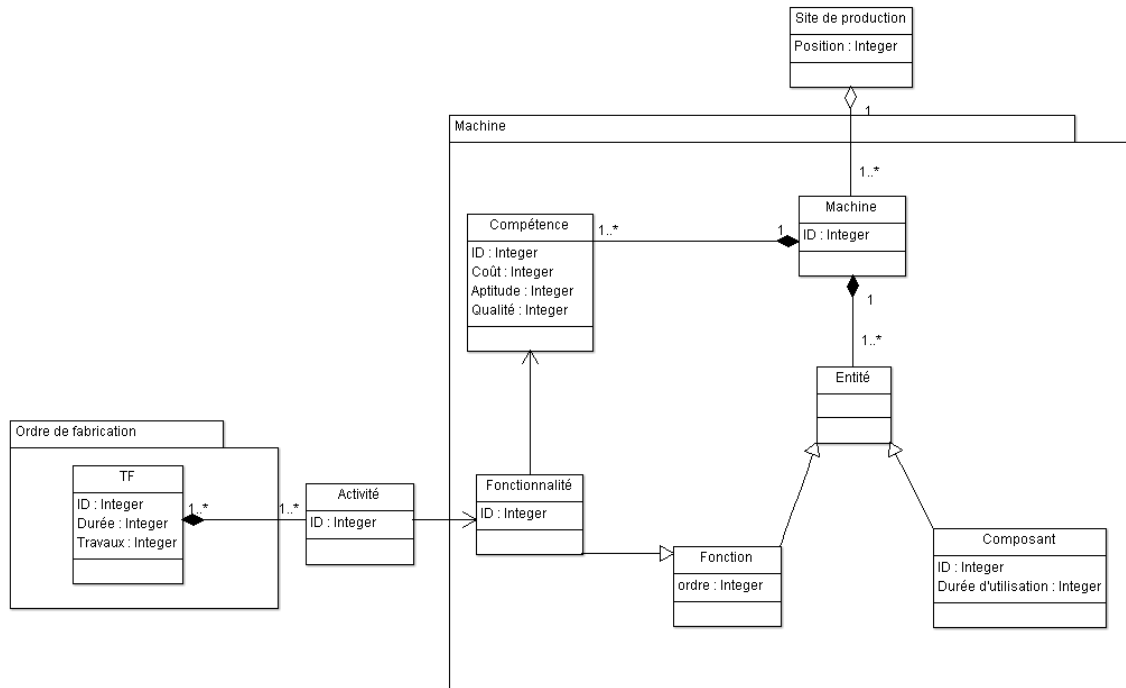


FIGURE 2.6 – Modélisation d’une machine

ce travail nous utilisons les méthodes développées dans le cadre de l’évaluation de l’état de santé de systèmes et de pronostic pour estimer les durées de vies restantes des composants. Il est préconisé que ces méthodes soient mises en œuvre dans le cadre du modèle à sept couches (figure 2.7), proposé par le projet OSA-CBM (Open System Architecture for Condition Based Monitoring) [Provan, 2003a] et conduisant à la norme ISO 133741.

Le but du projet OSA-CBM est de définir une architecture pour le diagnostic et le pronostic. Dans ce projet, il existe 7 couches qui forment une succession de sous-processus pour la mise en œuvre de la maintenance conditionnelle et aussi la maintenance prédictive [Gouriveau et al., 2017]. En effet, le projet OSA-CBM définit une couche d’évaluation de santé (Health Assessment) dont la fonction principale est de diagnostiquer l’état de santé d’un système et de connaître le ou les modes de défaillance/dégradation courants. Le pronostic, quant à lui, utilise les informations issues du processus de diagnostic, pour projeter l’état du système dans le futur [Cocheteux et al., 2007]. Le pronostic est défini comme étant l’estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance (RUL – Remaining Useful Life) et du risque d’occurrence sur un horizon temporel, d’un ou de plusieurs modes de défaillances [Norme ISO 13381-1 :2004]. Les différents résultats fournis par les fonctions de diagnostic et de pronostic doivent être considérés comme une aide à la maintenance pour prendre les décisions adéquates pour maintenir et ré-

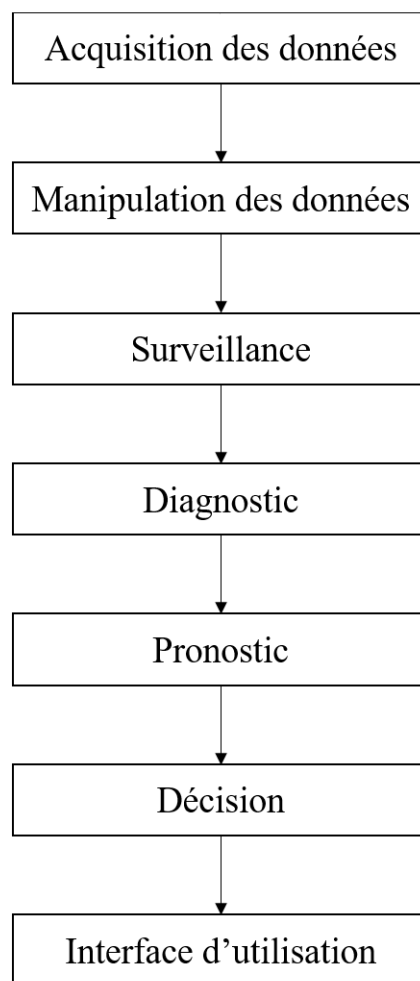


FIGURE 2.7 – Open System Architecture for Condition Based Monitoring (OSA-CBM)

tablir le système dans son état opérationnel, comme cela est considéré dans la couche Décision d'OSA-CBM [Diévert, 2010].

Nous considérons l'importance de la connaissance de l'état de santé présent des composants contribuant à la mise en œuvre des fonctionnalités primordiales des machines mais aussi l'importance de l'évolution de leur état de santé futur. Pour cela, il est indispensable que ces composants soient surveillés par un module de PHM permettant d'avoir accès aux informations que sont les chances [González et al., 2018] ou mieux encore les probabilités de leurs défaillances [Desforges et al., 2017] qui peuvent être déterminées en fonction de leur durée d'utilisation prévue et, lorsque cela est possible, de la sévérité des sollicitations [Ferreiro et al., 2012]. Si pour des raisons de coût le module de PHM ne peut être instrumenté par des capteurs pour certains composants, les données statistiques issues des études de fiabilités comme le Mean Time To failure (MTTF) correspondant au temps moyen de fonctionnement du composant avant panne

et le Mean Time Before Failure (MTBF) correspondant au temps moyen entre deux pannes successives d'un composant. Ces études sont effectuées par leur fabricants et peuvent être exploitées par un module de PHM n'admettant en entrée que les données d'utilisation et les durées de leurs futures sollicitations [Desforges et al., 2017]. Nous supposons alors que, pour chaque composant contribuant à une fonctionnalité d'une machine, il existe un seuil de risque prédéfini au-dessus duquel la probabilité de panne du composant est tellement élevée qu'il est considéré comme défaillant. Ainsi, il est alors impératif de planifier sa maintenance avant d'atteindre ce seuil (figure 2.8).

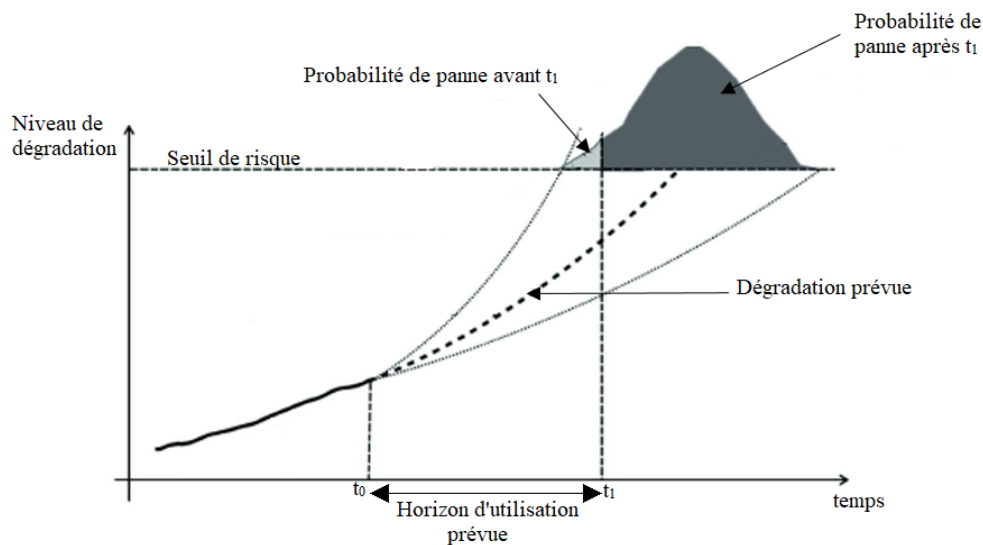


FIGURE 2.8 – Résultats de la fonction pronostic

En disposant des données des modules de PHM et en appliquant les méthodes décrites dans [González et al., 2018] et [Desforges et al., 2017], les probabilités ou les chances que les fonctionnalités nécessaires à la réalisation des tâches de production puissent ne pas être dans un état opérationnel permettant leur achèvement dans des conditions satisfaisantes de délais, de qualité et/ou de coût peuvent être évaluées. Ces méthodes permettent également d'identifier les composants nécessitant des opérations de maintenance pour que ces fonctionnalités retrouvent un état opérationnel satisfaisant. Elles exploitent pour cela les connaissances sur le système (dans notre cas une machine) telles que définies dans [Diévert, 2010]. Les connaissances structurelles sont les relations directes entre des entités échangeant des flux d'informations, d'énergie ou de matière. Les connaissances fonctionnelles regroupent les entités contribuant directement à la réalisation de la fonction. Dans la connaissance fonctionnelle, les redondances sont considérées

à part. Elles sont déployées généralement pour des raisons de fiabilité. Il s'agit alors d'entités réalisant toutes la même fonction. Lorsque le nombre d'entités capables de réaliser cette fonction est inférieur à une valeur prédéfinie (ordre de la redondance), la fonction n'est alors plus assurée. Alors que pour les fonctions simples, si une des entités n'assure plus son service c'est toute la fonction qui est défaillante. Ces travaux exploitent une modélisation des systèmes sous forme de graphes pour lesquels sont appliquées des inférences exploitant le théorème de Bayes [Desforges et al., 2017] ou la théorie des fonction de croyance [González et al., 2018]. Dans la suite du manuscrit, les développements proposés le seront dans le cadre du théorème de Bayes. Cependant, nous pensons qu'un déploiement à partir des fonctions de croyances est tout aussi possible en programmant différemment les fonctions (méthodes) associées aux objets chargés de définir leur aptitude à accomplir les futures tâches de production mais aussi d'identifier les composants à maintenir.

Une modélisation plus détaillée d'une machine est présentée dans la figure 2.9. Dans cette modélisation apparaissent :

- les attributs `ID_composant à maintenir` contenant l'identifiant des composants à maintenir prioritairement ;
- les méthodes `RUL()` qui définissent selon le type de l'entité sa probabilité à accomplir les futures tâches de production et d'identifier les composants à maintenir (qui peut être elle-même si l'entité est un seul composant).

Grâce aux différentes méthodes `RUL()` et à la construction particulière des fonctionnalités, il est possible de connaître les probabilités ou les chances de réussite de la séquence de tâches de production. Si celles-ci sont insuffisantes, les composants à maintenir sont identifiés et peuvent faire l'objet de demandes de TM. Une TM impliquant un composant spécifique est demandée lorsque une fonctionnalité ou un groupe de fonctionnalités a une probabilité trop importante de ne pas réaliser la séquence de tâches de production dans des conditions acceptables. Le champ `ID_composant à maintenir` de la machine indique le composant à maintenir en priorité. Pour vérifier si cela suffit, sa durée d'utilisation est mise temporairement à zéro. Après recalcul des probabilités de réussite de la séquence des tâches de production, il se peut qu'un autre composant doive être maintenu et ainsi de suite selon la démarche présentée dans [González et al., 2018].

La connaissance des probabilités de panne des fonctionnalités permet ainsi de planifier

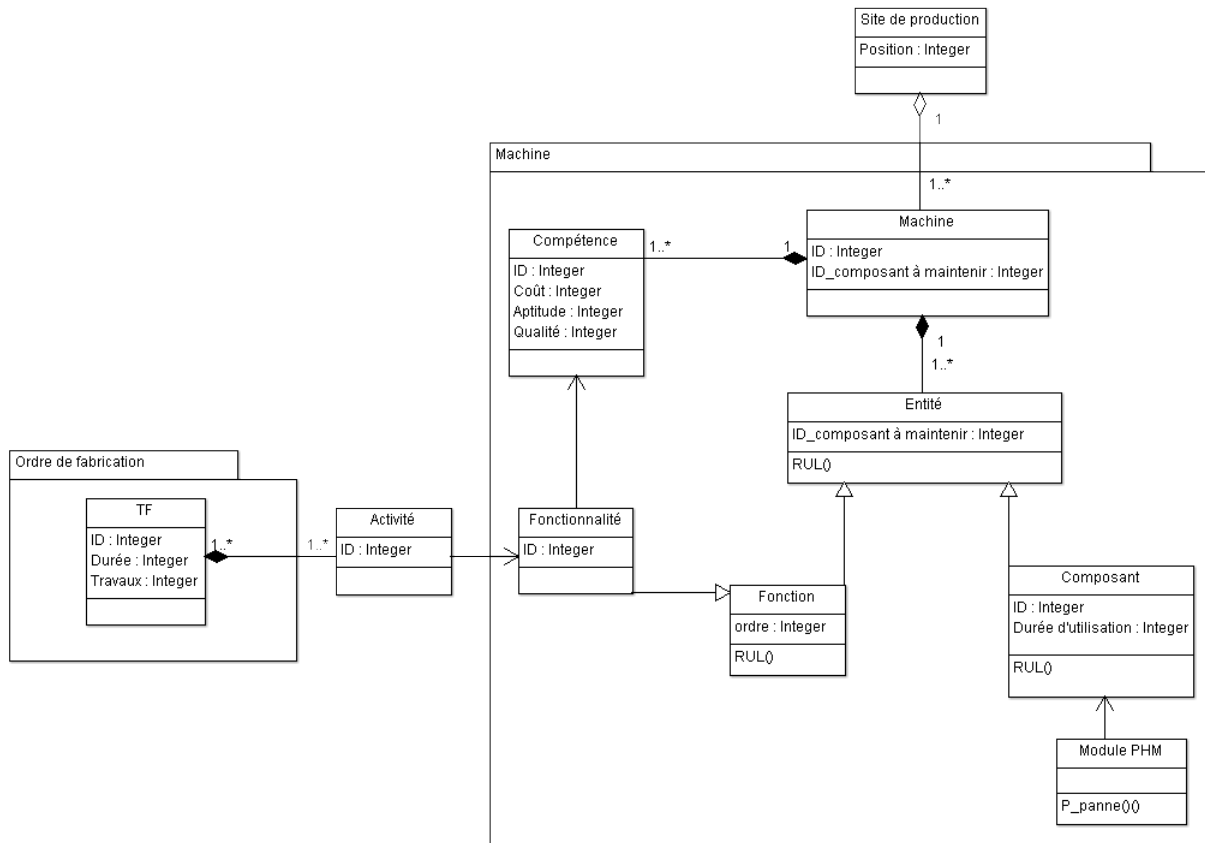


FIGURE 2.9 – Modélisation d’une machine

au préalable les tâches de production et de maintenance, car celle-ci permet de connaître les disponibilités futures des fonctionnalités de la machine, ainsi que de distinguer les composants qui nécessitent une intervention de maintenance.

2.4.3 Les ressources de maintenance

Pour pouvoir réaliser les TM demandées par les gestionnaires de production, un ensemble de mainteneurs et d’outils spécifiques pour la réparation ou le remplacement des composants dégradés est nécessaire. Pour cela, des centres de maintenance regroupant les ressources capables de réaliser ces TM sont créées. Chaque centre de maintenance dispose d’un ensemble de mainteneurs, dont chacun est décrit par la liste de ses compétences. Une compétence est la capacité du mainteneur à traiter un type de composant associée à son aptitude (rapidité) à réparer le composant et au coût de traitement par unité de temps de la réparation. Par analogie

avec les ressources de production, une tâche de maintenance ne peut être effectuée que par un seul mainteneur à la fois et ce dernier doit avoir la compétence nécessaire pour l'intervention sur le composant concerné par la tâche. De plus, un mainteneur ne peut traiter qu'une seule tâche de maintenance à la fois. Toutefois, plusieurs mainteneurs peuvent avoir les compétences nécessaires pour traiter un composant donné. Cependant, l'aptitude et le coût de traitement peuvent différer d'un mainteneur à l'autre, ce qui rend la durée et le coût de traitement des TM variables en fonction des mainteneurs sélectionnés pour leur traitement.

Une modélisation des ressources de maintenance est donnée sur la figure 2.10. Les centres de maintenance, reçoivent des demandes sous forme de TM de la part de plusieurs centres de production. Ces TM doivent être planifiées par les centres de maintenance qui, comme tout organisme, cherchent à maximiser leurs profits en satisfaisant les demandes de leurs clients (qui sont dans ce cas les gestionnaires de production) selon leurs propres critères et contraintes. Par conséquent, il se peut qu'une tâche de maintenance ne soit pas planifiée à la date souhaitée par le gestionnaire de production.

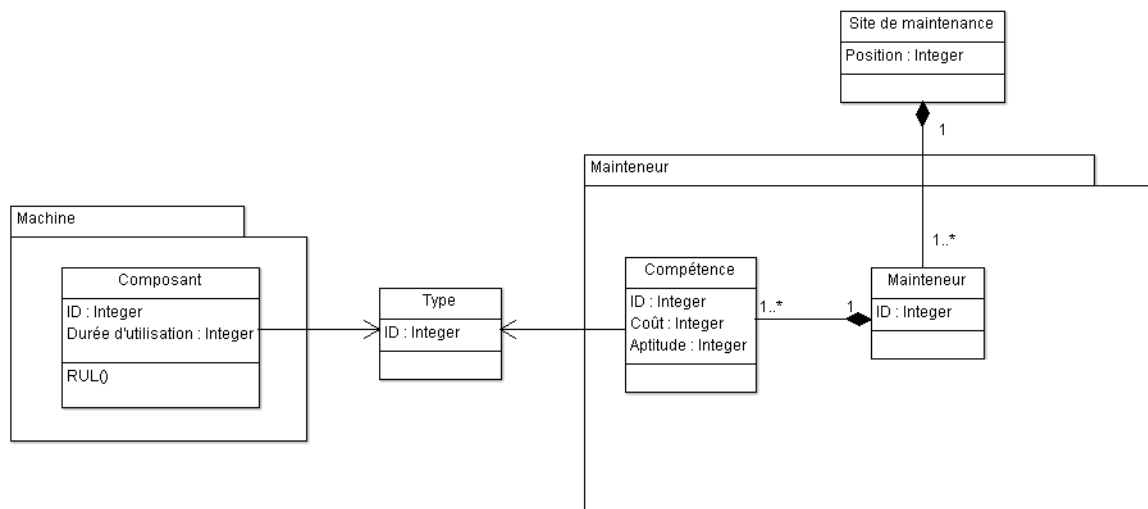


FIGURE 2.10 – Modélisation d'un mainteneur

Après avoir modélisé séparément chaque entité du problème étudié, nous présentons dans la figure 2.11 une vision globale de ces modélisations en soulignant les liens et interactions entre les entités qu'elles représentent.

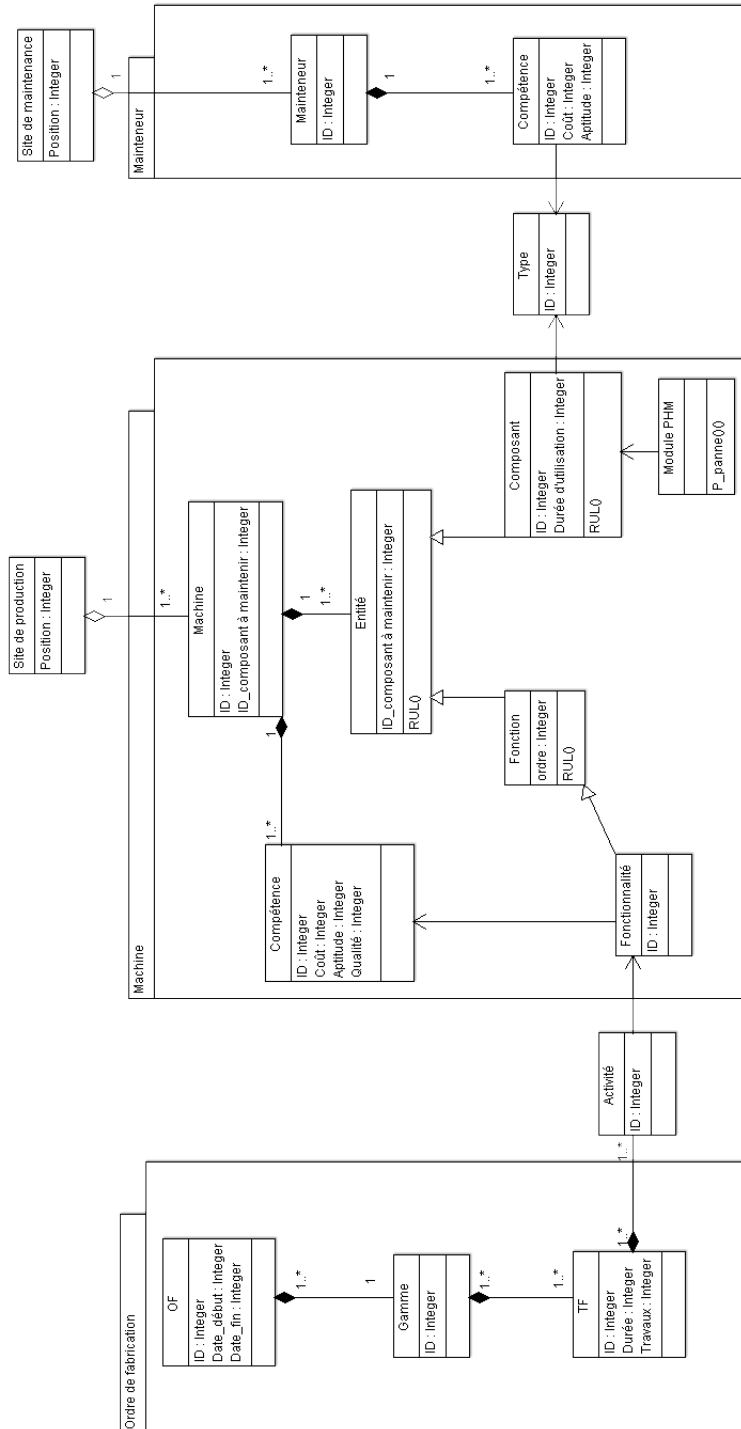


FIGURE 2.11 – Modélisation globale du problème

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière détaillée notre problématique, les objectifs et les contraintes de chaque élément faisant partie du problème. Nous avons aussi proposé une modélisation orientée objet de ces éléments par des diagrammes de classes UML, qui est un langage de modélisation unifié permettant des représentations graphiques qui facilitent la compréhension du problème. Après cette étude du problème et la modélisation présentant les particularités de ses différentes parties ainsi que les liens entre elles, plusieurs questions concernant la planification conjointe des interventions de maintenance et des tâches de production se posent :

- Comment planifier les tâches de production en prenant en compte la contrainte de dégradation de l'état de santé des machines en fonction de leurs utilisations ?
- Comment planifier les tâches de maintenance en tenant compte de la contrainte de disponibilité des mainteneurs tout en maximisant l'utilisation des machines ?
- Comment faire coopérer les services de production et de maintenance sachant que très souvent chacun prend ses décisions indépendamment de l'autre ?

Dans la suite de ce travail, nous présentons nos contributions aux réponses à ces questions. Cependant, et puisqu'il n'est pas possible de trouver une réponse générale à toutes ces questions en même temps d'une manière exacte, nous avons divisé et traité le problème en plusieurs sous-problèmes puisque chaque élément du problème peut être une entité individuelle et autonome qui prend ses décisions indépendamment des autres. Ces entités pourront difficilement converger pour atteindre au mieux les objectifs généraux, du fait que chacune cherche à satisfaire ses propres objectifs pouvant être contraires à ceux des autres et aussi parce que des informations internes à chaque entité, jouant un rôle important dans la prise de décision, ne peuvent pas être partagées pour des raisons de confidentialité.

Cette approche de résolution par sous-problèmes nous a conduit à développer une méthode générique ainsi qu'une plateforme facilitant la communication entre les entités prenant en considération ces contraintes. La méthode développée est distribuée, flexible et a pour objectif de satisfaire au mieux les intérêts de la production et de la maintenance. Elle doit être distribuée pour prendre en compte le cas où les ateliers de production et les centres de maintenance sont

des entreprises différentes. La flexibilité de la méthode réside dans le fait qu'elle peut être facilement modifiée pour s'adapter aux changements qui peuvent survenir dans l'environnement (ajout de nouvelles ressources, apparition de nouvelles technologies, installation, déplacement ou suppression de centres, etc.). Pour ce faire, nous avons choisi d'exploiter les capacités des systèmes multi-agents pour plusieurs raisons détaillées dans le chapitre suivant. Parmi celles-ci, il y a le fait qu'ils ont fait la preuve de leur efficacité dans le domaine de la gestion de production, grâce à leur aspect distribué et, aussi, grâce à la flexibilité et l'autonomie des agents qui s'adaptent bien à la nature changeante des systèmes de production.

Chapitre 3

SCEMP : un système multi-agent pour la planification conjointe des tâches de production et de maintenance

3.1 Introduction

Après avoir présenté la problématique relative à l'ordonnancement des tâches de production et de maintenance, et après avoir présenté les caractéristiques et contraintes de notre système, il a été mis en évidence que les décideurs (mainteneurs et producteurs) sont en conflit pour la planification de leurs tâches respectives et qu'il peut être souhaitable de réaliser cette planification conjointement. Il s'agit donc d'un problème d'ordonnancement conjoint des tâches de production et de maintenance. Pour résoudre ce problème d'ordonnancement, nous avons besoin d'un outil permettant la modélisation de chacune des entités de notre problématique, des liens qu'elles partagent, ainsi que des conflits qui existent entre elles. C'est justement pour cette raison que nous avons choisi d'utiliser les Systèmes Multi-Agents (SMA) qui sont un outil de modélisation et de résolution offrant une grande flexibilité ainsi que la capacité d'utiliser les techniques de négociation. L'aspect distribué des SMA s'adapte aussi parfaitement à notre problématique, car notre objectif est de réaliser une méthode générique qui pourra être utilisée, entre autres, dans le cas de plusieurs pôles de production et de maintenance qui sont sur des sites distincts ou qui peuvent être des entreprises indépendantes. Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter plus amplement les systèmes multi-agents et l'intérêt de leur utilisation

pour la résolution de notre problématique. Nous allons ensuite expliquer en détail comment on peut modéliser chacun des décideurs sous forme d'un agent indépendant et comment ces agents communiquent afin de converger vers une solution ciblant convenablement leurs objectifs et satisfaisant les contraintes du système général.

3.2 Systèmes multi-agents

La décentralisation d'un système présente des avantages indéniables. La minimisation du contrôle central allège le fonctionnement d'un système et correspond mieux aux intérêts individuels des entités le composant. Les Systèmes Multi-Agents (SMA) transposent ces idées sur les systèmes informatiques composés d'entités intelligentes appelées agents. Les travaux sur les SMA couvrent plusieurs disciplines, pas seulement en informatique, puisqu'ils s'inspirent aussi des idées et concepts issus de l'économie, de la psychologie et de la sociologie [Zargayouna, 2007]. Nous trouvons dans la littérature plusieurs définitions d'un agent, mais nous nous limitons à celle donnée dans [Jennings, 1994] qui le définit comme étant une entité physique ou virtuelle qui :

1. est capable d'agir dans un environnement,
2. peut communiquer avec d'autres agents,
3. cherche à satisfaire un objectif individuel,
4. possède des ressources propres,
5. ne dispose que d'une représentation partielle des autres agents,
6. possède des compétences et offre ses services aux autres agents,
7. a un comportement qui tend à satisfaire ses propres objectifs en tenant compte de ses compétences et de ses ressources.

Cette définition met l'accent sur l'autonomie de décision qui résulte de l'indépendance avec laquelle l'agent tente de satisfaire les objectifs qui lui sont assignés en utilisant au mieux les ressources et les compétences dont il dispose.

Malgré la diversité de natures que peuvent avoir les agents, ils possèdent des caractéristiques communes [Jennings and Wooldridge, 1995] :

Autonomie : les agents doivent être en mesure d'effectuer la majeure partie de la résolution de leurs problèmes sans l'intervention directe de l'homme ou d'autres agents, et ils doivent avoir un certain degré de contrôle sur leurs propres actions et leur propre état interne,

Capacité sociale : l'agent doit être capable d'interagir avec d'autres agents, via des langages de communication, dans le but d'atteindre ses objectifs ou d'aider les autres agents à résoudre leurs problèmes.

Réactivité : les agents doivent percevoir leur environnement et agir rapidement aux changements qui peuvent se produire.

Adaptabilité : les agents doivent pouvoir changer leur comportement en réponse aux évolutions de l'environnement ou de leur base de données.

3.2.1 La coordination dans les systèmes multi-agents

La participation à toute situation sociale doit être à la fois contraignante mais aussi enrichissante. En ce sens, la coordination, c'est-à-dire le processus par lequel un agent décide de ses actions locales et les actions (prévues) des autres pour s'assurer que la communauté agit d'une manière cohérente, est la clé pour atteindre cet objectif. Sans coordination, les avantages de la résolution décentralisée des problèmes disparaissent et la communauté peut rapidement diverger en un ensemble d'individus égoïstes et incohérents [Jennings, 1996]. Plus précisément, les objectifs du processus de coordination sont d'assurer que les agents interagissent d'une manière qui permet à leurs activités d'être intégrées dans la solution globale et que tous les membres agissent de manière ciblée et cohérente pour pouvoir atteindre les objectifs globaux désirés [Durfee et al., 1987a], [Durfee et al., 1987b].

Le but principal d'un SMA est de faire collaborer un certain nombre d'agents afin de résoudre un problème [Hafri and Najid, 2001]. La résolution d'un problème dans un contexte multi-agent consiste à définir des étapes intermédiaires pour arriver à une solution satisfaisante. Le principe est de fédérer l'ensemble des connaissances et la capacité de raisonnement détenus par les agents. Chaque agent peut être spécialisé dans un sous-domaine du domaine global et c'est leur coopération qui permet de résoudre la totalité du problème en question.

Parmi les raisons principales pour lesquelles les différents agents doivent coopérer et être coordonnés, nous citons :

- Aucun agent n'a suffisamment de compétences, de ressources ou d'informations pour résoudre l'ensemble du problème. Par conséquent, la résolution de problèmes en coopération est le seul moyen d'y parvenir.
- A cause de la décentralisation dans les SMA, les conflits peuvent se produire facilement parce qu'aucun agent ne possède une vue globale de l'environnement auquel il appartient.
- Il y a des dépendances entre les actions des agents. Les décisions locales prises par un agent ont un impact sur les décisions des autres membres de la communauté.
- Il existe en général des contraintes globales que le groupe d'agents doit satisfaire pour que le système soit jugé efficace. Si les agents agissent isolément, il est peu probable que ces contraintes globales soient respectées. Ainsi, ce n'est que par une bonne coordination entre les agents que des solutions réalisables peuvent être élaborées.
- Même lorsque les individus peuvent fonctionner de manière indépendante, évitant ainsi le besoin de coordination, les informations découvertes par un agent peuvent être suffisamment utiles à un autre agent pour que les deux agents puissent résoudre le problème plus rapidement.

3.2.2 La communication dans les systèmes multi-agents

Dans un système multi-agent constitué d'un ensemble d'agents coopérants, les agents doivent disposer d'un moyen de communication leur permettant de partager leurs connaissances et de tirer profit du savoir faire des autres. Tout comme pour les humains, la communication est à la base des interactions entre les agents. La communication est un élément essentiel qui permet de synchroniser les actions des agents et de résoudre les éventuels conflits par des processus dédiés. En d'autres termes, elle permet la coordination du système en se comportant en tant qu'unité [Sycara, 1989]. Cependant, cette communication ne doit pas être faite n'importe comment et n'importe quand. C'est un acte qui doit être modélisé. Les agents doivent s'exprimer avec un langage standard permettant au récepteur de comprendre la requête et de répondre de façon adéquate à cette dernière. Ce langage utilisé doit être suffisamment riche et expressif pour transmettre facilement des informations complexes et exprimer clairement leurs buts et objectifs. Nous distinguons principalement deux types de modèles de communication : la communication par partage d'informations et la communication par envoi de messages.

3.2.2.1 La communication par partage d'information

Dans ce mode de communication, la communication entre les agents ne se fait pas directement mais à travers un tableau noir. Le tableau noir correspond à une base de données globale commune à tous les agents dans laquelle les différents agents écrivent et lisent les informations dont ils ont besoin [Ferber, 1997]. Toute architecture à base de tableau noir (figure 3.1) dispose d'un contrôleur qui gère les accès au tableau noir des agents. Le contrôleur active les agents d'une manière à synchroniser leurs actions en suivant une stratégie préétablie.

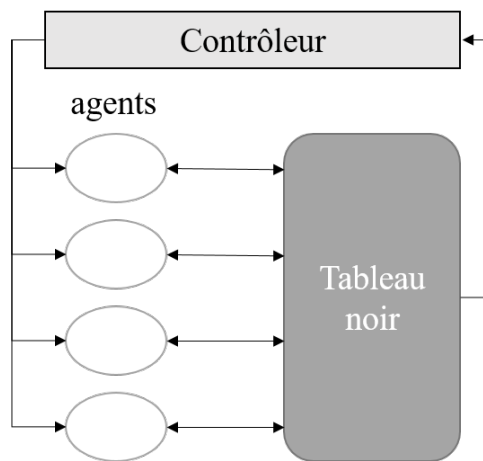


FIGURE 3.1 – Architecture d'un SMA à base de tableau noir

3.2.2.2 La communication par envoi de messages

Dans ce mode de communication, les agents communiquent directement entre eux en s'envoyant des messages. Une communication est une suite de messages intelligibles par les agents émetteurs et les agents récepteurs. Cette suite est structurée et suit une certaine logique ou un certain protocole. Pour ceci, tout système fonctionnant avec un mode de communication par envoi de messages nécessite la mise en œuvre d'un protocole de communication. La conception de protocoles de communication entre agents est essentielle pour un bon fonctionnement du contrôle décentralisé. Ces protocoles doivent être simples, tout en étant capables d'effectuer toutes les opérations assignées aux agents [Krothapalli and Deshmukh, 1999].

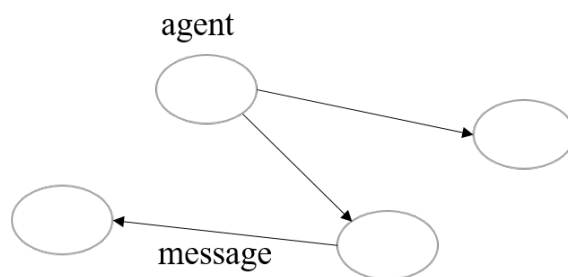


FIGURE 3.2 – Communication par envoi de messages

Parmi les protocoles de communication existant, il y a Contract-Net proposé dans [Smith, 1980] dont le principe consiste à diffuser un message d'appel d'offre concernant une tâche, puis à comparer les offres reçues afin de signer un contrat avec l'agent qui propose la meilleure offre.

3.2.3 Apport d'utilisation des SMA pour l'ordonnancement

Comme mentionné dans le premier chapitre, le problème d'ordonnancement a été largement étudié dans la littérature et plusieurs méthodes ont été proposées pour sa résolution. Cependant, ces problèmes sont, dans la plupart des cas, résolus d'une manière centralisée et éprouvent plusieurs difficultés lors de leur application pratique dans les systèmes de production [Letouzey et al., 2003]. Ceci est dû à la modélisation simpliste du problème alors qu'en réalité il existe des contraintes et des objectifs contradictoires qui rendent la gestion centralisée du problème difficile voire impossible.

L'étude du problème d'une manière décentralisée devient intéressante afin de contrôler les conflits qui peuvent survenir entre les différents acteurs de notre problème. Les SMA semblent convenir parfaitement. Ceci se justifie par les caractéristiques suivantes :

- Leur autonomie permet de modéliser chaque entité de notre problématique d'une façon décentralisée, intégrée, réactive et distribuée. En effet, les gestionnaires de production et de maintenance se retrouvent souvent dans des situations de conflits parce que chacun d'eux essaie de résoudre son propre problème indépendamment de l'autre. Ces conflits, peuvent être résolus par des techniques de négociations qu'offrent les SMA, tout en gardant l'autonomie de chacun, où chaque agent est chargé de résoudre les problèmes qui lui sont confiés en fonction des informations et connaissances dont il dispose.
- La résolution des conflits peut être traitée par des processus de négociation qui modèrent

les satisfactions et les frustrations des différents agents afin d'aboutir à une solution basée sur des compromis.

- Leur flexibilité est un atout majeur pour notre modèle. En effet, la flexibilité des SMA leur permet de s'adapter facilement aux changements qui peuvent survenir sur les marchés et même dans les systèmes de production. Par exemple, l'achat de nouvelles machines plus performantes pour améliorer la qualité des produits, l'installation de nouveaux centres de production, l'apparition de nouvelles techniques et outils de maintenance, etc. Tous ces changements cités ne nécessitent pas de reconstruction totale du modèle, seuls les protocoles de communication entre les entités modifiées/ajoutées doivent être mis à jour ou encore les traitements internes des agents concernés par les changements.
- Les ressources connectées directement aux ressources physiques permettent de considérer un ordonnancement en temps réel.

Toutes ces raisons nous ont amenés à traiter le problème à l'aide des SMA. Ainsi, nous proposons un SMA permettant de modéliser un système de gestion décentralisé, distribué et flexible appliqué aux fonctions de production et de maintenance. Le modèle que nous proposons dérive d'un SMA, nommé SCEP (Superviseur, Clients, Environnement et Producteurs) présenté dans la figure 3.3.

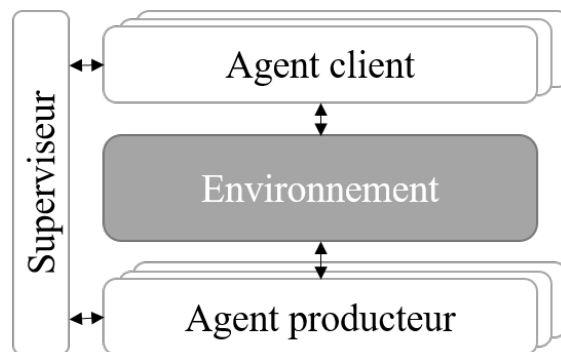


FIGURE 3.3 – Système multi-agent SCEP

Le modèle SCEP a été introduit par [Archimède and Coudert, 1998] et s'inspire du protocole Contract-Net avec les notions d'appel d'offre et d'enchère mais sa communication se fait par tableau noir. Ce modèle SCEP permet de traiter des séquences de fabrication souples, des structures de machines différentes et peut associer des objectifs et contraintes spécifiques à chaque agent. SCEP introduit une coopération indirecte entre les agents par l'intermédiaire d'un tableau noir : l'environnement.

L'intérêt des méthodes basées sur le modèle SCEP, selon [Archimède and Coudert, 2001], réside dans la qualité de la solution fournie ainsi que dans la durée d'exécution qui reste acceptable pour les gestionnaires. En 2000, un aspect distribué a été introduit dans le modèle SCEP dans [Archimède et al., 2000] permettant à de multiples sites de natures différentes de se connecter afin de planifier leurs activités dans le même environnement. Ce modèle a suscité un intérêt pour d'autres travaux au cours des dernières années et s'est révélé efficace pour traiter différents types de problèmes d'ordonnancement, notamment, les problèmes d'ordonnancement comprenant des ressources partagées [Xu et al., 2012], [Archimède et al., 2014], la planification des transports [Memon and Archimède, 2013], l'interopérabilité en planification multi-site [Ishak et al., 2008], etc.

Considérant le problème de la planification de la production et de la maintenance, un logiciel appelé R@MSES basé sur le modèle SCEP a été développé et présenté dans [Coudert et al., 2002]. Le planificateur RAMSES est composé de plusieurs agents de production-RAMSES, d'agents de maintenance-RAMSES et d'un tableau noir qui est régulièrement mis à jour pendant le processus de négociation. Chaque agent de production-RAMSES représente un atelier et chaque agent de maintenance-RAMSES est dédié à la planification des opérations de maintenance de trois types : préventive, conditionnelle et corrective. Tout d'abord, tous les producteurs et les agents de maintenance planifient leurs opérations, puis ils vérifient s'il y a un chevauchement. Dans l'affirmative, un échange de messages entre les agents impliqués est lancé jusqu'à ce qu'un compromis satisfaisant au mieux les besoins de chacun soit trouvé. Cependant, dans ce logiciel, l'évolution de la dégradation de l'état de santé des machines n'est pas considérée durant la planification.

Dans ce travail, nous étendons le modèle SCEP en introduisant un nouvel agent mainteneur et en enrichissant les capacités des agents producteurs qui évaluent l'état de santé actuel et futur de leur machine et planifient les TF en fonction de cet état de santé. Ainsi, la planification des opérations de production et de maintenance est construite simultanément afin qu'aucune interruption de production n'apparaisse. Les ordres de maintenance visent à répondre à des demandes d'intervention de maintenance sur des composants de machine d'agents producteurs. Ces demandes sont émises par les agents producteurs si la fonctionnalité à laquelle contribuent ces composants présente un risque ou une probabilité trop importante d'entraîner des défaillances lors de la réalisation d'une tâche de production.

3.3 Le système multi-agent SCEMP

SCEMP est le nom que nous avons donné au modèle multi-agent que nous avons développé pour l'ordonnancement conjoint des tâches de production et de maintenance. SCEMP comprend cinq types d'agents (figure 3.4) : le superviseur (S), les clients (C), l'environnement (E), les mainteneurs (M) et les producteurs (P) [Bencheikh et al., 2018a].

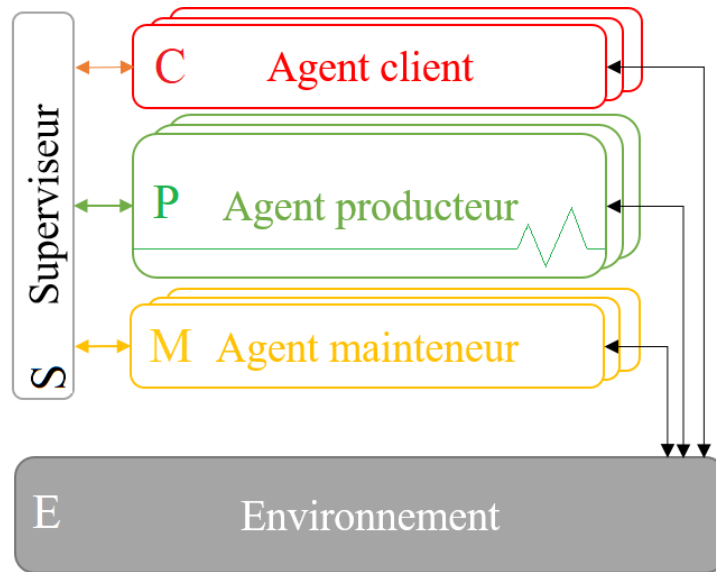


FIGURE 3.4 – Système multi-agents SCEMP

SCEMP est un SMA à base d'un tableau noir qui correspond à l'agent environnement dans lequel les différents agents déposent et récupèrent les informations dont ils ont besoin pour résoudre leurs sous-problèmes [Bencheikh et al., 2018b]. L'environnement est donc une ressource critique dans laquelle les informations doivent être ordonnées et écrites d'une manière qui permet leur utilisation par les autres agents. Dans le but de bien ordonner les informations qui y sont écrites, l'agent superviseur contrôle l'accès des autres agents à l'environnement selon un ordre logique.

Concrètement, l'environnement est constitué d'un ensemble d'objets ayant tous la même structure. Chaque objet correspond à une tâche de production ou à une tâche de maintenance et est formé d'un triplet (PS, LP, PF), correspondant respectivement à la position souhaitée, la liste des propositions de position et à la position finale choisie pour la tâche en question. Lorsqu'un appel d'offre est lancé dans l'environnement, la PS est définie par l'agent qui a fait l'offre (agent

client dans le cas d'une TF et l'agent producteur dans le cas d'une TM). Les agents concernés par l'offre proposent des enchères c'est-à-dire des positions pour cette tâche qui sont regroupées dans la liste LP de l'objet en question. Ensuite, l'agent lanceur de l'offre compare les différentes propositions et choisit celle qui convient le mieux à ses objectifs. Lorsqu'une proposition est retenue, un contrat entre l'agent lanceur de l'offre et l'agent gagnant de l'enchère est établi et la PF de l'objet est ainsi fixée pour cet objet. Si la PF est vide, cela signifie que l'objet est toujours dans l'état "libre", c'est-à-dire qu'il n'est pas encore affecté à une ressource. Dans le cas contraire, il passe à l'état dit "validé" et ne pourra pas être modifié postérieurement.

Pour une tâche, l'enchère proposée par un agent comporte une Position Effective (PE) et une Position Potentielle (PP). La PE est déterminée par le producteur ou le mainteneur en considérant toutes les autres tâches pouvant être ordonnancées sur la ressource. Il s'agit des tâches qui sont dans l'état "validé" ainsi que les tâches pour lesquelles la ressource est candidate (figure 3.5). La PP, quant à elle, est déterminée en ne considérant que les tâches déjà validées et en supposant que les autres tâches de la liste seront réalisées sur d'autres ressources (figure 3.6).

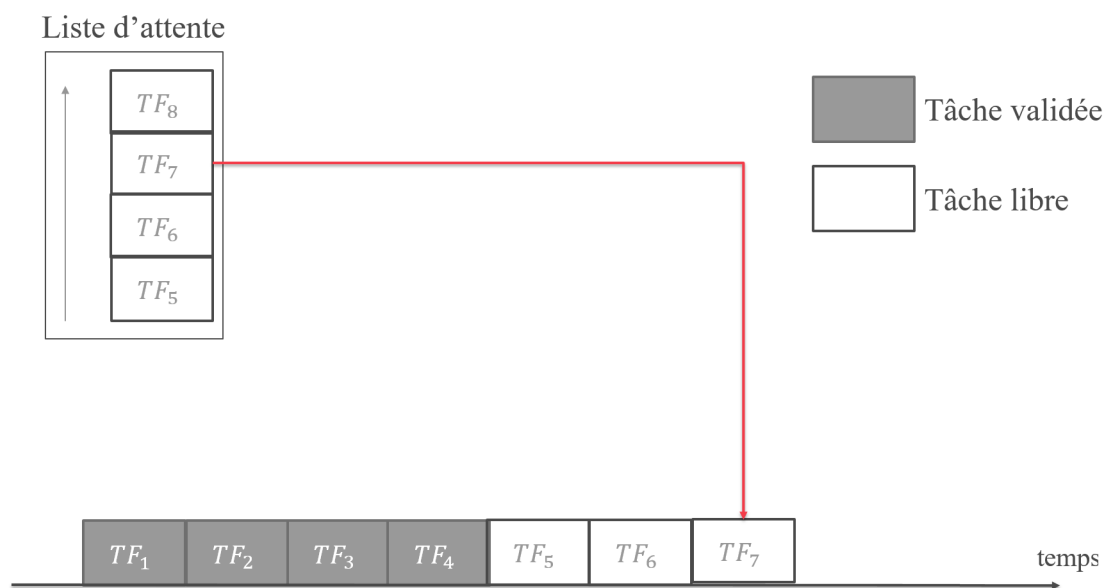


FIGURE 3.5 – Exemple de détermination de position effective (PE) pour la TF_7

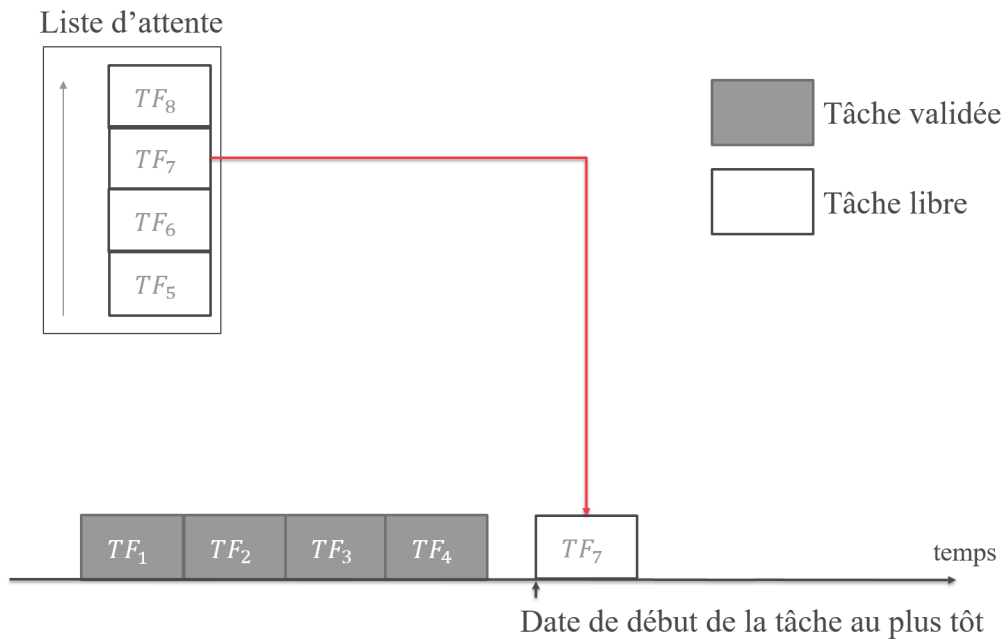


FIGURE 3.6 – Exemple de détermination de position potentielle (PP) pour la TF_7

3.3.1 Description des agents

Afin de modéliser les actions de chaque agent de SCEMP, nous nous inspirons des raisonnements de chacun des décideurs de notre problématique. Pour cela, nous analysons les différences concernant les informations dont chaque décideur dispose, ainsi que leurs objectifs et leurs contraintes.

3.3.1.1 Agent client

Dans la réalité, les clients ne disposent pas d'information concernant la disponibilité des machines, de leur état actuel de santé ni de leurs capacités. Ils supposent que leurs produits seront toujours fabriqués par les machines les plus performantes. Les clients sont exigeants concernant les dates de livraison de leurs produits et l'enchaînement des tâches de production. En se basant sur ces caractéristiques, un agent client correspond à un ordre de fabrication OF_i qui contient des tâches de fabrication TF qui, quant à elles, suivent un ordre prédéfini par la gamme de production correspondant à l'article en question. Ainsi, un agent client contrôle que la réalisation de l'OF commence après sa date de début au plus tôt R_i et exige qu'il se fasse livrer avant sa date de fin au plus tard D_i . Il s'assure aussi que l'enchaînement des TF est fait de sorte que toute TF de sa gamme ne commence qu'après l'achèvement de toutes les TF

précédentes.

3.3.1.2 Agent producteur

Après la réception d'un ordre de fabrication, un responsable d'atelier décide quelle tâche de production va être réalisée sur quelle machine, tout en tenant en compte de l'aptitude des machines à exécuter les différentes tâches et de la disponibilité de leurs fonctionnalités contraintes par la durée de vie des composants entrant dans leur construction. Plusieurs tâches de production affectées à une machine sont ordonnancées suivant un ordre imposé par le système de production selon un critère d'optimisation donné. En supposant que le responsable d'atelier mette en œuvre une politique de maintenance prédictive, il surveille l'état de santé des fonctionnalités que possède chaque machine en calculant leurs chances ou probabilités de défaillance en fonction des résultats donnés par les modules de PHM des composants concernés. Lorsqu'il s'aperçoit que pour une machine, une fonctionnalité n'est plus en mesure d'être utilisée pour exécuter des tâches de production la nécessitant, il exclut cette fonctionnalité de l'ensemble de fonctionnalités disponibles de la machine et fait en sorte qu'elle soit remise en condition opérationnelle via des maintenances sur les composants contribuant au mieux à cette remise en condition.

Dans le modèle SCEMP, un agent producteur ne gère qu'une machine M_j et l'ensemble des ressources associées (outillage, opérateurs, etc.). Il a accès aux informations concernant ses fonctionnalités et leurs coefficients de rapidité (aptitude) ainsi qu'à ses composants et leur état de santé. De plus, chaque agent producteur applique une méthode d'ordonnancement permettant de planifier les TF selon un objectif souhaité. Chaque agent producteur est donc chargé d'ordonnancer les TF de sa liste en fonction de sa méthode d'ordonnancement tout en suivant l'évolution des dégradations des composants de sa machine. Pour cela, il doit calculer en permanence les chances ou probabilités de pannes des fonctionnalités de la machine qu'il gère en fonction des résultats donnés par les modules de PHM des composants concernés pour chaque nouvelle TF placée dans son ordonnancement. Lorsque la chance ou la probabilité de panne d'une fonctionnalité entraîne un risque, fixé par l'agent producteur, trop important pour que la TF ne puisse pas être achevée dans des conditions satisfaisantes, l'agent producteur lance des demandes de Tâche de Maintenance (TM) pour les composants identifiés comme nécessitant une intervention des mainteneurs.

3.3.1.3 Agent mainteneur

Un centre de maintenance gère des ressources de maintenance Mt_k . Ces ressources représentent par exemple des équipes de maintenance, des équipements de maintenance fixes, des équipements spéciaux, des outillages, etc. L'utilisation des ressources de maintenance est contrainte par des critères d'optimisation propres à chaque mainteneur. Ces critères d'optimisation font que chaque mainteneur applique sa propre méthode d'ordonnement des Tâches de Maintenance (TM).

Dans SCEMP, un agent mainteneur correspond à une ressource de maintenance qui, quant à elle, possède des compétences lui permettant d'intervenir sur des types de composants précis avec un coefficient de rapidité propre à chaque composant. Ce coefficient de rapidité diffère d'une ressource à une autre et indique le temps nécessaire pour qu'une ressource répare un composant donné. Ainsi, ayant reçu une TM pour un composant, le mainteneur propose selon la disponibilité de sa ressource une date de début et de fin d'exécution de la tâche en question.

Nous résumons dans le tableau 3.1, les connaissances dont dispose chaque agent, son rôle dans la planification ainsi que ses objectifs.

Agent	Connaissances	Sous-problème traité	Objectifs
Client	<ul style="list-style-type: none"> • Un OF (R_i, D_i, gamme) 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification à capacité infinie • Suivi du séquençement des TF 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiser L_{max} • Minimiser le coût de fabrication • etc.
Producteur	<ul style="list-style-type: none"> • Une machine (fonctionnalités, compétences, composants) • RUL des composants • Méthode d'ordonnancement 	<ul style="list-style-type: none"> • Ordonnancement conjoint sur une machine 	<ul style="list-style-type: none"> • minimiser L_{max} • Minimiser C_{max} • Minimiser $\sum U_i$ • Minimiser les coûts de maintenance • etc.
Mainteneur	<ul style="list-style-type: none"> • Une ressource • Périodes d'indisponibilité • Durées de traitement des composants • Méthode d'ordonnancement 	<ul style="list-style-type: none"> • Ordonnancement des TM 	<ul style="list-style-type: none"> • Minimiser L_{max} • Minimiser les coûts de transport • Minimiser $\sum U_i$ • etc.

TABLE 3.1 – Description des agents

3.3.2 Protocole de communication

La méthode que nous proposons repose sur l'exécution de plusieurs cycles qui correspondent chacun à des échanges et négociations entre les différents agents. Nous distinguons deux types de cycle : un cycle de production (correspond aux négociations entre les clients et les producteurs) et un cycle de maintenance (contenu dans un cycle de production et correspond aux négociations entre les producteurs et les mainteneurs). Notre objectif étant d'ordonnancer les tâches de production et de maintenance, ces cycles se répètent tant qu'il reste au moins une tâche non planifiée dans l'environnement.

Les échanges entre les différents agents se font selon un protocole de communication qui comporte les étapes fondamentales représentées dans le diagramme de séquence UML de la figure 3.7 :

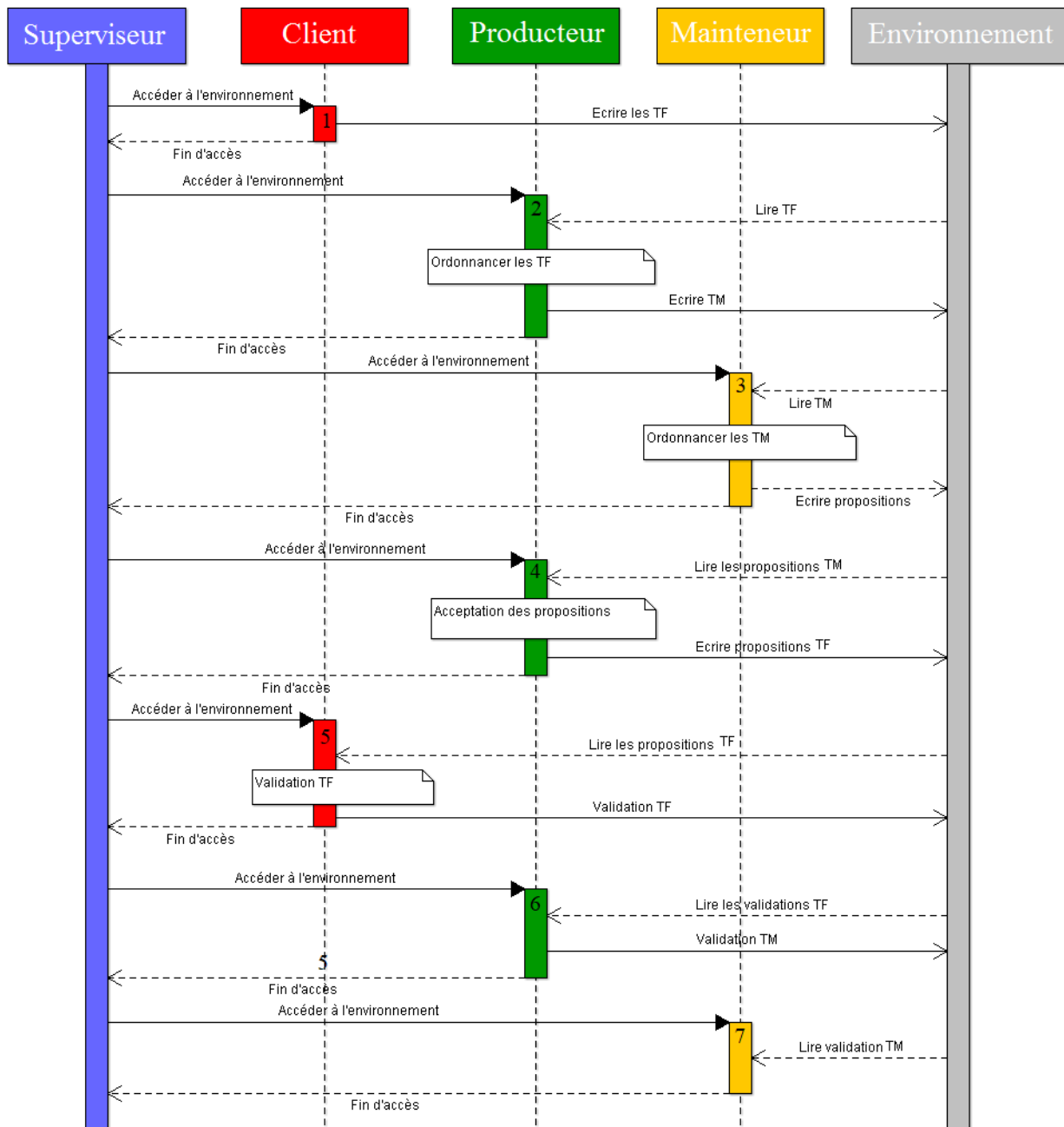


FIGURE 3.7 – Protocole de communication entre les agents

1. Planification des clients : Au début d'un cycle de production, le superviseur active les agents clients pour déposer leurs offres de TF. Chaque agent client planifie selon sa propre procédure de planification les différentes tâches TF de la gamme qui lui est associée à capacité infinie (c'est-à-dire sans prendre en considération la disponibilité des machines). L'agent client ne planifie les TF de sa gamme qu'en fonction des contraintes d'antériorité et de la date de début au plus tôt de l'OF (R_i).

Lorsque tous les agents terminent leur planification, ils émettent un appel d'offre en écrivant dans l'environnement leur souhait concernant la date de début pour les TF, sans pour autant qu'ils soient concernés par les choix des ressources sur lesquelles leurs tâches seront exécutées. Ainsi, pour chaque TF un appel d'offre est lancé dans l'environnement sous forme d'un objet. Pour chaque objet dans l'environnement la tâche requise est spécifiée, l'ensemble des fonctionnalités nécessaires et la position souhaitée (PS) pour la tâche calculée par l'agent client en supposant que la TF sera planifiée sur la machine la plus performante. A ce stade du processus, tous les objets TF présents dans l'environnement sont dans l'état "libre".

2. Planification des producteurs : Après que les agents clients ont terminé d'écrire sur l'environnement leurs demandes de TF, l'agent superviseur active les agents producteurs pour ordonnancer les TF demandées. Chaque agent producteur procède à la "lecture" des informations sur les objets (TF) libres qui figurent dans l'environnement. Il sélectionne les TF ayant des activités compatibles avec les fonctionnalités disponibles de sa machine et ajuste leur durée de réalisation en fonction de la valeur de son aptitude puis ordonnance les TF sélectionnées à capacité finie (c'est-à-dire en prenant en compte les autres tâches déjà planifiées et l'état de santé actuel et futur de sa machine). D'après la prévision de l'état de santé de la machine sur un horizon de temps prédéfini, relatif aux durées des tâches positionnées, si à un moment la machine devient incapable d'exécuter une tâche, car au moins une fonctionnalité requise par la tâche en question n'est plus en mesure d'être utilisée, le producteur lance une demande de TM pour chaque composant dont la maintenance permettra de remettre la fonctionnalité en état opérationnel. Le producteur lance donc autant de TM que de composants à maintenir pour que la fonctionnalité soit à nouveau en condition opérationnelle.

3. Planification des mainteneurs : Après que les agents producteurs aient écrit toutes les TM

nécessaires sur l'environnement, l'agent superviseur active les agents mainteneurs pour ordonnancer les TM demandées pendant le cycle de production en cours. A ce stade, un cycle de maintenance est lancé et les agents mainteneurs disposant des compétences nécessaires aux interventions sur les TM demandées ordonnancent celles-ci selon leurs disponibilités et selon leur méthode d'ordonnement. Ensuite, les agents mainteneurs écrivent sur l'environnement leurs propositions potentielle et effective pour chaque TM libre.

4. Acceptation des TM : L'agent superviseur active à nouveau les agents producteurs ayant lancé un appel d'offre pour des TM pendant le cycle de production en cours pour qu'ils puissent lire et décider d'accepter ou non chaque proposition faite par les mainteneurs. Un agent producteur accepte la proposition qui a la meilleure PE à condition qu'elle soit égale à la PP correspondante. Dans le cas où aucune proposition ne vérifie cette condition, la TM reste dans son état libre et est demandée à nouveau dans le prochain cycle de maintenance. Ce processus se poursuit itérativement en boucle jusqu'à ce que toutes les TM soient validées et affectées chacune à un agent mainteneur. Si aucune proposition n'a été retenue par les producteurs (aucune TM n'est passée à l'état "acceptée"), le processus d'ordonnement se bloque : Par analogie avec le processus client-producteur de SCEP décrit dans [Coudert et al., 2002], au moins une TM doit être acceptée durant chaque cycle de maintenance pour poursuivre le processus. Le protocole oblige alors le producteur ayant les propositions les moins éloignées de sa PS à accepter sa TM. Une fois que toutes les TM sont acceptées, le cycle de production se poursuit et les producteurs reprennent la planification de leurs TF restantes en prenant en compte la durée de la tâche de maintenance. A la fin de cette phase, les producteurs enregistrent sur l'environnement leurs propositions pour chaque TF de leur liste.
5. Validation des TF : L'agent superviseur active ensuite les agents clients pour qu'ils lisent les propositions (PE et PP) faites pour leurs TF par les agents producteurs. Ensuite, par analogie avec la phase d'acceptation des TM, chaque agent client valide la proposition qui a la meilleure PE à condition qu'elle soit égale à la PP correspondante. Dans le cas où aucune proposition ne vérifie cette condition, l'agent client décide d'attendre une éventuelle proposition plus intéressante au cycle prochain. A la fin de cette phase, les tâches retenues par les clients passent alors à l'état "validé". De même, si aucune proposition n'a

été retenue par les clients (aucune TF n'est passée à l'état "validée"), le processus d'ordonnancement se bloque [Coudert et al., 2002]. Le protocole oblige alors le client ayant les propositions les moins éloignées de sa PS à valider sa TF.

6. Validation des TM : L'agent superviseur active à nouveau les agents producteurs pour lire les validations faites par les agents clients. Ceci leur permettra de décider de valider ou non les TM acceptées pendant le cycle de production en cours. Chaque agent producteur gagnant d'une enchère intègre la tâche correspondante dans son planning et un contrat est ainsi assigné entre le client qui a demandé la TF et ce producteur. Naturellement, si aucune des propositions d'un producteur n'a été retenue, il n'est pas nécessaire d'effectuer les TM demandées par ce producteur durant le cycle de production en cours. Dans le cas contraire, un processus de validation des TM est lancé (différentes stratégies de validation sont présentées dans la section 3.3.6) afin de décider si une TM acceptée par un producteur doit être validée ou abandonnée.

Il a été souligné durant le processus de coopération entre les agents que les clients, les producteurs et les mainteneurs sont amenés chacun à résoudre un problème d'ordonnancement avec des hypothèses et contraintes différentes.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les sous-problèmes traités par ces trois classes d'agents en spécifiant les hypothèses et les contraintes considérées dans chaque cas. Ensuite, nous discuterons des éventuelles méthodes de résolution possibles pour chaque sous-problème.

3.3.3 Planification des clients

Dans cette section nous abordons le sous-problème de planification à capacité infinie des tâches d'une gamme de production et nous proposons un algorithme qui permet de calculer la date de début au plus tôt et la date de fin au plus tard des TF.

3.3.3.1 Hypothèses des clients

Nous supposons que les TF ont une durée fixe $p_{i,j}$ déterminée par la meilleure aptitude, le problème traité par les agents client consiste à trouver l'intervalle $[r_{i,j}, d_{i,j}]$ (voir la figure 3.8) correspondant à la fenêtre de temps réalisable dans laquelle chaque $TF_{i,j}$ peut être planifiée

sans causer de retard de livraison.

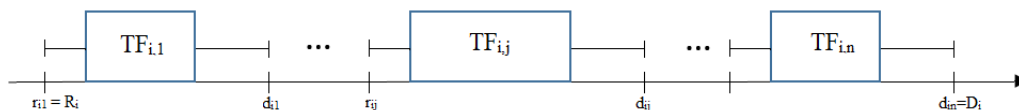


FIGURE 3.8 – Fenêtre de temps réalisable pour chaque TF d'une gamme

3.3.3.2 Contraintes des clients

Durant la planification à capacité infinie des TF d'une gamme de production, un client doit prendre en considération les contraintes suivantes :

- Aucune TF ne peut être planifiée avant la date de début au plus tôt R_i spécifiée dans l'OF ;
- Une tâche ne peut pas être planifiée avant l'achèvement de la tâche précédente ;

3.3.3.3 Résolution du sous-problème d'ordonnancement des clients

Pour trouver cette fenêtre de temps, nous proposons l'algorithme 1 qui permet de calculer la date de début au plus tôt ainsi que la date de fin au plus tard de chaque tâche de la gamme de production.

Les dates de début et de fin calculées par les clients ne constituent que les dates souhaitées et dans la plupart des cas, il est difficile de trouver des ressources disponibles à ces dates pour toutes les TF. Chaque fois qu'une tâche de la séquence est planifiée à une date qui dépasse celle souhaitée par le client, un décalage des dates de début au plus tôt des tâches qui suivent celle-ci est nécessaire.

3.3.4 Planification des producteurs

Dans cette section, nous abordons le problème d'ordonnancement d'un ensemble de TF indépendantes sur une seule machine soumise à des maintenances prédictives basées sur le PHM. Le PHM permet d'estimer les chances ou les probabilités que les défaillances de fonctionnalités nécessaires à des tâches de production aient lieu pendant leur réalisation. Il devient donc possible de planifier la maintenance de composants juste avant que les chances ou probabilités de panne

Algorithme 1 : Calcul des fenêtres réalisables pour les TF

Entrées : R_i : la date de début au plus tôt de l'OF

D_i : la date de fin au plus tard de l'OF

$p_{i,j}$: la durée des TF, avec $j = 1, \dots, n$

n : le nombre de TF dans la gamme

Sorties : $r_{i,j}$: date de début au plus tôt de $TF_{i,j}$

$d_{i,j}$: date de fin au plus tard de $TF_{i,j}$

$r \leftarrow R_i$;

pour $j = 1$ *to* n **faire**

| $r_{i,j} \leftarrow r$;
 | $r \leftarrow r + p_{i,j}$;

fin

$d \leftarrow D_i$;

pour $j = n$ *to* 1 **faire**

| $d_{i,j} \leftarrow d$;
 | $d \leftarrow r - p_{i,j}$;

fin

deviennent trop importantes. Chaque producteur est ainsi confronté au sous-problème de la planification conjointe des TF et des TM sur une seule machine avec contraintes de disponibilité.

3.3.4.1 Hypothèses des producteurs

Nous supposons dans cette section que :

- chaque TF a une durée opératoire initiale ;
- la durée de traitement d'une TF dépend de l'aptitude de la machine à effectuer toutes les fonctionnalités exigées par la tâche ;
- chaque $TF_{i,j}$ a une date de début au plus tôt $r_{i,j}$ et une date de fin au plus tard $d_{i,j}$;
- la durée des TM varie en fonction du type de composant concerné par la tâche et en fonction de l'aptitude du mainteneur chargé du traitement de la tâche ;
- les temps de réglage de la machine sont inclus dans les temps opératoires des tâches ;
- un seuil de risque s_z est associé à la machine correspondant aux chances ou probabilités maximales admissibles de défaillance d'au moins une fonctionnalité nécessaire lors de la réalisation d'une TF. Ces probabilités ou chances sont réévaluées lors de l'ordonnancement des TF à partir des probabilités ou chances de défaillances des composants ;
- la chance ou probabilité de défaillance d'un composant D_k est déterminée à partir des

données fournies par les modules de PHM qui peuvent fournir des distributions ou des fonctions cumulatives de ces chances ou probabilités en fonction de la future durée d'utilisation du composant concerné voire de la sévérité de cette sollicitation. Nous utilisons les méthodes proposées par [Desforges et al., 2017] et [González et al., 2018] pour calculer la probabilité de panne des fonctionnalités en fonction des données des modules de PHM des composants qu'elles utilisent et pour déterminer l'ensemble des composants à maintenir pour remettre les fonctionnalités de la machine en état opérationnel.

3.3.4.2 Contraintes des producteurs

Un producteur doit prendre en considération les contraintes suivantes :

- la machine ne peut traiter qu'une seule tâche (de production ou de maintenance) à la fois ;
- le traitement des tâches ne peut pas être interrompu ;
- une tâche TF ne peut être planifiée avant sa date de début au plus tôt $r_{i,j}$;
- une tâche de production $TF_{i,j}$ ne peut être planifiée à un instant t que si la machine peut mettre en œuvre toutes les fonctionnalités requises par $TF_{i,j}$ avec un risque de panne ou défaillance inférieur à s_z pendant sa réalisation sur l'intervalle $[t, t + p_{i,j}]$;

3.3.4.3 Résolution du sous-problème d'ordonnancement des producteurs

Pour résoudre ce sous-problème d'ordonnancement rencontré par les agents producteurs, chacun peut faire appel à une méthode d'optimisation développée dans le domaine de la recherche opérationnelle comme par exemple les algorithmes génétiques, le recuit simulé, etc., comme il peut déployer simplement une règle de priorité. Dans ce qui suit nous proposons une heuristique qui permet de trouver une position réalisable pour chaque TF en fonction de l'état de santé de la machine et qui prend en entrée une liste de tâches à ordonnancer selon la méthode déployée par l'agent producteur en question.

L'agent producteur applique sa méthode d'ordonnancement à l'ensemble des tâches de sa liste. A chaque fois qu'une position P est trouvée pour une tâche, 2 cas peuvent se produire :

- L'état de santé de la machine permet d'effectuer la tâche à cette position. Cela signifie que la probabilité ou chance de défaillance d'aucune des fonctionnalités requises ne dépassera

le seuil de risque s_z lors de l'exécution de la séquence de TF. Dans ce cas, la position P trouvée est affectée à la tâche TF actuelle. La durée de la tâche planifiée est ajoutée aux composants utilisés par les fonctionnalités nécessaires à la tâche. Le processus de planification des autres tâches de la liste reprend.

- L'état de santé de la machine ne permet pas d'effectuer entièrement la TF. Les composants à maintenir sont ensuite identifiés. S'il y a déjà des TM prévues pour ces composants critiques, alors le producteur essaie de trouver une autre position après ces TM (on note t_m la date de fin de la tâche de maintenance). Dans le cas contraire, il lance un appel de TM pour chaque composant à maintenir. Dans ce cas, le processus d'ordonnancement s'arrête jusqu'à ce que les TM soient planifiées.

Cette heuristique est présentée par le diagramme de la figure 3.9.

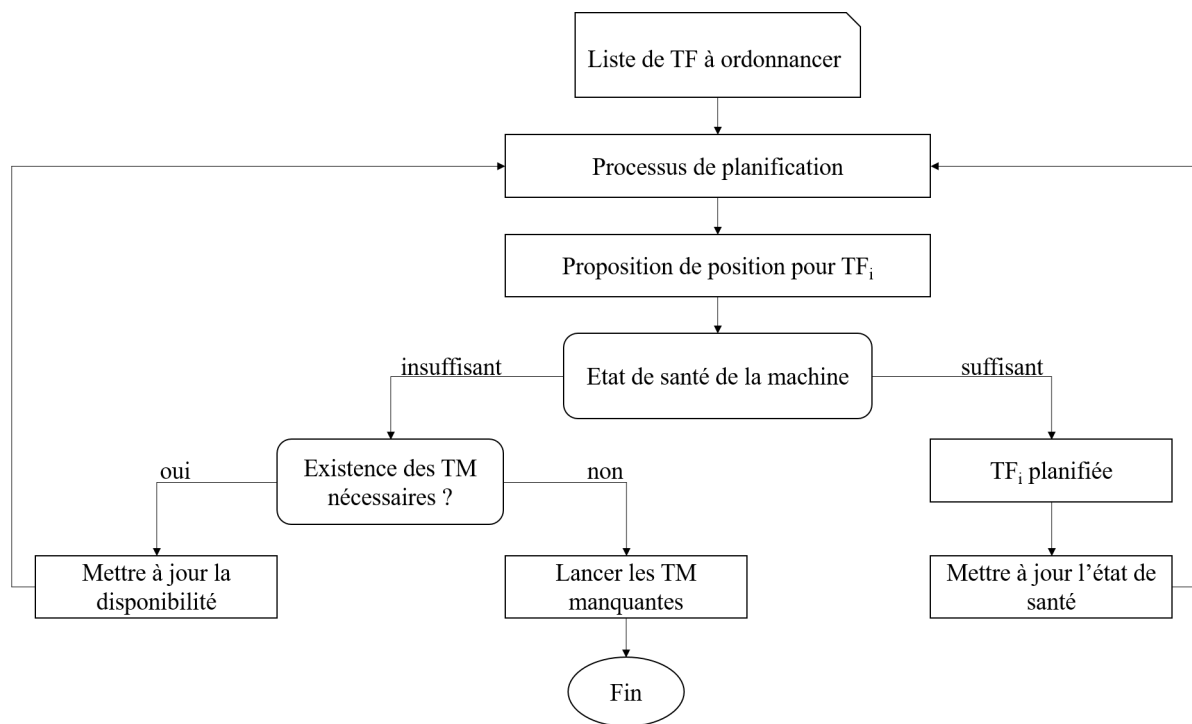


FIGURE 3.9 – Diagramme de planification des producteurs

3.3.5 Planification des mainteneurs

Un mainteneur, disposant des informations concernant la ressource de maintenance qui lui est assignée, a pour objectif de planifier un ensemble de TM demandées par les producteurs. Ce problème peut être vu comme le problème combinatoire du voyageur de commerce avec fenêtres

de temps qui dérive du problème de voyageur de commerce classique (TSP - Traveling Salesman Problem) qui, dans sa version originale, consiste à faire visiter au voyageur un ensemble de client en passant une et une seule fois par chaque client puis retourner au dépôt initial, tout en minimisant le coût total de ce parcours. Ce problème est étudié depuis le 19^{me} siècle, et est un des problèmes types de la recherche opérationnelle [Haouari et al., 1990]. Ce problème a été prouvé comme étant NP-difficile [Jünger et al., 1995]. Plusieurs études ont été dédiées au problème du TSP, en particulier les travaux de [Laporte, 1992] qui donnent un aperçu général de son traitement dans la littérature.

Le TSP avec fenêtres est défini ainsi : le voyageur doit visiter un ensemble de clients ayant une demande connue et ces visites ne sont autorisées que dans des intervalles précis et connus à l'avance [Haouari et al., 1990]. Pour faire le lien avec le sous-problème d'ordonnancement que rencontrent les mainteneurs, nous pouvons considérer le voyageur comme étant le mainteneur, les agents producteurs comme étant ses clients et que les fenêtres correspondent aux intervalles $[t_1, +\infty]$ avec t_1 la date de début de la TM souhaitée par le producteur. Selon le critère d'optimisation du mainteneur, les coûts peuvent correspondre aux temps d'attente des producteurs, les distances entre les centres de production que le mainteneur doit parcourir (dans le cas où c'est le mainteneur qui se déplace pour effectuer les opérations de maintenance), etc. Pour résoudre ce problème, nous pouvons appliquer une méthode d'optimisation exacte ou approchée, comme nous pouvons simplement appliquer une règle de priorité et faire les visites successivement en fonction des dates de début souhaitées pour les TM.

3.3.6 Validation des producteurs

Il a été prouvé dans [Coudert et al., 2002] que la validation d'au moins une TF par cycle assure la convergence du modèle. Qu'en est-il alors pour la validation des tâches de maintenance ?

3.3.6.1 La nécessité de la validation des TM

Il paraît intuitif que, si pendant un cycle de production k aucune TF n'a été validée sur une certaine machine ou encore si aucune des TF validées ne nécessite les TM lancées pendant ce cycle, il est alors inutile de réaliser ces TM. Ainsi, pour valider une TM acceptée, il suffit de vérifier qu'il existe une tâche de production dont la réalisation dépend de cette tâche de

maintenance. Cependant, il n'est pas toujours judicieux de procéder ainsi. Nous donnons un exemple qui montre que, parfois, pour avoir de meilleures propositions il faut valider des TM même si aucune tâche de production validée ne dépend d'elle.

Supposons la situation montrée dans la figure 3.10.

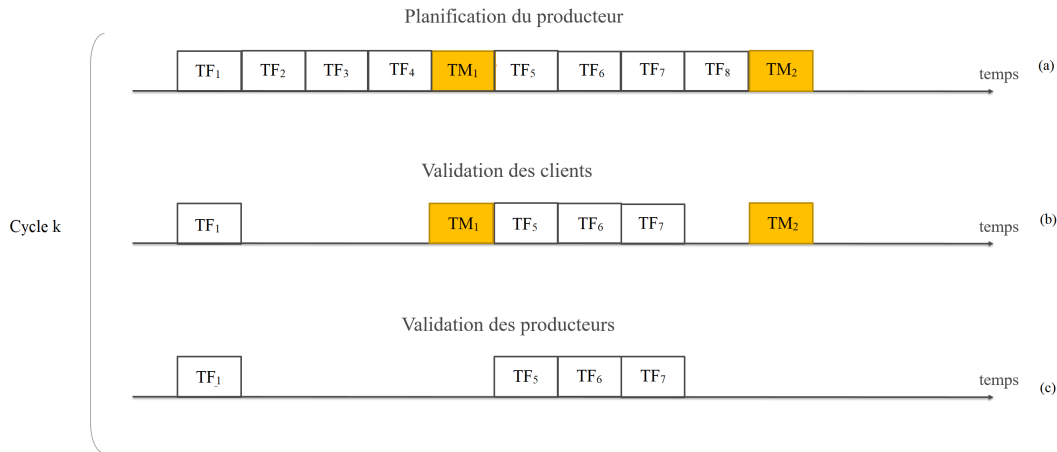


FIGURE 3.10 – Planification dans un cycle k

Au début du cycle, le producteur a planifié toutes les tâches de production qu'il avait dans sa liste et a demandé deux tâches de maintenance (figure 3.10 (a)). Cependant, lors de la validation des clients, seules les tâches TF_1 , TF_5 , TF_6 et TF_7 ont été validées sur sa machine (figure 3.10 (b)). En évaluant l'état de santé de sa machine, ce producteur constate que la réalisation de toutes ces tâches validées ne nécessite pas les deux TM qu'il a demandé. Il décide donc de les rejeter (figure 3.10 (c)). Or, au prochain cycle, il se retrouve une nouvelle fois avec la TF_2 qui pourrait être planifiée juste après la TF_1 . Cependant, cette position n'est plus réalisable parce qu'elle met en danger la réalisation de la tâche TF_7 (Figure 3.11), chose qui ne se serait pas produite si le producteur avait validé la tâche de maintenance TM_1 au cycle précédent. Pour cela, et afin d'avoir un planning réalisable, il faudra d'abord planifier une tâche de maintenance après la tâche TF_7 puis placer TF_2 après cette nouvelle tâche de maintenance (Figure 3.12). Dans ce cas, sa proposition sera pire que celle du cycle précédent. Or, parmi les hypothèses du modèle SCEP, il y a le fait qu'à chaque cycle, les agents font des propositions au moins de la même qualité qu'au cycle précédent mais jamais de qualité moindre. Pour cela, il est nécessaire d'établir des stratégies de validation des TM qui empêcheraient l'occurrence de ce type de scénarios.

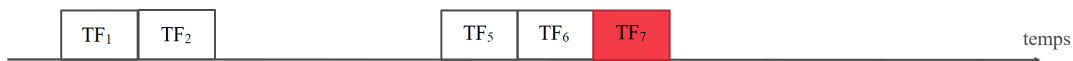


FIGURE 3.11 – Planification non réalisable

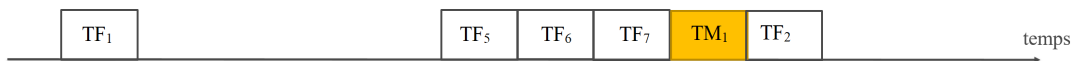


FIGURE 3.12 – Planification réalisable

3.3.6.2 Stratégies de validation des TM

Compte tenu du fait qu'une TM est automatiquement validée si la TF qui a causé le lancement de cette TM a été validée par le client, plusieurs critères peuvent être considérés durant cette validation tels que : la charge de la machine, la charge du composant, le temps d'arrêt de la machine, etc. Une combinaison de ces stratégies peut également être envisagée.

Stratégie basée sur le temps d'inactivité de la machine

Cette stratégie a pour but de réduire les temps d'arrêt des machines (Figure 3.13). En effet, ces temps d'arrêt peuvent être exploités pour d'autres tâches de production ce qui permet d'améliorer le taux d'utilisation de la machine. Ainsi, une stratégie de validation des interventions de maintenance qui ne tient pas compte de ce temps d'arrêt peut conduire à une mauvaise gestion des ressources. Par conséquent, une intervention de maintenance est validée si une de ces conditions est rencontrée :

- aucune des TF restantes ne peut être insérée dans ce temps d'arrêt. Ceci nous permettra d'exploiter ce temps d'arrêt pour réaliser la TM.
- une des TF pouvant être insérée dans ce temps d'arrêt met en danger l'exécution d'une TF programmée après.

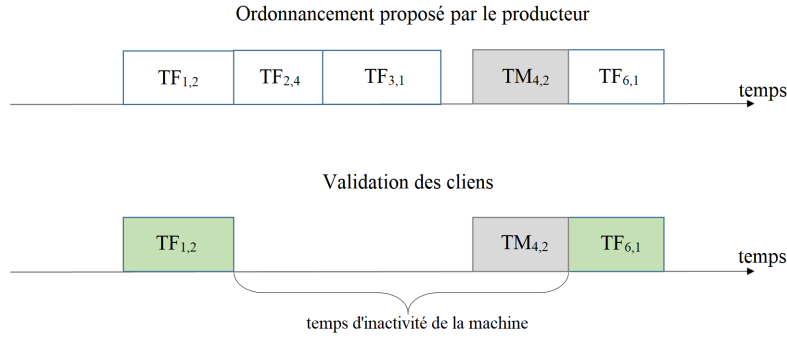


FIGURE 3.13 – Temps d'arrêt d'une machine

Stratégie basée sur le temps d'utilisation des composants

Lorsqu'une TM est demandée sur une machine, cela signifie que la séquence de TF ordonnancée va trop solliciter au moins un composant entraînant un risque supérieur à s_z qu'au moins une des fonctionnalités nécessaires à cette séquence défaille lors de sa réalisation. L'objectif de cette stratégie est, d'une part, de réduire le nombre de TM et, d'autre part, d'assurer que chaque composant soit assez utilisé avant de valider la TM le concernant. Ceci permet d'avoir un intervalle de temps assez conséquent entre deux TM pour un même composant.

Pour cette stratégie nous définissons un seuil de durée d'utilisation pour chaque composant. Une tâche de maintenance n'est validée que si le temps d'utilisation de ce composant entre la dernière TM validée pour le composant et celle programmée dépasse ce seuil. Le temps d'utilisation d'un composant D_k d'une machine M_j à un instant t peut être calculé par l'équation 3.1 suivante :

$$L_{j,k}(t) = \sum_{\tau=\max(0,t_m)}^t \sum_{\forall TF_{x,y} \in Q_j} s_{x,y,j,\tau} \times l_{i,j,x,y} \quad (3.1)$$

avec,

t_m : la date de fin de la dernière TM validée pour ce composant.

$s_{x,y,j,\tau}$: égal à 1 si la tâche $TF_{x,y}$ est affectée à la machine M_j au temps τ , 0 sinon.

Q_j : la liste des TF validées sur la machine.

$l_{i,j,x,y}$: égal à 1 si le composant D_k de la machine M_j est nécessaire pour exécuter la tâche $TF_{x,y}$, 0 sinon.

Stratégie basée sur la charge de la machine

Cette stratégie est basée sur la répartition des tâches exécutées sur l'ensemble des machines. Pour rappel, une *TM* est demandée pour une machine lorsqu'une tâche ne peut pas être exécutée à cause de la dégradation de l'état de santé du composant correspondant. Lorsque cette tâche n'est pas validée en fin de cycle de production, nous devinons sur quelle machine elle sera validée au prochain cycle.

Pour cette stratégie, nous partons de l'hypothèse que ce sont les machines les moins chargées qui ont le plus de chances de remporter les enchères. Ainsi, pour estimer qui aura la charge d'exécuter la *TF* causant la *TM* en question, nous effectuons un tirage au sort par une roulette dans laquelle nous associons à chaque machine candidate une portion de la roulette proportionnelle à sa chance de remporter l'enchère donc inversement proportionnelle à sa charge. La *TM* en question est validée si la machine choisie est celle sur laquelle la *TM* a été programmée. Cependant, cette stratégie comporte une limitation dans sa mise en oeuvre. Car elle nécessite la connaissance de la *TF* entraînant la *TM*. Or ceci n'est applicable que pour des agents producteurs mettant en oeuvre des méthodes d'ordonnancement plaçant les *TF* successivement, comme c'est le cas pour les règles de priorité, et pas simultanément.

3.4 Conclusion

Les caractéristiques de notre système nous ont motivés à orienter notre travail vers le développement d'une méthode générique d'ordonnancement distribuée pour la résolution de notre problème d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance. Nous avons montré dans ce chapitre la nécessité de la coopération entre la production et la maintenance afin d'arriver à la planification conjointe recherchée, justifiée par le conflit qui peut exister entre ces deux entités. Nous avons ensuite mentionné l'intérêt de l'utilisation des SMA dans les systèmes de production et en particulier celui de leur utilisation pour la résolution de notre problématique. En effet, grâce aux systèmes multi-agents, nous avons pu attribuer à chacune des entités de notre problème (clients, mainteneurs et producteurs) un agent autonome auquel est associé un sous-problème d'ordonnancement répondant à ses besoins. S'ajoutent à ces trois types d'agents deux autres agents qui sont l'environnement, représenté par un tableau noir qui est principalement un outil de communication entre les différents agents et le superviseur, qui permet de

contrôler l'accès à l'environnement par les trois autres types agents. A travers un protocole de communication entre les agents, ceux-ci arrivent à aboutir à une solution qui satisfait au mieux l'ensemble des décideurs. Notre modèle, que nous avons appelé SCEMP, est un modèle flexible, générique et distribué qui peut être utilisé dans une grande variété de systèmes.

Dans le chapitre suivant nous allons montrer comment notre modèle SCEMP peut être implémenté, après quoi nous allons tester sa performance et sa flexibilité en l'appliquant à plusieurs scénarios.

Chapitre 4

Implémentation et validation

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté notre méthode, basée sur les systèmes multi-agents, de planification conjointe des activités de production et de maintenance à l'aide des informations issues du PHM. Ce dernier chapitre est consacré à l'implémentation et l'évaluation de cette méthode.

Notre méthode de planification conjointe de la production et de la maintenance a été implémentée avec le langage de programmation orienté objet C++, dans une extension du logiciel R@MSES. Afin de la valider, nous avons réalisé des tests sur plusieurs cas d'études. L'absence de benchmark concernant les deux aspects de production et de maintenance sur les systèmes complexes surveillés par des modules de PHM nous a incité à générer des jeux de données pour ces tests.

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'implémentation de notre méthode de planification. Les différents choix faits pour l'implémentation, ainsi que les techniques utilisées pour la génération des cas d'étude sont décrites. La deuxième partie présente la validation de SCEMP et des différents choix effectués. Les résultats obtenus en planifiant un cas simple sont présentés, puis différents cas planifiés nous permettent de valider les différentes méthodes d'ordonnement possibles sur les producteurs et d'évaluer les stratégies de validation des ordres de maintenance. Enfin, notre logiciel nous permet de simuler deux stratégies de maintenance : systématique ou prédictive, et de montrer l'intérêt du PHM.

4.2 Implémentation du modèle et génération des données

Le but de notre travail est de mettre au point une méthode de planification conjointe de la production et de la maintenance présentant un caractère générique et pouvant être utilisée par n'importe quel système de production. Nous cherchons donc à inclure dans notre méthode un outil permettant à chaque gestionnaire responsable d'un atelier de production ou de maintenance de saisir les informations et préciser les caractéristiques propres à son atelier (Figure 4.1). Concrètement, il s'agit pour chaque responsable :

- de production de saisir les informations sur les OF issus du PDP et du CBN (séquences de TF, durées opératoires des TF, dates de début et de fin souhaitées) ;
- d'atelier de saisir les données sur la structure des machines constituant son atelier (compétences, fonctionnalités, composants utilisés par chaque fonctionnalité, durées de vie des composants), ainsi que la méthode adoptée pour l'ordonnancement des TF ;
- de maintenance de saisir les données sur les ressources de maintenance (compétences, disponibilités), ainsi que la méthode adoptée pour l'ordonnancement des TM.

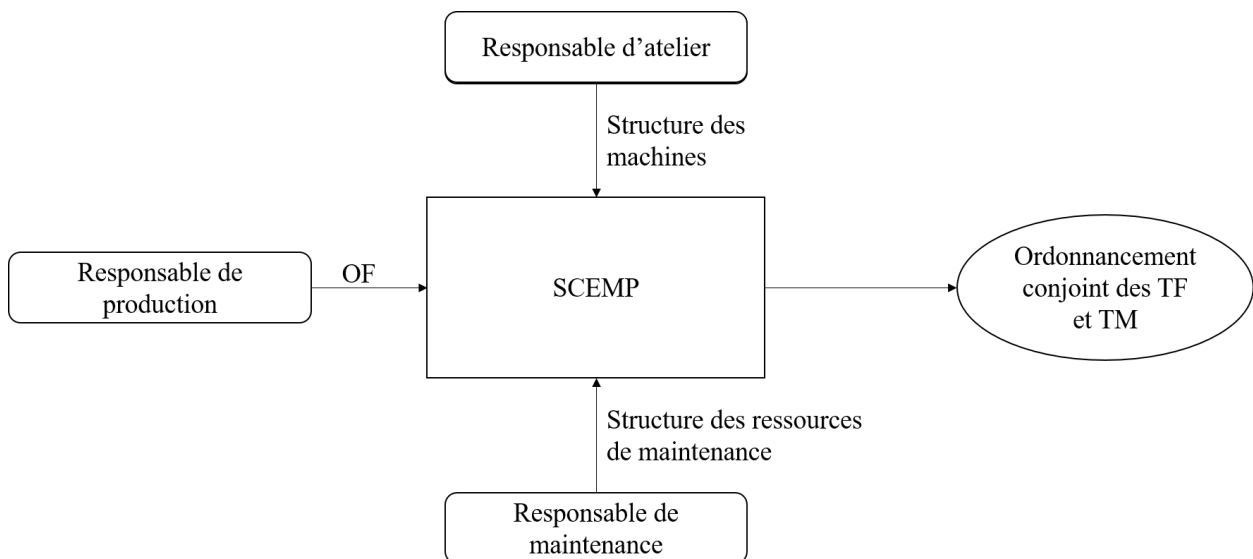


FIGURE 4.1 – Données fournies par chaque responsable

Pour cela, nous avons créé une interface graphique permettant aux utilisateurs de saisir les informations leur correspondant. Cependant, pour pouvoir tester notre méthode, nous avons été conduits à effectuer plusieurs tests sur plusieurs cas d'études (plusieurs configurations d'ateliers

de production et de maintenance, plusieurs ressources de maintenance, et plusieurs OF). Afin de réaliser ceci, nous avons généré aléatoirement des données pour chaque entité du problème (OF, machines et ressources de maintenance). Nous présentons dans les sections suivantes les interfaces de saisie des données ainsi que la méthodologie suivie lors de la génération des données correspondantes.

4.2.1 Ordres de Fabrication

4.2.1.1 Interface

L'interface graphique utilisée pour la saisie des OF est présentée dans la figure 4.2

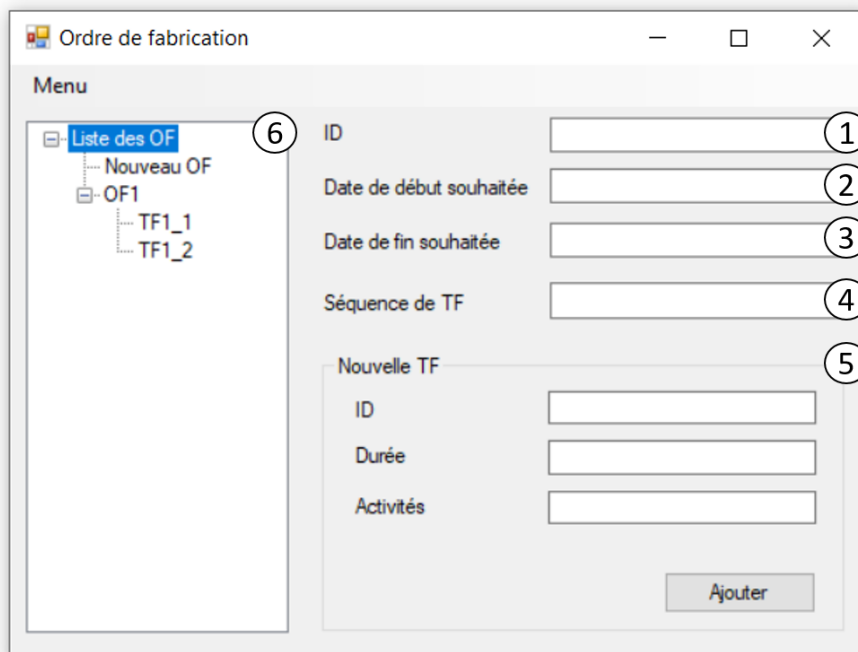


FIGURE 4.2 – Interface graphique de saisie des OF

L'utilisateur doit saisir chaque information concernant l'OF dans le champ correspondant. D'abord, il doit donner un identifiant à l'OF (ID) dans le champ (1), cet identifiant doit être unique. Ensuite les dates de début et de fin souhaitées pour l'OF sont à saisir dans les champs respectifs (2) et (3), puis il faut spécifier la liste des TF à exécuter. Dans le champ (4) nous pouvons visualiser la liste des TF déjà saisies par l'utilisateur. Pour ajouter une nouvelle TF il suffit de remplir les champs de la section "nouvelle TF" (5). Lorsque l'utilisateur termine la configuration de l'OF, ce dernier s'ajoute automatiquement à la liste des OF présentée à gauche

de la fenêtre (6).

4.2.1.2 Génération des OF

Notre objectif étant de montrer l'efficacité de la méthode proposée et sa capacité à traiter un grand nombre d'OF dans un temps raisonnable, nous avons généré aléatoirement un ensemble d'OF tel que :

- chaque OF est composé d'au moins 5 TF et d'au plus 10 TF ;
- les durées opératoires des TF varient uniformément dans l'intervalle $[1, 10]$ Unités de Temps (UT) ;
- chaque TF nécessite au plus 2 activités et au moins une ;
- les dates de début d'exécution au plus tôt des OF (R_i) varient uniformément dans l'intervalle $R_i \in [0, n]$, avec n le nombre d'OF générés ;
- les dates de fin d'exécution au plus tard des OF (D_i) varient uniformément dans l'intervalle $D_i \in [30R_i, 80R_i]$;

4.2.2 Machines

4.2.2.1 Interface

L'interface graphique utilisée pour la saisie des données sur les machines est présentée dans la figure 4.3.

L'utilisateur doit saisir chaque information concernant la machine dans le champ correspondant. Dans le champ (1) l'utilisateur saisit le code du centre auquel la machine appartient, le champ (2) correspond à l'identifiant de la machine et en appuyant sur les boutons (3) et (4) de nouvelles fenêtres s'affichent pour permettre la saisie des données concernant respectivement les composants et les fonctionnalités de la machine (Figure 4.4 et 4.5). Lorsque l'utilisateur termine la configuration de la machine, cette dernière s'ajoute automatiquement à la liste des machines présentée à gauche de la fenêtre (5).

Chaque composant est caractérisé par une durée de vie qui suit une loi de probabilité fournies par le constructeur. En utilisant cette information nous pouvons déduire la probabilité de panne de chaque composant selon la loi que suit sa durée de vie. Ensuite, nous calculons la

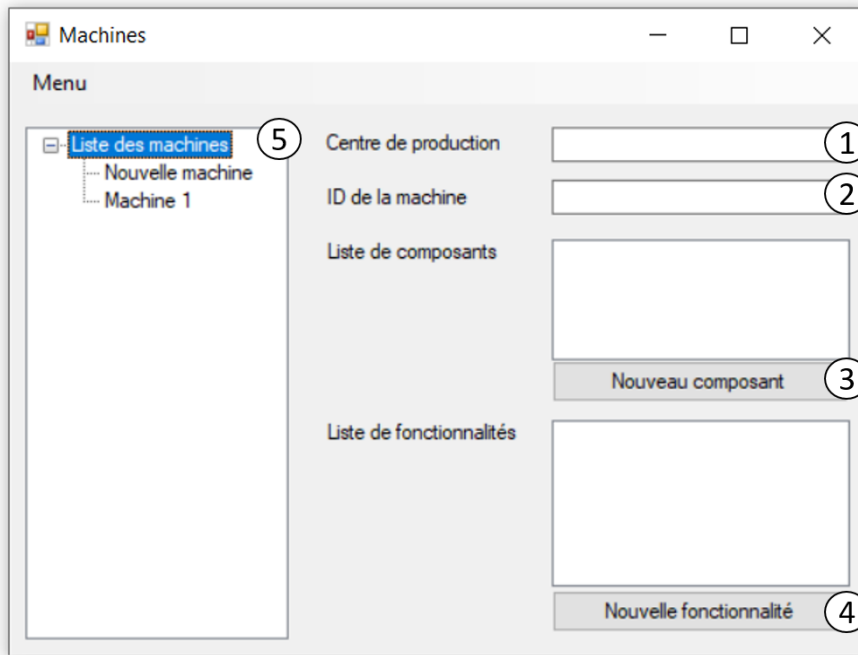


FIGURE 4.3 – Interface graphique de saisie des machine

probabilité de panne d'une fonctionnalité à partir des probabilités de panne des composants la constituant. La maintenance consiste donc à surveiller l'évolution de la probabilité de panne d'au moins une des fonctionnalités sollicitées et ensuite, quand celle-ci atteint un seuil critique s_z (défini dans le chapitre précédent), de planifier les tâches de maintenance sur les composants ayant une grande probabilité de panne. Nous qualifions ici cette maintenance de systématique, car la loi de probabilité des composants identiques est invariante en fonction de leurs durées d'utilisation. Ainsi, après une même durée d'utilisation, les composants auront la même probabilité de défaillance.

L'information sur la durée de vie fournie par le constructeur caractérise généralement tous les composants d'un type donné et elle n'est généralement pas précise. Afin d'augmenter la précision concernant la probabilité de panne d'un composant, les responsables d'atelier peuvent déployer des modules de PHM pour suivre et prédire directement la durée de vie restante de ce composant. Les modules de PHM étant des outils relativement chers, ceux-ci sont généralement installés sur des composants considérés comme critiques ou sensibles, pour lesquels il est indispensable de suivre avec précision l'état de santé et d'intervenir avant l'atteinte d'un seuil de risque donné. Dans un tel cas, le composant subit des maintenances dites prédictives. L'état de santé d'un composant équipé d'un module de PHM est fourni par celui-ci sous forme d'une

FIGURE 4.4 – Interface graphique de saisie des composants

FIGURE 4.5 – Interface graphique de saisie des fonctionnalités

fonction RUL représentant les chances de panne du composant à tout instant.

4.2.2.2 Génération des machines

N'ayant pas des données sur des machines issues des systèmes de production réels, nous avons considéré des machines fictives et générales ayant chacune leurs propres fonctionnalités en spécifiant, pour chaque fonctionnalité, les composants constituant celle-ci ainsi que l'aptitude de la machine et le coût de son utilisation. Nous considérons dans les tests réalisés les hypothèses suivantes :

- La probabilité de panne d'un composant non suivi par un module de PHM est déterminée par les données de fiabilité de son fabricant. On suppose qu'elle suit une loi normale $N_s(\lambda_s, \sigma_s)$ avec $\lambda_s = 100UT$ et $\sigma_s = \frac{\lambda_m}{10}$ (λ_s est assimilé au MTTF du composant). La probabilité de panne pour une durée d'utilisation t_s d'un composant maintenu systématiquement se calcule ainsi via l'équation suivante :

$$P_{f_s}(t_s) = \frac{1}{\sigma_s 2\pi} \int_0^{t_s} e^{-\frac{1}{2\sigma_s^2(t-\lambda_s)^2}} dt \quad (4.1)$$

- La probabilité de panne d'un composant équipé d'un module de PHM est supposée suivre une loi normale $N_p(\lambda_p, \sigma_p)$, avec λ_p générée, initialement et après chaque tâche de maintenance, aléatoirement selon la loi N_s (voir la figure 4.6 où sont représentés 5 tirages aléatoires pour λ_p avec $\sigma_p = \frac{\sigma_s}{5}$). Cette probabilité de panne pour une durée d'utilisation

t_s d'un composant équipé d'un module de PHM se calcule via l'équation suivante :

$$P_{f_p}(t_s) = \frac{1}{\sigma_p 2\pi} \int_0^{t_s} e^{-\frac{1}{2\sigma_p^2(t-\lambda_p)^2}} dt \quad (4.2)$$

- le seuil de panne s_z de toutes les fonctionnalités des machines est fixé à un niveau de 1% et l'identification des composants nécessitant une intervention de maintenance est faite grâce à la méthode décrite dans [Desforges et al., 2017];
- après chaque tâche de maintenance sur un composant, il est réinitialisé à son état neuf (par la remise à zéro de sa durée d'utilisation).

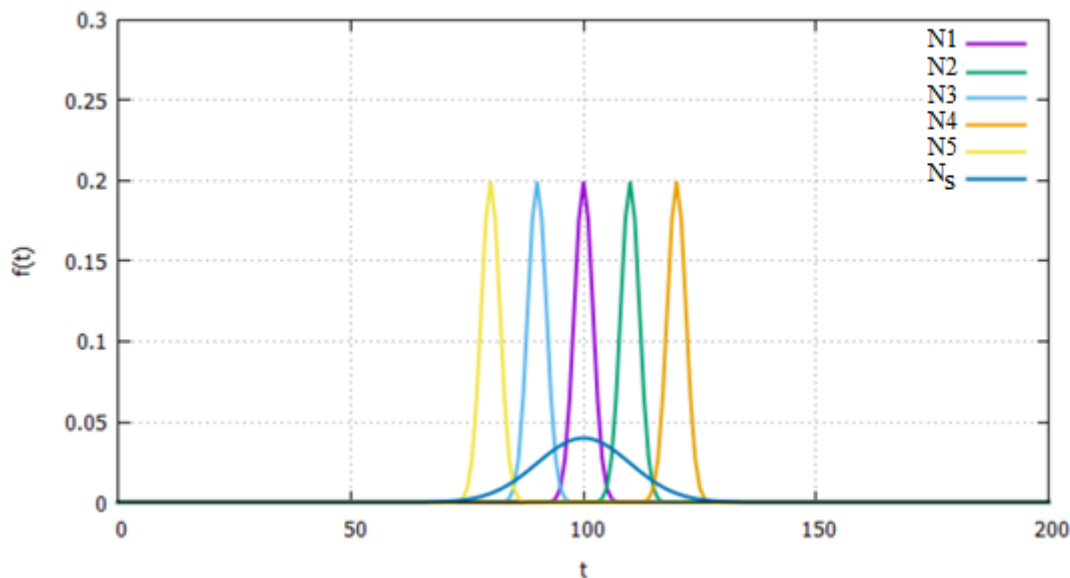


FIGURE 4.6 – Lois de probabilité pouvant être générées pour un composant

4.2.3 Ressources de maintenance

4.2.3.1 Interface

L'interface graphique utilisée pour la saisie des données sur les mainteneurs est présentée dans la figure 4.7

L'utilisateur doit saisir chaque information concernant la ressource de maintenance dans son champ correspondant. Dans le champ (1) l'utilisateur saisit le code du centre auquel la ressource appartient, le champ (2) correspond à l'identifiant de la ressource de maintenance. Dans le

FIGURE 4.7 – Interface graphique de saisie des ressources maintenance

champ (3) nous pouvons visualiser la liste des compétences de la ressource déjà saisies, et pour ajouter une nouvelle compétence il suffit de remplir les champs de la section (5) "Compétence". Dans le champ (4), l'utilisateur peut préciser les périodes d'indisponibilité de la ressource qui correspondent à des intervalles de temps durant lesquels la ressource de maintenance est occupée ailleurs. Lorsque l'utilisateur termine la configuration de la ressource, cette dernière s'ajoute automatiquement à la liste des ressources présentée dans la section (6).

4.2.3.2 Génération des ressources de maintenance

N'ayant pas les données sur des ressources de maintenance issues des systèmes de maintenance réels, nous avons considéré des ressources de maintenance fictives et générales ayant chacune leurs propres compétences en spécifiant pour chaque ressource considérée, les types de composants pouvant être traités par celle-ci, son aptitude et le coût de son utilisation. Nous considérons dans les tests réalisés que les périodes d'indisponibilité des ressources sont générées aléatoirement (dates, durées et nombre de périodes).

4.3 Évaluation du modèle SCEMP

Afin de valider notre méthode, prouver sa flexibilité, tester sa portabilité et découvrir ses limites, nous avons réalisé plusieurs tests sur quelques cas. Ces cas d'études ont pour but de tester la performance de l'approche d'ordonnement conjointe proposée en tenant compte de demandes multiples (OF et TM) et de ressources multiples (machines et ressources de maintenance).

4.3.1 Cas de trois machines

Nous considérons un atelier de production composé de trois différentes machines (M_1 , M_2 et M_3) ayant chacune une structure particulière (voir la figure 4.8) :

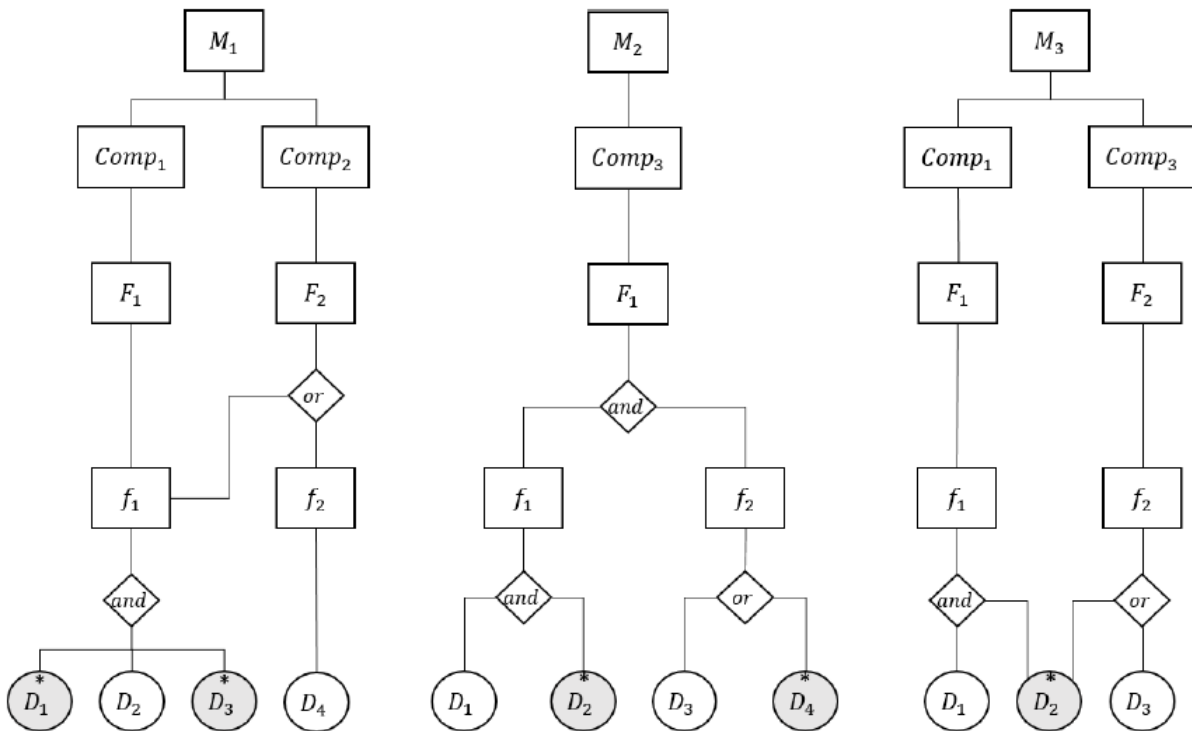


FIGURE 4.8 – Structure des machines

- La machine M_1 dispose de deux compétences $Comp_1$ et $Comp_2$ qui chacune est associée à une fonctionnalité de la machine. La compétence $Comp_1$ est associée à la fonctionnalité F_1 avec une aptitude de 1.5, tandis qu'à la compétence $Comp_2$ est associée la fonctionnalité F_2 avec une aptitude de 1. Nous considérons que la fonctionnalité F_1 est simple

et composée d'une seule fonction f_1 et que la fonctionnalité F_2 est redondante nécessitant soit la fonction f_1 soit la fonction f_2 . La fonction f_1 est supposée simple regroupant trois composants D_1 , D_2 et D_3 . La fonction f_2 est supposée simple composée d'un seul composant D_4 . En total la machine M_1 regroupe 4 composants différents.

- La machine M_2 dispose d'une seule compétence $Comp_3$ qui est associée à la fonctionnalité F_1 avec une aptitude de 1.5. La fonctionnalité F_1 est une fonction simple regroupant deux fonctions f_1 et f_2 . La fonction f_1 est une fonction simple et nécessite deux composants D_1 et D_2 . La fonction f_2 est une fonction redondante qui peut utiliser soit le composant D_3 , soit le composant D_4 .
- La machine M_3 dispose de deux compétences $Comp_1$ et $Comp_2$, associées respectivement aux fonctionnalités F_1 et F_2 . Les deux fonctionnalités de la machine M_3 sont simples et nécessitent chacune une seule fonction de la machine telle que F_1 nécessite la fonction f_1 et la fonctionnalité F_2 nécessite la fonction f_2 . La fonction f_1 est considérée simple utilisant deux composants D_1 et D_2 et la fonction f_2 est considérée redondante pouvant utiliser soit le composant D_2 , soit le composant D_3 . Nous avons considéré pour la machine M_3 un composant en commun, D_2 , entre les deux fonctions f_1 et f_2 .

Nous considérons que seuls les composants d'indice impair de la première machine M_1 , les composants d'indice pair de la machine M_2 et le composant en commun de la machine M_3 (les composants colorés en gris foncé sur la figure 4.8) sont surveillés par un module de PHM permettant la planification de maintenance prédictive. Les autres composants sont sujets à des maintenances dites systématiques.

Notre atelier de maintenance est composé de deux ressources de maintenance Mt_1 et Mt_2 ayant chacun une seule compétence avec une aptitude de 1. Le mainteneur Mt_1 est chargé de traiter les composants ayant un indice pair et le mainteneur Mt_2 est chargé de traiter les composants ayant un indice impair. Nous considérons dans ce cas d'études que tous les agents producteurs et mainteneurs utilisent une méthode d'ordonnement basée sur une règle de priorité pour classer leurs tâches. A titre de simplification, nous fixons la règle de priorité FIFO (First In First Out). Nous supposons aussi qu'aucune tâche de production ni de maintenance n'est planifiée au début des simulations.

Pour que la planification réalisée par les producteurs prenne en compte l'état de santé des machines, la méthode présentée dans le diagramme de la figure 4.9, dérivé de celui de la figure

3.9, devient exploitable par le déploiement de règles de priorité et est implémentée dans chaque agent producteur.

Dans un premier temps, le producteur trie la liste des TF en fonction de la règle FIFO. Puis il planifie successivement les tâches de sa liste en fonction de l'état de santé de sa machine. Pour chaque tâche de la liste le producteur cherche la première position vide P dans laquelle la tâche peut être insérée (obtenue par la fonction $GFAP(t)$) puis vérifie si la machine sera capable de réaliser la tâche à cette position. Deux cas peuvent se produire :

- L'état de santé de la machine permet d'effectuer la tâche à cette position. Cela signifie que la probabilité de défaillance d'au moins une des fonctionnalités requises ne dépassera pas le seuil s_z de risque lors de l'exécution de l'opération. Dans ce cas, la position P trouvée est affectée à la tâche TF actuelle.

- L'état de santé de la machine ne permet pas d'effectuer entièrement la TF. S'il y a déjà des TM prévues pour les composants de la fonctionnalité conduisant à la défaillance, alors le producteur relance une nouvelle recherche pour trouver une autre position après les TM (on note t_m la date de fin de la tâche de maintenance). Dans le cas contraire, il lance une demande de TM pour chaque composant identifié comme nécessitant une maintenance. Dans ce cas, le processus d'ordonnancement s'arrête jusqu'à ce que les TM soient planifiées.

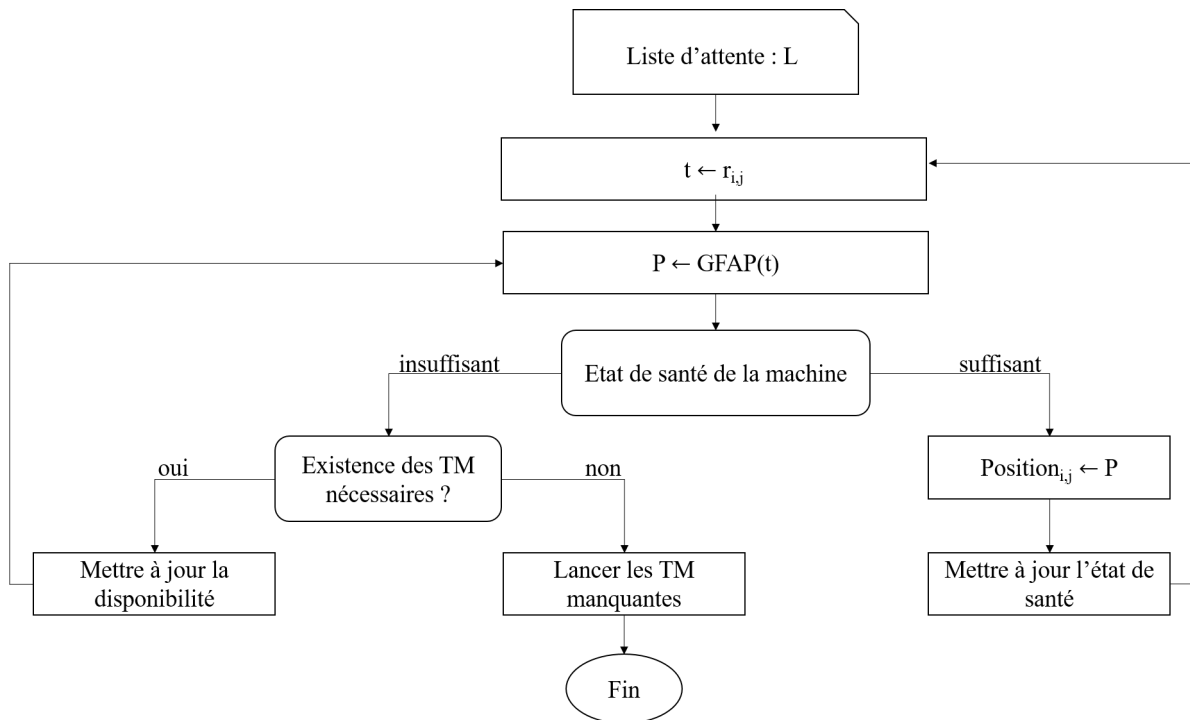


FIGURE 4.9 – Modèle d'ordonnancement

4.3.1.1 Critères d'évaluation

Afin d'évaluer la performance de SCEMP nous avons considéré les critères suivants :

- la charge des machines ($LM_i, i \in 1, 2, 3$);
- le temps d'exécution du programme (E);
- le nombre de cycles de production (voir le diagramme de séquence sur la figure 3.7) lancés à chaque expérience (nC).

4.3.1.2 Résultats obtenus

Les premiers résultats obtenus après exécution du programme sont présentés dans les figures 4.10, 4.11 et 4.12 :

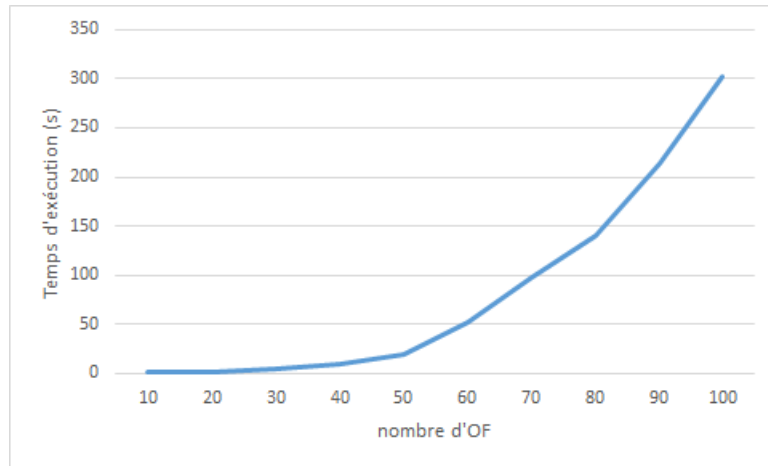


FIGURE 4.10 – Variation du temps d'exécution du programme

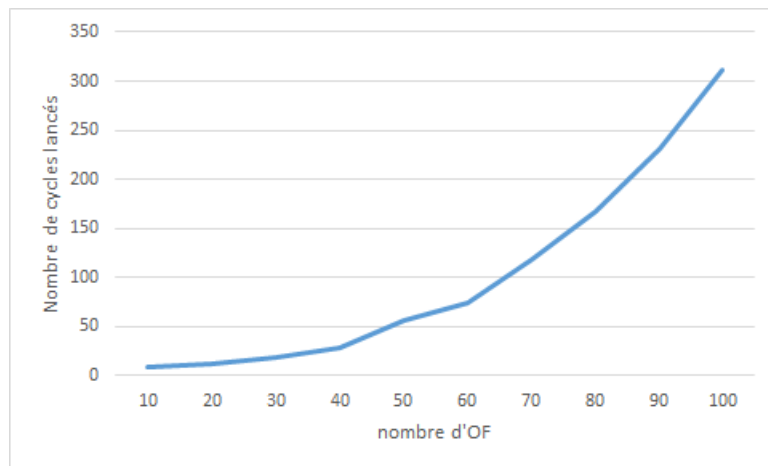


FIGURE 4.11 – Nombre de cycle de production lancés à chaque expérience

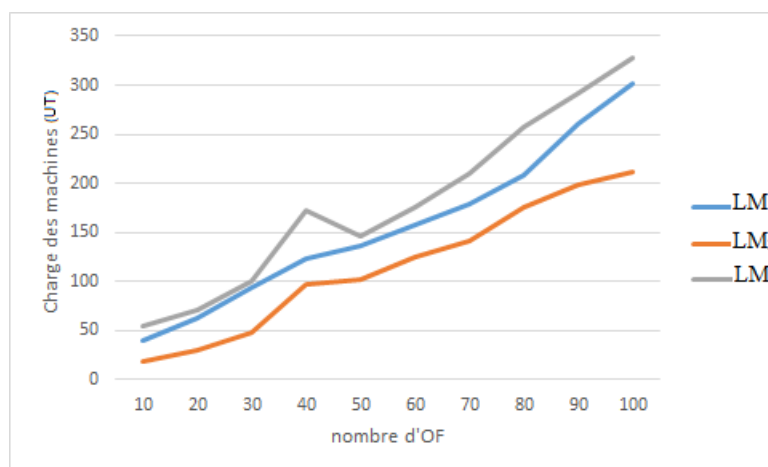


FIGURE 4.12 – Variation des charges des machines

D'après ces figures nous remarquons que les deux premiers critères d'évaluation choisis croissent d'une manière semblant être exponentielle en augmentant le nombre d'OF à planifier. Nous remarquons aussi sur la figure 4.10, que le temps d'exécution du programme reste plutôt acceptable. Cette méthode peut donc être utilisée par des responsables de production sans pour autant qu'ils attendent trop longtemps pour obtenir une solution, ceci leur permet de procéder rapidement à l'exécution réelle des tâches.

D'après la figure 4.12, nous pouvons dire que la méthode permet d'avoir un équilibrage des charges des machines. Les charges des deux machines M_1 et M_3 sont presque identiques, avec quelques variations forcément dues à la génération aléatoire des OF, même si leurs aptitudes diffèrent. Quant à la machine M_2 , il est naturel qu'elle soit la moins chargée puisqu'elle ne possède qu'une seule fonctionnalité, donc la liste des TF de sa liste d'attente à chaque cycle de production est restreinte par rapport aux deux autres machines.

4.3.1.3 Variation de la complexité des instances

Dans ce même cas d'étude, nous nous sommes intéressé au suivi du comportement de SCEMP pour traiter des instances de difficultés variables. Pour cela, nous avons considéré deux types d'instances d'OF :

- Instances difficiles : c'est une classe d'instances dans lesquelles beaucoup d'OF sont en conflits, c'est-à-dire que leurs dates de début souhaitées sont très proches les unes des autres.
- Instance faciles : dans cette classe d'instances, les dates de début des OF sont réparties d'une manière homogène sur l'horizon de temps de planification.

La figure 4.13, montre une répartition des dates de début des OF dans l'horizon de temps de planification considéré pour un nombre d'OF égal à 100.

Le but de ces tests est d'évaluer le temps nécessaire à SCEMP pour trouver une solution. Pour cela, nous n'avons considéré que le temps d'exécution du programme comme critère d'évaluation. Dix expériences sont lancées sur les trois machines de la figure 4.8, en variant le nombre d'OF générés de 10 jusqu'à 100. Les résultats obtenus sont les suivants (figure 4.14) :

D'après ces résultats, nous remarquons que le temps d'exécution des deux types d'instances est de la forme d'une fonction exponentielle mais avec un degré de croissance différent. Nous remarquons que pour un petit nombre d'OF, SCEMP traite les deux types d'instance avec la

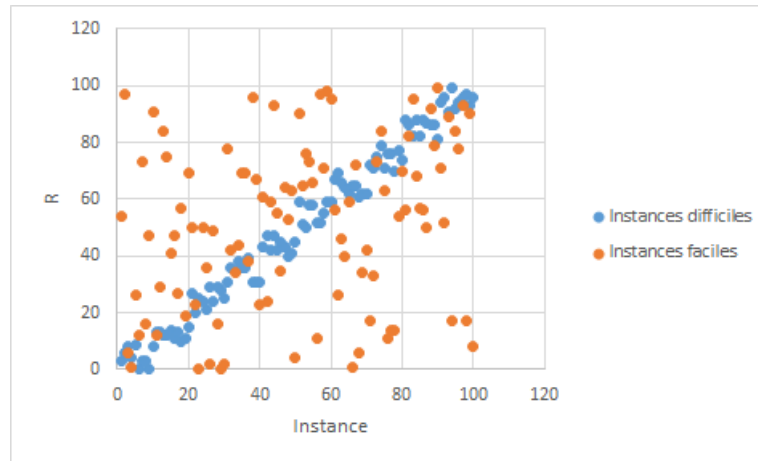


FIGURE 4.13 – nuage de points des 2 types d’instances

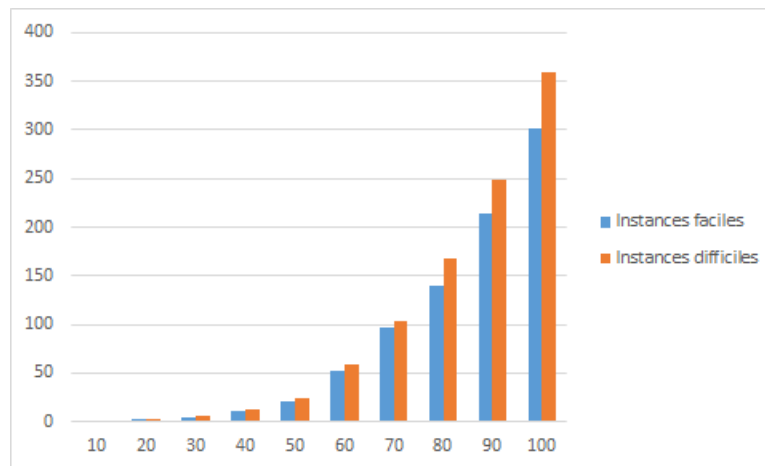


FIGURE 4.14 – Comparaison des temps d’exécution des deux types d’instances

même vitesse, mais lorsque le nombre d’OF augmente, la méthode prend plus de temps pour traiter les instances difficiles. Ceci est dû au fait que nous avons besoin de lancer plusieurs cycles durant la planification car plusieurs TF ayant des positions souhaitées similaires, peu de TF peuvent recevoir des propositions qui correspondent à leur souhait. De ce fait, à chaque cycle, les clients préfèrent ne pas valider les propositions reçues en espérant avoir de meilleures propositions au cycle suivant. Cependant, la méthode obligeant à valider au moins une TF par cycle, le temps d’exécution des instances difficiles reste relativement proche de celui des instances faciles. Cela nous permet de valider que SCEMP est utilisable dans des cas complexes et permet d’obtenir une solution en un temps acceptable.

4.3.2 Cas de plusieurs machines avec différentes méthodes d'ordonnement

Afin de montrer la flexibilité de la méthode proposée, nous avons considéré des cas d'études variables (un grand nombre de machines, avec des producteurs ayant une méthode d'ordonnement basée sur différentes règles de priorité comme SPT, FIFO, LPT, ou une méthode d'ordonnement basée sur les algorithmes génétiques). Pour simplifier, nous avons dupliqué les machines de la figure 4.8 et nous avons seulement changé la méthode d'ordonnement adoptée par le producteur correspondant à chacune. La méthode d'ordonnement utilisée par chaque producteur est choisie aléatoirement.

4.3.2.1 Critères d'évaluation

Afin d'évaluer la performance de SCEMP dans le cas de plusieurs machines, nous avons considéré les critères suivants :

- le temps d'exécution du programme (E);
- le nombre de cycles de production (voir le diagramme de séquence sur la figure 3.7) lancés à chaque expérience (nC);
- le pourcentage d'OF en retard ($\%R$);
- écart des charges des machines (E_{ch});

4.3.2.2 Résultats obtenus

Les figures 4.15 et 4.16 présentent les premiers résultats de cette simulation.

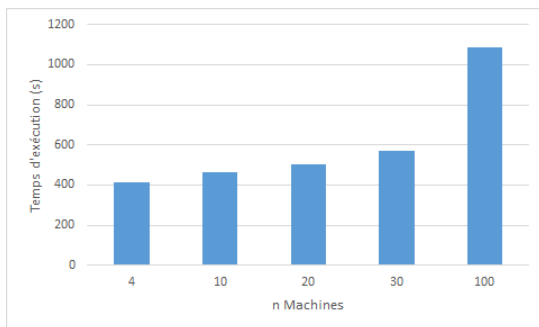


FIGURE 4.15 – Temps d'exécution moyen des expériences

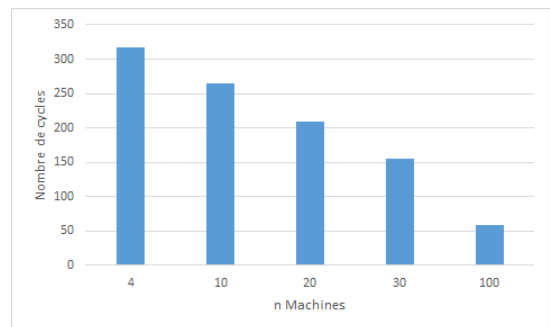


FIGURE 4.16 – Nombre de cycles lancés pour chaque expérience

Nous observons que le temps de calcul de la solution augmente lorsqu'on augmente le nombre de machines à 100, contrairement au nombre de cycles. Ceci est dû au fait que pendant chaque cycle nous avons plusieurs problèmes d'ordonnancement à une seule machine à traiter, la résolution de chacun nécessite une certaine durée, par contre, puisque nous avons plusieurs machines, chaque TF reçoit plusieurs propositions, et donc la chance que le client correspondant trouve une proposition qui satisfait ses besoins augmente.

Les figures 4.17 et 4.18 présentent les résultats de la simulation pour les deux autres critères.

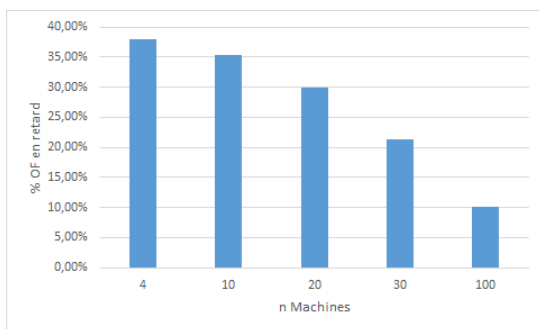


FIGURE 4.17 – pourcentage des OF en retards pour chaque expérience

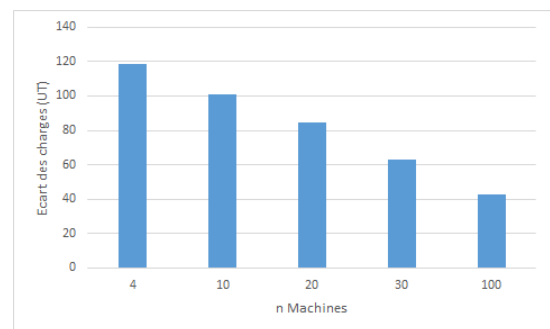


FIGURE 4.18 – Écart des charges des machines pour chaque expérience

Nous observons que la charge des machines diminue lorsque le nombre de machines augmente. Cela est logique, puisque les TF se répartissent sur un grand nombre de machines. Bien évidemment, le retard des OF diminue lorsque le nombre de machines augmente, puisque chaque OF dispose de d'avantage de producteurs pour répondre à ses demandes.

Nous notons aussi que toutes les expériences lancées ont été résolues et en aucun cas nous ne nous sommes retrouvés dans une situation de non convergence du modèle. Ceci nous permet de dire que SCEMP est un système flexible qui peut gérer différents centres de production et s'adapte bien aux changements dans l'environnement.

4.3.3 Évaluation des méthodes d'ordonnancement

Comme chaque producteur peut mettre en œuvre sa propre méthode d'ordonnancement, nous nous sommes intéressés à l'étude de la qualité des propositions obtenues par différentes méthodes. Pour ce faire, nous avons considéré 5 machines identiques ayant chacune une méthode d'ordonnancement particulière. Les machines utilisent des méthodes basées respectivement sur :

- la règle de priorité FIFO ;

- la règle de priorité SPT ;
- l'algorithme génétique avec un objectif de minimiser le nombre de TM ;
- l'algorithme génétique avec une fonction objectif de minimiser le C_{max} ;
- l'algorithme génétique avec une fonction objectif de minimiser les retards.

Nous avons généré des ensembles d'OF selon la méthode décrite dans la section 4.2.1 en variant le nombre d'OF de 20 jusqu'à 500.

4.3.3.1 Critères d'évaluation

Afin d'évaluer les qualités des ordonnancements proposées par les producteurs nous avons considéré les deux critères suivants :

- la date de fin de l'ordonnancement de la liste des TF (C_{max}) ;
- pourcentage des TF en retard (%R) ;

4.3.3.2 Résultats obtenus

Nous avons obtenu les résultats présentés dans les figures 4.19 et 4.20.

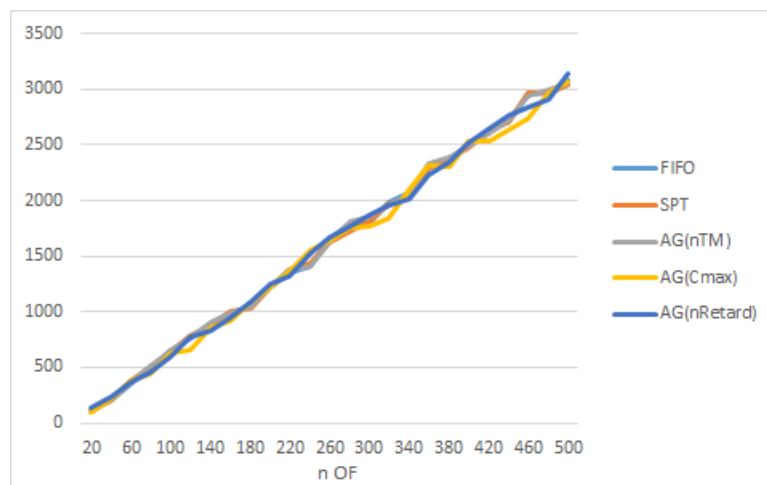


FIGURE 4.19 – Comparaison des C_{max} de chaque méthode d'ordonnement

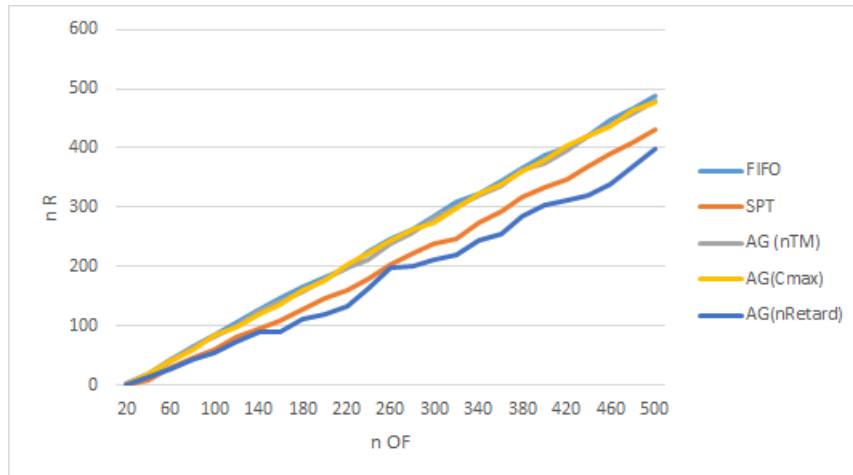


FIGURE 4.20 – Comparaison des nombres de TF en retard pour chaque méthode d'ordonnement

Sur ces figures, nous observons que pour le critère d'évaluation C_{max} la qualité de la solution calculée par toutes les méthodes est à peu près la même. Quant au critère du nombre de TF en retard, l'algorithme génétique avec une fonction objectif de minimiser le retard permet de trouver une solution de meilleure qualité que les autres méthodes.

Durant ces tests nous avons observé que le temps moyen d'exécution de chaque cycle est plus élevé pour les producteurs qui adoptent des méthodes basées sur les algorithmes génétiques.

Certes, les méthodes d'ordonnement basées sur des techniques d'optimisation permettent de trouver des planifications optimisées de bonne qualité cependant le temps de calcul nécessaire pour trouver la solution est souvent plus élevé que les simples méthodes basées sur des règles de priorité.

4.3.4 Évaluation des stratégies de validation des TM

L'objectif de ces cas d'étude est de comparer les différentes stratégies de validation des tâches de maintenance que nous avons présentées dans le chapitre précédent. Pour cela, nous avons considéré une flotte de quatre machines identiques. Ces machines ont la capacité de réaliser trois fonctionnalités et chacune nécessite un composant différent. Nous supposons que chaque fonctionnalité est indépendante, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de composant en commun entre les fonctions. Nous considérons 3 ressources de maintenance polyvalentes, c'est-à-dire que chacune peut traiter n'importe quel composant des machines. Pour voir la différence entre les différentes stratégies de validation nous avons lancé des tests simples de 5 OF dont les caractéristiques

sont listées dans le tableau 4.1.

Nous avons lancé 3 expériences, en prenant à chaque fois une des 3 stratégies de validation de TM.

ID	R	D	Gamme	Durée	Activité
OF_1	0	25	$TF_{1,1}$	7.5	A_1
			$TF_{1,2}$	8	A_3
			$TF_{1,3}$	7.5	A_2
OF_2	0	15	$TF_{2,1}$	7.5	A_2
			$TF_{2,2}$	3	A_1
OF_3	0	15	$TF_{3,1}$	6.5	A_1
OF_4	10	28	$TF_{4,1}$	7	A_3
			$TF_{4,2}$	8	A_1
OF_5	15	45	$TF_{5,1}$	7.5	A_2

TABLE 4.1 – Caractéristiques des OF

Pour chaque expérience nous présentons le résultat obtenu sous forme d'un diagramme de Gantt (figures 4.21, 4.22 et 4.23).

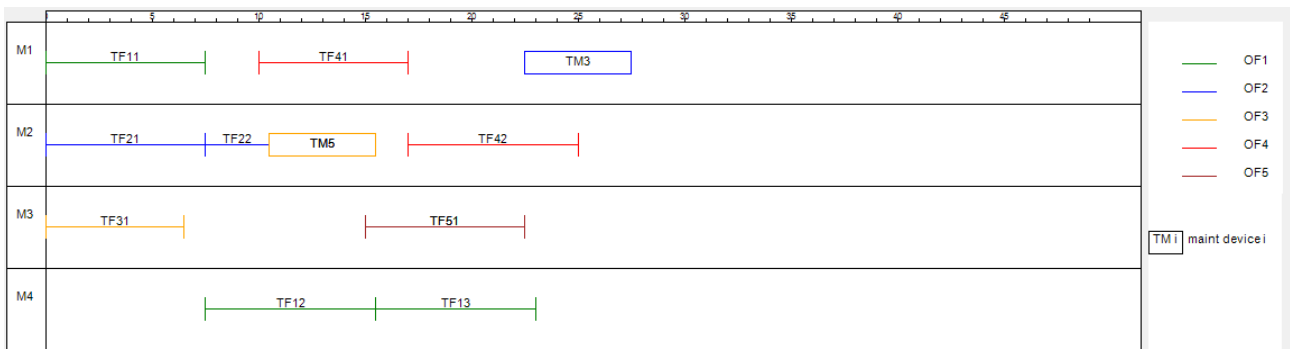


FIGURE 4.21 – Validation basée sur le temps d'inactivité des machines

4.3 Évaluation du modèle SCEMP

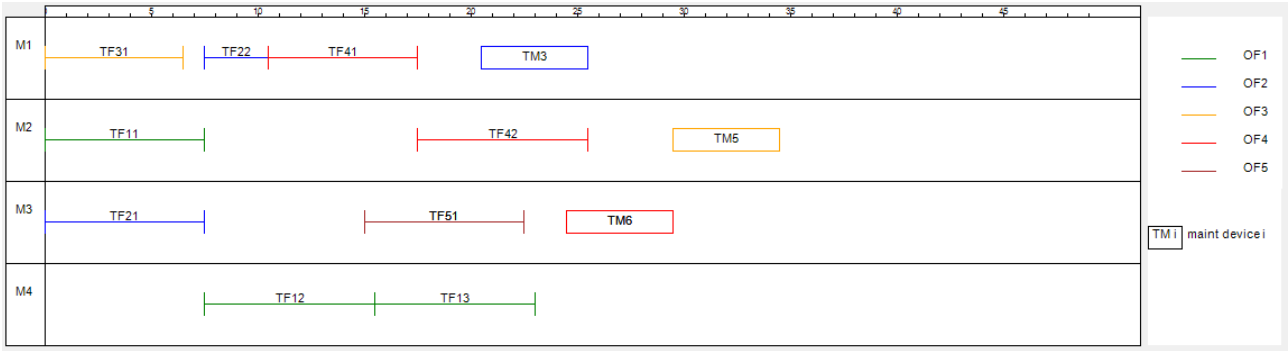


FIGURE 4.22 – Validation basée sur le taux d'utilisation des composants

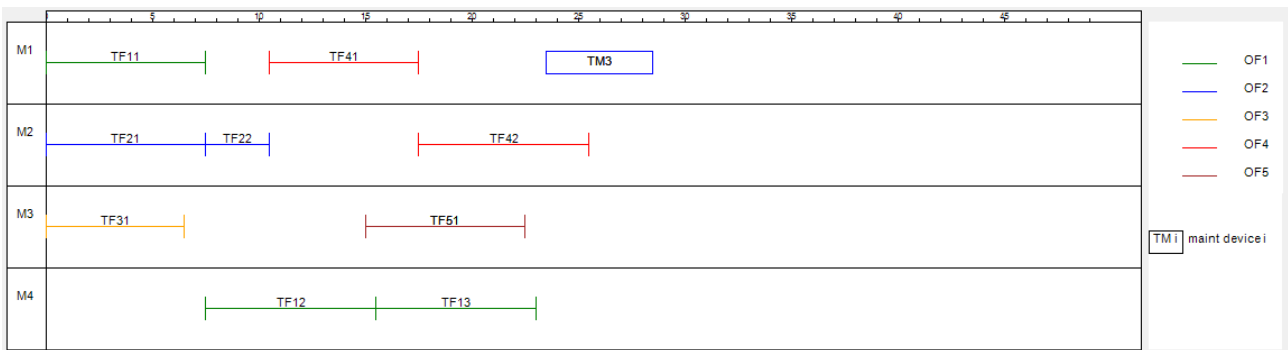


FIGURE 4.23 – Validation basée sur la charge de la machine

Comme nous remarquons ici, pour cet exemple très simple, que nous n'avons pas obtenu les mêmes résultats, cela veut dire que la stratégie de validation des tâches de maintenance utilisée influence l'ordonnancement final. Ainsi, pour pouvoir comparer ces stratégies nous avons lancé 100 tests avec un nombre d'OF de 500.

4.3.4.1 Critères d'évaluation

Nous avons considéré les critères d'évaluation suivants :

- le nombre moyen de tâches de maintenance planifiées (nTM) ;
- la date de fin de tous les OF (C_{max}) ;
- le temps d'inactivité des machines (en considérant que les interventions de maintenance comme des temps d'inactivité) (T_i) ;
- l'écart des charges des machines E_{ch} ;

4.3.4.2 Résultats obtenus

Afin de comparer les stratégies, nous avons lancé les tests et calculé la moyenne des critères d'évaluation choisis. Ces moyennes sont présentées dans les figures 4.24, 4.25, 4.26 et 4.27, avec :

S1 : stratégie basée sur le temps d'inactivité de la machine ;

S2 : stratégie basée sur le temps d'utilisation des composants ;

S3 : stratégie basée sur la charge de la machine.

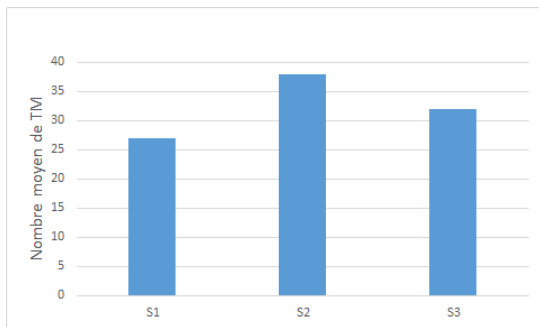


FIGURE 4.24 – Comparaison du nombre moyen de TM planifiées

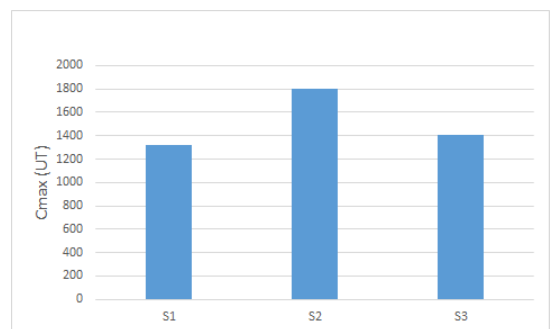


FIGURE 4.25 – Comparaison de C_{max} moyen

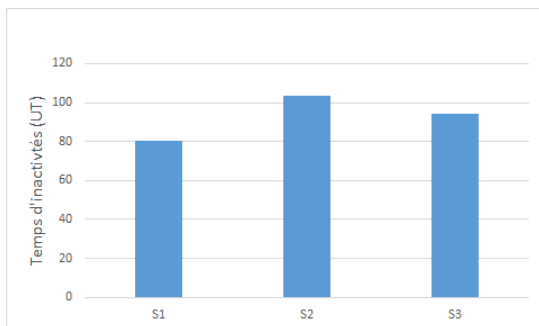


FIGURE 4.26 – Comparaison des temps d'inactivités moyens

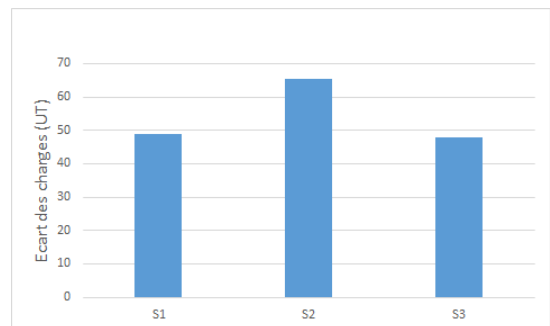


FIGURE 4.27 – Comparaison des écarts de charge moyens

D'après les figures 4.24, 4.25, 4.26 nous remarquons que la stratégie basée sur les temps d'inactivité de la machine (S1) est la meilleure en terme de minimisation du C_{max} , l'équilibre des charges des machines et du nombre total de tâches de maintenance planifiées. Nous remarquons aussi sur la figure 4.27 que les deux stratégies S1 et S3 sont équivalentes. Pour la stratégie basée sur le temps d'utilisation des composants (S2), nous remarquons qu'elle est moins bonne quel que soit le critère d'évaluation choisi.

4.4 Apports de l'utilisation du PHM

L'objectif de cette partie est de montrer l'intérêt de l'utilisation des données du PHM pour planifier les tâches de production et de maintenance. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs simulations de planification, sur quatre machines identiques (la structure est donnée sur la figure 4.28).

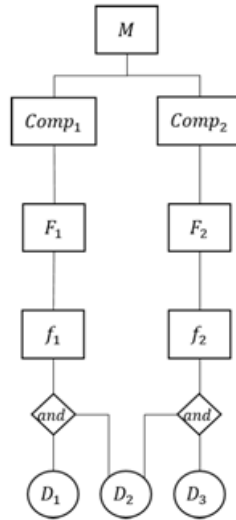


FIGURE 4.28 – Structure de la machine

Afin de tester l'impact de la précision des informations obtenues par l'outil du PHM, nous avons effectué quatre séries de tests, la première série avec une stratégie de maintenance systématique (sys) et les trois autres avec une stratégie de maintenance prédictive avec des valeurs différentes de σ_p :

- $\sigma_p = \sigma_s$: c'est-à-dire que les informations fournies par le PHM ont la même précision que celle utilisées pour la maintenance systématique (T1) ;
- $\sigma_p = \sigma_s/2$: c'est-à-dire que les informations fournies par le PHM sont deux fois plus précises que celle utilisées pour la maintenance systématique (T2) ;
- $\sigma_p = \sigma_s/5$: c'est-à-dire que les informations fournies par le PHM sont cinq fois plus précises que celle utilisées pour la maintenance systématique (T3).

Dans un premier temps, nous avons lancé une série de tests avec des TF qui varient entre 10 et 200 et nous avons calculé le nombre de TM lancées pour chaque machine, ainsi nous avons obtenu les résultats présentés dans la figure 4.29.

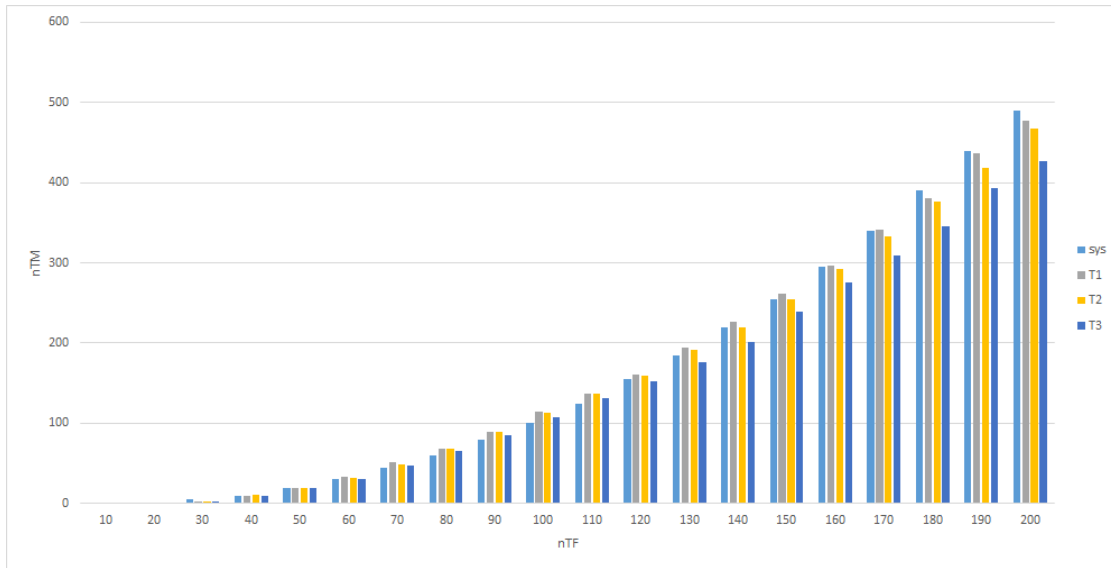


FIGURE 4.29 – Nombre de TM planifiées pour chaque machine

Nous remarquons d’abord que le nombre de TM planifiées pour chaque machine augmente d’une manière semblant être exponentielle lorsque la liste des TF à planifier augmente. Ensuite, nous remarquons que le nombre de TM planifiées pour la série T_3 est toujours inférieur aux autres machines.

Puis, afin de voir de plus près l’impact de la précision sur la qualité de la solution, nous avons lancé 100 tests avec un nombre fixe de 500 TF à planifier. Une même liste de 500 TFs a été planifiée sur les quatre machines selon une règle de priorité FIFO. A titre de simplification, nous considérons que les machines ont une aptitude de 1 pour réaliser les deux fonctionnalités et que les tâches de maintenance sont planifiées à capacité infinie.

4.4.1 Critères d’évaluation

Pour comparer les deux stratégies de maintenance et l’impact de la précision des informations fournies par le PHM, nous avons choisi les deux critères d’évaluation suivants :

- le nombre de tâches de maintenance planifiées (nTM) ;
- la durée d’utilisation moyenne des composants (T) avant maintenance (et donc défaillance présumée) ;

4.4.2 Résultats obtenus

Nous avons réalisé 100 expériences pour chaque cas d'étude, en générant à chaque expérience une nouvelle liste de TF, puis nous avons calculé la moyenne des critères d'évaluation cités. Les résultats obtenus sont résumés dans les figures 4.30 et 4.31.

En comparant les résultats obtenus par chaque stratégie de maintenance (figure 4.30 et 4.31), nous remarquons que lorsque la précision des données fournies par les modules de PHM ne sont pas plus précises que celles données par la loi de probabilité du composant, nous obtenons presque les mêmes résultats (les différences subtiles des résultats peuvent être dues à la génération aléatoire des λ_p). Mais lorsque les données fournies par les modules de PHM sont beaucoup plus précises que celles données par la loi de probabilité fournie par le fabricant du composant, nous remarquons une grande différence dans les résultats. Ces résultats montrent qu'en utilisant le PHM nous avons réussi à réduire considérablement le nombre de tâches de maintenance planifiées et à augmenter le temps moyen d'utilisation des composants.

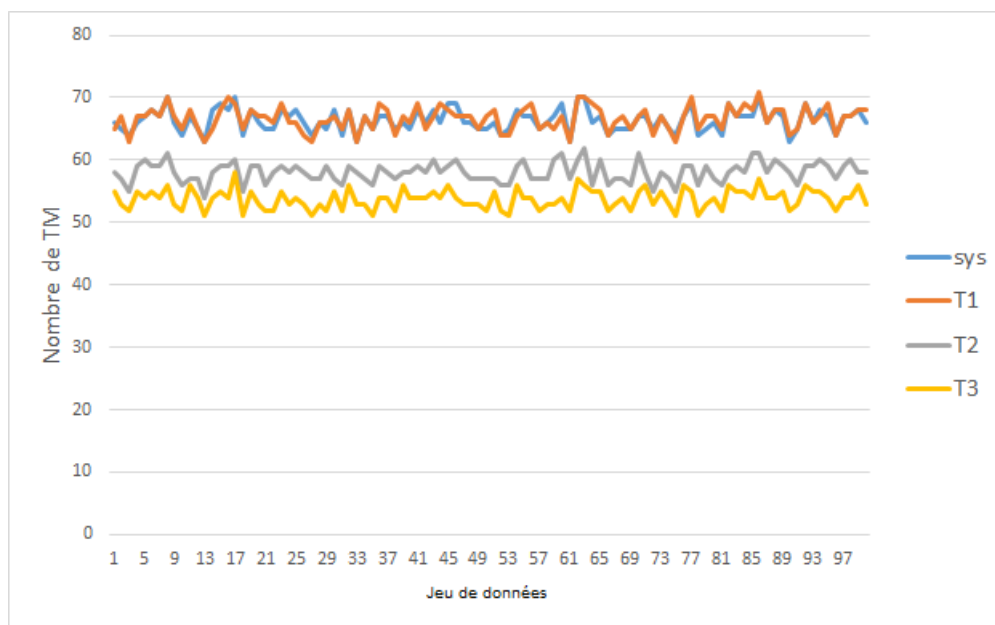


FIGURE 4.30 – Variation du nombre de TM planifiées pour chaque série

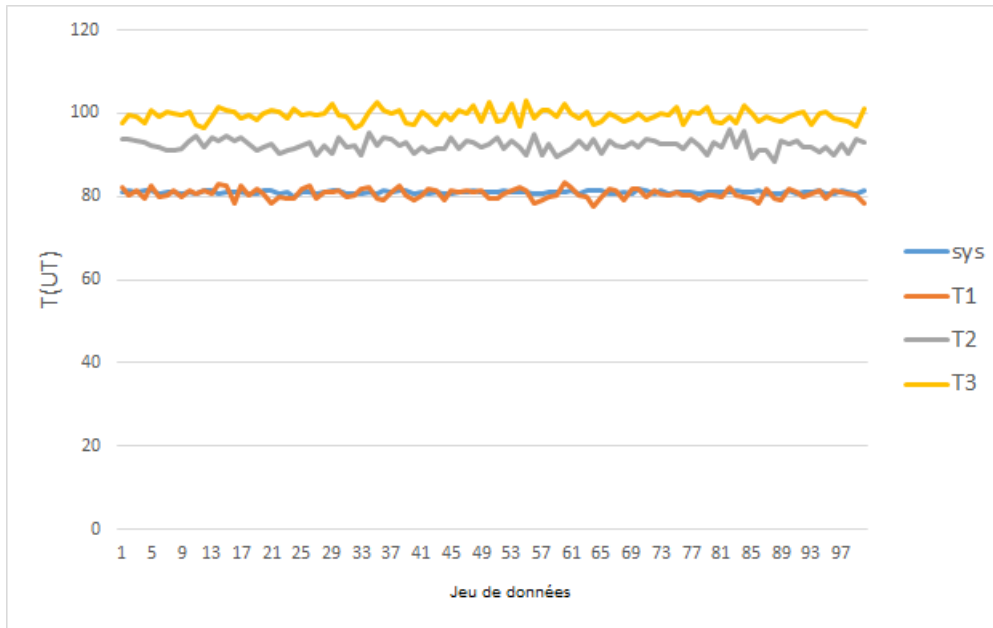


FIGURE 4.31 – Variation du temps moyen d'utilisation des composants pour chaque série

Cette série de tests montrent que l'écart entre le nombre total des tâches de maintenance prévues pour les différentes machines, le temps moyen d'utilisation des composants obtenu en utilisant les deux stratégies avec les différents σ_p deviennent plus importants lorsqu'on augmente la précision des informations fournies par les modules de PHM. Ces résultats nous permettent de déduire que les performances de maintenance sont améliorées avec la mise en œuvre de modules de PHM efficaces et que si l'incertitude sur les RUL n'est pas réduite par le module de PHM, alors le module risque d'être inutile. Alors qu'au contraire avec des modules de PHM précis, cela permet de réduire le nombre d'interventions de maintenance inutiles tout en assurant la disponibilité de l'équipement. Cela nous permet d'affirmer que l'utilisation des résultats des modules de PHM peut être la clé d'une meilleure planification conjointe des opérations de production et de maintenance.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs tests réalisés pour valider la performance du modèle SCEMP proposé dans ce manuscrit. Ces tests ont montré que le modèle est flexible et peut être utilisé dans plusieurs situations. Nous avons aussi montré l'intérêt d'utilisation des données du PHM pour une meilleure planification non seulement des tâches de maintenance

mais aussi des tâches de production. Nous avons réalisé plusieurs expériences en faisant varier le nombre de machines, d'OF et de ressources de maintenance et à chaque expérience nous avons obtenu un résultat dans un temps raisonnable. Nous n'avons pas constaté sur ces séries de tests de cas pour lequel SCEMP n'a pas convergé.

Durant les expériences lancées nous avons remarqué que lorsque la machine regroupe plusieurs composants, plusieurs TM sont lancés avec un écart, pas très important, entre les interventions ce qui peut nuire à la bonne utilisation de la machine. La production sur la machine est souvent interrompue et le coût de maintenance de la machine devient très important. Pour surmonter ces problèmes, une nouvelle stratégie de regroupement des interventions de maintenance devrait être mise en œuvre pour réduire ces temps d'inactivité des machines et par ailleurs réduire le coût total de possession des machines (total ownership cost).

Conclusion générale

Dans ce travail de recherche nous nous sommes intéressés à l'étude du problème de planification conjointe des tâches de production et de maintenance en fonction de l'état de santé des ressources. Notre objectif était d'apporter une contribution à la modélisation et à la proposition d'une méthode de planification générique, rapide et flexible qui pourra être appliquée à une certaine variété de systèmes en plus des systèmes de production.

Le premier chapitre de ce manuscrit nous a permis d'exposer le contexte général de notre travail. Il nous a permis de comprendre ce qu'est aujourd'hui une fonction de production performante, quelles sont ses contraintes et ses enjeux. Les systèmes de production et une classification de ces systèmes ont été présentés. Ensuite, les enjeux, les objectifs ainsi que les différents niveaux de planification de la production ont été abordés. Nous avons constaté dans ce chapitre l'importance de la fonction de maintenance dans les systèmes de production puisque celle-ci garantit la disponibilité des équipements de production. Ceci nous a conduit à présenter également la fonction de maintenance, dont la récente politique de maintenance prédictive permettant des gains de performance aussi bien pour la fonction de production que pour la fonction de maintenance. Nous avons ainsi mis en évidence qu'une gestion de production efficace doit prendre en considération les tâches de maintenance durant la planification de ses tâches de production afin d'améliorer la productivité du système et donc le profit de l'entreprise en général. Ceci a justifié ainsi notre motivation pour l'étude de cette problématique de planification conjointe des tâches de production et de maintenance. Comme la planification consiste en grande partie en un problème d'ordonnancement, nous avons également présenté un état de l'art des méthodes permettant de traiter les problèmes d'ordonnancement des tâches de production et des tâches de maintenance. De l'analyse de ces méthodes, nous avons établi le constat que, bien que d'un intérêt certain, la considération des éléments associés à la maintenance prédictive, comme le pronostic, n'est pas faite dans les travaux de la littérature portant sur la planification

conjointe des activités de production et celles de maintenance. Les développements que nous avons présentés dans la suite de ce manuscrit ont été créés dans le but de pallier ce manque.

Le deuxième chapitre est ensuite consacré à la présentation des fonctions de production et de maintenance afin d'identifier l'origine des conflits entre ces deux fonctions. Pour cela, nous avons présenté les particularités de chacune des deux fonctions et plus particulièrement les processus et données qu'elles mettent en œuvre ou exploitent pour organiser leurs activités. Cet examen nous a permis de mettre en évidence quatre éléments en jeu dans une planification conjointe représentant l'essence du conflit entre la production et la maintenance (les ordres de fabrication, les ressources de production, les ressources de maintenance, les ordres de maintenance). Une modélisation dans une représentation orientée-objet (sous forme d'un diagramme de classes UML) pour chacune de ces entités est ainsi présentée dans ce chapitre.

Dans le troisième chapitre nous avons exposé le modèle SCEMP (Superviseur, Clients, Environnement, Mainteneurs et Producteurs) que nous avons proposé pour résoudre le problème de planification conjointe. Cette méthode fait appel aux systèmes multi-agents dont nous avons justifié l'intérêt. Le système multi-agents que nous avons proposé permet de faire collaborer des agents de différentes natures en utilisant des techniques de négociation pour converger convenablement vers une solution qui satisfait au mieux les objectifs des agents tout en leur permettant de planifier leurs activités conjointement, en considérant l'état de santé présent et futur des ressources techniques permettant de considérer les avancées dans le domaine de la maintenance prédictive. Nous avons également proposé des stratégies de validation des tâches de maintenance.

Enfin le dernier chapitre a été consacré à la présentation de la plate-forme informatique que nous avons développée et qui met en œuvre SCEMP. Plusieurs cas d'études ont été définis afin d'effectuer des tests de SCEMP. Nous avons présenté ces cas d'études qui ne sont pas issus de benchmarks puisqu'aucun n'intègre les développements en maintenance prédictive. La démarche adoptée pour créer ces cas d'études a aussi été présentée. Grâce aux différents tests menés nous avons validé le fonctionnement de SCEMP en comparant les résultats obtenus. Une deuxième série de tests nous a permis de vérifier la robustesse du modèle confronté à un grand nombre d'OF avec des dates de livraisons proches. Nous avons aussi montré la flexibilité de la méthode en considérant différents OF, machines, mainteneurs, méthodes d'ordonnancement pour chaque agent producteur et stratégies de validation des tâches de maintenance. Nous soulignons aussi

que l'ordonnancement peut être réalisé d'une manière décentralisée. Cette décentralisation va permettre de garder la distribution naturelle des centres de décision qui ne sont pas forcément sur le même site et qui peuvent chacun avoir leur propre processus d'ordonnancement. La plate-forme implémentée nous a aussi permis de mettre en évidence l'intérêt de la maintenance prédictive et des modules de PHM en simulant des cas d'étude similaires mais avec des politiques de maintenance différentes.

Perspectives

Pour des raisons de simplicité nous n'avons considéré dans les tests réalisés que la minimisation des délais de livraison comme critère de validation pour les agents clients, et que la maximisation de la disponibilité des machines comme critère d'acceptation pour les agents producteurs. Cependant, nous avons mentionné que chaque agent peut avoir un objectif différent lors de la planification de ses tâches. Grâce à la flexibilité de notre méthode nous pouvons, à tout moment, enrichir l'ensemble des critères selon lesquels un agent peut choisir d'accepter/valider une proposition ou une autre.

Un des critères majeurs que nous pouvons développer est le coût. En effet, le choix du producteur par le client influence le coût de la fabrication du produit et le choix du mainteneur par le producteur influence le coût de la maintenance. Le coût de fabrication peut comporter le coût d'utilisation de la machine et le coût de transport, sachant qu'un client peut planifier les TF de son OF sur plusieurs machines, et qu'un coût de transport peut s'appliquer pour le déplacement du produit entre les différents producteurs concernés. Le coût de maintenance peut comporter les coûts de déplacement des machines vers les ateliers de maintenance ou celui des équipements de maintenance dans les centres de production, de même qu'un coût, correspondant à chaque mainteneur, sur la durée de la maintenance. De même, selon le choix du producteur concernant la validation d'une TM, il peut y avoir des coûts de transport inutiles que nous pouvons éliminer.

En effet, le producteur peut se rendre compte qu'il est très coûteux de ne maintenir que les composants juste nécessaires à la remise en condition opérationnelle juste suffisante caractérisée par s_z dans ce manuscrit. Donc le producteur peut juger que, quand une TM est planifiée, de restaurer d'autres composants de telle sorte à ramener l'état de santé général de la machine

nettement au-dessus. Il peut aussi appartenir à un producteur de juger qu'il est plus rentable de regrouper les TM pour réduire les coûts de transport.

Une autre perspective majeure est la prise en compte de la disponibilité des ressources de transport dans le cas où le transport est lui même une entité du système de production et aussi dans le cas où il s'agit d'un organisme de transport indépendant. Ceci incite intuitivement à introduire, dans notre méthode, un nouvel agent correspondant à cette entité de transport et qui peut avoir aussi ses propres objectifs et ses propres contraintes.

Bibliographie

- [Adiri et al., 1989] Adiri, I., Bruno, J., Frostig, E., and Kan, A. (1989). Single machine flow-time scheduling with a single breakdown. *Acta Informatica*, 26(7) :679–696.
- [Alexandre, 2006] Alexandre, P. (2006). *Contribution au diagnostic décentralisé des systèmes à événements discrets : Application aux systèmes manufacturiers*. PhD thesis, Université de Reims - Champagne Ardenne.
- [Archimède and Coudert, 1998] Archimède, B. and Coudert, T. (1998). A multi-agent scheduling approach for the flexible manufacturing production systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(32) :143–148.
- [Archimède and Coudert, 2001] Archimède, B. and Coudert, T. (2001). Reactive scheduling using a multi-agent model : the scep framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(5) :667–683.
- [Archimède et al., 2014] Archimède, B., Letouzey, A., Memon, M., and Xu, J. (2014). Towards a distributed multi-agent framework for shared resources scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(5) :1077–1087.
- [Archimède et al., 2000] Archimède, B., Priem, L., and Coudert, T. (2000). Ordonnancement multisite de systèmes flexibles de production via corba. *Journal européen des systèmes automatisés*, 34(2-3) :317–330.
- [Bénassy, 1998] Bénassy, J. (1998). *La gestion de production*. Hermes.
- [Bencheikh et al., 2018a] Bencheikh, G., Letouzey, A., and Desforges, X. (2018a). Process for joint scheduling based on health assessment of technical resources. *IFAC-PapersOnLine*, 51(24) :192–199.
- [Bencheikh et al., 2018b] Bencheikh, G., Letouzey, A., and Desforges, X. (2018b). Scheduling of production and maintenance activities using multi-agent systems. In *2018 IEEE 23rd Inter-*

-
- national Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, volume 1, pages 508–515. IEEE.
- [Berrichi et al., 2009] Berrichi, A., Amodeo, L., Yalaoui, F., Châtelet, E., and Mezghiche, M. (2009). Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling : application to the parallel machine problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(4) :389.
- [Berrichi et al., 2010] Berrichi, A., Yalaoui, F., Amodeo, L., and Mezghiche, M. (2010). Bi-objective ant colony optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers & Operations Research*, 37(9) :1584–1596.
- [Błażewicz et al., 2000] Błażewicz, J., Drozdowski, M., Formanowicz, P., Kubiak, W., and Schmidt, G. (2000). Scheduling preemptable tasks on parallel processors with limited availability. *Parallel Computing*, 26(9) :1195–1211.
- [Bratley et al., 1971] Bratley, P., Florian, M., and Robillard, P. (1971). Scheduling with earliest start and due date constraints. *Naval Research Logistics Quarterly*, 18(4) :511–519.
- [Bratley et al., 1975] Bratley, P., Florian, M., and Robillard, P. (1975). Scheduling with earliest start and due date constraints on multiple machines. *Naval Research Logistics Quarterly*, 22(1) :165–173.
- [Buzacott and Hanifin, 1978] Buzacott, J. A. and Hanifin, L. (1978). Models of automatic transfer lines with inventory banks a review and comparison. *AIIE transactions*, 10(2) :197–207.
- [Byington et al., 2004] Byington, C., Roemer, M., and Watson, M. (2004). Prognostic enhancements to diagnostic systems (peds) applied to shipboard power generation systems. Technical report, IMPACT TECHNOLOGIES LLC STATE COLLEGE PA.
- [Cao and Ho, 1990] Cao, X. and Ho, Y. (1990). Models of discrete event dynamic systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 10(4) :69–76.
- [Carlier and Chretienne, 1982] Carlier, J. and Chretienne, P. (1982). Un domaine très ouvert : les problèmes d’ordonnancement. *RAIRO-Operations Research*, 16(3) :175–217.
- [Cassady and Kutanoglu, 2003] Cassady, C. and Kutanoglu, E. (2003). Minimizing job tardiness using integrated preventive maintenance planning and production scheduling. *IIE transactions*, 35(6) :503–513.

- [Cocheteux, 2010] Cocheteux, P. (2010). *Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [Cocheteux et al., 2007] Cocheteux, P., Voisin, A., Levrat, E., and Iung, B. (2007). Formalisation du pronostic à base d’une approche processus. In *3ème Colloque International Francophone Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007*, pages 1–19.
- [Cook, 1971] Cook, S. (1971). The complexity of theorem-proving procedures. In *Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing*, pages 151–158. ACM.
- [Coudert, 2000] Coudert, T. (2000). *Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance*. PhD thesis, Toulouse, INPT.
- [Coudert et al., 2002] Coudert, T., Grabot, B., and Archimède, B. (2002). Production/maintenance cooperative scheduling using multi-agents and fuzzy logic. *International Journal of Production Research*, 40(18) :4611–4632.
- [Delahaye, 1993] Delahaye, J. (1993). *Logique, informatique et paradoxes*. Pour la science.
- [Deloux et al., 2008] Deloux, E., Castanier, B., and Bérenguer, C. (2008). Maintenance policy for a deteriorating system evolving in a stressful environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability*, 222(4) :613–622.
- [Deppner, 2004] Deppner, F. (2004). *Ordonnancement d’atelier avec contraintes temporelles entre opérations*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [Desforges et al., 2017] Desforges, X., Diévert, M., and Archimède, B. (2017). A prognostic function for complex systems to support production and maintenance co-operative planning based on an extension of object oriented bayesian networks. *Computers in Industry*, 86 :34–51.
- [Diévert, 2010] Diévert, M. (2010). *Architectures de diagnostic et de pronostic distribuées de systèmes techniques complexes de grande dimension*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.

- [Durfee et al., 1987a] Durfee, E., Lesser, V., and Corkill, D. (1987a). Coherent cooperation among communicating problem solvers. *IEEE Transactions on Computers*, 100(11) :1275–1291.
- [Durfee et al., 1987b] Durfee, E., Lesser, V., and Corkill, D. (1987b). Cooperation through communication in a distributed problem solving network. *Distributed artificial intelligence*, 1 :29–58.
- [Ferber, 1997] Ferber, J. (1997). Les systèmes multi-agents : un aperçu général. *Techniques et sciences informatiques*, 16(8).
- [Ferreiro et al., 2012] Ferreiro, S., Arnaiz, A., Sierra, B., and Irigoien, I. (2012). Application of bayesian networks in prognostics for a new integrated vehicle health management concept. *Expert Systems with Applications*, 39(7) :6402–6418.
- [Francois, 2007] Francois, J. (2007). *Planification des chaînes logistiques : Modélisation du système décisionnel et performance*. PhD thesis, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I.
- [Giard, 2003] Giard, V. (2003). *Gestion de la production et des flux*. Economica Paris.
- [Gillet-Goinard and Maimi, 2015] Gillet-Goinard, F. and Maimi, L. (2015). *Toute la fonction production- : Savoir-être, savoir-faire, savoirs*. Dunod.
- [González et al., 2018] González, E., Desforges, X., and Archimède, B. (2018). Assessment method of the multicomponent systems future ability to achieve productive tasks from local prognoses. *Reliability Engineering & System Safety*, 180 :403–415.
- [GOThA and Picouleau, 2004] GOThA and Picouleau, C. (2004). *Modeles et algorithmes en ordonnancement*.
- [Gouriveau et al., 2017] Gouriveau, R., Medjaher, K., and Zerhouni, N. (2017). *Du concept de PHM à la maintenance prédictive 1 : Surveillance et pronostic*, volume 3. ISTE Editions.
- [Grabot, 1998] Grabot, B. (1998). Objective satisfaction assessment using neural nets for balancing multiple objectives. *International Journal of Production Research*, 36(9) :2377–2395.
- [Graham et al., 1979] Graham, R., Lawler, E., Lenstra, J., and Kan, A. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey. In *Annals of discrete mathematics*, volume 5, pages 287–326. Elsevier.

- [Grall et al., 2002] Grall, A., Dieulle, L., Bérenguer, C., and Roussignol, M. (2002). Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *IEEE transactions on reliability*, 51(2) :141–150.
- [Graves and Lee, 1999] Graves, G. and Lee, C. (1999). Scheduling maintenance and semiresumable jobs on a single machine. *Naval Research Logistics (NRL)*, 46(7) :845–863.
- [Hafri and Najid, 2001] Hafri, Y. and Najid, N. (2001). Utilisation de l’approche multi-agents pour le pilotage en temps réel des systèmes de production. In *3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation : Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels, MOSIM*, volume 1, page 25.
- [Hamilton and Miles, 2006] Hamilton, K. and Miles, R. (2006). *Learning UML 2.0*, volume 286. O’Reilly Sebastopol, USA.
- [Haouari et al., 1990] Haouari, M., Dejax, P., and Desrochers, M. (1990). Les problèmes de tournées avec contraintes de fenêtres de temps, l’état de l’art. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 24(3) :217–244.
- [Haupt, 1989] Haupt, R. (1989). A survey of priority rule-based scheduling. *Operations-Research-Spektrum*, 11(1) :3–16.
- [Held and Karp, 1962] Held, M. and Karp, R. (1962). A dynamic programming approach to sequencing problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(1) :196–210.
- [Hetreux, 1996] Hetreux, G. (1996). *Structures de décision multi-niveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions*. PhD thesis, INSA de Toulouse.
- [Higgins et al., 1996] Higgins, P., Le Roy, P., and Tierney, L. (1996). *Manufacturing planning and control : Beyond MRP II*. Springer Science & Business Media.
- [Horn, 1974] Horn, W. (1974). Some simple scheduling algorithms. *Naval Research Logistics Quarterly*, 21(1) :177–185.
- [Ishak et al., 2008] Ishak, K., Archimède, B., and Charbonnaud, P. (2008). Scep-soa : An applicative architecture to enhance interoperability in multi-site planning. In *OTM Confederated International Conferences" On the Move to Meaningful Internet Systems"*, pages 313–322. Springer.

- [Jardine et al., 2006] Jardine, A., Lin, D., and Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7) :1483–1510.
- [Javel, 2010] Javel, G. (2010). *Organisation et gestion de la production*. Dunod.
- [Jennings, 1994] Jennings, N. (1994). *Cooperation in industrial multi-agent systems*, volume 43. World Scientific.
- [Jennings, 1996] Jennings, N. (1996). Coordination techniques for distributed artificial intelligence. *Foundations of distributed artificial intelligence*, 187 :210.
- [Jennings and Wooldridge, 1995] Jennings, N. R. and Wooldridge, M. (1995). Applying agent technology. *Applied Artificial Intelligence an International Journal*, 9(4) :357–369.
- [Julka et al., 2011] Julka, N., Thirunavukkarasu, A., Lendermann, P., Gan, B. P., Schirrmann, A., Fromm, H., and Wong, E. (2011). Making use of prognostics health management information for aerospace spare components logistics network optimisation. *Computers in Industry*, 62(6) :613–622.
- [Jünger et al., 1995] Jünger, M., Reinelt, G., and Rinaldi, G. (1995). The traveling salesman problem. *Handbooks in operations research and management science*, 7 :225–330.
- [Kaabi et al., 2002] Kaabi, J., Varnier, C., and Zerhoni, N. (2002). Heuristics for scheduling maintenance and production on a single machine. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 5, pages 5–pp. IEEE.
- [Kaabi-Harrath, 2004] Kaabi-Harrath, J. (2004). *Contribution à l’ordonnement des activités de maintenance dans les systèmes de production*. Theses, Université de Franche-Comté.
- [Kallrath, 2005] Kallrath, J. (2005). Solving planning and design problems in the process industry using mixed integer and global optimization. *Annals of Operations Research*, 140(1) :339–373.
- [Korte et al., 2010] Korte, B., Fonlupt, J., and Vygen, J. (2010). *Optimisation combinatoire : Théorie et algorithmes*. Springer Science & Business Media.
- [Krothapalli and Deshmukh, 1999] Krothapalli, N. and Deshmukh, A. (1999). Design of negotiation protocols for multi-agent manufacturing systems. *International journal of production research*, 37(7) :1601–1624.

- [Ladj et al., 2017a] Ladj, A., Tayeb, F., Varnier, C., Dridi, A., and Selmane, N. (2017a). A hybrid of variable neighbor search and fuzzy logic for the permutation flowshop scheduling problem with predictive maintenance. *Procedia Computer Science*, 112 :663–672.
- [Ladj et al., 2017b] Ladj, A., Varnier, C., Tayeb, F., and Zerhouni, N. (2017b). Exact and heuristic algorithms for post prognostic decision in a single multifunctional machine. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(2).
- [Laporte, 1992] Laporte, G. (1992). The traveling salesman problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(2) :231–247.
- [Lebold and Thurston, 2001] Lebold, M. and Thurston, M. (2001). Open standards for condition-based maintenance and prognostic systems. In *Maintenance and Reliability Conference (MARCON)*, volume 200. May.
- [Lee, 1996] Lee, C. (1996). Machine scheduling with an availability constraint. *Journal of global optimization*, 9(3-4) :395–416.
- [Lee and Liman, 1992] Lee, C. and Liman, S. (1992). Single machine flow-time scheduling with scheduled maintenance. *Acta Informatica*, 29(4) :375–382.
- [Lee, 2000] Lee, C et Chen, Z. (2000). Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. *Naval Research Logistics (NRL)*, 47(2) :145–165.
- [Letouzey, 2001] Letouzey, A. (2001). *Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Letouzey et al., 2003] Letouzey, A., Grabot, B., and Geneste, L. (2003). Indicators for interactive scheduling. In *Collaborative Systems for Production Management*, pages 619–630. Springer.
- [Li et al., 2017] Li, G., Liu, M., Sethi, S., and Xu, D. (2017). Parallel-machine scheduling with machine-dependent maintenance periodic recycles. *International Journal of Production Economics*, 186 :1–7.
- [Liao et al., 2007] Liao, C., Chen, C., and Lin, C. (2007). Minimizing makespan for two parallel machines with job limit on each availability interval. *Journal of the Operational Research Society*, 58(7) :938–947.

- [Liao and Chen, 2003] Liao, C. and Chen, W. (2003). Single-machine scheduling with periodic maintenance and nonresumable jobs. *Computers & Operations Research*, 30(9) :1335–1347.
- [Liao et al., 2005] Liao, C., Shyur, D., and Lin, C. (2005). Makespan minimization for two parallel machines with an availability constraint. *European Journal of Operational Research*, 160(2) :445–456.
- [Liao and Sheen, 2008] Liao, L. and Sheen, G. (2008). Parallel machine scheduling with machine availability and eligibility constraints. *European Journal of Operational Research*, 184(2) :458–467.
- [Lopez, 1991] Lopez, P. (1991). *Approche énergétique pour l’ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [Luo et al., 2003] Luo, J., Namburu, M., Pattipati, K., Qiao, L., Kawamoto, M., and Chigusa, S. (2003). Model-based prognostic techniques [maintenance applications]. In *Proceedings AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference.*, pages 330–340. IEEE.
- [Marty, 1997] Marty, C. (1997). *Juste à temps : produire autrement*. Hermes.
- [Mateo et al., 2018] Mateo, M., Teghem, J., and Tuyttens, D. (2018). A bi-objective parallel machine problem with eligibility, release dates and delivery times of the jobs. *International Journal of Production Research*, 56(3) :1030–1053.
- [Memon and Archimede, 2013] Memon, M. and Archimede, B. (2013). Towards a distributed framework for transportation planning : A food supply chain case study. In *2013 10th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL (ICNSC)*, pages 603–608. IEEE.
- [Méndez et al., 2006] Méndez, C., Cerdá, J., Grossmann, I., Harjunkoski, I., and Fahl, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & chemical engineering*, 30(6-7) :913–946.
- [Mobley, 2002] Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- [Moller, 1988] Moller, P. (1988). *Théorie algébrique des systèmes à événements discrets*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [Mourani, 2006] Mourani, I. (2006). *Étude des systèmes de productions automatisée soumis à des aléas*. PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz.

- [Muller, 2005] Muller, A. (2005). *Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic*. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- [Murthy and Krishnamurthy, 2009] Murthy, V. and Krishnamurthy, E. (2009). Multiset of agents in a network for simulation of complex systems. In *Recent Advances in Nonlinear Dynamics et Synchronization*, pages 153–200. Springer.
- [Nasri, 2013] Nasri, I. (2013). *Développement d'une méthodologie d'ordonnement/optimisation adaptée aux systèmes industriels de type HVLV (High-Variety, Low-Volume)*. PhD thesis, Université de Grenoble.
- [Nguyen, 2015] Nguyen, D. N. (2015). *Contribution aux approches probabilistes pour le pronostic et la maintenance des systèmes contrôlés*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes.
- [Odell, 1998] Odell, J. J. (1998). *Advanced object-oriented analysis and design using UML*, volume 12. Cambridge University Press.
- [Orlicky, 1975] Orlicky, J. (1975). *Material requirements planning : the new way of life in production and inventory management*. McGraw-Hill.
- [Pillet et al., 2011] Pillet, M., Martin-Bonnefous, C., Bonnefous, P., and Courtois, A. (2011). *Gestion de production : Les fondamentaux et les bonnes pratiques*. Editions Eyrolles.
- [Provan, 2003a] Provan, G. (2003a). An open systems architecture for prognostic inference during condition-based monitoring. In *2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No. 03TH8652)*, volume 7, pages 3157–3164. IEEE.
- [Provan, 2003b] Provan, G. (2003b). Prognosis and condition-based monitoring : an open systems architecture. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(5) :81–86.
- [Pujo and Kieffer, 2002] Pujo, P. and Kieffer, J. (2002). *Fondements du Pilotage des Systèmes de Production*. Hermès.
- [Rardin, 1998] Rardin, R. (1998). *Optimization in operations research*, volume 166. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- [Sanlaville, 1995] Sanlaville, E. (1995). Nearly on line scheduling of preemptive independent tasks. *Discrete Applied Mathematics*, 57(2-3) :229–241.

- [Sanlaville and Schmidt, 1998] Sanlaville, E. and Schmidt, G. (1998). Machine scheduling with availability constraints. *Acta Informatica*, 35(9) :795–811.
- [Sloan and Shanthikumar, 2000] Sloan, T. W. and Shanthikumar, J. (2000). Combined production and maintenance scheduling for a multiple-product, single-machine production system. *Production and Operations Management*, 9(4) :379–399.
- [Smith, 1980] Smith, R. (1980). The contract net protocol : High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on computers*, (12) :1104–1113.
- [Sun et al., 2007] Sun, B., Kang, R., and Xie, J.-s. (2007). Research and application of the prognostic and health management system. *Systems Engineering and Electronics*, 29(10) :1762–1767.
- [Sycara, 1989] Sycara, K. (1989). Multiagent compromise via negotiation. In *Distributed artificial intelligence*, pages 119–137. Elsevier.
- [Thomas and Griffin, 1996] Thomas, D. and Griffin, P. (1996). Coordinated supply chain management. *European journal of operational research*, 94(1) :1–15.
- [Tobon-Mejia et al., 2012] Tobon-Mejia, D., Medjaher, K., Zerhouni, N., and Tripot, G. (2012). A data-driven failure prognostics method based on mixture of gaussians hidden markov models. *IEEE Transactions on reliability*, 61(2) :491–503.
- [Touati et al., 2007] Touati, N., Létocart, L., and Nagih, A. (2007). Méthodes de décomposition pour l’optimisation discrète.
- [Varnier and Zerhouni, 2012] Varnier, C. and Zerhouni, N. (2012). Scheduling predictive maintenance in flow-shop. In *Prognostics and System Health Management (PHM), 2012 IEEE Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- [Wolosewicz, 2008] Wolosewicz, C. (2008). *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [Xu et al., 2008] Xu, D., Sun, K., and Li, H. (2008). Parallel machine scheduling with almost periodic maintenance and non-preemptive jobs to minimize makespan. *Computers & operations research*, 35(4) :1344–1349.
- [Xu et al., 2012] Xu, J., Archimède, B., and Letouzey, A. (2012). A distributed multi-agent framework for shared resources scheduling. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6) :775–780.

- [Yin et al., 2017] Yin, Y., Wang, Y., Cheng, T., Liu, W., and Li, J. (2017). Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions. *Omega*, 69 :17–28.
- [Zargayouna, 2007] Zargayouna, M. (2007). *Modèle et langage de coordination pour les systèmes multi-agents ouverts. Application au problème du transport à la demande*. PhD thesis, PhD dissertation, University of Paris-Dauphine, Paris (France), 2007. In French.