



MESURE DE LA PRODUCTIVITÉ DANS UNE USINE DE RABOTAGE DE BOIS D'ŒUVRE

Mémoire

Mohamed Lamine Lamrani

Maîtrise en génie mécanique
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

© Mohamed lamine Lamrani, 2014

Résumé

Le marché industriel requiert une production de qualité à des prix compétitifs, comme c'est le cas dans l'industrie du rabotage de bois. L'impact des temps d'arrêt sur la productivité est un phénomène complexe et la maîtrise de ce phénomène constitue toujours une avancée pour les industriels.

L'objectif de ce mémoire est d'analyser et d'identifier les causes spécifiques de la dégradation de la performance du procédé de rabotage. Le processus de résolution de problèmes proposé dans notre étude est inspiré de la démarche **DMAIC** (Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler) de **Six Sigma**.

L'application de la démarche **DMAIC** dans notre étude a révélé que 80% de la non-performance est occasionnée par des arrêts non planifiés des machines.

Afin de remédier à cette problématique, il faut contrôler la qualité des intrants et éliminer les dysfonctionnements de la ligne de production. Cela doit passer par la mise en place d'une stratégie de maintenance préventive basée sur la fiabilité.

Abstract

The industrial market requires a good quality production with competitive prices; this is the case in the wood planing industry. The downtime impact on productivity is a complex phenomenon, and understanding this phenomenon represents a real challenge for industrials.

The main goal of this thesis is to analyse and identify the specific causes of the planing process performance degradation. The process put forward in our study is inspired by the **DMAIC** approach (**Define, Measure, Analyze, Improve, Control**) of **Six Sigma**.

The use of the **DMAIC** approach in our study showed that 80% of non-performance is due to the unscheduled downtime of machines.

To solve this issue, it is essential to eliminating the not quality of the inputs and dysfunctions of the production line and this should be done by implementing a preventive maintenance strategy; Reliability Centered Maintenance (**RCM**).

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Remerciements	xv
Chapitre 1 - Introduction et objectifs	1
1.1 Introduction	2
1.2 Les systèmes de production : généralités	3
1.2.1 Typologie des systèmes de production.....	5
1.2.1.1 Typologie liée à la demande	5
1.2.1.2 Typologie liée aux ressources	5
1.3 Critères d'évaluation d'un système de production.....	6
1.3.1 La performance des systèmes de production.....	6
1.3.2 La sûreté de fonctionnement	9
1.4 Objectif et apports du mémoire	12
1.5 L'industrie de la première transformation du bois	14
1.5.1 Problématique.....	17
1.5.2 Description du procédé de rabotage	18
1.6 Contenu du mémoire	22
Chapitre 2 - Généralités sur les lignes de production.....	23
2.1 Introduction	24
2.2 Définitions des lignes de production	24
2.3 Conduite des lignes de production.....	25
2.4 Classification des lignes de production	26
2.4.1 Les lignes de flux (flow lines).....	26
2.4.1.1 Problème rencontré dans les lignes de flux.....	27
2.4.2 Les lignes de transfert ou lignes automatisées	28
2.4.2.1 Les avantages et les inconvénients des lignes de transfert.....	29
2.4.2.2 Conduite des lignes de transfert.....	30
2.4.2.3 Les aléas d'une ligne de transfert.....	31
2.4.2.4 Solutions aux problèmes d'opération des lignes de transfert.....	32
2.5 Conclusion	33
Chapitre 3 - Amélioration continue de la performance : revue de la littérature.....	35
3.1 Introduction	36

3.2	Le Lean : historique	37
3.2.1	Le concept Lean	39
3.2.1.1	Le Kaizen	39
3.3	Les outils de résolution de problèmes de performance	42
3.3.1	Indicateurs de performance	43
3.3.1.1	Le Taux de Rendement Synthétique	46
3.4	Impact de la maintenance sur le Taux de Rendement Synthétique	51
3.4.1	La maintenance : définition	52
3.4.2	Les approches de la maintenance	55
3.4.2.1	La maintenance productive totale (TPM)	55
3.4.2.2	La maintenance basée sur la fiabilité (MBF)	56
3.5	Conclusion	57
Chapitre 4 – Impact des temps d’arrêt sur la productivité dans l’usine de rabotage de bois : application du processus (DMAIC).....		59
4.1	Introduction	60
4.2	Le Six Sigma	60
4.3	Déroulement de la méthode de résolution de problèmes (DMAIC).....	61
4.4	Déploiement du processus de résolution de problèmes (DMAIC).....	62
4.4.1	Définir	62
4.4.1.1	Rappel sur la problématique et l’objectif du projet.....	63
4.4.1.2	Cartographie du processus (SIPOC)	64
4.4.2	Mesurer.....	67
4.4.2.1	Approfondissement de la cartographie du processus.....	67
4.4.2.2	Collecte des données et mesure de la capacité du processus	71
4.4.3	Analyser	72
4.4.3.1	Analyse du Taux de Rendement Synthétique (TRS)	72
4.4.3.2	Analyse des causes de faiblesse du TRS de la ligne de rabotage	76
4.5	Conclusion	79
Chapitre 5 – Résultats et conclusion : synthèse de l’étude		81
5.1	Synthèse finale de l'analyse	82
5.2	Conclusion	87
5.3	Limites et perspectives	88
Bibliographie.....		89

Liste des figures

Figure 1.1 : Modèle conceptuel d'un système de production [DOU84, ROB88].....	4
Figure 1.2 : Triangle de la performance [GIB80].	7
Figure 1.3 : Politique générale de l'entreprise [GAR04].	8
Figure 1.4 : Relation entre les attributs de sûreté de fonctionnement [CAU04]......	11
Figure 1.5 : Processus de résolution de problèmes (inspiré de la démarche DMAIC [CHO04]).	13
Figure 1.6 : Procédé de transformation du bois.....	15
Figure 1.7 : Optimisation de la découpe d'un billot (lecteur optique).....	16
Figure 1.8 : Schéma illustrant la coupe périphérique et les composantes de la force de coupe résultante [WEN88].....	17
Figure 1.9 : Le procédé de rabotage de bois.	19
Figure 2.1 : Ligne de production.	24
Figure 2.2 : Schéma de flux dans une ligne de transfert.	29
Figure 3.1 : La maison de Toyota [TBM11].	38
Figure 3.2 : Les pertes d'un système de production - Afnor NFE 60-182.	45
Figure 3.3 : Les temps d'état d'un moyen de production (adopté de NFE 60-182-[AYE04]).	47
Figure 3.4 : Le contenu de la fonction maintenance [RET90].	53
Figure 3.5 : Les différents types de maintenance [AFN88].	54
Figure 4.1 : DMAIC- Processus de résolution de problèmes de Six Sigma [DMA11].	61
Figure 4.2 : Modèle physique des équipements selon la norme ISA88.	68
Figure 4.3 : Modèle physique des équipements du procédé de rabotage.	70
Figure 4.4 : Présentation des temps perdus.	71
Figure 4.5 : Diagramme du temps net de fonctionnement de la ligne de rabotage.	71
Figure 4.6 : Présentation systématique d'un système de production (adopté de la performance industrielle globale) [GRA12].....	73
Figure 4.7 : Diagramme des temps d'état et temps perdus de la ligne de rabotage.	74
Figure 4.8 : Diagramme des temps d'arrêts et de ralentissements de la ligne de rabotage.	75
Figure 4.9 : Diagramme du Taux de Rendement Synthétique.	76
Figure 4.10 : Arbre des causes de faiblesse du TRS [HOH14]......	77
Figure 4.11 : Diagramme de Pareto des origines d'arrêt.....	78
Figure 5.1 : Diagramme causes/effet.....	84

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Les principes de la démarche Kaizen [SIE05].	41
Tableau 4.1 : SIPOC du processus de rabotage de bois.	66

*Je dédie ce mémoire à mes enfants Mehdi, Melissa, Ikram,
à ma femme et à mes très chers parents qui m'ont toujours dit :
« C'est du travail et de la persévérance dont résulte la réussite ».*

Remerciements

Je souhaite adresser mes premiers remerciements à mon directeur de recherche, Professeur Mustapha Nourelfath, pour son encadrement exemplaire et pour la confiance qu'il m'a toujours accordée.

Merci aussi à mon codirecteur, Dr. François Léger. Merci au Professeur Eric Châtelet de l'Université de technologie de Troyes (France) et au Professeur Jonathan Gaudreault de l'Université Laval pour le temps qu'ils ont consacré pour l'évaluation de ce mémoire.

Merci à toutes les personnes qui m'ont aidé et m'ont fait progresser dans mon travail de recherche et industriel. Je ne peux pas toutes les citer mais je pense qu'elles se reconnaîtront dans ces quelques lignes.

Je voudrais aussi remercier tous les membres de l'équipe FORAC. Je garde un très bon souvenir de ces deux années passées au sein de ce Consortium de recherche à l'Université Laval.

À ma femme et à mon fils, merci pour leur compréhension et leur soutien qui ont été une source constante de motivation. Merci pour autant d'heures qu'on n'a pas pu partager en famille.

Et enfin des millions de mercis à mes parents pour tous leurs encouragements et leur soutien sans faille tout au long de ce travail.

Chapitre 1 - Introduction et objectifs

1.1 Introduction

Les forêts représentent l'un des principaux moteurs de l'économie des régions du Québec. L'industrie forestière, notamment les secteurs de l'exploitation forestière et de la fabrication des produits du bois, constitue un pilier majeur de l'économie québécoise. Comptant plus de 400 usines de première transformation implantées un peu partout en région, cette industrie génère quelque 80 000 emplois directs en foresterie et en transformation du bois. Dans les dernières années, les entreprises du secteur forestier ont eu à faire face à d'importants défis en raison de la concurrence mondiale qui vise continuellement à améliorer aussi bien la qualité et le prix des produits que les délais de production. De ce fait, l'industrie est réellement gagnante si elle peut augmenter sa production sans avoir à investir dans des moyens supplémentaires. Pour ce faire, elle cherche à obtenir le maximum de sa capacité de production en limitant le plus possible les pertes. La recherche constante de performance nécessite des processus visant à améliorer les indicateurs représentatifs de la productivité.

La problématique de l'amélioration de la performance n'est pas véritablement nouvelle. Au cours de ces dernières années et jusqu'à présent la performance industrielle est définie par la maîtrise des activités de l'industrie, c'est-à-dire son aptitude à réaliser les résultats attendus de manière répétée. Cela dépend de l'efficacité de son organisation, cette efficacité est obtenue par :

- La maîtrise de la disponibilité des machines et de de l'outillage durant tout le temps prévu pour la réalisation la production planifié,
- La maîtrise de la qualité exigée par le client en termes de conformité, de prix et de disponibilité « Juste à Temps »,
- La maîtrise des dépenses relative à la satisfaction des clients.

Advenant la difficulté à satisfaire simultanément et efficacement ces trois enjeux, l'industrie forestière devra supprimer l'imprévu et le hasard dans ses activités de production.

Dans ce mémoire, on s'intéresse à l'industrie de rabotage de bois. Nous évoquerons le rôle important de cette industrie dans le procédé de transformation du bois ainsi que les bonnes pratiques industrielles dans l'amélioration de la performance. Notre étude de cette industrie manufacturière va démontrer l'existence de difficultés au niveau de la productivité, de la performance de la ligne de rabotage et de la qualité des produits finis. Tous ces problèmes sont dus aux pannes, à l'usure mécanique des outils de coupe, aux réglages, à la marche à vide, aux micro-arrêts et à la qualité des intrants.

1.2 Les systèmes de production : généralités

Un système est un ensemble d'éléments interdépendants orientés vers la réalisation d'une fonction. Il peut être divisé en sous-systèmes, en composants et en éléments.

Produire, c'est transformer [SAS98]. Le lieu et les moyens de ces transformations, c'est le système de production. Un processus de production est généralement composé d'un grand nombre d'opérations ou de transformations organisées en réseau. Ces opérations assurent des transformations de forme (modification des produits eux-mêmes), des transformations dans le temps (fonction de stockage) ou dans l'espace (fonction de transport). Les systèmes de production diffèrent par les objectifs visés par le producteur, les attributs des objets transformés et par les caractéristiques des processus de production. Ils ne sont pas statiques et ils évoluent sous les effets conjugués de l'évolution du marché, des technologies et des sociétés dans lesquelles ils sont insérés. Ils se définissent par les attributs de sortie : coût des produits, qualité des produits, quantité de produits par unité de temps, délais moyens de livraison d'un produit (ou temps de service), etc.

Un système de production d'une entreprise doit regrouper les principaux processus fonctionnels : «définition et mise en œuvre des stratégies d'entreprise, conception des produits et des processus de production, conduite et gestion de ces systèmes» [ANS05].

Les systèmes de production ont été classés dans [SAS98, AMO99] en trois grandes catégories :

- **Les processus continus** tels que la production électrique, chimique ou papetière ;
- **Les processus discrets** tels que l'usinage et toutes les activités d'assemblage, etc. Cette vision des systèmes est très fréquente dans l'industrie manufacturière ;
- **Les processus discontinus** qui se situent, par définition, à mi-chemin entre les processus continus et les processus discrets. Les deux types de processus sont couplés : la production est continue mais il y a un conditionnement discret des produits.

Nous allons nous concentrer dans notre étude sur le système de production manufacturier qui se caractérise par la nature discrète du processus. Il y s'agit de la fabrication de produits finis par lots homogènes. On rencontre ce type de production dans les industries qui offrent différents produits finis fabriquées dans une chaîne de production unique. Tous ne pouvant être fabriqués simultanément, on lance à tours de rôle une fabrication par lot suivie du stockage. La théorie des systèmes appliquée aux systèmes de production permet de partager ces derniers en trois sous-systèmes : «le système physique de production, le système d'information et le système de décision» [DOU84, ROB88] (figure 1.1).

Le système, couramment appelé système de gestion de production, est constitué par la partie du système de décision et du système d'information traitant des fonctions rattachées directement à la production (par exemple, les achats, les approvisionnements, la planification, la gestion des ressources, la maintenance, etc.).

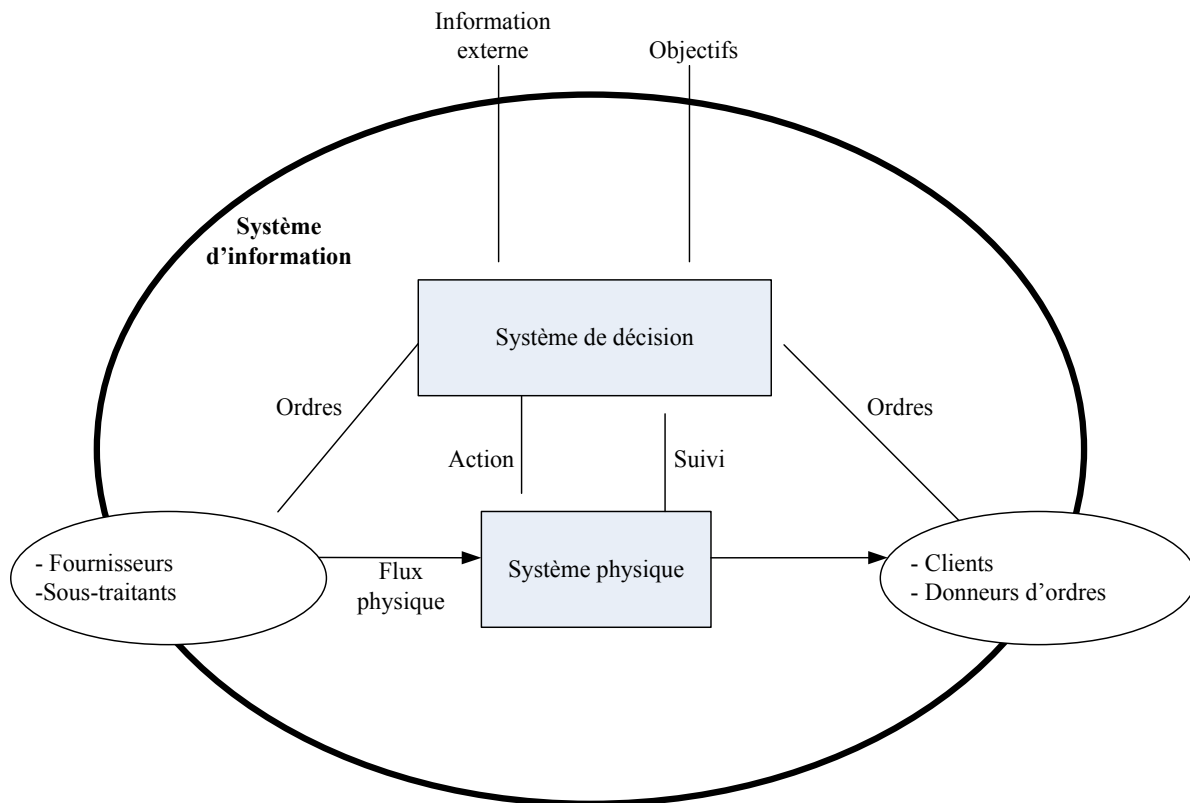


Figure 1.1 : Modèle conceptuel d'un système de production [DOU84, ROB88].

Le système physique transforme les matières premières en produits finis. Pour effectuer cette opération, il est commandé par le système de décision qui transforme les informations à caractère commercial en ordres de fabrication et ordres d'approvisionnement. Le système est ainsi bouclé puisqu'en retour, il reçoit les informations de suivi du système physique pour pouvoir effectivement piloter ce dernier.

En termes de flux, un ensemble de flux régulés parcourent le système de production. Tout d'abord, le flux physique ou de matière qui transforme la matière première et les composants en produits finis, puis le flux d'information ou de suivi qui permet la circulation d'informations nécessaires au contrôle et à la prise de décision. Enfin, le flux de décision ou ordre qui contrôle et pilote le système physique.

1.2.1 Typologie des systèmes de production

Un processus de fabrication est caractérisé par la séquence des opérations nécessaires à la production d'un bien spécifique. Face à la diversité et à la complexité de ces processus de fabrication, les systèmes de production sont classés et gérés en fonction des critères de choix. Giard [GIA88] propose deux typologies : une première liée à l'origine de la demande et une seconde liée aux ressources.

1.2.1.1 Typologie liée à la demande

Elle est basée sur le fait que les ordres de fabrication émanent, soit directement des commandes, soit pour réapprovisionner les stocks de produits finis. Deux types de systèmes de production en découlent :

- **Systèmes basés sur la production à la commande** : la production est déclenchée par les commandes fermes du client ou par les demandes aléatoires. Dans ce type de structure, le délai de fourniture se négocie avec le client, par contre l'état des stocks en produits finis est quasiment nul.
- **Systèmes basés sur la production pour stocks** : le client commande les articles selon les spécifications définies par l'entreprise. La production est alors déclenchée par anticipation d'une demande solvable. Nous remarquons, dans ce cas, que les délais de fourniture sont nuls ; par contre le problème de gestion des stocks se pose.

1.2.1.2 Typologie liée aux ressources

Elle est liée à la façon dont sont organisées les ressources pour traiter les flux de matières premières. Quatre types de systèmes de production en découlent :

- **Système à production unitaire ou projet** : ce type d'organisation concerne la réalisation de grands projets uniques (ou de petites séries) sur des périodes assez longues. La taille du projet étant importante relativement aux moyens mis en œuvre, ce sont les moyens de production qui viennent sur le site de construction pour effectuer les opérations sur le produit. L'objectif étant de réaliser le projet dans un délai optimal, la difficulté dans ce cas consiste à coordonner simultanément les tâches avec les moyens à mettre en œuvre en planifiant la succession des différentes opérations. Les méthodes de modélisation les plus répandues sont le diagramme de Gantt, les méthodes des potentiels [HAR95] et PERT [BAV02].

- **Système de production en petite ou moyenne série ou atelier** : il s'agit ici de produire une grande variété de produits en faible quantité, tout en utilisant les mêmes moyens de production. Dans cette organisation, les équipements sont regroupés par fonctionnalité équivalente dans un ensemble d'ateliers spécialisés. Une classification des ateliers peut s'opérer selon l'ordre d'utilisation des machines pour fabriquer un produit (gamme de fabrication). On rencontre des ateliers à cheminement unique (*flowshop*) où toutes les gammes sont identiques, des ateliers à cheminements multiples où chaque produit ou famille de produits possède (*jobshop*) ou ne possède pas (*openshop*) une gamme spécifique.
- **Système de production en grande série ou de masse** : la production de masse s'appuie sur la fabrication de produits standards à grande consommation. Dans un tel système organisé en ligne de fabrication, les produits passent successivement et dans le même ordre par une séquence identique de postes de travail. Les équipements qui sont dans ce cas spécialisés, sont agencés de manière à assurer un flux continu de produits sur toutes les lignes.
- **Système de production continue ou processus** : ce mode de production concerne les systèmes où la matière circule en flux continu ; peu de produits sont fabriqués, mais en quantité très importante. Cela nécessite de grands investissements en équipements et peu de main d'œuvre. Dans ce type d'organisation, la disponibilité des équipements au cours de la production est très importante ainsi qu'un niveau de stock d'encours quasiment nul.

1.3 Critères d'évaluation d'un système de production

Les systèmes de production devenant de plus en plus complexes suite à une grande flexibilité et un fort degré d'automatisation, leur conception et leur exploitation nécessitent des techniques d'évaluation basées sur deux principaux critères : la performance et la sûreté de fonctionnement.

1.3.1 La performance des systèmes de production

L'origine du mot « performance » vient du verbe anglais « *to perform* » issu du vieux français « parformer » qui signifie accomplir. En effet, la performance d'un système est définie comme étant l'efficacité à fournir un service attendu à un instant donné et dans des conditions prédéterminées. Dans le domaine industriel, Tarondeau [TAR96] définit la performance comme étant un attribut mesurable et observable par lequel se définit la qualité d'un produit ou la rapidité d'un service. Elle est liée à tout le cycle de vie du système de production, à sa

productivité, aux stocks et encours, aux coûts de production, aux délais de livraison, à la qualité du produit, etc.

Dans une autre définition, Gibert [GIB80] positionne la performance au centre du triangle regroupant les notions d'efficacité, d'efficacités et de pertinence (figure 1.2). Ces notions pouvant se définir dans : objectifs, moyens, résultats

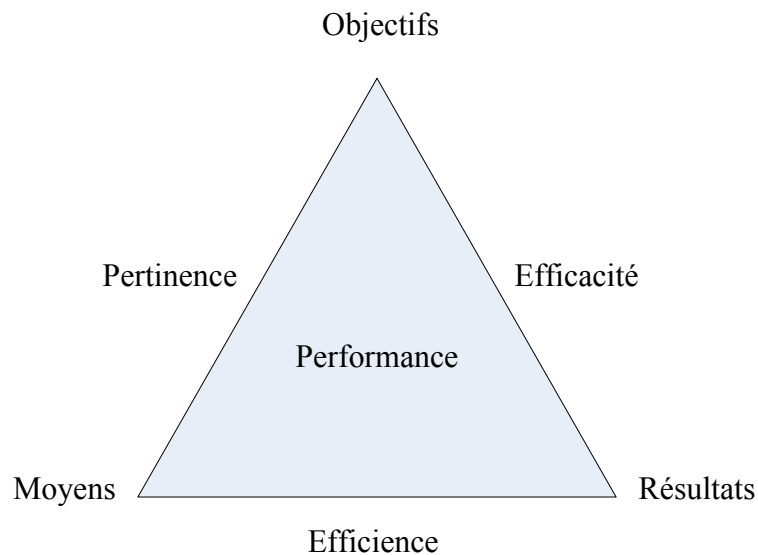


Figure 1.2 : Triangle de la performance [GIB80].

La définition des axes du triangle de la performance est exprimée selon Gibert [GIB80] comme suit (ce qui est entre guillemets est intégralement pris de la référence [GIB80]) :

- **L'axe objectifs-résultats** : « définit l'efficacité comme l'écart entre les objectifs à atteindre et les résultats obtenus c'est-à-dire atteindre le but visé et à quel point l'objectif fixé est atteint ». Si l'efficacité d'un système est non performante, on doit agir sur l'organisation interne du système ou le système de pilotage. À titre d'exemple, en fixant pour un système de production des pièces un objectif de 100 pièces/minute et qu'en réalité ce dernier produit 60 pièces/minute alors ce système n'est pas efficace.
- **L'axe moyens-objectifs** : « définit la pertinence comme le rapport entre les moyens déployés et les objectifs à atteindre. Son évaluation répond à la question suivante : les moyens mis en œuvre correspondent-ils aux objectifs ? La réponse à cette question est fondamentale en phase de conception du système de production, car la pertinence permet d'éviter le surdimensionnement coûteux et la mise en place des moyens suffisants pour atteindre un niveau de satisfaction fixé ». Par exemple, si notre système de production des pièces est équipé de deux machines d'emballage d'une capacité de 20 pièces/minute

chacune et que l'objectif de production est fixé à 100 pièces/minute, alors ce système n'est pas pertinent.

- **L'axe résultats-moyens** : « définit l'efficacité comme le rapport entre l'effort produit et les moyens totaux déployés dans une activité. L'efficacité mesure le rendement du système en comparant les moyens mis en œuvre et les résultats obtenus. Cela nous amène à s'interroger : est-ce que les résultats sont suffisants compte tenu des moyens mis en œuvre ? L'efficacité représente la différence entre les capacités d'un système et les résultats réellement obtenus ». Par exemple, si une ligne de production comporte cinq machines capables de produire 900 pièces/minute, la production réelle étant égale à 600 pièces/minute, on déduit qu'il y a un problème d'efficacité dans notre ligne.

De nos jours l'entreprise regroupe différentes activités et il est donc nécessaire de toutes les évaluer afin d'obtenir la performance globale du système. En effet la performance peut être **qualitative** (image de l'entreprise) et **quantitative** (Rentabilité, Délais, Coûts de production). Gratiser et al. [GAR04] proposent d'élargir le triangle de Gibert à l'ensemble des activités de l'organisation s'inscrivant dans une cohérence globale (triptyque : finalités, culture, structure) (figure 1.3).

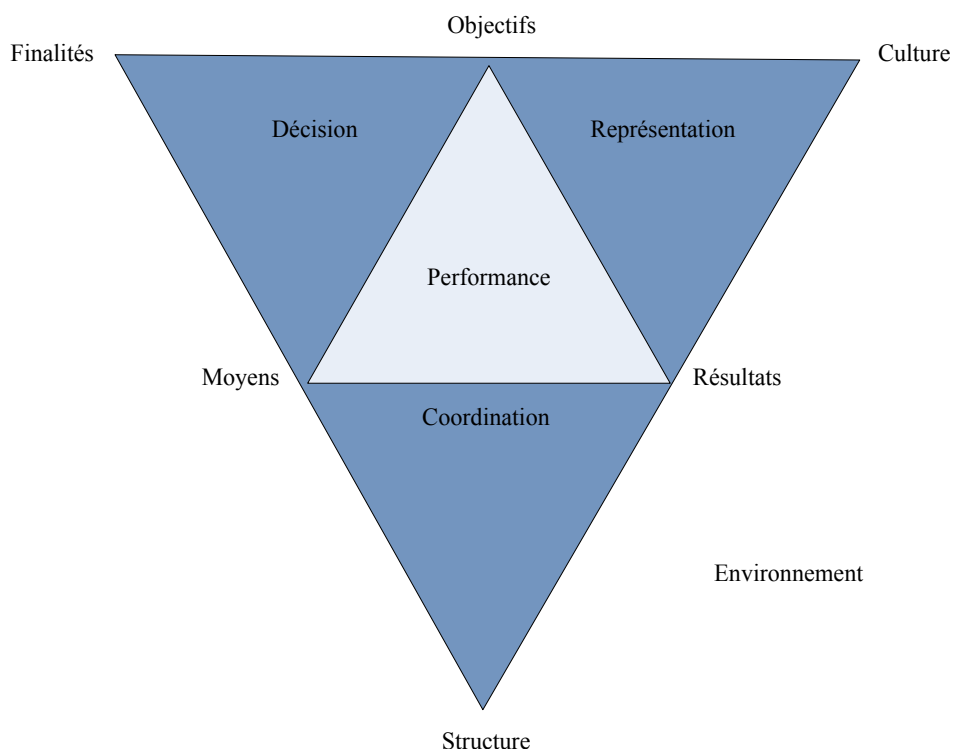


Figure 1.3 : Politique générale de l'entreprise [GAR04].

En effet,

- Les objectifs et les résultats dépendent de l'ensemble des valeurs partagées (culture d'entreprise) ;
- Les moyens et les résultats des activités dépendent de la structure de l'organisation ;
- Les objectifs et les moyens doivent être décidés en cohérence avec les finalités.

Ainsi, toutes les activités de l'entreprise évaluent dans un tel système.

Il est primordial d'évaluer la performance d'un système de production au niveau global et bien sûr, au niveau des actifs. Quelle que soit la vision de la performance que l'on veut analyser, des unités de mesure sont nécessaires pour bien définir, suivre et évaluer la performance. Différents moyens ou méthodes sont appliqués pour évaluer les différentes performances [ECO99] comme :

- **Point de vue global (ou de l'entreprise) :** une évaluation économique via la comptabilité d'activité (chiffres d'affaires, rapports financiers, etc.) ;
- **Point de vue des activités :** une évaluation physique via des indicateurs de performance :
 - Activité de production : Taux de Rendement Synthétique (TRS). Il nous permet de calculer le taux de rebuts, le rendement, la qualité, etc.
 - Activités marketing ou commerciales : part de marché, ratio de bilan, besoins en fonds de roulement, capacités d'autofinancement, etc.
 - Activité service après-vente : nombre de retours, nombre de réclamations clients, etc.

L'indicateur de l'efficacité décrit dans le triangle de Gibert est lié au suivi de la production.

Selon la référence [ECO99] : « Il sous-entend plusieurs notions : une notion de cadence et une notion de disponibilité ». À ce moment, l'efficacité peut être considérée comme une combinaison d'indicateurs tel le TRS qui comporte les notions de qualité d'utilisation et de disponibilité.

1.3.2 La sûreté de fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) permet d'établir le degré de fonctionnement que l'on peut attribuer à un système dans le cadre de la mission qu'il doit remplir. Dans le domaine de la production manufacturière, la sûreté de fonctionnement consiste à assurer le respect du cahier des charges en matière de productivité, en tenant compte des perturbations (défaillances, aléas, etc.) affectant un atelier, en limitant les coûts de conception et de fonctionnement et en assurant une qualité et une disponibilité maximale. Elle est liée à tout le cycle de vie du système de production, à sa disponibilité, à la fiabilité et à la maintenabilité de ses machines,

etc. Elle consiste à connaître, détecter, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des machines [ZWI96].

Selon Laprie et Al [LAP95], la sûreté de fonctionnement d'un système est la priorité qui permet à ses utilisateurs d'avoir confiance dans le service qu'il leur délivre. Selon Francastel [FRA01] la SdF est « un ensemble d'aptitudes nécessaires à un bien à être disponible aux différents moments de son cycle de vie, en offrant les performances requises, soit : fiabilité (ou probabilité pour que le bien accomplisse sa fonction), maintenabilité (ou aptitude à être maintenu) et sécurité pour les biens eux-mêmes, le personnel et leur environnement ».

La relation entre les attributs de la SdF (figure 1.4) est exprimée selon Cauffriez et Al [CAU04] comme suit :

- Une mauvaise fiabilité d'un système peut conduire à une mauvaise disponibilité en cas de nombreuses défaillances, mais peut également agir sur la sécurité puisque l'occurrence d'un accident est souvent associée à une défaillance ;
- Une maintenabilité insuffisante dans les systèmes réparables peut compromettre la disponibilité d'un système (augmentation du nombre de défaillances), mais aussi sa sécurité (augmentation de l'exposition au risque d'accidents en opération de maintenance) ;
- Un système peut être fiable et maintenable sans nécessairement être sécuritaire.

La sécurité (à l'inverse de la disponibilité) ne dépend pas entièrement de la maintenabilité et de la fiabilité. Les contraintes liées à la sécurité ont une influence souvent négative sur la disponibilité.

Les moyens et les méthodes d'analyse de la SdF reposent sur la prévention, la tolérance, la prévision et l'élimination au mieux des défaillances. L'intégration de la maintenance est primordiale pour l'amélioration de la SdF et l'augmentation de la performance des systèmes de production.

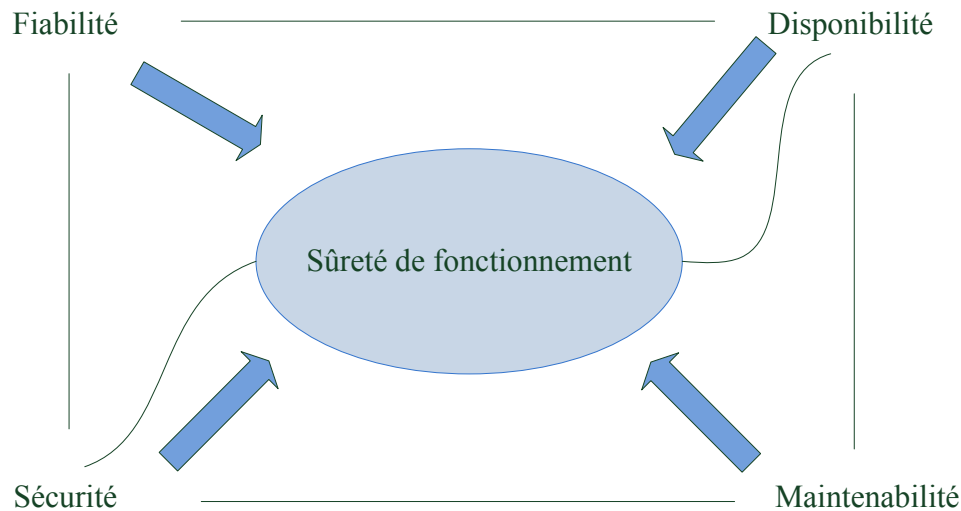


Figure 1.4 : Relation entre les attributs de sûreté de fonctionnement [CAU04].

La définition des attributs de sûreté de fonctionnement est exprimée selon la norme *Afnor* [AFN01] comme suit :

- **La disponibilité** : est « une aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires est assurée. Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la supportabilité de la maintenance » [AFN01].
- **La fiabilité** : est « une aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné » [AFN01].
- **Maintenabilité** : est « dans des conditions données d'utilisation, une aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits » [AFN01].
- **La sécurité** : est « l'aptitude à prévenir l'occurrence de conséquences catastrophiques pour l'environnement » [AFN01].

Dans le domaine de la sécurité relative aux machines, celle-ci est définie comme « l'aptitude d'une machine à accomplir sa fonction, à être transportée, installée, mise au point, entretenue, démontée et mise au rebut dans les conditions d'utilisation normale spécifiées dans la notion d'instruction sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé » [EN292, 97].

Le rôle de la SdF consiste à identifier les dysfonctionnements, à les prévenir, à réduire leur impact s'ils se produisent et à financer leurs conséquences éventuelles [NIE92].

En résumé, l'évaluation et l'analyse de la sûreté de fonctionnement reposent sur quatre éléments clés : la prévention, la tolérance, la prévision et l'élimination au mieux des défaillances. L'intégration de la maintenance est primordiale pour l'amélioration de la sûreté de fonctionnement ainsi que pour l'augmentation de la performance des systèmes de production.

1.4 Objectif et apports du mémoire

Dans la section précédente, nous avons présenté, de manière générale, les systèmes de production au niveau fonctionnel ainsi que les techniques d'évaluation retenues dans la littérature. Nous avons énoncé un indicateur de performance clé (TRS) qui est devenu, au travers de la norme NFE 60-182, un indicateur qui mesure à la fois la performance et les plans d'actions pour l'amélioration de la productivité (pilotage des systèmes de production). Finalement nous avons discuté des principales notions qui caractérisent la sûreté de fonctionnement afin de démontrer l'intérêt primordial de la disponibilité et la maintenabilité des équipements.

L'objectif de ce mémoire est de mesurer et d'analyser la performance de la ligne de rabotage de bois qui compte trois unités (Décanteur, Raboteuse, Trieur). Pour ce faire, il faut passer par un processus d'analyse et l'identification des causes spécifiques de la dégradation de performance du procédé.

Le processus de résolution de problèmes adopté dans notre étude est inspiré de la démarche DMAIC (**D**éfinir, **M**esurer, **A**nalyser, **I**nnover, **C**ontrôler) de Six Sigma (figure 1.5).

En effet, la démarche DMAIC de Six Sigma agit, avec sa boîte à outils, comme un filtre qui permet de passer d'un problème complexe ayant de nombreuses variables non maîtrisées à une situation simple où les mauvais acteurs sont identifiés et mesurables.

La mise en place de notre processus de résolution de problèmes (Chapitre 4) est effectuée en cinq étapes principales regroupées sous les initiales DMAIC. Ces étapes sont présentées comme suit :

D pour **D**éfinir. Cette étape permet de définir les paramètres du processus à améliorer, ce qui consiste à identifier le processus qui va faire l'objet de l'étude et de cartographier les flux de matière et d'information à l'aide du processus SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers).

M pour **M**esurer. Cette étape est divisée en deux parties. La première consiste à détailler la cartographie du processus en faisant appel à la norme **ANSI/ISA-88** tandis que la deuxième

porte sur l'analyse préliminaire des données de production afin de quantifier le problème de non-performance de la ligne de production. La collecte de ces données est assurée par un ensemble de capteurs installés sur les équipements de production. L'information collectée par ces capteurs est acheminée vers un automate programmable et sauvegardée sous forme de rapport de production.

A pour **Analyser**. Cette étape est consacrée à l'analyse des données de production en faisant appel à la norme **AFNOR NFE 60-182** qui permet d'évaluer un indicateur majeur de performance, le Taux de Rendement Synthétique (TRS). Introduit par la TPM (Total Productive Maintenance), ce dernier permet de mesurer l'importance des fluctuations aléatoires (arrêts, non-qualité, ralentissements) sur l'efficacité des équipements de la ligne de production et en particulier sur les équipements goulots.

I pour **Innover**. Cette étape consiste à identifier les plans d'amélioration de la performance à partir de l'analyse statistique.

C pour **Contrôler**. Cette étape consiste à vérifier les améliorations en calculant les nouveaux indicateurs permettant de mesurer la performance du processus après la mise en œuvre des améliorations.

Dans la suite de ce mémoire les phases « **Innover** » et « **Contrôler** » sont présentées sous forme de synthèse de l'analyse suivie des recommandations pour l'amélioration de la performance du procédé de rabotage.

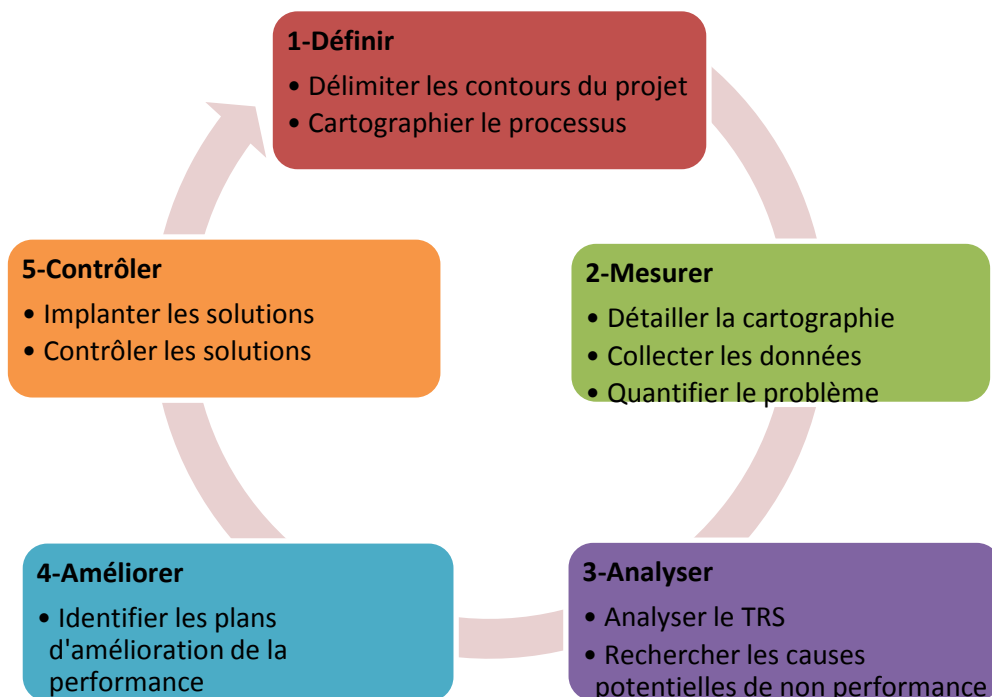


Figure 1.5 : Processus de résolution de problèmes (inspiré de la démarche DMAIC [CHO04]).

Nous allons donc présenter, de manière générale, l'industrie de la première transformation du bois. Nous évoquerons le rôle important du rabotage, la problématique qui affecte le procédé ainsi qu'une description détaillée des unités qui assurent le déroulement de l'opération de rabotage.

1.5 L'industrie de la première transformation du bois

Le bois est un matériau très spécifique. Tout d'abord, il est à l'origine de l'évolution de l'homme. Depuis toujours, nous avons eu besoin du bois pour évoluer. « Il est le premier combustible utilisé par l'homme, mais il est aussi le premier outil de l'humanité ». Le bois est un matériau naturel utilisable sans transformation. En effet, contrairement aux autres matériaux, il ne nécessite pas d'opérations complexes pour être mis en œuvre. La formation du bois est, à l'échelle de la planète, très rapide. Il fait partie intégrante de notre patrimoine commun, quelle que soit la localisation géographique et quelle que soit la culture, le bois est présent dans notre environnement. Il assure un sentiment de bien-être et de chaleur pour la majorité des hommes. Pour toutes ces raisons et d'autres encore, nous avons besoin du bois et nous cherchons à mieux le connaître depuis toujours.

Si, pour la plupart des gens, le bois est utile, beau et réconfortant, ceux qui cherchent à l'étudier ou à l'usiner ont un regard complémentaire. En effet, le bois est un matériau naturel, ce qui lui confère son extrême complexité et son hétérogénéité. Le bois est «**anisotrope**», ce qui signifie qu'il n'a pas les mêmes propriétés mécaniques selon le sens dans lequel on le sollicite.

Parallèlement le procédé de transformation de bois d'œuvre tel que le sciage et le rabotage sont des procédés «**divergents**» ; les procédés consomment un produit ayant une dimension spécifique et génèrent simultanément plusieurs produits de différentes dimensions et longueur.

Plusieurs étapes successives et importantes sont nécessaires à la transformation du bois (figure 1.6).

Le procédé de transformation comprend deux grandes industries : l'industrie de la première transformation et l'industrie de la seconde transformation.

La première transformation comprend la collecte du bois, le sciage, le séchage et le rabotage. La deuxième transformation est un ensemble d'activités très diverses où l'on distingue plusieurs domaines de production comme l'ameublement et l'industrie des pâtes et papier.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à l'industrie de la première transformation du bois et plus précisément au procédé de rabotage.

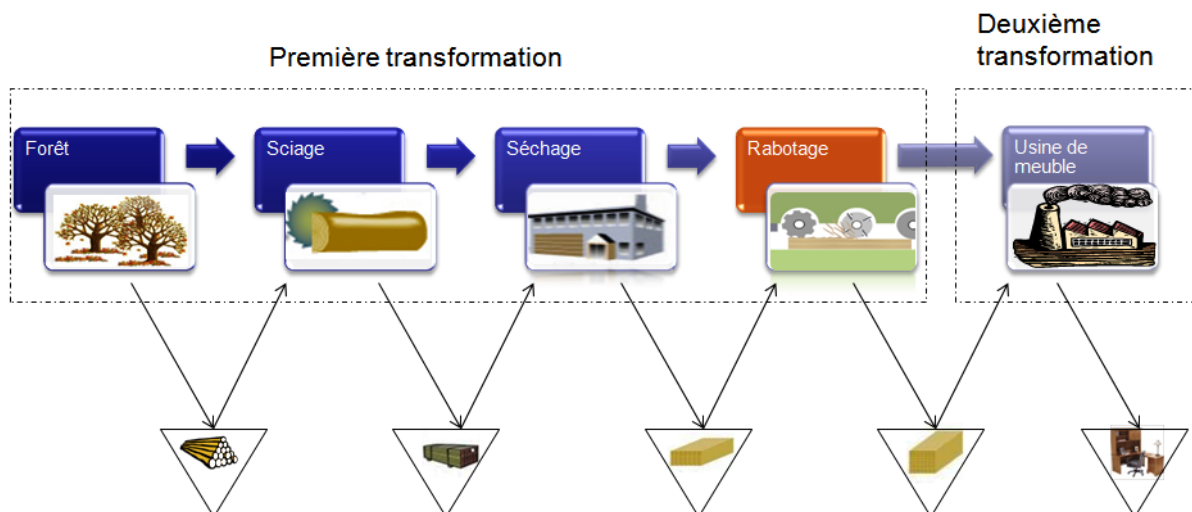


Figure 1.6 : Procédé de transformation du bois.

Plusieurs étapes successives et importantes sont nécessaires à la première transformation.

- L'arrivée du bois à l'usine et le sciage

Dans un premier temps et après la collecte et l'entreposage des billes de bois dans des parcs de stockage, l'opération de transformation commence par le conditionnement des billes dans des bassins de trempage à température contrôlée afin de faciliter l'opération d'écorçage. Une fois le trempage réalisé, les billes sont dirigées vers une écorceuse. Il s'agit d'une machine rotative munie de couteaux actionnés par de puissants moteurs qui enlèvent l'écorce des billes. Elles sont ensuite transportées sur un convoyeur et examinées par un lecteur optique qui relève plusieurs paramètres, dont la longueur, le diamètre et la forme.

Ces paramètres sont alors transmis à un ordinateur qui effectue les calculs nécessaires. Les paramètres analysés sont enfin pris en considération quant à la valeur des produits, les volumes, les règles de classification et ce, afin d'optimiser chaque bille et la diriger vers la ligne de sciage appropriée.

Une fois les billes dirigées vers la ligne de sciage appropriée, elles sont sciées selon le patron de coupe retenu. Ce processus actionne plusieurs scies et couteaux qui sont contrôlés par des ordinateurs et des lecteurs optiques. Les variations quant aux dimensions des bois sciés sont vérifiées au millième de centimètre, afin de réduire au maximum les résidus de coupe et d'offrir une grande variété de produits (figure 1.7).

À la fin de ce procédé, on obtient des pièces de bois de différentes largeurs et longueurs qui ont une teneur élevée en humidité. L'étape suivante est le séchage des lamelles de bois produites par le procédé de sciage.

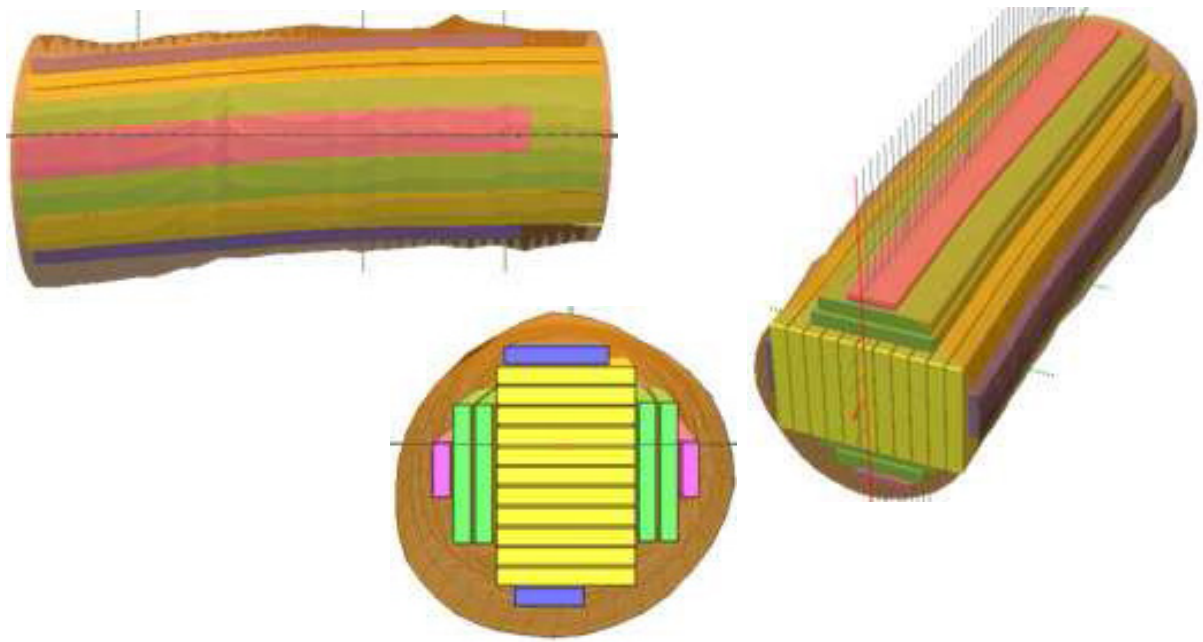


Figure 1.7 : Optimisation de la découpe d'un billot (lecteur optique).

- Le séchage

Le procédé de séchage a pour objectif de diminuer la teneur en humidité afin d'assurer la stabilité dimensionnelle, d'améliorer les propriétés mécaniques et également de répondre aux normes de bois traité à la chaleur exigées par les marchés d'exportation. Par la suite et tel que présenté à la figure 1.6, le bois est acheminé au rabotage où la finition et la classification sont réalisées.

- Le rabotage

Le rabotage est, après le séchage, un des plus importants procédés d'usinage du bois [CAN 67] ; [WIL98]. Il sert à uniformiser les dimensions du bois suite au séchage et représente la dernière étape de transformation avant la commercialisation. Ce procédé permet d'amener les pièces à l'étape finale ainsi qu'à préparer les surfaces du bois. Le rabotage est produit par le mouvement perpendiculaire de l'arête tranchante des couteaux disposés sur la périphérie de l'outil rotatif de la raboteuse (figure 1.8).

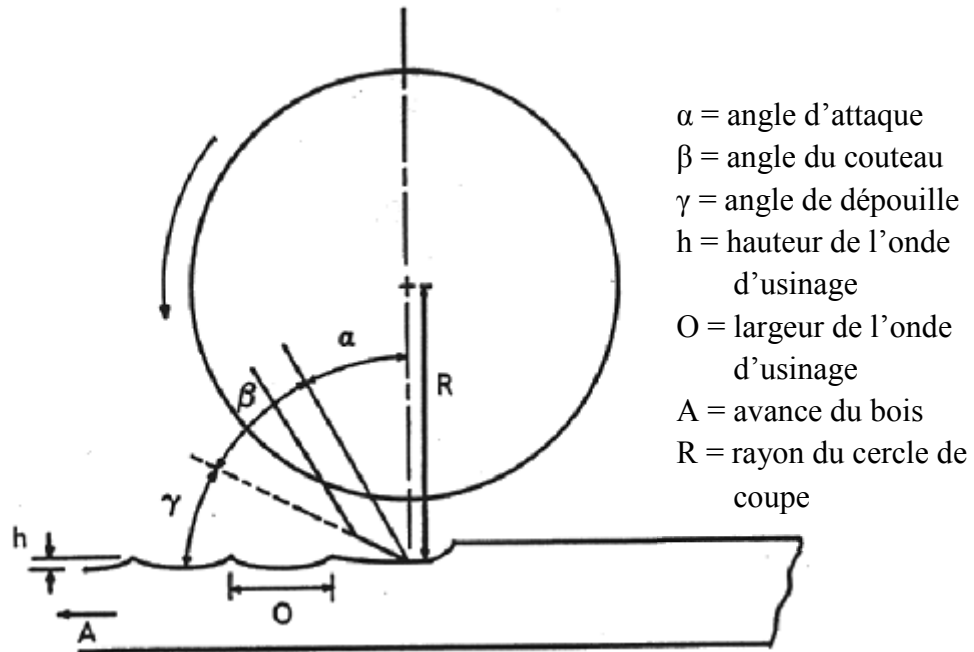


Figure 1.8 : Schéma illustrant la coupe périphérique et les composantes de la force de coupe résultante [WEN88].

1.5.1 Problématique

La productivité dans une usine de rabotage est affectée par plusieurs contraintes, parmi ces derniers les arrêts causés par le coincement des pièces de bois dans les machines. L'effort de coupe représente une cause potentielle à l'origine du coincement.

En effet, durant la coupe, l'outil va venir frotter contre le bois ce qui provoquera un phénomène de choc dont la force dépend de l'état de l'outil de coupe et du taux d'humidité de la pièce ainsi que de sa forme. La force de coupe peut causer des dommages significatifs sur la pièce de bois ce qui provoque l'arrêt de la machine.

Du fait que, dans une usine de rabotage, les machines sont placées en série, le bris d'un outil n'a pas pour effet l'arrêt d'une seule machine mais de toute la ligne de rabotage.

Dans plusieurs usines de rabotage, les outils de coupe sont changés une fois qu'ils sont vraiment usés, car il n'y a pas de contrôles en ligne du niveau d'usure d'un outil. Les employés de ces usines changent l'outil une fois les dégâts constatés au niveau de la qualité de rabotage.

Un outil usé génère des pièces de qualité non conforme. S'il s'agit d'un outil en fin ou au début d'une ligne de production, cela signifie que les opérations antérieures ont coûté du temps et de l'argent à l'entreprise et le gain potentiellement réalisable sur cette pièce sera nul ou difficilement récupérable (déclassement des pièces).

De même le procédé de rabotage est un procédé divergent ; il consomme des paquets de bois séché et il génère comme produit fini des pièces de bois de différentes longueurs et dimensions. La performance de la ligne de rabotage est ainsi affectée par les recettes de production, cette problématique est à l'origine des goulots d'étranglement.

À cet effet, l'entreprise a besoin d'un outil d'aide à la décision pour cibler les mauvais acteurs à l'origine des pertes, voire implémenter des stratégies d'amélioration continue de la performance pour atteindre ses objectifs.

Il est en effet aussi inconcevable de piloter efficacement sa voiture sans tableau de bord (ensemble d'indicateurs : compteur de vitesse, compteur kilométrique, niveau de carburant, etc.) que de gérer correctement un processus sans :

- Mesurer ses performances,
- Suivre l'évolution de ses performances,
- Comparer ses performances à l'objectif fixé.

Ainsi, lorsqu'un indicateur révèle un écart entre les performances réalisées et les performances attendues, il est possible de déclencher une action, voire prendre des mesures correctives afin d'améliorer le taux de production (**Throughput**) sur toute la ligne de rabotage.

1.5.2 Description du procédé de rabotage

Le procédé de rabotage est un système de production en série. Les unités de production sont interconnectées par des convoyeurs qui assurent le transport de la matière entre les unités de production (figure 1.9). Le système de rabotage est caractérisé par la nature discrète du processus. Au cours de la production, les produits sont classés en séries de fabrication sur la base de matières premières. Une quantité de produits spécifique se déplace, en tant qu'unité (paquet de pièces), entre les unités de travail et chaque pièce a son identité propre.

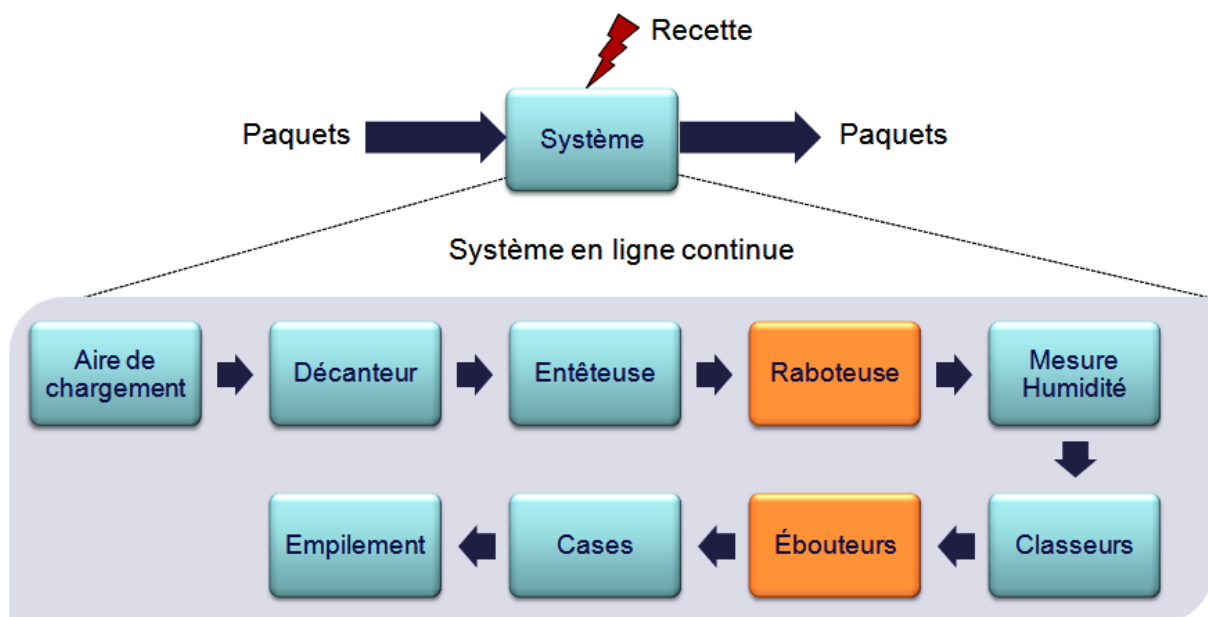


Figure 1.9 : Le procédé de rabotage de bois.

La production s'appuie sur la fabrication de produits standards à grande consommation. Les produits passent successivement, et ce, dans le même ordre par une séquence identique de postes de travail. Les équipements sont agencés de manière à assurer un flux continu de produits sur toute la ligne.

Le système de production est exploité selon des recettes. La recette représente le mode opératoire de fabrication ; elle définit l'ensemble des règles qui permettent de produire une série de produits bien spécifiques et est composée de quatre éléments :

- Entête : planification de la production (ex : produire une série de X paquets de pièces de dimension 2" x 4" x 14', .etc.) ;
- Procédure : les séquences de production ;
- Formule : paramètres d'entrées et de sorties du procédé ;
- Exigences équipements.

Le système physique de production d'une usine de rabotage comporte plusieurs opérations (figure 1.9) et la productivité de la ligne dépend de la performance de ses équipements. La production se déroule comme suit :

- Aire de chargement et décanteur

Après le séchage, les paquets de bois sont transportés à l'usine de rabotage, ils sont chargés dans un convoyeur qui alimente le décanteur ; l'opération est réalisée à l'aide d'un chariot élévateur. Le décanteur fait glisser les rangs de planches un par un sur un convoyeur et ce dernier achemine les pièces de bois vers une entêteuse.



Photo 1 : Décanteur

- Entêteuse

L'entêteuse est une machine rotative équipée de deux cylindres menés chacun par une poulie. L'entêteuse alimente la raboteuse avec les pièces de bois transportées par le convoyeur.

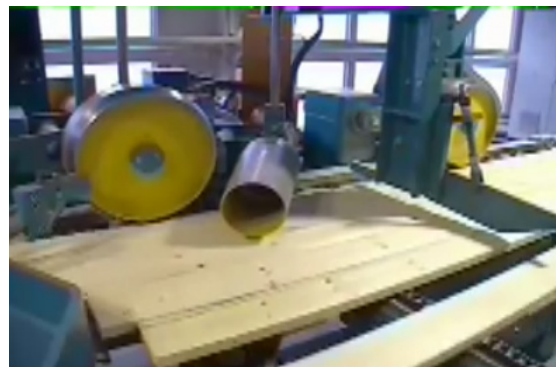


Photo 2 : Entêteuse

- Raboteuse et mesure d'humidité

La raboteuse sert ensuite à usiner les pièces de bois et elle est équipée d'un ensemble de couteaux rotatifs. L'opération de rabotage travaille les faces des pièces. Suite à cette opération, une lecture d'humidité est prise à l'aide d'un scanneur installé sur la ligne du convoyeur qui transporte les pièces rabotées vers le classeur. Ce dernier permet d'identifier le taux d'humidité de chaque pièce.



Photo 3 : Raboteuse

- Classeurs

La classification du bois est une étape cruciale après le rabotage car elle affecte directement les profits générés. Cette opération est semi-automatique et elle dépend de la performance des opérateurs ainsi que de leurs qualifications. Durant cette opération, l'opérateur inspecte les pièces de bois rabotées et décide de la longueur de coupe selon les défauts de la pièce.



Photo 4 : Classeurs

- Ébouteurs

Après l'opération de classement, les pièces sont acheminées vers l'ébouteur qui sert à enlever la partie de la non-qualité décidée par le classeur à l'aide d'une machine automatique munie d'un ensemble de scies rotatives. Suite à cette opération, les pièces sont uniformisées selon des standards commerciaux et acheminées vers des cases.

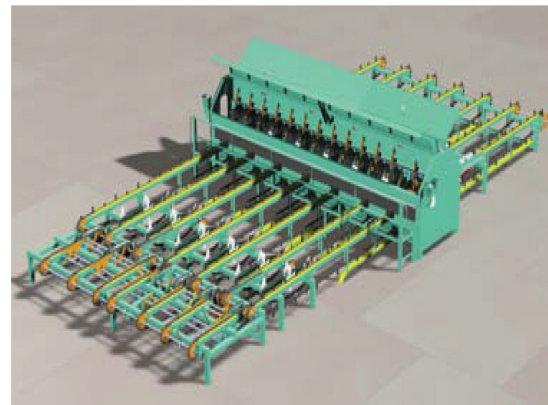


Photo 5 : Ébouteurs

- Cases et empilement

Les cases servent à stocker les pièces usinées par grade et par longueur afin de faciliter l'opération d'empilement. Le classement se fait automatiquement dans les cases et chaque case compte le nombre de pièces nécessaires pour empiler un paquet de bois fini. À la fin les paquets sont empilés automatiquement par des empileuses et envoyés à la commercialisation.



Photo 6 : Cases

Avec un tel système de production aménagé en ligne, on peut affirmer que pour augmenter la productivité on doit :

- Équilibrer la matière au niveau de la chaîne pour garder un flux continu. Il faut donc que chaque unité ait une tâche dont la durée soit sensiblement égale à celles des autres unités. La difficulté réside dans le découpage du processus de fabrication en sous-ensembles de durée égale sans perturber le processus.
- Le deuxième point consiste à améliorer la disponibilité des unités de travail. Ceci est primordial puisque dans une ligne de production une panne provoque l'arrêt de toute la ligne.

1.6 Contenu du mémoire

Ce mémoire est divisé comme suit :

Le **Chapitre 2** présente des généralités sur les lignes de production, leur conduite et leur classification, ainsi que des solutions aux problèmes d'opération des lignes de transfert qui font l'objet de notre étude.

Le **Chapitre 3** constitue une revue de la littérature sur les outils et les méthodes pertinents pour l'amélioration continue de la performance des lignes de production.

Dans le **Chapitre 4** nous allons présenter, en détail, le processus de résolution de problèmes adopté dans notre étude (DMAIC). À l'évidence, nous allons analyser la performance et identifier voire caractériser les facteurs qui influencent la productivité dans l'usine de rabotage.

Le **Chapitre 5** constitue une synthèse de notre étude, ainsi que des recommandations pour l'amélioration de la performance de l'industrie de rabotage.

Chapitre 2 - Généralités sur les lignes de production

Comme le système industriel étudié est une ligne de production, ce chapitre présente des généralités sur les lignes de production, leur conduite et leur classification, ainsi que des solutions aux problèmes d'opération des lignes de transfert qui font l'objet de notre étude.

2.1 Introduction

Depuis que Henry Ford obtient des gains spectaculaires en économie et en productivité après l'introduction des courroies sur les lignes d'assemblage dans la production des automobiles en 1913, il ne fait aucun doute que les lignes de production représentent l'organisation idéale d'une production ayant un volume suffisant pour justifier l'investissement de machines et d'outillages appropriés.

Au début, les lignes de production ont été largement utilisées dans les opérations d'assemblage réalisées par des opérateurs humains où les machines et les outils étaient relativement simples.

Quand un grand investissement dans les machines est demandé, comme les opérations de façonnage et de découpage des matériaux, il est difficile de travailler avec des opérateurs humains et des outils simples, surtout si un grand volume de production est exigé ; d'où la nécessité d'investir dans des systèmes de production hautement automatisés. Avec cette automatisation est née une nouvelle génération de lignes de production appelées lignes de transfert ou lignes automatisées comme c'est le cas dans l'industrie du rabotage.

Nous allons présenter, dans ce chapitre, les deux modèles de lignes les plus utilisés dans les systèmes de production à savoir les lignes de flux et les lignes de transfert.

2.2 Définitions des lignes de production

Les lignes de production constituent un système de production avec une structure spéciale. C'est un réseau linéaire de stations de travail ou de machines (M_1, M_2, \dots, M_k) séparées par des stocks tampons (B_1, B_2, \dots, B_{k-1}). Les produits circulent dans le système à partir de M_1 , ensuite B_1, M_2 et ainsi de suite jusqu'à atteindre M_k qu'ils vont quitter par la suite.

La figure qui suit montre bien le système : les carrés représentent les machines et les cercles représentent les stocks tampons.



Figure 2.1 : Ligne de production.

Si la conduite de la machine est parfaitement prévisible et régulière, on n'aura plus besoin des stocks tampons. Or, toute machine est susceptible de tomber en panne. Cette irrégularité a le potentiel de troubler le travail des machines adjacentes et des autres machines aussi, et les stocks tampons sont utilisés pour réduire ces effets.

Quand une machine tombe en panne ou quand elle prend un temps exponentiel pour terminer sa tâche, le niveau du stock tampon de la machine précédente augmente. Si l'arrêt dure assez longtemps et que le stock se sature, la machine précédente sera obligée de s'arrêter. Dans ce cas on dit que la machine est bloquée. De même si le niveau de stock de la machine en panne diminue jusqu'à ce qu'il s'anéantisse, la machine suivante sera obligée de s'arrêter. Dans ce cas on dit que la machine est affamée. Bien que les stocks tampons réduisent beaucoup l'effet des pannes sur les lignes de production, les encours (WIP : *Work In Process*) demeurent indésirables pour les raisons suivantes :

- La création de stocks tampons peut s'avérer coûteuse et en plus les pièces qui y sont stockées ne génèrent pas de revenus ;
- Les inventaires dans une usine sont exposés au risque d'être endommagés (dû aux outillages ou au sol lui-même) et plus il y a d'items, plus ils deviennent vulnérables avec le temps ;
- L'espace requis et les systèmes de manutention utilisés peuvent parfois être très coûteux.

Les pannes surgissent de manière imprévisible. Dans la littérature on trouve beaucoup de modèles aléatoires sur les pannes des machines.

En général on peut distinguer deux types de modèles : panne dépendante du temps (TDF : Time Dependent Failure) et panne dépendante des opérations (ODF : Operation Dependent Failure).

D'après Buzacott et Hanifin [BUZ68], les deux peuvent être aléatoires ou déterministes mais le premier (TDF) dépend seulement de la période de temps depuis la dernière réparation, alors que le deuxième (ODF) dépend seulement du nombre d'opérations qui ont été réalisées depuis la dernière réparation.

2.3 Conduite des lignes de production

Il y a deux facteurs qui limitent la productivité des lignes de production :

- Elles ne peuvent pas travailler avec un taux supérieur à celui de la machine la plus lente appelée machine goulot ;
- Elles sont limitées par la variabilité et le manque de synchronisation des opérations.

Les seuls moyens pour augmenter le taux de production sont :

- Augmenter le taux de production de la machine goulot ;
- Réduire la fréquence et la durée des événements asynchrones.

2.4 Classification des lignes de production

Selon Buzacott [BUZ93], les lignes de production peuvent être divisées en deux grandes classes : les lignes de flux et les lignes de transfert.

2.4.1 Les lignes de flux (flow lines)

Lors de l'invention des lignes de production par Henry Ford, ces dernières étaient largement utilisées dans les opérations d'assemblage d'automobiles. Ces opérations étaient réalisées par des opérateurs humains avec de l'outillage et des machines simples.

Les lignes de flux elles-mêmes sont classifiées selon le temps de traitement et les mouvements des pièces.

- **Ligne à durée de traitement limitée (Paced)** : dans ce cas le temps alloué à l'opérateur pour achever une opération est limité. Une fois cette durée dépassée l'opérateur ne peut plus continuer l'opération même si elle n'est pas achevée.
- **Les lignes à durée de traitement illimité (Unpaced)** : dans cette configuration il n'y a pas de temps limite imposé à l'opérateur pendant lequel il doit achever sa tâche. Le mouvement des pièces d'un poste au suivant peut aussi être utilisé comme critère pour diviser les lignes de flux en deux types :
 - **Ligne synchrone (Indexing line)** : Le transfert de la pièce est coordonné pour que les travaux commencent simultanément. Ce mode de transfert maintient fixe le nombre de pièces à traiter, souvent une seule pièce par poste. Les lignes synchrones peuvent être conçues pour le mode à durée de traitement limitée où le temps alloué pour achever une opération est fixe et constant, comme il peut être utilisé aussi pour le mode à durée de traitement illimité où le transfert ne peut commencer qu'après avoir reçu un signal indiquant que toutes les opérations sont terminées sur tous les postes.
 - **Lignes asynchrones** : dans les lignes asynchrones, les opérations des stations adjacentes ne sont pas coordonnées. L'opérateur commence l'opération peu après qu'il soit disponible. Une fois l'opération achevée, la pièce ne peut quitter son poste que s'il y a de l'espace pour la stocker. Dans ce genre de conception, il est possible que l'opérateur ou la station qu'il occupe soit « non alimenté » c'est-à-dire

qu'il n'y a pas de pièce à traiter, comme il peut aussi être bloqué c'est-à-dire que le poste suivant est occupé et/ou qu'il n'y pas d'espace pour stocker la pièce. Pour cela il peut y avoir souvent des accumulations entre les postes de travail. Dans les lignes de flux asynchrones, l'opérateur travaille presque toujours en mode de traitement illimité et c'est donc lui qui décide si le travail est susceptible d'être transféré ou non au poste suivant. Dans ce genre de conception, comme c'est le cas dans l'industrie automobile, on prévoit un système de signalisation qui avertit l'opérateur et son superviseur du dépassement du temps standard de traitement.

2.4.1.1 Problème rencontré dans les lignes de flux

Le but principal des lignes de flux est d'assurer un niveau de qualité et de quantité de produits au moindre coût. Les lignes synchrones ne présentent pas d'inventaire en cours, c'est pour cette raison que le nombre de pièces dans la ligne est fixe, tandis que les autres types de lignes de flux ont un niveau d'inventaire fluctuant entre les stations de travail, c'est pourquoi il faut prévoir plus d'espace pour le stockage.

En étudiant les problèmes des lignes de flux on peut les diviser en trois types.

➤ **Configuration et aménagement** : c'est le genre de problème qu'il faut résoudre avant l'installation de la ligne. On doit d'abord déterminer le nombre de stations de travail à installer tout en tenant compte du problème d'équilibrage des postes, de la variabilité des opérateurs et de la qualité des tâches à exécuter. Durant l'usinage, il y a des pièces non conformes qui doivent être réparées sur de nouveaux postes. Il y a ensuite le problème des systèmes de manutention qui sont critiques puisqu'ils influent sur le mode d'opérations à durée limitée ou non, et si les lignes sont synchrones ou non. Dans le cas d'une ligne asynchrone, il est nécessaire d'allouer la totalité de l'espace disponible pour l'inventaire en cours (stockage tampon). Ceci exige la bonne localisation des stocks, leur capacité ainsi qu'un système de manutention adéquat.

Le degré de parallélisme peut aussi aider à équilibrer les postes. Par exemple si une tâche a un temps de traitement relativement long qui ne peut pas être divisé, la seule solution, dans ce cas, est de créer des postes en parallèle.

L'inspection des produits dans les lignes de flux est inévitable. Pour résoudre ce problème il faut trouver un compromis entre le nombre de postes d'inspection, leur emplacement, leur coût et le coût des pièces défectueuses détectées soit au début, au milieu ou à la fin de la ligne.

- **Setup de la ligne** : les problèmes de setup de la ligne consistent d'abord à déterminer les guides transporteurs qui influent directement sur la performance de la ligne. Vient ensuite l'affectation des tâches aux différentes stations de travail en veillant sur l'équilibrage de la ligne et finalement le niveau d'inspection ou de contrôle en tenant compte du niveau de qualité toléré, les coûts d'inspection ainsi que les coûts de non-qualité.
- **Opération de la ligne** : dans une ligne de flux, il y a beaucoup de facteurs qui peuvent affecter sa performance comme les pannes et le changement d'ouvriers. En effet, tous les ouvriers n'ont pas la même expérience et les mêmes compétences et cela influence la vitesse de la ligne ou le temps de cycle des produits.
- **Commande de la production** : mis à part les contraintes ou les paramètres mentionnés qui affectent la conduite des lignes de flux déjà citées, il y a aussi la commande de la production qui peut se résumer en trois approches :
 - Produire suivant l'ordre de la commande ;
 - Produire à la capacité de la ligne ;
 - Produire pour stocker c'est-à-dire tant qu'il y a de l'espace pour que la production ne s'arrête pas.

2.4.2 Les lignes de transfert ou lignes automatisées

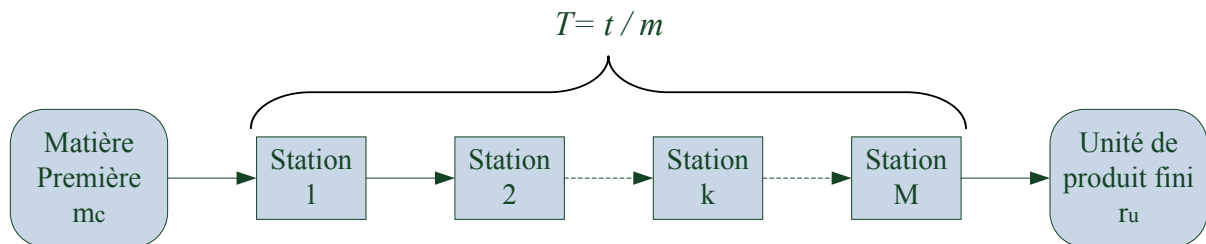
Dans les systèmes de production de type discret comme c'est le cas dans l'industrie du rabotage, la production est assurée par un système de fabrication automatisé nommé ligne de transfert.

Selon S. B. Gershwin [GER94], une ligne de transfert est un système de production avec une structure très spéciale. Elle est composée d'un réseau linéaire de stations (Station1, Station 2, Stations M) comme il est montré dans la figure 2.2. Les matières arrivent de l'extérieur du système sur la station 1, puis la station 2, et ainsi de suite jusqu'à la dernière station où elles quittent le système. Les stations sont composées d'un ensemble de machines comme il peut s'agir d'une seule machine.

Selon J. A. Buzacott et J.G. Shantikumar [BUZ92], la première ligne de transfert est composée de trois machines. Elle a été installée en 1908 pour fabriquer les rails de chemin de fer. Ensuite, dans les années 1920 et 1930 des lignes de transfert de six à huit machines ont été développées. Des lignes de transfert de 60 à 80 machines ont été développées et utilisées dans l'industrie automobile vers les années 1950.

Dans les lignes de production, la ligne de transfert est considérée comme la forme la plus économique d'exploitation des ressources car elle permet une plus grande productivité. Pour

pouvoir l'utiliser, il faut avoir des produits homogènes ou un seul type fabriqué en grand volume. Elle est donc utilisée pour une production de masse : une grande quantité d'un même type de produit fini est usinée en suivant les mêmes séquences d'opérations sur des machines disposées en série. Elle convient à un écoulement régulier des encours avec un temps de cycle court. Dans la suite de notre étude, on s'intéresse à ce type de ligne, car elle caractérise la ligne de rabotage.



m_c : Coût de la matière première.

r_u : Prix de vente.

Figure 2.2 : Schéma de flux dans une ligne de transfert.

Durant le cycle de production, chaque station doit effectuer un ensemble d'opérations données et, quand c'est fait, la pièce est transférée à la station suivante et le cycle suivant commence. Le produit fini est déchargé à la fin de la ligne. Si, pour fabriquer un produit, il faut faire l'ensemble des (N) opérations, alors la ligne correspondante peut contenir jusqu'à $M = |N|$ stations (une opération par station dans le pire des cas). Bien sûr nous pouvons avoir moins de (M) stations si nous regroupons certaines opérations. S'il y a (M) stations, la matière première de coût (m_c) passe au travers de ces (M) stations pour donner un produit fini ayant un prix de vente (r_u).

2.4.2.1 Les avantages et les inconvénients des lignes de transfert

Les principaux avantages qu'offrent les lignes de transfert sont :

- La précision : les lignes de transfert sont conçues pour apporter un maximum de précision dans l'usinage des pièces ;
- La qualité : les lignes automatisées sont conçues pour avoir une meilleure qualité de produits finis. Quant aux lignes semi-automatisées, cela est également valable, car les ouvriers font les mêmes tâches et connaissent parfaitement leur travail (cela peut aussi être un inconvénient et amener une certaine lassitude pouvant provoquer des incidents par inattention) ;

- La productivité : la possibilité (voir la nécessité) de faire une production de masse (sciage, rabotage, etc.). Cela fait en sorte que le volume annuel des produits finis peut atteindre plusieurs millions ;
- L'interaction entre l'étude du produit et ses moyens de production est simplifiée ;
- La production de déchets est minime (diminution du nombre de réglages) ;
- Les coûts de manutention sont bas, les besoins en compétence moindres, la gestion de flux, le plan de production et de contrôle sont assez simples et réguliers.

Les inconvénients des lignes de transfert sont :

- Les lignes de transfert demandent de gros investissements et doivent fonctionner suffisamment longtemps pour être rentables ;
- Un produit va d'un bout à l'autre de la ligne ; s'il est défectueux cela n'est détecté qu'en bout de ligne car il est très difficile de rompre le cycle d'une ligne de transfert pour intervenir ;
- L'arrêt d'une station est un problème important car plus le nombre de machines ou de stations augmente, plus la probabilité d'avoir une panne quelque part augmente. Si une opération ne s'est pas terminée à temps à cause d'une panne, le produit est automatiquement défectueux ;
- Le manque de flexibilité et la difficulté d'introduire de nouveaux produits (ou de changements dans la fabrication) sont des facteurs à prendre également en compte.

2.4.2.2 Conduite des lignes de transfert

Les lignes de transfert peuvent être divisées en deux grandes classes : rotatives ou droites. Dans l'usine de rabotage la ligne de transfert est une ligne droite.

Pour achever le séquencement et la synchronisation des opérations dans une ligne de transfert, il est nécessaire d'avoir un système de commande commun pour toutes les stations. La logique de commande est réalisée à l'aide d'un réseau de capteurs qui contrôle toutes les machines de la ligne. Cette commande est assurée par des microprocesseurs ou des automates programmables.

La cadence de production dans une ligne de transfert dépend de la cadence de l'unité la plus lente (goulot). Les critères d'évaluation d'une ligne de transfert sont définis comme suit :

- **La durée de production** d'une unité de produit (t) (pour une seule machine elle est égale au temps de cycle (T)) est la somme du temps de préparation (t_p) (comprenant le temps de chargement et de déchargement), du temps d'exécution (t_e) et du temps de remplacement de l'outil de travail (t_r)

$$T = t = t_p + t_e + t_r \quad (2-1)$$

- **Le taux de production ρ** est le nombre de pièces produites par unité de temps et est l'inverse de la durée de production d'une unité de produit. Pour une seule machine il est égal à :

$$\rho = 1/T = 1/t \quad (2-2)$$

Le coût de production d'une unité de produit comprend le coût d'amortissement de la machine (μ_r), le coût de production (μ_p), et le coût de l'outil (μ_0). Ce dernier inclut le coût d'achat, le coût de l'usure et d'amortissement et les coûts dérivés :

$$\mu = \mu_r + \mu_p + \mu_0 \quad (2-3)$$

- **Le profit par unité de produit (g)** est égal au prix de vente (r_u) moins le coût de la matière première (m_c) moins le coût de production (μ).

$$g = r_u - m_c - \mu \quad (2-4)$$

- **Le taux de profit** est calculé en utilisant la formule suivante :

$$pf = g/T \quad (2-5)$$

Dans la suite de notre étude, nous allons nous pencher sur un indicateur de performance globale : le Taux de Rendement Synthétique (TRS). Le TRS tient compte des deux premiers critères soit la durée de production et le taux de production. Il permet de mesurer l'importance des fluctuations aléatoires (pannes, non-qualité, ralentissements) sur l'efficacité des équipements de la ligne de transfert et en particulier sur les contraintes (goulots), ce qui permet d'identifier les différentes sources de pertes qui affectent le taux de profit.

Dans les lignes de transfert le taux de production net est inférieur au taux de production brut. C'est pour cette raison que le premier souci des lignes de transfert est d'améliorer la fiabilité et de diminuer l'impact des pannes.

2.4.2.3 Les aléas d'une ligne de transfert

Les systèmes de production automatisés sont soumis à des aléas comme les pannes de machines, les micro-arrêts, les ralentissements, la non-qualité, les demandes exceptionnelles et l'expérience du personnel ou encore les retards de livraison.

Le comportement d'une ligne de transfert est négativement affecté par les pannes de machines. La compréhension de l'impact des pannes de machines sur la productivité est très importante si on veut atteindre la fiabilité et la performance souhaitées.

Dans les systèmes réels de production il existe plusieurs types de pannes. Elles ont été mises en relief par J.A. Buzacott et L.E. Hanifin [BUZ78] dans leur étude statistique des interruptions de production. Ils ont identifié deux types de pannes de machines :

- **Pannes dépendantes du temps** (Time Dependent Failures : TDF) : ce type de pannes dépend principalement du temps écoulé et est indépendant de la charge de la machine. Par conséquent, une machine peut tomber en panne même si elle ne travaille pas sur une pièce.
- **Pannes dépendantes des opérations** (Operation Dependent Failures : ODF) : ce type de pannes dépend du temps qu'une machine passe à travailler sur une pièce. Une machine soumise à ce type de panne ne se dégrade pas si elle ne travaille pas donc elle ne peut pas tomber en panne.

Ils ont constaté que les pannes dépendantes des opérations sont plus courantes et représentent plus de 70% des interruptions de production. Pour cette raison, le modèle de pannes dépendantes des opérations est considéré plus réaliste que celui des pannes dépendantes du temps.

Les pannes dépendantes des opérations sont généralement prises en compte pour l'analyse des performances des systèmes de production (J. A. Buzacott et J.G. Shantikumar [BUZ92] et Y. Dallery, et S. B. Gershwin [DAL92]) et les pannes dépendantes du temps sont habituellement prises en compte dans le pilotage des flux des systèmes de production sujets à des pannes (J. Kimemia et S. B. Gershwin, [KIM83], R. Akella et P. R. Kumar [AKE86], X. Xie [XIE02]). Les pannes dépendantes des opérations sont considérées comme un meilleur modèle pour les systèmes réels de production puisque les pannes d'équipement sont habituellement liées à l'utilisation. Cependant, les pannes dépendantes des opérations mènent souvent à des modèles délicats plus difficiles à étudier. C'est pourquoi, les pannes dépendantes du temps sont souvent utilisées pour simplifier l'analyse.

Dans la littérature, peu de travaux comparent théoriquement les deux types de pannes et leur impact sur la productivité du système de production (voir [WIJ56] et [HON94]).

Dans notre étude, on s'intéresse aux types de pannes dépendantes des opérations et leur impact sur la productivité du système de rabotage.

2.4.2.4 Solutions aux problèmes d'opération des lignes de transfert

En général, l'objectif des lignes de transfert est de produire un large volume de pièces à un moindre coût par pièce. Les coûts qui doivent être considérés sont les coûts initiaux

d'acquisition, d'installation ainsi que les coûts d'exploitation soit la main d'œuvre, les outils, la réparation, la maintenance et les coûts d'inventaires en cours de production.

En cherchant à augmenter le taux de production net dans une ligne de transfert, on peut utiliser trois différentes approches :

- **Diminuer le temps de cycle** : diminuer le temps de cycle ou augmenter le taux de production brut exige la diminution du temps de transfert d'une pièce à la station suivante, et la réduction du temps de traitement d'une pièce. L'attention doit être portée vers la machine dont le temps de traitement est le plus lent (machine goulot).
- **Diminuer la fréquence d'occurrence des pannes** : les pannes sont un grand problème en ce qui a trait à la non-performance. Pour remédier à ce phénomène, il faut implanter une stratégie de maintenance afin d'améliorer la fiabilité des machines.
- **Diminuer le temps des arrêts planifiés (temps de mise en course)** : le temps de mise en course est un problème de préparation et de planification des opérations plutôt qu'un problème de conception. Il est particulièrement essentiel de planifier les opérations de réparation à l'avance.

En contrepartie, la correction de l'un de ces trois problèmes peut avoir un impact négatif sur les autres. Par exemple, la diminution du temps de cycle en accélérant les machines engendre une augmentation du taux d'utilisation des machines et des outils, ce qui fait augmenter la fréquence d'occurrence des pannes.

Pour développer un modèle réaliste de performance de la ligne de transfert, il est nécessaire d'étudier la nature des arrêts de la ligne. Dans la littérature on trouve plusieurs études sur les temps d'arrêt des lignes de transfert. Certaines études sont basées sur l'analyse de l'enregistrement des temps d'arrêt dus aux opérations de la ligne et à la maintenance, d'autres sont basées sur les observations des ingénieurs du domaine. Dans la suite de notre étude, on s'intéresse à l'analyse de l'enregistrement des temps d'arrêt dus aux opérations de la ligne. Les données analysées sont collectées en temps réel à l'aide d'un ensemble de capteurs installés sur la ligne de rabotage reliés à un automate programmable qui contrôle la production.

2.5 Conclusion

Comme le système industriel étudié est une ligne de production, nous avons présenté, dans ce chapitre, les deux modèles de lignes les plus utilisés dans les systèmes de production à savoir les lignes de flux et les lignes de transfert. Dans la littérature traitant de ces deux modèles, on remarque qu'il y a des différences entre les chercheurs au niveau de la définition et de la

classification des lignes. Par exemple, certains auteurs divisent les lignes de production en deux classes : les lignes de flux et les lignes de transfert, alors que d'autres supposent que les lignes de transfert et les lignes de flux veulent dire la même chose. Ce qui est commun à tous les chercheurs est la performance des lignes de production qui est déterminée par le taux de production.

Nous avons également analysé deux types de pannes : pannes dépendantes du temps (la machine peut tomber en panne à n'importe quel moment) et pannes dépendantes des opérations (la machine ne peut tomber en panne que lorsqu'elle fonctionne). Les pannes dépendantes des opérations sont principalement liées à la dégradation de l'équipement, la qualité des intrants et des outils de production et sont, en réalité, les plus courantes. Elles sont généralement utilisées pour l'analyse de la performance des systèmes de production alors que les pannes dépendantes du temps sont habituellement adoptées dans la commande des systèmes de production soumis aux pannes.

Dans le chapitre suivant, nous développerons, en détail, le calcul du Taux de Rendement Synthétique ainsi que les différents temps d'état (temps d'arrêt) des lignes de transfert qui affectent le taux de production. Le Taux de Rendement Synthétique dépend sensiblement du caractère aléatoire ou déterministe du temps de traitement des stations, de leur mode de défaillance ainsi que de leur disponibilité.

Chapitre 3 - Amélioration continue de la performance : revue de la littérature

3.1 Introduction

La compétition mondiale a changé les données de l'économie. Le maintien ou l'amélioration de la compétitivité d'une ligne de production est conditionné par son environnement, c'est-à-dire par l'évolution du marché, par les technologies de la production et par les hommes qui sont impliqués dans son fonctionnement. De nombreuses analyses ont été conduites pour mettre en évidence l'évolution des différents facteurs qui conditionnent les systèmes de production automatisés d'aujourd'hui et de demain.

Nous sommes définitivement passés de l'économie d'échelle marquée par le taylorisme durant une partie du vingtième siècle à l'économie d'envergure. Désormais, il faut fabriquer à bas prix de petites quantités de produits identiques. On parle même de « *one of a kind production* » (un seul exemplaire par type de produit) ou de produits personnalisés. De plus, le marché évolue vers des produits de grande qualité. Plus que jamais, satisfaire les demandes des clients devient la priorité de tout système de production. On parle du triplet Coût-Délai-Qualité.

Pour réduire au minimum les coûts de fabrication d'un produit, il faut que les lignes de production aient des temps de production courts. C'est pourquoi la connaissance du système de production ainsi que la mise en place d'indicateurs de performance sont primordiales pour les entreprises.

Dans ce chapitre nous présentons, tout d'abord, les principales démarches à faire pour l'amélioration de la performance des lignes de production, la philosophie **Lean** et l'approche **Kaizen**, qui est à l'origine de l'évaluation de l'efficacité des lignes de transfert. Dans la seconde partie, nous discutons des principaux outils d'amélioration de la performance et le calcul du Taux de Rendement Synthétique. En dernier lieu nous traiterons de la maintenance qui est, à l'origine, le levier d'amélioration du Taux de Rendement Synthétique.

3.2 Le Lean : historique

En 1950, Taiichi Ohno travaille comme ingénieur pour le constructeur automobile japonais, Toyota. À cette époque, Toyota vit un conflit social très dur se termine, par le licenciement de 1600 employés. Suite à cette épreuve, Toyota doit impérativement réduire ses coûts et améliorer son efficacité pour vendre des voitures. T. Ohno se rend aux Etats-Unis pour étudier les méthodes taylorienne et fordiste.

De retour au Japon, T. Ohno avait compris qu'il était impossible d'utiliser les mêmes méthodes que les Américains : alors que ces derniers produisent d'énormes quantités pour réaliser des économies d'échelle, les Japonais devaient abaisser les coûts tout en produisant des séries courtes [TBM11].

T. Ohno et son équipe développaient le nouveau système de production de Toyota (TPS). Basé sur le principe « produire juste ce dont on a besoin et le faire juste à temps » [TBM11].

T. Ohno réussit à concrétiser ce principe en supprimant toute action inutile, il définit alors sept catégories de gaspillage ou 7 Muda :

1. Production excessive : produire trop, ou trop tôt.
2. Attentes : attendre des pièces ou une machine qui finit son cycle, etc.
3. Transport et manutention inutiles : tout transport est essentiellement un gaspillage et doit être minimisé.
4. Usinage inutile : toutes opérations non strictement nécessaires contribuant à dépasser les attentes du client et mobilisant des ressources.
5. Stocks excessifs : générant une utilisation d'espace ainsi qu'une gestion des stocks coûteuse et consommatrice de temps.
6. Mouvements inutiles : tous les déplacements inutiles de personnel et actions superflus qui ne contribuent pas directement à l'ajout de valeur.
7. Défauts et rebuts : fabriquer des produits non conformes entraîne la mise au rebut ou le retraitement de ces produits, gaspillant temps, main d'œuvre et matière première.

[BAL11].

Le concept innové par T. Ohno et son équipe a permis à Toyota de réduire considérablement les coûts et les délais de production en éliminant les pertes de temps ainsi que les activités inutiles au processus de production [DRE04]

Le Système de Production Toyota, a ensuite été formalisée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) sous le nom de *Lean Manufacturing*.

Le **Lean** trouve ses sources dans le Toyota Production System (TPS) au Japon. Le modèle toyotisme repose sur l'élimination des gaspillages dans les processus et il est représenté par le concept de la « Maison de Toyota ».

Tel que souligné dans [TBM11], la Maison de Toyota (figure 3.1) a été créée par « Taiichi Ohno et Eiji Toyota pour expliquer plus facilement le Système de Production Toyota aux employés et fournisseurs. Ils ont choisi la forme d'une maison car c'est une forme familière qui véhicule une idée de stabilité. Le toit contient les principaux objectifs du TPS : qualité supérieure, réduction des coûts et des délais de livraison par l'élimination du gaspillage. Les fondations sur lesquelles la maison repose représentent des valeurs fortes de stabilité opérationnelle des processus et du personnel. Les deux piliers qui entourent le pilier de l'amélioration continue sont les principes du Juste à Temps et du Jidoka » [TBM11].

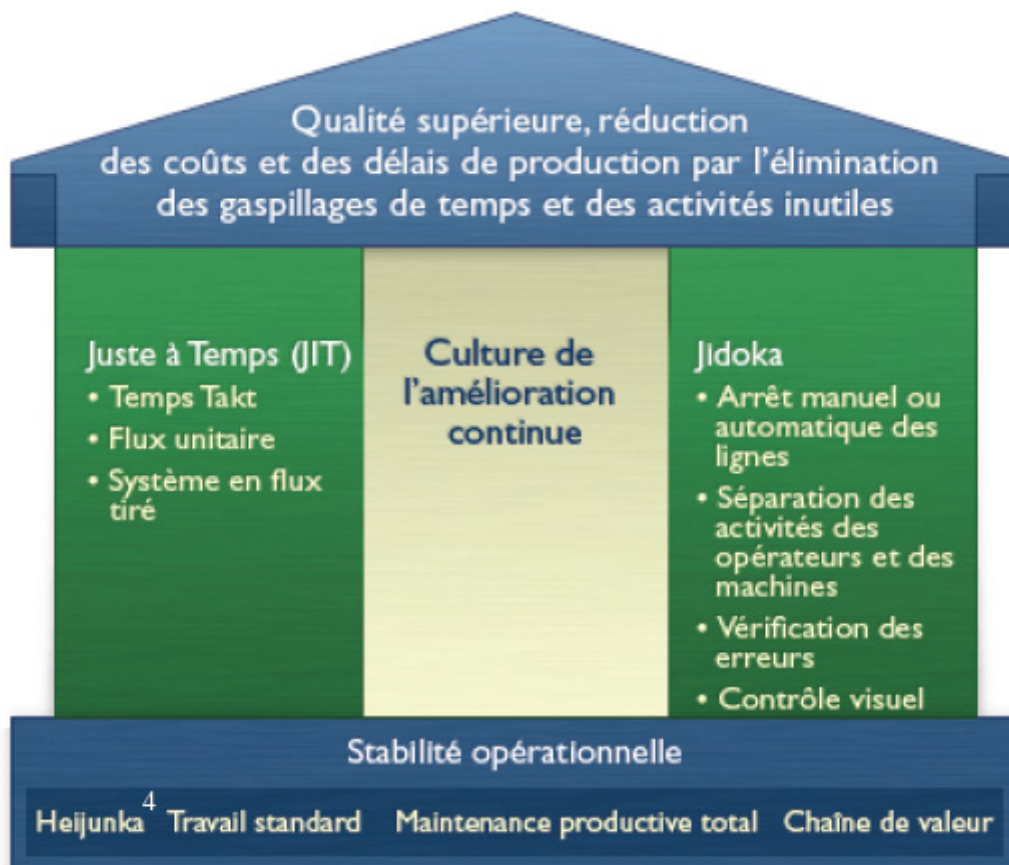


Figure 3.1 : La maison de Toyota [TBM11].

3.2.1 Le concept Lean

La gestion d'entreprise dite **Lean** peut-être traduite par « mince », « entreprise agile » ou « entreprise flexible » permet la détection rapide des problèmes et le changement rapide des produits. Cependant le plus important dans une entreprise dite Lean est d'avoir un niveau de stock extrêmement bas afin remonter aux sources des problèmes potentiels (pannes, ralentissements, gaspillage, etc.), cela permet à l'entreprise d'optimiser en permanence l'ensemble de ses activités.

La méthodologie **Lean** intègre un ensemble de principes, de pratiques, d'outils et de techniques conçus pour éliminer les causes racines de mauvaise performance opérationnelle.

L'objectif du **Lean** est « d'optimiser la qualité, les coûts, les délais et la productivité. Pour atteindre un tel objectif, il est nécessaire d'agir sur trois sources d'inefficacité de tout système opérationnel : le gaspillage, la variabilité et le manque de flexibilité » [DRE04].

La méthodologie **Lean** reprend le concept de gestion de la production du système Toyota dont les trois piliers sont le « Juste à Temps, le Jidoka et le Kaizen ».

Les grands principes de ces trois piliers sont définis par Drew [DRE04] comme suit :

- **Juste à Temps** : « fabriquer ce qui est nécessaire, lorsque cela est nécessaire et en quantité voulue, dans les délais les plus courts possibles. Appelée aussi « flux tendu », cette méthode consiste à réduire le gaspillage que constituent les stocks ainsi que le risque d'obsolescence » [DRE04].
- **Jidoka** : « signifie transfert de l'intelligence humaine à la machine (Autonomation). C'est un ensemble de systèmes de détection des non-conformités qui permet d'arrêter la production, soit manuellement soit automatiquement, pour ne pas produire de mauvaises pièces » [DRE04].
- **Kaizen** : « philosophie de l'amélioration continue, ou « progression pas à pas vers l'excellence » fondée sur la responsabilisation et l'autonomie de chaque membre de l'équipe et la lutte ininterrompue contre le gaspillage » [DRE04].

Ces approches ont plusieurs noms mais ont toutes la même finalité (amélioration de la productivité).

3.2.1.1 Le Kaizen

Introduit dans les années 1990 par Masaaki IMAI [IMA 89]. L'expression résulte de l'association de deux termes, « Kai » qui signifie Changement et « Zen » qui signifie Bon.

Le Kaizen est traduit en français par « amélioration continue », il repose sur des améliorations faites de façon continue au quotidien. L'implantation de cette philosophie nécessite une forte motivation de la part de tous les employés qui doivent constamment réfléchir sur leur lieu de travail, voire proposer des pistes d'améliorations.

Les principes de cette approche sont définis par Siebenborn [SIE05] comme suit :

N°	Principe	Définition
1	Briser les paradigmes	La culture, les habitudes et les façons de faire forment dans l'entreprise des paradigmes qui peuvent sembler immuables. Avec le Kaizen , il s'agit de penser différemment quitte, parfois, à remettre en cause des évidences, en évitant de penser que tout problème récurrent n'a systématiquement pas de solution. Dans l'industrie du rabotage, on parle des micro-arrêts et des sous-vitesses de production.
2	Travailler les processus autant que les résultats	Traditionnellement, les acteurs d'un processus focalisent davantage sur les résultats à atteindre que sur la manière d'y parvenir. L'approche Kaizen recommande donc à ces acteurs de travailler sur leur processus de manière à améliorer le niveau de qualité et d'homogénéité des résultats. Dans ce cas-ci on parle de déclassement des produits finis. Cette stratégie coûte énormément cher à l'entreprise car les pièces déclassées ne correspondent pas à la recette de production
3	Évoluer dans un cadre global	Avec le Kaizen , les capacités individuelles des acteurs doivent être exploitées dans le but d'améliorer la productivité globale de l'organisation. Les objectifs d'efficacité définis pour les acteurs d'un même processus doivent donc être cohérents et ces acteurs doivent prendre conscience de leur rôle dans la réalisation de l'objectif global du processus
4	Ne pas juger, ne pas blâmer	le respect mutuel des acteurs est un des principes clés de la philosophie Kaizen. La recherche des causes du problème doit se substituer progressivement à celle des acteurs à l'origine du problème. L'idée est de faire émerger une analyse positive des problèmes en voyant ceux-ci comme des opportunités d'amélioration

5	Considérer l'étape suivante comme un client	le Kaizen introduit la notion de client interne dans la chaîne de réalisation d'un processus. En termes de fonctionnement, cela implique que les problèmes doivent désormais être traités et remédiés là où ils apparaissent et non plus en phase terminale de réalisation du processus. Dans la ligne de rabotage, ce point résume le problème de déclassement des produits finis causé par la qualité de rabotage. Le contrôle qualité des pièces rabotées arrive à la fin du procédé
6	Faire de la qualité une priorité	la qualité doit être intégrée aux objectifs de performance du processus au même titre que le sont classiquement délais et coûts
7	Donner une orientation « marché » au changement	l'organisation doit comprendre les besoins des clients, explicitement ou implicitement exprimés, de manière à les traduire en termes d'activités à réaliser
8	Gérer les problèmes en amont	il s'agit d'introduire le management de la qualité le plus possible en amont du processus d'élaboration du produit, de manière à éviter l'apparition tardive de problèmes plus difficiles et plus coûteux à remédier. Dans ce cas-ci on parle de la matière première (les intrants). Si la qualité de sciage et de séchage n'est pas conforme, cela affecte la productivité de la ligne de rabotage
9	Baser les décisions sur des données tangibles	la résolution de problèmes doit se baser sur des faits et des données, et non sur des intuitions ou des opinions, qu'il s'agisse de collecter et d'en vérifier la validité
10	Identifier les véritables causes du problème	l'identification des causes racines du problème nécessite de ne pas s'arrêter à la première cause visible qui peut-être une cause potentielle du problème constaté (recours à l'outil "5 pourquoi"). Cela implique aussi de vérifier que la résolution d'un problème ne cause pas l'apparition de nouveaux problèmes.

Tableau 3.1 : Les principes de la démarche Kaizen [SIE05].

Notre choix d'exploiter l'approche **Kaizen** est d'intégrer les différents principes de l'amélioration continue dans l'industrie du rabotage. La mise en œuvre de cette approche repose sur le concept de l'amélioration de la roue de Deming (Plan – Do – Check – Act) ou du processus DMAIC.

En effet, « l'approche **Kaizen** s'appuie, en particulier, sur le savoir-faire existant des acteurs sur le terrain pour réduire le gaspillage (MUDA), les tensions (MURI) et les divergences (MURA) » [IMA 89]. Elle fait appel à tous les outils et méthodes de créativité et de résolution de problèmes classiques.

3.3 Les outils de résolution de problèmes de performance

Les principaux outils d'amélioration de performance utilisés dans l'amélioration continue (**Kaizen**) sont :

- **QOQOCP** « Accélérer la compréhension des problèmes » : le QOQOCP est une méthode inventée aux USA au début du vingtième siècle. Permet la compréhension des problèmes ainsi que les méthodes de travail, autrement dit comprendre les différentes opérations du processus afin d'identifier les sources de gaspillage importantes pour augmenter la productivité des entreprises. La méthode consiste à se poser les questions suivantes :
 - **QUOI ?** Est-ce que ce travail est nécessaire ?
 - **QUI ?** Est-ce que la personne qui effectue ce travail est qualifiée ?
 - **OÙ ?** Dans quel endroit le travail est-il effectué ?
 - **QUAND ?** Est-ce que le bon moment pour faire ce travail ?
 - **COMMENT ?** Comment fait-on ?
 - **POURQUOI ?** Est-ce réellement nécessaire ?
- **5 POURQUOI** « Identifier la ou les causes premières d'un problème » : le 5 pourquoi permet de rechercher les causes fondamentales d'un problème, il consiste à se poser plusieurs fois de suite la question : « Pourquoi ? » jusqu'à ne plus pouvoir y répondre.
- **5S** « Maintenir la productivité d'une activité en évitant le désordre naturel qui s'installe dans son environnement » : l'outil 5S convient à identifier tout ce qui est utile pour effectuer les opérations et d'affecter une place précise à chaque objet.
 - **Seiri** : débarrasser,
 - **Seiton** : ranger,
 - **Seiso** : nettoyer,
 - **Seiketsu** : propreté personnelle – ordre,

- **Shitsuke** : discipline – rigueur.

- **SMED** « Accélérer l'exécution d'une activité » : le SMED est l'abréviation de l'anglais (*Single Minute Exchange of Die*). Une méthode organisationnelle qui réduit de façon systématique le temps de changement de série par l'analyse d'une activité pour classer les tâches qui peuvent être exécutées en temps masqué.
- **POKA YOKE** « Faire bien du premier coup » : C'est un outil détrompeur consiste à trouver des moyens pour élimine les problèmes d'erreur lors d'une activité répétitive.
- **TPM** « Améliorer et maintenir la productivité d'une activité » : la Total Productive Maintenance est une démarche globale d'amélioration permanente des systèmes de production, elle vise la performance économique des entreprises. Cette démarche utilise l'expérience et le savoir-faire des employés pour améliorer la productivité en matière de performance, disponibilité et maintenabilité ainsi que la qualité des produits fins. Elle introduit un indicateur de mesure globale, le TRS (Taux de Rendement Synthétique) qui lui permet de détecter et de mesurer les vrais problèmes. C'est une démarche globale qui s'intègre dans la mission des opérateurs.

Peu d'entreprises parviennent à tirer de l'approche **Kaizen** autant d'avantages que Toyota, car pour récolter les promesses de ce système, il faut beaucoup plus qu'une conjugaison de principes, de méthodes et d'outils. L'état d'esprit et le comportement du personnel sont essentiels. La capacité de Toyota à créer une culture d'entreprise est la composante la moins transposable de son succès et le produit d'une longue évolution. Nous présentons, dans la suite de ce chapitre, la définition des indicateurs de performance retenue de la TPM.

3.3.1 Indicateurs de performance

Les indicateurs représentent des outils indispensables d'aide à la décision, pour toutes les personnes qui sont en charge du management d'un processus, quel qu'il soit.

Il est en effet tout aussi inconcevable de piloter efficacement sa voiture sans tableau de bord (ensemble d'indicateurs : compteur de vitesse, compteur kilométrique, niveau de carburant, etc) que de gérer correctement un processus sans :

- Mesurer ses performances ;
- Suivre les temps d'état du système ;
- Comparer ses performances à l'objectif fixé.

En effet, dans l'industrie actuelle, une ligne de production ne peut être opérationnelle à 100% durant toutes les heures d'ouverture de l'atelier ou de l'usine. Il y a nécessairement des opérations qui nécessitent son arrêt ou du moins une phase non productive : changement de

série, rechargement, maintenance, etc. Cela occasionne des pertes significatives de production. La figure 3.2 résume les différentes pertes qui affectent la productivité d'un système de production [AFNOR].

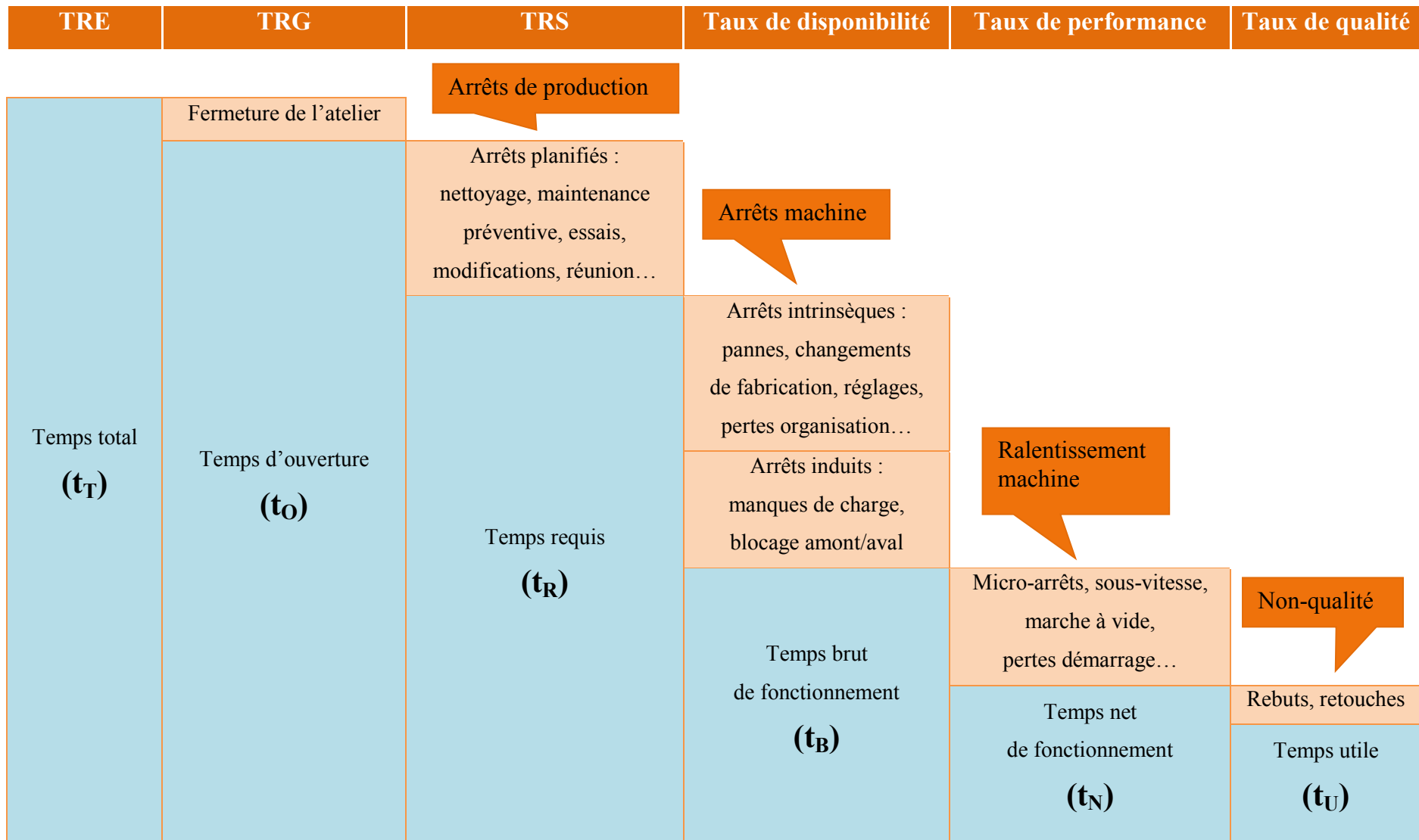


Figure 3.2 : Les pertes d'un système de production - Afnor NFE 60-182.

La figure ci-dessus montre l'écart entre le fonctionnement réel et celui que l'on pourrait qualifier d'idéal, sans aléas et sans perte d'efficacité. L'analyse d'amélioration de la performance doit donc porter sur les pertes à chaque stade de la production. Pour cela, la TPM relève seize causes principales de pertes qui empêchent d'obtenir l'efficacité maximale des hommes, des équipements, des matières et de l'énergie.

Les principaux indicateurs de performance qui résument les différentes pertes de production mentionnées dans la figure 3.2 sont :

- **Le Taux de Rendement Économique (TRE) :** le TRE est égal au rapport entre le temps utile (t_U) et le temps total (t_T). Le temps utile correspond au temps non mesurable obtenu en multipliant le nombre de pièces bonnes par temps de cycle de référence. Le temps total, c'est le temps de possession du moyen de production qu'il soit utilisé ou pas (pour cause de panne, de maintenance) que l'atelier soit ouvert ou fermé. Le temps total inclut donc les jours de fermeture, les weekends et les jours fériés.
- **Le Taux de Rendement Global (TRG) :** le TRG est égal au rapport entre le temps utile et le temps d'ouverture (t_O). Le temps d'ouverture est la partie du temps total (t_T) qui correspond à l'amplitude des horaires de travail du moyen de production.
- **Le Taux de Rendement Synthétique (TRS) :** le TRS est égal au rapport entre le temps utile (t_U) et le temps requis (t_R). Le temps requis est la période de temps pendant laquelle l'utilisateur engage son moyen de production avec la volonté de produire. Ce temps comprend les temps d'arrêt subis et programmés, par exemple les pannes, les changements de série, les réglages et l'absence de personnel.

En effet, le TRS est un indicateur de performance normalisé (NFE 60-182) qui rend compte de l'utilisation effective d'un moyen de production et permet de mettre en évidence la marge de progrès potentiel en termes de productivité et de qualité.

3.3.1.1 Le Taux de Rendement Synthétique

Toute entreprise a pour objectifs :

- **La satisfaction de ses clients** en termes de qualité, prix, respect des délais, flexibilité, innovation.
- **Sa position sur le marché** créée par les facteurs précédents, mais aussi par son image et sa valeur opérationnelle.
- **Sa rentabilité** qui lui permet de satisfaire ses actionnaires. Cette contrainte crée de nombreux problèmes et va à l'encontre des démarches de progrès continu.

L'obtention de ces objectifs exige la Capabilité, la Flexibilité et la Productivité des ressources de production. Ces trois composantes sont mesurées par le Taux de Rendement Synthétique (TRS).

Le TRS est défini, selon la norme Afnor NFE 60-182, comme « un indicateur de productivité qui rend compte de l'utilisation effective d'un moyen de production. Il mesure la performance d'un système de production par l'analyse d'un poste goulot limitant la productivité, évalue les progrès et permet d'identifier les pertes » [AYE03].

Le TRS est un indicateur qui mesure la rentabilité de l'entreprise grâce à ses trois composantes : taux de disponibilité, de performance et de qualité. Il est indispensable de vérifier si ces composantes sont ou non sous contrôle statistique afin de distinguer les causes communes des causes spéciales de non-productivité. Ces dernières, exigeant de retrouver les conditions normales d'utilisation des ressources, seront traitées principalement par la maintenance. Les causes communes sont la responsabilité du management.

La figure 3.3 représente les différents temps d'état mesurés par le TRS.

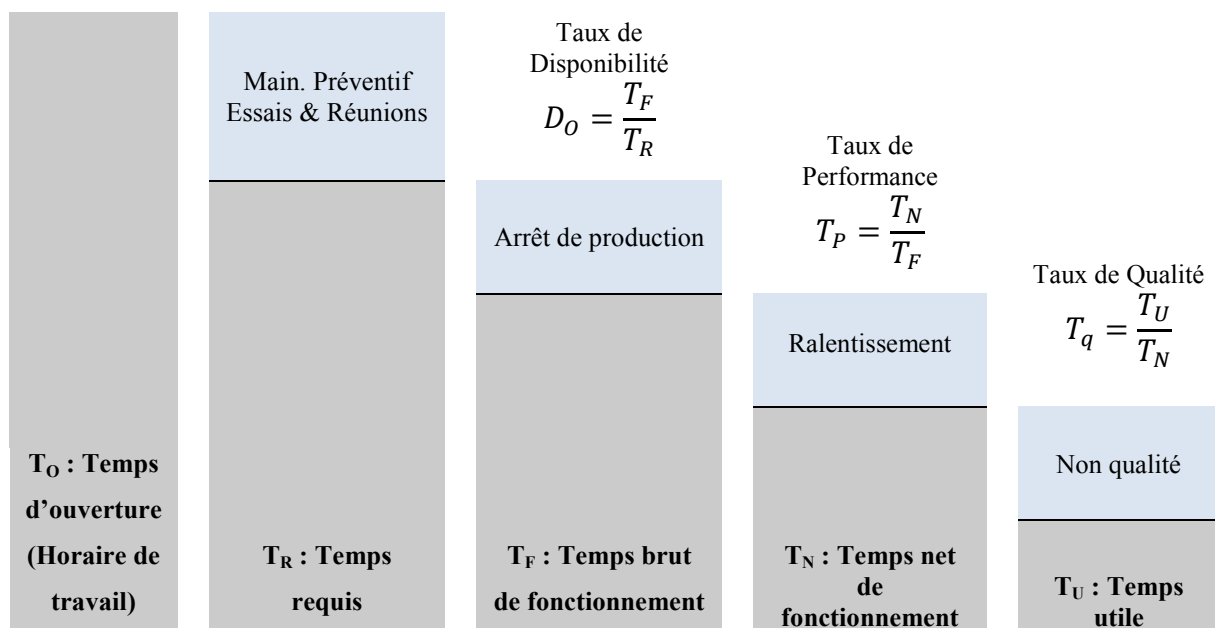


Figure 3.3 : Les temps d'état d'un moyen de production (adopté de NFE 60-182-[AYE04]).

Mathématiquement, le Taux de Rendement Synthétique se définit par le produit du taux de qualité (T_q), par le taux de performance (T_p) et par la disponibilité opérationnelle (D_o) comme suit :

$$TRS = T_q * T_p * D_o \quad (3-1)$$

Dans la pratique le TRS représente le rapport du nombre de pièces bonnes (NPB) sur le nombre de pièces théoriquement réalisables (NPTR) :

$$NPTR = \frac{t_r}{t_{cr}} \quad \text{Avec } t_r : \text{ Temps requis.}$$

$$t_{cr} : \text{ Temps de cycle de référence.}$$

Alors on obtient

$$TRS = \frac{NPR}{NPTR} = NPB * \frac{t_{cr}}{t_r} \quad (3-2)$$

Les composantes du TRS se définissent en fonction des temps d'état d'un moyen ou d'une machine de production selon la norme NFE 60-182, de la manière suivante :

- **Taux de qualité (Tq)** : tel qu'exprimé dans la formule (3-3), le taux de qualité est le rapport du nombre de pièces bonnes sur le nombre de pièces réalisées.

$$T_q = \frac{\text{le nombre de pièces bonnes}}{\text{le nombre de pièces réalisées}} = \frac{NPB}{NPR} \quad (3-3)$$

Dans les industries où les pièces de non-qualité ne sont pas des rejets mais un déclassement de produits finis comme les industries de bois, le taux de qualité est exprimé comme le rapport du temps utile sur le temps net, formule (3-4).

$$T_q = \frac{\text{temps utile}}{\text{temps net}} = \frac{T_U}{T_N} \quad (3-4)$$

- **Taux de performance (Tp)** : C'est le rapport du temps net sur le temps de fonctionnement, comme le montre la formule (3-5).

$$T_p = \frac{\text{temps net}}{\text{temps de fonctionnement}} = \frac{T_N}{T_F} \quad (3-5)$$

- **Disponibilité opérationnelle (Do)** : La disponibilité opérationnelle est définie comme le rapport du temps de fonctionnement sur le temps requis, formule (3-6).

$$D_o = \frac{\text{temps de fonctionnement}}{\text{temps requis}} = \frac{T_F}{T_R} \quad (3-6)$$

Selon la norme Afnor NFE 60-182, on distingue que le TRS dénombre plusieurs causes de pertes. Elles concernent la performance :

- des équipements ;
- de la main-d'œuvre ;
- des matières, outillages et fournitures ;
- de l'énergie.

Et ont pour origines :

- le manque de fiabilité des équipements ;
- les carences de l'organisation ;

- les méthodes et procédés utilisés.

➤ **Pertes dues au manque de fiabilité**

Cette catégorie englobe toutes les pertes dues à la fiabilité de l'équipement définie par sa conception et ses conditions d'utilisation.

Pour beaucoup d'industriels, la fiabilité est associée uniquement aux pannes et donc aux problèmes relevant de la fonction maintenance alors que la fiabilité entraîne beaucoup d'autres pertes.

- **Les arrêts programmés** : les arrêts incontournables qui permettent la bonne utilisation des équipements tels que les opérations :
 - nettoyage ;
 - inspections et réparation programmées ;
 - modifications des équipements et essais ou lancement de nouveaux produits.
- **Les pannes** : elles correspondent à la disparition ou la dégradation d'une fonction, elles peuvent être causées par un bris mécanique, bris électrique, produit coincé dans la machine, usure de pièce, etc.
- **Les réglages** : un procédé est « capable » lorsqu'il ne nécessite pas de réglage. Il est très recommandé de faire apparaître les réglages nécessitant un arrêt de la production. L'identification de ces derniers démontre que le procédé n'est pas stable ou que les paramètres standards de conduite sont inconnus.
- **Les pertes aux démarrages** : le démarrage ou le redémarrage d'une installation peut demander un réglage, un temps de marche à vide et parfois la fabrication de pièces non conformes.
- **Marche à vide** : peut être due à un manque d'alimentation de la machine causé par une pièce coincée dans le système d'alimentation, redémarrage de la production, etc.
- **Micro arrêts** : ils peuvent être, soit des arrêts visibles, soit des défauts de cycles de durée très faibles, mais répétitifs. Les micros arrêts représentent souvent une source très importante de pertes, ils seront mis en évidence par confrontation des résultats obtenus par le calcul du TRS.
- **Sous vitesse** : peut être provoquée par un problème de qualité ou de fiabilité, la machine a pu être réglée volontairement à une vitesse inférieure à sa vitesse nominale.

- **Non qualité ou qualité visée non obtenue** : la non qualité représente des temps machine perdus, mais aussi des pertes matières.

Il arrive dans certaines industries comme l'industrie de rabotage, lors de l'exécution d'une recette, que la qualité obtenue ne soit pas celle demandée (épaisseur, caractéristique de la pièce, etc.). Même si le produit obtenu est déclassé en second choix, il doit être considéré comme une non qualité. Le client attend son produit alors que le stock de produits déclassés déborde.

➤ **Pertes dues aux carences de l'organisation**

- **Changement de fabrication** : même s'il est indispensable, un changement de fabrication est considéré dans la TPM comme une perte d'efficacité.
- **Activité de l'opérateur** : l'habilité, la formation et le savoir-faire différent d'un opérateur à un autre ce qui génère des écarts entre le temps réel de production et le temps standard.
- **Déplacement et manutention** : un dysfonctionnement machine, un défaut dans les matières premières et déplacement des pièces peut créer une manutention ou une manipulation supplémentaire donc une perte de temps opérateur et/ou machine.
- **Défauts logistiques** : regroupe toutes les pertes créées par
 - attente matière, fourniture et emballage ;
 - matière non conforme ;
 - attente outillage ;
 - instruction ;
 - main-d'œuvre.
- **Excès de mesure** : est causé par une mauvaise organisation du contrôle dû au manque de confiance dans le procédé.

➤ **Pertes dues aux méthodes et procédés**

Dans la plus part du temps ces pertes n'apparaissent pas dans le TRS. Elles correspondent rarement à des minutes ou à des pièces perdues par rapport au standard mais à un coût.

Ces pertes doivent être évaluées par rapport à une référence issue de méthodes ou de procédé existants plus performants.

- **Rendement matériaux** : ce sont les pertes de matière qui s'expriment par le rapport
Quantité matières achetées / Quantité matière vendues dans le produit fini.
On trouve dans ces pertes les consommations matières dues aux procédés, aux démarrages, aux réglages.

- **Rendement énergétique** : exprimé soit par rapport à une valeur théorique, soit par comparaison avec d'autres procédés ou d'autres ateliers.
- **Surconsommations d'outillages et de fourniture** :
 - casses ou usures prématurées des outillages ;
 - consommations excessives des produits nécessaires au bon fonctionnement des machines de production tels que l'huile, la graisse, les scies, produit de nettoyage, etc. ;
 - surcoût des outillages : le non-respect des conditions normales d'utilisation de l'équipement oblige l'entreprise à utiliser des outillages de caractéristiques plus élevées que nécessaire.

À ce stade nous concluons que l'amélioration du TRS passe par l'amélioration de ses indicateurs, et donc des principaux temps d'états identifiés dans la figure 3.3 :

- amélioration du taux de qualité par diminution du temps de non qualité ;
- amélioration du temps de performance par diminution du temps d'écarts de cadence et des micro-arrêts ;
- amélioration de la disponibilité par diminution du temps d'arrêt de production.

Selon CLEMONS, J.W [CLE00] et VORNE [VOR13], la valeur optimale internationale du TRS est de l'ordre de **85%**. Pour atteindre cette valeur, l'entreprise doit améliorer la fiabilité de ses équipements, la planification de la production (l'ordre de fabrication) ainsi que les méthodes utilisées au travail. Il est indispensable pour l'industrie qui veut atteindre l'efficacité maximale de ses installations d'adopter une stratégie qui permet d'atteindre le niveau requis de la fiabilité de ses systèmes afin d'aboutir à une amélioration globale de la productivité.

Dans la section suivante, nous présentons l'impact de la maintenance sur le Taux de Rendement Synthétique ainsi que les différentes approches qui existent dans la littérature.

3.4 Impact de la maintenance sur le Taux de Rendement Synthétique

Un système de production est caractérisé par les différents états qu'il occupe tout son cycle de vie. Le changement d'état d'un système de production résulte également de l'occurrence d'un événement. Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement (Chapitre1), les événements sont généralement de type « défaillance » ou « réparation ». La mise en place d'une politique de maintenance adaptée au problème de l'entreprise représente un levier d'amélioration du Taux de Rendement Synthétique.

Selon la World Class Performance [CLE00], [AYE04] et [VOR13], un système est dit efficient lorsqu'il est caractérisé par un **TRS \geq 85%**. Cette valeur non absolue est celle

régulièrement citée dans les littératures dans les cas des systèmes manufacturiers. L'avantage des indicateurs du TRS est de caractériser globalement une efficacité de production et les exigences des trois composantes sont : $T_q \geq 99\%$, $T_p \geq 95\%$, $D_o \geq 90\%$. À partir de ces trois indicateurs ainsi que les causes des pertes listées auparavant, nous concluons que la valeur du TRS dépend directement de la fiabilité des installations.

3.4.1 La maintenance : définition

La fonction maintenance a comme objectif d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, de diminuer les pannes et de réduire les coûts de révision et de remise en état de fonctionnement. La maintenance est, après la production, une fonction très importante de l'entreprise. Plusieurs définitions sont attribuées à la maintenance :

- **AFNOR [AFN01]** : « la maintenance est l'ensemble de toutes les actions administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état où il peut accomplir la fonction requise ».

Le bien est notamment défini comme tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement [AFN01].

Les événements qui contribuent au non fonctionnement d'un système sont appelés les défaillances. La défaillance est définie comme la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise [AFN01].

De par sa définition, la défaillance est un événement survenu à un moment durant le fonctionnement d'un bien (équipement). Cela diffère de la dégradation.

Selon [AFN01], la dégradation est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien (équipement) liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe.

- **RICHER [RIC96]** : définit la maintenance comme étant « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien 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 ».
- **RETOUR & AL [RET90]** : présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion comme le montre la figure 3.4.

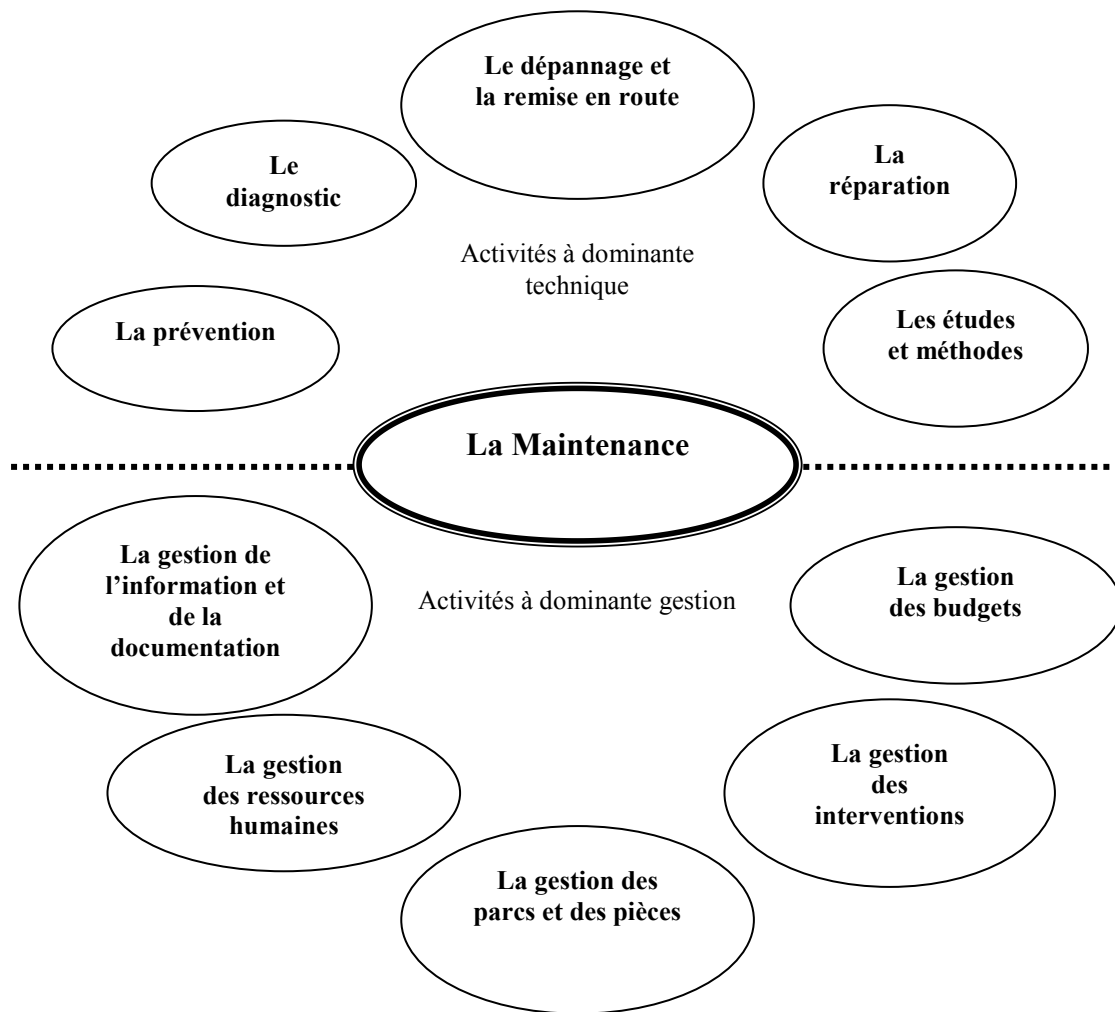


Figure 3.4 : Le contenu de la fonction maintenance [RET90].

Dans la définition de la maintenance nous trouvons deux mots clés : « maintenir et rétablir ».

- Maintenir : est une action de prévention.
- Rétablir : est une action de correction.

On peut résumer les différents politiques de maintenance selon la figure 3.5, nous présentons ainsi dans ce qui suit la définition de chaque type de maintenance.

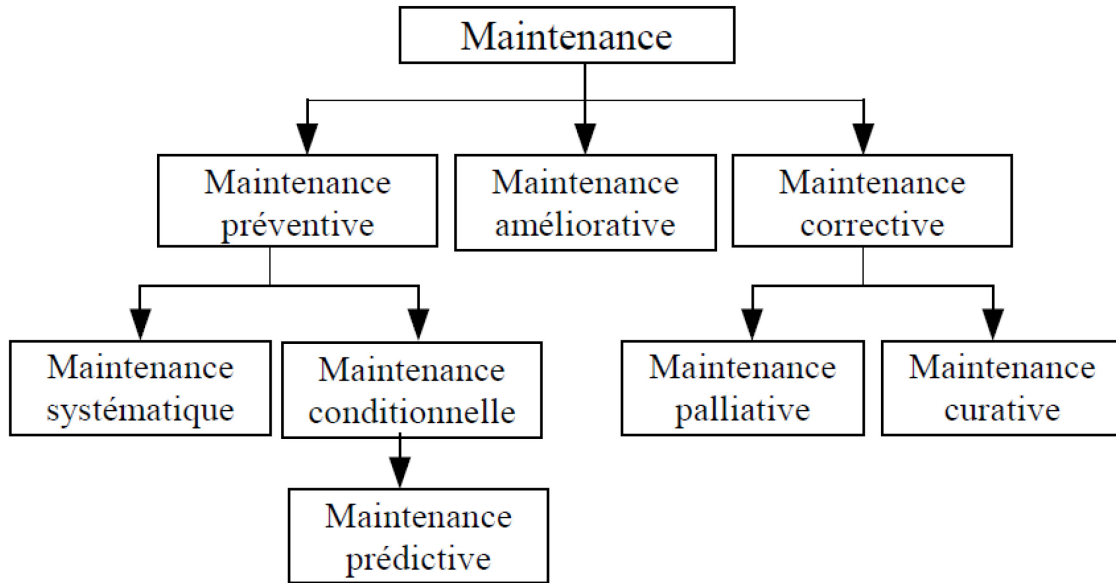


Figure 3.5 : Les différents types de maintenance [AFN88].

- **La maintenance corrective** est définie comme une maintenance effectuée après défaillance (AFNOR X 60-010) [AFN88]. Elle est caractérisée par son caractère aléatoire et requiert des ressources humaines compétentes et des ressources matérielles (pièces de rechange et outillage) disponibles sur place. La maintenance corrective débouche sur deux types d'intervention. Le premier type est à caractère provisoire, ce qui caractérise la maintenance palliative tandis que le deuxième est à caractère définitif, ce qui caractérise la maintenance curative.
- **La maintenance préventive** est définie comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).
- **La maintenance préventive systématique** est une maintenance effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage [AFNOR]. La périodicité des remplacements est déterminée selon deux méthodes : la première est de type bloc et la seconde, de type âge. La politique de remplacement de type âge suggère de remplacer l'équipement à la panne ou après T unités de temps de bon fonctionnement. La politique de type bloc suggère de remplacer l'équipement après une période prédéterminée de temps T, 2T, etc. indépendamment de l'âge et de l'état du composant.

- **La maintenance préventive conditionnelle** est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé [AFN88]. Divers outils comme l'analyse de la vibration et l'analyse d'huile permettent de détecter les signes d'usure ou de dégradation de l'équipement. Ceci s'effectue en mesurant, à chaque inspection, la valeur d'un paramètre de contrôle tel que l'amplitude de déplacement, de vitesse ou d'accélération des vibrations, le degré d'acidité, ou la teneur de particules solides dans l'huile. L'action ne se déclenche que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement, fixé par le constructeur ou par les normes de santé et de sécurité au travail.
- **La maintenance prédictive** (ou prévisionnelle) est « une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation d'un équipement » [AFN88].

3.4.2 Les approches de la maintenance

3.4.2.1 La maintenance productive totale (TPM)

Nakajima [NAK, AFN89], [NAK, AFN87] définit la TPM comme une approche où tous les employés participent à la maintenance préventive par des activités d'équipe. La TPM est une démarche globale d'amélioration permanente des ressources de production qui vise la performance économique des entreprises. C'est une démarche globale dans le sens où elle concerne tout le personnel, du directeur à l'opérateur ainsi que toutes les fonctions de l'entreprise.

Hartmann [HAR89], Nakajima et Shirose [SHI94] définissent la TPM en cinq points clés :

- Le fonctionnement optimal des installations ;
- Un système exhaustif de maintenance préventive, incluant la maintenance autonome et la détection des micro-dégradations par un programme de propreté ;
- Une approche multidisciplinaire (design + production + maintenance) ;
- L'implication de tous les employés et à tous les niveaux ;
- La réalisation des activités de maintenance préventive par petits groupes autonomes.

L'implantation du concept de la TPM doit s'effectuer progressivement, tel qu'exposé par Nakajima. Il propose une période de deux à trois ans aux membres de l'usine (incluant travailleurs et administrateurs) pour adopter cette philosophie. Il conseille d'essayer ce programme dans le cadre d'un projet-pilote avant de généraliser l'expérience.

L'aspect principal à considérer, lors de l'implantation de la TPM, est le facteur humain [MAG91]. Peu de problèmes sont à prévoir du côté technique. Il est donc crucial de bien planifier et gérer le facteur humain pour garantir la réussite d'un tel changement. Les prérequis à la TPM se retrouvent principalement dans la culture d'entreprise et selon le potentiel d'apprentissage des employés, plutôt que du côté technique de la maintenance. Les méthodes d'implantation proposées (Nakajima et Shirose) sont semblables mais non génériques.

3.4.2.2 La maintenance basée sur la fiabilité (MBF)

La maintenance basé sur la fiabilité (RCM – Reliability Centred Maintenance) est une démarche de maintenance qui a fait son apparition dans l'industrie aéronautique vers la fin des années 1960 et au début des années 1970 aux États-Unis [WHE96]. Cette démarche a le risque à l'œil, son objectif principal consiste à améliorer la fiabilité des installations à moindre coût. La RCM est une démarche participative, elle consiste la collaboration des services opération et maintenance pour apporter leurs expertise complémentaire.

La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) est une stratégie de maintenance préventive structurée qui permet de déterminer le programme de maintenance optimisé pour les équipements critiques.

Cependant, elle a un objectif beaucoup plus ambitieux. En effet, le second objectif de l'approche réside dans son utilisation comme vecteur principal d'amélioration de l'organisation. Elle permet à l'opération de bien opérer ses installations selon des standards près établis (standards opérationnels) qui respectent la fiabilité intrinsèque des actifs. C'est la marche initiale nécessaire pour aller vers la certification. Un troisième aspect lié à la conservation des données de maintenance et de production (base de données pour le retour d'expérience) et également un objectif non contournable pour cette démarche.

La MBF consiste à rechercher les causes de défaillance d'un système ou un équipement par une analyse fonctionnelle qui permettra de définir les limites de l'étude, le milieu de fonctionnement, les conditions de fonctionnement d'un système (matériels, pièces, matière, etc.) et les fonctions caractérisant les flux de matière entre les machines de production. Cette approche constitue le moyen le plus sûr de recenser toutes les causes de défaillances à chaque niveau de la décompositions hiérarchique.

Selon Moubray [MOU97], une analyse de MBF à la base permet de trouver des réponses aux questions ci-après.

- 1- Quelles sont les fonctions et la performance standards associées de l'équipement dans son contexte opérationnel présent ?
- 2- Dans quels cas faillit-il à assurer ces fonctions ?
- 3- Quel est la cause de chaque défaillance fonctionnelle ?
- 4- Que se passe-t-il lorsque survient chaque défaillance ?
- 5- Quel est le degré de gravité de chaque défaillance ?
- 6- Que peut-on faire pour éviter chaque défaillance ?
- 7- Que devra-t-on faire lorsqu'une intervention de maintenance préventive adéquate ne peut être réalisée ?

L'analyse peut être réalisée comme une séquence d'activités dont notamment [MOU97] :

- 1- La préparation de l'étude ;
- 2- La sélection et définition du système ;
- 3- L'analyse de défaillance fonctionnelle ;
- 4- La sélection de l'entité critique ;
- 5- L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leurs criticités (AMDEC) ;
- 6- La sélection des actions préventives ;
- 7- L'analyse de comparaison de la maintenance préventive ;
- 8- Le traitement des entités non critique
- 9- L'implémentation
- 10- La collecte et la remise à jour des données en phase opérationnelle.

La maintenance basée sur la fiabilité est une démarche de progrès pour les industriels, elle constitue un processus d'analyse et de décision logique, elle permet ainsi l'élaboration des plans stratégiques de maintenance et d'exploitation des systèmes de productions en partent des conséquences des défaillances.

3.5 Conclusion

Au cours du présent chapitre, nous avons présenté différentes approches d'amélioration continue de la performance des systèmes de production. Il est important de connaître les grandeurs et les indicateurs qui en résultent pour pouvoir implanter un système de contrôle et d'amélioration de performance. Puis, nous avons défini l'indicateur de l'efficacité des équipements de production (TRS) ainsi que ses différentes composantes. À la fin, on a présenté l'outil d'amélioration du Taux de Rendement Synthétique, la maintenance avec ses différentes approches ainsi que les étapes d'implantation de ces dernières.

Dans le prochain chapitre, on s'intéresse à l'analyse de la performance de la ligne de rabotage et au diagnostic des différentes causes de la non-productivité en suivant la démarche DMAIC.

**Chapitre 4 – Impact des temps d’arrêt sur la productivité dans l’usine de
rabotage de bois : application du processus (DMAIC)**

4.1 Introduction

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, les différentes approches de l'amélioration continue (**Kaizen**) ainsi que les outils de résolution de problèmes de performance. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'implantation de l'indicateur de mesure et de suivi de la performance (TRS).

Rappelons que le TRS permet d'évaluer la performance des lignes de production et de garantir un niveau de productivité toujours élevé. Tout cela passe par la réduction de différentes pertes liées à la non-disponibilité, la non-performance et la non-qualité.

Afin d'atteindre l'objectif de notre projet et pour mieux structurer notre démarche d'analyse et de résolution de problèmes, nous adoptons, dans ce chapitre, la démarche DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler) de Six Sigma.

4.2 Le Six Sigma

Le Six Sigma débute en 1986 lorsque le groupe Motorola cherche à mettre en place une méthode pour optimiser ses processus de fabrication en vue de satisfaire ses clients. À cette époque, Motorola constate une variabilité importante de la qualité finale de ses produits et l'explique par des processus de fabrication complexes, des matières premières de qualité variable et l'utilisation de procédures difficiles à comprendre. La production s'écarte de la qualité acceptable par le client. La gestion des rebuts et des réclamations génère des coûts supplémentaires pour l'entreprise et le client est insatisfait.

En statistiques, la lettre grecque sigma σ désigne l'écart type. Six Sigma signifie donc « six fois l'écart type ». Pour atteindre ce niveau d'excellence, le groupe Motorola s'appuie sur les outils de Maîtrise Statistique des Procédés qu'il applique à tous les processus et crée sa démarche d'amélioration connue sous le nom de « Six Sigma ». Les résultats de la démarche sont impressionnants puisque dans les années qui suivent, Motorola améliore ses niveaux de qualité de 4 à 5,5 Sigma et permet l'économie de 2,2 millions de dollars. Le Six Sigma devient célèbre dans les années 1990 lorsque General Electric décide de l'appliquer et de l'améliorer [SIG11].

En résumé la méthode Six Sigma permet :

- La réduction des dépenses en diminuant la quantité de rebuts, de retraitements et de gaspillage ;
- L'optimisation de l'utilisation des équipements de l'entreprise ;
- L'augmentation de la satisfaction des clients ;

- L'augmentation du chiffre d'affaires grâce à la réduction des coûts et à l'amélioration de la qualité [TOU06].

4.3 Déroulement de la méthode de résolution de problèmes (DMAIC).

Le Six Sigma propose d'utiliser une méthode de résolution de problèmes pour piloter les projets (figure 4.1). Cette méthode suit une ligne directrice en cinq étapes nécessaires à l'obtention de résultats fiables, contractée dans l'acronyme DMAIC pour **D**éfinir, **M**esurer, **A**nalysier, **I**nnover et **C**ontrôler.

La démarche DMAIC du Six Sigma agit, avec sa boîte à outils, comme un filtre qui permet de passer d'un problème complexe avec de nombreuses variables non maîtrisées à une situation où la qualité est maîtrisée.

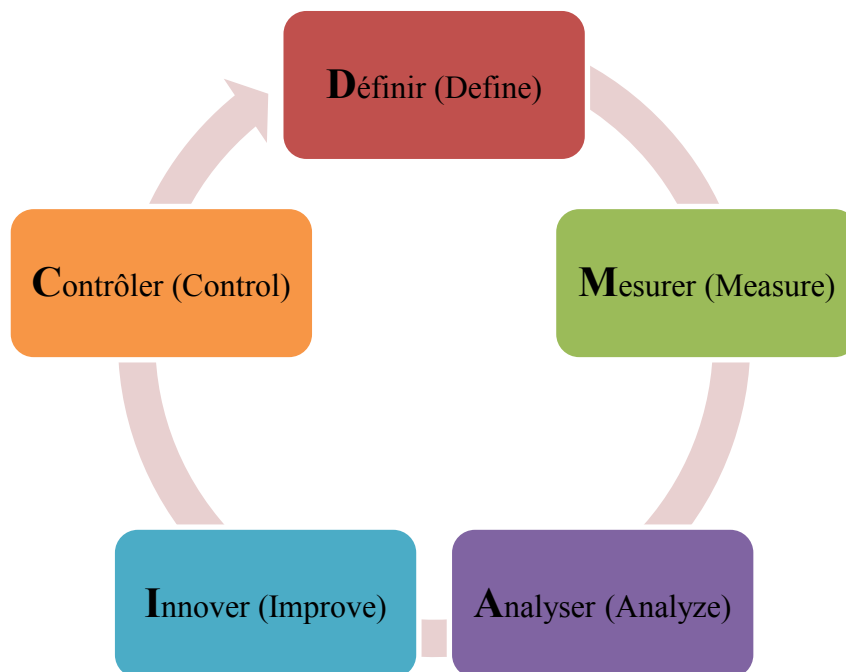


Figure 4.1 : DMAIC- Processus de résolution de problèmes de Six Sigma [DMA11].

➤ **D** pour Define ou Définir

Cette phase permet de clarifier les enjeux du projet, d'identifier les attentes du client, de fixer les objectifs à atteindre et de désigner les protagonistes du projet. Dans cette première étape, il est nécessaire de focaliser sur le processus qui génère le produit ou le service et de le cartographier afin d'en avoir une bonne connaissance [CHO04], [DMA11].

➤ **M** pour Measure ou Mesurer

Il s'agit d'une étape de collecte de données sur les paramètres mesurables du processus. L'objectif est de déterminer ce que le processus concerné est capable de fournir, à savoir son

sigma. Au cours de cette étape, il est important de se concentrer sur les paramètres critiques pour la qualité, c'est-à-dire ceux dont l'influence sur le résultat est la plus grande [CHO04], [DMA11].

➤ **A** pour Analyze ou Analyser

Les chiffres obtenus lors de l'étape précédente sont analysés afin de calculer les écarts de performance, c'est-à-dire les écarts entre ce qui est fait au quotidien et ce qui peut être atteint. Il faut ensuite étudier les origines de la variabilité du processus et en déterminer les causes racines. À ce stade, des solutions pour supprimer les causes racines de la variabilité du processus concerné sont proposées afin de répondre aux objectifs [CHO04], [DMA11].

➤ **I** pour Improve ou Innover

Les solutions proposées sont validées par l'équipe projet puis l'aptitude du processus optimisé est évaluée afin de s'assurer de leur impact. Enfin, un plan d'action détaillant la mise en œuvre des solutions retenues doit être élaboré afin de gérer au mieux les changements induits par les solutions mises en place [CHO04], [DMA11].

➤ **C** pour Control ou Contrôler

Cette dernière étape consiste à contrôler le processus pour s'assurer que le problème est résolu et rester au niveau de qualité atteint. Au cours de cette étape, il faut maintenir les bénéfices acquis en standardisant le processus. Enfin, le bilan financier est établi afin de chiffrer les gains réalisés [CHO04], [DMA11].

L'application de la démarche DMAIC nécessite de recourir à de nombreux outils s'appuyant sur des techniques statistiques et différentes méthodes d'analyse de processus (type Pareto, diagramme d'Ishikawa, AMDEC, 5 pourquoi, etc.) dont certains seront développés dans la suite de cette étude.

4.4 Déploiement du processus de résolution de problèmes (DMAIC)

Le processus DMAIC peut être décrit comme étant un processus structuré de résolution de problèmes qui se base sur des données. En d'autres termes, il s'agit là d'un processus qui permet de réaliser des activités spécifiques dans un ordre spécifique, en se basant sur des données recueillies à chaque phase afin d'étayer les décisions, tout en veillant à ce que les solutions mises en place éliminent la cause du problème.

4.4.1 Définir

Dans un premier temps on s'intéresse d'abord à définir la problématique, à délimiter précisément les paramètres du projet et à fixer son objectif. Dans un deuxième temps on

cartographie les flux de matière et d'information à l'aide du SIPOC (Suppliers-Inputs-Process-Outputs-Customers).

4.4.1.1 Rappel sur la problématique et l'objectif du projet

➤ Contexte

L'industrie de rabotage de bois nécessite une production de qualité à des prix compétitifs. L'impact des temps d'arrêt sur la productivité est un phénomène qui affecte la performance du procédé et la maîtrise de ce phénomène constitue une avancée pour l'entreprise.

En effet, le zéro défaut n'existe pas dans l'industrie du rabotage, à cause de l'occurrence de défaillance des machines. La nécessité de mieux traiter, voire éviter les pannes nous conduit à l'usage répandu de stratégies de maintenance préventive qui permet d'améliorer la fiabilité des actifs et d'augmenter les performances de la production ainsi que la qualité des produits finis.

➤ Problématique

La performance du procédé de rabotage est affectée par plusieurs contraintes notamment la qualité des **intrants** qui a un impact direct sur la **fiabilité** des actifs. Parallèlement le processus de rabotage de bois est **divergent** ; la chaîne de production est utilisée pour fabriquer une grande variété de produits analogues, mais non identiques. Le procédé consomme des paquets de bois séché et génère simultanément après classification plusieurs produits (pièce de bois) de différentes longueurs et dimensions. Chaque changement de lot de fabrication nécessite un nouveau réglage.

Cette divergence a généré des contraintes majeures au niveau de la **performance** de la ligne de rabotage. L'exploitation d'un tel système nécessite des techniques d'évaluation se basant sur deux principaux concepts : **l'efficacité** et la **sûreté de fonctionnement**.

La résolution des problèmes de la performance des systèmes nécessite que l'on connaisse sa structure, ses fonctions principales et secondaires, les différents éléments qui le composent et son mode d'exploitation. La performance industrielle se distingue par la disponibilité, la productivité, la qualité et la flexibilité des ressources. Lorsqu'une entreprise envisage d'améliorer sa productivité, elle doit :

- Assurer la disponibilité des machines et de l'outillage durant la production ;
- Réduire les facteurs responsables des micro-arrêts (non-performance) ;
- Obtenir la qualité et la quantité de produits finis prévues dans la planification de la production.

Sur le constat d'une difficulté à satisfaire simultanément et efficacement ces trois enjeux, l'industrie de rabotage de bois doit supprimer l'imprévu et le hasard dans ses activités de production.

➤ **Objectif**

L'objectif de notre projet est de mesurer et d'analyser la performance du procédé de rabotage de bois afin d'identifier les mauvais acteurs qui affectent la productivité.

En effet, l'amélioration des processus de production réside dans la bonne appréciation des indicateurs de performance. Dans la section précédente, nous avons discuté un indicateur majeur de l'efficacité, le TRS.

La mesure de cet indicateur représenterait une avancée pour l'industrie de rabotage de bois. Le TRS rend compte de l'utilisation effective des équipements de productions, il permet ainsi d'identifier les différentes sources de non-productivité.

AYEL [AYE03], a présenté le TRS comme l'un des plus importants indicateurs d'aide à la décision, il permet à l'industrie de :

- mieux comprendre et d'optimiser les flux de production ;
- se doter d'outils d'aide à la décision dynamique et appropriés ;
- organiser une politique de maintenance adoptée aux problèmes de la performance.

La connaissance de cet indicateur est importante pour l'appréciation de l'incompatibilité de la performance dans un processus **divergent** tel que le rabotage. La performance d'un système de production s'obtient d'un contrôle efficace des dysfonctionnements dus aux facteurs diminuant l'efficacité.

Afin de permettre une meilleure évaluation de la performance du système de rabotage, nous allons présenter dans le chapitre 5 les différentes causes potentielles qui affectent le taux de rendement synthétique du procédé de rabotage. Cette présentation sera mise à la disposition des décideurs afin d'améliorer le TRS.

4.4.1.2 Cartographie du processus (SIPOC)

Le SIPOC est un outil qui permet de créer une cartographie du processus en définissant :

- Les fournisseurs (Suppliers) : les personnes ou groupes qui fournissent tout ce qui est transformé au cours du processus (informations, formulaires, matériaux) ;
- Les entrées (Inputs) : les informations ou les matériaux utilisés (matières premières) ;
- Le processus (Process) : les différentes étapes du processus ;
- Les sorties (Outputs) : le produit, le service ou les informations fournis au client ;
- Les clients (Customers) : l'étape suivante dans le processus ou le client final.

Le SIPOC se présente sous la forme d'un schéma (tableau 4.1). Les principaux avantages de cet outil font qu'il porte à se concentrer sur l'optimisation du processus en entier et pas uniquement sur des éléments pris de façon individuelle et aussi qu'il incite à écouter le client. Il permet également de reconnaître le rôle important des fournisseurs en amont du processus [THO11].

Nom du processus		
Procédé de rabotage de bois		
1- Fournisseurs	3- Description du processus	4- Clients
<ul style="list-style-type: none"> - Usine de séchage - Entrepôt de bois séché 	<p>Ligne de finition (rabotage)</p> <pre> graph TD A[Décanteur] --> B[Raboteuse] B --> C[Trieur] C --> D[Empileuse] D --> E[Sertisseuse] E --> F[Emballeuse] </pre> <p>Ligne de fabrication des paquets</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Département de commercialisation. - Industrie de deuxième transformation.
2- Intrants	3- Extrants	
<ul style="list-style-type: none"> - Paquets de bois séché - Recette de production 	<ul style="list-style-type: none"> - Paquets de bois fini selon la recette de production - Pièces de bois déclassées 	
Processus débute lorsque		Processus termine lorsque
Le décanteur reçoit le premier paquet de bois		Les paquets de bois fini sont emballés

Tableau 4.1 : SIPOC du processus de rabotage de bois.

Le procédé de rabotage est un système de production en série, les unités de production étant interconnectées par des convoyeurs qui assurent le transport de la matière entre les unités de production. Le procédé est alimenté par l'unité de séchage ou l'entrepôt de bois séché.

Le système consomme des paquets de bois séché comme intrant et produit des pièces de bois fini comme extrant. À la fin du procédé, les pièces produites qui ne correspondent pas à la recette de production sont déclassées comme sous-produit fini et le reste des pièces est empilé puis emballé en paquets de bois fini.

La production est exécutée selon des recettes considérées comme des intrants (tableau 4.6). La recette décrit la méthode de fabrication adaptée à l'atelier. Elle définit :

- La qualité des intrants ;
- La dimension (épaisseur, longueur et la largeur) des intrants et des pièces sortantes ;
- Le taux d'humidité des paquets intrants ;
- La vitesse de production.

Les clients de notre procédé sont les industries de la seconde transformation du bois comme l'industrie du meuble ou le département de la commercialisation chargé de la vente des produits finis.

4.4.2 Mesurer

La phase de mesure est une phase de recueil de données et suit le schéma suivant :

- Approfondissement de la cartographie du processus ;
- Établissement d'une collecte de données ;
- Analyse des données afin de dégager des tendances qui seront étudiées dans la phase d'analyse.

4.4.2.1 Approfondissement de la cartographie du processus

Pour avoir une représentation visuelle des principaux équipements décisionnels de notre processus, on a fait appel à la norme **ANSI/ISA-88** pour améliorer la compréhension du système en le schématisant afin de faciliter l'identification des zones de dysfonctionnement.

➤ **La norme ISA88** - « Batch Control » a été publiée pour la première fois en 1995. Elle avait pour objectif de faciliter le contrôle des procédés discontinus flexibles « Batch ». Elle est utilisée pour identifier toutes les étapes du processus à tous les niveaux de l'entreprise.

Seuls les processus discontinus nommés «Batch» on fait l'objet d'une action normative, la raison tient dans la problématique particulière de ces processus.

La norme repose sur trois modèles inter-reliés :

- Le modèle procédé : définit le procédé générique de fabrication (transformation nécessaire à la fabrication d'un produit) ;
- Le modèle procédural : définit la hiérarchie fonctionnelle selon le modèle procédé ;
- Le modèle physique : définit la hiérarchie d'équipement de fabrication, permettant d'accomplir les fonctions listées dans le modèle physique.

Dans la suite de notre étude on a exploité le modèle physique de la norme pour la mise en place de la hiérarchie des équipements du procédé de rabotage (figure 4.3). La figure 4.2 présente le modèle physique selon la norme ISA 88, dans ce modèle «Chaque entité d'équipement est une agrégation d'entités d'équipement de niveau inférieur. Le modèle est extensible et réductible, toutefois les quatre niveaux inférieurs ont une définition et un rôle précis qui doit être pris en compte dans la modélisation» [ANS95].

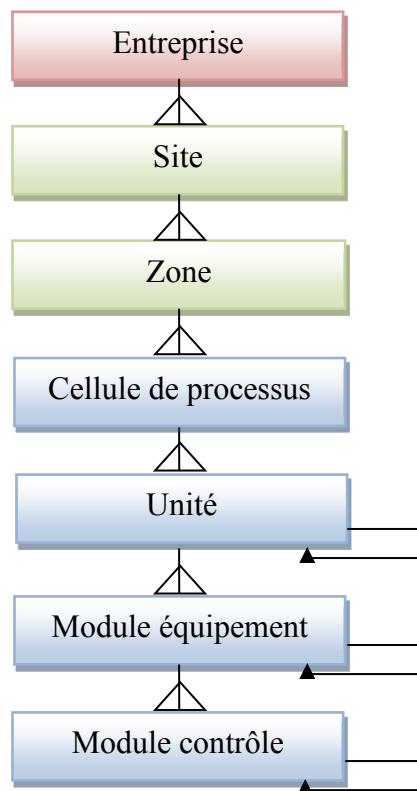


Figure 4.2 : Modèle physique des équipements selon la norme ISA88.

La figure 4.3 résume le modèle physique du procédé de rabotage. Cette présentation est utilisée pour identifier toutes les étapes et les principaux points décisionnels de notre processus. En effet le procédé de rabotage possède deux lignes :

- Ligne de finition : elle comporte trois unités (Décanteur, Raboteuse et Trieur) et chaque unité comporte des modules équipement qui assurent son bon fonctionnement. L'ébouteuse comporte un ensemble de modules contrôle qui assurent la mesure de différents indicateurs de qualité de production (humidité, contrainte mécanique et contrôle de la qualité de surface des pièces rabotées).
- Ligne de fabrication des paquets : représente l'étape finale dans notre procédé de production et elle comporte trois unités (Empileuse, Sertisseuse et Emballeuse).

Dans notre étude, on s'intéresse à l'analyse de la performance de la ligne de finition, comme c'était défini dans l'objectif du projet.

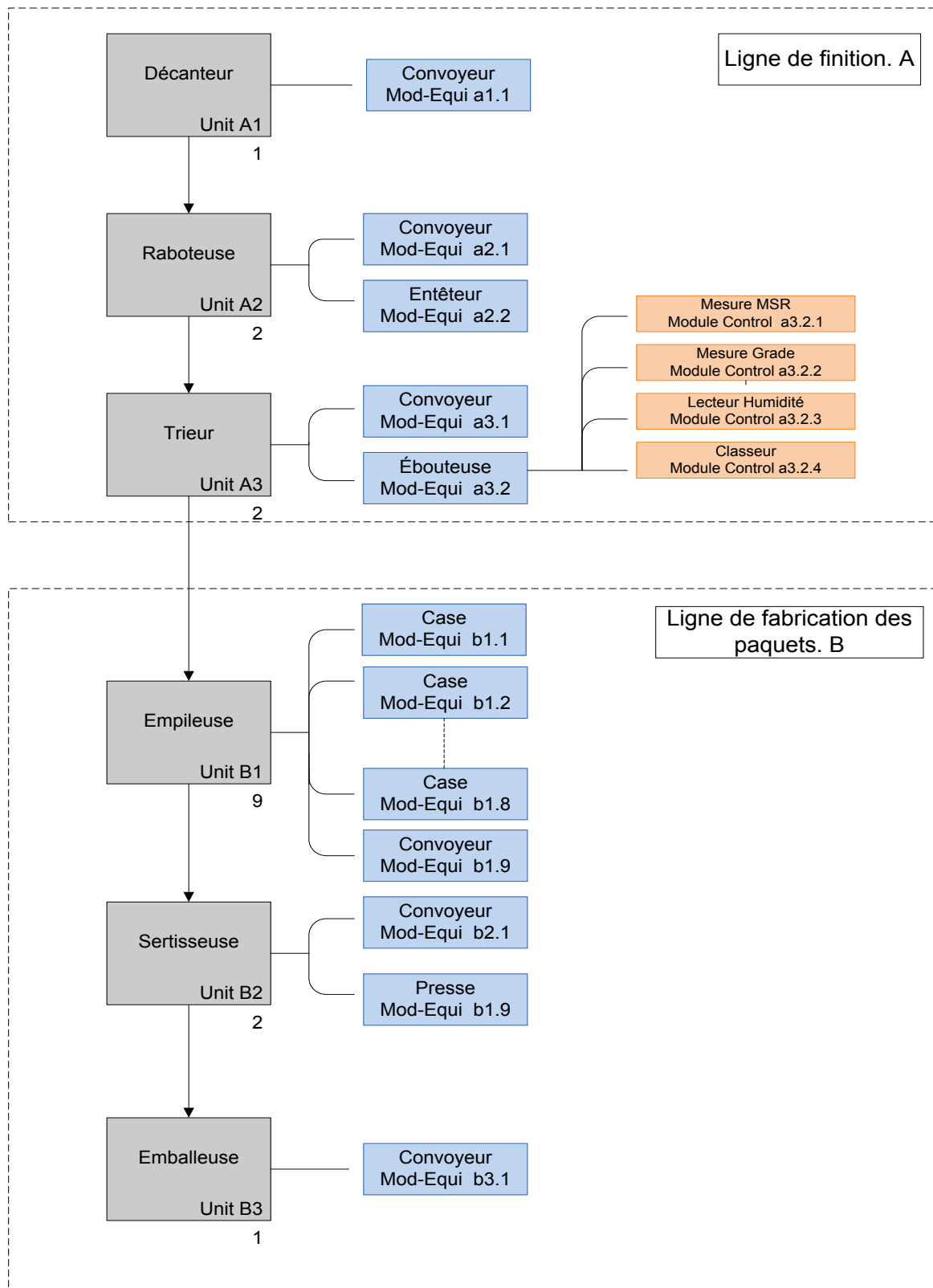


Figure 4.3 : Modèle physique des équipements du procédé de rabotage.

4.4.2.2 Collecte des données et mesure de la capacité du processus

La collecte des données de production est assurée par un ensemble de capteurs installés sur les équipements de production. L'information est acheminée et sauvegardée dans un automate programmable sous forme de rapport de production.

Pour bien structurer cette phase qui représente une étape cruciale dans notre processus de résolution de problème, on a opté pour un modèle de mesure des temps d'états (figure 4.4) inspiré des figures 3,2 et 3,3. On a utilisé un échantillon de données qui couvre une période équivalant à une semaine de production pour réaliser notre analyse, cette période représente 79,5 heures.

Temps requis (T_R) : le temps passé dans l'atelier pour réaliser la totalité de la production planifiée	
Temps brut de fonctionnement (T_F) : le temps pendant lequel les machines fonctionnent pour réaliser la production.	Temps perdu pour arrêts
Temps net de fonctionnement (T_N) : le temps que l'on aurait dû engager pour réaliser la production.	Temps perdu pour ralentissements
Temps utile (T_U) : le temps que l'on aurait dû engager pour produire que les bonnes pièces	Temps perdu pour non qualité

Figure 4.4 : Présentation des temps perdus.

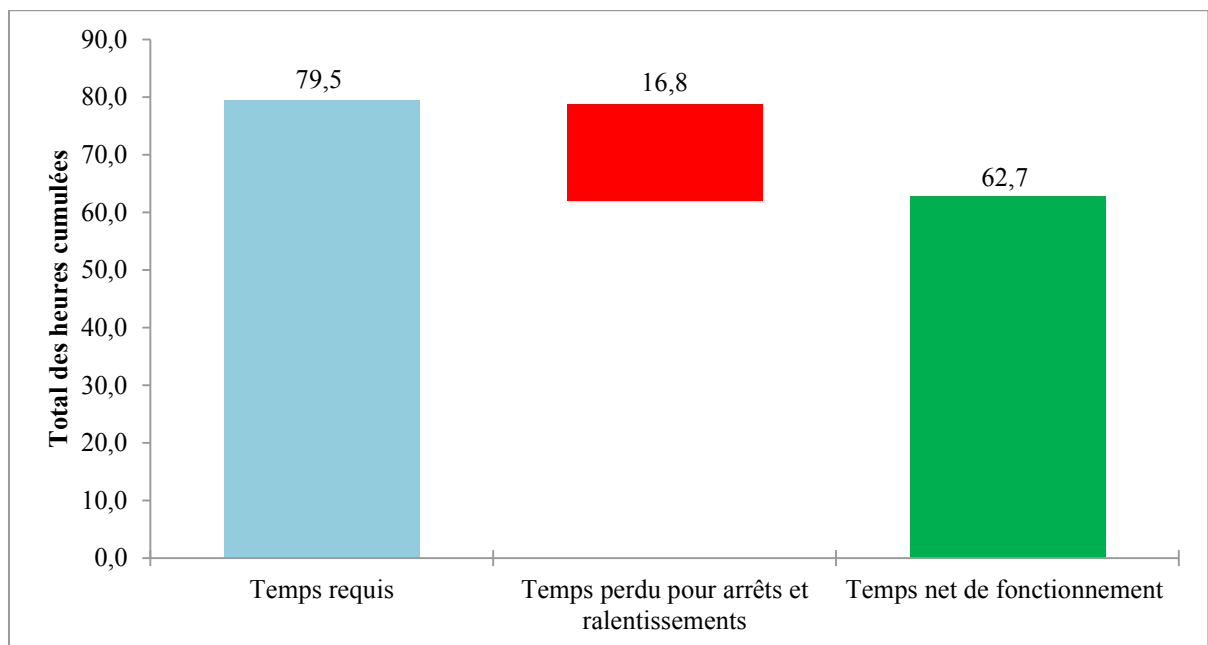


Figure 4.5 : Diagramme du temps net de fonctionnement de la ligne de rabotage.

La figure 4.5 représente la mesure du temps net de fonctionnement par rapport au temps requis. La mesure indique clairement que sur 79,5 heures de temps passé dans l'usine pour réaliser la production planifiée la compagnie a produit que 62,7 heures. Cette valeur représente le temps net de fonctionnement. 16,8 heures sont donc considérées comme des pertes dues aux arrêts et aux ralentissements.

Nous avons complété, dans cette phase, la collecte des données et leur première interprétation. Il reste cependant des éléments importants à travailler à partir de ces données.

Dans la phase «Analyser», on vise à trouver les principales causes des pertes et à démontrer concrètement leur importance dans le processus.

4.4.3 Analyser

Les étapes 1 et 2 ont permis de dresser une cartographie du processus et de récolter des données à partir des moyens de mesure.

Il s'agit maintenant d'analyser ces données afin de déterminer les paramètres réellement influents dans la variabilité du processus. Tel est l'objectif de la phase d'analyse et les outils sont nombreux.

L'analyse des données issues de la phase précédente se déroule donc selon ce plan :

- Implantation des indicateurs de performance et analyse du Taux de Rendement Synthétique ;
- Analyse des causes de faiblesse du TRS de la ligne de rabotage.

4.4.3.1 Analyse du Taux de Rendement Synthétique (TRS)

Un système est caractérisé par le processus qu'il héberge, Joël De Rosnay définit dans son ouvrage « Le Macroscopie », un système comme « un ensemble d'éléments en interaction dynamique structurés en fonction d'un objectif ». La norme ISO 9000, définit ainsi un processus comme « ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforment des éléments d'entrée en éléments de sortie ».

Dans l'usine de rabotage, les éléments d'entrée sont des pièces de bois séchées et les éléments de sorties sont des pièces de bois usinées destinés aux clients.

Cette transformation physique se traduit financièrement par la valeur ajoutée brute, à savoir la différence entre le prix de vente et le prix d'acquisition de la matière première. Cette valeur ajoutée peut ensuite être comparée aux charges fixes d'exploitation.

La performance globale d'un système de production peut être appréhendée à travers trois dimensions. Celles-ci sont comparées aux caractéristiques d'un tuyau et sont représentées par la figure 4.6.

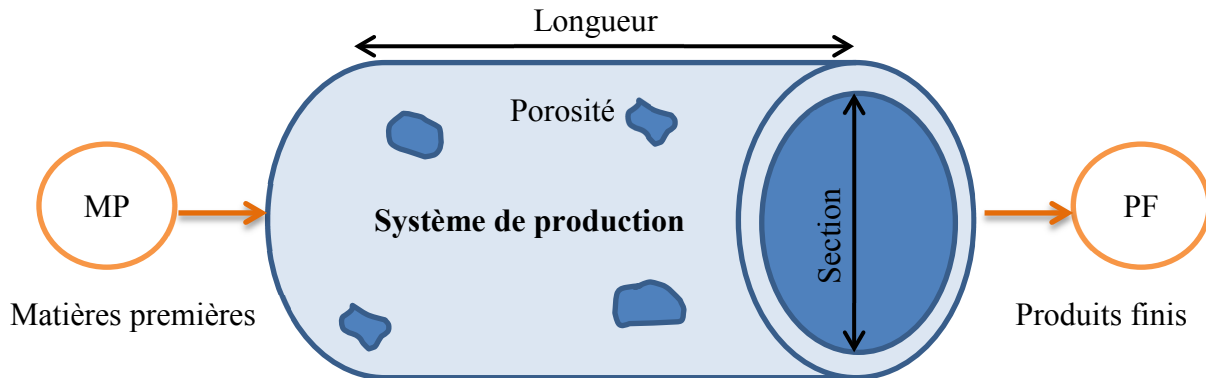


Figure 4.6 : Présentation systématique d'un système de production (adopté de la performance industrielle globale) [GRA12].

Les trois dimensions sont :

- Débit : (section du tuyau) représente la quantité de produits générés par unité de temps, cette dimension est mesurée par le temps brut de fonctionnement ;
- Vitesse : (longueur du tuyau) représente le temps écoulé entre l'arrivée dans le système des éléments incorporés (MP) et la fin de l'usinage, la vitesse est représentée par le temps net de fonctionnement ;
- Qualité : (porosité du tuyau) représente la quantité produite des pièces conformes, elle est ainsi exprimée par le temps que l'on aurait dû engager pour produire que les bonnes pièces (temps utile).

À partir de cette présentation et pour évaluer le rendement global de la ligne de rabotage, nous allons déterminer dans ce qui suit les temps d'état représentant les dimensions de notre système.

Toutes les mesures de la phase précédente ont été analysées et regroupées selon la définition visuelle du TRS (figure 3.3, chapitre 3) dans la figure 4.7.

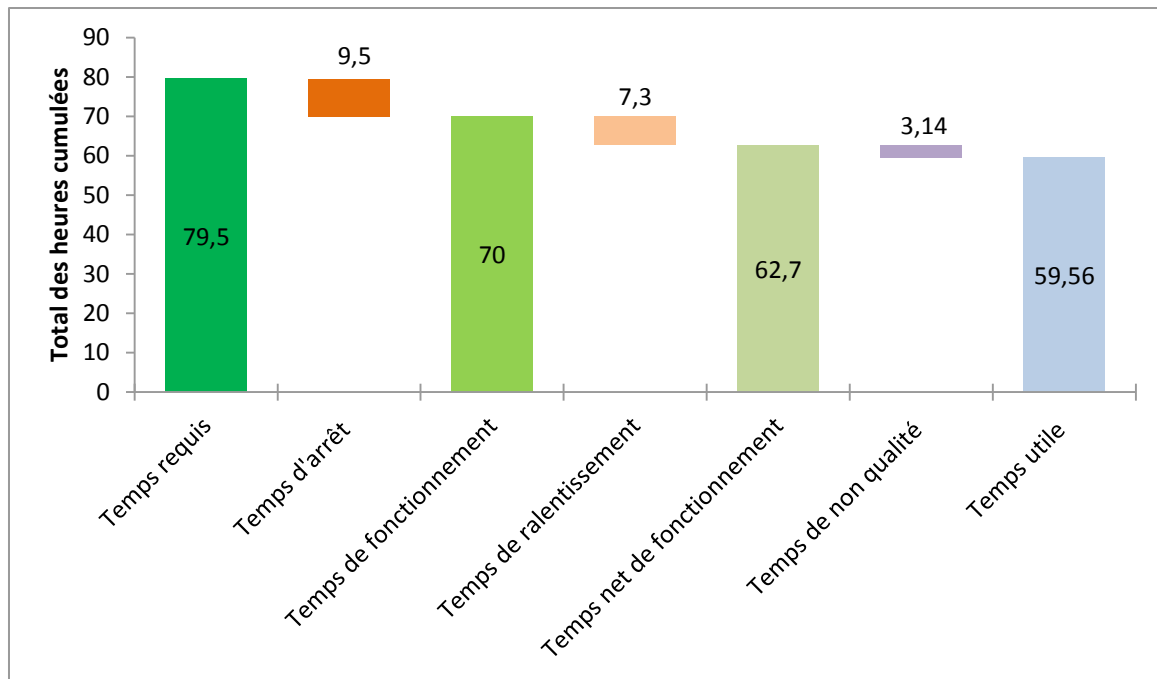


Figure 4.7 : Diagramme des temps d'état et temps perdus de la ligne de rabotage.

Dans un premier volet, l'analyse des temps d'état nous a permis de distinguer le temps d'arrêt du temps de ralentissement identifié au paravent dans la phase «Mesurer» (figure 4.5). Dans le second volet, elle a révélé les différentes pertes de temps qui caractérisent les indicateurs secondaires du taux de rendement synthétique ainsi que les dimensions du système de rabotage présentées dans la figure 4.6 :

- Débit : influencé par la perte de temps dû à la non-disponibilité ;
- Vitesse : influencée par la perte de temps dû à la non-performance ;
- Porosité (fuites) : influencée par la non-qualité. Les fuites sont mesurées à partir du temps que l'on aurait dû mettre pour ne produire que les pièces bonnes en respectant les gammes de production.

En effet, chaque rebut ou déclassement de produit retarde à hauteur de son temps de cycle l'avancement de l'ensemble du lot. Le déclassement de produit conduit également à surdimensionner les lots de produits fini et par conséquent engendre une augmentation des stocks et augmente les coûts.

Au sein d'une démarche structurée d'analyse et d'amélioration, nous avons opté pour la décomposition des 80% des temps perdus influencés par les arrêts et les ralentissements. Cette décomposition démontre les temps perdus pour les secteurs ayant le plus fort impact sur la

performance globale de la ligne, à savoir le débit et la vitesse d'écoulement des produits.

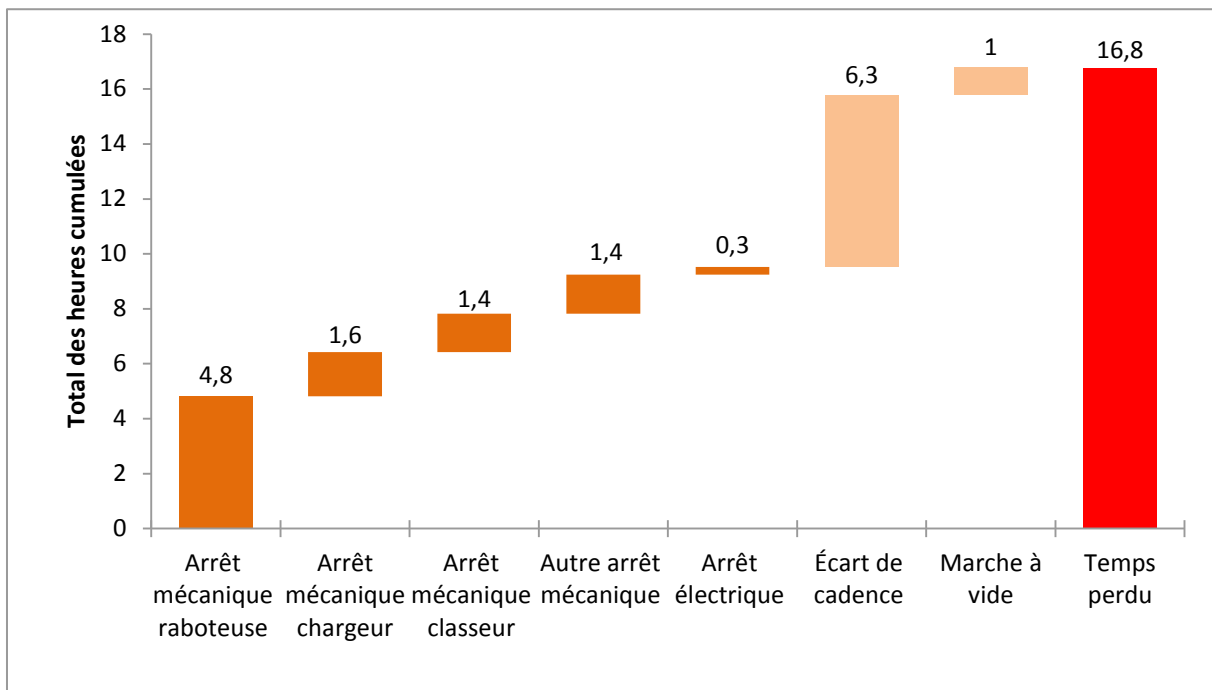


Figure 4.8 : Diagramme des temps d'arrêts et de ralentissements de la ligne de rabotage.

- **Le temps perdu dû aux arrêts** : les arrêts affectent directement le débit d'écoulement de la production (disponibilité), le temps perdu regroupe l'ensemble des arrêts mécaniques et électriques. Il représente 57% des pertes de temps.
- **Le temps perdu dû aux ralentissements** : affecte directement la vitesse d'écoulement de la production (performance), réunissant l'écart de cadence et la marche à vide, représente 43 % des pertes.

Finalement après la présentation des différents temps d'état ainsi que la décomposition de ces derniers, nous procéderons à l'analyse du TRS.

Tel que présenté dans la figure 3.3 au chapitre 3, le TRS est calculé à partir de trois indicateurs majeurs :

- Taux de disponibilité opérationnelle (D_o)

$$D_o = \frac{\text{temps de fonctionnement}}{\text{temps requis}} = \frac{T_F}{T_R} = \frac{70}{79.5} = 88\%$$

- Taux de performance (T_p)

$$T_p = \frac{\text{temps net}}{\text{temps de fonctionnement}} = \frac{T_N}{T_F} = \frac{62.7}{70} = 90\%$$

- Taux de qualité (T_q) : Le taux de qualité est exprimé comme le rapport du temps utile sur le temps net.

$$T_q = \frac{\text{temps utile}}{\text{temps net}} = \frac{T_U}{T_N} = \frac{59.56}{62.7} = 95\%$$

Finalement le $TRS = T_q * T_p * D_o = 0.88 * 0.9 * 0.95 = 75\%$

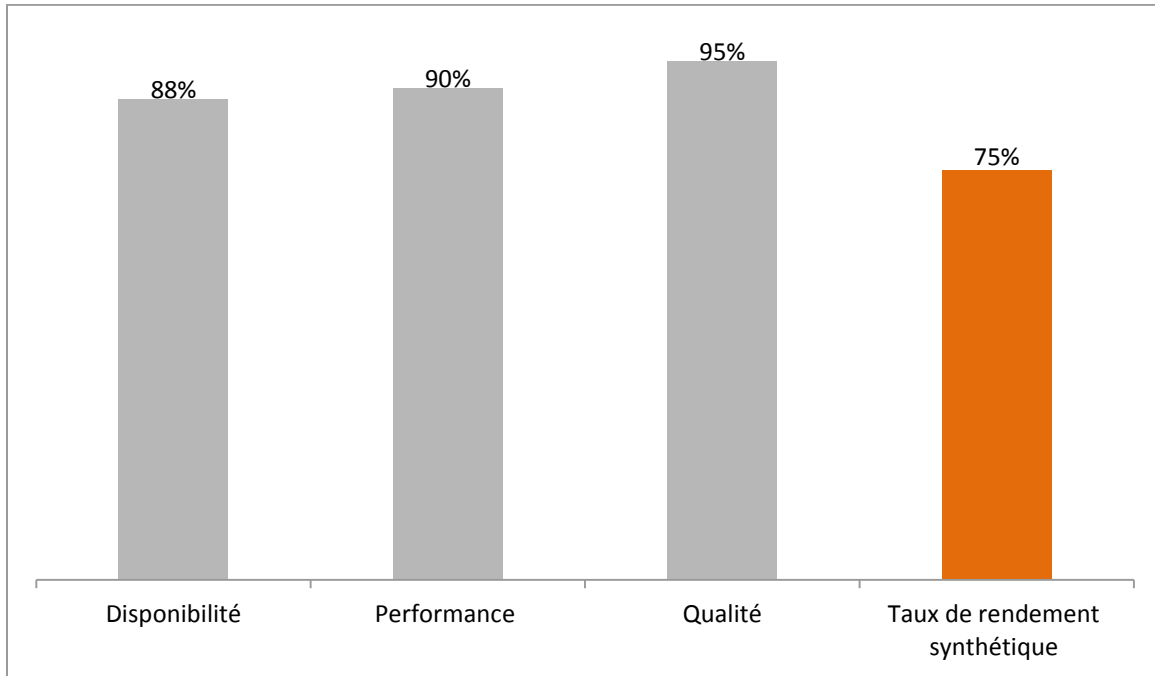


Figure 4.9 : Diagramme du Taux de Rendement Synthétique.

4.4.3.2 Analyse des causes de faiblesse du TRS de la ligne de rabotage

L'optimisation des processus de production réside dans la bonne appréciation des indicateurs de performance. Le TRS est reconnu actuellement comme outil fondamental de mesure de performance des systèmes de production.

L'analyse des indicateurs secondaires du TRS permet de mesurer les dimensions du système de production présentées auparavant par la figure 4.6 ; le débit de production, la vitesse et les fuites.

L'implantation de cet indicateur (TRS) est importante pour l'appréciation de l'incompatibilité coût – délais – qualité.

Il représente un excellent outil d'investigation. Mais pour progresser, savoir ne suffit pas, il faut comprendre. Pour cela nous avons présenté dans le diagramme des temps d'arrêts et de ralentissements (figure 4.8) un recueil détaillé des causes de non rendement synthétique. 80% des pertes de temps sont dues aux arrêts mécaniques, électriques et aux ralentissements.

Il ressort de cette analyse que l'amélioration de la capacité productive passe par la maîtrise des temps d'état présentés dans la figure 4.4, à savoir le temps brut de fonctionnement et le temps net de fonctionnement.

Les causes responsables de la baisse du TRS peuvent être regroupées dans le diagramme dit « arbre des causes de faiblesse du TRS » présenté ci-après par la figure 4.10.

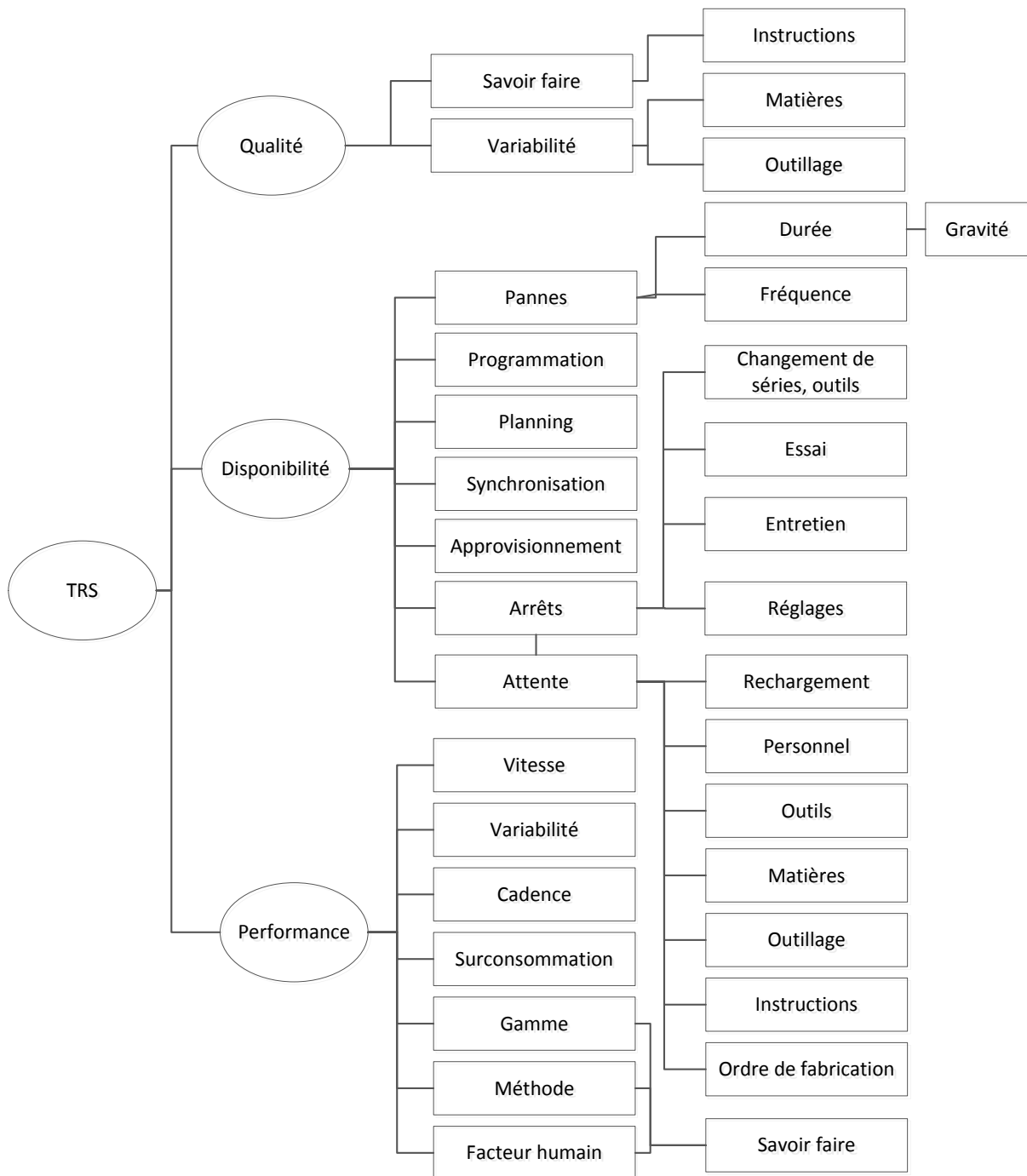


Figure 4.10 : Arbre des causes de faiblesse du TRS [HOH14].

L'objectif ultime de l'analyse du taux de rendement synthétique de la ligne de rabotage est de ressortir les principaux facteurs affectant la productivité. 80% des pertes de temps mesurées affectent directement la disponibilité et la performance de la ligne de rabotage, ils sont représentées comme suite :

- **Pertes dues aux ralentissements** : 43% de la problématique, réunissant :
 - Écart de cadence : 86% des pertes, l'écart de cadence est à l'origine un problème dû au manque de fiabilité ;
 - Marche à vide : 14% des pertes, elle est à l'origine des changements de fabrication (recette).

Selon EFAGA, l'augmentation du taux de performance des lignes de production doit passer par « une diminution des écarts de cadence, en améliorant l'organisation, la fiabilité des équipements et le temps de mise en marche de l'équipement. Ceci permet d'augmenter le temps net de fonctionnement. Le taux de performance pourra tendre vers 95% (valeur internationale) » [EFA03].

- **Pertes dues aux arrêts** : les pertes dues aux arrêts affectent directement le débit de la production, les arrêts représentent 57% de la problématique.

Pour déterminer les causes premières des pertes de disponibilité, voire quantifier le problème par équipement. Nous avons utilisé le principe de Pareto, cette méthode est parfaitement adaptée à la résolution des problèmes de temps d'arrêt imprévu (figure 4.11).

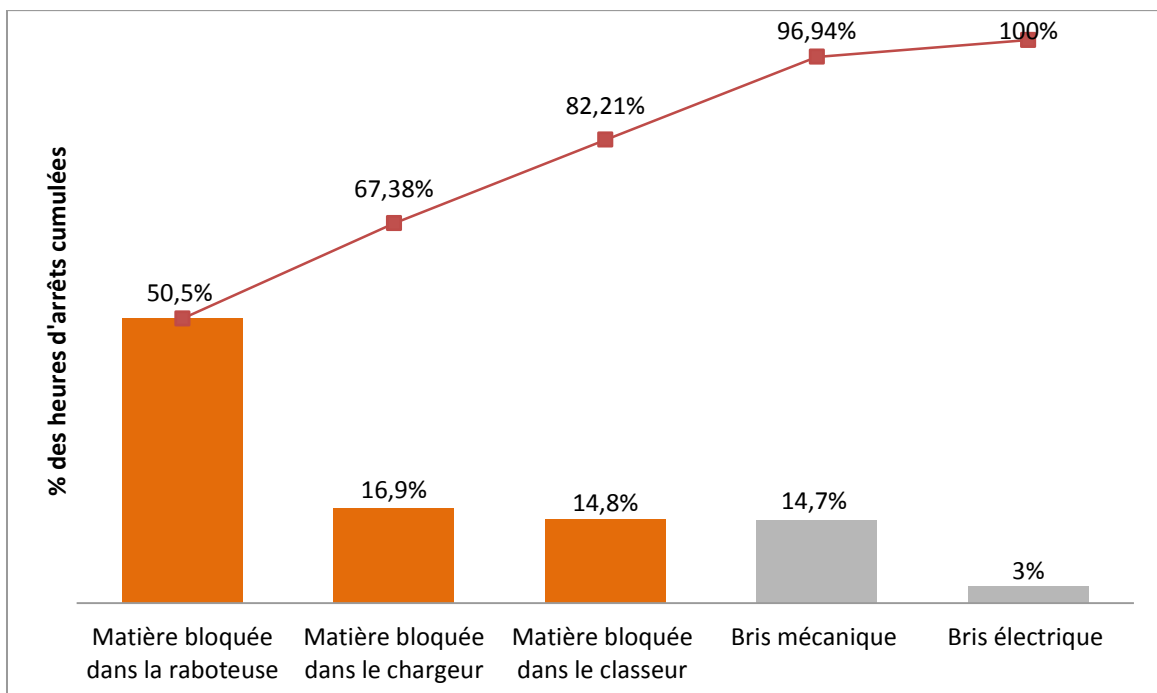


Figure 4.11 : Diagramme de Pareto des origines d'arrêt.

À partir du diagramme de Pareto, également connu sous le nom de règle des 80/20 on remarque que 82% des pertes dues aux arrêts sont à l'origine du blocage de la matière dans les équipements de production.

À ce stade d'analyse, il est difficile de mettre le doigt sur la cause fondamentale du problème de blocage de la matière. L'identification de la cause racine de ce problème exige des données précises afin de réaliser une analyse plus poussée. Il n'y a rien de plus facile que de confondre le vrai problème avec ses symptômes et ses causes présumées.

En effet, le problème de blocage de la matière peut avoir plusieurs causes fondamentales (manque de la fiabilité, qualité des intrants, manque de réglage des équipements, etc.).

Par conséquent, les pertes de disponibilité sont généralement liées à la sûreté de fonctionnement du système de production (SdF). « La sûreté de fonctionnement (SdF) d'un système permet d'établir le degré de fonctionnement que l'on peut lui attribuer dans le cadre de la mission qu'il doit assurer » [SAS98].

Cette notion est définie en détail dans le chapitre1, les principales techniques d'analyse de la SdF sont :

- AMDE : Analyse des modes de défaillance et de leurs effets ;
- AMDEC : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticité ;
- AdD : Arbre de défaillance.

4.5 Conclusion

L'évaluation de performance des systèmes de production nécessite que l'on connaisse sa structure, ses fonctions et les différents éléments qui le composent. Un système de production simple ou complexe est caractérisé par les différents états qu'il occupe durant le cycle de production, le changement d'état résulte de l'occurrence des événements.

La démarche de résolution de problème (DMAIC) présentée dans ce chapitre a permis dans la première phase «Définir» de déterminer les paramètres de l'analyse, cartographié les flux de matière et d'information à l'aide du processus SIPOC.

Dans la deuxième phase «Mesurer» nous avons détaillé la cartographie du processus et analysé les données de production, ce qui a permis de quantifier le problème de non performance de la ligne de rabotage.

Dans la troisième phase «Analyser» nous avons présenté la répartition des différents temps d'état de la ligne de rabotage selon la norme NFE 60-182, cette présentation à montrer clairement les pertes ayant un impact majeurs sur le rendement de la ligne de rabotage, à savoir :

- Le temps brut de fonctionnement (débit de la production) : affecté par les arrêts imprévus ;
- Le temps net de fonctionnement (vitesse de la production) : affecté par les écarts de cadence.

À la fin, nous avons complété l'analyse quantitative des indicateurs secondaires du taux de rendement synthétique de la ligne de rabotage, la valeur globale du TRS est de 75%.

Cette analyse a permis d'ouvrir une voie dans la connaissance de la mesure de l'efficacité de la ligne de rabotage mais il reste de nombreuses voies à exploiter et à développer.

Tout d'abord il faut, dans le futur analyser la sûreté de fonctionnement (SdF) de la ligne de rabotage afin d'identifier les causes fondamentales à l'origine des pertes de disponibilité.

Cette analyse permettra de continuer les travaux concernant les phases «Améliorer» et «Contrôler» du processus (DMAIC), voire améliorer le taux de rendement synthétique de la ligne de rabotage. Le TRS pourra tendre vers 85% (valeur internationale).

Le chapitre suivant présente une analyse Ishikawa (Fishbone diagramm) des différentes causes potentielles ayant le plus fort impact sur la dégradation de performance globale de la ligne de rabotage, cette analyse servira comme piste de départ à l'analyse de la sûreté de fonctionnement.

Chapitre 5 – Résultats et conclusion : synthèse de l'étude

Ce chapitre présente des pistes de solution pour l'atteinte des phases « Améliorer » et « Contrôler » de notre processus de résolution de problèmes. La présentation se fait sous forme de synthèse finale de l'analyse et nous proposons, en conclusion, une recommandation pour l'amélioration de l'efficacité de la ligne de rabotage.

5.1 Synthèse finale de l'analyse

À ce stade et après avoir réalisé un audit avec les différents intervenants dans l'usine de rabotage, il apparaît nécessaire d'établir la liste la plus complète possible de tous les acteurs potentiels intervenant sur la disponibilité et la performance de notre ligne de production. Pour ce faire, nous avons établi un diagramme causes/effet (Figure 5.1) pour nous permettre d'avoir une vue générale des problèmes qui affectent notre Taux de Rendement Synthétique.

En effet, sur ce diagramme, nous avons choisi de diviser les causes en six domaines.

Pour le domaine machine, les paramètres qui peuvent influencer la non-productivité sont les suivants :

- Le matériau de coupe : il va de soi que la composition et la nature même du matériau influenceront sur l'usure et la durée de vie d'une arête de coupe ce qui cause un déséquilibre dans la machine. Cela induit des vibrations qui provoquent un stress dans la matière et elles conduisent à l'arrêt de la machine.
- La puissance dont dispose le moteur permettra de faire pénétrer l'arête de coupe de façon optimale dans le bois. S'il n'y a pas assez de puissance, on peut arriver à un refus de coupe et la pièce de bois bloque la machine comme elle peut aussi être dégradée ou déclassée comme produit fini de non-qualité.
- Les vitesses de rabotage sont, à l'heure actuelle, calculées pour une utilisation optimale de l'outil, mais la plupart des machines ne peuvent fonctionner que sur un nombre limité de vitesses de rotation. En effet, les transmissions par courroie sans variateur de vitesse bloquent le nombre de possibilités avec, par exemple, 3 000, 5 000 et 8 000 trs/min comme vitesses possibles. L'outil, dans ce cas, fonctionne avec un compromis plus ou moins efficace générant une usure accélérée de l'arête, ce qui est à l'origine du déclassement de produits finis.
- Jeux de transmission : l'usure de l'arbre de transmission génère un jeu qui provoque une usure précoce de l'outil de coupe. Le mode d'entraînement de la pièce de bois va influencer le comportement de la pièce de bois durant la coupe et donc changer l'orientation des contraintes exercées sur l'arête de coupe affectant ainsi la qualité de rabotage.

- Entretien de premier niveau : le réglage, le graissage et le nettoyage nécessaires à la bonne utilisation de la machine ne sont pas correctement planifiés. En effet, il est rare de voir un entretien de premier niveau respecté dans les délais, la production étant souvent la priorité de l'industrie. De plus, il peut arriver qu'un outil soit mal monté sur le porte-outil ou que le porte-outil soit mal fixé sur l'arbre d'entraînement. Ce qui affecte directement le bon fonctionnement de la machine et cause l'arrêt (le fonctionnement de la machine est directement affecté).

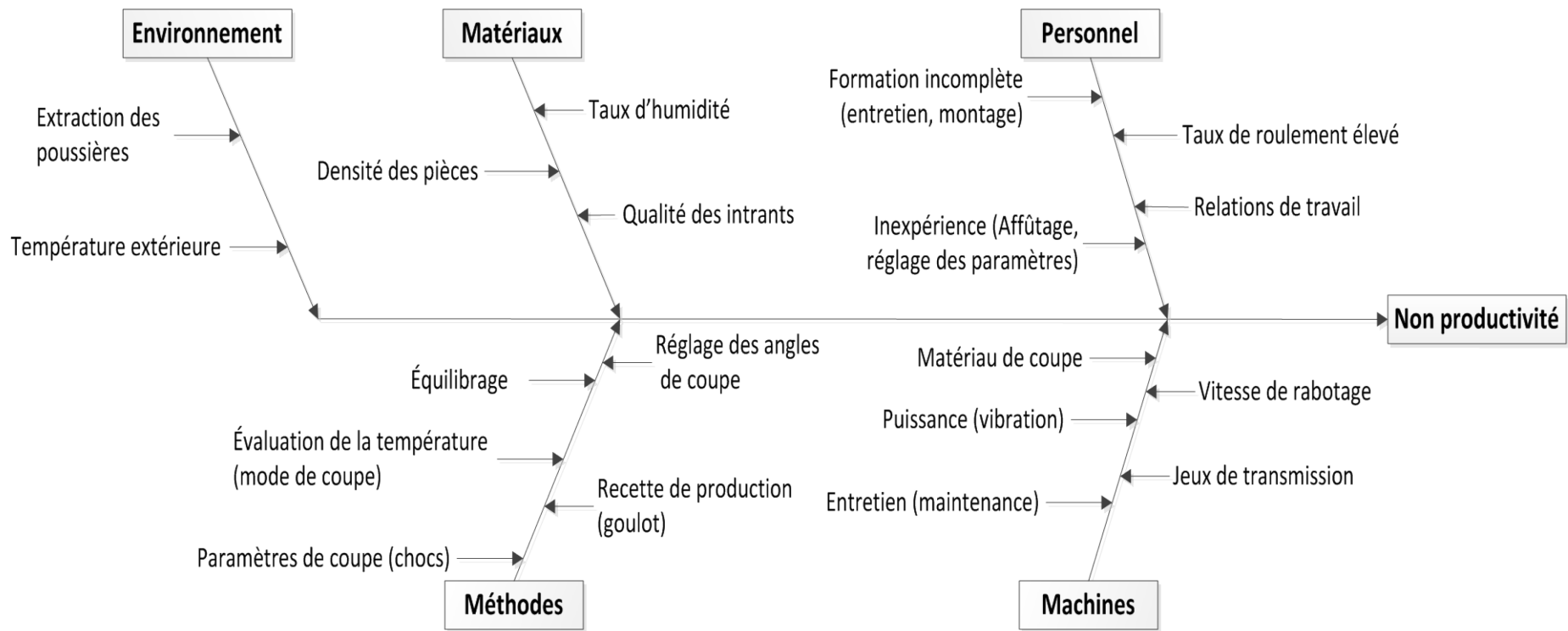


Figure 5.1 : Diagramme causes/effet.

Les causes liées au domaine des méthodes de travail sont également nombreuses.

- Élévation de la température due au sens du travail qui change l'évolution de l'effort de coupe durant l'usinage. Les frottements qui sont générés durant l'usinage vont conduire à une élévation de la température de l'arête de coupe qui aura des effets sur l'usure de l'outil de coupe et qui est la cause des micro-arrêts de la machine de rabotage.
- Paramètres de coupe : durant la coupe, l'outil va venir froter contre le bois ce qui provoquera des chocs et si les paramètres de coupe ne sont pas respectés (réglage de la machine) le choc causera des bris majeurs au niveau de la machine.
- L'équilibrage et le réglage des angles de coupe jouent un rôle sur la durée de vie des couteaux car ils provoquent des vibrations qui causent un stress dans la matière. Ils conduisent à faire travailler une dent plus qu'une autre, ce qui provoque des micro-arrêts au cours de la production et influence la qualité de la surface des pièces.
- Recette de production : influence la performance de la ligne de rabotage en termes de durée de production (goulot) et de marche à vide causée par le changement de recette.

L'environnement de travail est aussi un domaine qui influence la productivité de la ligne.

- Température extérieure : suite à l'opération de séchage, les paquets de bois séché sont stockés dans des cours à ciel ouvert ce qui influence le taux d'humidité des pièces. Dans la période hivernale, les pièces stockées à l'extérieur sont gelées donc l'usinage de ces pièces influence l'usure des couteaux ce qui conduit à l'arrêt de la ligne de rabotage.
- Autres facteurs liés à l'environnement : l'aspiration des particules (défectueuse ou mal adaptée) ainsi que les particules en suspension dans l'air généreront des arrêts au niveau des machines tournantes aggravant l'usure normale des outils de coupe.

Le personnel peut lui aussi occasionner la dégradation des équipements ce qui influence directement la productivité.

- En effet, même si nous possédons la meilleure machinerie du monde, si les opérateurs ne savent pas quels paramètres régler et de quelle manière, alors la machine ne sera pas utilisée dans de bonnes conditions. Pour pallier à cela, les opérateurs ont l'obligation de suivre une formation adéquate pour l'affûtage, le réglage des paramètres de coupe ainsi que le pilotage de la machinerie, comme ils doivent respecter l'entretien de premier niveau de la machine (nettoyage, graissage, etc.).
- Le taux de roulement élevé ainsi que le manque de personnel a une influence sur le non-respect des procédures d'opération et d'entretien standard ce qui affecte le bon

fonctionnement des machines de production. Pour répondre à cela, il faut compléter les équipes de travail et améliorer le système de communication de l'entreprise.

Finalement, nous allons évoquer tous les paramètres liés au domaine « matériau usiné » : le bois et ses dérivés.

- Les intrants : le bois contient naturellement une proportion plus ou moins élevée de particules abrasives telles que la silice. Ces composés dégradent fortement les outils de coupe par leur nature dure et saillante ce qui affecte la performance des équipements. Il va de soi que si ces particules sont présentes dans le bois dit « massif », elles le sont aussi dans les dérivés du bois qui contiennent, la plupart du temps, les parties les moins nobles d'un arbre. De plus, les dérivés du bois contiennent de la colle et de la mélamine ayant une dureté bien supérieure à celle du bois engendrant une aggravation du phénomène d'usure par abrasion. Elles ont aussi des propriétés chimiques dues à leur composition ce qui va favoriser une usure corrosive de l'outil.
- L'humidité du bois joue aussi un rôle sur la vitesse d'usure d'un outil. En effet, le coefficient dit d'humidité fait partie intégrante de la formule utilisée pour calculer l'effort de coupe. L'effort de coupe n'est pas proportionnel mais il est fortement lié à la vitesse de dégradation d'une arête de coupe, ce qui est à l'origine des micro-arrêts de la ligne de rabotage.
- Un autre paramètre dû au matériau bois est sa densité. En effet, plus un bois est dur plus les contraintes mécaniques seront fortes au moment de la coupe. Ainsi, la face d'attaque subira une dégradation plus grande avec un matériau dur, ce qui est à l'origine des arrêts causés par la matière. Cependant, la réciproque n'est pas vraie pour autant : un bois tendre va effectivement soulager la face d'attaque mais, en contrepartie, la face de dépouille subira l'effet ressort des fibres. Sous l'effort de compression dû à la coupe, les fibres d'un bois tendre vont se comprimer pour se détendre après le passage de l'arête de coupe venant frotter sur la face de dépouille. Ce phénomène est à l'origine du blocage des machines causé par le bris de la pièce de bois dans la machine.

Suite à cette synthèse, nous pouvons conclure que l'amélioration de la productivité dans l'usine de rabotage de bois doit passer par le contrôle de la qualité des intrants (bois), la formation du personnel et l'amélioration de la fiabilité des machines afin d'éliminer les pannes et les micro-arrêts.

5.2 Conclusion

La démarche de résolution de problèmes DMAIC adoptée dans notre étude nous a conduits à mesurer et analyser l'impact des temps d'arrêt sur la productivité, voire identifier les mauvais acteurs mis en cause.

Après avoir défini notre objectif, on a mesuré les différents temps d'état qui nous permettent de calculer le TRS et de cibler les actions prioritaires nécessaires pour remédier aux points faibles de la productivité en termes de disponibilité, de performance et de qualité, afin d'améliorer le taux de production (*Throughput*) de l'usine de rabotage.

L'analyse effectuée a clairement démontré que 80% de la problématique est liée aux arrêts non planifiés des machines. Nous avons identifié les causes potentielles qui affectent la productivité dans le diagramme des causes/effets et même proposé des mesures pour l'amélioration de la performance opérationnelle des équipements.

Nous constatons que pour maximiser le TRS, il est essentiel d'optimiser la fiabilité ; de plus, la maintenance joue un rôle de premier plan dès qu'il s'agit d'objectifs de fiabilité. Cependant pour atteindre ces objectifs, il est indispensable de changer d'attitude vis-à-vis de la maintenance pour passer d'une maintenance classique, réactive et fonctionnelle, à un processus proactif, pleinement intégré aux activités générales de l'usine.

La Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) permet de mettre en place un plan de maintenance sélectif à partir de la criticité des équipements et de leurs défaillances. Les objectifs ultimes sont :

- L'amélioration de la disponibilité des équipements sélectionnés pour leur impact sur le flux de production (raboteuse, chargeur et classeur) ;
- L'amélioration de la performance à travers une démarche globale de progrès permanent, intégrant le contrôle de la qualité des intrants, l'élimination des facteurs responsables des micro-arrêts et la responsabilisation de chaque opérateur ;
- La maîtrise des coûts de production par la réduction des temps d'arrêt et l'optimisation du plan de maintenance préventive.

Enfin, la mise en œuvre de cette stratégie contribue à l'évolution du Taux de Rendement Synthétique ainsi qu'à la culture de maintenance par une approche fonctionnelle efficace et par un élargissement de l'implication du personnel de l'entreprise.

5.3 Limites et perspectives

Une limite importante de l'approche préconisée dans ce mémoire découle du fait que l'analyse de performance n'a pas été effectuée recette par recette. Le TRS est un indicateur de performance global qui mesure la capacité, la flexibilité et la productivité des ressources de production. La flexibilité mesure le changement de fabrication (changement de recette), les réglages, les pertes au démarrage et la marche à vide. Appliquer la méthode du TRS recette par recette revient à ignorer mesure de flexibilité ; la ligne de rabotage étant conçue pour produire toutes les recettes, toutes les pièces de bois sont rabotées dans la même ligne ; il n'existe pas en fait une ligne pour chaque recette. Nous avons utilisé un indicateur de performance global permettant seulement à l'entreprise de mettre en évidence ses axes de progrès. Néanmoins, des questions clés demeurent ouvertes en ce qui concerne l'analyse de performance recette par recette. Une telle analyse requiert l'utilisation d'indicateurs de performance autre que le TRS (qui demeure global), et devrait conduire à des améliorations plus spécifiques et nécessaires dans les usines de rabotage de bois d'œuvre.

Bibliographie

- [AFN01] AFNOR, Maintenance Terminology. European standard, NF EN 13306, 2001.
- [AFN88] AFNOR, Guides de l'utilisateur. Contrats de maintenance, 2^{ème} Édition, 1988.
- [AFNOR] AFNOR, Recueil des normes françaises X 06, X 50, X 60, AFNOR.
- [AKE86] AKELLA, R. & P. R. KUMAR. Optimal Control of Production Rate in a Failure Prone Manufacturing System. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 31, no. 2, pp. 116- 126, 1986.
- [AMO99] AMODEO, L., Contribution à la simplification et à la commande des réseaux de Pétri stochastiques. Application aux systèmes de production, Thèse de doctorat en productique soutenue à l'INPG, Grenoble (France), 1999.
- [ANS05] ANSI/ISA-95, Activity Models of Manufacturing Operations Management, American National Standard. Enterprise Control System Integration, part 3, 2005.
- [AYE03] AYEYEL, A. et B. DAVIER. Le TRS indicateur de la performance : Un guide pratique à l'usage des responsables de production. Éditions CETIM, 2003.
- [AYE04] A. Aye. La mesure de performance des machines de production. CETIM, TRS performance 2004.
- [BAL11] BALLE, M., Le Modèle Toyota en France. disponible à partir de : <http://lean.enst.fr/wiki/pub/LesPublications/PrefaceModeleToyota.pdf> (2012).
- [BAV02] BAVIER, G., Les techniques d'ordonnancement, disponible à partir de : <http://www.schedstar-distribution.com/Documents/Techordon.pdf> (2011).
- [BUZ68] BUZACOTT, J.A. Prediction of the Efficiency of Production Systems without Internal Storage. International Journal of Production Research, vol. 6, no. 3, pp. 173–188, 1968.
- [BUZ78] BUZACOTT, J.A. & L.E. HANIFIN. Models of Automatic Transfer Lines with Inventory Banks: A Review and Comparison. AIIE Transactions, vol. 10, no. 2, pp.197-207, 1978.
- [BUZ92] BUZACOTT, J.A. & J.G. SHANTHIKUMAR. Queueing Models of Manufacturing Systems. Queueing Systems: Theory and Applications, 1992.
- [BUZ93] BUZACOTT, J.A. & J.G. SHANTHIKUMAR. Stochastic Models of Manufacturing Systems. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [CAN67] CANTIN, M. Propriétés d'usinage de 16 essences de bois de l'Est du Canada. Direction générale des Forêts. Publication no 1111 S, pp 31, 1967
- [CAU04] CAUFFRIEZ, L., WILLAEYS, D., DEFRENNE, J. A. The Event-Triggered Method. International Conference on System, Man and Cybernetics. Proceedings vol.3, pp. 210-215, 1993.
- [CHO04] CHOWDHURY, S. Vous avez dit Six Sigma ! : comprendre la méthode Six Sigma pour améliorer la qualité et augmenter les profits. Éditions Dunod, 2004.
- [CLE00] CLEMONS, J.W. Overall Equipment Effectiveness. Proficy for Manufacturing. Editions Mountain Systems Inc. & EnteGreat Inc., Birmingham, pp. 50, 2000.
- [DAL92] DALLERY, Y. & S. B. GERSHWIN. Manufacturing Flow Line Systems: a Review of Models and Analytical Results. Queueing Systems, vol. 12, pp. 3-94, 1992.
- [DMA11] ICP, The Innovation Consultancy Partnership, DMAIC process overview, disponible à partir de: <http://www.icpartnership.com/sixsigma.html> (2012).

- [DOU84] DOUMEINGTS, G. Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes en productique. Thèse d'état soutenue à l'Université de Bordeaux I, 1984.
- [DRE04] DREW J., McCALLUM, B., ROGGENHOFER, S. L'essence du Lean. In : Objectif Lean. Réussir au plus juste : enjeux techniques et culturels, Éditions d'Organisation, pp. 35-37, 2004.
- [ECO99] ECOSIP (FRA) Dialogues autour de la performance en entreprise : les enjeux. Harmattan, 1999.
- [EFA03] EFAGA. E. D, R. DANWE, F. BRAUN (2003). Analyse des données du retour d'expérience pour l'organisation de la maintenance des outils de production des PME et PMI dans le cadre de la MBF. QUALITA 2003. 5^{ème} Congrès international pluridisciplinaire Qualité et sûreté de fonctionnement.
- [EN292, 97] Norme EN 292 Sécurité des machines : notions fondamentales. Principes généraux de conception, Partie 1, janvier 1997.
- [FRA01] FRANCASTEL, J.C. Externalisation de la maintenance : Stratégies, méthodes et contrats. 2001.
- [GAR04] GARTISER, N., C. LERCH, et al. Appréhender la dynamique d'évolution des organisations. Vers une opérationnalisation des modèles de Mintzberg. XIIIème Conférence Internationale de Management Stratégique, Normandie-Vallée de Seine, France, 2004.
- [GER94] GERSHWIN, S.B. Manufacturing Systems Engineering. Prentice Hall, 1994.
- [GIA88] GIARD, N. Gestion de la production. Éditions Economica, 1988.
- [GIB80] GIBERT, P. Le contrôle de gestion dans les organisations publiques. Éditions d'Organisation, 1980.
- [GRA12] GRAMDI, José (2012). La performance industrielle globale. Présentation Université de technologie Troyes. Disponible à partir de : http://productique.activeportail.fr/orga_prodppra/uploads/public/1599JoseGRAMDI.pdf (consulté 02 décembre 2013).
- [HAR89] HARTMANN, E.H. The 12 steps of a TPM program. Sixth International Maintenance Conference, pp. 31-41, 1989.
- [HAR95] HARAN, G. Méthode P.E.R.T : Gestion et ordonnancement des projets par la méthode du chemin critique. Éditions Eyrolles, 1995.
- [HOH14] HOHMANN, C. (2014). TRS et maintenance. Disponible à partir de : <http://christian.hohmann.free.fr/index.php/portail-maintenance-productive/les-indicateurs-de-la-maintenance/102-le-trs-et-la-maintenance> (consulté 12 décembre 2013)
- [IMA 89] IMAI, M. Kaizen : la clé de la compétitivité japonaise. Éditions Eyrolles, 1989.
- [KIM83] KIMEMIA, J.G. & S.B. GERSHWIN. An algorithm for the computer control of production in flexible manufacturing system. IIE Transactions, vol. 15, pp. 353-362, 1983.
- [LAP95] LAPRIE, J.C., BLANQUART J.P et AL. Guide de la Sûreté de Fonctionnement. Éditions Cepaduès, 1995.
- [MAG91] MAGGARD, B.N. Capacity Assurance through T.P.M. and Equipment Reliability. 8th Annual International Maintenance Conference Proceedings, pp. 3-20, 1991.
- [MOU97] MOUBRAY, J. Reliability Centered Maintenance. International Press, 1997.

- [NAK, AFN87] NAKAJIMA, S. La maintenance productive totale (TPM). Nouvelle vague de la production industrielle. AFNOR Gestion, 1987.
- [NAK, AFN89] NAKAJIMA, S. La maintenance productive totale : Mise en œuvre. AFNOR, 1989.
- [NIE92] NIEL, É et JUTARD, A. Contribution à la formalisation de la sécurité opérationnelle. Revue d'automatique et de productique appliquées, vol. 5, no 2, pp.57-64,1992.
- [RET90] RETOUR, D., BOUCHE, M. et PLAUCHU, V. Où va la maintenance industrielle ? Problèmes Économiques, vol. 2, no 159, pp. 7-13, 1990.
- [RIC96] RICHET, D. et GABRIEL, M. Maintenance basée sur la fiabilité. Éditions Masson, 1996.
- [ROB88] ROBOAM, M. Modèles de référence et intégration des méthodes d'analyse pour la conception des systèmes de production. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Bordeaux, France, 1988.
- [SAS98] SASSINE, C. Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers. Thèse de doctorat soutenue à l'INP de Grenoble, France, 1998.
- [SHI94] SHIROSE, K. Le guide TPM de l'unité de travail, conduite et maintenance de l'installation industrielle. Éditions Dunod, France, 1994.
- [SIE05] SIEBENBORN, T. Une approche de formalisation du processus de changement dans l'entreprise. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 2005.
- [TAR96] TARONDEAU, J.C. La gestion de production. Presses Universitaires de France, Que sais-je ?, no 3115, Septembre 1996.
- [TBM11] TBM Consulting Group, La maison de Toyota, disponible à partir de : http://www.tbmcg.com/fr/about/ourroots/house_toyota.php (2012)
- [THO11] THOMPSON, R. Steps to statistical thinking, disponible à partir de : <http://learnsigma.com/3-steps-statistical-thinking/> (2012)
- [TOU06] TOUZET, I. Lean management et Six Sigma ou comment concilier amélioration de la qualité et performance industrielle. Application des méthodes SMED et AMDEC au conditionnement pharmaceutique. Thèse d'exercice, Université de Rouen, pp. 131, 2006.
- [VOR 13] Vorne, (2013). Calculating OEE [online]. Vorne Industries. disponible à partir de : <http://www.oee.com/world-class-oee.html> (consulté 21 mai 2013, 2008).
- [WEN88] WENGERT, G. The Wood Doctor's RX. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1988.
- [WHE96] WHEATON, R. Reliability Based Maintenance Requires Mill Culture Change. Pulp and Paper, pp. 53-61, July 1996.
- [WIL98]. WILLIAMS, D. & R. MORRIS. Machining and Related Mechanical Properties of 15 B.C. Wood Species. Forintek Canada Corp., Division de l'Ouest, Vancouver, B.C., pp. 31, 1998.
- [XIE02] XIE, X. Evaluation and Optimization of Two-stage Continuous Transfer Lines Subject to Time-Dependent Failures. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, vol. 12, pp. 109-122, 2002.
- [ZW196] ZWINGELSTEIN, G. La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM. Série Diagnostic et Maintenance, AFNOR, 1996.
- [SIG11] Le 6 Sigma, disponible à partir de : http://www.qualiteonline.com/rubriques/rub_3/dossier-42.html (2012).