



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باتنة 2
UNIVERSITÉ « BATNA- 2 »
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الهندسة الصناعية
DEPARTEMENT GENIE INDUSTRIEL

THÈSE

Présentée au Laboratoire d'Automatique et Productique LAP

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en LMD

Option : Génie Industriel

Par

Soltani Mohyiddine

(Master en Génie Industriel)

Thème

**Implémentation et déploiement d'une nouvelle
approche à base de Lean Six Sigma pour le
développement et l'amélioration de la durabilité de la
production des petites et moyennes entreprises**

Devant le jury composé de :

MOUSS Kinza Nadia	Prof	Université de Batna 2	Président
MOUSS Mohamed Djamel	Prof	Université de Batna 2	Rapporteur
AOUAG Hichem	MCA	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
DEBLA Fateh	MCA	Université de Biskra	Examineur1
SENOUSSI Ahmed	MCA	Université de Batna 2	Examineur 2

Année universitaire 2020/ 2021

Dédicaces

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père, Allah Yarahmou.

À ma mère qui a veillé nuit et jour pour que je puisse arriver à ce stade de mes études.

A mes frères.

Et je le dédie aussi à toutes les personnes qui me sont très chères.

À mon encadreur, Pr Mohamed Djamel MOUSS, et mon Co-encadreur Dr Hichem

AOUAG sans qui ce travail n'aurait pas vu le jour.

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du Laboratoire d'Automatique et Productique LAP (Université de Batna 2), dirigé par **Pr LEILA HAYET MOUSS**. Je tiens à lui adresser mes remerciements pour ses conseils précieux.

Je tiens à exprimer mes profondes gratitude au **Pr. Mohamed Djamel MOUSS** et **Dr. Hichem AOUAG** pour leurs encadrements, leurs aides, leurs soutiens, leurs disponibilités, et le temps qu'ils ont consenti et surtout pour leurs conseils précieux.

Je voudrais adresser mes vifs remerciements à **Mme Nadia Kinza MOUSS** Professeur à l'université de Batna 2 pour avoir accepté d'être le président de jury. Sa présence me fait beaucoup d'honneur et je lui suis reconnaissant.

Je suis très reconnaissant à **Mr Fateh DEBLA** Docteur à l'université de Biskra, d'avoir accepté d'être examinateur de ces travaux et de participer au jury.

Je suis très reconnaissant à **Mr Ahmed SENOUSSE** Docteur à l'université de Batna 2 d'avoir accepté d'être examinateur de ces travaux et de participer au jury.

Je remercie vivement l'équipe de l'entreprise SNS-BAG et surtout l'équipe de l'entreprise Aurès Solaire pour leurs aides durant la réalisation de mon projet de recherche.

Je remercie également tous les enseignants du département de Génie Industriel.

Résumé

L'objectif de ce travail de thèse est de développer des nouvelles approches permettant aux petites et moyennes entreprises d'améliorer les performances de leur processus de fabrication.

Nous avons développé trois approches inspirées du Lean Six Sigma (LSS) pour l'amélioration de la production dans un contexte conventionnel et classique d'une part et d'autre part dans un contexte de production durable. Dans la première approche nous avons proposé une approche Lean Six Sigma conventionnelle pour évaluer et suivre la compétitivité d'une PME en fonction des résultats obtenus par la méthode VSM. Dans la deuxième approche, nous avons proposé une nouvelle extension de l'approche LSS vers le contexte de la production durable en incorporant des algorithmes multicritères quantitatives. Cette approche nous a permis de surmonter quelques barrières au niveau du processus de l'application du LSS. Dans la troisième approche nous avons présenté une amélioration de l'approche LSS qui vise à montrer l'effet positif des algorithmes multicritères qualitatifs flous pour surmonter certaines barrières du Lean Six Sigma liées aux phases d'analyse et d'amélioration de l'état actuel des processus de fabrication.

Les approches proposées sont appliquées dans deux entreprises algériennes pour améliorer et contrôler la durabilité de leurs processus de fabrication.

Mots clefs : Lean Manufacturing, Six Sigma, la production durable

Abstract

The objective of this thesis is to develop new approaches allowing small and medium-sized businesses to improve the performance of their manufacturing process.

Also, we have developed three Lean Six Sigma (LSS) approaches for improving production in conventional and sustainable production contexts. In the first approach, we have proposed a conventional Lean Six Sigma approach in order to assess and monitor the competitiveness of a SME based on the results obtained by the VSM method. The second approach we have proposed a new extended LSS approach by incorporating quantitative multi criteria algorithms. This approach has allowed us to overcome some barriers in the application process of LSS. The third approach we have presented an improved LSS approach. This approach aims to show the positive effect of fuzzy qualitative multi criteria algorithms to overcome some barriers of Lean Six Sigma related to the analysis and improvement phases of the current state of manufacturing processes.

The proposed approaches are applied in a small and medium-sized Algerian company to improve and control the sustainability of their manufacturing processes. The results obtained through each approach strongly encourage the use of Lean Manufacturing and Six Sigma approaches in SMEs / SMIs.

Key words: Lean Manufacturing, Six Sigma, sustainable manufacturing

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تطوير مناهج جديدة تسمح للشركات الصغيرة والمتوسطة الحجم بتحسين أداء عملية التصنيع الخاصة بهم.

قمنا بتطوير ثلاثة مناهج (LSS) Lean Six Sigma لتحسين الإنتاج في سياقات الإنتاج التقليدية والمستدامة. في النهج الأول ، اقترحنا نهج Lean Six Sigma تقليدي من أجل تقييم ومراقبة القدرة التنافسية للشركات الصغيرة والمتوسطة بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة طريقة VSM. المرحلة الثانية اقترحناها نهج LSS جديد ممتد من خلال دمج خوارزميات متعددة المعايير الكمية. سمح لنا هذا النهج بالتغلب على بعض الحواجز في عملية تطبيق LSS. المرحلة الثالثة قدمناها نهج LSS محسن. يهدف هذا النهج إلى إظهار التأثير الإيجابي لخوارزميات متعددة المعايير النوعية الغامضة للتغلب على بعض حواجز Lean Six Sigma المتعلقة بمراحل التحليل والتحسين للوضع الحالي لعمليات التصنيع.

تم تطبيق الأساليب المقترحة في شركة جزائرية صغيرة ومتوسطة الحجم لتحسين ومراقبة استدامة عمليات التصنيع الخاصة بهم. النتائج التي تم الحصول عليها من خلال كل نهج تشجع بقوة على استخدام نهج Lean Manufacturing و Six Sigma في الشركات الصغيرة والمتوسطة. PMEs.

الكلمات الدالة : ستة سيقما، التصنيع المرن، الصناعة المستدامة.

Notations

VSM	Value Stream Mapping
SMED	Single Minute Exchange of Die
SIPOC	Supplier, Input, process, Output, Costumer
DEMATEL	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
QFD	Quality Function Deployment
DMAIC	Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler
NVA	Non-Valeur Ajoutée
VA	Valeur Ajoutée
TPM	Total Productive Maintenance
VOC	Voice Of Costumer
CTQ	Critical To Quality
DPMO	Défauts Par Million d'Opportunités
DPO	Defect Per Opportunity
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
ACV	Analyse de Cycle de Vie
DMIACV	Définir, Mesurer, Analyser, Désigne, Vérifier
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MEFA	Material and Energy Flow Analysis
LCA	Life Cycle Assessment
CPQ	Cost of Poor Quality
DOE	Design Of Experiment
ANOVA	Analysis Of Variance
PLI	Physical Load Index
PME	Petite et Moyenne Entreprise

Table des matières

Liste des figures	XII
Liste des tableaux.....	XIV

Introduction Générale

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

I.1 Introduction	6
I.2 L'approche Lean Manufacturing	6
I.2.1 Les différents types de gaspillage	7
I.2.2 Les principes de l'approche Lean Manufacturing	9
I.2.2.1 Principe 1 : Définir la valeur	9
I.2.2.2 Principe 2 : Définir la chaîne de valeur.....	9
I.2.2.3 Principe 3 : Améliorer le déroulement des Flux	9
I.2.2.4 Principe 4 : Tirer la production	10
I.2.2.5 Principe 5 : Assurer la perfection.....	10
I.2.3 Boîte à outils de l'approche Lean Manufacturing	10
I.2.3.1 Cartographie des processus :.....	10
I.2.3.2 Cartographie de chaîne de valeur (VSM) :	10
I.2.3.3 Diagramme de spaghetti :.....	12
I.2.3.4 La méthode 5S :	12
I.2.3.5 La méthode SMED :.....	13
I.2.3.6 Total productive maintenance	13
I.2.3.7 Système Kanban :	14
I.2.3.8 Takt time :	14
I.3 L'approche Six Sigma	14
I.3.1 La structure organisationnelle de l'approche Six Sigma	15
I.3.1.1 Des méthodes philosophiques	15
I.3.1.2 Des méthodes statistiques	16
I.3.1.3 Modèles d'amélioration	24
I.4 Différence entre Lean Manufacturing et Six Sigma.....	28
I.5 L'approche Lean six sigma	28

I.6 L'évolution d'utilisation de Lean Six Sigma dans l'industrie	30
I.7 La production durable.....	30
I.7.1 Principes de la production durable.....	31
I.7.2 Les grands axes de la production durable.....	32
I.7.2.1 La durabilité économique de la production.....	32
I.7.2.2 La durabilité environnementale de la production.....	32
I.7.2.3 La durabilité sociale de la production	33
I.8 Lean Six Sigma dans le contexte de la production durable.....	34
I.9 Intégration du concept de la durabilité dans le cycle d'amélioration DMAIC.....	34
I.10 Limites de Lean six sigma dans le contexte de la production durable	36
I.11 Aide méthodologique pour surmonter les limites de Lean six sigma dans le contexte de la production durable	37
I.12 Conclusion.....	39

Chapitre II : Etat de l'art des différents contextes d'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les PME

II.1 Introduction	40
II.2 État de l'art.....	40
II.2.1 Travaux relatifs à l'utilisation traditionnelle des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les PME.....	41
II.2.2 Travaux relatifs à l'extension des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte de la production durable des PME.....	42
II.2.3 Travaux relatifs à l'amélioration du processus d'application des approches Lean Manufacturing et six sigma.....	45
II.3 Synthèse :	46
II.4 Conclusion.....	48

Chapitre III : Amélioration et mise en oeuvre d'une approche Lean Six Sigma conventionnelle dans les PME

III.1 Introduction.....	49
III.2 Le problème traité et le cadre méthodologie	49
III.2.1 Partie 1 : Application de la méthode Cartographie de la chaîne de Valeur (VSM)	50
III.2.1.1 Collecte des données	50

III.2.1.2 Construire l'état actuel de la chaîne de production	51
III.2.1.3 Analyse de l'état actuel	51
III.2.2 Partie 2 : Evaluation de la compétitivité de l'entreprise	51
III.2.2.1 Le modèle Défaut Par Million d'Opportunités(DPMO) :	51
III.2.2.2 Le modèle DPMO pondéré.....	52
III.2.2.3 Le niveau Sigma	52
III.2.3 Amélioration du processus de fabrication.....	53
III.3 Application de l'approche proposée dans une PME algérienne	53
III.3.1 Présentation de l'entreprise BAG.....	53
III.3.2 Description du processus de la fabrication d'une bouteille à gaz :	54
III.3.3 Construction de la cartographie de l'état actuel	55
III.3.2.1 Analyse de l'état actuel	58
III.3.4 Évaluation de la compétitivité de l'entreprise.....	60
III.3.4.1 Évaluation la compétitivité de l'atelier mécanique	61
III.3.4.2 Évaluation la compétitivité de l'atelier soudage	62
III.3.4.3 Évaluation la compétitivité de l'atelier finition.....	63
III.3.4.4 Le niveau sigma global de l'entreprise.....	64
III.3.4.5 Comparaison de la compétitivité de l'entreprise dans les années 2012,2014, 2016	64
III.3.5 Développement de l'état futur et amélioration de la compétitivité du processus de fabrication.....	65
III.4 Conclusion	67

Chapitre IV :Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

IV.1 Introduction	68
IV.2 Problèmes traités et cadre méthodologique	68
IV.3 L'approche proposée	69
IV.3.1 La phase définir.....	70
IV.3.2 la phase Mesurer	70
IV.3.2.1 Mesure des indicateurs environnementaux	71
IV.3.2.2 Mesure d'indicateurs économiques	71
IV.3.2.3 Mesure d'indicateurs sociaux.....	72
IV.3.2.4 Développement d'une extension de la méthode VSM	72

IV.3.2.5 Mesure le poids de chaque indicateur de performance	73
IV.3.3 Phase d'analyse	74
IV.3.4 Phase d'amélioration et de contrôle	74
IV.3.4.1 Application de l'algorithme TOPSIS	75
IV.3.4.2 Plan d'action	77
IV.4 Application de l'approche proposée	77
IV.4.1 La phase définir.....	80
IV.4.1.1 Charte de projet	80
IV.4.1.2 Diagramme SIPOC.....	81
IV.4.2 La phase de mesure	83
IV.4.2.1 Mesure d'indicateurs environnementaux	83
IV.4.2.2 Mesure d'indicateurs économiques	84
IV.4.2.3 Mesure d'indicateurs sociaux.....	86
IV.4.2.4 Construction de l'état actuel.....	86
IV.4.2.5 Mesurer le degré d'importance de chaque indicateur	88
IV.4.3 La phase d'analyse.....	90
IV.4.3.1 Diagramme d'Ishikawa	90
IV.4.3.2 Analyse du processus de pondération	91
IV.4.4 La phase d'amélioration et du contrôle.....	93
IV.4.4.1 Organisation du processus d'amélioration	93
IV.4.4.2 Opportunités d'amélioration et du contrôle de la durabilité de la production.....	95
IV.5 Conclusion	97

Chapitre V : amélioration du processus d'application des extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les PME par une approche qualitative

V.1 Introduction.....	99
V.2 Problème traité et cadre méthodologique	99
V.3 L'approche proposée.....	100
V.3.1 Analyse de la VSM de l'état actuel en utilisant l'approche DEMATEL floue.....	102
V.3.2 Application de la méthode QFD floue	104
V.4 Application de l'approche proposée	105
V.4.1 Analyse de la carte de l'état actuel à l'aide de DEMATEL floue.....	107
V.4.5 Application de l'approche QFD flou.....	111

V.5 Conclusion	113
----------------------	-----

Conclusion Générale

Conclusion générale.....	115
--------------------------	-----

Bibliographie

Références.....	118
-----------------	-----

Annexes

Annexe I.....	129
Annexe II	132
Annexe III.....	133
Annexe IV	134
Annexe V	136
Annexe VI.....	139

Liste des figures

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Figure I.1 : les sept types de gaspillage	8
Figure I.2 : Classification des outils Six Sigma	15
Figure I.3 : Diagramme d'Ishikawa.....	16
Figure I.4 : Carte de contrôle.....	17
Figure I.5 : Interprétation des indicateurs de la capacité	21
Figure I.6 : Interprétation de résultats du coefficient de corrélation	22
Figure I.7 : Les différents facteurs d'un processus de fabrication	22
Figure I.8 : Diagramme de Pareto	24
Figure I.9 : Cycle d'amélioration DMAIC	24
Figure I.10 : Cycle d'amélioration DMADV	26
Figure I.11 : La structure de la maison de qualité	27
Figure I.12 : Etapes de construction de QFD ou maison de qualité	27
Figure I.13 : Complémentarité des méthodes Lean et Six Sigma (Pillet, 2008)	29
Figure I.14 : Les approches Lean Manufacturing Six Sigma dans le domaine production durable	30
Figure I.15 : Principe de la production durable	32
Figure I.16 : Modèle d'intégration Lean Manufacturing, Six Sigma et la production durable	34

Chapitre II : Etat de l'art des différents contextes d'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les PME

Figure II.1 : méthodologie de recherche.....	41
---	----

Chapitre III : Amélioration et mise en oeuvre d'une approche Lean Six Sigma conventionnelle dans les PME

Figure III. 1 : L'approche proposée	50
Figure III.2 : Localisation de l'entreprise BAG	54
Figure III. 3 : Les différentes opérations du processus de fabrication.....	56
Figure III.4 : Cartographie de l'état actuel.....	57

Figure III. 5: Temps de cycle de chaque opération.....	58
Figure III. 6: Diagramme d'Ishikawa.....	59
Figure III.7: Diagramme de Pareto	60

Chapitre IV :Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

Figure IV.1: L'approche proposée	69
Figure IV.2: La méthodologie de mesure	70
Figure IV.3: Méthodologie pour mesurer les indicateurs environnementaux	71
Figure IV.4: Processus d'amélioration et de contrôle	75
Figure IV.5: L'emplacement géographique de l'entreprise	77
Figure IV.6: Processus de fabrication.....	78
Figure IV.7: Diagramme de SIPOC	82
Figure IV.8: Cartographie de l'état actuel	87
Figure IV.9: Diagramme d'Ishikawa.....	91
Figure IV.10: Classement des indicateurs lorsque la valeur de dimension économique varie de 0,1 à 0,9	92

Chapitre V : Amélioration du processus d'application des extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les PME par une approche qualitative

Figure V.1: L'approche proposée	101
Figure V.2: La cartographie de l'état actuel du processus de fabrication.	106
Figure V.3: Diagramme des relations causales d'indicateurs	110
Figure V.4: La maison de qualité de la phase d'amélioration	112
Figure V.5: résultat d'analyse de sensibilité	113

Liste des tableaux

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Tableau I.1: Définition de l'approche Lean Manufacturing	7
Tableau I.2: Définition de l'approche Six Sigma.....	15
Tableau I.3: Les cartes de contrôle par mesure	18
Tableau I.4: Les cartes de contrôle par attribut	19
Tableau I.5: Boîte à outils du Lean Six Sigma (Zajkowska 2012)	25
Tableau I.6: La différence entre Lean Manufacturing et Six Sigma	28
Tableau I.7: Définition de la production durable	31
Tableau I.8: Indicateurs d'évaluation de la durabilité de la production.....	33
Tableau I.9: Étapes du processus DMAIC et objectifs associés dans le contexte de la durabilité (Erdil, et al. 2018).....	35
Tableau I.10: Les barrières Lean six sigma dans la production durable	36
Tableau I.11: Aide méthodologique pour surmonter les barrières Lean Six Sigma	37
Tableau I.12: Extension ou amélioration de la boîte à outils du cycle d'amélioration DMAIC	38

Chapitre II : Etat de l'art des différents contextes d'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les PME

Tableau II.1: limites des travaux existants.....	47
---	----

Chapitre III : Amélioration et mise en oeuvre d'une approche Lean Six Sigma conventionnelle dans les PME

Tableau III.1: Évolution du nombre des PME en Algérie 2016-2019	49
Tableau III.2: Classement d'une organisation en fonction du niveau sigma.....	53
Tableau III.3: Tableau préparatoire pour le diagramme de Pareto.	59
Tableau III.4: le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations dans l'atelier mécanique	61
Tableau III.5: le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations dans l'atelier soudage	62

Tableau III.6: le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations de l'atelier finition.....	63
Tableau III.7: le nombre de défauts par opportunité et poids des trois ateliers.....	64
Tableau III.8: Le DPMO pondéré et niveau Sigma de l'entreprise pour chaque année.....	64
Tableau III.9: des opportunités d'amélioration pour réduire le gaspillage et améliorer le niveau qualité.....	66

Chapitre IV :Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

Tableau IV.1: Les caractéristiques mécaniques du panneau solaire	79
Tableau VI.2: Les caractéristiques électriques du panneau solaire.....	80
Tableau IV.3: Charte du projet.....	81
Tableau IV.4: Description d'indicateurs les plus influentes sur la durabilité de la production	83
Tableau IV.5: les valeurs nécessaires pour évaluer le niveau de qualité	85
Tableau IV.6 : La matrice de comparaison par paires.....	88
Tableau IV.7: le poids de chaque dimension	88
Tableau IV.8: La matrice de décision.	89
Tableau IV.9: La matrice de décision normalisée.....	89
Tableau IV.10: Résultats d'implémentation du l'algorithme Entropy	89
Tableau IV.11: le poids global de chaque indicateur	90
Tableau IV.12: Poids des dimensions pendant l'analyse de sensibilité.....	91
Tableau IV.13: Poids globales des indicateurs lors de l'analyse de sensibilité lorsque le poids de la dimension économique (D2) varie de 0,1 à 0,9.....	92
Tableau IV.14: Classement d'indicateurs lorsque la valeur de dimension économique varie de 0,1 à 0,9.....	92
Tableau IV.15: La matrice de décision normalisée pour la méthode TOPSIS	94
Tableau IV.16: Matrice de normalisation pondérée.....	94
Tableau IV.17: La solution idéale positive et la solution idéale négative.....	94
Tableau IV.18: Les résultats de S^- , S^+ et C_i	95
Tableau IV.19: Plan d'action pour améliorer et contrôler la durabilité de la production ...	96

Chapitre V : Amélioration du processus d'application des extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les PME par une approche qualitative

Tableau V.1: Les nombres flous triangulaires utilisés dans l'approche DEMATEL..	103
Tableau V.2: Les nombres flous triangulaires utilisés dans l'approche QFD	105
Tableau V.3: La matrice de relation directe floue (A)	108
Tableau V.4: La matrice de relation directe floue normalisée	108
Tableau V.5: La matrice d'influence totale (T).....	109
Tableau V.6: La matrice de relation totale défuzzifiée (T)	109
Tableau V.7: Les valeurs obtenues de R , C , $R_i + C_i$ et $R_i - C_i$	110

Production scientifique

Publications

- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,** (2019) “Enhancement of the competitiveness and the financial capability of a manufacturing process through a new Value Stream Mapping approach.” *International Journal of Productivity and Quality Management*, Vol. 29, No. 4
- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,** (2019), "An integrated framework using VSM, AHP and TOPSIS for simplifying the sustainability improvement process in a complex manufacturing process", *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 18 No. 1,
- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,** (accepted) A Multiple Criteria Decision Making improvement strategy in complex manufacturing processes, *International Journal of Operational Research*
- Aouag, H., Soltani, M. and Mouss, M.D,** (accepted) “Enhancement of Value Stream Mapping application process through using Fuzzy DEMATEL and Fuzzy QFD approaches: a case study considering economic and environmental perspectives”, *Journal of modelling and management*.

Conférences internationales

- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,** (2019) “Enhancement of the industrial performances through using Value Stream Mapping method: a case study in an Algerian company” *International Symposium on Technology & Sustainable Industry Development, ISTSID’2019* At: EL OUED, Algeria
- Aouag, H., Soltani, M. and Mouss, M.D,** (2019) “Enhancement of the competitiveness and the financial capability of a manufacturing process through a new Value Stream Mapping approach.: a case study in an Algerian company” *International Symposium on Technology & Sustainable Industry Development, ISTSID’2019* At: EL OUED, Algeria

Conférences nationales

- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,**(2017)“Implémentation et déploiement d’une nouvelle approche à base de Lean Six Sigma pour le développement et l’amélioration de la durabilité de la production des petites et moyennes entreprises”*Journées Doctorales en génie industriel (L.D.17)*, 09-10 Novembre 2017.
- Soltani, M., Aouag, H. and Mouss, M.D,**(2019)“enhancement of the environmental performances of an Algerian company through using environmental Value Steam Mapping approach”*la première conférence nationale sur l’environnement et le développement durable (CNEDD-01/19)*, 12-06-2019

Introduction générale

Introduction générale

Les réformes économiques algériennes ont impulsé une dynamique en faveur des PME/PMI. Dans ce contexte, l'Algérie a mis en place un dispositif de mise à niveau des entreprises, mais, il doit être accompagnée d'une mise à niveau des activités environnementales, économiques et sociales. Ce plus positif doit s'inscrire dans un processus d'amélioration continue pour maintenir et améliorer la compétitivité des entreprises. Pour réagir aux changements, l'entreprise algérienne se doit d'innover et d'implanter efficacement et rapidement une culture d'amélioration pour soutenir ses différentes initiatives. Dans ce contexte, nous préconisons aux entreprises algériennes d'adopter le Lean Manufacturing et six sigma qui ont une philosophie et une démarche d'amélioration continue concentrée vers la réduction des gaspillages pour une production et un rendement plus juste et aussi pour mesurer et évaluer le niveau de qualité.

L'amélioration continue est l'un des problèmes les plus étudiés dans le domaine du management industriel. Ceci consiste à trouver des solutions qui permettent de fournir des améliorations aux processus de fabrication, aux produits ainsi que le développement des stratégies à long terme.

Dans ce contexte, l'approche Lean Six Sigma est l'une des stratégies d'amélioration continue qui a été employées par les entreprises pour améliorer leurs performances opérationnelles. En effet, l'approche Lean Six Sigma a été développée pour des objectifs limités tel que la réduction du gaspillage, l'amélioration de la productivité, l'amélioration de la qualité du produit et la satisfaction des exigences des clients. Mais avec l'émergence du concept de la production durable ainsi que leur intégration dans l'approche Lean Six Sigma ont suscités l'intérêt des chercheurs pour améliorer les performances des entreprises en matière de durabilité.

La littérature fournit de nombreux exemples d'intégration Lean Six Sigma dans le contexte de la production durable (**Cherrafi et al, 2016b ; Garza-Reyes, 2015**). L'approche commune dans ces cadres est de progresser vers la durabilité en identifiant un projet et en évaluant son état actuel de performance en matière de durabilité, puis en sélectionnant des outils Lean Six Sigma qui aideront l'entreprise à augmenter ses performances en matière de durabilité. Sur la base de cette méthodologie, nous constatons que la mise en œuvre de l'approche Lean Six Sigma dans un contexte de production durable est conduit à plusieurs barrières, limites, ambiguïtés et des difficultés au niveau

de leur processus d'application. Ces dernières sont justifiées par la diversité des objectifs, l'ambiguïté et l'incertitude dans la prise de décision à cause de la multiplicité des critères et les indicateurs de performance et de la complexité dans la sélection des outils apriori pour l'amélioration.

Ceci exige un ajustement et développement de la boîte à outils de l'approche Lean Six Sigma afin d'améliorer leur processus d'application. De plus, il est essentiel d'adopter des approches modernes en passant de produits orientés vers les coûts à des produits durables (Esfahbodi et al., 2016).

En se basant des avantages et les rôles importants des approches Lean Manufacturing et Six Sigma ainsi que le degré d'importance du concept de la production durable, notre objectif est l'amélioration du cadre méthodologique de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité d'un système de production. Ceci nous a amené aux questions suivantes :

« Quelle sont les différentes barrières de l'approche Lean Six Sigma ? »

« Comment surmonter des barrières qui augmentent le degré de difficulté de la mise en œuvre de l'approche Lean Six Sigma ? »

« Comment améliorer la durabilité de la production dans les petites et moyennes entreprises ? »

Pour répondre à toutes ces questions, nous allons proposer un ensemble d'approches Lean Six Sigma conventionnelles et améliorées permettant de traiter certaines barrières, complexités et difficultés dans le processus d'application du Lean Six Sigma afin d'améliorer les processus de fabrication dans les petites et moyennes entreprises.

Pour assurer une chronologie dans la présentation de notre travail, notre thèse a été divisé en Cinq chapitres.

Dans le premier chapitre nous présentons les notions et les concepts de base des approches utilisées. Nous commençons au premier lieu par une description générale des approches Lean Manufacturing et Six Sigma. Ensuite nous présentons une discussion des limites et barrières qu'imposent l'évolutions et l'orientation des approches Lean Manufactueing et Six Sigma vers le contexte de la production durable. Nous terminons ce chapitre par la proposition une nouvelle génération de l'approche Lean Six Sigma pour surmonter les barrières discutées.

Le deuxième chapitre est consacré à une revue de la littérature permettant de décrire et justifier la progression et le développement de l'approche Lean Six Sigma ainsi que son utilisation pour différents objectifs et dans différents contextes.

Dans le troisième chapitre nous présentons un développement et une validation d'une approche Lean Six Sigma conventionnelle pour améliorer les performances d'une PME algérienne. L'approche proposée est composée en deux parties. Dans la première partie, nous présentons une application de la méthode Value Stream Mapping pour identifier les différents types de gaspillage. La deuxième partie est dédiée à l'évaluation du niveau de qualité et la situation compétitive de l'entreprise en utilisant le DPMO pondéré et le niveau Sigma.

Dans le quatrième chapitre nous développons une nouvelle extension et amélioration de l'approche Lean Six Sigma conventionnelle. L'approche proposée est basée sur le cycle d'amélioration DMAIC qui vise à surmonter quelques barrières Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable.

Le cinquième chapitre est dédié à la troisième approche proposée. Cette approche vise à améliorer qualitativement le processus d'application de la méthode Value Stream Mapping en utilisant l'algorithme DEMATEL et la méthode QFD sous un environnement flou afin de surmonter d'autres barrières Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable.

Nous terminons notre thèse par une conclusion qui synthétise les approches développées, les résultats obtenus et quelques perspectives de recherche.

La figure suivante donne une vision claire de la structure de notre thèse

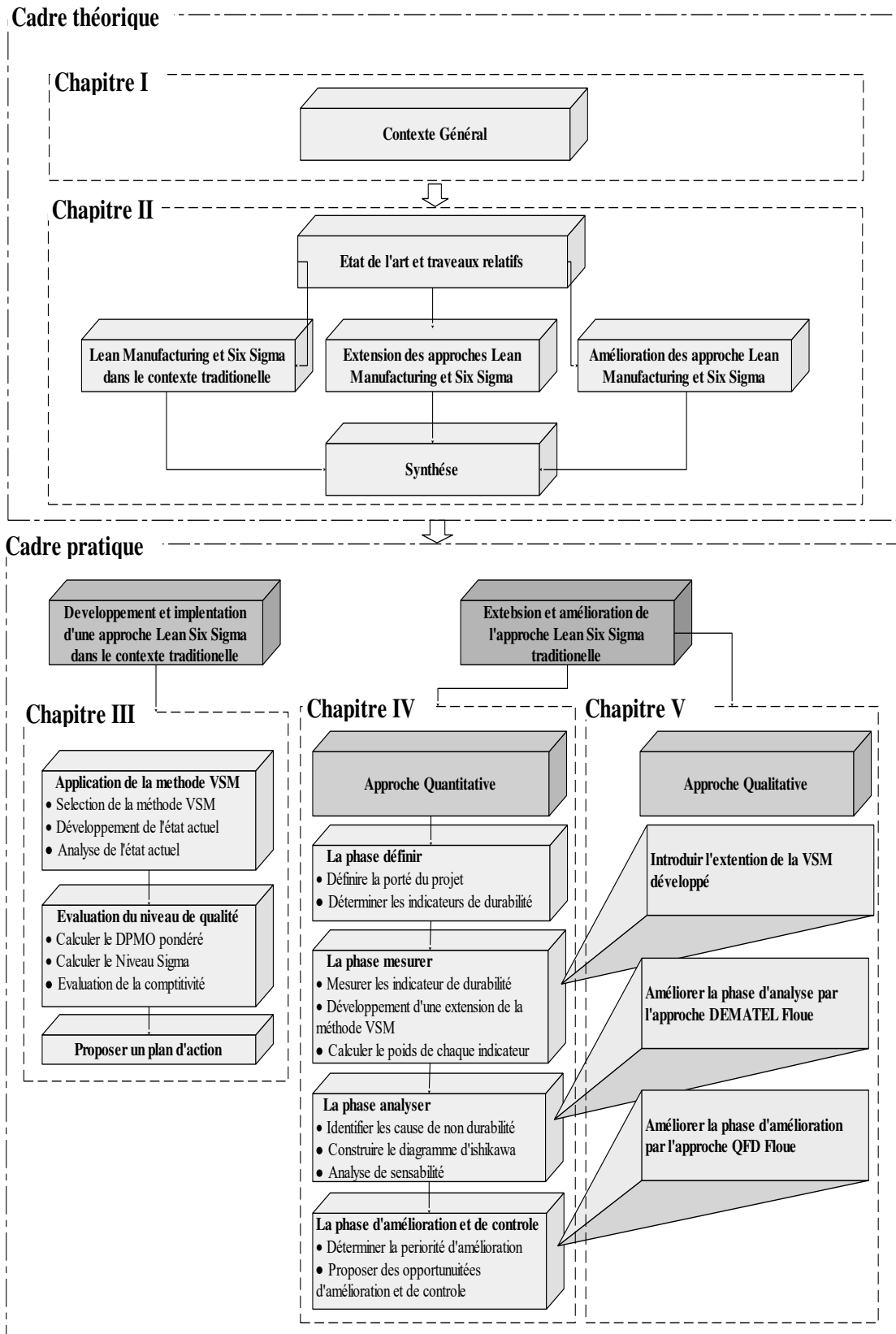


Figure I : Organisation de la thèse

Notre travail de thèse vise à atteindre les objectifs suivants

- Attirer l'attention des industriels algériennes vers la nécessité de partager la culture de Lean Six Sigma dans ses processus de gestion pour améliorer la production et assurer leur durabilité.
- Développement d'une approche Lean Six Sigma dans le contexte original de leurs utilisations, cette approche met en évidence l'amélioration du processus, ainsi que l'évaluation de la compétitivité d'une PME algérienne.
- Développement des extensions et des améliorations de l'approche Lean Six Sigma pour améliorer la durabilité de la production.

Chapitre I :

**Concepts de base des approches Lean
Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions
dans les PME**

I.1 Introduction

Traditionnellement, l'amélioration des systèmes industriels en matière de coût et qualité est considérée comme un domaine très intéressant aux entreprises pour assurer leurs compétitivités dans un environnement concurrentiel. Actuellement, les entreprises industrielles visent à élargir son champ d'activités et cherchent à améliorer leurs performances industrielles, en tenant en compte des critères de durabilité (économiques, environnementaux, sociaux).

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter le cadre théorique de notre thèse à travers la chronologie suivante :

- Présenter les concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma ainsi que l'avantage de leur intégration.
- Définir le concept et les principes de la production durable.
- Décrire l'évolution et l'orientation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma vers l'axe de la production durable.
- Définir quelques limites et barrières qui entravent l'exécution du processus Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable.
- Nous terminons ce chapitre par une description des tentatives pour surmonter les limites décrites.

I.2 L'approche Lean Manufacturing

Après la deuxième guerre mondiale, les entreprises japonaises ont souffert l'augmentation des coûts des matières premières en raison du manque de ressources, ce qui a influé négativement sur leur compétitivité industrielle dans le marché mondial.

Pour traiter cette situation, la philosophie Lean Manufacturing a été développée pour effectuer les opérations manufacturières avec le minimum des ressources matérielles, financières et humaines (**Behrouzi and Wong 2011**). La philosophie de base du Lean Manufacturing consiste à évaluer l'état actuel des systèmes et des processus de fabrication pour classer les activités en valeur ajoutée et non-valeur ajoutée afin de créer un état futur pour le processus de fabrication évalué.

L'approche Lean Manufacturing est caractérisée par une diversité des définitions. En outre, il n'existe pas une définition standard ou universelle utilisée pour expliquer le Lean Manufacturing d'une manière exacte. La littérature fournit diverses manières pour le définir.

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Le Tableau I.1 offre un ensemble de définitions de Lean Manufacturing proposées par plusieurs chercheurs :

Tableau I.1 : Définitions de l'approche Lean Manufacturing

L'auteur	Définition
Womack et al. (1990)	Lean Manufacturing est un processus d'amélioration dynamique conduit par un ensemble systématique des principes et des méthodes qui visent à une amélioration continue.
Womack and Jones (1996)	Le terme «Lean» désigne un système qui utilise moins d'entrées pour garder les mêmes résultats créés par un système de production.
Dankbaar (1997)	La production « Lean » vise à une utilisation optimale des compétences de la main-d'œuvre, en donnant aux travailleurs plus d'une tâche, et en encourageant les activités d'amélioration continue.
Storch and Lim (1999)	Lean Manufacturing est un moyen efficace pour satisfaire les besoins des clients tout en offrant aux producteurs un avantage concurrentiel.
Alukal (2003)	Lean Manufacturing est une philosophie de fabrication qui permet de réduire le délai entre la commande d'un client et l'expédition des produits grâce à l'élimination de toutes les formes de gaspillage.
Worley (2004)	Le Lean Manufacturing c'est l'élimination systématique des différents types de gaspillage dans toutes les parties de l'organisation.
Davis and Heineke (2005)	Lean Manufacturing est un ensemble intégré des activités orientées pour atteindre une production flexible en utilisant un minimum de ressources.

I.2.1 Les différents types de gaspillage

En se basant sur la définition de **Worley (2004)**, l'objectif principal de l'approche Lean Manufacturing est de réduire les coûts fournis pour exécuter toutes les opérations dans un processus de fabrication en éliminant les différents types de gaspillage, afin d'atteindre une performance optimale des processus de fabrication.

Le gaspillage, ou la non-valeur ajoutée (NVA), comprend toutes les opérations et les activités qui provoquent une consommation des ressources non créatrices de valeur ajoutée. Ces opérations sont situées dans la chaîne logistique de l'entreprise et qui sont jugées comme des inutiles et les clients n'ont pas prêts de les payer (**Zajkowska, 2012**).

(**Taiichi Ohno ,1988**) a identifié sept types de gaspillage, comme montre la figure I.1.

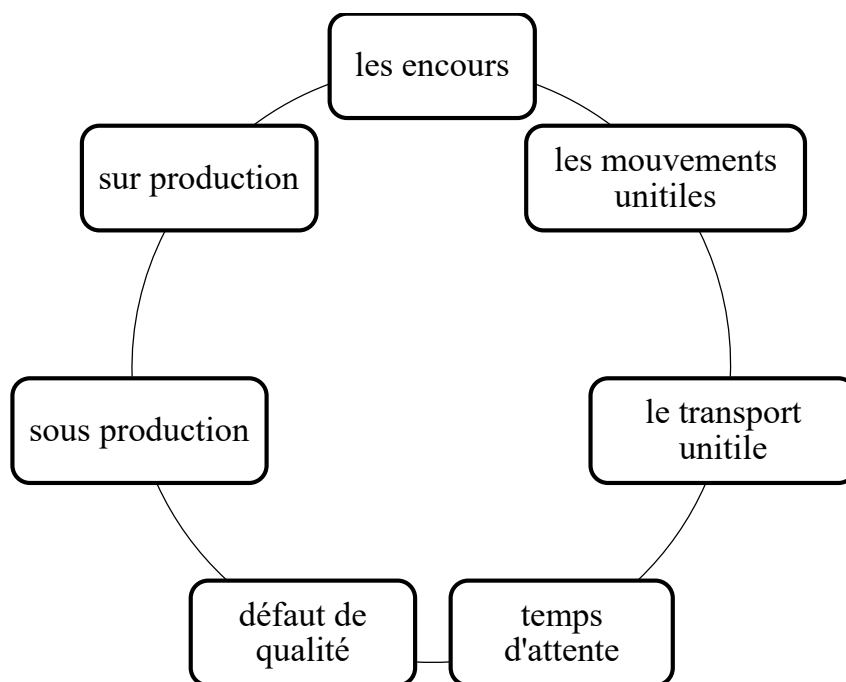


Figure I.1 : les sept types de gaspillage

Les types de gaspillage sont liés entre eux d'une manière significative, c'est-à-dire l'excès dans chaque type de gaspillage provoque la création d'un ou de plusieurs types. Les éléments suivants expliquent brièvement chaque type ainsi que son influence sur les autres.

- **La surproduction** signifie que la quantité produite est plus grande que la demande de client, ce type de gaspillage provoque un taux élevé des encours ainsi qu'augmentent les mouvements et le transport inutiles.
- **Le temps d'attente** : c'est une perte du temps qui traduit des retards au niveau d'exécution et le déroulement des opérations dans la chaîne de production.
- **Mouvements inutiles** : ce sont les mouvements effectués par les opérateurs qui n'ajoutent aucune valeur au produit, ce type de gaspillage peut être traduit des temps d'attente dans la chaîne de production.
- **Défaut de qualité** : défini par les pièces non conformes, c'est le type de gaspillage le plus influent sur la capacité économique des entreprises ainsi que sur le niveau de satisfaction des clients.
- **Transport inutile** : ce sont les mouvements du produit au niveau de la chaîne de production qui n'ajoutent aucune valeur au produit, ce type de gaspillage influe sur l'augmentation des mouvements inutiles.
- **La sous-production** : signifie que la quantité produite est inférieure à la demande de client, ce type de gaspillage augmente le taux de temps d'attente du client.

- **Les encours** : ce sont les stocks des produits semi-finis ou les stocks des déchets, réservent une grande surface et entravent le chemin du produit, ainsi qu'augmentent le nombre des défauts de qualité.

I.2.2 Les principes de l'approche Lean Manufacturing

L'approche Lean Manufacturing vise à améliorer d'une manière significative les performances qui permettent aux entreprises de « faire plus avec moins ». L'approche Lean Manufacturing offre un effort continu pour accélérer la production et minimiser les coûts dans chaque opération en éliminant la non-valeur ajoutée. L'approche Lean Manufacturing est basée sur les cinq principes de base pour atteindre les objectifs de l'approche (Aouag, 2016), (Bédry, 2012).

I.2.2.1 Principe 1 : Définir la valeur

La valeur est définie par ce que le client veut vraiment **prêt à payer**. Cependant, la valeur c'est les exigences du client présentées au niveau du centre de décision de l'entreprise comme étant le service ou le produit fournit au client au juste prix, au bon moment, et tel que défini par le client (Aouag, 2016).

I.2.2.2 Principe 2 : Définir la chaîne de valeur

Une chaîne de valeur est l'ensemble des opérations exécutées hors la création d'un bien en consommant des ressources financières, matérielles, matière et humaines. Au cours de la création de la chaîne de valeur, on distingue généralement trois types de valeur qui sont :

- ✓ **La valeur ajoutée** : sont les opérations qui ajoutent une marge financière au produit et que le client est prêt à payer.
- ✓ **La valeur non ajoutée** : sont des opérations qui n'ajoutent aucune valeur au produit, de sorte que les charges de ces opérations sont sous la responsabilité de l'entreprise.
- ✓ **La valeur non ajoutée mais nécessaire** : sont des opérations sans aucune valeur au produit, mais leurs exécutions sont nécessaires par exemple : le transport des pièces d'une opération à l'autre.

I.2.2.3 Principe 3 : Améliorer le déroulement des Flux

Ce principe vise à assurer une exécution successive et sans interruption de toutes les opérations pourraient être incluses dans la création du produit en éliminant les différents types de gaspillage à l'aide d'un ensemble des techniques et des outils qui permettent d'assurer un flux continu (Aouag 2016).

I.2.2.4 Principe 4 : Tirer la production

Cette phase permet de planifier la production à partir des besoins des clients en fonction des capacités financières, matérielles et humaines de l'entreprise. Cela garantit que les produits vont distribuer aux clients et non pour les stocker.

I.2.2.5 Principe 5 : Assurer la perfection

Une fois que les principes précédents sont mis en œuvre d'une manière efficace, la dernière phase vise à atteindre la perfection en assurant la continuité d'amélioration du processus. C'est-à-dire, les principes du Lean Manufacturing doivent être effectués d'une manière continue non seulement une fois.

I.2.3 Boîte à outils de l'approche Lean Manufacturing

Le Lean Manufacturing est un système sociotechnique intégré, qui comprend un ensemble des pratiques de gestion pour éliminer le gaspillage et réduire la variabilité dans les processus de fabrication. L'approche Lean Manufacturing englobe tout un ensemble d'outils qui a la capacité d'amélioration des processus en raison de leur adaptabilité à chaque type de gaspillage. Nous présentons dans ce qui suit les outils les plus utilisés et les plus efficaces dans l'élimination de la non-valeur ajoutée dans l'approche Lean Manufacturing.

I.2.3.1 Cartographie des processus :

La cartographie du processus est une méthode d'analyse et de modélisation des processus de fabrication. Elle permet de donner une vision générale sur le fonctionnement de l'entreprise et de présenter l'interaction entre les différentes parties et les différents acteurs d'un système (client, fournisseur, employé) de l'organisation.

I.2.3.2 Cartographie de chaîne de valeur (VSM) :

D'abord, le terme de la chaîne de valeur a été utilisé pour la première fois dans le livre « The Machine that Changed the World » **Womack (1990)**. Selon **Martin et Osterling, (2014)**. *‘Une chaîne de valeur est la séquence d'activités requises pour concevoir, produire et livrer un bien ou un service aux clients’*. La chaîne de valeur inclut toute l'activité effectuée par les employés ainsi que les informations échangées dans un environnement de travail.

La cartographie de la chaîne de valeur ou Value Stream Mapping (VSM) en anglais, c'est la méthode la plus utilisée dans l'approche Lean Manufacturing, elle a été introduite par Michael PORTER en 1985 pour le but de modéliser les flux informationnels et de matériels allant des matières premières jusqu'au produit fini. La méthode VSM présente un outil très

efficace pour la visualisation des activités au sein d'un processus de fabrication, ainsi que l'élimination des activités sans valeur ajoutée.

Martin et Osterling (2014) ont résumés les avantages de la cartographie des flux de valeur dans les points suivants :

- C'est un outil visuel peut aider à visualiser le travail non visible.
- Il Permet de créer un lien entre l'entreprise et le client, ce qui aide l'entreprise à maximiser la satisfaction du client.
- La Cartographie de la chaine de valeur fournit une vision globale sur le système de production.
- La cartographie de la chaine de valeur peut aider à visualiser et à simplifier le processus de travail.

Le processus de création d'une carte de la chaine de valeur peut suivre une démarche bien organisée qui se compose d'un ensemble des étapes, comme suit (**Rother et Shook 2003**) :

- **Identifier la famille des produits** : l'identification de la famille des produits nous a permis de déterminer le produit critique qui a une influence économique sur l'entreprise. En plus, elle permet de comprendre les caractéristiques du produit pour effectuer une amélioration sans changement dans la structure des produits.
- **Construction de l'état actuel** : la carte d'état actuel montre comment les activités sont exécutées réellement dans un contexte de travail. La construction de la carte d'état actuel commence par la collecte des données et des informations en interrogeant les personnes qui effectuent les tâches.

Basant sur les informations recueillies, la cartographie de l'état actuel est créée à l'aide des symboles prédéfinis (Annexe I) qui permettent de présenter les différents éléments de la chaine de valeur, indiquant les informations, les étapes de processus requises et les délais nécessaires pour livrer le produit ou le service demandé par le client.

- **Analyse de l'état actuel** : une fois la carte d'état actuel est dessinée, une analyse ou bien une évaluation doit être effectuée pour déterminer les différents types de gaspillage et leurs causes profondes afin de trouver des solutions pour créer un nouvel état.
- **Développement de l'état futur** : C'est la dernière étape du processus d'application de la méthode. Elle consiste à développer un état futur basé sur les résultats d'analyse

en mettant en œuvre des modifications qui apportent des opportunités d'amélioration permettant de réduire ou éliminer le gaspillage.

I.2.3.3 Diagramme de spaghetti :

Le diagramme de spaghetti est un outil graphique simple, utilisé pour cartographier le parcours physique des produits, personnes et des informations dans une entreprise. Cet outil offre une prise de conscience des déplacements réels effectués dans un processus, ainsi que permet de détecter les mouvements inutiles, afin d'effectuer un réaménagement physique des produits et des équipements.

La mise en œuvre du diagramme de spaghetti suit un ensemble des étapes simples à effectuer, comme l'indiquent les points suivants :

1. Dessiner la zone de travail avec la prise en compte des différents composants du système (produits, équipements stocks...).
2. Tracer avec des couleurs le déroulement des différents flux (matériel, produit, personnel, informationnel).
3. Déterminer le temps de chaque activité et la distance parcourue par les différents flux.
4. Proposer une nouvelle organisation des flux pour améliorer le processus et réduire les tâches ou les mouvements sans valeur ajoutée.

I.2.3.4 La méthode 5S :

C'est un processus d'optimisation vise à améliorer l'organisation du poste de travail et assurer les conditions ergonomiques aux employés afin de faciliter et simplifier l'exécution des différentes tâches. La méthode 5S est une combinaison des cinq mots japonais (seiri, seiton, seiso, seiketsu, and shitsuke). Chaque mot représente une étape d'application de la méthode, comme suit :

- **Seiri (Débarras)** : cette étape permet de garder les objets nécessaires et supprimer tout ce qui est inutile et entrave l'exécution des tâches.
- **Seiton (Rangement)** : cette étape à pour but de placer les objets dans un propre endroit et les classer selon la fréquence de leurs utilisations.
- **Seiso (Nettoyage)** : consiste à éliminer les déchets et assurer la propriété du poste de travail pour éviter le désordre dans les postes de travail.
- **Seiketsu (order)** : mise en œuvre des règles de travail pour maintenir l'application des trois premières étapes.

- **Shitsuke (Rigueur)** : mise en œuvre des programmes et des formations périodiques pour améliorer la discipline collective et assurer la durabilité de l'amélioration continue des conditions de travail.

I.2.3.5 La méthode SMED :

Single Minute Exchange of Die, signifie en langue française (Système de modification rapide des réglages des machines). C'est une méthode d'organisation dont le but est de réduire de façon systématique le temps de changement d'outils à moins de 10 minutes. (Norme AFNOR NF X 50-310). La méthode SMED est utilisée beaucoup plus dans les chaînes de production mono produits en raison des pertes du temps dans chaque changement d'outil pour lancer la production d'un autre produit. La méthode SMED est appliquée en trois étapes principales :

- **Étape 1** : séparation des opérations internes et des opérations externes : les opérations internes sont les opérations qui obligent l'arrêt des machines par exemple : montage et démontage des outils. En outre, les opérations externes sont celles qui peuvent effectuer où les machines sont dans un état de marche, par exemple : la préparation des outils qui vont être montés, préparation de l'outillage...
- **Étape 2** : Conversion le plus possible des opérations internes en opérations externes. Cette étape a pour but de réduire au maximum le nombre des opérations internes.
- **Étape 3** : Rationalisation de toutes les opérations. Le but de cette étape est de minimiser le temps des opérations internes en élaborant des diagrammes des opérations performantes.

I.2.3.6 Total productive maintenance

C'est une méthode qui a été développée au Japon dans les années 1970 pour répondre aux besoins de juste à temps et atteindre la productivité optimale d'un système de production. La méthode TPM prolonge ou maximise le cycle de vie de la machine à travers la gestion et l'optimisation de la sûreté de fonctionnement du système et réduit les différentes pertes de rendement. La méthode TPM repose sur deux principales phases, chaque phase comprend un ensemble des objectifs. Comme suit :

- **La phase analyse** : cette phase vise à planifier les objectifs du TPM, et établir les règles de leur politique.

- **La phase d'amélioration :** cette phase permet d'améliorer l'expertise et les compétences des employés au sein de l'entreprise. En plus, elle consiste à appliquer et suivre le programme des objectifs de la méthode TPM.

I.2.3.7 Système Kanban :

Kanban est un mot japonais qui signifie une étiquette. La méthode Kanban est une technique de contrôle et de planification de la production selon la demande du client. Elle a été développée dans l'entreprise Toyota au Japon après la deuxième guerre mondiale pour éliminer les stocks des encours et éviter la surproduction.

I.2.3.8 Takt time :

Takt Time : c'est un terme qui signifie le rythme de la demande des clients. Il définit le taux auquel une entreprise doit fabriquer un produit pour satisfaire la demande de ses clients. Le Takt Time est calculé à l'aide de l'équation suivante.

$$Takttime = \frac{\text{temps d'ouverture total}}{\text{demande de client}}$$

Sachant que les arrêts autorisés sont définis par : pauses, repas, réunions, nettoyage de poste, la cadence n'autorise pas les arrêts machines (pannes, changements de séries).

I.3 L'approche Six Sigma

Six Sigma est une approche d'amélioration des processus de fabrication, elle a été introduite par l'entreprise Motorola aux États-Unis à la fin des années 1980. La méthode Six Sigma devient célèbre dans les années 1990 lorsque Général Electric décide de l'appliquer dans toutes les parties de leur organisation. Dans les années 1996-1998, Six Sigma a été diffusé, par la suite dans des grandes entreprises : Nokia, Sony, Toshiba, Ford Motor, Whirlpool, etc.

L'approche Six Sigma vise à réduire les variations d'un processus de fabrication pour assurer la qualité du produit, augmenter le niveau de satisfaction clientèle et améliorer la compétitivité d'une entreprise.

L'approche Six Sigma peut être considérée comme un mécanisme opérationnel qui offre aux entreprises industrielles, commerciales, et des services des opportunités pour améliorer l'exécution de leurs opérations en assurant la réduction des défauts de qualité. Alors, plusieurs définitions sont proposées dans la littérature pour décrire l'approche Six Sigma comme indique dans le tableau II.2.

Tableau I.2 : Définitions de l'approche Six Sigma

Auteur	Définition
Linderman et al. (2003)	Une approche organisée d'une manière systématique pour une amélioration stratégique des processus de fabrication, la conception des nouveaux produits et le développement des services.
(Laureani and Antony, 2018)	Six Sigma est une approche d'amélioration des différents types d'organisations (industrielles, services), visant spécifiquement à maximiser la valeur des profits en augmentant le niveau de qualité, la satisfaction des clients et la capacité compétitive des entreprises.
(Pande et al., 2000).	l'approche Six Sigma est une mesure statistique de la performance d'un processus, afin d'atteindre un niveau de qualité de classe mondiale.
Snee (1999)	une stratégie d'amélioration qui cherche à identifier et éliminer les causes des erreurs, défauts ou d'échecs dans les processus de fabrication en se concentrant sur les produits critiques pour les clients.

I.3.1 La structure organisationnelle de l'approche Six Sigma

L'approche Six Sigma prend une structure bien organisée qui englobe plusieurs méthodes, techniques et modèles. Ces dernières peuvent être divisées en plusieurs catégories selon leurs philosophies, nature, et l'objectif d'utilisation. Par exemple, **Jeannine et al. (2005)** ont proposés une classification des méthodes de l'approche Six Sigma en trois catégories comme la montre la figure I.2 :

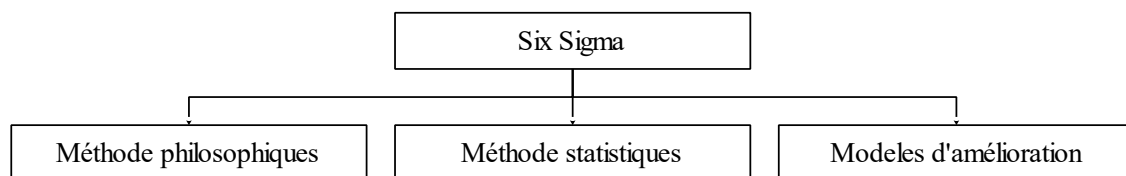


Figure I.2 : Classification des outils Six Sigma

I.3.1.1 Des méthodes philosophiques

Sont des méthodes simples et faciles à implémenter avec des résultats significatifs. Généralement, ces méthodes sont utilisées pour générer les idées qui permettent de simplifier la complexité des problèmes liés à la satisfaction du client, l'amélioration des processus de fabrication ainsi que la réduction de la variabilité des processus. Les titres ci-dessous décrivent un ensemble des outils les plus utilisés dans cette catégorie.

a) Diagramme d'Ishikawa (la méthode des 5M) :

C'est un outil qui permet de déterminer les causes approfondies d'un problème qui entravent l'exécution des différentes tâches de la production. Le diagramme d'Ishikawa prend une

forme d'une arête de poisson de cinq racines, chaque racine représente une catégorie des causes (matière, méthode, main-d'œuvre, milieu, matériel) comme la présente la figure I.3 :

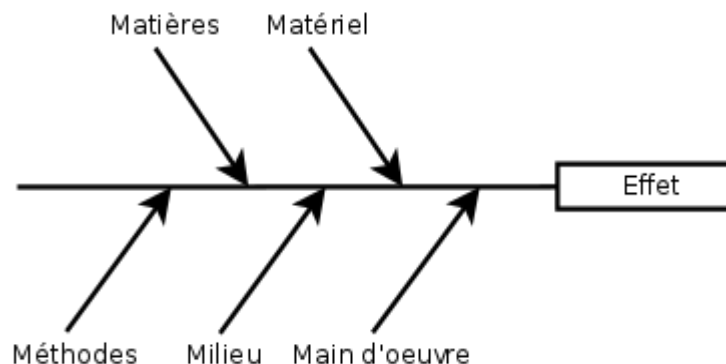


Figure I.3 : Diagramme d'Ishikawa

b) Le brainstorming

Brainstorming a été initialement développé dans la discipline du marketing dans les années 1940. Cette technique a pour but de chercher des solutions des problèmes en ouvrant le champ de l'esprit de mis en avant des opinions et des idées. Le brainstorming c'est la méthode la plus utilisée dans le domaine du management en raison de leur facilité d'application, et ne demande qu'un minimum de moyens matériels et humains.

c) Charte de projet

Une charte de projet est une fiche ou bien un document de travail permettant de définir les grandes lignes d'un projet Six Sigma. La charte de projet décrit, d'une manière générale, un projet en spécifiant les ressources nécessaires, les limites et les participants. Alors, les éléments nécessaires d'une charte de projet sont définis comme suit (**Basu2009**) :

- ✓ Titre du projet : Il est important d'utiliser un titre descriptif qui permettra à identifier rapidement le projet.
- ✓ Type de projet : spécifier la nature du projet, ce que soit un projet d'amélioration de la qualité, augmentation des revenus, réduction des coûts....
- ✓ Description du projet : présenter une description claire du problème, des objectifs et les procédures utilisées.

I.3.1.2 Des méthodes statistiques

Statiquement, le mot sigma est associé par le symbole σ qui signifie un écart type. L'écart type peut être assimilé à la dispersion d'un processus. L'écart type est défini par la racine carrée de la somme des différences au carré de chaque valeur par rapport à la moyenne de l'échantillon considéré. Dans l'approche traditionnelle, les entreprises industrielles visent

d'aboutir un niveau de qualité correspondant à $\pm 3 \sigma$, soit 99,73% des éléments conformes et 2700 unités défectueuses par million (Pièces défectueuses Par Million PPM). Actuellement, l'objectif du « processus Six Sigma » est d'obtenir un niveau de qualité de $\pm 6 \sigma$, ce qui correspond à 0,002 pièce défectueuse par million. Dans l'aspect statistique de l'approche Six Sigma, plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour atteindre l'objectif souhaitée et le contrôler d'une manière durable.

➤ Les cartes de contrôle

Une carte de contrôle est définie comme un outil graphique avec deux axes X et Y, tel que X c'est l'axe horizontal qui présente le temps, et l'axe vertical Y qui décrit les mesures statiques effectuées sur un échantillon. Une carte de contrôle est caractérisée par trois limites de contrôle permettant d'étudier la stabilité du processus de fabrication ou bien l'existence des variabilités.

Les limites d'une carte de contrôle sont définies par : la ligne centrale (LC), la limite de contrôle inférieure (LCI) et la limite de contrôle supérieure (LCS), sur lesquelles les valeurs de certaines mesures statistiques sont tracées par des points (Figure I.4). Si les points situés au-dessus de LCS ou au-dessous de la LCI indiquent l'existence des causes de variabilité. Si les points sont situés plus proches que la ligne centrale, le processus est sous contrôle.

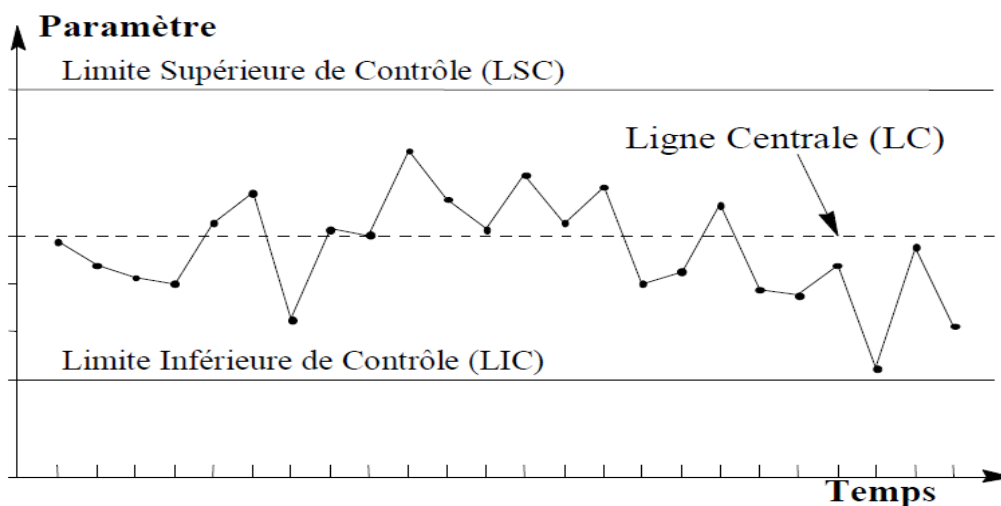


Figure I.4 : Carte de contrôle

Les cartes de contrôles sont divisées en deux grandes familles, les cartes de contrôle par mesure et les cartes de contrôle par attributs.

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

- **Les cartes de contrôle par mesure** : ce type des cartes est utilisé pour surveiller ou contrôler une caractéristique mesurable de façon continue. Cette catégorie englobe un ensemble des cartes, parmi les plus utilisées, on trouve :

Tableau I.3: Les cartes de contrôle par mesure

Carte de contrôle	Utilisation	Carte de contrôle	Limite centrale	Limite supérieure	Limite inférieure
Carte $(\bar{X}, R)$	Détecter la présence des causes affecte la tendance centrale du processus, ainsi que les causes qui affectent la variabilité du processus dans le cas où la taille de l'échantillon est supérieure à 10	Carte $\bar{X}$	$LC = \bar{\bar{X}}$	$LCS = \bar{\bar{X}} + A_2 R$	$LCI = \bar{\bar{X}} - A_2 R$
		Carte R	$LC = \bar{R}$	$LCS = D_3 \bar{R}$	$LCS = D_4 \bar{R}$
Carte $(\bar{X}, S)$	Détecter la présence des causes affecte la tendance centrale du processus, ainsi que les causes qui affectent la variabilité du processus dans le cas où la taille de l'échantillon est inférieure à 10	Carte $\bar{X}$	$LC = \bar{\bar{X}}$	$LCS = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S}$	$LCS = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S}$
		Carte S	$LC = \bar{S}$	$LCS = B_4 \bar{S}$	$LCS = B_3 \bar{S}$

Avec :

Carte $\bar{X}$ Carte de contrôle des moyenne

Carte R carte de contrôle des étendus

$\bar{\bar{X}}$ La moyenne des moyennes d'un ensemble des échantillons

R l'étendue de l'échantillon

$\bar{R}$ La moyenne des étendus d'un ensemble des échantillons

$\bar{S}$ La moyenne des écarts-types des échantillons

$A_2, D_3, D_4, A_3, B_3, B_4$ présentent des coefficients pour calculer les limites de contrôle qui sont déterminer en fonction de la taille de l'échantillon

- ✓ **Les cartes de contrôle par attribut** : utilisées pour des données de type attribut. Ce sont les cartes les plus utilisées pour afficher des taux ou des proportions dans le cas où les tailles des échantillons sont variées, ce type de carte est caractérisé par des limites de contrôle dépend de la taille de l'échantillon. Le tableau suivant présente quelques cartes de contrôle par attribut :

Tableau I.4 : Les cartes de contrôle par attribut

	Utilisation	Limite Centrale	Limite de contrôle supérieur	Limite de contrôle inférieur
Carte p	Suivre la proportion des unités non conformes. Utilisée dans le cas où la taille des échantillons fixe ou variable	$LC = \bar{p}$	$LCS = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	$LCI = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$
Carte np	Suivre le nombre des unités non conformes. utilisée dans le cas où la taille des échantillons fixe ou variable	$LC = \overline{n\bar{p}}$	$LCS = \overline{n\bar{p}} + 3\sqrt{\overline{n\bar{p}}\left(1 - \frac{\overline{n\bar{p}}}{n}\right)}$	$LCS = \overline{n\bar{p}} - 3\sqrt{\overline{n\bar{p}}\left(1 - \frac{\overline{n\bar{p}}}{n}\right)}$
Carte u	Suivre le taux de non-conformités par unité de contrôle.	$LC = \bar{u}$	$LCS = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$	$LCI = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$
Carte c	suivre le nombre de non-conformités, par unité de contrôle	$LC = \bar{c}$	$LCS = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$	$LCS = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$

Avec :

$\bar{p}$ La proportion moyenne des unités défectueuses

n Le nombre des prélèvements ou le nombre des échantillons

$\overline{n\bar{p}}$ Le nombre des unités défectueuses

$\bar{u}$ La proportion moyenne de non-conformité

$\bar{c}$ Le nombre moyen de non-conformité

➤ Notion de capacité

C'est un terme qui signifie l'aptitude d'un processus de fabrication et leur capacité d'aboutir un niveau de qualité satisfait aux exigences des clients. La capacité est caractérisée par sa propre dispersion naturelle (C_n). Cette dernière est définie par : $C_n = 6\sigma$. En général le concept de capacité est exprimé par deux types qui sont : la capacité de la machine et la capacité du processus.

a) La capacité de la machine (cm) :

Reconnue par la capacité à court terme, elle permet de mesurer les performances d'une machine à réaliser des pièces conformes en respectant l'intervalle de tolérance, ce type de capacité est exprimé par la formule suivante :

$$cm = \frac{T_s - T_i}{6\sigma} \text{ Avec } T_s - T_i \geq 8\sigma \text{ Eq (I.1)}$$

T_s = tolérance supérieure.

Ti = tolérance inférieure.

σ = écart type instantané.

- **L'indicateur de centrage (Cmk)**

Le résultat optimal de l'indicateur précédent ne donne pas une information exacte qui affirme concrètement que la machine ne produit pas des pièces défectueuses, c'est-à-dire malgré l'obtention d'une valeur acceptable de la capacité de la machine, on peut avoir des pièces hors l'intervalle de tolérance à cause du décentrage de la moyenne du processus par rapport aux tolérances. Dans ce cas il est nécessaire d'utiliser un autre indicateur défini par l'indicateur de centrage ou de réglage en utilisant la formule suivante :

$$Cmk = \min\left(\frac{\bar{X}-Ti}{3\sigma}, \frac{Ts-\bar{X}}{3\sigma}\right) \text{Eq (I.2)}$$

Ts = tolérance supérieure.

Ti = tolérance inférieure.

$\bar{X}$ la moyenne des mesures des échantillons

- b) Capabilité du processus (Cp):**

Reconnue par la capabilité à long terme, utilisé pour mesurer la capacité d'un processus de fabrication et leurs performances qui permettent d'atteindre un niveau de qualité acceptable. Elle se distingue de la capabilité à court terme dans l'estimation de la dispersion. La capabilité du processus est estimée comme suite :

$$cp = \frac{Ts-Ti}{6\sigma} \text{ avec } \sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \text{Eq (I.3)}$$

Ts = tolérance supérieure.

Ti = tolérance inférieure.

$\bar{R}$ la moyenne des étendues des échantillons

d_2 coefficient pour la ligne de centrage

- **L'indicateur de centrage (Cpk)**

C'est la même situation on peut la trouver dans la capabilité du procédé. Il existe une possibilité d'obtenir des défauts de qualité malgré la valeur optimale du Cm, due au décentrage de la moyenne du procédé. L'indicateur de réglage est défini par l'équation suivante :

$$Cpk = \left(\min \frac{Ts-\bar{\bar{X}}}{3\sigma} \text{ ou } \frac{\bar{\bar{X}}-Ti}{3\sigma}\right) \text{Eq (I.4)}$$

$\bar{\bar{X}}$ = moyenne des moyennes des échantillons.

Ts = tolérance supérieure.

Ti = tolérance inférieure.

À partir des résultats d'indicateurs précédents on distingue plusieurs cas, qui sont définis et interprétés comme indique dans la Figure I.4.

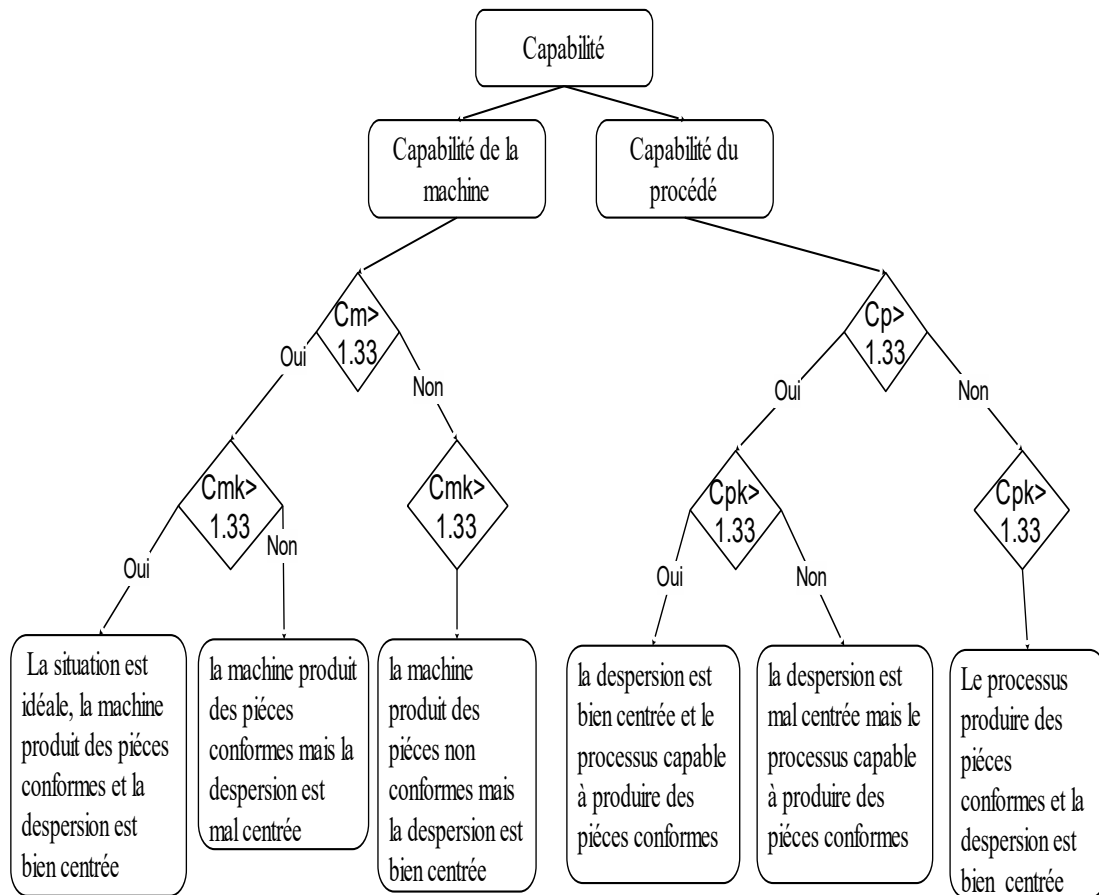


Figure I.5: Interprétation des indicateurs de la capacité

➤ La corrélation

C'est une mesure statistique utilisée pour montrer l'existence ou l'absence de la liaison entre deux échantillons des variables quantitatives. La mesure de cette corrélation est appuyée sur le calcul du coefficient de corrélation par l'équation (I.5).

$$r_{x,y} = \frac{\text{covar}(X,Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \cdot \text{var}(Y)}} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum (X - \bar{X})^2)(\sum (Y - \bar{Y})^2)}} \text{Eq (I.5)}$$

A partir de résultat de la valeur du r, on distingue généralement trois cas, comme nous le montre la figure I.5.

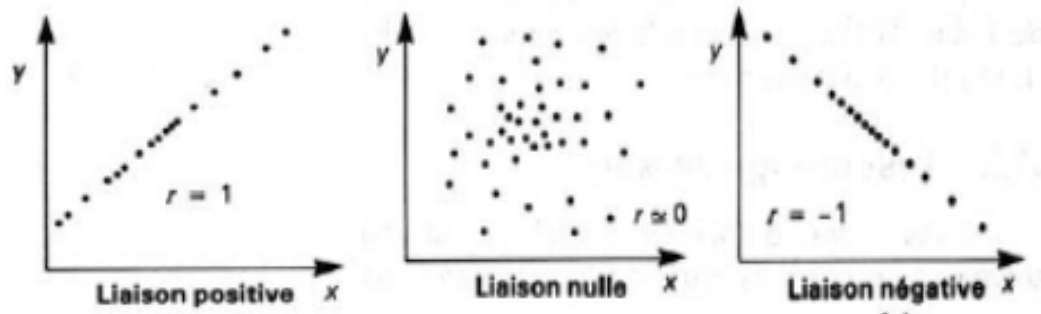


Figure I.6: Interprétation des résultats du coefficient de corrélation

➤ Plans d'expérience

C'est une technique d'amélioration statistique puissante, proposée par Taguchi en 1993 pour améliorer la sortie d'un système à partir de leurs facteurs d'entrée qui ont été généralement classée en deux catégories : facteurs contrôlable et facteurs non contrôlable, comme indiqué dans la figure I.6 :

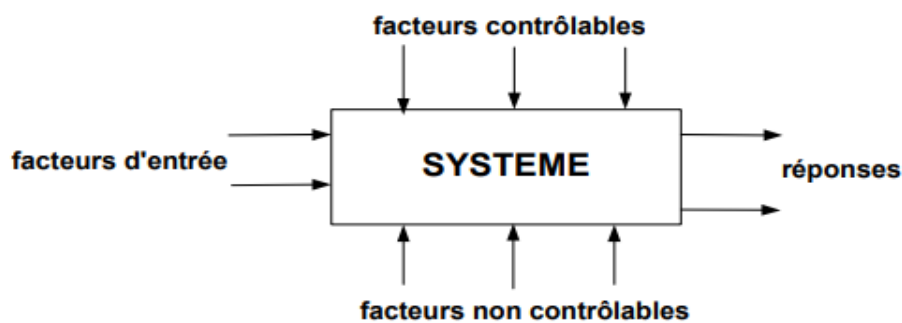


Figure I.7: Les différents facteurs d'un processus de fabrication

Le principe de base des plans d'expérience est de déterminer la meilleure interaction des facteurs ou paramètres afin d'obtenir une performance optimale d'un système. L'application des plans d'expérience est basée sur deux outils essentiels (Maher et al., 2015):

- **La matrice orthogonale.**

Parfois la combinaison des facteurs et leurs niveaux nous donnent un grand nombre des essais, par exemple : on considère un système défini par 9 facteurs d'entrée et une seule réponse, chaque facteur d'entrée peut avoir trois niveaux, dans ce cas le nombre des combinaisons et des essais est très grand ($3^9=19683$) et qui nécessite des coûts et du temps. A cet effet, Tagushi propose un ensemble des matrices qui s'appellent les matrices orthogonales, utilisées pour réduire le nombre des essais et supprimer tous les tests ne fournissant aucune information afin d'aboutir les résultats désirés dans un temps minimal avec un coût réduit.

- **Le rapport signal sur bruit (S / N),**

C'est un paramètre utilisé pour identifier le type des facteurs de contrôle qui optimisent la variabilité de la réponse. Il existe trois types de ratios(s/n), qui sont ; le plus petit est le meilleur, le nominal est le meilleur, le plus haut est le meilleur. Chaque type a une propre équation de calcul, comme suit :

a) Le plus petit est le meilleur type,

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} (\sum y^2) \right) \text{Eq (I.6)}$$

Avec :

y les réponses pour la combinaison des niveaux des facteurs données

n le nombre des réponses dans la combinaison de niveaux de facteurs

b) Le nominal est le meilleur,

$$S/N = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \text{Eq (I.7)}$$

Avec :

$\bar{y}$ La valeur moyenne des réponses pour la combinaison des niveaux des facteurs donnés

s_y la variance des valeurs de test

c) Le plus haut est le meilleur,

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} (\sum (1/y^2)) \right) \text{Eq (I.8)}$$

Avec :

y les réponses de la combinaison des niveaux des facteurs données

n le nombre des réponses dans la combinaison de niveaux de facteurs

➤ **Le diagramme de PARETO**

Le diagramme de PARETO est un outil qui permet d'évaluer et de classer des causes d'un problème par ordre d'importance. Le diagramme Pareto repose sur la loi 20/80, c'est-à-dire seulement 20% des causes qui sont responsables aux 80% des effets. La construction du diagramme Pareto est basée sur plusieurs étapes, la première consiste à associer un poids qui représente le degré d'importance de chaque cause, ensuite classer les causes par ordre décroissant, dans la troisième étape on calcule le pourcentage cumulé, la dernière étape vise à tracer une courbe qui représente le diagramme de Pareto comme l'indique la figure I.7 :

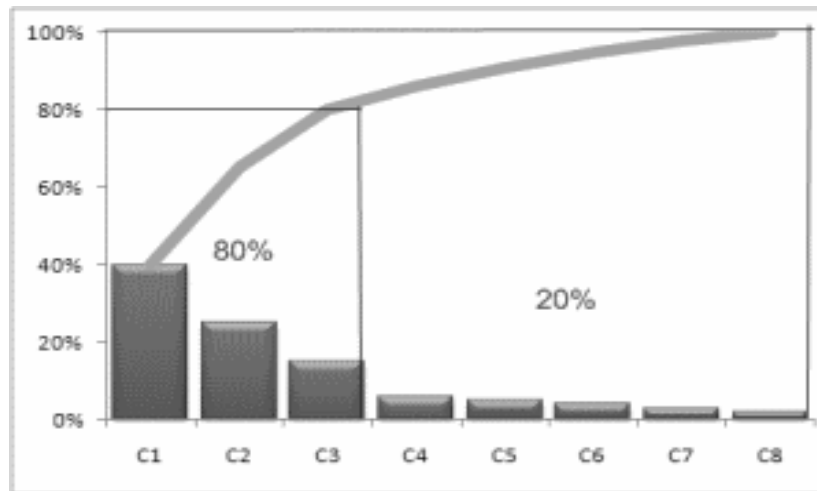


Figure I.8: Diagramme de Pareto

I.3.1.3 Modèles d'amélioration

La troisième catégorie dans l'organisation de l'approche Six Sigma englobe plusieurs modèles d'optimisation et d'amélioration des processus de fabrication et des produits, chaque modèle se caractérise par leur structure et leur propre objectif. Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques modèles les plus utilisés dans la littérature.

➤ Le modèle DMAIC

La mise en place de la démarche Six sigma est généralement basée sur un processus d'amélioration qui se compose de cinq étapes principales, ces dernières sont regroupées sous la forme d'un cycle qui prend l'acronyme DMAIC, qui signifie (Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler) comme l'indique la figure I.8 :

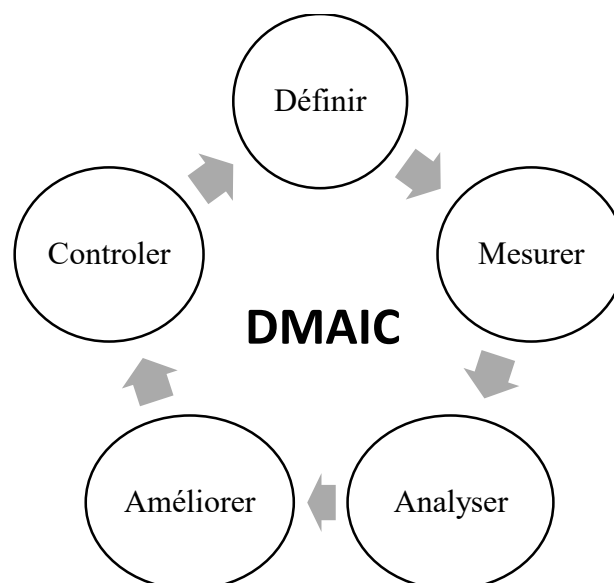


Figure I.9: Cycle d'amélioration DMAIC

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Chaque étape se caractérise par leur propre objectif ainsi que leur ensemble des outils quel que soit philosophique ou bien statistique comme nous le montre le Tableau I.5.

Tableau I.5 : Boîte à outils du Lean Six Sigma (Zajkowska 2012)

Étape	Description ou objectif	Outils
Définir	C'est l'introduction du cycle d'amélioration DMAIC, elle vise à définir les grands axes du projet en identifiant les problèmes et les objectifs d'étude.	Diagramme SIPOC, VOC, Diagramme CTQ, chart de projet.
Mesurer	Présente la deuxième phase du processus d'amélioration. Elle consiste à collecter les valeurs nécessaires liées aux objectifs du travail et mesurer les indicateurs de la performance dans leurs états actuels.	Cartographie de la chaîne de valeur (VSM), carte de contrôle, capacité du processus et de machine, Niveau de sigma, Défauts Par Million d'Opportunités DPMO.
Analyser	Cette phase permet d'analyser les valeurs obtenues dans la phase précédente, ainsi que déterminer les causes approfondies des problèmes trouvés dans la chaîne de production.	Diagramme Ishikawa, diagramme de Pareto, régression multiple, AMDEC, Histogramme, Test d'hypothèse.
Améliorer	Consiste à proposer des opportunités d'optimisation pour réduire le taux des problèmes et de gaspillage dans le processus de fabrication.	Plan, d'expérience, Kanban, flux contenu, Poka-Yoke, 5S, Maintenance Productive Totale TPM.
Contrôler	Cette phase permet d'assurer le suivi et le contrôle des améliorations obtenues dans la phase précédente.	Niveau de sigma, Défauts Par Million d'Opportunités DPMO, Cartes de contrôle, Contrôle visuel.

➤ Le modèle DMADV

C'est un processus d'amélioration définie par l'acronyme DMADV (Définir, Mesurer, Analyser, Désigne, Vérifier). Son utilisation couvre le champ de la conception des nouveaux processus de fabrication, produits et services ou bien l'amélioration des existants. Il se diffère de la démarche DMAIC dans les deux dernières étapes (désigne, vérifié), ainsi que dans la procédure de la mise en œuvre des trois premières phases (Définir, Mesurer, Analyser). Les étapes du processus de la démarche DMADV sont schématisées dans la Figure I.9.

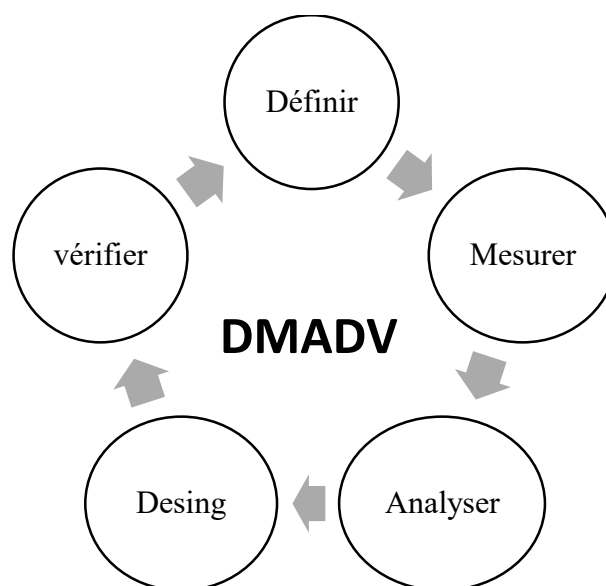


Figure I.10: Cycle d'amélioration DMADV

Au niveau de chaque phase du processus DMADV, on a un propre objectif. Ces phases sont présentées comme suit :

- **Définir** : cette phase a pour but de définir les objectifs de l'étude, et déterminer les caractéristiques du produit ou du processus qu'on a besoin d'améliorer en respectant les exigences du marché et du client.
- **Mesurer** : cette phase vise à traduire les besoins définis dans l'étape précédente en indicateurs mesurables afin de faciliter leurs quantifications.
- **Analyser** : cette phase consiste à analyser les résultats des mesures précédentes pour déterminer les causes des défauts du produit ou du processus.
- **Design** : basant sur les étapes précédentes, cette étape nous a permis d'offrir une nouvelle conception d'un nouveau produit ou processus ou une conception qui améliore un produit ou un processus existant.
- **Vérifier** : cette phase permet de vérifier la conception obtenue dans la phase précédente et évaluer sa capacité qui permette de satisfaire les besoins attendus par les clients.

➤ Déploiement de la fonction de qualité (QFD)

L'approche Déploiement de la Fonction de Qualité (QFD) a été développée au Japon en 1976 par Akao. QFD est un outil de management de la qualité bien structuré, utilisé dans les processus d'amélioration et de développement des produits. L'idée de base du QFD est de définir les exigences attendues par les clients et les traduits d'une manière stratégique en un ensemble des techniques.

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

La structure globale de la méthodologie QFD prend une forme d'une maison constituée de six parties, comme montre la Figure I.10.

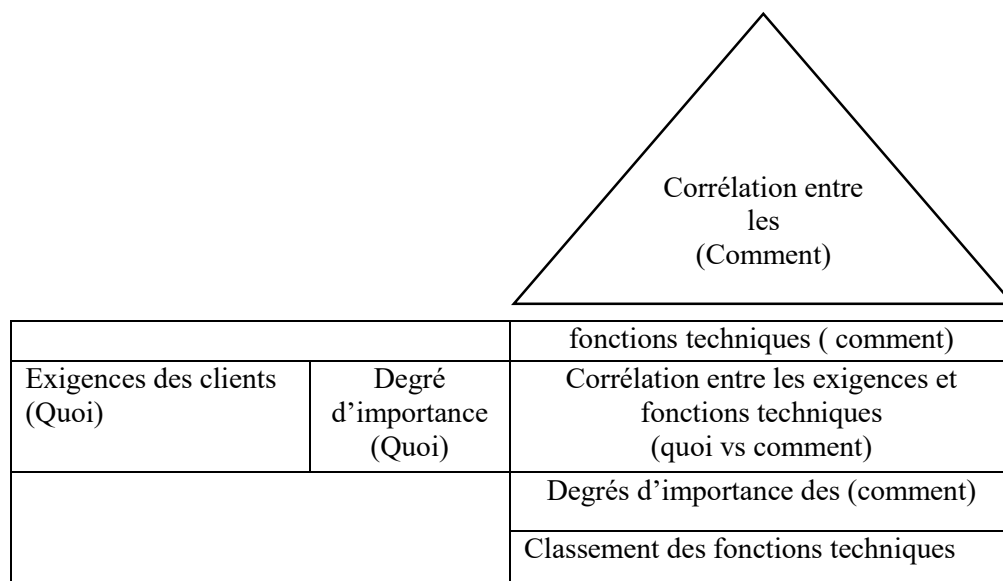


Figure I.11: La structure de la maison de qualité

Le processus d'application de la méthode déploiement de la fonction de la qualité (QFD) comprend généralement quatre phases, comme suite :

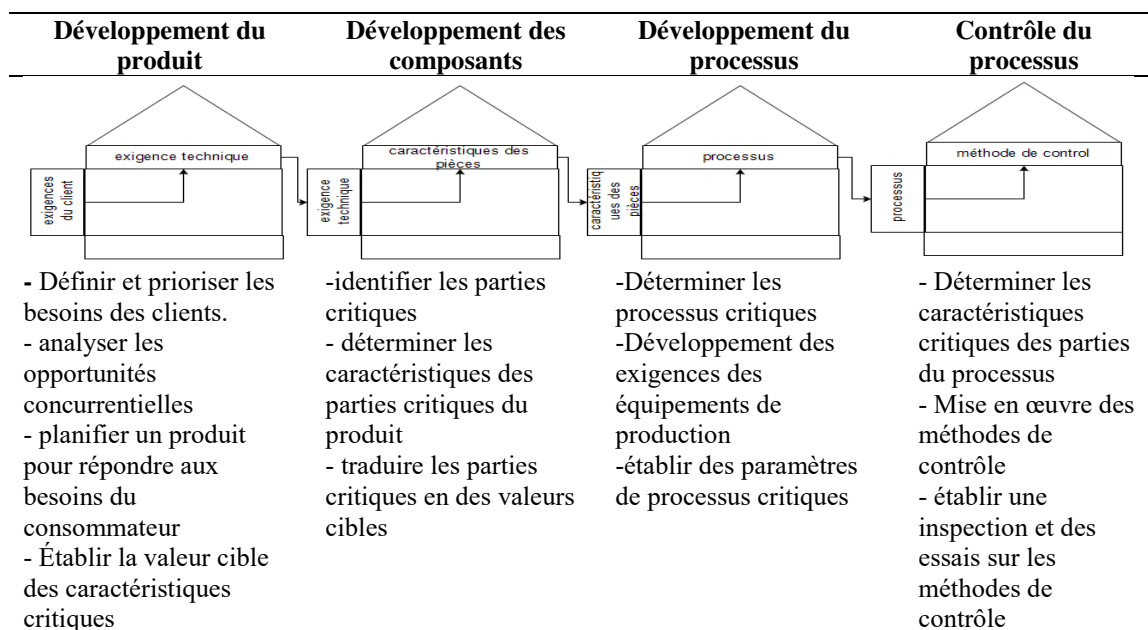


Figure I.12: Etapes de construction de QFD ou maison de qualité

Chaque matrice QFD, est construite suivant un processus de six étapes standards. Les étapes ci-dessous donnent une brève explication :

- **Étape 1** : cette étape consiste à déterminer les caractéristiques du produit qui sont définies par les besoins du client. Ses caractéristiques sont utilisées comme « QUOI » dans la matrice QFD.
- **Étape 2** : fixer la priorité entre les caractéristiques définies (quoi) et déterminer leurs degrés d'importance.
- **Étape 3** : traduire les (quoi) en des actions techniques (comment), d'autre terme, trouver des méthodes à appliquer pour aboutir les besoins des clients.
- **Étape 4** : utiliser un jugement pour quantifier la relation entre les (quoi) et les (comment) afin d'élaborer la matrice de corrélation.
- **Étape 6** : calculer le poids de chaque solution technique (comment), et déterminer leur priorité d'action.

I.4 Différence entre Lean Manufacturing et Six Sigma

La littérature décrit un point de vue qui montre une différence entre les deux approches Lean Manufacturing et Six Sigma. Le Lean Manufacturing met en évidence la réduction de la non-valeur ajoutée tout au long de la chaîne de production. En outre, l'approche Six Sigma se concentre sur la réduction de la variabilité et l'amélioration continue de la qualité jusqu'à la satisfaction du client final (Alhuraish, 2016). Le tableau I.6 présente un ensemble de critères de comparaison sous forme d'un check liste qui montre la différence entre les deux approches ainsi que les points forts et les points faibles de chaque approche.

Tableau I.6 : La différence entre Lean Manufacturing et Six Sigma

Critères d'amélioration	Lean Manufacturing	Six Sigma
Satisfaction du client	×	✓
Amélioration de la qualité	×	✓
Réduire le temps de production	✓	×
Réduction des stocks des encours	✓	×
Mesure statistique	×	✓
Amélioration des conditions ergonomiques	✓	×
Réduction des variations des processus	×	✓

I.5 L'approche Lean six sigma

L'application de Lean Manufacturing sans prendre en compte les outils de six sigma permet d'aboutir une production sans non-valeur ajoutée et rapide mais avec un niveau de qualité non satisfait. En outre, l'utilisation de l'approche Six Sigma sans les outils de Lean

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Manufacturing permet de satisfaire le niveau de qualité exigé par le client mais avec un certain taux élevé de gaspillage (Aouag, 2016).

Une intégration entre les deux approches a été apparue pour la première fois en 2002 dans le livre de George « Lean Six Sigma : Combining Six Sigma with Lean Speed ». Elle permet d'accélérer la production, réduire les variations et augmenter la capacité d'un processus en identifiant des facteurs de qualité critiques afin que les données puissent être capturées par la voix du client (VOC). (Alhuraish, 2016). L'approche Lean Six Sigma est définie comme « une méthodologie qui maximise la valeur pour les actionnaires en réalisant un taux acceptable d'amélioration de la satisfaction client, du coût, et de qualité » (George, 2002). En plus, Lean Six Sigma c'est l'intégration complémentaire qui joue un rôle important dans l'amélioration des processus de fabrication grâce à l'exploitation multiple des avantages des deux approches pour éliminer les différents types de gaspillage et réduire les variations des processus en même temps, comme explique la figure I.12

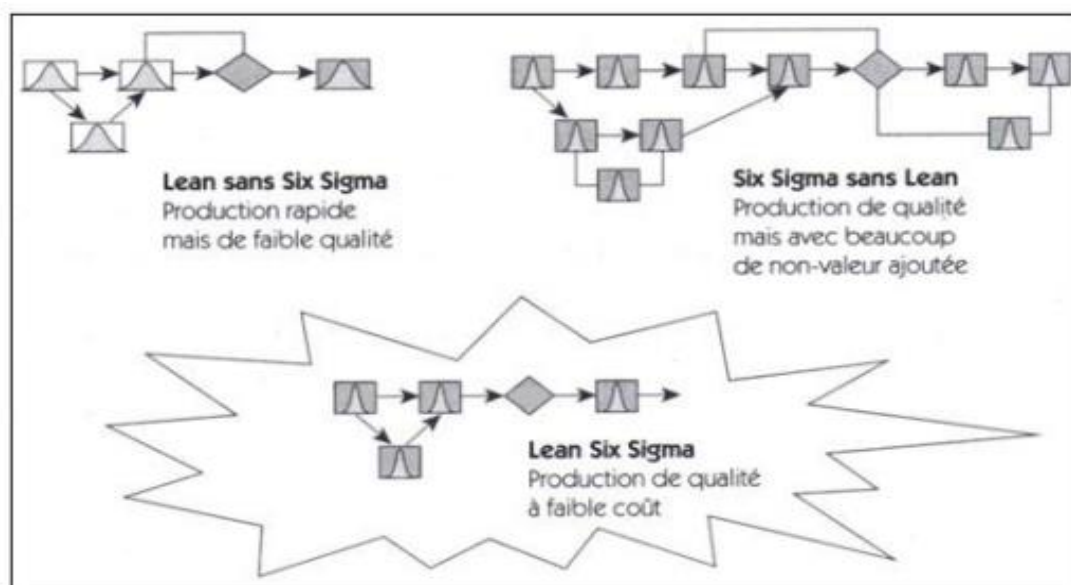


Figure I.13: Complémentarité des méthodes Lean et Six Sigma (Pillet, 2008)

Selon (George et al., 2006). L'approche Lean Six Sigma repose sur les quatre fondements suivants :

- Offrir une meilleure qualité du produit et du service en respectant les dates précises pour satisfaire les clients ;
- Améliorer le processus de fabrication en réduisant le gaspillage et les variations du processus pour répondre aux exigences des clients ;
- Partager la culture du travail collectif pour faciliter la proposition des solutions ;
- Prendre des décisions en se basant sur les données.

I.6 L'évolution d'utilisation de Lean Six Sigma dans l'industrie

Traditionnellement l'approche Lean Six Sigma est orientée pour traiter et améliorer un ensemble très limité d'indicateurs de performance ; tel que le temps de la production, la compétitivité de l'entreprise et la qualité du produit.

Au fil du temps, la situation industrielle est devenue plus compliquée en raison de certaines perturbations qui font face les entreprises industrielles actuelles, ces perturbations peuvent être définies par : l'augmentation du nombre d'entreprises et la forte concurrence entre eux, la difficulté de satisfaire les exigences réelles des clients, la complexité des produits suivie par une complexité des processus de fabrication. Ces dernières ont causé dans l'émergence des nouveaux indicateurs de performance difficilement à les améliorer et les contrôler par l'approche Lean Six Sigma. Ces indicateurs génèrent un nouveau champ concurrentiel, qu'on peut l'appeler '**la concurrence vers la durabilité**'. Ceci oblige l'approche Lean Six Sigma à élargir leur champ d'application (figure I.13) pour traiter ces problèmes d'une manière significative.

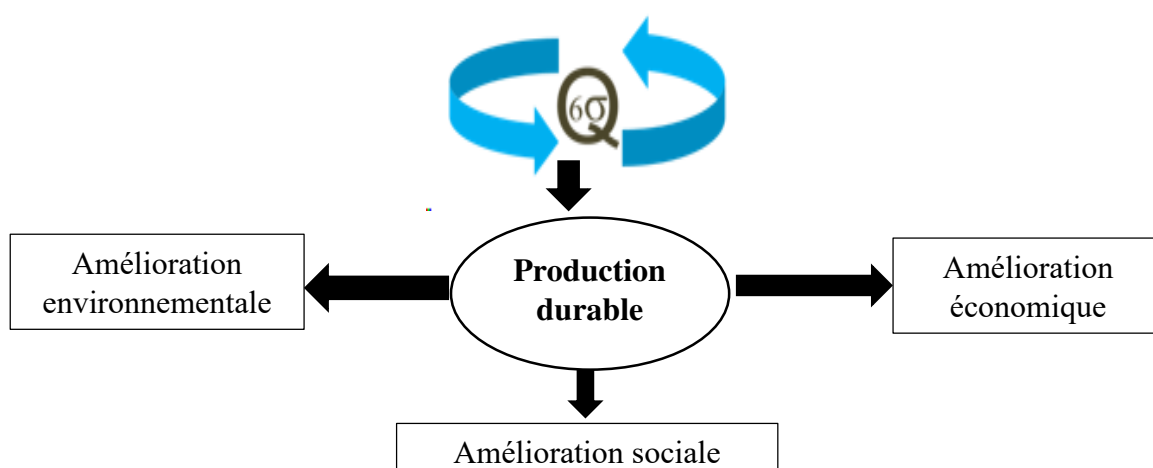


Figure I.14: Les approches Lean Manufacturing Six Sigma dans le domaine production durable

I.7 La production durable

Au niveau de la littérature, il existe plusieurs notions et définitions pour simplifier la compréhension du concept de la production durable, comme montre le Tableau I.7.

Tableau I.7 : Définition de la production durable

Définition	Sources
La fabrication durable est un paradigme qui pointe vers des nouvelles solutions pour la mise en œuvre des principes de durabilité dans la création de valeur.	(Buchert et al., 2015)
La fabrication durable est une branche de la durabilité qui traite les objectifs économiques, environnementaux et sociaux des activités de fabrication.	(Valaki et al., 2016)
La création de produits manufacturés en utilisant des procédés qui minimisent les impacts environnementaux, conservent l'énergie et les ressources naturelles, sont sécuritaire pour les employés.	(département du Commerce des États-Unis, 2010).
la création de produits manufacturés en utilisant des procédés non polluants, préservant l'énergie et les ressources naturelles, économiste et sans danger pour les employés, les communautés et les consommateurs.	(Egilmez et al., 2014)
La fabrication durable est définie comme une approche prenant en compte les problèmes économiques, environnementaux et sociétaux, dans laquelle la maintenance joue un rôle majeur.	(Ait-Alla et al., 2016)
la fabrication durable consiste à développer des capacités de transformation de matériaux sans émission, ni utilisation de matériaux non renouvelables ou toxiques, ni production de déchets.	(Rolstadâset al., (2012)

I.7.1 Principes de la production durable

La mise en œuvre des principes et des pratiques de la production durable conduit à l'innovation et à la création d'une valeur durable au niveau des produits et des processus de fabrication.

La notion de durabilité dans les entreprises et les opérations manufacturières est de plus en plus importante dans les dernières années, en raison de l'intérêt croissant de la responsabilité économique, environnementale et sociale des entreprises. L'origine du concept de la production durable est traduite par l'orientation du principe de développement durable vers le domaine de l'industrie, pour produire des biens en utilisant des processus adaptés aux aspects environnementaux, économiques et sociaux.

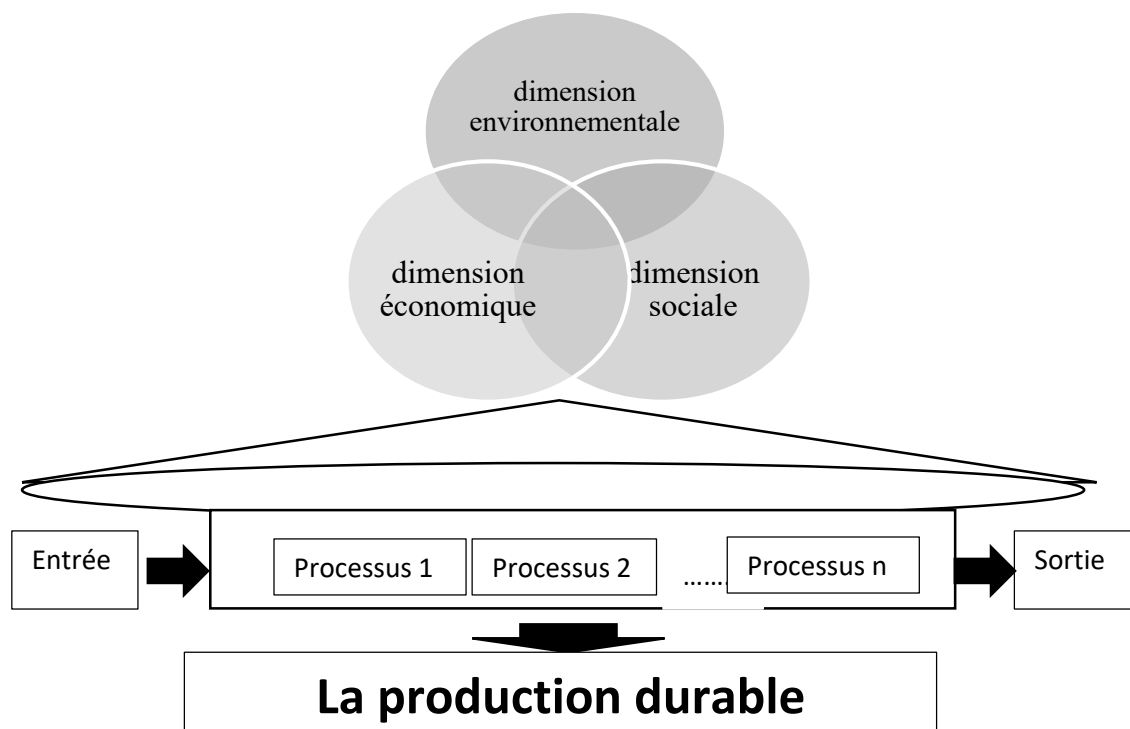


Figure I.15 : Principe de la production durable

I.7.2 Les grands axes de la production durable

Le point de départ pour l'innovation et le développement des meilleures stratégies pour une production durable consiste à prendre en considération l'amélioration de la durabilité de la chaîne de valeur et de produit en même temps. Alors, la production durable est appuyée sur les trois axes du développement durable lui-même, chaque axe traite un ensemble d'indicateurs de performance spécifiques.

I.7.2.1 La durabilité économique de la production

Le palier économique dans le contexte de la production durable comprend les activités générales de production, distribution... etc. Selon **Bartelmus (2010)**, la durabilité économique est directement liée à la rentabilité de l'entreprise ainsi qu'elle permet d'assurer sa durabilité à long terme.

I.7.2.2 La durabilité environnementale de la production

Dans le contexte environnemental de la production, les entreprises doivent surveiller et réduire efficacement les dommages causés par des effets négatifs sur l'environnement. La dimension environnementale vise à satisfaire les conditions qui assurent la vie humaine et préservent l'environnement qui exigent la remise en état et le développement des entreprises, ainsi que pour maîtriser l'utilisation des substances dangereuses, rejet d'eaux usées et les émissions de gaz nocifs.

I.7.2.3 La durabilité sociale de la production

La dimension sociale renvoie à la portée des activités humaines et l'impact des entreprises sur le développement de la société avec la prise en compte de la sécurité au travail, la protection de l'environnement de la production et le nombre des blessures. Ces effets auront un effet significatif sur l'image sociale de l'entreprise.

Dans ce sens, l'évaluation et l'amélioration de la durabilité de la production sont basées sur l'étude et l'optimisation des performances environnementales, économiques et sociales. La littérature a mis au point un ensemble d'indicateurs liés aux contextes de la production durable pour un développement personnalisé en fonction des besoins et des contraintes de chaque entreprise. Nous résumons dans le Tableau I.8 un ensemble d'indicateurs les plus utilisés dans l'évaluation et l'amélioration de la durabilité de la production.

Tableau I.9 : Indicateurs d'évaluation de la durabilité de la production

Dimension	Indicateurs	Références
Indicateurs économiques	Coûts de production	Paju et al (2010), Faulkner and Badurdeen, (2014), Vinodh et al (2016).
	Rentabilité	Vinodh and Chintha (2011), Lu et al, (2011).
	Investissement	Kluczek (2017), Badurdeen et al (2013), Zhang (2012)
	Niveau de qualité	Aouag et al (2015), Ravichandran, (2007).
	La productivité	Valdez-Vazquez et al (2017).
	Temps de production	Ismail et al (2014), Psychogios and Tsironis (2012).
Indicateurs environnementaux	Consommation d'énergie	Paju et al (2010), Faulkner and Badurdeen, F. (2014), Kluczek (2017), Badurdeen et al (2013).
	Consommation de matière première	Faulkner and Badurdeen (2014), Badurdeen et al (2013)
	Les émissions de gaz	Paju et al (2010), Badurdeen et al (2013), Vinodh et al (2016).
	l'utilisation de substances dangereuses.	Zhang (2012), Joung et al (2013), Govindan et al (2016).
Indicateurs sociaux.	Conditions ergonomiques	Badurdeen et al (2013)
	Taux de blessure	Kluczek (2017), Amrina and Yusof (2011),
	Satisfaction du client	Paju et al (2010).
	Nombre de réclamations	Ardekani et al, (2013); Galankashi et al (2016).

I.8 Lean Six Sigma dans le contexte de la production durable

Selon **Cherrafi et al. (2016a)**, la méthodologie Lean Six Sigma est le potentiel de devenir le défi de la durabilité des organisations qui l'utilisent comme système de gestion. L'intégration entre Lean, Six Sigma et le concept de la durabilité s'affirme au cours des dernières années en tant que domaine d'étude innovant, principalement en raison de l'alignement de la logique de l'approche Lean Six Sigma qui nécessite le développement des modèles plus pratiques pour l'amélioration et le contrôle de la durabilité dans les petites et moyennes entreprises industrielles.

Dans cette intégration (figure I.15), le Lean Manufacturing fournit des méthodes permettant d'éliminer les différents types de gaspillage, Six Sigma offre des outils statistiques pour réduire les variations des processus de fabrication ainsi qu'améliorer la qualité du produit, la production durable a pour l'objectif de visualiser et diminuer des impacts générés par les perspectives environnementales, sociales et financières (**Garza-Reyes, 2015**).

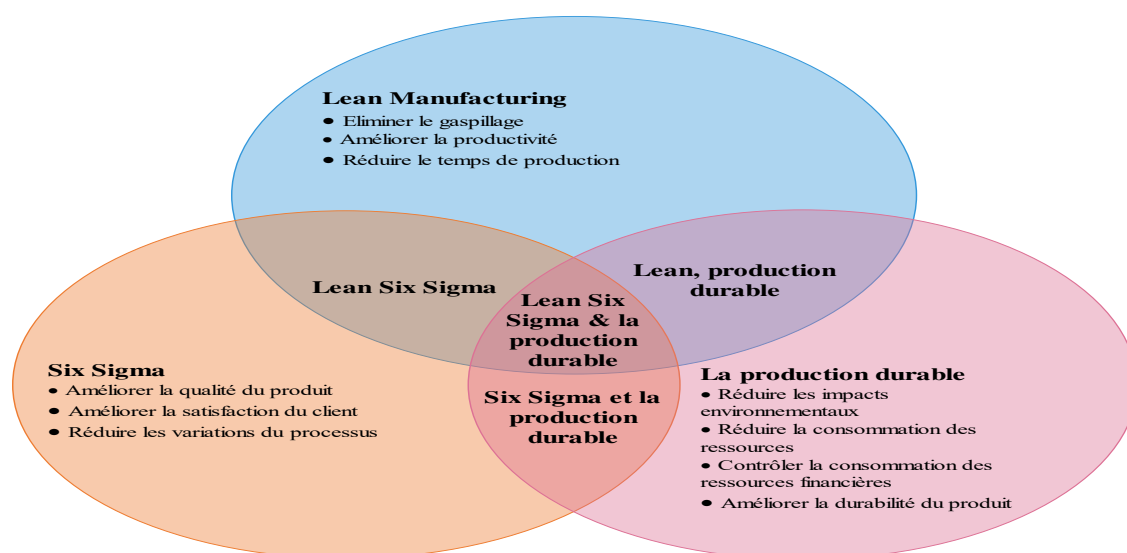


Figure I.16: Modèle d'intégration Lean Manufacturing, Six Sigma et la production durable

I.9 Intégration du concept de la durabilité dans le cycle d'amélioration DMAIC

S'appuyant sur les gains importants obtenus dans l'amélioration des processus grâce à l'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et son adoption généralisée dans tous les secteurs. L'intégration de la durabilité dans le processus d'amélioration DMAIC peut être un remède contre le manque de stratégies de mise en œuvre. Elle fournit des outils et des pratiques utilisés pour atteindre les objectifs de durabilité et encouragera l'adoption des principes de développement durable dans les pratiques industrielles.

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

Cette intégration commence par la phase ‘définir’ en identifiant les opportunités de durabilité pouvant être liées à un projet d'amélioration et se poursuit par la définition des objectifs et des métriques associées qui nous permettront d'effectuer un suivi dans les phases suivantes afin d'atteindre les résultats de durabilité souhaités.

Le Tableau I.9 décrit les tâches principales effectuées dans chaque étape pour garantir que les efforts de durabilité sont pleinement intégrés dans le processus d'amélioration DMAIC et qu'ils sont alignés sur les autres objectifs du projet.

Tableau I.9 : Étapes du processus DMAIC et objectifs associés dans le contexte de la durabilité (Erdil, et al. 2018)

Phase	Objectifs
Définir	Identifier les objectifs et les indicateurs de durabilité.
Mesurer	Développer des mesures de durabilité pour les objectifs inclus dans l'étape Définir.
Analyse	Suivre la procédure d'analyse conventionnelle du processus d'amélioration DMAIC.
Améliorer	Proposer des solutions ou des améliorations pour avoir un impact positif sur la durabilité de la production.
Contrôler	Utiliser la procédure de contrôle conventionnelle du processus d'amélioration DMAIC.

Selon **Erdil et al., (2018)** la création des liens entre les objectifs de l'entreprise et les objectifs d'un projet d'amélioration en matière de durabilité est une tâche plus importante dans l'intégration de la durabilité dans tout type de projet. À partir du tableau I.9, nous remarquons que les trois phases du processus DMAIC (Définir, Mesurer, Améliorer) incluent des étapes supplémentaires pour intégrer la durabilité au projet, les étapes restantes (analyser et à contrôler) sont réalisées de manière conventionnelle.

Dans notre point de vue, il est nécessaire de déterminer les besoins et les priorités des objectifs de l'entreprise en matière de développement durable dans la phase définir. Ensuite des méthodologies de mesure doivent être utilisées pour effectuer une évaluation des performances actuelles de l'entreprise. La phase d'analyse nécessite une étude un peu détaillée grâce au nombre d'objectifs et d'indicateurs traités pour identifier les problèmes en matière de durabilité. La mise en œuvre des étapes précédentes permet de gérer les stratégies d'amélioration et de contrôler les résultats obtenus.

Dans ce contexte, la multiplicité des objectifs en matière de durabilité, la diversité d'indicateurs de performance et la complexité des processus de fabrication, sont des facteurs difficiles à contrôler et qui traduisent des limites de barrières au niveau de chaque étape

d'application du processus d'amélioration DMAIC. Dans les titres ci-dessous, nous allons présenter une simple revue qui décrit quelques limites dans le contexte d'application de l'approche Lean Six Sigma.

I.10 Limites de Lean six sigma dans le contexte de la production durable

Conventionnellement, la procédure commune utilisée dans l'approche Lean Six Sigma consiste à identifier les objectifs du projet suivi par une évaluation et analyse de l'état actuel des processus de fabrication, puis proposer des améliorations de la performance à l'aide des outils Lean Six Sigma.

L'intégration du principe de la production durable confronte plusieurs difficultés et barrières. Selon (Yadav et Desai, 2016), l'identification des barrières avant la mise en œuvre des outils Lean Six Sigma au sein d'une entreprise industrielle est une phase très importante.

En effet, lors de la recherche effectuée sur les barrières Lean Six Sigma, il a été constaté que plusieurs auteurs avaient contribué avec des travaux utiles pour identifier l'ensemble des barrières Lean Six Sigma. De plus, plusieurs auteurs donnent une classification de ces barrières pour faciliter leurs traitements. Par exemple Yadav et al., (2018) ont regroupés les barrières en cinq classes qui sont : barrières basées sur la stratégie, barrières technologiques, barrières socioculturels, barrières organisationnels, barrières individuelles. Une autre classification plus similaire a la précédente qui se compose en Cinq groupes proposés par Belhadi et al (2017) : barrières stratégiques, barrières techniques, barrières culturelles, barrières liées au marché, barrières liées aux connaissances.

En se basant sur les catégories proposées et selon les objectifs et les perspectives de notre thèse, nous avons proposé une nouvelle catégorie qui englobe des barrières Lean Six Sigma les plus adaptatif au contexte de la production durable, comme montré dans le tableau I.10 :

Tableau I.10 : Les barrières Lean six sigma dans la production durable

Catégorie	Barrières
Barrières de durabilité	1. Manque d'information et difficulté pour analyser l'état actuel des processus de fabrication
	2. Mauvaise sélection d'outils Lean / Six Sigma pour améliorer la durabilité de la production
	3. Mauvaise planification des stratégies d'amélioration de la durabilité de la production
	4. Diversité d'indicateurs de performance et leur influence sur la durabilité de la production
	5. Manque de compréhension de l'approche Lean six sigma dans le contexte de la production durable

I.11 Aide méthodologique pour surmonter les limites de Lean six sigma dans le contexte de la production durable

Selon (Yadav et Desai, 2017), ce n'est pas difficile pour identifier les barrières Lean Six Sigma à travers une revue de la littérature, une étude des systèmes de production et les avis des experts. Mais il est extrêmement difficile pour les praticiens de traiter toutes ces barrières simultanément. Alors, pour surmonter quelques limites et barrières qui entravent l'utilisation de Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable, diverses méthodes et approches peuvent être introduites et utilisées comme des méthodes de base dans le processus d'application de Lean Six Sigma. Le tableau I.11 présente quelques méthodes et approches qui permettent de simplifier la complexité de traitement des barrières Lean Six Sigma dans le contexte de la production durable, afin d'aboutir un processus d'amélioration systématique et performant.

Tableau I.11 : Aide méthodologique pour surmonter les barrières Lean Six Sigma

Méthode	Définition
Cycle de vie du coût du produit	Cycle de vie du coût est l'une des techniques les plus utilisées dans l'évaluation économique des produits et des projets.
Analyse de Cycle de Vie (ACV)	L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation utilisée pour quantifier les impacts des produits et des processus sur l'environnement, à partir de la consommation des matières premières jusqu' à la fin du cycle de vie (Bicalho et al. 2017).
Les approches multicritères	Les approches d'analyse décisionnelle multicritères sont des algorithmes mathématiques qui ont été développés pour résoudre les problèmes complexes qui sont liés à la prise de décision. Les approches d'analyse décisionnelle multicritères ne sont pas des méthodes automatisables qui conduisent aux mêmes résultats et mêmes solutions, puisqu' elles sont basées sur des informations subjectives fournies par un ou plusieurs décideurs.
La logique floue	C'est une extension de la logique booléenne, développée par Lotfi Zadeh en 1965. Cette méthode est classée parmi les méthodes d'intelligence artificielle et a été utilisée dans les processus de prise de décision avec des informations imprécises et incertaines.

Chapitre I : Concepts de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma et leurs évolutions dans les PME

A ce point, l'approche Lean Six Sigma doit être devenue comme une approche open source qui comprend l'utilisation des autres méthodes comme des outils principaux dans les modèles globaux d'amélioration (DMAIC et DMIACV, QFD). Pour cette raison et en se basant sur la distribution standard des outils Lean six sigma dans le cycle DMAIC (**Tableau I.5**), nous proposons un ajustement ou une amélioration définis par l'insertion d'autres approches dans les processus d'amélioration DMAIC pour surmonter quelques barrières dans le contexte de la production durable. L'ajustement proposé est montré dans le Tableau I.12.

Tableau I.12 : Extension ou amélioration de la boîte à outils du cycle d'amélioration DMAIC

Étapes	Outils ajoutés	Objectifs
Définir	Les approches multicritères aident à la décision (MCDM).	Prioriser les objectifs Réduire l'ambiguïté dans le processus de définitions et de sélection des problèmes.
Mesurer	Cycle de vie du coût (LCC).	Mesurer la consommation des coûts
	Analyse de cycle de vie (ACV).	Mesurer et quantifier les impacts environnementaux générés par le processus de fabrication.
	Les procédures de mesure du score de durabilité.	Mesurer et évaluer la durabilité de la production.
Analyser	Les approches multicritères aident à la décision (MCDM).	Analyser la relation entre les facteurs ou les indicateurs de durabilité. Hiérarchiser et prioriser les causes d'un effet (Gupta et al 2019).
	Analyse de cycle de vie.	Analyser les impacts environnementaux de la production sur l'environnement (Vinodh et al 2016).
	Analyse les flux de matières et d'énergie (MEFA).	Analyser la consommation des matières premières et des ressources énergétiques.
Améliorer	Les approches multicritères aident à la décision (MCDM).	Déterminer la priorité d'amélioration. Prioriser l'application des outils Lean Six Sigma Sélection des outils Lean Six Sigma (Kumar et al, 2018).
	Analyse de cycle de vie (ACV).	Évaluer les améliorations écologiques obtenues.
Contrôler	Logique floue.	Utiliser les approches floues pour les cartes de contrôle (Kahraman and Yanik 2016).

I.12 Conclusion

Le Lean Manufacturing et Six Sigma sont des approches puissantes, largement utilisées comme des méthodes d'amélioration des chaînes de production. La littérature décrit le succès de la mise en œuvre de deux approches dans divers types d'industrie (textile, pharmaceutique, métal, automobile). Cependant, la difficulté de l'industrie actuelle en termes technologiques, la complexité des processus de fabrication, la diversité des objectifs et l'émergence d'un ensemble des barrières et des limites sont des facteurs qui entravent l'application du processus des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans l'industrie actuelle.

Le but de ce chapitre était de définir d'une manière générale les concepts de base des deux approches Lean Manufacturing et Six Sigma, ainsi que décrire le développement et l'évolution de son utilisation dans le domaine de l'industrie.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter un état de l'art détaillé qui englobe tout un ensemble des recherches qui décrivent l'impact positif de la mise en œuvre des approches Lean Manufacturing et Six Sigma pour différents objectifs.

Chapitre II :

**Etat de l'art des différents contextes d'utilisation
des approches Lean Manufacturing et Six Sigma
dans les PME**

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art portant sur l'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les problèmes d'amélioration de la production d'une manière générale. En outre, ce chapitre décrit l'adaptabilité des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les différents contextes de leurs utilisations (conventionnel et production durable).

II.2 État de l'art

Les problèmes d'amélioration continue sont parmi les problèmes les plus étudiés au niveau de la littérature et dans les entreprises industrielles, à cause de l'apparence de plusieurs barrières qui font face l'industrie actuelle.

À cet effet, nous avons présenté une recherche bibliographie et nous avons cité quelques études et approches développées à base de Lean Six Sigma dans les différents contextes de l'amélioration continue.

En respectant le cadre méthodologique de notre travail de thèse, et pour donner une vision claire sur l'ensemble des recherches obtenues au cours de notre recherche bibliographique, notre état de l'art est organisé en trois parties. Chaque partie présente un contexte d'utilisation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma. Ceci est expliqué dans la **Figure II.1** et aussi dans les points suivants :

- Dans la première partie, nous avons présenté des recherches basées sur les approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte original ou conventionnel de leur utilisation.
- La deuxième partie vise à étudier des extensions des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte de la production durable.
- Dans La troisième partie nous avons présenté des recherches qui montrent l'amélioration des processus d'application des approches Lean Manufacturing et Six Sigma.

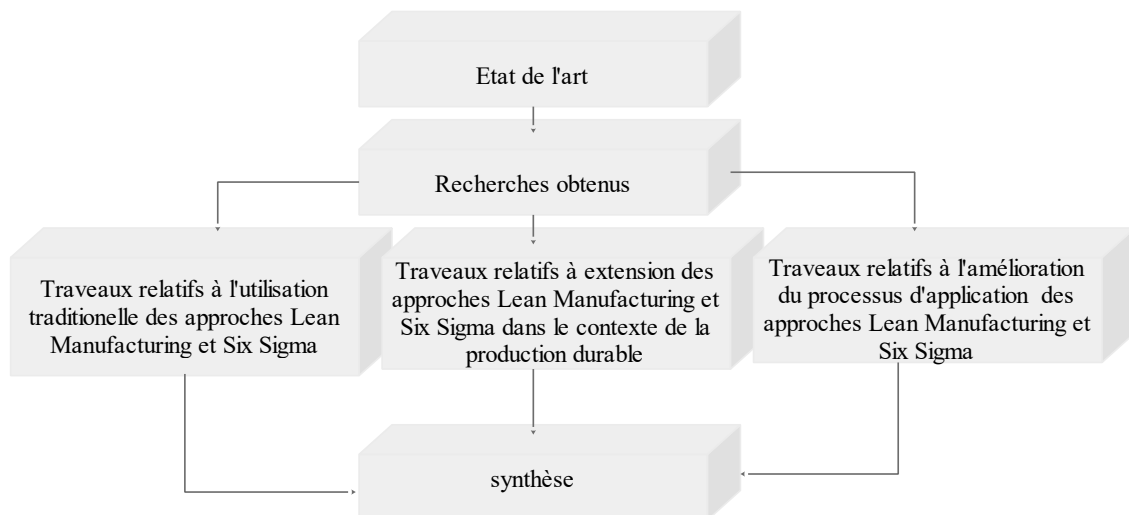


Figure II.1 : Méthodologie de recherche

II.2.1 Travaux relatifs à l'utilisation traditionnelle des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les PME

Lean Manufacturing et Six Sigma sont devenus comme des approches intéressantes et puissantes pour répondre aux besoins attendus par les entreprises industrielles, en offrant des améliorations au niveau de la productivité, de la qualité, du temps de production tout en permettant des économies (Zajkowska 2012). Cette partie de notre état de l'art est effectuée selon les perspectives conventionnelles des approches Lean Manufacturing et Six Sigma qui concerne la réduction de gaspillage et l'amélioration de la qualité du produit dans les processus de fabrication.

(Ravichandran, 2007) a proposé une approche de pondération du DPMO pour optimiser le résultat du niveau Six Sigma et évaluer le niveau de qualité d'un système de production.

Thomas et al., (2009) ont proposé une approche Lean Six Sigma en utilisant les cinq phases du cycle d'amélioration DMAIC. Le modèle proposé a été implémenté dans plusieurs PME pour obtenir des améliorations au niveau des coûts de production et de la qualité du produit.

Vinodh, et al., (2013) ont proposé une approche basée sur la méthode VSM pour montrer son influence sur la réduction du taux de gaspillage. Cette étude est réalisée pour déterminer les différents types de gaspillage afin de proposer des opportunités d'amélioration pour le développement d'un état futur. Les opportunités proposées visent à augmenter le taux de la productivité, améliorer la qualité et réduire le temps de cycle.

Jasti and Sharma, (2014) ont fournis une étude qui vise à expliquer l'importance du Lean Manufacturing dans une PME indienne. L'approche proposée montre l'impact des outils

Lean Manufacturing sur plusieurs paramètres tels que le temps de cycle de production et le niveau des stocks des encours.

Jirasukprasert et al., (2014) ont proposé une approche Six Sigma en utilisant le cycle d'amélioration DMAIC, l'approche a été validée dans une PME qui fabrique des gants en caoutchouc pour améliorer le taux de défaut de qualité, DPMO, et du niveau Sigma.

Rohani and Zahraee (2015) ont utilisé la méthode VSM pour identifier et éliminer le gaspillage au niveau d'une ligne de production. Les résultats obtenus ont montré des améliorations dans les délais de production et dans la valeur ajoutée.

Azizi and Manoharan (2015) ont proposé une nouvelle approche basée sur la méthode VSM et la méthode SMED pour améliorer la productivité des petites et moyennes entreprises (PME) en éliminant les activités sans valeur ajoutée.

Aouag et al, (2015) ont proposé un autre modèle de DPMO pondéré basé sur les coûts des défauts de qualité pour mesurer le niveau de qualité d'un processus de fabrication d'une entreprise algérienne et évaluer sa compétitivité industrielle.

Swarnakar and Vinodh (2016) ont proposé une approche Lean Six Sigma basée sur le processus d'amélioration DMAIC. L'approche proposée a été appliquée dans une organisation de fabrication des composants automobiles pour réduire les défauts de qualité et éliminer les activités sans valeur ajoutée.

Kumar and Kumar (2016) ont examiné l'influence de la méthode VSM sur les stocks des encours et des délais de production.

Singh et al (2017) ont proposé une approche intégrée à base de Lean Six Sigma pour réduire le temps de production, mouvements de matériaux et les stocks des encours dans une PME indienne.

De Albuquerque Marques and Matthé (2017) ont développé une approche basée sur le processus d'amélioration DMAIC. L'approche proposée a été appliquée dans une PME industrielle portugaise, pour réduire le taux de rejet et améliorer la qualité du produit.

II.2.2 Travaux relatifs à l'extension des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte de la production durable des PME

Dans le contexte de la production durable, les entreprises manufacturières se concentrent sur la création des produits en utilisant des processus qui contrôlent les flux financiers,

minimisent les impacts environnementaux et réduisent la consommation de ressources naturelles et d'énergie pour assurer une production durable et répondre aux aspects économiques, environnementaux et sociaux. Dans ce contexte, plusieurs recherches montrent que l'utilisation des outils Lean Six Sigma ont un effet positif sur la durabilité de la production.

Torres et al, (2009) ont développé un outil de management basé sur la méthode de VSM appelé Environnemental Value Stream Mapping (EVSM)', pour améliorer les performances environnementaux d'un processus de production.

Chiarini et al, (2014) ont proposé une approche pour montrer l'effet positif des outils de Lean Manufacturing sur les impacts environnementaux des entreprises manufacturières. Dans cette étude, un ensemble des outils LSS ont été appliqué dans Cinq PME pour améliorer leurs performances environnementales. Les résultats obtenus confirment que les outils Lean réduisent avec succès les impacts environnementaux.

Faulkner and Badurdeen (2014) ont présenté une méthode de visualisation et d'évaluation des performances industrielles basant sur le développement d'une extension de la méthode cartographie de chaîne de valeur (Sus-VSM) qui englobe des indicateurs liés aux trois piliers du développement durable.

Brown et al, (2014) ont présenté l'application de la méthodologie développée par **Faulkner and Badurdeen (2014)** pour évaluer son généralisation et élucider son utilisation avec trois configurations des systèmes de fabrication. Les trois études de cas réalisées révèlent que l'utilisation de Sus-VSM permet d'obtenir des résultats précieux en ce qui concerne les performances de durabilité des systèmes de fabrication quelle que soit la nature de la complexité du système.

Banawi and Bilec (2014) ont intégré les trois approches : Lean, Green, Six Sigma pour améliorer la qualité et réduire les impacts environnementaux d'un processus de construction. La structure de la recherche est basée sur le processus d'amélioration DMAIC et a été organisé en trois étapes :

Étape 1 définir et mesurer : en utilisant les méthodologies VSM et LCA pour identifier et quantifier les déchets.

Étape 2 analyser et améliorer : en utilisant les outils Lean Six Sigma pour éliminer le gaspillage.

Étape 3 Contrôler – Réévaluer les résultats obtenus en utilisant Lean (VSM) et Green (LCA).

Sagnak and Kazancoglu (2016) ont proposé une approche analytique basée sur les cartes de contrôle pour mesurer les variations du processus et réduire les impacts environnementaux dans une chaîne de production.

Vinodh et al, (2016) ont amélioré les travaux de **Brown et al, (2014) et Faulkner and Badurdeen (2014)** avec la proposition d'une nouvelle approche capable de visualiser et d'évaluer les performances des processus de fabrication du point de vue de durabilité. L'approche met l'accent sur l'intégration d'une extension de la méthode VSM avec l'approche analyse de cycle de vie (LCA) pour évaluer la production sur les trois axes de durabilité (environnementale, économique, social). L'extension de la méthode VSM a été utilisée pour fournir une visualisation complète des performances de la production, LCA a été utilisé pour identifier les impacts environnementaux. L'approche proposée a été démontrée par étude de cas suivi par un plan d'action contient des opportunités d'améliorations.

Helleno et al, (2017) ont proposé une méthodologie qui intègre un nouveau groupe d'indicateurs de durabilité dans la méthode VSM pour évaluer les processus de fabrication en points de vue économique, environnemental, et social. La méthode a été appliquée avec trois études de cas pour démontrer sa généralisation dans les différents niveaux de durabilité des processus de fabrication.

Verma et al, (2016) ont développé une nouvelle extension de la méthode VSM nommée « Energie Value Stream Mapping (EVSM) » pour analyser les flux d'énergie et de matières premières dans les processus de production et de déterminer la consommation d'énergie de non-valeur ajoutée.

Cherrafi et al, (2016a) ont proposé un modèle qui montre le lien entre le Lean Manufacturing et Six Sigma et le concept de la durabilité de la production, le modèle proposé vise à identifier les points forts et la possibilité d'atteindre des performances économiques, environnementales et sociales équilibrées dans les processus de fabrication.

Cherrafi et al. (2016b) ont présenté un cadre méthodologique à base de Lean Six Sigma dans le contexte de la production durable. L'approche proposée se compose en cinq phases et seize étapes qui sont orientées pour réduire la consommation d'énergie, la

consommation d'eau, augmenter la productivité et améliorer les conditions ergonomiques. L'approche proposée a été appliquée dans quatre secteurs différents.

Jia et al, (2017) ont proposé une nouvelle extension de la méthode VSM, nommée 'Therblig-embedded Value Stream Mapping (TVSM)', cette approche a été utilisée pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les activités de non-valeur ajoutée dans un processus d'usinage.

II.2.3 Travaux relatifs à l'amélioration du processus d'application des approches Lean Manufacturing et six sigma

Dans l'industrie actuelle, la complexité des systèmes de production en termes du nombre des barrières traitées et des objectifs établis sont des facteurs principaux qui augmentent le degré de difficulté de la mise en œuvre des approches Lean Manufacturing et Six Sigma. Diverses méthodes, outils et approches sont utilisés pour simplifier le processus d'application des approches Lean Manufacturing et Six Sigma.

Mohanraj et al, (2011) ont proposé une approche intégrée basée sur la méthode déploiement de la fonction de la qualité (QFD) et la méthode VSM pour l'identification et la hiérarchisation des gaspillages et les techniques d'élimination du gaspillage dans un processus de fabrication d'une PME.

Vinodh and Swarnakar (2015) ont proposé une intégration d'un ensemble des approches multicritères pour sélectionner le projet Lean Six Sigma optimal dans une organisation de fabrication des composantes d'automobiles.

Yousefi and Hadi-Vencheh (2016) ont proposé un cadre méthodologique basé sur les approches multicritères et l'approche Six Sigma pour réduire le risque d'échec dans la sélection des solutions appropriés dans les projets six sigma.

Yadav et al, (2017) ont proposé une étude analytique pour identification et priorisation des barrières Lean Six Sigma pour sa mise en œuvre productive. L'étude débute par la collecte des barrières à partir de la littérature ainsi que des opinions d'experts des différentes industries. Ensuite les barrières identifiées sont hiérarchisées en utilisant l'approche AHP floue.

Kumar et al, (2018) ont proposé une approche intégrée basée sur les méthodes VSM et TOPSIS floues pour faciliter la sélection des événements Kaizen appropriés, afin d'aboutir une amélioration des performances d'une PME indienne.

Ratlalan et al, (2018) ont intégré la méthode VSM avec la méthode analyse hiérarchique du processus (AHP) pour faciliter l'élimination du gaspillage dans un processus de fabrication. La méthode VSM a été utilisée pour l'évaluation et l'identification de gaspillage, mais la méthode AHP a été introduite pour pondérer et classer le gaspillage identifié.

Yadav, et al, (2018) ont proposé une approche intégrée basée sur les méthodes AHP et TOPSIS, l'approche proposée vise à prioriser et classer un ensemble des solutions pour surmonter quelques limites et barrières Lean Six Sigma dans les projets d'améliorations.

Behnam et al, (2018) ont développé une approche intégrée basée sur la méthode VSM et la méthode processus de réseau analytique(ANP), la méthode VSM a été utilisée pour déterminer le gaspillage, tandis que la méthode ANP a été introduite pour hiérarchiser les différents types de gaspillage.

Gupta et al, (2019) ont fourni un cadre analytique qui illustre l'application d'une méthode de prise de décision multicritères (MCDM) dans la phase d'analyse du modèle DMAIC et élargit la boîte à outils Six Sigma en matière d'application des méthodes basées sur la recherche opérationnelle, l'objectif de cette approche est la hiérarchisation des principaux défauts dans un processus de fabrication.

Raval et al, (2020) ont proposé une approche hybride en utilisant AHP-TOPSIS floue pour prioriser les solutions d'implémentation Lean Six Sigma (LSS) pour la mise en œuvre réussie du LSS

Shukla et al, (2021) ont proposé une approche qui vise à traiter un problème de pondération et hiérarchisation d'un ensemble des critères pour la sélection du projet Lean Six Sigma réussie dans une organisation indienne.

Singh et al, (2021) ont présenté une étude vise à étudier et à hiérarchiser les facteurs de succès qui facilitent la mise en œuvre efficace de LSS dans un contexte environnemental des PME

II.3 Synthèse :

Pour clarifier les contributions proposées dans notre travail de thèse, nous avons synthétisé les limites des approches Lean Six Sigma développées dans les différents contextes comme suit (Tableau II.1) :

Tableau II.1 : Limites des travaux existants

Contexte	Limites
L'approche Lean Six Sigma dans le contexte original	➤ L'approche Lean Six Sigma conventionnelle est uniquement utilisée pour identifier les activités sans valeur ajoutée et améliorer la qualité des produits dans les processus de fabrication. ➤ L'utilisation des avantages des deux approches (amélioration du processus et l'évaluation de la qualité du produit) en même temps est rare, ainsi que l'évaluation et le suivi de la compétitivité des entreprises n'a pas pris une grande importance.
Extension des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte de la production durable	➤ La plupart des recherches liées à la production durable sont basées sur une seule dimension de développement durable, quel que soit environnementale, économique ou sociale. Par contre l'évaluation de la production sur les trois piliers du développement durable est rarement utilisée. Sachant que le développement de la durabilité de la production est basé sur les trois dimensions, si une seule dimension est faible alors le système dans son ensemble sera faible (Cherrafi et al., 2016a), d'autre façon et selon Gladwin et al. (1995) les trois dimensions doivent être satisfaites en même temps pour parvenir à une meilleure position dans le marché. ➤ Les outils de Lean acquis dans toutes les études s'intéressent à l'amélioration de la production en matière de durabilité, comme exposé dans les travaux de recherche de (Cherrafi et al 2016a) qui a montré que la majorité (85,9%) des études sont associées à l'amélioration de la durabilité de la production et sont traités avec l'approche Lean Manufacturing. ➤ Malgré la diversité des objectifs et la multiplicité d'indicateurs de performance, les phases d'analyse et d'amélioration ont été étudiées de manière conventionnelle et classique sans aucune recherche qui présente une étude plus approfondie.

Amélioration du processus d'application des approches Lean Manufacturing et six sigma

- La plupart des recherches concernant l'amélioration du processus d'application de l'approche Lean Six Sigma sont basées sur la problématique de priorisation et la hiérarchisation des différents types de gaspillage.
- L'absence des recherches qui traitent d'une façon approfondie, les deux phases d'analyse et d'amélioration simultanément dans le processus d'application de l'approche Lean Six Sigma.
- Les problèmes de classement des machines selon la priorité d'amélioration et la priorisation de la mise en œuvre des outils Lean Six Sigma ne sont pas encore étudiés.

Le domaine de recherche de notre thèse se concentre beaucoup plus sur la production durable, et nous cherchons à développer des nouvelles méthodologies à base de Lean Six Sigma pour l'amélioration de la durabilité de la production dans les Petites et Moyennes Entreprises.

Le choix des approches Lean Manufacturing et Six Sigma est justifié par plusieurs raisons, tels que l'absence de ces approches dans le domaine de la production durable ainsi que leur efficacité dans l'amélioration importante des processus de fabrication. De plus, le cadre méthodologique proposé dans le cadre de cette thèse est orienté vers l'amélioration continue des Petites et Moyennes Entreprises industrielles qui représentent la cellule de l'économie algérienne.

II.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir le contexte général de notre travail, ainsi qu'il présente une étude et une analyse détaillée sur des modèles et des approches développées dans le domaine d'amélioration des processus de fabrication en utilisant les approches Lean Manufacturing et Six Sigma.

Dans la partie suivante, on va présenter le développement et l'implantation d'un ensemble des méthodologies basées sur les approche Lean Manufacturing et Six Sigma dans différents domaines d'amélioration de la production.

Chapitre III :

Amélioration et mise en oeuvre d'une approche

Lean Six Sigma conventionnelle dans les PME

III.1 Introduction

Actuellement, la contrainte de la concurrence dans le monde industriel exige aux entreprises industrielles à chercher des manières pour améliorer leurs performances en produisant des produits de qualité acceptable avec des coûts compétitifs. Ce chapitre vise à développer une approche dans laquelle on intègre le Lean Manufacturing et Six Sigma pour améliorer les performances d'une PME algérienne.

L'approche proposée se compose de deux parties. La première partie met l'accent sur l'application de la méthode de cartographie de la chaîne de valeur pour visualiser la chaîne de production et identifier les différents types de gaspillage afin de trouver la possibilité de les réduire. La deuxième partie consiste à évaluer le niveau de qualité du produit et la compétitivité de l'entreprise en utilisant le modèle DPMO pondéré et le niveau Sigma.

III.2 Le problème traité et le cadre méthodologique

Au cours de ces dernières années nous remarquons des investissements par création de plusieurs PME en Algérie (tableau III.1) ce qui génère un fort champ concurrentiel. Mais la plupart de ces PME souffrent d'une crise en matière de management des installations industrielles ainsi que leurs propres ressources. Ceci à cause du manque des compétences et des connaissances concernant les méthodes de gestion et d'amélioration industrielles, ainsi que le manque de la qualité des produits et des services.

Tableau III.1 : Évolution du nombre des PME en Algérie 2016-2019

Type de l'entreprise	2016	2017	2018	2019
Petites entreprises (PE)	51 434	47483	50151	60159
Moyenne entreprise (ME)	5897	6366	7374	9225
Total des Petites et Moyennes entreprises	57331	53849	57525	69414

Source : Bulletins d'information annuels du ministère de la PME

Pour cette raison, l'approche Lean Six Sigma proposée dans ce chapitre vise à contribuer, en respectant une simple démarche dans le contexte de gestion des PME, et améliorer les processus de fabrication pour rester compétitive. Les détails de l'approche proposée sont schématisés dans la figure III.1.

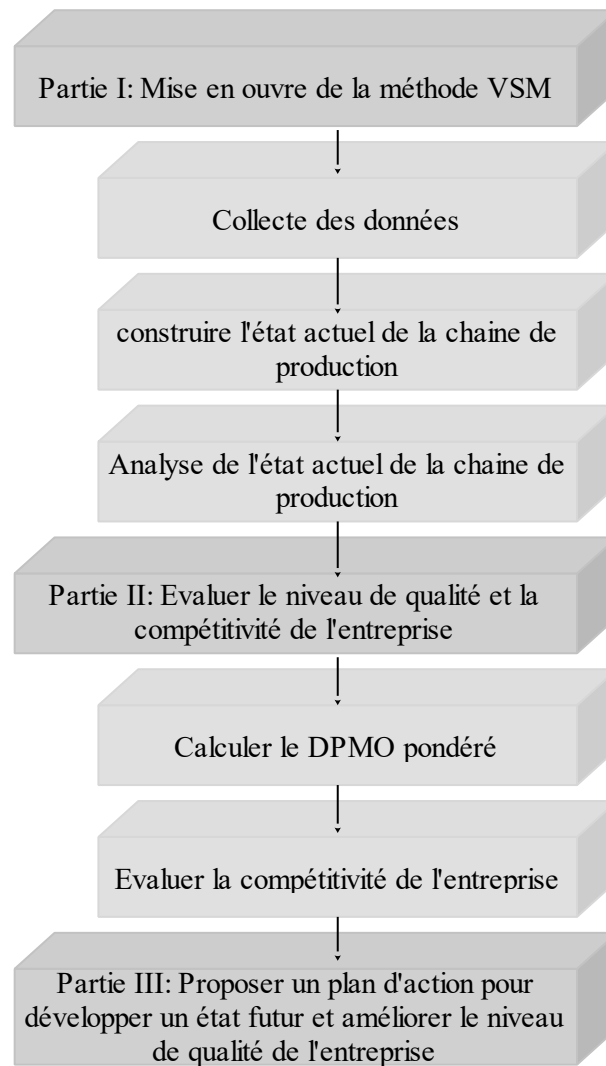


Figure III.1 : L'approche proposée

III.2.1 Partie 1 : Application de la méthode Cartographie de la chaîne de Valeur (VSM)

La méthode VSM c'est l'outil le plus connu dans l'approche Lean Manufacturing grâce à son capabilité dans l'amélioration et le diagnostic des processus de fabrication. Elle facilite l'identification et la visualisation de la non-valeur ajoutée dans les chaînes de production. Elle permet aussi d'éviter les consommations excessives des ressources et des déchets générés. La première partie de notre approche vise à appliquer cette méthode en se basant sur un enchainement des étapes, comme indique les sous-titres suivants :

III.2.1.1 Collecte des données

L'utilisation conventionnelle de la méthode VSM met en considération l'amélioration d'indicateurs simples à manipuler tel que (le temps de cycle, les stocks des encours, le nombre ou l'affectation des opérateurs). Dans notre approche, la phase de collecte des données et des informations a été possible suite à un stage pratique pendant deux mois à

l'entreprise BAG (Mai et Juin 2017) en se basant sur l'observation empirique et des sessions de brainstorming en interrogeant les dirigeants de l'entreprise ainsi que les personnes qui effectuent les tâches du processus de fabrication.

III.2.1.2 Construction de l'état actuel de la chaîne de production

Les données collectées dans l'étape précédente doivent être modélisées sous forme d'une cartographie à l'aide des symboles prédéfinis (Annexe I) représentant les différents éléments de la chaîne de valeur pour construire une carte de l'état actuel de la chaîne de production.

La carte de l'état actuel illustre de quelle manière les tâches de production sont effectués dans l'environnement de travail. L'état actuel est développé pour identifier les différents types de gaspillage dans chaque étape de processus de fabrication. De plus, l'état actuel nous a permis d'expliquer la situation réelle du processus de fabrication et la manière dont les composants interagissent les uns avec les autres.

III.2.1.3 Analyse de l'état actuel

Une fois la carte de l'état actuel construite, la phase d'analyse est la plus importante dans le processus d'application de la cartographie de la chaîne de valeur. Elle permet de procéder au processus d'évaluation pour identifier les différents types de gaspillage et leurs causes réelles. Au cours de cette phase, plusieurs outils et méthodes peuvent être utilisés (Takt time, l'outil Pareto, diagramme d'Ichikawa.) pour faciliter l'analyse de la chaîne de valeur et déterminer la non-valeur ajoutée.

III.2.2 Partie 2 : Evaluation la compétitivité de l'entreprise

La deuxième partie de notre approche est liée beaucoup plus au produit, et nous avons essayé d'évaluer le niveau de qualité et la capacité compétitive de l'entreprise en se basant sur les pièces non conformes générées par le processus de fabrication. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle DPMO pondéré et le niveau sigma.

III.2.2.1 Le modèle Défaut Par Million d'Opportunités(DPMO) :

Le DPMO, est l'un d'indicateurs les plus utilisés dans l'approche Six sigma. Il exprime la proportion de défauts sur le nombre total d'opportunités dans un ensemble de données (Aouag et al., 2015). Le calcul du DPMO est effectué en utilisant la formule suivante :

$$DPMO = \frac{NB}{NP \times NO} \times 1000000 \quad \text{Eq (III.1)}$$

NB : le nombre des pièces non conformes

NP : nombre des pièces produites

NO : nombre d'opportunités de défauts par unité.

On peut utiliser une autre formule qui met la relation du DPMO en fonction de DPO, comme suit :

$$DPMO = DPO / 1000000 \quad \text{Eq (III.2)}$$

DPO : Défaut par opportunité

III.2.2.2 Le modèle DPMO pondéré

Le modèle DPMO pondéré consiste à associer des poids aux valeurs du DPMO correspondant pour chaque processus afin d'obtenir un niveau sigma global de l'entreprise.

Les résultats obtenus par **Aouag et al., (2015)** montrent que la pondération du DPMO augmente et améliore le taux d'estimation des résultats. Dans notre approche, nous avons exploité une pondération développée par **Aouag et al., (2015)** pour évaluer le niveau de qualité mais pour une période de trois ans. Alors, la pondération utilisée est exprimée par l'équation suivante :

$$W_i = \frac{CPQ_i}{\sum_i^n CPQ_i} \quad \text{Eq (III.3)}$$

W le ratio de pondération

i l'étape dans le processus de fabrication

CPQ le cout de défaut de qualité

III.2.2.3 Le niveau Sigma

Le niveau Six Sigma est le facteur clé utilisé pour déterminer et évaluer les améliorations obtenues dans un projet Six Sigma (**Kim, 2008**). Le niveau Sigma peut être calculer à l'aide de la fonction NORMSINV disponible dans Microsoft Excel (**Lucas, 2002**), en utilisant l'équation suivante :

$$\text{niveau Sigma} = 1,5 + NORMSINV(1 - DPMO) \quad \text{Eq (III.4)}$$

À partir des résultats du niveau sigma, les entreprises peuvent être classées dans l'une des catégories suivantes : « classe mondiale », « classe moyenne » ou « non compétitive » (**Lucas, 2002**). Chaque catégorie est définie dans un intervalle de variation de la valeur du DPMO, comme indiquée dans le tableau III.2 :

Tableau III.2 : Classement d'une organisation en fonction du niveau sigma

Niveau sigma	DPMO	Catégorie
6	3.4	Classe mondiale
5	230	Classe moyenne
4	6200	
3	67000	
2	310000	Non compétitive
1	700000	

III.2.3 Amélioration du processus de fabrication

C'est la dernière étape du processus d'application de notre approche, vise à éliminer ou réduire les dysfonctionnements et le taux de gaspillage au niveau de la chaîne de production ainsi qu'améliorer le niveau de qualité pour un état futur meilleur.

La construction d'une carte de l'état futur est basée sur une évaluation d'état actuel en tenant en compte des sources de gaspillage et à éliminer d'une manière systématique en apportant un ensemble des opportunités d'amélioration.

III.3 Application de l'approche proposée dans une PME algérienne

L'approche proposée dans ce chapitre a été appliquée dans une PME algérienne (BAG) pour améliorer leurs performances.

III.3.1 Présentation de l'entreprise BAG

L'entreprise BAG (Bouteille à Gaz) est issue de la restructuration de la SNS, elle est détenue à 100% par NAFTAL. Les activités principales de l'entreprise sont la fabrication et la commercialisation de :

- Bouteilles à gaz 11/13kg et 35/42kg.
- Réservoirs GPL (carburant) 60 litres cylindriques.
- Casiers métalliques pour bouteilles à gaz.

Mais son activité actuelle porte essentiellement sur la conception, la production et la commercialisation des bouteilles à gaz 11 / 13 kg.

Géographiquement, elle est située au niveau de la zone industrielle au nord-est de la ville (Batna), et s'étend sur une superficie de 71114 m² dont 17000 m² couverte (Figure III.2). Le régime de travail est le système des 1×8 pour le service production, 3×8 pour le service de sécurité et 1×8 pour l'administration. Son effectif est de 263 personnes (les statistiques 2017).



Figure III.2: Localisation de l'entreprise BAG

III.3.2 Description du processus de la fabrication d'une bouteille à gaz :

Dans cette entreprise, on trouve trois ateliers principaux composent le système de fabrication d'une bouteille à gaz (atelier de mécanique, de soudage et de finition). Chaque atelier englobe un ensemble des opérations, comme suite :

Atelier mécanique : il regroupe les lignes de production des emboutis, des colliers et des pieds. Passant sur les opérations suivantes

- **Découpeuse des Flancs** au niveau de cette opération, une tôle de métal est découpée en flancs (forme circulaire) par une presse découpeuse
- **Ligne des emboutis supérieurs** : consiste à fabriquer la partie supérieure de la bouteille basant sur un sous-ensemble des opérations qui sont : La graisseuse, La presse d'emboutissage, La soyeuse rogneuse
- **Ligne des emboutis inférieurs** cette ligne comprend trois opérations : La graisseuse des flancs La presse d'emboutissage La soyeuse rogneuse afin de générer la partie inférieure de la bouteille.
- **La presse découpe pieds et colliers** : générer les pieds et les colliers de la bouteille
- **Ligne des pieds** : cette ligne se commence par une cintreuse pour obtenir une forme circulaire, en suite ils subissent l'opération de cambrage qui consiste à couder les têtes des pieds à l'intérieur.
- **Ligne des colliers** au niveau de cette ligne de fabrication nous trouvons presque les mêmes opérations Ligne des pieds, elle se commence par une cintreuse pour obtenir une forme circulaire, la seule différence c'est que le cambrage est effectué en deux phases le pré cambrage et le cambrage final

Atelier de soudage : il comprend quatre lignes de soudage :

- **Soudage collerette** : consiste à souder les collerettes avec les emboutis supérieurs
- Soudage pieds** : pour rôle l'assemblage des emboutis inférieurs et des pieds.
- **Soudage circulaire** : consiste à souder les emboutis supérieurs avec les emboutis inférieurs pour former les bouteilles.
- **Soudage colliers** : cette opération a pour le but de souder le collier avec la bouteille former dans l'opération précédente

Atelier de finition : présente la dernière phase de fabrication de la bouteille. Elle se compose de Cinq opérations, comme suit :

- **Traitement thermique** : C'est un four pour un traitement thermique qui fonctionne avec du gaz. Le traitement que doivent subir les bouteilles est le recuit qui est utilisé pour éliminer les contraintes et les déformations que les éléments des bouteilles ont subies pendant les différentes étapes de leur fabrication.
- **Banc d'épreuve** : Les bouteilles empilées passent l'une après l'autre grâce à l'opérateur qui, pour tester la solidité de la bouteille avec une pression de 30bar
- **Le grenailage** une fois que les bouteilles sont réputées bonnes, elles sont envoyées vers la grenailleuse pour rendre la bouteille poreuse et à supprimer le calame produit au recuit.
- **La métallisation** cette opération est effectuée par une machine qui fait tourner la bouteille, le chalumeau fait fondre le fil de zinc sur toute la surface de la bouteille pour la protéger contre la corrosion et la peindre.
- **La peinture** la peinture est réalisée par une machine à pistolets qui injecte la peinture dans tous les sens, pour toucher tous les côtés de la bouteille

La figure III.3 donne une vision plus claire de la structure générale de toute la chaîne de la production.

III.3.3 Construction de la cartographie de l'état actuel

La cartographie de l'état actuel (Figure III.4) donne une vision générale sur la situation réelle du processus de production, ainsi qu'elle nous a permis de faciliter la détection des différentes sources de gaspillage. L'étape initiale pour créer une carte de chaîne de valeur consiste à rassembler des données qui reflètent l'état actuel du système (**Jasti and Sharma, 2014**). Les valeurs nécessaires pour construire l'état actuel sont définies par le temps de cycle, lead time, le temps de changement d'outils et le nombre des opérateurs. Ces dernières sont obtenues à partir de l'observation empirique, un chronomètre et des fiches techniques concernant le processus de fabrication.

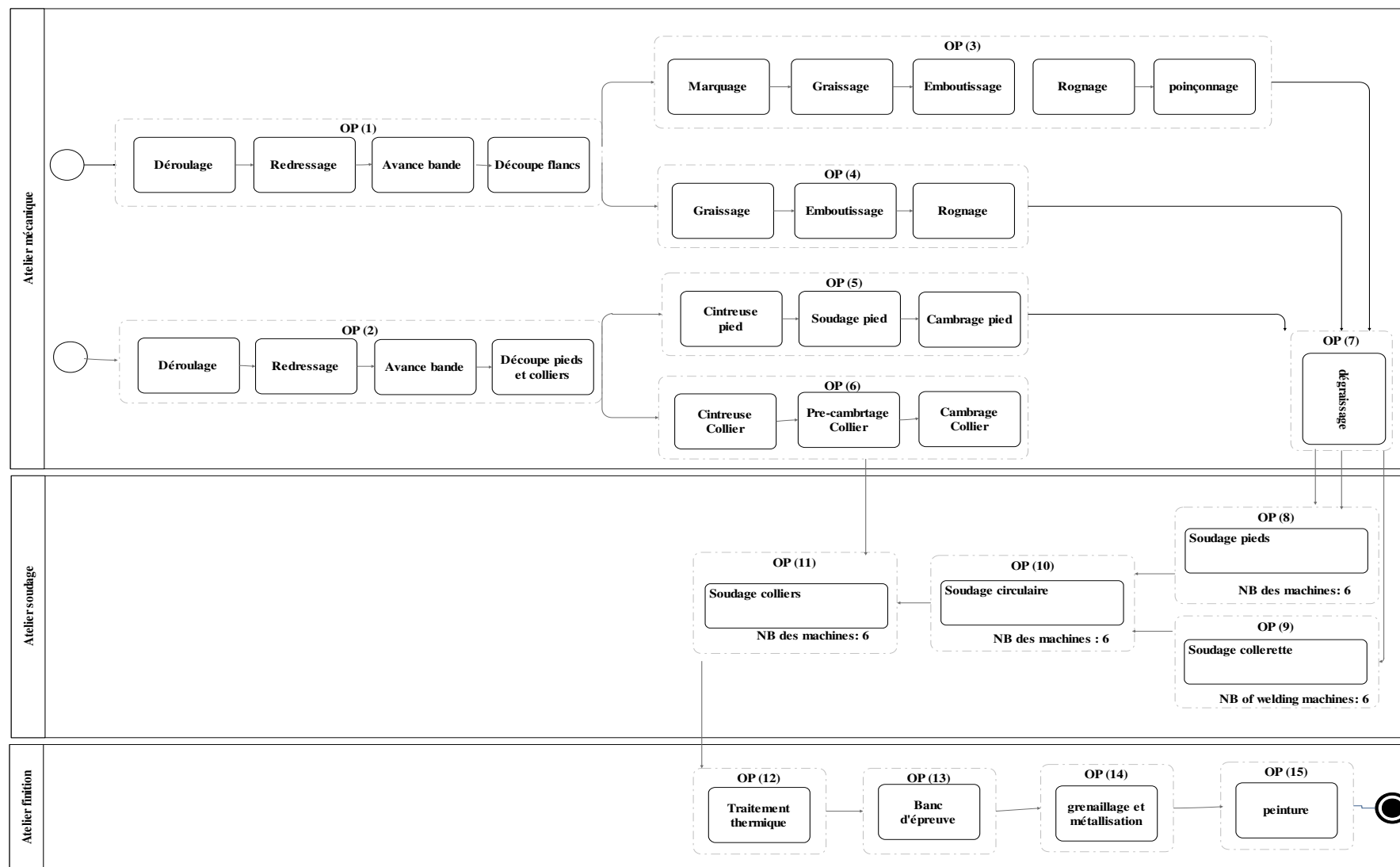


Figure III.3 : Les différentes opérations du processus de fabrication.

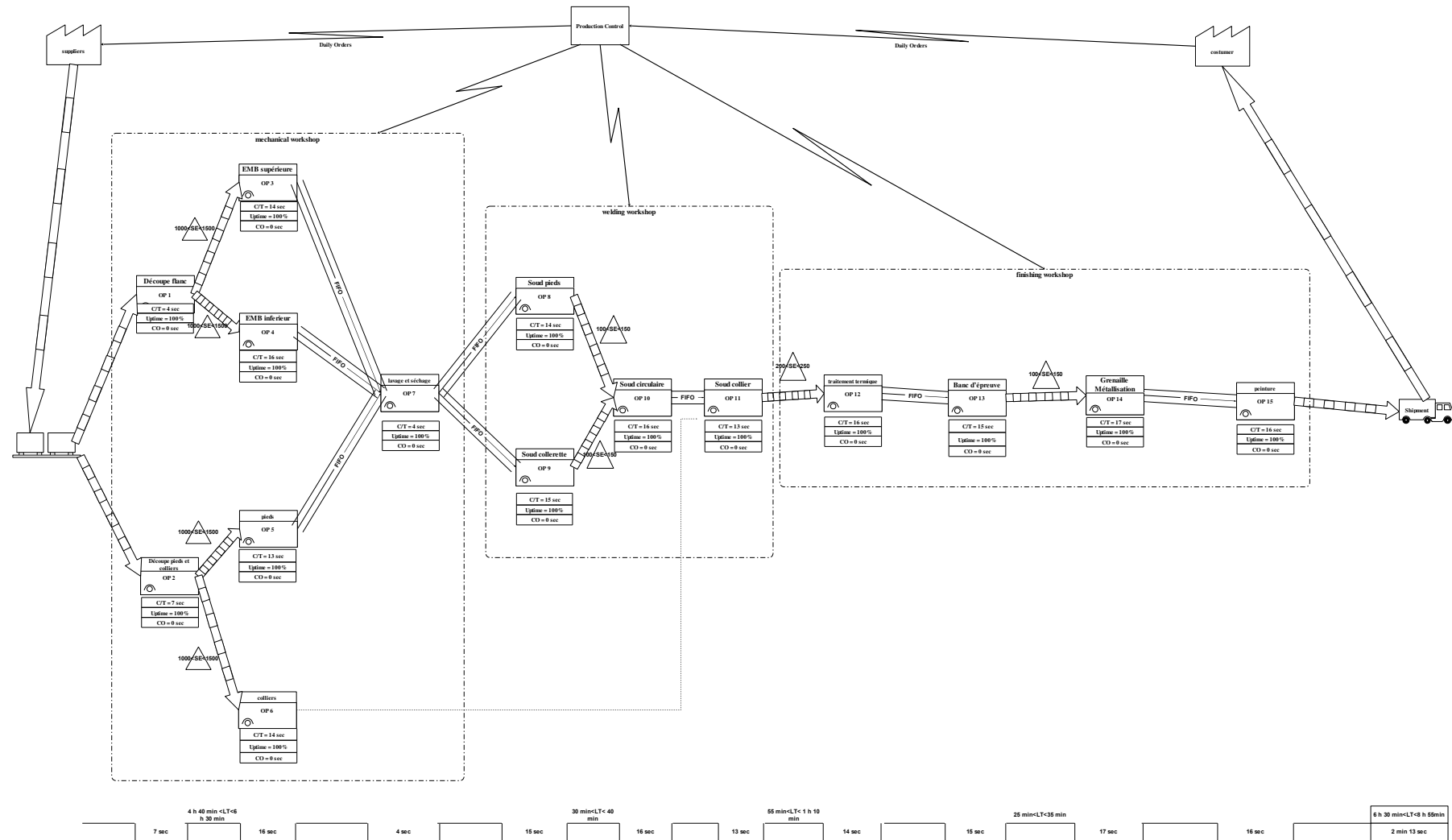


Figure III.4 : Cartographie de l'état actuel

III.3.2.1 Analyse de l'état actuel

Le but de cette partie est d'effectuer une analyse de la carte de l'état actuel pour identifier les différents types de gaspillage et leurs causes principales, afin de faciliter la sélection des opportunités d'amélioration qui permettent de rendre la chaîne de production plus stable. Alors, dans cette chaîne de production les activités sans valeur ajoutée sont réparties entre les mouvements inutiles et le temps de transport, ainsi que la différence entre les cadences de machines.

III.3.2.1.1 Analyse du temps

Le temps de production est l'un d'indicateurs les plus importants que son analyse doit être prise en compte pour trouver la possibilité de le réduire. Au niveau de cette chaîne de production, le temps de cycle de chaque opération est obtenu par la fiche technique du processus de fabrication et en utilisant un chronomètre. Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure III.5.

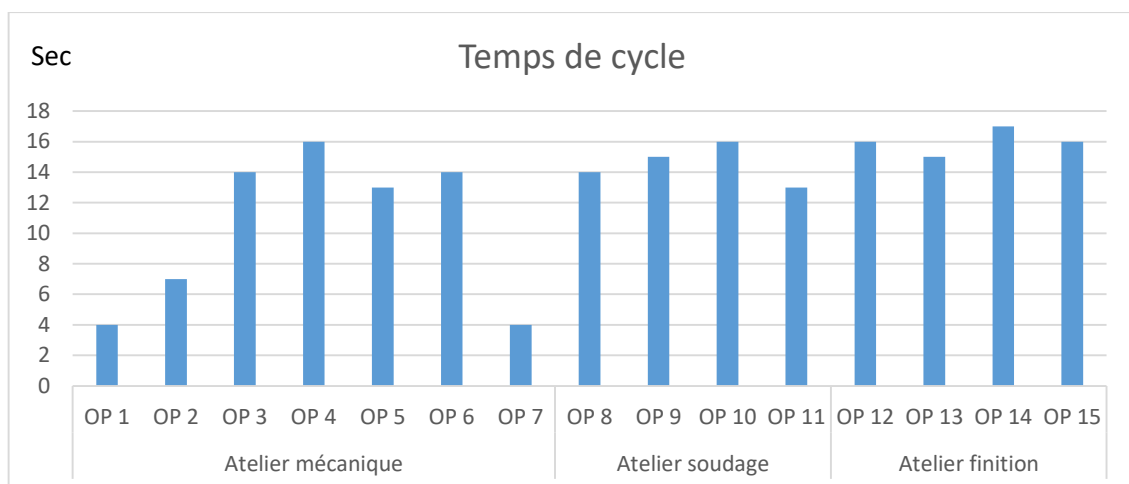


Figure III.5 : Temps de cycle de chaque opération

III.3.2.1.2 Takt Time de la chaîne de production

Le TAKT time définit la fréquence dans laquelle le processus de fabrication doit produire pour satisfaire les demandes des clients, le Takt time est calculé en divisant le temps de travail net par la demande du client. Dans cette entreprise, la demande des clients est de 1277 bouteilles par jour. Une équipe qui travaille 8 heures par jour avec 30 minutes de pause, 23 jours par mois. Le takt Time est calculé comme suite.

$$\text{Takt time} = \frac{(8-0.5) \times 3600 \times 23}{1277 \times 23} = 21 \text{ seconds}$$

Nous remarquons que la valeur du Takt time dépasse le temps de cycle de toutes les opérations de la chaîne de production. Ceci montre un type de gaspillage appelé **la**

surproduction qui est causée par le grand nombre des encours comme illustré par le dessin de l'état actuel de la chaîne de production (Figure III.4)

III.3.2.1.3 Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa est utilisé comme un outil d'analyse pour regrouper les causes de gaspillage et les associer pour un seul effet, comme indique la figure III.6

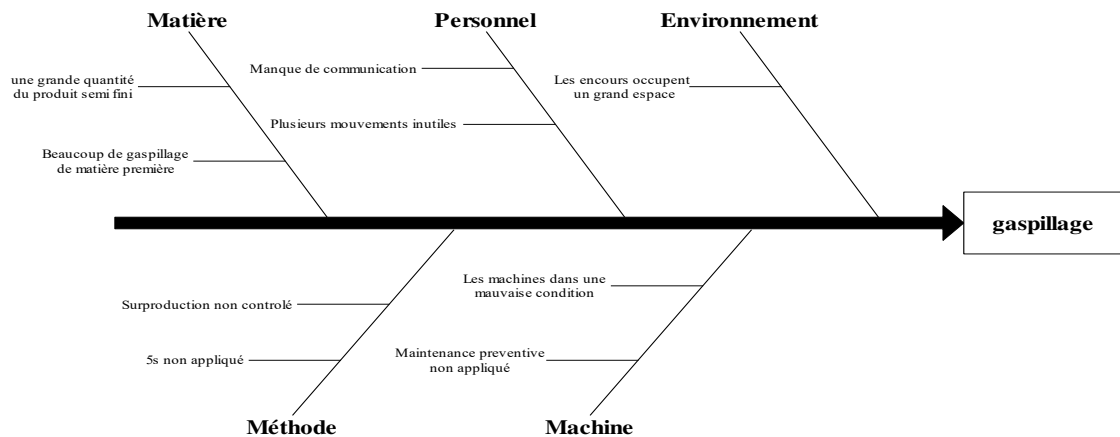


Figure III.6 : Diagramme d'Ishikawa

III.3.2.1.4 Diagramme de Pareto

Pour une analyse un peu détaillée, nous avons appliqué l'outil Pareto pour faire un classement des causes selon leurs degrés d'influence. Pour ce faire, nous avons demandé au chef de production de proposer un poids entre 1 et 15 pour chaque cause sachant que la cause la plus influente aura le poids le plus élevé. Ensuite nous avons classé les causes par ordre décroissant selon les poids donnés, dans la troisième étape on calcule le poids cumulé et pourcentage cumulé, comme indique le tableau III.3.

Tableau III.3 : Tableau préparatoire pour le diagramme de Pareto.

Causes	poids	Poids cumulé	% cumulée
Plusieurs mouvements inutiles (C1)	15	15	21%
une grande quantité du produit semi-fini (C2)	13	28	39%
Surproduction non contrôlée (C3)	10	38	53%
5s non appliquées (C4)	9	47	65%
Maintenance préventive non appliquée (C5)	7	54	75%
Les machines dans une mauvaise condition (C6)	7	61	85%
Beaucoup de gaspillage de matière première (C7)	6	67	93%
Manque de communication (C8)	5	72	100%

Ensuite, nous avons construit le diagramme de Pareto en utilisant Microsoft Excel, comme montre la figure III.7 :

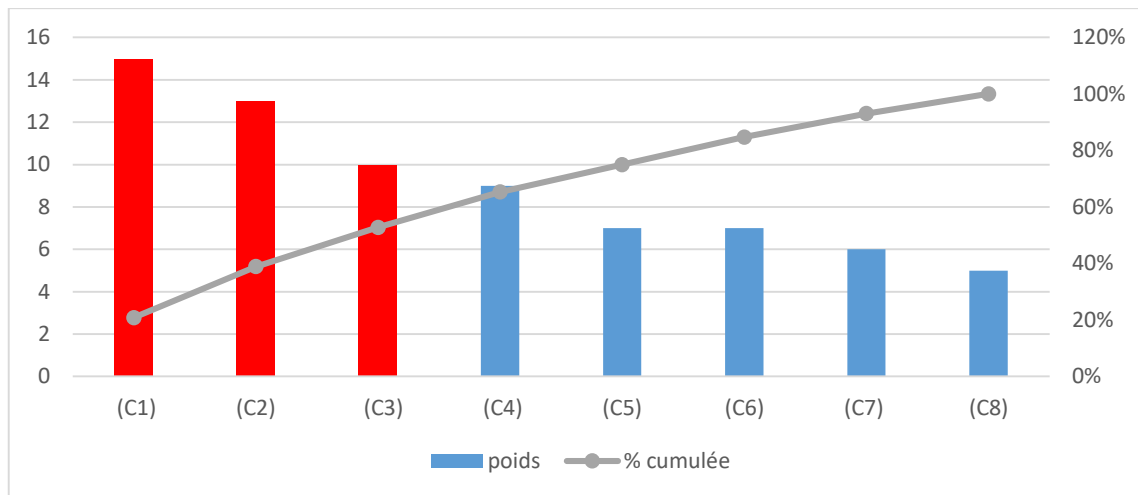


Figure III.7 : Diagramme de Pareto

Le diagramme est élaboré pour mettre en graphique le principe de Pareto. Ces diagrammes sont appelés aussi « courbes ABC ». Dans les relations de causes à effets, ils permettent de distinguer trois familles de causes. Celles qui sont importantes sont classées en A, les moyennes sont classées en B et les faibles sont classées en C.

Selon le principe de Pareto, et le principe de la courbe ABC. En prend trois causes les plus influentes sur les performances de la chaîne de production et qui nécessitent une priorité d'action :

- Plusieurs gestes inutiles(C1).
- Le stock d'un produit semi-fini est trop élevé et occupe beaucoup d'espace(C2).
- Surproduction non contrôlée (C3)

III.3.4 Évaluation de la compétitivité de l'entreprise

L'objectif de cette partie est de calculer le DPMO pondéré et le niveau sigma de l'entreprise dans les années 2012, 2014 et 2016 respectivement, afin d'évaluer la progression et la variation de degré de compétitivité du processus de fabrication.

Dans cette partie, nous avons appliqué une démarche de pondération des processus mais avec une mise à jours des données de l'entreprise et en particulier pour les années 2012, 2014 et 2016 pour atteindre les objectifs suivants :

- Effectuer une comparaison juste et équitable des résultats ;
- Effectuer une étude comparative du niveau de qualité dans une période de trois années ;
- Évaluer s'il y a des améliorations abouties par l'entreprise en matière de compétitivité.

Chapitre III : Amélioration et mise en oeuvre d'une approche Lean Six Sigma conventionnelle dans les PME

Dans notre approche, le DPMO pondéré et le niveau sigma sont calculés à travers les informations communiquées par les services : qualité, comptabilité et production.

Dans ce qui suit et pour expliquer la procédure de calcul, on a traité les valeurs de chaque atelier du processus de fabrication de l'année 2016.

III.3.4.1 Évaluation la compétitivité de l'atelier mécanique

Nous avons décomposé l'atelier mécanique en cinq opérations, comme suit :

- ✓ Opération 1 (OP1) : découpe Flanc
- ✓ Opération 2 (OP2) : emboutis supérieur.
- ✓ Opération 3 (OP3) : emboutis inférieur
- ✓ Opération 4 (OP4) : Pieds.
- ✓ Opération 5 (OP5) : Colliers

Chaque opération comporte ses propres valeurs nécessaires pour effectuer le processus de calcul afin d'évaluer le niveau du qualité (tableau III.4).

Tableau III.4 : Le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations dans l'atelier mécanique

Opérations	Pièce produite	Défaut par opportunité (DPO)	Coût de défaut de qualité	Poids
Découpe Flanc	1011014	1616	459,92	25,5%
Emboutis supérieur	467620	1045	496,9	27,5%
emboutis inférieur	464560	1141	509,99	28,2%
Pieds	467875	2346	169,48	9,4%
Colliers	414872	697	169,68	9,4%

En se basant sur le tableau précédent, le calcul du DPMO pondéré est présenté comme suit :

$$DPMO_{Total} = \sum (W_i \times DPO_i) / 10^6$$

$$DPMO_{Tmécanique} = (0,255 \times 1616 + 0,275 \times 1045 + 0,282 \times 1141 + 0,094 \times 2346 + 0,094 \times 697) / 10^6.$$

$$DPMO_{Tmécanique} = 0.001307.$$

En utilisant l'équation III.4, le niveau sigma est calculé comme suit :

$$Z_{mécanique} = 1.5 + NORMSINV(1 - 0.001307).$$

$$Z_{mécanique} = 1.5 + NORMSINV(0.999086).$$

$$Z_{mécanique} = 4.51.$$

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus peuvent être interprétés comme suit :

- Le calcul des poids des différentes opérations de l'atelier mécanique montre que l'opération d'emboutie supérieure est la plus importante avec un poids de 0.282,

suivi par l'embouti inférieur et découpe flan avec les poids 0.275 et 0.255 respectivement.

- Le niveau sigma de l'atelier mécanique est égal à 4,51.
- En utilisant le tableau de classement (Tableau III.2), le niveau sigma de l'atelier mécanique est appartient à la classe moyenne.

III.3.4.2 Évaluation la compétitivité de l'atelier soudage

L'atelier de soudage fait l'objet de l'assemblage des différentes parties constituant la bouteille qui sont fabriqués dans l'atelier mécanique, il comprend quatre (4) opérations :

- ✓ Opération (OP 6) : soudage pieds.
- ✓ Opération (OP 7) : soudage Emboutis.Sup + collorettes.
- ✓ Opération (OP 8) : soudage circulaire
- ✓ Opération (OP 9) : soudage Colliers.

Le tableau ci-dessous présente le nombre de défauts par opportunité, le coût de défaut de qualité et le poids de chaque processus dans l'atelier de soudage.

Tableau III.5 : Le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations dans l'atelier soudage

Opérations	Pièce produite	Défaut par opportunité	Coût de défaut de qualité	Poids
Soudage pieds	440451	855	57,16	14,07%
Soudage collerettes	442355	1241	169,66	41,77%
Soudage circulaire	414252	2064	108,93	26,82%
Soudage colliers	385919	285	70,43	17,34%

À partir du tableau III.5, le calcul du DPMO pondéré est effectué comme suit :

$$DPMO_{Total} = \sum (W_i \times DPO_i) / 10^6$$

$$DPMO_{Tsoudage} = (0,1407 \times 855 + 0,4177 \times 1241 + 0,2682 \times 2064 + 0,1734 \times 285) / 10^6.$$

$$DPMO_{Tsoudage} = 0.00124163.$$

En utilisant l'équation (III.4), le niveau sigma est calculé comme suit :

$$Z_{soudage} = 1.5 + NORMSINV(1 - 0.00124163).$$

$$Z_{soudage} = 1.5 + NORMSINV(0.99876).$$

$$Z_{soudage} = 4.52.$$

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont interprétés comme suit :

- Les poids obtenus des différentes opérations de l'atelier soudage montrent que les opérations de soudage collerettes et soudage circulaire sont les plus importants avec les poids de 0,4177 et 0.2682 respectivement.
- Le niveau sigma de l'atelier de soudage est égal à 4,52.

- Le résultat du niveau sigma montre que l'atelier de soudage est appartient à la classe moyenne.

III.3.4.3 Évaluation la compétitivité de l'atelier finition

Une fois les différentes opérations de soudage sont réalisées, la bouteille est transmise à l'atelier finition qui se compose de quatre opérations, comme suit :

- ✓ Opération 10 (OP 10) Traitement thermique.
- ✓ Opération 11 (OP 11) Banc d'épreuve.
- ✓ Opération 12 (OP 12) Grenailage et Métallisation.
- ✓ Opération 13 (OP 13) Bouteilles finis.

Les informations nécessaires pour évaluer la compétitivité de l'atelier finition sont collectées et enregistrées dans le Tableau III.6.

Tableau III.6 : Le nombre de défauts par opportunité et poids des opérations de l'atelier finition

Opérations	Pièce produite	Défaut par opportunité	Coût de défaut de qualité	Poids
Four BAG	357737	0	59,16	0%
Banc d'épreuve	330201	570	34,6	100%
Grenailage et Métallisation	302192	0	134,23	0%
Bag finit	273990	0	483,41	0%

À partir du tableau III.6 le calcul du DPMO pondéré est effectué comme suit :

$$DPMO_{Total} = \sum (W_i \times DPO_i) / 10^6$$

$$DPMO_{Tfinition} = (0+1 \times 570 + 0 + 0) / 10^6.$$

$$DPMO_{Tfinition} = 0,000570.$$

En utilisant l'équation (III.4), le niveau sigma est calculé comme suit :

$$Z_{finition} = 1.5 + NORMSINV(1 - 0,000570).$$

$$Z_{finition} = 1.5 + NORMSINV(0.99943).$$

$$Z_{finition} = 4.75.$$

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont interprétés comme suit :

- Les poids obtenus des différentes opérations de l'atelier finition montrent qu'une seule opération influençant la compétitivité de l'atelier, c'est l'opération banc d'épreuve avec un poids de 100%.
- Le niveau sigma de l'atelier finition est égal à 4.75.
- L'atelier finition est appartient à la classe moyenne.

III.3.4.4 Le niveau sigma global de l'entreprise

Le tableau III.7 contient toutes les informations nécessaires pour calculer les poids des ateliers qui forment la chaîne de production afin d'évaluer la compétitivité et la performance globale de l'entreprise.

Tableau III.7 : le nombre de défauts par opportunité et poids des trois ateliers

Ateliers	Pièce produite	Défaut par opportunité	Coût de défaut de qualité	Poids
A mécanique	1 809 698	6845	1346,05	55%
A soudage	1 678 532	4445	406,18	16%
A finition	1 263 550	570	711,4	29%

A partir du Tableau III.7, le calcul du DPMO pondéré total est effectué comme suit

$$DPMO_{Total} = \sum (W_i \times DPO_i) / 10^6$$

$$DPMO_{Tprocessus} = (0,55 \times 6845 + 0,16 \times 4445 + 0,29 \times 570) / 10^6.$$

$$DPMO_{Tprocessus} = 0,00464125.$$

En utilisant l'équation III.4, le niveau sigma est calculé comme suit :

$$Z_{processus} = 1.5 + NORMSINV(1 - 0,00464125).$$

$$Z_{processus} = 1.5 + NORMSINV(0.9953).$$

$$Z_{processus} = 4.1.$$

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus sont interprétés comme suit :

- Les poids des différents ateliers montrent que l'atelier mécanique est l'atelier le plus influent sur la compétitivité de l'entreprise avec un taux de 55%.
- Le niveau sigma global du processus de fabrication est égal à 4,1.
- Les résultats du niveau sigma montrent que la compétitivité de l'entreprise se trouve dans la classe moyenne.

III.3.4.5 Comparaison de la compétitivité de l'entreprise dans les années 2012, 2014, 2016

De la même manière et avec les mêmes procédures des calculs utilisés, on a étudié la situation compétitive de l'entreprise dans les années 2012 et 2014. Alors, les valeurs nécessaires utilisées pour calculer le DPMO pondéré et le niveau sigma de chaque année sont présentées dans l'Annexe II. Les résultats finals sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Le DPMO pondéré et le niveau Sigma de l'entreprise pour chaque année

Année	DPMO pondéré	Niveau sigma	Classe
2012	0.00311661	4,24	Classe moyenne
2014	0.010034	3,82	Classe moyenne
2016	0,00464125	4,1	Classe moyenne

À partir du Tableau III.8, la comparaison entre les résultats des années 2012, 2014 et 2016 montre l'existence des variations des résultats du DPMO pondéré et niveau sigma, mais le plus important c'est que l'entreprise n'a réalisé aucune amélioration en matière de compétitivité et les processus de fabrication sont restés dans la même classe (classe moyenne) pendant les trois années.

III.3.5 Développement de l'état futur et amélioration de la compétitivité du processus de fabrication

Dans cette étude, l'état actuel est développé et analysé pour identifier les activités sans valeur ajoutée au sein de la chaîne de production, ainsi qu'évaluer le niveau de qualité de l'entreprise en utilisant le modèle DPMO pondéré et le niveau Sigma. En se basant sur les informations et les résultats obtenus par les deux parties précédentes, et selon les perspectives de notre approche (Figure III.1), nous avons proposé des opportunités d'amélioration pour améliorer les performances du processus de fabrication en éliminant les différents types de gaspillage ainsi qu'améliorer la compétitivité de la chaîne de production afin de promouvoir la situation mondiale de l'entreprise. Le plan d'action proposé (Tableau III.9) contient tout un ensemble des opportunités qui vont permettre d'offrir une amélioration systématique au processus de fabrication.

Tableau III.9 : Des opportunités d'amélioration pour réduire le gaspillage et améliorer le niveau qualité

Opportunités d'amélioration	Causesprimaires				Causes secondaires				
	C1	C2	C3	N.Q	C4	C5	C6	C7	C8
Améliorer la luminosité du milieu travail	✓			✓	✓				
Création des procédures standards pour effectuer les différentes tâches dans le milieu de travail.	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
Utiliser des protocoles d'évaluation des conditions ergonomiques dans chaque poste de travail	✓			✓					✓
Niveler la production et produire avec le rythme de Takt Time	✓	✓	✓						✓
Utiliser des fiches de suivi des pannes et assurer l'application régulière de la maintenance préventive				✓		✓	✓		✓
Appliquer les outils MSP pour détecter le dérèglage du processus et les défauts de qualité				✓				✓	
Contrôler le processus de fabrication par la notion des cartes de contrôle				✓				✓	
Mise en œuvre des techniques adéquates pour gestion optimale du temps	✓				✓				
Former les ouvriers et développer l'esprit des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans tous les services de l'entreprise	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utiliser des méthodes efficaces pour réduire les stocks des encours (Kanban, OPT...)	✓	✓	✓	✓				✓	✓
Proposer un réarrangement de la chaine de production pour réduire le temps de transport	✓				✓				
Mise en œuvre des instructions de travail claires pour éviter les instructions personnelles et irrégulières	✓		✓	✓	✓	✓			✓
Organiser le lieu de travail en assurant les conditions ergonomiques	✓			✓	✓				

NQ : niveau de qualité

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons proposé une méthodologie à base de Lean Six Sigma pour motiver les dirigeants de l'entreprise de partager la culture Lean Six Sigma dans tous les services de l'entreprise afin d'aboutir à des améliorations acceptables pour une chaîne de production d'une PME.

Cette approche est divisée en deux parties essentielles. Dans la première étape, nous avons utilisé le principe de la méthode cartographie de la chaîne de valeur pour collecter les données concernant l'état actuel du processus de fabrication. Ensuite le diagramme d'Ishikawa et l'outil Pareto ont été utilisés comme des outils d'analyse pour identifier les différentes causes de gaspillage et les classer selon leurs degrés d'influence. Dans la deuxième partie, nous avons basé sur un modèle DPMO pondéré et le niveau sigma pour évaluer la compétitivité de l'entreprise dans une période déterminée.

Pour construire une carte d'état futur, nous avons proposé un plan d'action, qui contient un ensemble de recommandations qui vont permettre l'atteinte des résultats acceptables en ce qui concerne la réduction de gaspillage et l'amélioration du niveau de qualité.

a) Contributions et implications de l'approche

L'approche proposée dans ce chapitre traite des problèmes que fait face l'industrie algérienne et va essayer d'attirer l'attention des PME algériennes d'utiliser les approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans toutes les parties de leurs entreprises.

L'approche proposée permet aux chercheurs du domaine de suivre l'évaluation de la compétitivité des entreprises d'une manière continue avec la prise en considération des résultats de l'application de la méthode VSM.

b) Limites de l'approche

Les limites constatées par cette approche sont le manque des outils statistiques tels que DOE, ANOVA et les cartes de contrôle, qui ont une influence sur l'amélioration de la qualité du produit. De plus, l'approche proposée dans ce chapitre est classée parmi les approches Lean Six Sigma conventionnel.

Dans le chapitre suivant et selon nos perspectives, nous allons proposer une autre approche qui va permettre d'améliorer et d'élargir le champ d'application de l'approche Lean Six Sigma vers le domaine de la production durable.

Chapitre IV :

**Développement d'une extension de l'approche
Lean Six Sigma pour la durabilité des PME**

IV.1 Introduction

Il est clair que les approches Lean Manufacturing et six sigma sont les approches les plus utilisées dans le domaine d'amélioration continue grâce aux résultats obtenus par leurs applications dans divers contextes industriels.

Ce chapitre vise à élaborer une approche intégrée basée sur les approches Lean Manufacturing et Six Sigma pour évaluer et améliorer la production en respectant les trois axes du développement durable (environnemental-économique-sociale). L'approche proposée présente une réponse aux besoins méthodologiques des petites et moyennes entreprises industrielles. Ainsi que pour surmonter quelques limites qui ont été présentées précédemment (tableau I.10).

IV.2 Problèmes traités et cadre méthodologique

Les industries manufacturières doivent équilibrer l'amélioration des performances de durabilité pour maintenir leur existence dans le marché. La fabrication durable est l'un des domaines récents qui peut apporter un équilibre entre les aspects économiques, environnementaux et sociaux.

L'approche Lean Six Sigma est une méthodologie systématique et structurée qui contient des méthodes statistiques et des philosophies de gestion pour l'amélioration des performances des petites et moyennes entreprises.

Actuellement, l'application de Six Sigma dans les différents secteurs industriels est limitée en raison de plusieurs obstacles et contraintes telles que : le développement technologique avancé, la complexité de la conception des processus de fabrication et des produits, et le développement du champ d'optimisation à l'amélioration des facteurs environnementaux, économiques, sociaux.

Dans ce chapitre, un cadre de mise en œuvre des approches Lean Manufacturing et Six Sigma est développé en incorporant les outils de recherche opérationnelle en plus d'autres outils conventionnels tels que : SIPOC, diagramme d'Ishikawa, cartographie de la chaîne de valeurs pour résoudre certains problèmes liés aux points suivants :

- Le traitement de la durabilité de la production par les approches Lean Manufacturing et Six Sigma.
- Surmonter quelques limites de l'approche Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable.

IV.3 L'approche proposée

La méthodologie proposée dans ce chapitre présente une extension et amélioration de l'approche Lean Six Sigma conventionnelle. L'intérêt principal de cette méthodologie est d'améliorer la durabilité de la production dans les petites et moyennes entreprises. L'approche proposée appelée (SUS-DMAIC) est provenu de la combinaison des deux mots, le premier c'est (SUS) qui signifie sustainability ou durabilité et le deuxième c'est (DMAIC) qui signifie le cycle d'amélioration Define, Mesure, Analyze, Improve, Control. Ceci vise principalement à atteindre les objectifs fixés par les organisations en fonction des besoins attendus par le projet, qui sont exprimés par une amélioration équilibrée : économique, environnementale et sociale. Les étapes de l'approche proposée sont détaillées comme suit (figure IV.1) :

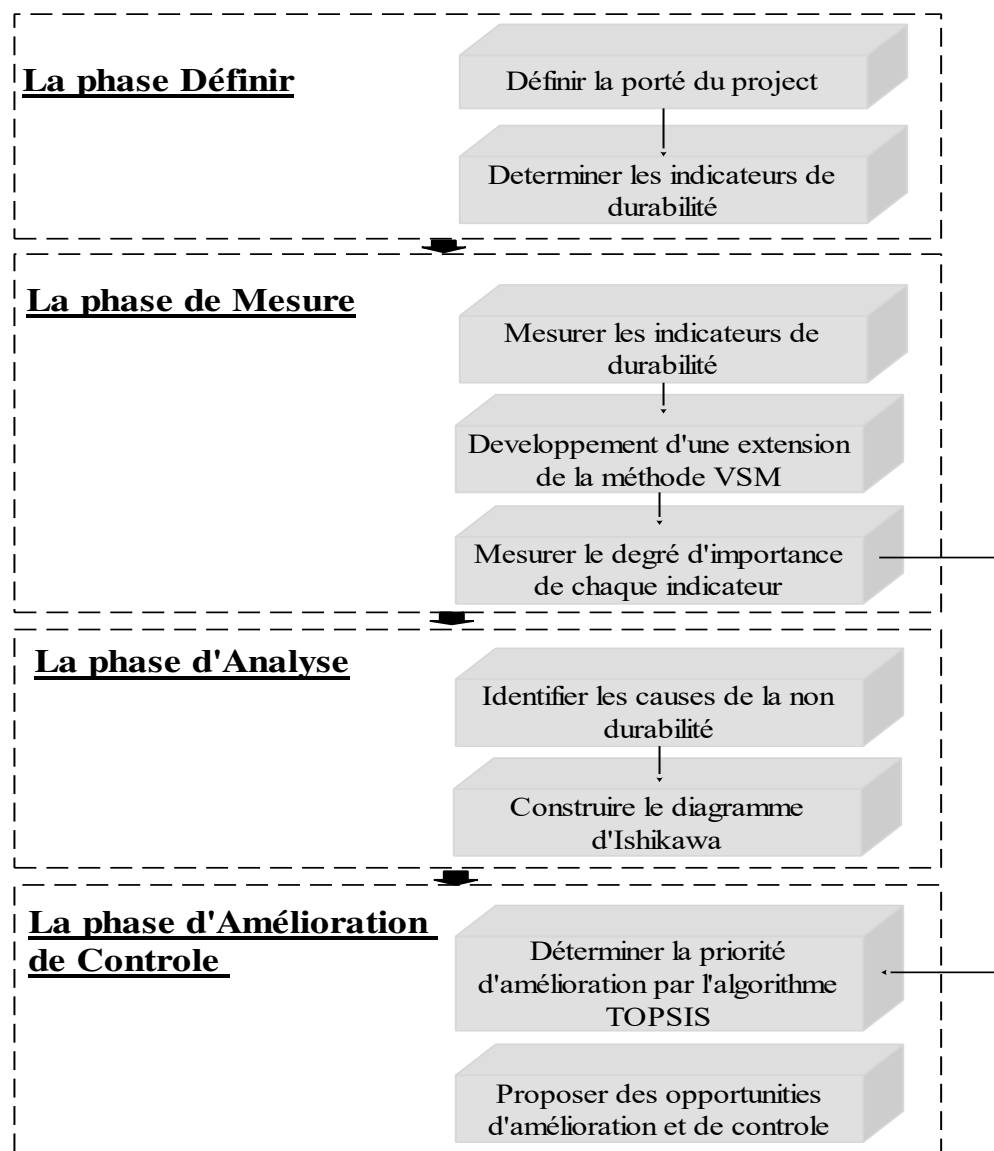


Figure IV.1: L'approche proposée

IV.3.1 La phase définir

Cette phase présente le départ du processus d'amélioration Sus-DMAIC. L'utilisation des outils Six Sigma dans cette étape doit être identifiée correctement les objectifs de la démarche. Ceci permet de confronter les attentes des clients avec les limites et les plans de développement de l'entreprise afin d'entreprendre une stratégie d'action la plus appropriée.

Dans cette phase du travail, nous avons utilisé en premier lieu l'outil charte de projet pour donner une vision globale et claire sur notre projet d'amélioration afin d'identifier les grands axes du travail et de déterminer les problèmes qui doivent être résolus et les objectifs dont nous avons besoin pour les réussir. Et deuxièmement, nous avons introduit la méthode SIPOC pour déterminer les entrées et les sorties du processus de fabrication afin d'extraire les indicateurs les plus influents sur la durabilité de la production.

IV.3.2 la phase Mesurer

C'est la phase la plus importante dans notre processus d'amélioration Sus-DMAIC. Elle se focalise sur les mesures d'indicateurs de durabilité définis dans l'étape précédente.

Selon les perspectives de notre approche, cette phase est constituée de trois principales composantes comme illustré dans la figure IV.2 :

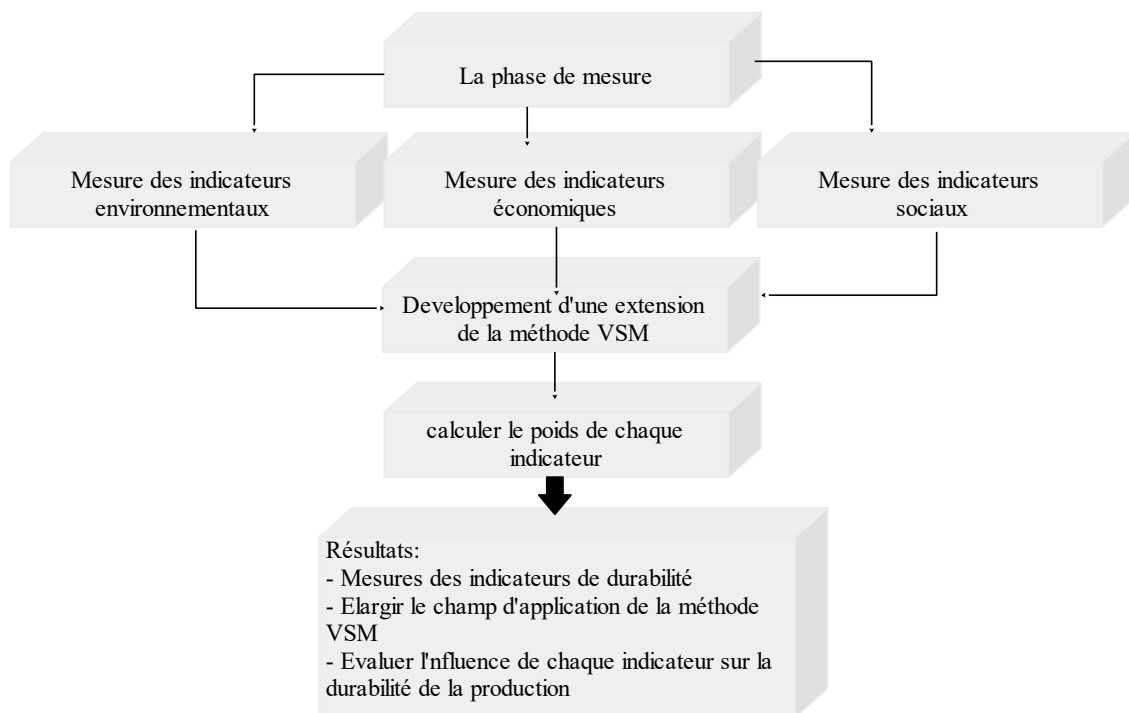


Figure IV.2 : La méthodologie de mesure

La description des différentes parties de la méthodologie de mesure sont présentées dans ce qui suit :

IV.3.2.1 Mesure des indicateurs environnementaux

Le pilier environnemental est l'un des axes les plus importants qui doivent être pris en compte dans l'évaluation de la durabilité de la production. Cependant, l'évaluation des performances environnementales repose sur la mesure de plusieurs indicateurs tels que la consommation d'énergie, de la matière première et la consommation d'eau. La sélection de ces métriques dépend du processus de fabrication et des résultats obtenus par la phase définir. Dans cette étape de mesure, nous avons utilisé un extrait d'une méthodologie de mesure de la consommation d'eau, développée par **(Sachidananda and Rahimifard 2012)** et nous élargissons leur champ d'application pour mesurer tous les indicateurs environnementaux, comme montré dans la figure suivant :

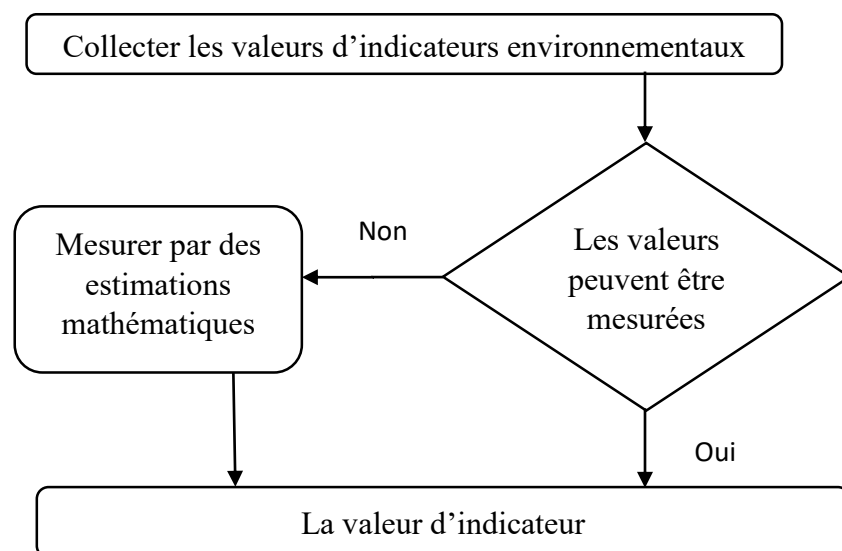


Figure IV.3 : Méthodologie utilisée pour mesurer les indicateurs environnementaux

IV.3.2.2 Mesure d'indicateurs économiques

Le facteur économique est un paramètre qui garantit la durabilité de la production à long terme. Selon **(Abidin et Pasquire 2007)**, la viabilité économique accroît la rentabilité grâce à l'utilisation efficace des ressources humaines, matérielles et financières. Cependant, la mesure d'indicateurs économiques repose sur plusieurs modèles tels que le cycle de vie du coût et le coût du cycle de la production. Le choix d'indicateurs et du modèle dépend des ressources et les données disponibles, ainsi que les besoins d'exactitude **(Utne 2009)**.

Dans le contexte de Lean Six Sigma, généralement les modèles d'estimation englobent les coûts visés par les objectifs du projet. La littérature fournit plusieurs modèles pour estimer les coûts de production (**Vinodh et al, 2016**).

Dans notre approche, l'évaluation de la durabilité économique repose sur deux phases :

- Dans la première phase, nous avons utilisé la méthodologie coût de cycle de la production pour estimer les dépenses des coûts les plus influents sur la durabilité économique de l'entreprise.
- Dans la deuxième phase de mesure économique, le modèle de cout de cycle de la production développé dans la première étape est utilisé comme un nouveau modèle de pondération. Ceci nous permet de calculer le DPMO pondéré et le niveau Sigma afin d'évaluer le niveau de qualité et le degré de compétitivité de l'entreprise dans le monde industriel.

IV.3.2.3 Mesure d'indicateurs sociaux

Pour assurer une évaluation globale de la durabilité de la production, il est nécessaire de prendre en compte des paramètres sociaux. Cependant, dans le domaine de la production, l'aspect social vise généralement à satisfaire les conditions de travail appropriées telles que le salaire et les conditions ergonomiques.

Dans cette étape nous avons utilisé une métrique du travail physique pour évaluer la durabilité sociale interne de l'entreprise. Pour ce faire, nous avons introduit la méthodologie proposée par (**Hollmann et al., 1999**) pour évaluer les conditions ergonomiques et le calcul de l'indice de charge de travail au niveau de chaque opération du processus de fabrication. Le calcul du PLI (Physical Load Index) est basé sur un check liste qui contient les opérations effectuées et les mouvements des différentes parties du corps, suivi par une équation, comme illustré dans l'Annexe III.

IV.3.2.4 Développement d'une extension de la méthode VSM

Au niveau de cette phase, nous avons mis l'accent sur le développement d'une extension de la méthode VSM qui englobe les valeurs liées aux dimensions économiques, sociales et environnementales mesurées dans les phases précédentes. L'extension de la méthode VSM proposée permet d'effectuer un diagnostic général sur la chaîne de production afin de faciliter leur évaluation et de détecter les dysfonctionnements en matière de durabilité.

IV.3.2.5 Mesure le poids de chaque indicateur de performance

La diversité d'indicateurs de performance est l'un des facteurs principaux qui traduit la différence entre le Lean Six Sigma conventionnelle et le Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable mais sans prise en considération du degré d'influence d'indicateurs sur la durabilité de la production (**barrière 4, Tableau 10.1**). Pour traiter cette barrière, nous avons introduit un algorithme multicritère intégré AHP-Entropy pour déterminer le poids de chaque indicateur de performance, basé sur les étapes suivantes :

Algorithme AHP-Entropy

Calculer le poids de chaque dimension

Étape 1	Construire la matrice de comparaison par paires	
Étape 2	Normaliser la matrice de comparaison par paires $Mat_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}$	Eq (IV.1)
Étape 3	Obtenir le poids de chaque dimension $P_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}}}{n}$	Eq (IV.2)
Étape 4	Calculer Lambda Max (λ_{max}), $\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i}{n}$	Eq (IV.3)
Étape 5	Calculez l'indice de cohérence $CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1)$	Eq (IV.4)
Étape 6	Calculez le rapport de cohérence $CR = CI/RI$	Eq (IV.5)

Calculer le poids local de chaque indicateur

Étape 7	Transformer la cartographie de l'état actuel en matrice de décision	
Étape 8	Normaliser la matrice de décision. $ind_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$	Eq (IV.6)
Étape 9	Calculer la valeur entropy pour chaque indicateur $e_j = -k \sum_{j=1}^m x_{ij} \times \ln(x_{ij}), \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$	Eq (IV.7)
	$K = 1/(\ln m)$	Eq (IV.8)
Étape 10	Calcul du coefficient de variation $g_j = (1 - e_j), \quad j = 1, \dots, n$	Eq (IV.9)
Étape 11	Calcul le poids d'entropie pour chaque indicateur $W_j = \frac{g_j}{\sum_i g_j}$	Eq (IV.10)

Calculer le poids global de chaque indicateur

Étape 12	$W_{global_i} = P_i \times W_{ji}$	Eq (IV.11)
----------	------------------------------------	------------

Avec :

Mat_{ij} La matrice de comparaison par paire normalisée

y_{ij} c'est la valeur de comparaison par paire $i = 1, \dots, 3, j = 1, \dots, 3, i \neq j$

λ_{max} C'est la valeur propre maximal de la matrice de décision normalisée

CIL l'indice de cohérence

RI Le rapport de cohérence

n C'est le nombre des dimensions

P_i Le poids de dimension i avec $i=1 \dots 3$

x_{ij} la valeur normalisée de l'indicateur j dans l'opération $i i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$

e_j La valeur d'entropie de l'indicateur j

g_j Le coefficient de variation de l'indicateur j

W_{ji} La valeur d'entropie ou le poids locale de l'indicateur j liée au dimension i

IV.3.3 Phase d'analyse

Cette phase donne plus d'informations sur la durabilité du processus de fabrication et permet de déterminer les causes profondes qui limitent le progrès de l'entreprise vers la durabilité.

Dans l'approche utilisée, la phase d'analyse vise à appliquer le diagramme d'Ishikawa qui a pour but de classer les causes selon les cinq catégories et déterminer celles qui influencent sur la durabilité de la production.

Ensuite, nous avons effectué une analyse de sensibilité pour évaluer les poids générés par l'algorithme AHP-Entropy

IV.3.4 Phase d'amélioration et de contrôle

Pour compléter les étapes précédentes, cette phase vise à développer une méthodologie d'amélioration et de contrôle. Pour ce faire, nous avons proposé un processus qui se compose de deux parties essentielles comme suit (figure IV.4) :

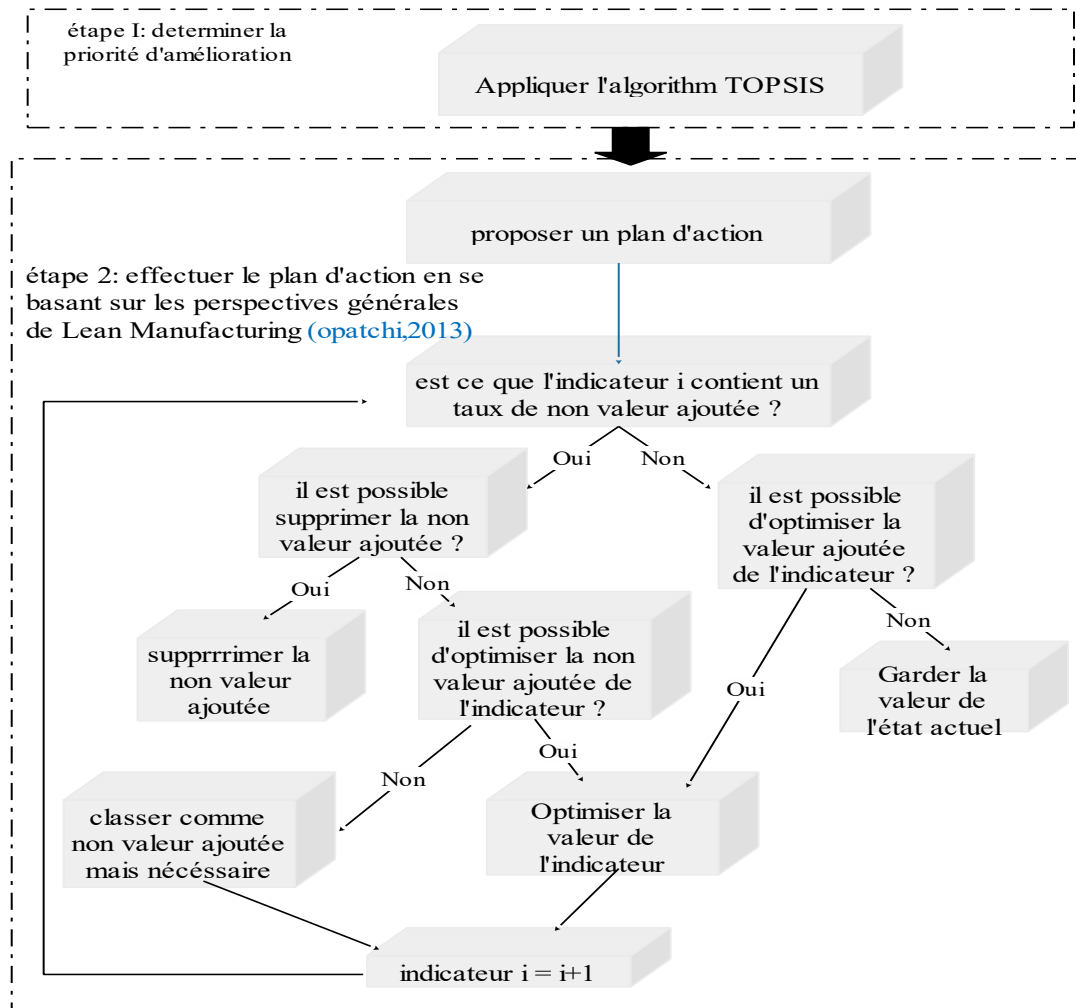


Figure IV.4 : Processus d'amélioration et de contrôle

IV.3.4.1 Application de l'algorithme TOPSIS

Les chaînes de production qui sont caractérisées par plusieurs opérations, une diversité d'indicateurs de performance et de poids produit une certaine complexité dans les processus d'amélioration pour déterminer quelle est l'opération la plus influente sur la durabilité de la production qui nécessite la priorité d'amélioration (**barrière 3 Tableau I.10**).

Pour surmonter cette barrière, la première étape de la phase d'amélioration vise à proposer une planification pour organiser le processus d'amélioration en classant les opérations de la chaîne de production selon leurs influences sur la durabilité de la production et déterminer la priorité d'amélioration. Pour ce faire, nous avons utilisé l'algorithme AHP-Entropy-TOPSIS en suivant les étapes suivantes :

Algorithme TOPSIS pour classer les opération selon la priorité d'amélioration	
Étape 1	Construire la matrice de décision normalisée $n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i^m x_{ij}^2}}, j=1,2,3,\dots,n; i=1,2,3,\dots,m \quad \text{Eq (IV.12)}$
Étape 2	Calculer la matrice normalisée pondérée : $V_{ij} = n_{ij} \times w_{global_j}, j=1,2,3,\dots,n; i=1,2,3,\dots,m \quad \text{Eq (IV.13)}$ Les poids utilisés dans cette phase (w_j) sont les poids générés par l'algorithme AHP-Entropy
Étape 3	Calculer les solutions idéales positives (A_i^+) et négatives (A_i^-) $A_i^+ = \{(\max V_{ij} j \in J), (\min V_{ij} j \in J') i = 1,2,3, \dots, m\} \quad \text{Eq (IV.14)}$ $\{V_1^+, V_2^+, V_3^+, \dots, V_n^+\}$ $A_i^- = \{(\min V_{ij} j \in J), (\max V_{ij} j \in J') j = 1,2,3, \dots, n\} \quad \text{Eq (IV.15)}$ $\{V_1^-, V_2^-, V_3^-, \dots, V_n^-\}$
Étape 4	Calculer les mesures de séparation de chaque opération à partir de la solution idéale positive et de la solution idéale négative $S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i = 1,2,3, \dots, m; \quad j = 1,2,3, \dots, n \quad \text{Eq (IV.16)}$ $S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i = 1,2,3, \dots, m; \quad j = 1,2,3, \dots, n \quad \text{Eq (IV.17)}$
Étape 5	Calculer la proximité relative à la solution idéale $C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \quad \text{Eq(IV.18)}$
Étape 6	Classement des résultats de C_i dans l'ordre décroissant.

Avec :

n_{ij} C'est la matrice de décision de n opérations et m indicateurs

x_{ij} C'est la valeur de l'indicateur j dans l'opération i

V_{ij} La matrice de décision normalisé de n opérations et m indicateurs

w_j Présente le poids global de l'indicateur j qui a été généré par l'algorithme AHP-TOPSIS

A_i^+ La solution idéale positive de l'opération i

A_i^- La solution idéale négative de l'opération i

S_i^+ Mesure de séparation de l'opération i à partir de la solution idéale positive

S_i^- Mesure de séparation de l'opération i à partir de la solution idéale négative

C_i La proximité relative à la solution idéale de l'opération i

IV.3.4.2 Plan d'action

Suite à l'organisation du processus de fabrication, le but de cette partie est d'atteindre un niveau optimal d'indicateurs de durabilité. Pour ce faire, nous avons proposé un ensemble des solutions potentielles sous forme d'un plan d'action qui contient des outils Lean Six Sigma les plus aprioris à la situation actuel de la chaîne de production et en identifiant l'avantage économique, environnementale et sociale pour chaque outil dans l'amélioration afin de surmonter **les barrières 2 et 5 (Tableau I.10)**.

IV..4 Application de l'approche proposée

L'approche proposée dans ce chapitre a été appliqué dans une autre PME algérienne nommée 'Aurès Solaire', cette entreprise est spécialisée dans la fabrication des panneaux solaires. Géographiquement, elle est située dans la zone d'activités Ain-yagout Batna, comme nous l'indique la figure IV.5



Figure IV.5 : L'emplacement géographique de l'entreprise

a) Processus de fabrication

L'entreprise Aurès Solaire produit à moyen terme 30 MW par an de panneaux solaires photovoltaïques en utilisant une technologie française innovante avec une nouvelle technique d'encapsulation des cellules photovoltaïques. Cette technologie est définie par l'abréviation NICE (New Industrial Cells Encapsulation). Le processus de fabrication des panneaux solaires permet de réaliser des modules bi-verres de 60 cellules en multi, mono cristallin ou PERC, d'une puissance crête allant de 260 à 300 Wc. La ligne de fabrication

se compose de 8 opérations principales comme indique la figure IV.6 :

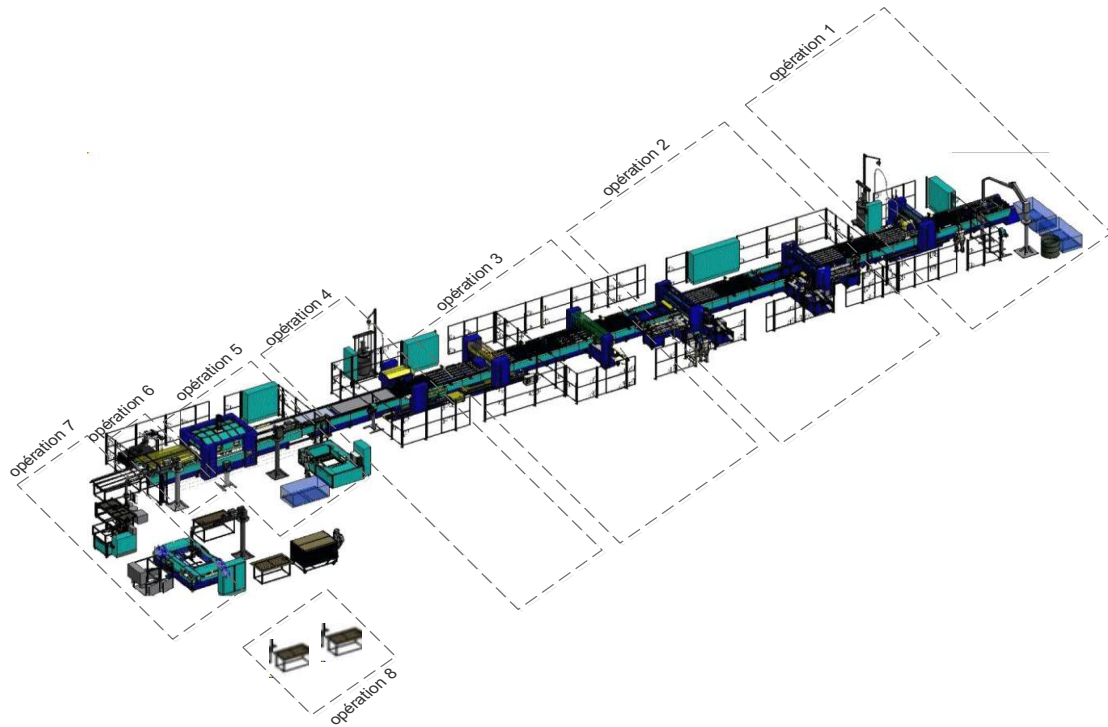


Figure IV.6 : Processus de fabrication.

Opération 1 : cette opération a pour but de mettre 30 lignes du mastic PIB pour assurer le coulage du cuivre et des cellules dans les opérations suivantes

Opération 2 : commence par deux sous opérations ou deux machines concrètement identiques, la première assure le placement des lignes paires du cuivre et des cellules, et la deuxième place les lignes impaires. Ensuite, une autre machine a pour but d'assembler les bus-bar au niveau de haut et de bas du panneau solaire pour lier les fils de cuivre placées dans l'opération précédente et assurer la transmission des électrons générés hors la conversion des rayons solaires.

Opération 3 : cette opération commence par le nettoyage des marges du verre face arrière. Ensuite un mastic PIB est placé sur les marges nettoyées dans l'étape précédente suivie par l'assemblage des contacts de cuivre qui sera lié avec la boîte de jonction.

Opération 4 : cette opération présente un contrôle visuel. Elle a pour but de détecter s'il existe des fissures au niveau des cellules, un décalage des fils des bus-bars et des cuivres. Après le contrôle, les fils de bus-bar et de cuivre sont soudés manuellement l'un avec l'autre.

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

Opération 5 : l'objectif de cette opération est d'encapsuler le panneau en assemblant le verre face avant. Pour ce faire, le verre face avant est placé avec un bras manipulateur sur le verre face arrière. Ensuite, le panneau est introduit dans une presse pour encapsuler le panneau.

Opération 6 : cette opération présente un autre contrôle de qualité, qui vise à vérifier l'occurrence des fissures après l'encapsulation du panneau.

Opération 7 : cette opération assure l'assemblage de la boîte de jonction, elle se commence par le placement des contacts de cuivre, ces derniers sont directement liés avec les contacts placés dans l'opération 3. Ensuite, le panneau passe par un test de flash pour vérifier les caractéristiques électriques

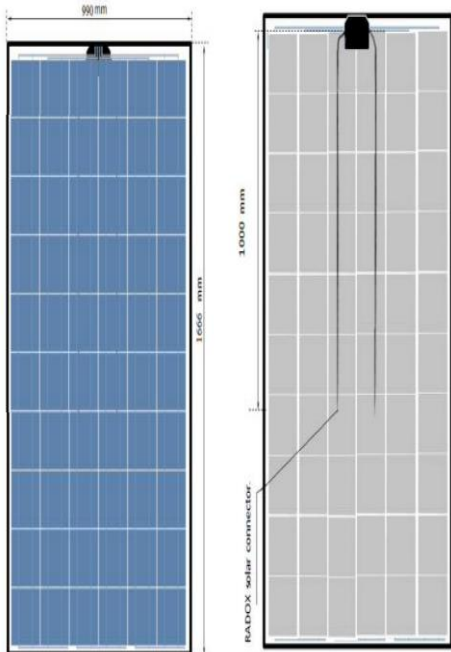
Opération 8 : la dernière étape dans ce processus de fabrication consiste à monter un cadre d'aluminium sur les côtés du panneau solaire pour assurer leur protection.

b) Description du produit

Le module photovoltaïque est caractérisé par un ensemble des spécifications mécaniques, comme suit :

➤ Spécifications mécanique

Tableau IV.1 : Les caractéristiques mécaniques du panneau solaire

Dimensions (L x l x E)	Non cadré : 1666 mm x 990 mm x 7 mm (1666 mm x 990 mm x 18 mm avec boîte de jonction) Non cadré avec renforts : 1666 mm x 990 mm x 27 mm Cadré : 1670 mm x 994 mm x 40 mm	
Poids	25 Kg (non cadré) 28 Kg (cadré)	
Verre avant	3,2 mm trempé extra blanc (EN12150) avec antireflets	
Verre arrière	3,2 mm trempé extra blanc (EN 12150)	
Cellules PV	6 x 10 cellules solaires (156x156) Polycristallines, monocristaline, PERC	
Boîte de jonction et Connecteurs	Boîte de jonctions : PV-XT1206 / IP 67 – 3 diodes Bypass Connecteurs : MC4 IP67/IP68	
Câbles	4 mm ² câble solaire, (+) 1000mm, (-) 1000mm	

➤ Spécifications électriques

Les spécifications électriques du panneau dans les conditions standard (STC : 1000 W/m², 25°C, AM 1.5) sont définis dans le tableau V.2

Tableau VI.2 : Les caractéristiques électriques du panneau solaire

Caractéristiques	Unité de mesure	Valeur
PUISSANCE NOMINALE (+/- 3.0 %)	[Wc]	260
Puissance Moyenne	[W]	260
Courant de court-circuit	[A]	8,6
Tension à vide	[V]	38
Courant à Pmpp	[A]	8,1
Tension à Pmpp	[V]	31

VI.4.1 La phase définir

La phase définir comprend deux activités principales : définir la charte du projet et effectuer une analyse SIPOC (fournisseur, entrée, processus, sortie, client).

IV.4.1.1 Charte de projet

La charte de projet comprend une brève description du projet ainsi que les objectifs visés. Il devrait également inclure des jalons et définir les responsabilités et les rôles des membres de l'équipe.

a- Informations générales sur le projet

Cette partie décrit les informations de base du projet tel que : le nom du projet, les personnes chargées au quotidien du suivi du déroulement et de l'avancement du projet. Le choix des personnes est effectué à base des compétences, formations et l'expertise dans ce type d'industrie.

b- Définir les objectifs, les mesures et les méthodes utilisées.

Le but de cette partie est de définir les objectifs de projet et les méthodes utilisées. L'objectif principal de ce chapitre est de proposer un cadre méthodologique pour obtenir une performance équilibrée liée aux indicateurs de performance économiques, environnementaux et sociaux d'une chaîne de production qui fabrique des panneaux solaires.

c- Définir la portée et le calendrier du projet

Cette partie de la charte du projet explique brièvement le déroulement des grandes phases de projet. Dans cette étude, une extension de l'approche Lean Six Sigma basée sur le cycle d'amélioration DMAIC a été proposée pour atteindre nos objectifs.

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

La structure générale du projet d'amélioration et les autres détails de la charte du projet sont illustrés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Charte du projet

Informations générales sur le projet		
Nom du projet	Amélioration de la durabilité de la production.	
Participants du Project	Directeur de l’entreprise, le chef de la production, le responsable informatique, les ingénieurs de la chaine de production.	
les objectifs, les mesures et les méthodes utilisées		
Objectif du Project	Dans cette étude, nous élaborons un projet d'amélioration à travers une implantation d’une nouvelle extension de l'approche Lean Six Sigma en se basant sur le cycle d'amélioration DMAIC qui contient des méthodes et des outils d'optimisation des chaines de production. Les principaux objectifs de ce projet sont présentés comme suit : - Concevoir et développer une approche systématique qui contient un ensemble complet des méthodes pour améliorer les performances économiques, environnementales et sociales. - Déterminer les mesures associées à chaque axe de développement durable afin d’effectuer une évaluation globale de la durabilité de la production. - Développer une méthodologie pour améliorer les indicateurs de performance.	
Cas d’étude	l'approche proposée est validée dans une PME algérienne qui fabrique des panneaux solaires (Aurès Solaire) Ain Yagout-batna.	
Méthodes utilisées	Méthodes.	Diagramme d’Ishikawa, niveau sigma, DPMO, SIPOC, charte de projet, cartographie de la chaine de valeur.
	Aide méthodologique.	AHP, Entropy, TOPSIS, DEMATEL, (Annex IV)
Les étapes du projet		
Définir	Dans cette étape nous définissons les grands axes du projet en identifiant les objectifs, les participants et les indicateurs de performance en matière de durabilité.	
Mesurer	Mise en œuvre des méthodologies pour mesurer les indicateurs définis dans la première étape.	
Analyser	Identifier les causes approfondies qui influent négativement sur la durabilité de la production.	
Améliorer et contrôler	Sur la base des problèmes identifiés dans la phase précédente, cette étape vise à proposer un ensemble de solutions qui permet d’améliorer et de contrôler les performances économiques, environnementales et sociales de la production.	

IV.4.1.2 Diagramme SIPOC

La deuxième étape de la phase définir consiste à identifier les fournisseurs, les entrants, le processus et les sortants du processus de fabrication à travers une analyse via le diagramme SIPOC. L'analyse SIPOC décrit l'ensemble du processus au niveau macro, il

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

montre comment les intrants sont traités et transformés en sortie finale ainsi, il nous permet d'identifier les indicateurs de performance du processus de fabrication. La méthode SIPOC aide à comprendre l'ensemble du processus et à rendre l'amélioration possible.

Le diagramme SIPOC du processus de fabrication étudiée est décrit dans la figure IV.7 :

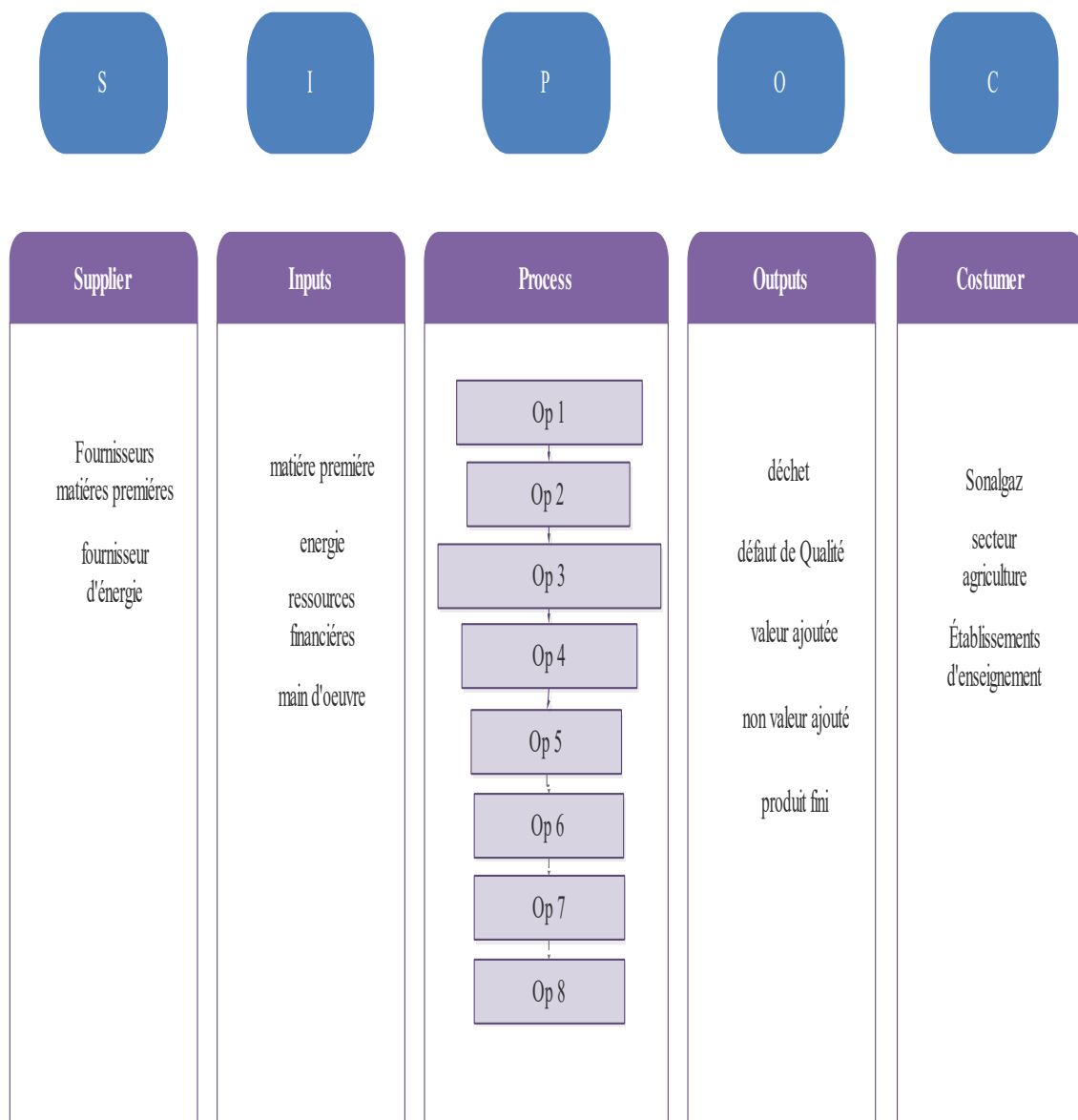


Figure IV.7 : Diagramme SIPOC

Grâce au diagramme SIPOC (figure IV.7), l'observation empirique et l'aide des responsables sélectionnés, nous pourrions clarifier notre vision en ce qui concerne le processus de fabrication, ainsi qu'on a pu déterminé l'ensemble d'indicateurs qui ont une grande influence sur la durabilité de la production. Les indicateurs, qui devraient être pris en compte dans cette étude, sont définis dans le Tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Description d'indicateurs les plus influents sur la durabilité de la production

	Indicateurs	Description
Indicateurs environnementaux	Matière première	C'est l'indicateur de base, utilisé pour créer n'importe quel produit. Dans ce système de production, la fabrication du panneau repose sur l'assemblage d'un ensemble des composants, tel que ; verres, cellules photovoltaïques, cuivre, boîte de jonction, cadre aluminium...
	Consommation d'électricité	Pour l'assemblage, il est nécessaire d'utiliser des ressources énergétiques ; cependant, dans cette chaîne de production, la consommation d'électricité est la source d'énergie principale utilisée dans chaque opération.
Indicateurs économiques	Coût de production	C'est une valeur financière fournie tout au long de la création de la chaîne de valeur.
	Temps de cycle	C'est le temps qui s'écoule entre la production de deux pièces par un processus.
	Défaut de qualité	C'est un indicateur très important pour évaluer la durabilité économique et la compétitivité de l'entreprise.
Indicateurs sociaux	Force de travail	C'est un indicateur qui nous permet d'évaluer la charge de travail et les conditions ergonomiques dans les différentes opérations de la chaîne de production.

IV.4.2 La phase de mesure

Au niveau de cette phase, nous avons suivi la méthodologie présentée précédemment (figure IV.2), comme suit :

IV.4.2.1 Mesure d'indicateurs environnementaux

a- Consommation de matière première

Le processus de fabrication étudié est caractérisé par une diversité des consommations des matières premières telles que des verres, cellules, cuivre, cadre aluminium mastique PIB (Poly-Iso-Butène) ...

Les différentes quantités des matières premières consommées sont obtenues depuis la fiche technique du produit en respectant la méthodologie de mesure présentée dans la figure VI.3

a- La consommation d'électricité

Dans cette chaîne de production, l'électricité est la principale source d'énergie. Elle est utilisée avec des quantités différentes pour fabriquer le panneau solaire. La consommation

d'électricité est calculée sur la base des puissances des machines qui ont été obtenues par une fiche technique de chaque opération

IV.4.2.2 Mesure d'indicateurs économiques

a- Coût de cycle de la production

Selon (Utne 2009) il n'existe pas une démarche standard ou universelle utilisée pour le développement des modèles pour estimer les coûts de production. Dans cette étape de mesure, nous proposons un simple modèle pour estimer les coûts les plus influents sur la durabilité économique du processus de fabrication.

L'utilisation d'un modèle pour estimer les coûts de production est le premier principe du Lean Manufacturing (identifier la valeur dans chaque opération). En exploitant les valeurs disponibles communiquées par les deux services de l'entreprise (service de production et service de comptabilité), Le modèle d'estimation est exprimé par l'équation suivante :

$$CP_i = \sum_{i=1}^n C_{MP_i} + C_{t_i} + C_{en_i} \quad \text{Eq (IV.19)}$$

Avec :

CP Coût de production

C_{MP} Coût de la matière première

C_T Coût de travail

C_{En} Coût d'énergie.

i l'étape dans le processus de fabrication

Ce modèle a été appliqué dans chaque étape du processus de fabrication. Les résultats obtenus sont utilisés dans la prochaine partie comme un facteur principal pour calculer le niveau de qualité et évaluer la compétitivité de l'entreprise.

b- Niveau de Qualité (niveau sigma)

Le niveau de qualité ou le degré de compétitivité d'une entreprise est l'un des facteurs les plus intéressants pour évaluer la durabilité économique de la production. Dans cette partie, nous avons mesuré le niveau de qualité de la chaîne de production en se basant sur le modèle DPMO pondéré et le niveau sigma.

Alors, en utilisant le modèle proposé, nous avons développé une nouvelle pondération basée sur le coût de production. Ce modèle de pondération est exprimé par l'équation IV.20, comme suit :

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

$$W_i = \frac{CP_i}{\sum_i^n CP_i} \quad \text{Eq (IV.20)}$$

Les valeurs de base utilisées pour valider notre modèle (nombre de défaut de qualité et le nombre opportunité dans chaque opération) sont obtenues auprès les services de qualité et de production pendant un stage de trois mois (juillet, aout, septembre) de l'année 2018, comme indique le tableau IV.5 :

Tableau IV.5 : les valeurs nécessaires pour évaluer le niveau de qualité

Opération	Production	Pièce non conforme	Nb. opp	DPO	CP (DZD)	Le poids $W_i = \frac{CP_i}{\sum_i^n CP_i}$
Op 1	625	19	1	0,0304	1574	0,1100
Op 2	606	29	2	0,0239	8223,5	0,5740
Op 3	577	14	2	0,0122	244,5	0,0171
Op 4	563	0	0	0,0000	131,08	0,0092
Op 5	563	17	3	0,0101	2134,39	0,1490
Op 6	546	0	0	0,0000	23.6	0,0016
Op 7	546	6	1	0,0110	496	0,0346
Op 8	540	0	0	0,0000	1500	0,1047

Nb : selon la politique de management de la qualité dans l'entreprise, il existe trois opportunités de défaut de qualité : défaut esthétique (DS), défaut de fissure (DF), défaut d'étanchéité (DE),

Selon le tableau IV.5 dans cette situation nous avons basé sur l'équation III.1 pour calculer le DPMO. Alors, le calcul du DPMO pondéré est comme suit :

$$DPMO_{Total} = \sum (W_i \times \frac{ND}{NP \times NO}) \times 10^6$$

$$DPMO_{Total} = (0,1100 \times 0,0304 + 0,5740 \times 0,0239 + 0,0171 \times 0,0122 + 0,0092 \times 0 + 0,1490 \times 0,0101 + 0,0016 \times 0 + 0,0346 \times 0,0110 + 0,1047 \times 0) \times 10^6.$$

$$DPMO_{Total} = 19160,33.$$

En se basant sur le tableau III.2, les résultats primaires montre que la valeur du DPMO pondéré est située dans l'intervalle de la classe moyenne (**230 < 19160.33 < 67000**). Pour trouver la valeur exacte du niveau sigma nous avons utilisé l'équation III.3, comme suite :

$$Niveau\ Sigma_{Total} = 1.5 + NORMSINV(1 - (19160,33/10^6)).$$

$$Niveau\ Sigma_{Total} = 1.5 + NORMSINV(0.980839).$$

$$Niveau\ Sigma_{Total} = 3.5714$$

À partir des résultats obtenus, le niveau sigma de la chaine de production est égal à **3,5714**. Ceci confirme que le niveau de qualité de l'entreprise appartient à la classe moyenne.

Remarque :

Malgré que le processus de fabrication est situé dans la classe moyenne, la valeur du niveau sigma obtenu est faible en raison de la concurrence importante effrayé par les autres entreprises locales (ENIE, ERIS, IRIS, Condor...) et étrangères. Donc, cette situation menace l'activité de l'entreprise.

IV.4.2.3 Mesure d'indicateurs sociaux

Dans cette phase de mesure, le seul indicateur social qui sera traité est la charge du travail physique.

a- La charge du travail physique

Malgré l'automatisation de la chaîne de production, l'exécution des différentes tâches exige une certaine force de travail pour des interventions successives aux machines sans oublier la mauvaise ergonomie du travail au niveau de chaque opération. Pour ces raisons, nous avons introduit et utilisés une méthode développée par **Hollmann et al (1999)** pour quantifier la force ou la charge de travail physique. Les résultats obtenus sont présentés dans la cartographie de l'état actuel.

IV.4.2.4 Construction de l'état actuel

Sans négliger les indicateurs conventionnels de la méthode VSM (temps de cycle, temps de changement d'outil...), l'extension de la méthode VSM proposée est préparée en intégrant les valeurs de mesure obtenues. La figure IV.8 montre la nouvelle VSM proposée, qui est constituée de huit opérations et quatre lignes d'évaluation principale. Chaque ligne inclut un type spécifique des valeurs comme suit :

1. La première ligne inclut les indicateurs conventionnels ou originaux de la méthode VSM ;
2. La deuxième ligne inclut les indicateurs environnementaux (consommation d'énergie et des matières premières) ;
3. La troisième ligne est une ligne d'évaluation économique qui comprend la consommation des coûts et les défauts de qualité par opportunité ;
4. La quatrième ligne comprend la valeur de l'indice de la charge du travail ;

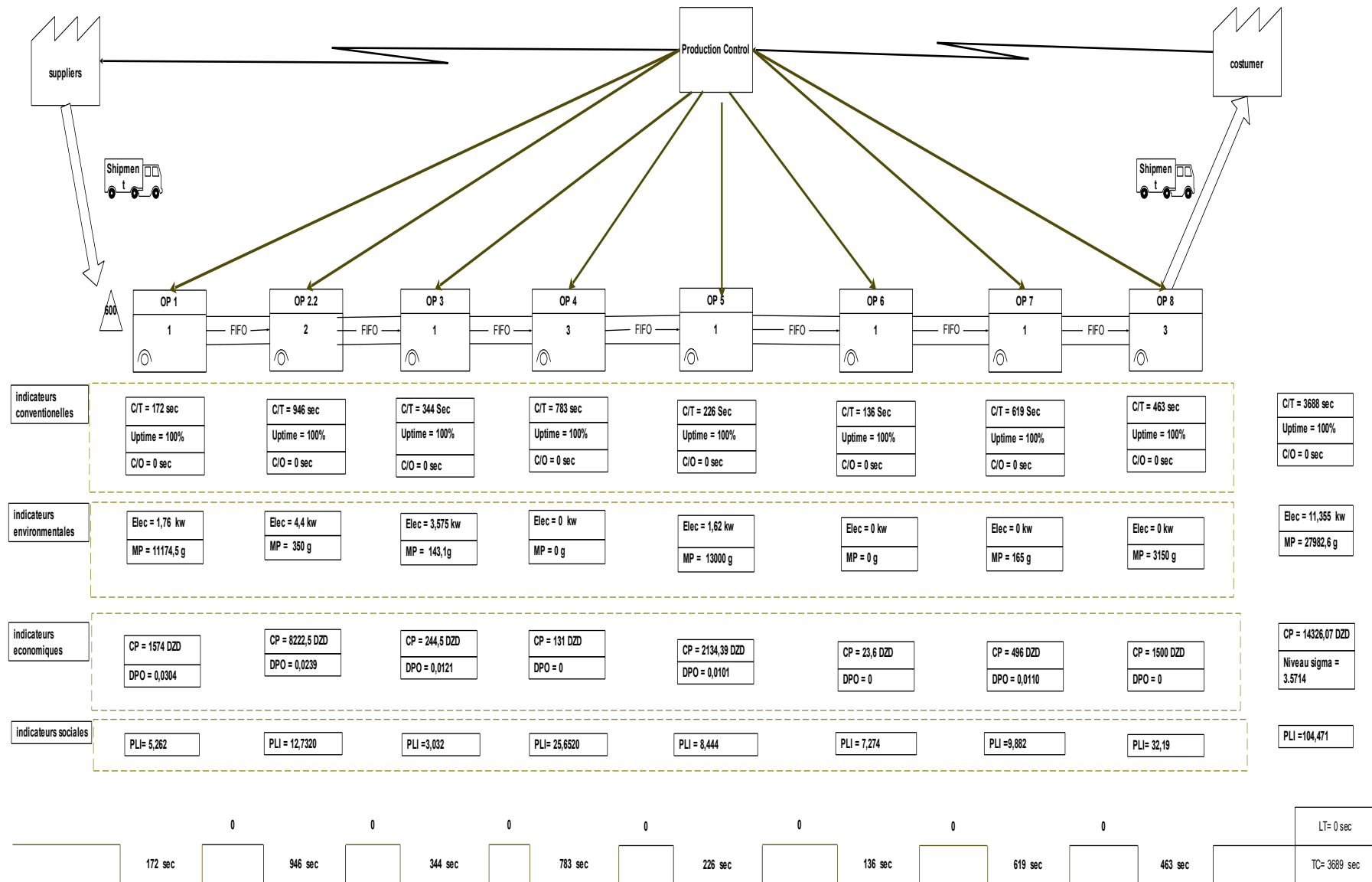


Figure IV.8 : Cartographie de l'état actuel

IV.4.2.5 Mesurer le degré d'importance de chaque indicateur

Le but de cette partie est de mesurer le poids de chaque indicateur de durabilité, pour ce faire, nous avons appliqué l'algorithme AHP-Entropy expliqué précédemment.

a) Application de la méthode AHP

Le poids de chaque dimension est obtenu à travers la méthodologie AHP en respectant la séquence d'étapes expliquées précédemment, en commençant par la matrice de comparaison par paires comme indiqué dans le tableau IV.6:

Tableau IV.6 : La matrice de comparaison par paires

	D. Économique	D. Environnementale	D. Sociale
D. Économique	1	2	4
D. Environnementale	1/2	1	3
D. Sociale	1/4	1/3	1
	1,75	3,333	8,0000

À partir de la matrice de comparaison, nous avons calculé la matrice normalisée en divisant chaque élément de la matrice de comparaison par la somme de sa colonne. Les poids finaux sont obtenus en calculant la moyenne des éléments de chaque ligne de la matrice normalisée comme indique le tableau IV. 7 :

Tableau IV.7 : Le poids de chaque dimension

	D. Économique	D. Environnementale	D. Sociale	Poids
D. Économique	0,5714	0,6000	0,5000	0,557
D. Environnementale	0,2857	0,3000	0,3750	0,320
D. Sociale	0,1428	0,1000	0,1250	0,123

Lambda max = 3,0234, Consistency index (CI) = 0.0117, Consistency ratio (CR) = 0.0201

b) Calculer le poids local de chaque indicateur

L'algorithme Entropy commence par la détermination de la matrice de décision. Cette dernière est définie par l'ensemble d'indicateurs de chaque opération. Dans ce cas, nous avons transformé la cartographie de l'état actuel en matrice de décision comme montre le tableau IV.8.

Tableau IV.8 : La matrice de décision.

Opérations	Ind.Env			Ind.Eco		Ind.Soc
	<i>MP</i> (g)	<i>Elec</i> (Kw)	<i>TC</i> (Sec)	<i>CP</i> (DZD)	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
Op 1	11174,5000	1,7600	172,0000	1574,0000	0,0304	5,2620
Op 2	350,0000	4,4000	946,0000	8223,5000	0,0239	12,7320
Op 3	143,1000	3,1250	344,0000	244,5000	0,0122	3,0320
Op 4	0,0000	0,0000	783,0000	131,0800	0,0000	25,6520
Op 5	13000,0000	1,6200	226,0000	2134,3900	0,0101	8,4440
Op 6	0,0000	0,0000	136,0000	23,6000	0,0000	7,2740
Op 7	165,0000	0,0000	619,0000	496,0000	0,0110	9,8820
Op 8	3150,0000	0,0000	463,0000	1500,0000	0,0000	32,1930

La deuxième étape consiste à normaliser la matrice de décision en utilisant l'équation (IV.6), la matrice de décision normalisée est présentée dans le tableau IV.9

Tableau IV.9 : La matrice de décision normalisée

Opérations	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
Op 1	0,3993	0,1614	0,0466	0,1099	0,3474	0,0504
Op 2	0,0125	0,4035	0,2564	0,5740	0,2734	0,1219
Op 3	0,0051	0,2866	0,0933	0,0171	0,1386	0,0290
Op 4	0,0000	0,0000	0,2123	0,0091	0,0000	0,2455
Op 5	0,4646	0,1486	0,0613	0,1490	0,1150	0,0808
Op 6	0,0000	0,0000	0,0369	0,0016	0,0000	0,0696
Op 7	0,0059	0,0000	0,1678	0,0346	0,1256	0,0946
Op 8	0,1126	0,0000	0,1255	0,1047	0,0000	0,3082

Le reste des étapes de l'algorithme Entropy tel que le calcul de la valeur Entropy, le calcul du coefficient de variation et le calcul du poids d'Entropy sont appliqués successivement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.10:

Tableau IV.10 : Résultats d'implémentation du l'algorithme Entropy

Opérations	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
Op 1	-0,3666	-0,2944	-0,1429	-0,2426	-0,3673	-0,1505
Op 2	-0,0548	-0,3662	-0,3490	-0,3187	-0,3545	-0,2565
Op 3	-0,0270	-0,3581	-0,2212	-0,0695	-0,2743	-0,1027
Op 4	0,0000	0,0000	-0,3290	-0,0429	0,0000	-0,3448
Op 5	-0,3562	-0,2833	-0,1711	-0,2837	-0,2491	-0,2033
Op 6	0,0000	0,0000	-0,1217	-0,0106	0,0000	-0,1855
Op 7	-0,0303	0,0000	-0,2995	-0,1164	-0,2604	-0,2231
Op 8	-0,2459	0,0000	-0,2605	-0,2363	0,0000	-0,3627
$\sum_i^n ind_{ij} \times \ln(ind_{ij})$	-1,0807	-1,3020	-1,8949	-1,3207	-1,5056	-1,8292
$e_i = -h \times \sum_i^n ind_{ij} \times \ln(ind_{ij})$	0,5197	0,6261	0,9112	0,6351	0,7240	0,8797
$1 - e_1$	0,4803	0,3739	0,0888	0,3649	0,2760	0,1203
$w_i = 1 - e_1 / \sum_i^n 1 - e_1$	0,2819	0,2194	0,0521	0,2141	0,1619	0,0706

c) Calculer le poids global de chaque indicateur

Le poids global de chaque indicateur est calculé en multipliant le poids local de chaque indicateur par le poids de dimension associée (équation IV.13). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.11 :

Tableau IV.11 : Le poids global de chaque indicateur

Dimension	Poids	Indicateurs	Poids local	Poids global
Environnementales	0,320	<i>MP</i>	0,2819	0,0901
		<i>Elec</i>	0,2194	0,0702
Économique	0,557	<i>TC</i>	0,0521	0,0290
		<i>CP</i>	0,2141	0,1192
		<i>DPO</i>	0,1619	0,0902
Sociale	0,123	<i>PLI</i>	0,0706	0,0086

Les résultats obtenus montrent que les coûts de production (*CP*) ont le poids le plus élevé avec une valeur (**0,1192**), suivi par le défaut par opportunité (*DPO*) (**0,0902**), la consommation des matières premières (*MP*) (**0,0901**), la consommation d'électricité (*Elec*) (**0,0702**), temps de cycle (**0,0290**), et indice de la charge de travail (*PLI*) (**0,0086**).

Les poids obtenus ont été utilisés comme des entrées dans l'algorithme TOPSIS pour classer les opérations en fonction de la priorité d'amélioration.

IV.4.3 La phase d'analyse

Dans cette étape, nous avons utilisé une analyse de cause à effet pour déterminer les causes profondes ayant affecté l'inefficacité d'indicateurs économiques, environnementaux et sociaux. Les causes de l'inefficacité d'indicateurs de durabilité ont été examinées par plusieurs séances de brainstorming avec l'équipe du projet et les ingénieurs de la chaîne de production, ensuite nous avons modélisé ces dernières en utilisant le diagramme d'Ishikawa.

IV.4.3.1 Diagramme d'Ishikawa

Les causes qui influent sur la durabilité de la production sont déterminés par les 5M : Machine, Méthode, Matériels, Main d'œuvre (personnel) et milieu (environnement). Ces causes sont illustrées dans la figure IV.9. La ligne horizontale est tracée en gras vers l'effet principal (non durabilité de la production). Les autres branches sont tirées de la ligne principale pour indiquer les principales catégories des causes.

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

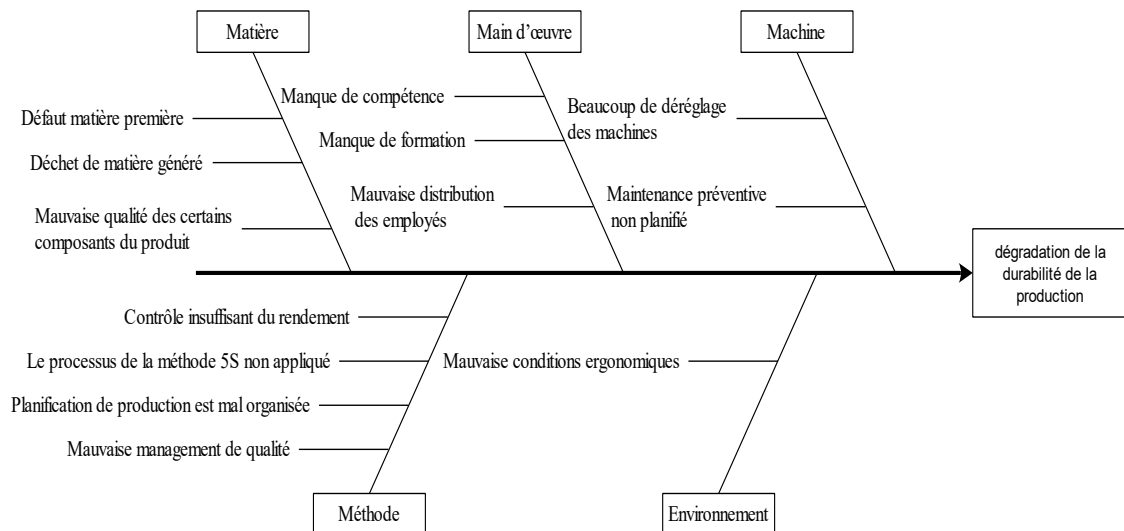


Figure IV.9 : Diagramme d'Ishikawa

IV.4.3.2 Analyse du processus de pondération

Dans cette phase, nous avons effectué une analyse de sensibilité pour étudier l'impact de changement des poids des dimensions sur le classement global d'indicateurs.

L'analyse de sensibilité est basée sur l'évaluation du changement proportionnel des poids des dimensions en fonction du variation de la dimension qui a le poids le plus élevé.

Dans notre cas, le dimension économique a le poids le plus élevé avec une valeur de 0,5570. Donc, le poids de dimension économique est varié à partir de 0,1 jusqu'à 0,9 avec une augmentation de 0,1. Les poids de toutes les autres dimensions sont modifiés proportionnellement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.12.

Tableau IV.12 : Poids des dimensions pendant l'analyse de sensibilité

Essai	D. économique	D. environnementale	D. social
normale	0,5570	0,3200	0,1230
E1	0,1000	0,6501	0,2499
E2	0,2000	0,5779	0,2221
E3	0,3000	0,5056	0,1944
E4	0,4000	0,4334	0,1666
E5	0,5000	0,3612	0,1388
E6	0,6000	0,2889	0,1111
E7	0,7000	0,2167	0,0833
E8	0,8000	0,1445	0,0555
E9	0,9000	0,0722	0,0278

En raison du changement du poids de chaque dimension, les poids et le classement d'indicateurs sont également changeant. Ces variations des poids sont présentées dans le tableau IV.13 et la figure IV.10.

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

Tableau IV.13 : Poids globaux d'indicateurs lors de l'analyse de sensibilité lorsque le poids de dimension économique varie de 0,1 à 0,9

ind	Normal	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
MP	0,0901	0,1833	0,1629	0,1425	0,1222	0,1018	0,0815	0,0611	0,0407	0,0204
Elec	0,0702	0,1426	0,1268	0,1109	0,0951	0,0792	0,0634	0,0475	0,0317	0,0158
TC	0,0290	0,0052	0,0104	0,0156	0,0208	0,0261	0,0313	0,0365	0,0417	0,0469
CP	0,1192	0,0214	0,0428	0,0642	0,0856	0,1071	0,1285	0,1499	0,1713	0,1927
DPO	0,0902	0,0162	0,0324	0,0486	0,0648	0,0810	0,0971	0,1133	0,1295	0,1457
PLI	0,0086	0,0176	0,0157	0,0137	0,0118	0,0098	0,0078	0,0059	0,0039	0,0020

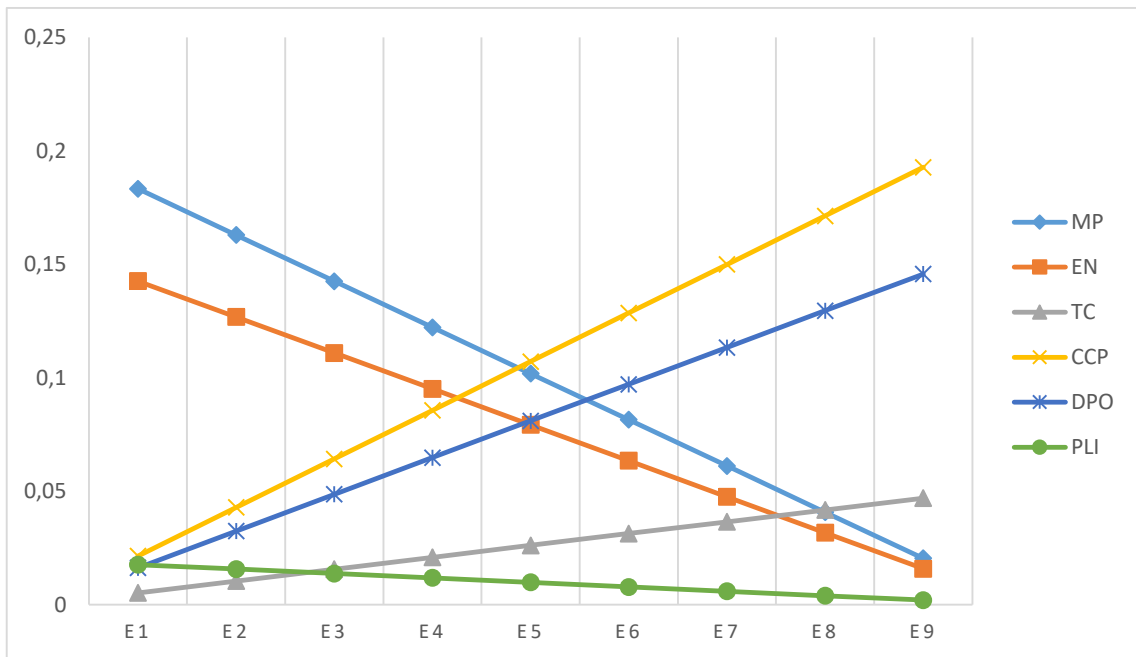


Figure IV.10 : Classement d'indicateurs lorsque la valeur de dimension économique varie de 0,1 à 0,9

Lorsque le poids de «dimension économique» est varié de 0,1 à 0,4, l'indicateur «**MP**» occupe le premier classement. Mais avec une variation de 0,5 jusqu'à 0,9, le classement de «**CP**» reste dans la première place.

De plus, nous avons également remarqué que l'indicateur «**PLI**» occupe la dernière place dans la plupart des tests et le classement des autres indicateurs sont variés avec le changement des poids des dimensions (tableau IV.14).

Tableau IV.14 : Classement d'indicateurs lorsque la valeur de dimension économique varie de 0,1 à 0,9

	Normal	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
MP	3	1	1	1	1	2	3	3	4	4
Elec	4	2	2	2	2	4	4	4	5	5
TC	5	6	6	5	5	5	5	5	3	3
CP	1	3	3	3	3	1	1	1	1	1
DPO	2	5	4	4	4	3	2	2	2	2
PLI	6	4	5	6	6	6	6	6	6	6

IV.4.4 La phase d'amélioration et du contrôle

À cause du nombre d'indicateurs traités et leurs poids ainsi que le nombre des machines, la phase d'amélioration dans notre approche est effectuée d'une manière différente par rapport à l'approche Lean Six Sigma conventionnelle. En effet, notre phase d'amélioration commence par un classement des opérations selon la priorité d'amélioration comme suit :

IV.4.4.1 Organisation du processus d'amélioration

Cette partie a pour but de surmonter l'une des barrières Lean Six Sigma associés à la priorité d'action dans les processus d'amélioration. Nous avons introduit l'algorithme TOPSIS pour réduire l'ambiguïté dans le processus d'amélioration ainsi qu'organiser leurs tâches d'amélioration afin d'atteindre les résultats prévus dans un temps minimal.

L'un des principes les plus importants des méthodes multicritères est de classer les critères. Ceux-ci seront étudiés en deux catégories : indicateurs bénéfiques et indicateurs non bénéfiques. Cette classification est effectuée en fonction des perspectives et des objectifs du projet.

Dans cette étude, la priorité d'amélioration est articulée sur six indicateurs qui sont présentés dans la cartographie de l'état actuel (figure IV.8). Les effets de ces indicateurs sont expliqués comme suit :

- Les valeurs plus élevées de *la matière première (RM)* et de *la consommation d'électricité (CE)* ont un impact environnemental dû aux émissions de gaz et aux déchets générés,
- La consommation élevée *des coûts de production (CP)* a plusieurs effets sur la capacité financière de l'entreprise,
- La valeur élevée du *DPO* a un impact négatif sur le niveau de qualité et la compétitivité de l'entreprise.
- La grande valeur de *PLI* touche l'aspect ergonomique et la santé des opérateurs.

Nous remarquons que les valeurs élevées de tous les indicateurs de durabilité participent à l'augmentation du degré de la priorité d'amélioration. Pour cette raison, tous les indicateurs sont classés comme d'indicateurs bénéfiques.

Chapitre IV : Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

Donc, à partir de la matrice de décision (tableau IV.8) et la classification définie, nous calculons la matrice normalisée en utilisant l'équation (IV.12). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau IV.15

Tableau IV.15 : La matrice de décision normalisée pour la méthode TOPSIS

Opérations	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
Op 1	0,6409	0,2981	0,1128	0,1791	0,7034	0,1144
Op 2	0,0201	0,7454	0,6207	0,9357	0,5537	0,2768
Op 3	0,0082	0,5294	0,2257	0,0278	0,2817	0,0659
Op 4	0,0000	0,0000	0,5137	0,0149	0,0000	0,5577
Op 5	0,7456	0,2744	0,1483	0,2429	0,2337	0,1836
Op 6	0,0000	0,0000	0,0892	0,0027	0,0000	0,1582
Op 7	0,0095	0,0000	0,4061	0,0564	0,2543	0,2149
Op 8	0,1807	0,0000	0,3038	0,1707	0,0000	0,7000

Chaque élément de la matrice de décision normalisée est multiplié par le poids associé qui est généré par l'algorithme AHP-Entropy. La matrice de décision normalisée pondérée obtenue est présentée dans le tableau IV.16:

Tableau IV.16 : pondération de la matrice normalisée.

Opérations	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
Op 1	0,0578	0,0209	0,0033	0,0214	0,0635	0,0010
Op 2	0,0018	0,0523	0,0180	0,1116	0,0499	0,0024
Op 3	0,0007	0,0372	0,0065	0,0033	0,0254	0,0006
Op 4	0,0000	0,0000	0,0149	0,0018	0,0000	0,0048
Op 5	0,0673	0,0193	0,0043	0,0290	0,0211	0,0016
Op 6	0,0000	0,0000	0,0026	0,0003	0,0000	0,0014
Op 7	0,0009	0,0000	0,0118	0,0067	0,0229	0,0019
Op 8	0,0163	0,0000	0,0088	0,0204	0,0000	0,0061

Dans cette situation, la solution idéale positive et la solution idéale négative sont calculées en utilisant les équations (IV.14) et (IV.15) respectivement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.17.

Tableau IV.17 : La solution idéale positive et la solution idéale négative.

	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
A^-	0,0000	0,0000	0,0026	0,0003	0,0000	0,0006
A^+	0,7456	0,7454	0,6207	0,9357	0,7038	0,7000

Les mesures de séparation de chaque indicateur à partir de la solution idéale positive et de la solution idéale négative ainsi que la proximité relative à la solution idéale sont calculées à l'aide des équations (IV.16), (IV.17) et (IV.18), respectivement, et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.18 :

Tableau IV.18 : Les résultats de S^- , S^+ et C_i

Opérations	S^-	S^+	C_i	Classement
Op 1	0,0908	1,7645	0,0490	2
Op 2	0,1336	1,7291	0,0717	1
Op 3	0,0453	1,8033	0,0245	4
Op 4	0,0131	1,8245	0,0071	7
Op 5	0,0785	1,7728	0,0424	3
Op 6	0,0008	1,8307	0,0004	8
Op 7	0,0256	1,8151	0,0139	6
Op 8	0,0271	1,8101	0,0148	5

Les résultats finaux soulignent que le processus d'amélioration doit être réalisé en respectant le classement présenté dans le tableau IV.18, c'est-à-dire l'opération (2) qui a la priorité d'amélioration suivi par les opérations (1), (5), (3), (8), (7), (4), (6) respectivement.

IV.4.4.2 Opportunités d'amélioration et du contrôle de la durabilité de la production

Nous terminons notre approche par la proposition d'un ensemble des opportunités pour améliorer et contrôler la durabilité de la production. Les opportunités proposées sont définies par un ensemble des outils Lean Six Sigma. Ces derniers sont sélectionnés en se basant sur la capacité d'amélioration et l'élimination des causes du gaspillage (tableau IV.19).

Méthodes	Bénéfice Environnemental	Bénéfice Economique	Bénéfice Social
5S	/	Augmenter le taux d'horaire de la production. Réduire le temps de non-valeur ajoutée.	Assurer et améliorer les conditions ergonomiques des opérateurs Éliminer les mouvements inutiles et réduire la valeur du PLI
Kanban	Réduire la consommation d'électricité Minimiser le gaspillage de matière première	Éliminer la surproduction Éliminer les stocks inutiles	Réduire les efforts personnels
TPM	/	Améliorer l'efficacité des machines	Améliorer l'expérience des opérateurs
MSP	Contrôler la consommation des matières premières et d'électricité	Contrôler la consommation des coûts Améliorer la qualité des produits Améliorer la compétitivité de l'entreprise	Satisfaire la qualité exigée par le client
Poka-Yoke	Réduire le gaspillage de matière première et la consommation d'énergie à cause des défauts de qualité	Diminuer les coûts des défauts de qualité Rendre le processus plus compétitif et augmenter son niveau sigma	Augmenter le niveau de qualité et assurer la satisfaction clientèle
Control visuel	Suivre et contrôler la consommation des ressources.	Surveiller la performance économique et augmenter la productivité	Améliorer les compétences des opérateurs Assurer la communication entre les employés

Tableau IV.19 : Plan d'action pour améliorer et contrôler la durabilité de la production

IV.5 Conclusion

Le travail présenté dans ce chapitre a prouvé l'importance de l'approche Lean Six Sigma dans le domaine de la production durable. Nous avons proposé une nouvelle approche intégrée, appelée Sus-DMAIC, qui vise à orienter et à adapter les avantages des approches Lean Manufacturing et Six Sigma pour améliorer la production du point de vue de la durabilité.

L'approche proposée (Sus-DMAIC) comprend cinq phases, chacune ayant sa propre procédure et ses propres outils, comme suit :

La première étape a mis en évidence l'utilisation de la charte de projet et l'outil SIPOC pour déterminer les grands axes du projet et extraire les indicateurs les plus influents sur la durabilité du processus de fabrication.

La deuxième étape consistait à mesurer la durabilité de la production du point de vue environnemental, économique et social, afin de développer une nouvelle extension de la méthode Value Stream Mapping. Ensuite, nous avons calculé le poids de chaque indicateur.

La troisième phase visait à étudier les causes des variations d'indicateurs de durabilité du processus de fabrication en utilisant le diagramme d'Ichikawa.

Dans la dernière phase, nous avons proposé un nouveau processus d'amélioration qui permet de surmonter l'une des barrières Lean Six Sigma liés à l'amélioration des processus caractérisés par un nombre élevé d'indicateurs de performance

Cette phase commence par l'application de l'algorithme TOPSIS pour organiser le processus d'amélioration et classer les opérations selon la priorité d'amélioration. Ensuite, nous avons proposé des opportunités d'amélioration pour motiver les responsables de l'entreprise à améliorer la durabilité de processus de fabrication.

Contributions et implications de l'approche

Les résultats obtenus soutiennent les dirigeants des entreprises à organiser l'amélioration dans des processus de fabrication complexes en calculant le poids de chaque indicateur et en classant les opérations selon leurs degrés d'influence et de priorité d'amélioration.

En matière de recherche, l'approche proposée a poussé les chercheurs du domaine d'améliorer et d'élargir le champ 'application de l'approche Lean Six Sigma. De plus

Chapitre IV :Développement d'une extension de l'approche Lean Six Sigma pour la durabilité des PME

l'approche proposé décrit quelques points liés à l'utilisation de l'ajustement et l'amélioration du cycle d'amélioration DMAIC proposé dans Tableau I.12.

Limites de l'approche

Malgré les implications de l'approche proposée, on trouve quelques limites résumées comme suit :

- La phase d'analyse est effectuée d'une manière conventionnelle et superficielle.
- Les opportunités d'amélioration sont proposées sans un engagement et une étude d'application
- Dans le cas où l'existence d'un engagement et une étude d'application, la mise en œuvre des outils Lean Six Sigma proposées sera effectué d'une manière aléatoire

En se basant sur les limites de cette approche, Nous remarquons la présence des lacunes et des ambiguïtés dans les processus d'application du cycle d'amélioration de l'approche proposée (SUS-DMAIC), sur tout dans les phases d'analyse et d'amélioration. Alors, nous allons proposer dans le chapitre suivant une autre méthodologie qualitative pour traiter ces limites et ces lacunes.

Chapitre V :

**amélioration du processus d'application des
extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les
PMEs par une approche qualitative**

V.1 Introduction

Ce chapitre propose une autre méthodologie intégrée qui cherche à améliorer le processus d'application des extensions des approches Lean Six Sigma développée dans la littérature (**Banawi and Bilec 2014 ; Vinodh et al, 2016 ; Cherrafi et al 2016b**).

L'approche proposée s'articule sur l'intégration de la méthode VSM, et les approches DEMATEL et QFD dans un environnement flou pour améliorer les phases d'analyse et d'amélioration de la méthode VSM. Dans ce chapitre, la méthode VSM est utilisée comme une méthode de référence pour la collecte des données et l'évaluation des processus de fabrication. La méthode DEMATEL floue est utilisée comme un outil supplémentaire pour une analyse approfondie de l'état actuel. La méthode QFD floue est introduite pour organiser le processus d'amélioration.

V.2 Problème traité et cadre méthodologique

Le domaine d'amélioration des processus de fabrication est étudié depuis des décennies en conséquence de la forte compétitivité provoquée par le nombre important des entreprises manufacturières. À cet effet, l'adoption des performances de durabilité est devenue le principal enjeu des entreprises manufacturières pour réserver une situation prestigieuse dans l'environnement concurrentiel. Dans cette situation, les dirigeants d'entreprises sont obligés d'améliorer continuellement leur processus de fabrication en développant et mettant en œuvre des différentes approches de développement.

L'approche Lean Manufacturing est une approche d'amélioration qui comprend des concepts de progression des processus de fabrication, de la productivité, du temps de cycle et de la durabilité (**Kaswan et Rathi 2020**). Cependant, avec l'accroissement des préoccupations écologiques, économiques et sociales, la mise en œuvre du Lean Six Sigma est devenue difficile. Cette complication pousse à développer des méthodologies pour améliorer l'approche Lean Six Sigma conventionnelle.

Ce chapitre propose une nouvelle approche intégrée qui vise à couvrir certaines limites de l'approche Lean Six Sigma conventionnelle dans le contexte de la production durable. Elle présente une approche qualitative qui vise à intégrer les approches DEMATEL floue et QFD floue dans le processus d'application de la méthode VSM.

V.3 L'approche proposée

L'objectif principal de cette étude concerne l'analyse et l'amélioration des performances de durabilité des processus de fabrication. Dans ce sens, nous avons proposé une approche qualitative intégrée qui se compose de trois phases.

Nous avons utilisé l'extension de la méthode VSM développée dans le chapitre précédent comme un outil de base dans cette approche. Dans la phase d'analyse, nous avons introduit l'approche DEMATEL floue pour effectuer une analyse détaillée de l'état actuel du processus de fabrication. Le choix de l'approche DEMATEL est justifié par leur capacité dans l'étude des relations de causalité entre les indicateurs ainsi que la classification d'indicateurs en groupes de cause ou d'effet.

Dans la phase d'amélioration, les degrés d'influence d'indicateurs qui ont été calculés dans l'approche précédente sont utilisés comme des entrées dans l'approche QFD pour planifier un processus d'amélioration cohérent et bien organisée en déterminant la priorité d'application des opportunités d'amélioration.

Pour une vision claire, on schématise l'approche proposée comme suit (Figure V.1) :

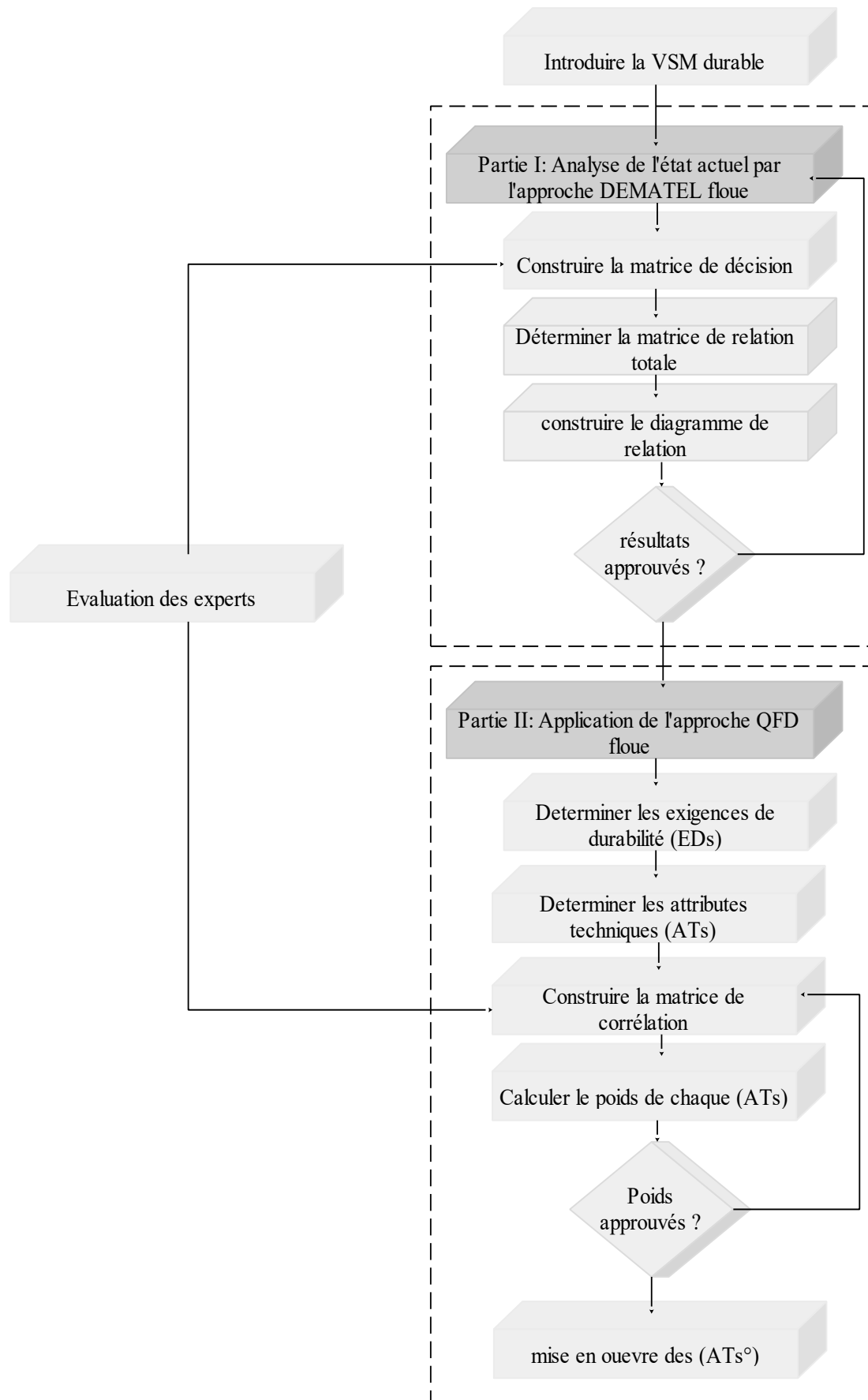


Figure V.1 : L'approche proposée

En se basant sur l'extension de la méthode VSM développée dans le chapitre précédent, nous avons proposé une méthodologie qualitative d'analyse et d'amélioration pour surmonter des limites de l'approche précédente (SUS-DMAIC). Les étapes de l'approche proposée sont expliquées comme suit :

V.3.1 Analyse de la VSM de l'état actuel en utilisant l'approche DEMATEL floue

D'abord, la méthode DEMATEL est une méthode de prise de décision multicritère qui a été développée par **Gabus and Fontela (1972)**. DEMATEL est une méthode algorithmique qualitative basée sur l'opinion et l'expertise humaine, elle est utilisée pour analyser les modèles conceptuels et évaluer les relations causales entre un ensemble de critères (**Quader et al., 2016**). De plus, DEMATEL cherche à déterminer les influences entre les critères en se basant sur deux facteurs : l'intensité de l'influence et la direction de l'influence.

Dans l'approche Lean Six Sigma conventionnelle, les problèmes de causalité dans la phase d'analyse sont généralement étudiés par la méthode 'diagramme de relation', qui traite malheureusement la causalité d'une manière superficielle par des liens sans aucune information qui montre les degrés d'influence (l'intensité et direction).

En effet, cette phase présente l'une des contributions principales de notre thèse. Elle vise à intégrer l'approche DEMATEL dans un environnement flou pour améliorer la phase d'analyse en étudiant et quantifiant les relations causales entre les indicateurs de durabilité. Pour ce faire, nous avons suivi les étapes suivantes :

a) Construction de la matrice de relation floue (A).

La matrice de relation est une représentation numérique qui montre la relation entre deux indicateurs (comparaison par paires) et évaluer l'influence d'un indicateur par rapport à un autre. Généralement, Le processus de prise de décision est basé sur les connaissances, l'expérience, les compétences et les attitudes des décideurs. Les données qualitatives utilisées ont été collectées à travers plusieurs entretiens effectués avec des cadres et des ingénieurs de l'entreprise. Ces derniers sont choisis selon les critères : expérience, compétences, formations et les connaissances du domaine de la gestion de la production. En outre, les évaluations des trois décideurs sont réalisées en utilisant des nombres flous triangulaires (TFN) (Tableau V.1) pour réduire l'ambiguïté dans le processus de jugement et d'évaluation.

Tableau V.1 : Les nombres flous triangulaires utilisés dans l'approche DEMATEL

Degré d'influence	Désignation	Nombre flou
Très haut	VH	(0.8, 0.9, 1)
Haut	H	(0.6, 0.7, 0.8)
Moyenne	M	(0.4, 0.5, 0.6)
Faible	L	(0.2, 0.3, 0.4)
Très faible	VL	(0, 0.1, 0.2)

a) Normalisation de la matrice de relation floue (B).

La normalisation de la matrice de relation floue (A) est effectuée en utilisant l'équation (V.1).

$$B = A \times \gamma \quad \text{Eq (V.1)}$$

Avec,

$$\gamma = \min \left[\frac{1}{\max_{1 \leq i < n} \sum_{j=1}^n |A_{ij}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq i < n} \sum_{i=1}^n |A_{ij}|} \right] \quad \text{Eq (V.2)}$$

b) Conception de la matrice de relation floue totale (T) :

La matrice de relation totale est obtenue en utilisant l'équation (V.3).

$$T = B \times (I - B)^{-1} \quad \text{Eq (V.3)}$$

I présente l'identité de la matrice.

Et

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & t_{nn} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (V.4)}$$

Et

$$\begin{aligned} \text{Matrice}[x'_{ij}] &= B_x(I - B_x)^{-1} \\ \text{Matrice}[y'_{ij}] &= B_y(I - B_y)^{-1} \\ \text{Matrice}[z'_{ij}] &= B_z(I - B_z)^{-1} \end{aligned} \quad \text{Eq(V.5)}$$

c) Calcul de la matrice de relation totale défuzzifiée.

Chaque élément de la matrice de relation totale (T) prend la forme d'un nombre flou triangulaire. Alors, la défuzzification est effectuée à l'aide de l'équation (V.6) (Vinodh and Chintha, 2011).

$$\text{Valeur nette} = \frac{a+2 \times b+c}{4} \quad \text{Eq (V.6)}$$

d) Construction de diagramme de causalité.

Pour construire le diagramme de causalité. Premièrement, nous avons calculé la somme de la colonne (C_i) et la somme de la ligne (R_i) en utilisant les expressions (V.7) et (V.8).

$$C_i = \sum_{j=1}^n [t_{ij}]_{n \times 1} \quad \text{Eq (V.7)}$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n [t_{ij}]_{1 \times n} \quad \text{Eq (V.8)}$$

Ensuite, nous avons calculé l'intensité de l'influence ($R_i + C_i$) et la direction de l'influence ($R_i - C_i$) pour quantifier l'influence entre les indicateurs et pour classer les indicateurs en groupe de cause ou d'effet. Si ($R_i - C_i$) est positif, l'indicateur i affecte les autres indicateurs. Si ($R_i - C_i$) est négatif, l'indicateur i est influencé par les autres indicateurs.

Le diagramme causal est construit sur un graphique de deux axes X et Y, l'axe horizontal (X) est appelé «l'intensité» et contient les valeurs de ($R_i + C_i$). L'axe vertical (Y) est nommé «direction» et inclut les valeurs de ($R_i - C_i$).

V.3.2 Application de la méthode QFD floue

Une fois les relations de causalité sont étudiées et les poids d'indicateurs sont déterminés, le but de cette partie est de proposer une méthodologie d'amélioration d'indicateurs de durabilité présentés dans la cartographie de l'état actuel. Pour ce faire, nous comptons sur l'approche QFD floue, selon les étapes suivantes :

a) Identification des exigences de durabilités (EDs).

Cette phase présente la première étape de l'application de la méthodologie d'amélioration. Les exigences de durabilité utilisées dans cette étape sont les indicateurs étudiés dans la phase précédente, où nous les utilisons comme « QUOI » dans la maison de la qualité (HOQ).

b) Identification les attributs techniques (ATs).

Dans cette approche, les attributs techniques sont définis par un ensemble des outils d'amélioration. Ces derniers sont généralement déterminés en fonction de leurs capacités d'amélioration d'indicateurs de durabilité.

c) Construction de la matrice de corrélation.

Cette étape vise à déterminer les scores de corrélation entre les exigences de durabilité et les attributs techniques. Pour atteindre ce but, nous référons aux avis des décideurs sélectionnés en utilisant les nombres flous triangulaires définis (tableau V.2).

Tableau V.2 : Les nombres flous triangulaires utilisés dans l'approche QFD

Degré Corrélation	Désignation	Nombre flou
C. très fort	VS	(0.8, 0.9, 1)
C. fort	S	(0.6, 0.7, 0.8)
C. Moyenne	M	(0.4, 0.5, 0.6)
C. Faible	L	(0.2, 0.3, 0.4)
C. très faible	VL	(0, 0.1, 0.2)
Aucune corrélation	Non	(0,0,0)

Les évaluations obtenues par les décideurs sont agrégées à l'aide de l'opérateur moyen, selon l'équation (V.11).

$$w_i = \frac{1}{n} \otimes (W_{i1} \oplus W_{i2} \oplus \dots \oplus W_{in}) \quad \text{Eq (V.11)}$$

Où :

W désigne le poids attribué par les décideurs.

n présente le nombre de décideurs.

d) Calcul de poids de chaque AT.

Le poids de chaque AT est calculé à l'aide de l'équation (V.12).

$$w_i = \frac{1}{K} \otimes (x_{i1} \otimes W_i) \oplus \dots \oplus (x_{in} \otimes W_n) \quad \text{Eq (V.12)}$$

Avec

k désigne le nombre des exigences.

x indique la valeur du score de corrélation des exigences avec les attributs techniques.

W présente le poids de l'exigence.

Les poids obtenus prennent la forme d'un nombre flou. La déffuzufucation est effectuée en utilisant l'équation (V.6).

V.4 Application de l'approche proposée

L'approche proposée dans ce chapitre est validée dans le même processus de fabrication étudié dans le chapitre précédent. En se basant sur les perspectives de cette étude, nous commençons par la présentation de notre extension de la méthode VSM développée dans le chapitre précédent comme montre la figure V.2.

Chapitre V : Amélioration du processus d'application des extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les PME par une approche qualitative

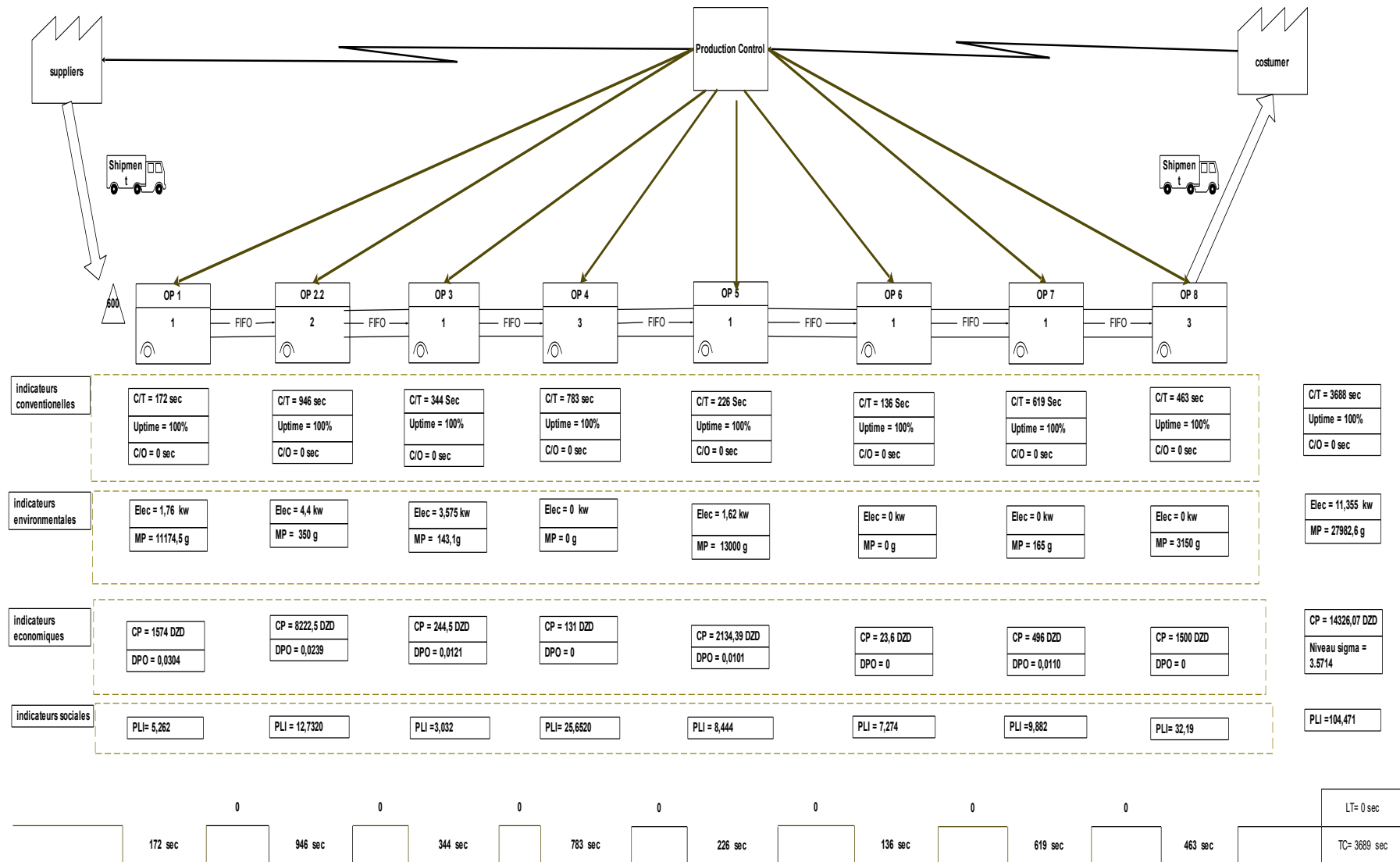


Figure V.2 : La cartographie de l'état actuel du processus de fabrication.

La mise en œuvre du nouveau processus application de la méthode VSM est expliquée dans les sous titres ci-dessous.

V.4.1 Analyse de la carte de l'état actuel à l'aide de DEMATEL floue

Dans l'approche précédente, la phase d'analyse est effectuée d'une manière superficielle en utilisant le diagramme d'Ishikawa. Dans cette étape, nous constatons, selon la cartographie de l'état actuel, la difficulté de réaliser une analyse globale et efficace avec une utilisation simultanée de tous les indicateurs de durabilité. Ceci est dû au nombre d'indicateurs et la différence de leurs degrés d'importance. Dans cette phase, nous avons présenté une analyse plus approfondie d'indicateurs de durabilité avec la prise en compte de la relation entre eux afin de surmonter **la barrière 1 (Tableau I.10)**. Ceci est fait en utilisant l'approche DEMATEL floue, en suivant les étapes suivantes :

a) Construction de la matrice de relation directe floue (A)

Pour construire la matrice de relation floue, un simple questionnaire préparé (Annexe IV) a été diffusé aux décideurs choisis. Chacun évalue qualitativement le degré d'influence de chaque indicateur sur les autres. Cela fait en utilisant les variables linguistiques définies dans le tableau V.1. Les résultats de l'évaluation et du jugement sont présentés dans l'Annexe IV.

Ensuite, les évaluations effectuées par les trois décideurs sont agrégées en utilisant l'opérateur moyen à l'aide de l'équation V.11. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : La matrice de relation directe floue (A)

Indicateurs	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
<i>MP</i>	(0,0000	(0,7333	(0,6667	(0,7333	(0,6667	(0,6667
	0,0000	0,8333	0,7667	0,8333	0,7667	0,7667
	0,0000)	0,9333	0,8667)	0,9333)	0,8667)	0,8667)
<i>Elec</i>	(0,0667	(0,0000	(0,1333	(0,5333	(0,2667	(0,2667
	0,1667	0,0000	0,2333	0,6333	0,3667	0,3667
	0,2667)	0,0000	0,3333)	0,7333)	0,4667)	0,4667)
<i>TC</i>	(0,0667	(0,6667	(0,0000	(0,4667	(0,1333	(0,5333
	0,1667	0,7667	0,0000	0,5667	0,2333	0,6333
	0,2667)	0,8667	0,0000)	0,6667)	0,3333)	0,7333)
<i>CP</i>	(0,1333	(0,2667	(0,4000	(0,0000	(0,2000	(0,2000
	0,2333	0,3667	0,5000	0,0000	0,3000	0,3000
	0,3333)	0,4667	0,6000)	0,0000)	0,4000)	0,4000)
<i>DPO</i>	(0,6667	(0,6667	(0,6000	(0,7333	(0,0000	(0,7333
	0,7667	0,7667	0,7000	0,8333	0,0000	0,8333
	0,8667)	0,8667	0,8000)	0,9333)	0,0000)	0,9333)
<i>PLI</i>	(0,0667	(0,4000	(0,6667	(0,1333	(0,2667	(0,0000
	0,1667	0,5000	0,7667	0,2333	0,3667	0,0000
	0,2667)	0,6000	0,8667)	0,3333)	0,4667)	0,0000)

b) Normalisation de la matrice de relation directe floue

La normalisation de la matrice de relation est effectuée en utilisant les équations (V.1) et (V.2), les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : La matrice de relation directe floue normalisée

indicateurs	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
<i>MP</i>	(0,0000)	(0,1642	(0,1493	(0,1642	(0,1493	(0,1493
	0,0000	0,2101	0,1933	0,2101	0,1933	0,1933
	0,0000	0,2692)	0,2500)	0,2692)	0,2500)	0,2500)
<i>Elec</i>	(0,0149	(0,0000	(0,0299	(0,1194	(0,0597	(0,0597
	0,0420	0,0000	0,0588	0,1597	0,0924	0,0924
	0,0769)	0,0000)	0,0962)	0,2115)	0,1346)	0,1346)
<i>TC</i>	(0,0149	(0,1493	(0,0000	(0,1045	(0,0299	(0,1194
	0,0420	0,1933	0,0000	0,1429	0,0588	0,1597
	0,0769)	0,2500)	0,0000)	0,1923)	0,0962)	0,2115)
<i>CP</i>	(0,0299	(0,0597	(0,0896	(0,0000	(0,0448	(0,0448
	0,0588	0,0924	0,1261	0,0000	0,0756	0,0756
	0,0962)	0,1346)	0,1731)	0,0000)	0,1154)	0,1154)
<i>DPO</i>	(0,1493	(0,1493	(0,1343	(0,1642	(0,0000	(0,1642
	0,1933	0,1933	0,1765	0,2101	0,0000	0,2101
	0,2500)	0,2500)	0,2308)	0,2692)	0,0000)	0,2692)
<i>PLI</i>	(0,0149	(0,0896	(0,1493	(0,0299	(0,0597	(0,0000
	0,0420	0,1261	0,1933	0,0588	0,0924	0,0000
	0,0769)	0,1731)	0,2500)	0,0962)	0,1346)	0,0000)

c) Construction de la matrice d'influence totale (T)

À partir de la matrice de relation normalisée, la matrice d'influence totale (T) est calculée à l'aide de l'équation (V.3). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : La matrice d'influence totale (T)

Indicateurs	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
<i>MP</i>	(0,0510 0,1648 0,8310)	(0,2806 0,5161 1,6763)	(0,2552 0,4766 1,5673)	(0,2744 0,5029 1,6271)	(0,2085 0,3821 1,2282)	(0,2506 0,4672 1,5334)
<i>Elec</i>	(0,0352 0,1191 0,5249)	(0,0475 0,1548 0,7891)	(0,0761 0,2031 0,8310)	(0,1553 0,2902 0,9414)	(0,0828 0,1843 0,6734)	(0,0974 0,2229 0,8378)
<i>TC</i>	(0,0355 0,1299 0,5932)	(0,1972 0,3562 1,1265)	(0,0579 0,1756 0,8621)	(0,1554 0,3077 1,0520)	(0,0652 0,1788 0,7368)	(0,1611 0,3066 1,0136)
<i>CP</i>	(0,0464 0,1301 0,5330)	(0,1071 0,2422 0,9058)	(0,1261 0,2549 0,8807)	(0,0475 0,1503 0,7592)	(0,0692 0,1690 0,6533)	(0,0866 0,2107 0,8204)
<i>DPO</i>	(0,1805 0,3250 1,0225)	(0,2663 0,4989 1,6472)	(0,2429 0,4618 1,5416)	(0,2716 0,4978 1,6108)	(0,0778 0,2178 1,0178)	(0,2610 0,4762 1,5326)
<i>PLI</i>	(0,0363 0,1268 0,5689)	(0,1465 0,2965 1,0291)	(0,1868 0,3305 1,0221)	(0,0887 0,2309 0,9371)	(0,0867 0,1963 0,7297)	(0,0547 0,1634 0,8015)

À ce stade, la défuzzification de chaque élément de la matrice de relation totale (T) est effectuée en utilisant l'équation (V.6). Nous présentons les résultats obtenus dans le tableau V.6.

Tableau V.6 : La matrice de relation totale défuzzifiée (T)

indicateurs	<i>MP</i>	<i>Elec</i>	<i>TC</i>	<i>CP</i>	<i>DPO</i>	<i>PLI</i>
<i>MP</i>	0,3029	0,7472	0,6939	0,7268	0,5502	0,6796
<i>Elec</i>	0,1996	0,2866	0,3283	0,4193	0,2812	0,3452
<i>TC</i>	0,2221	0,5090	0,3178	0,4557	0,2899	0,4470
<i>CP</i>	0,2099	0,3743	0,3792	0,2768	0,2651	0,3321
<i>DPO</i>	0,4633	0,7279	0,6771	0,7195	0,3828	0,6865
<i>PLI</i>	0,2147	0,4421	0,4675	0,3719	0,3023	0,2957

d) Construction de diagramme causal

Sur la base de la matrice d'influence totale défuzzifiée (T), nous calculons la somme des lignes (R) et la somme des colonnes (C) en appliquant les équations (V.7) et (V.8). Ensuite nous calculons l'intensité de l'influence ($R_i + C_i$) et la direction de l'influence ($R_i - C_i$). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau V.7.

Tableau V.7 : Les valeurs obtenues de R , C , $(R_i + C_i)$ et $(R_i - C_i)$

Indicateurs	R_i	C_i	$(R_i + C_i)$	$(R_i - C_i)$
MP	3,7008	1,6124	5,3132	2,0884
Elec	1,8602	3,0871	4,9473	-1,2269
TC	2,2415	2,8639	5,1054	-0,6223
CP	1,8374	2,9701	4,8075	-1,1327
DPO	3,6569	2,0715	5,7284	1,5854
PLI	2,0942	2,7861	4,8803	-0,6919

En exploitant les résultats de $(R + C)$ et $(R-C)$ ainsi que le principe de la méthode DEMATEL, nous pouvons déterminer les indicateurs de cause et les indicateurs d'effet, de plus on peut quantifier l'intensité d'influence de chaque indicateur.

Les résultats du $(R-C)$ montrent que la consommation de matières premières (MP), le défaut par opportunité (DPO) sont classés dans le groupe de cause et ont l'influence majeure sur les autres indicateurs (le temps de cycle (TC), consommation d'énergie (EC), coûts de production (CP) et indice de la charge physique (PLI)). Le groupe d'effet comprend quatre indicateurs qui sont : la consommation d'énergie (EC), le temps de cycle (TC), coûts de production (CP) et indice de la charge physique (PLI), ce qui signifie que ces indicateurs reçoivent l'influence majeure par les autres (la consommation de matières premières (MP), le défaut par opportunité (DPO)).

De plus, les résultats du $(R+C)$ montrent que le défaut par opportunité (DPO) qui a la grande intensité d'influence ($(R+C)$ de valeur **5,7284**), suivi par la consommation de matières premières (MP), temps de cycle (TC), consommation d'énergie (EC), indice de la charge physique (PLI) et les coûts de production (CP) avec les valeurs **5,3132**, **5,1054**, **4,9473**, **4,8803** et **4,8075** respectivement.

Les relations causales sont illustrées d'une façon claire dans la figure V.3.

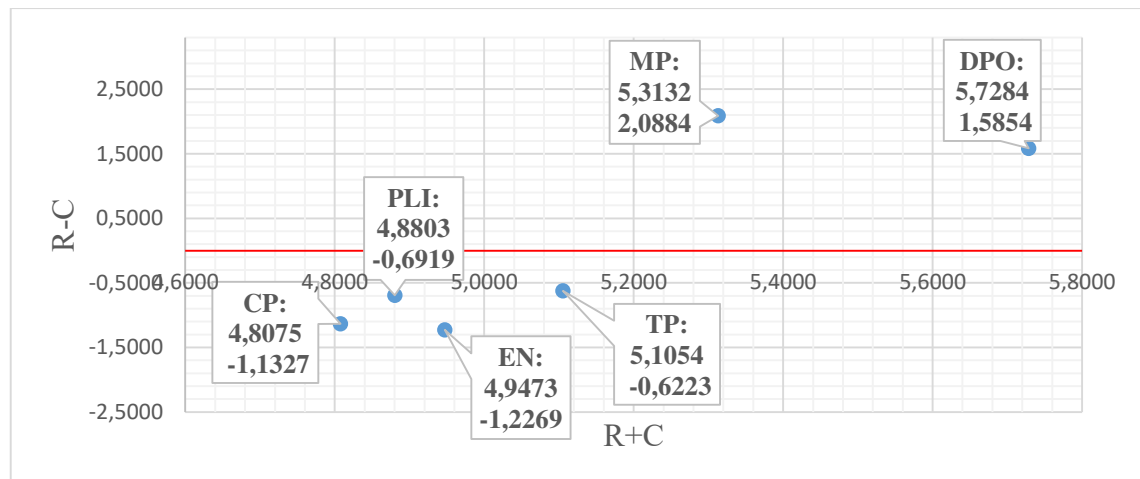


Figure V.3 : Diagramme des relations causales d'indicateurs

V.4.5 Application de l'approche QFD flou

Dans l'approche proposée au chapitre précédent, il est clair que la mise en œuvre des opportunités d'amélioration sera effectuée d'une manière aléatoire. Dans ce cas, les améliorations qui seront obtenues ne sont pas optimales et vont prendre du temps. Pour traiter ce problème et pour surmonter la **barrière 3 (tableau I.10)**, cette phase vise à optimiser le processus d'amélioration en utilisant l'approche QFD flou, selon les étapes suivantes :

a) Identification des exigences de durabilité (ED) « QUOI »

Dans cette étude, les indicateurs de durabilité définis dans l'état actuel sont utilisés comme « QUOI » dans la maison de qualité avec les poids relatifs déterminés par AHP-Entropy dans le chapitre précédent.

b) Identification des attributs techniques (COMMENT)

Les attributs techniques sont définis par l'ensemble des outils Lean Manufacturing, notamment Kanban, 5S, Total Productive Maintenance (TPM), Poka-Yoke, maîtrise statistique des procédés (MSP) et le Contrôle Visuel. Ces derniers sont les mêmes opportunités d'améliorations proposées dans l'approche précédente (Tableau IV.19).

c) Construction de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation est établie à base de l'expertise des trois décideurs sélectionnés en utilisant un autre questionnaire (Annexe V) et beaucoup d'orientation. Chaque décideur exprime son avis pour analyser la relation entre les exigences de durabilité- « QUOI » et les attributs techniques « COMMENT » en utilisant les variables linguistiques définies dans le Tableau V.1. Les scores de corrélation attribuée par les décideurs ont été agrégés à l'aide de l'opérateur moyen (équation V.11). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.4.

d) Calcul le poids de chaque attribut technique

Le degré d'importance ou bien le poids de chaque attribut technique est calculé en utilisant l'équation (V.12). Les résultats obtenus sont présentés dans la figure V.4.

e) Construction la maison de qualité

Dans les étapes précédentes, les exigences de durabilité et les attributs techniques ont été définis, ainsi le score de corrélation entre eux a été déterminé et les poids de chaque exigence et de chaque technique ont été calculés. Tous les résultats obtenus sont assemblés dans la maison de la qualité comme le montre la figure V.4.

		des attributs technique							
		poids	5S	Kanban	TPM	MSP	Poka-Yoke	controle visuel	Classement
Exigence de durabilité	MP	0,0901	(0.0000 0.0030 0.0060)	(0.0180 0.0271 0.0361)	(0.0000 0.0000 0.0000)	(0.0601 0.0691 0.0782)	(0.0661 0.0752 0.0842)	(0.0060 0.0150 0.0241)	3
	Elec	0,0702	(0.0187 0.0257 0.0328)	(0.0562 0.0632 0.0702)	(0.0328 0.0398 0.0468)	(0.0515 0.0585 0.0655)	(0.0328 0.0398 0.0468)	(0.0374 0.0445 0.0515)	4
	TC	0,0290	(0.0155 0.0184 0.0213)	(0.0232 0.0261 0.0290)	(0.0097 0.0126 0.0155)	(0.0000 0.0019 0.0039)	(0.0019 0.0048 0.0077)	(0.0116 0.0145 0.0174)	5
	CP	0,1192	(0.0000 0.0080 0.0159)	(0.0795 0.914 0.1034)	(0.0477 0.0596 0.0716)	(0.0795 0.0914 0.1034)	(0.0557 0.0676 0.0795)	(0.0318 0.0437 0.0557)	1
	DPO	0,0902	(0.0301 0.0391 0.0481)	(0.0241 0.0331 0.0421)	(0.0301 0.0391 0.0481)	(0.0722 0.0812 0.0902)	(0.0722 0.0812 0.0902)	(0.0601 0.0692 0.0782)	2
	PLI	0,0086	(0.0069 0.0078 0.0087)	(0.0041 0.0049 0.0058)	(0.0012 0.0020 0.0029)	(0.0000 0.0000 0.0000)	(0.0006 0.0014 0.0023)	(0.0046 0.0055 0.0064)	6
		Poids floue	(0.0119, 0.0170 0.0221)	(0.0342 0.0410 0.0478)	(0.0202 0.0255 0.0308)	(0.0439 0.0504 0.0569)	(0.0382, 0.0450 0.0518)	(0.0253, 0.0321 0.0389)	
		Poids déff	0.0170	0.0410	0.0255	0.0491	0.0450	0.0321	
		Poids normalisé	0.0811	0.1955	0.1216	0.2324	0.2146	0.1531	
		classm	6	3	5	1	2	4	

Figure V.4 : La maison de qualité de la phase d'amélioration

Par exploitation de la maison de qualité, on peut construire l'état futur et obtenir des résultats acceptables concernant les indicateurs de durabilité. Les attributs techniques doivent être appliqués en fonction du poids de chacun, ceci précise que la « MSP » est l'outil qui détient la priorité d'application avec un poids de **0,0491** ($P_{norm} : 0,2324$), suivi par « Poka-Yoke », « Kanban », « Contrôle visuel », « TPM » et « 5S », avec des valeurs de poids de **0,0450** ($P_{norm} : 0,2146$), **0,0410** ($P_{norm} : 0,1955$), **0,0321** ($P_{norm} : 0,1531$), **0,0225** ($P_{norm} : 0,1216$) et **0,0170** ($P_{norm} : 0,0811$) respectivement.

Pour réduire le taux d'échec dans le processus de prise de décision et pour évaluer la robustesse des résultats obtenus dans le cadre de ce chapitre, nous avons proposé une autre analyse de sensibilité en se basant sur la même procédure utilisée dans le chapitre précédent.

Chapitre V : amélioration du processus d'application des extensions de l'approche Lean Six Sigma dans les PME par une approche qualitative

Donc, la méthode « MSP » a le poids normalisé le plus élevé (0,2341). Lorsque le poids de la méthode « MSP » est varié de 0,1 jusqu'à 0,9 avec une augmentation de 0,1. Les poids de toutes les autres méthodes sont modifiés proportionnellement. Les résultats d'analyse sont présentés dans la figure V.5.

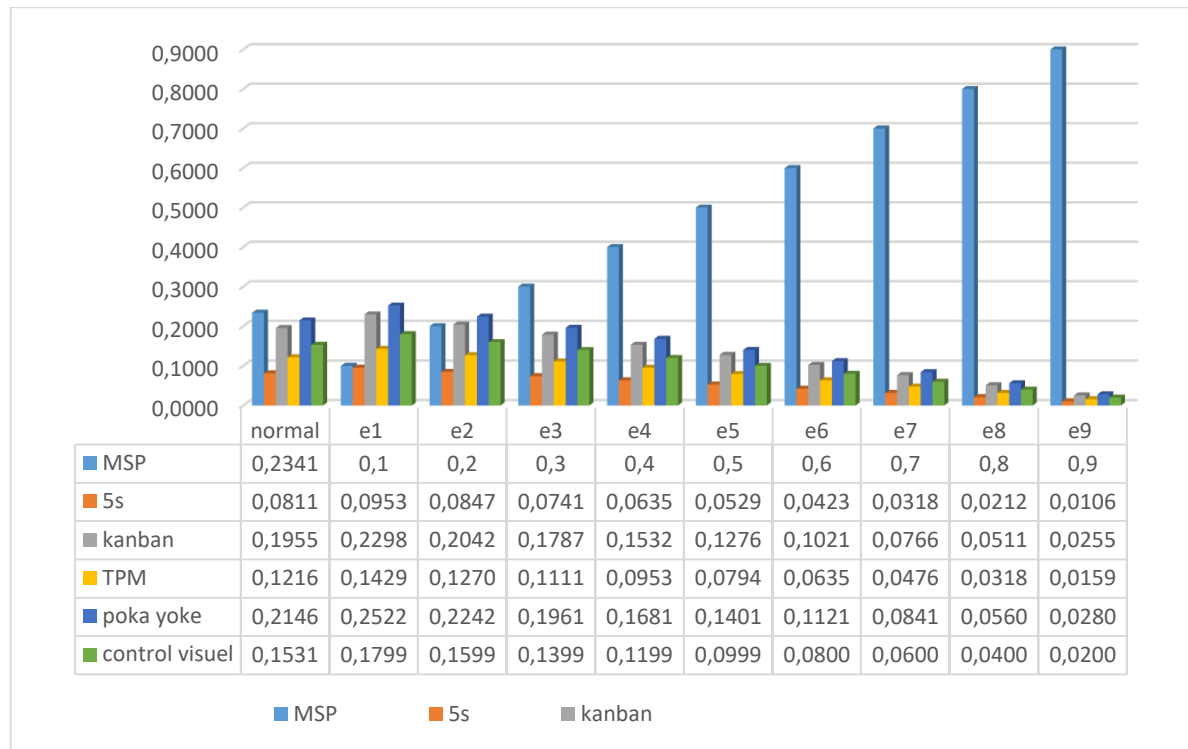


Figure V.5 : Résultats d'analyse de sensibilité

À partir des résultats obtenus, dans le cas où le poids de la méthode « MSP » est varié de 0,1 à 0,2, la méthode « poka yoké » prend la priorité d'application. Mais avec une variation de 0,3 jusqu'à 0,9 la méthode « MSP » qui tient la priorité d'application. De plus, nous avons remarqué que le classement de méthode 5s est toujours dans la dernière place.

V.5 Conclusion

Le principal objectif de ce chapitre était d'améliorer le processus d'application d'une extension de l'approche Lean Six Sigma avec la méthode VSM. En basant sur la VSM développée dans le chapitre précédent, nous avons introduit l'approche DEMATEL Floue pour effectuer la phase d'analyse, dans laquelle les relations causales entre les indicateurs de durabilité ont été étudiées. Ensuite, l'approche QFD floue a été utilisé pour organiser et simplifier la phase d'amélioration. L'approche proposée a été validée par une étude de cas réel mettant en évidence des objectifs d'amélioration de durabilité.

Contributions et Implications de l'approche

L'approche proposée dans ce chapitre peut être utilisée comme un outil d'aide aux dirigeants des entreprises pour analyser et améliorer l'état actuel des processus de fabrication d'un côté, et pour satisfaire les exigences de la durabilité d'un autre. Elle permet aussi d'ouvrir le champ de la participation aux experts du domaine du management industriel pour renforcer la compétitivité et la durabilité des entreprises.

Pour les chercheurs, ce chapitre offre un cadre méthodologique complet pour améliorer le processus d'application des extensions des approches LSS développées dans la littérature. De plus, l'approche proposée permet de surmonter quelques limites et barrières Lean Six Sigma (**Tableau I.10**) qui sont traduits à cause de l'orientation de l'approche Lean Six Sigma vers le contexte de la production durable.

Limites de l'approche.

On peut confiner les limites de cette approche dans les deux points :

- Le nombre moyen d'indicateurs traitées.
- Le petit nombre des décideurs impliqués dans cette étude peut empêcher d'avoir une multiplicité des avis des experts.

En plus, dans les approches qualitatives, le manque d'expérience des décideurs dans la prise de décision peut influencer sur les résultats obtenus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche a posé le problème de gestion des PME algérienne dans un contexte de production durable. Dans ce cadre, plusieurs interrogations sont portées, notamment, sur les objectifs attendus avec la prise en considération des critères de durabilité (économiques, environnementales, sociales). Sur cette problématique, l'idée principale de cette thèse était de voir comment appliquer des méthodes d'amélioration continue dans différents contextes. En effet, L'implantation de ces pratiques managériales permet aux organisations de s'adapter aux conditions changeantes de leur environnement.

L'objectif essentiel de notre travail de thèse était particulièrement centré sur l'amélioration continue dans les petites et moyennes entreprises algériennes en utilisant les deux approches connus du domaine : Lean Manufacturing et six sigma. Dans notre travail, nous avons proposé un cadre méthodologique pour montrer la progression de l'utilisation des approches Lean Manufacturing et six Sigma depuis le contexte conventionnel vers le contexte de la production durable.

Dans le premier chapitre nous avons abordé les notions de base des approches Lean Manufacturing et Six Sigma ainsi que l'évolution de leurs utilisations dans le domaine de la production durable. Ensuite nous avons identifié les limites et les barrières qui entravent l'exécution des processus d'application afin de proposer des manières pour les surmonter.

Une revue de la littérature a été présenté dans le deuxième chapitre. On a décrit l'exploitation et la mise en œuvre des approches Lean Manufacturing et Six Sigma pour atteindre différents objectifs et utiliser dans différents contextes en plusieurs parties.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit l'approche Lean Six Sigma conventionnelle qui touche l'aspect processus et produit. On a vu que cette approche est composée de deux parties. La première partie met en évidence l'application de la cartographie de la chaîne de valeur pour identifier les différents types de gaspillage dans une chaîne de production d'une PME Algérienne, et la deuxième partie applique le modèle DPMO pondéré et le niveau Sigma pour analyser et mesurer le niveau de qualité du produit généré par le processus de fabrication. Nous avons terminé cette approche par un ensemble des opportunités d'amélioration pour motiver les dirigeants de l'entreprise pour réaliser un état futur stable et un niveau de qualité acceptable.

Nous avons présenté une extension et une amélioration du processus d'application de l'approche Lean Six Sigma dans le quatrième chapitre. L'approche proposée est appuyée sur le cycle d'amélioration DMAIC. Ceci a été amélioré par l'intégration d'autres outils comme une aide méthodologique pour surmonter les barrières qui se traduit par une certaine ambiguïté dans la deuxième et la quatrième phase (mesurer, analyser et améliorer) du cycle d'amélioration DMAIC.

Dans Le dernier chapitre, nous avons accomplis le chapitre précédent par une nouvelle démarche qualitative visant l'optimisation des processus d'application des extensions de la méthode de la cartographie de la chaîne de valeur pour améliorer la durabilité de la production.

En conclusion, en accord avec l'idée principale posant que l'ensemble des outils du Lean Six Sigma contribuent efficacement à l'amélioration de la compétitivité, de la production, de la flexibilité des ressources humaines et de la protection de l'environnement. Ce qui confirme la nécessité d'adapter et d'appliquer l'approche Lean Six Sigma aux spécificités de chaque entreprise. Certainement, cela va permettre de contribuer au développement d'un système « Lean Six Sigma » adapté aux entreprises algériennes. La complémentarité des deux démarches, peut se révéler très intéressante.

Implications et contributions de la thèse

Notre travail de thèse a, tout d'abord, permis d'approfondir les connaissances théoriques du Lean Manufacturing et Six sigma afin de mieux appréhender ces deux démarches

Dans ce stade, il nous a poussé d'intégrer la culture des approches Lean Manufacturing, Six Sigma et le concept de la durabilité dans les PME algérienne. En plus, il va être exploité pour servir les dirigeants des entreprises pour améliorer les performances des processus de fabrication et le niveau de qualité.

On peut résumer nos contributions dans ce travail dans les points suivants :

- L'élargissement de la boîte à outils de l'approches Lean Six Sigma.
- L'élargissement du champ d'application des approches Lean Manufacturing, DMAIC.
- La maîtrise de quelques limites barrières des Lean Manufacturing et Six Sigma dans le contexte de la production durable.

- L'exploitation des approches Lean Manufacturing et Six Sigma dans les différents contextes de leurs utilisations (conventionnel et production durable).
- Le développement des extensions de l'approche Lean Six Sigma.
- L'amélioration des processus de mesure, d'analyse et d'amélioration dans le cycle DMAIC.

Perspectives

Avec l'application des outils du Lean Six sigma et durabilité que nous avons utilisée, les futurs travaux pourront se concentrer sur les perspectives suivantes :

- L'amélioration la première approche en ajoutant autres outils statistiques.
- Validation des approches proposées avec d'autre types d'industrie
- Appliquer les approches proposées dans des processus de fabrication plus complexe pour prouver leurs efficacités.
- Améliorer la deuxième approche en ajoutant la méthodologie d'analyse de cycle de vie (ACV).
- Informatiser les approches proposées pour suivre la durabilité de la production en temps réel.

Bébliographie

Référence

- Abidin, N.Z. and Pasquire, C.L., (2007).** “Revolutionize value management : A mode towards sustainability”. *International Journal of Project Management*, 25, pp.275–282.
- Afnor. Organisation et gestion de la production industrielle concepts fondamentaux de la gestion de production. *Norme NF X 50-310, 1991.*
- Ait-Alla, A., Lütjen, M., Lewandowski, M., Freitag, M. and Thoben, K.-D., (2016).** «Real-time Fault Detection for Advanced Maintenance of Sustainable Technical Systems”. *Procedia CIRP*, Vol. 41, pp. 295-300.
- Alukal, G. (2003),** “Create a lean, mean machine”, *Quality Progress*, Vol. 36 No. 4, pp. 29-34.
- Amrina, E., and Yusof, S. M. (2011).** “Key performance indicators for sustainable manufacturing evaluation in automotive companies”. *In IEEE international conference on industrial engineering and engineering management* (pp. 1093-1097).
- Aouag, H., Kobi, A. and Mechenene, A. (2015)** ‘Analysis of competitiveness level in an industrial company using a continuous improvement-based approach’, *Int. J. Six Sigma and Competitive Advantage*, Vol. 9, Nos. 2/3/4, pp.87–108.
- Aouag., H (2016)** ‘Étude, mise en œuvre et adaptabilité des outils de l’amélioration continue dans une industrie algérienne : approche théorique et pratique’ (thèse de doctorat), université de Batna 2, Batna, Algérie
- Ardekani, S.S., Sharifabadi, A.M., Jalaly, M.and Zarch, M.E., (2013).** “Comprehensive per- formance evaluation using FAHP-FVIKOR approach based on balanced score- card (BSC): a case of yazd’s ceramic and tile industry”. *Iran. J. Manag. Stud.* Vol. 6 No. 2, pp. 81-105.
- Azizi, A., Manoharan, T. (2015).** Designing a Future Value Stream Mapping to Reduce Lead Time using SMED-A Case Study. *2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 4-6 February 2015, Bali Indonesia.*
- Badurdeen, F., Shuaib, M. A., Lu, T. and Jawahir, I. S. (2013).** “Sustainable Value

- Creation in Manufacturing at Product and Process Levels: A Metrics-Based Evaluation”. *Handbook of manufacturing engineering and technology*, pp. 1-28.
- Banawi, A. and Bilec, M.M., (2014),** “A framework to improve construction processes: Integrating Lean, Green and Six Sigma”. *International Journal of Construction Management*, Vol. 14, No. 1 pp.58–71.
- Bartelmus, P, (2010).** “Use and usefulness of sustainability economics.” *Ecological Economics*. Vol. 69, No.11, pp. 2053-2055
- Basu, R. (2009).** “Implementing six sigma and lean”. Routledge.
- Behrouzi, F., and Wong, K. Y. (2011).** “Lean performance evaluation of manufacturing systems: A dynamic and innovative approach”. *Procedia Computer Science*, Vol. 3, pp. 388–395.
- Belhadi, A., Touriki, F. E., and El Fezazi, S. (2017).** “Prioritizing the solutions of lean implementation in SMEs to overcome its barriers: an integrated fuzzy AHP-TOPSIS approach”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 28, No. 8, pp. 1115-1139.
- Behnam, D., Ayough, A. and Mirghaderi, S. H. (2018).** “Value stream mapping approach and analytical network process to identify and prioritize production system’s Mudas (case study: natural fibre clothing manufacturing company)”, *The Journal of The Textile Institute*, Vol. 109, No.1, pp. 64-72.
- Bédry, P. (2012).** *Les basiques du lean manufacturing: dans les PMI et ateliers technologiques*. Editions Eyrolles
- Bicalho, T., Sauer, I., Rambaud, A. and Altukhova, Y. (2017).** “LCA data quality: A management science perspective”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 156, pp. 888-898.
- Brown, A., Amundson, J. and Badurdeen, F., (2014),** ‘Sustainable value stream mapping (Sus-VSM) in different manufacturing system configurations: Application case studies’, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 85, pp.164–179.

- Buchert, T., Steingrímsson, J.G., Neugebauer, S., Nguyen, T.D., Galeitzke, M., Oertwig, N., Seidel, J., McFarland, R., Lindow, K., and Hayka, H., (2015).** ‘Design and Manufacturing of a Sustainable Pedelec’. *Procedia CIRP*, Vol. 29, pp. 579-584.
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Govindan, K., Garza-Reyes, J.A., Benhida, K. and Mokhlis, A., (2016b).** “A framework for the integration of Green and Lean Six Sigma for superior sustainability performance”. *International Journal of Production Research*, Vol. 55, No. 15, pp.4481–4515.
- Cherrafi, A., Elfezazi, S., Chiarini, A., and Mokhlis, A., (2016a).** ‘The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model’. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 26, No. 1, pp.279–295.
- Chiarini, A., (2014).** “Sustainable manufacturing-greening processes using specific Lean Production tools: An empirical observation from European motorcycle component manufacturers”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 85, pp. 226-233.
- Dankbaar, B. (1997),** “Lean production: denial, confirmation or extension of socio-technical systems design”, *Human Relations*, Vol. 50 No. 5, pp. 567-583.
- Davis, M.M., Heineke, J.M:** Operations management: integrating manufacturing and services, 5th edn. McGraw-Hill, New York (2005)
- de Albuquerque Marques, P. A., and Matthé, R. (2017).** “Six Sigma DMAIC project to improve the performance of an aluminum die casting operation in Portugal”. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34, No. 2, pp.307-330
- Dechara, M, (2014)** ”stratégie de developpement des PME et le developpement local : essai d’analyse à partir du cas de la région nord-ouestde l’Algérie » mémoire de magister en science économie, université d’oran
- Egilmez, G., Kucukvar, M., Tatari, O. and Bhutta, M.K.S., (2014).** Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach. Resources”, *Conservation and Recycling*, Vol. 82, pp. 8-20.

- Erdil, N. O., Aktas, C. B. and Arani, O. M. (2018).** “Embedding sustainability in lean six sigma efforts”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 198, pp. 520-529.
- Esfahbodi A., Zhang Y. and Watson G. (2016).** “Sustainable supply chain management in emerging economies: Trade-offs between environmental and cost performance”. *International Journal of Production Economics*. Vol. 181, pp. 350-366.
- Faulkner, W. and Badurdeen, F., (2014),** ‘Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance’, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 85, pp.8–18.
- Fedajev, A., Stanujkic, D., Karabašević, D., Brauers, W. K. and Zavadskas, E. K. (2019).** ‘Assessment of progress towards “Europe 2020” strategy targets by using the MULTIMOORA method and the Shannon Entropy Index’. *Journal of Cleaner Production*, 118895.
- Ibrahim Alhuraish. (2016).** “Evaluation of the performance of organizations that implemented Lean Manufacturing and Six Sigma methods: application to French industries. Chemical and Process Engineering”. Thèse de doctorat, Université d’Angers.
- Ismail, A., Ghani, J. A., Ab Rahman, M. N., Deros, B. M. and Haron, C. H. C. (2014).** “Application of Lean Six Sigma tools for cycle time reduction in manufacturing: Case study in biopharmaceutical industry”. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, No. 2, pp. 1449-1463.
- Jasti, N.V.K and Sharma, A., (2014).** ‘Lean manufacturing implementation using value stream mapping as a tool’. *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 5, No. 1, pp.89–116.
- Jeannine, S., Lynn, P. and Erin, H. (2005)** ‘Relationships Between CMMIP P and Six Sigma’, *Software Engineering Institute*, CMU/SEI-2005-TN-005.
- Jia, S., Yuan, Q., Lv, J., Liu, Y., Ren, D. and Zhang, Z. (2017).** ‘Therblig-embedded value stream mapping method for lean energy machining’. *Energy*, Vol. 138, pp.1081-1098.

- Jirasukprasert, P., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V. and Lim, M. K. (2014)**, “A Six Sigma and DMAIC application for the reduction of defects in a rubber gloves manufacturing process”, *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 5, No. 1, pp. 2-21.
- Joung, C.B., Carrell, J., Sarkar, P. and Feng, S.C, (2013)**. “Categorization of indicators for sustainable manufacturing”. *Ecological indicators*. Vol. 24, pp. 148-157.
- Helleno, A. L., de Moraes, A. J. I. and Simon, A. T. (2017)**. ‘Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry’. *Journal of cleaner production*, Vol. 153, pp. 405-416.
- Hollmann, S., Klimmer, F., Schmidt, K.H. and Kylian, H., (1999)**. ‘Validation of a questionnaire for assessing physical work load’. *Scandinavian journal of work, environment & health*, Vol. 25, No. 2, pp.105–14
- Hwang, C. L., and Yoon, K. (1981)**. ‘Methods for multiple attribute decision making’. In *Multiple attribute decision making* (pp. 58-191). Springer, Berlin, Heidelberg
- Gabus, A. and Fontela, E.** ‘World Problems an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL, Battelle Geneva Research Centre, Switzerland Geneva, 1972
- Galankashi, M.R., Helmi, S.A. and Hashemzahi, P., (2016)**. “Supplier selection in automobile industry: a mixed balanced scorecard fuzzy AHP approach”. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 55 No. 1, pp. 93-100.
- Garza-Reyes J.A, Lean and Green. (2015)**, “A systematic review of the state of the art literature”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 102, pp. 18-29.
- George, M.L. (2002)**, “Lean Six Sigma – Combining Six Sigma Quality with Lean Speed” , McGraw-Hill, New York.
- George M. L., Kastle B. and Rowlands D. (2006)** “Qu’est-ce que le Lean Six Sigma?”, Maxima, Paris.
- Gladwin TN, Kennelly JJ, Krause TS (1995)**, “Shifting paradigms for sustainable

- development: implications for management theory and research”. *Academy of management Review*, Vol. 20, No. 4, pp. 874–907
- Gupta, A., Sharma, P., Jain, A., Xue, H., Malik, S. C., and Jha, P. C. (2019).** “An integrated DEMATEL Six Sigma hybrid framework for manufacturing process improvement”. *Annals of Operations Research*, pp. 1-41
- Govindan, K., Shankar, K.M. and Kannan, D., (2016).** “Sustainable material selection for construction industry. A hybrid multi criteria decision making approach”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 55, pp. 1274-1288.
- Kahraman, C. and Yanık, S. (2016).** “Intelligent Decision Making in Quality Management”. *Switzerland: Springer International Publishing*.
- Kaswan, M. S. and Rathi, R. (2020).** “Investigating the enablers associated with implementation of Green Lean Six Sigma in manufacturing sector using Best Worst Method”. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 22, pp. 865-876.
- Kluczek, A. (2017).** “An overall multi-criteria approach to sustainability assessment of manufacturing processes”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 8, pp. 136-143.
- Kumar, R. and Kumar, V. (2016),** ‘Operational performance improvement by implementation of value stream mapping – a case study from Indian industry’, *International Journal of Productivity and Quality Management*, Vol. 19, No. 4, pp.526–541
- Kumar, S., Dhingra, A. K. and Singh, B. (2018).** ‘Kaizen selection for continuous improvement through VSM-FUZZY-TOPSIS in small-scale enterprises: An Indian case study’. *Advances in Fuzzy Systems*, Vol. 2018.
- Laureani, A., and Antony, J. (2018).** “Leadership—a critical success factor for the effective implementation of Lean Six Sigma”. *Total Quality Management & Business Excellence*, Vol. 29, Nos. 5-6, pp. 502-523.
- Leseure Zajkowska, E. (2012),** ‘‘Contribution à l'implantation de la méthode Lean Six Sigma dans les Petites et Moyennes Entreprises pour l'amélioration des processus’’, Thèse de doctorat, université de Lille.

- Liang, G.S. and Wang, M.J.J. (1993)** ‘A fuzzy multi-criteria approach for robot selection’, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, pp.267–274.
- Linderman, K., Schroeder, R.G., Zaheer, S. and Choo, A.S., (2003)**, “*Journal of Operations management*” Vol. 21, No.2, pp. 193–203.
- Lucas.M.J, (2002)**, “The essential six sigma”, *Quality progress*, vol 35, No. 1, pp. 27-31.
- Lu, T., Gupta, A., Jayal, A. D., Badurdeen, F., Feng, S. C., Dillon Jr, O. W., and Jawahir, I. S. (2011)**. “A framework of product and process metrics for sustainable manufacturing”. In *Advances in Sustainable Manufacturing* (pp. 333-338). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kim, S. (2008)**. “Enhanced Evaluation Method of Sigma Level in Six-Sigma Activities”, *Proceedings of the 2008 IEEE ICMIT*.
- Maher, I., Sarhan, A. A., Barzani, M. M. and Hamdi, M. (2015)**. “Increasing the productivity of the wire-cut electrical discharge machine associated with sustainable production”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 108, pp. 247-255.
- Martin, K., and Osterling, M. (2014)**. “Value stream mapping: how to visualize work and align leadership for organizational transformation”. New York, NY: McGraw-Hill
- Marques, P.A.d.A. and Matthé, R. (2017)**, "Six Sigma DMAIC project to improve the performance of an aluminum die casting operation in Portugal", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34 No. 2, pp. 307-330.
- Mohanraj, R., Sakthivel, M. and Vinodh, S. (2011)** ‘QFD integrated value stream mapping: an enabler of lean manufacturing’, *Int. J. Productivity and Quality Management*, Vol.7, No.4, pp.501–522.
- Neuman, R. P. and Cavanagh, R. (2000)**. “The six sigma way: How GE, Motorola, and other top companies are honing their performance”. *USA: McGraw Hill Professional*.

- Opatchi, G (2013)** ‘‘Démarche d’optimisation des processus opérationnels’’ Mémoire d’Intelligence Méthodologique, Université de Technologie de Compiègne, Master.
- Paju, M., Heilala, J., Hentula, M., Heikkilä, A., Johansson, B., Leong, S., and Lyons, K. (2010).** Framework and indicators for a sustainable manufacturing mapping methodology. In *Proceedings of the 2010 winter simulation conference* (pp. 3411-3422). IEEE.
- Pande, P.S., Neuman, R.P., and Cavanagh, R.R. (2000).** The Six Sigma Way. How GE, Motorola, and Other Top Companies Are Honing Their Performance. United States: Mc. Graw Hill.
- Pillet M., (2008)** ‘Six Sigma. Comment l’appliquer’, *Éditions d’Organisation, Paris*.
- Psychogios, A.G.; Tsironis, K. (2012)** ‘‘Towards an integrated framework for Lean Six Sigma application: lessons from the airline industry’’. *Total Qual. Manag.* Vol. 23, No. 4, pp. 397–415.
- Quader, M.N., S. Ahmed, S., Raja Ghazilla, R.A., S. Ahmed, S. and Dahari, M. (2016)** ‘Evaluation of criteria for CO₂ capture and storage in the iron and steel industry using the 2-tuple DEMATEL technique’, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 120, pp. 207– 220.
- Rajesh, G., and Malliga, P. (2013).** ‘‘Supplier Selection Based on AHP QFD Methodology. International Conference On Design and Manufacturing’’, (IConDM: 2013), pp.1283–1292.
- Ratlalan, R. M., Tama, I. P., and Sugiono, S. (2018).** ‘Implementation of lean manufacturing to minimize waste in the process of plastic BOX 260 using VSM and AHP method’. *Journal of Engineering and Management in Industrial System*, Vol. 5, N. 2, pp. 67-76.
- Ravichandran, J. (2007)** ‘Cost-based process weights for DPMO’, *Total Quality Management*, Vol. 19, No. 5, pp.442–453.
- Rohani, J. M., and Zahraee, S. M. (2015).** ‘‘Production Line Analysis via Value Stream Mapping: A Lean Manufacturing Process of Color Industry’’. *Procedia Manufacturing*, 2(February), 6–10.

- Rolstadås, A., Henriksen, B., O’Sullivan, D., (2012).** Evolving Paradigms in Manufacturing, *Manufacturing Outsourcing*. Springer, London, pp. 27-33.
- Rother M, Shook J (2003)** “Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate Muda”. *Lean Enterprise Institute*, Brookline.
- Saaty, T. L. (1970).**” How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 48, pp. 9-26.
- Sachidananda, M. and Rahimifard, S., (2012).** “Reduction of Water Consumption within Manufacturing Applications”.*19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Berkeley, USA*
- Sagnak, M. and Kazancoglu, Y. (2016).** “Integration of green lean approach with six sigma: an application for flue gas emissions”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 127, pp. 112-118.
- Shannon, C.E., (1948),** “A mathematical theory of communications”. *Bell Syst. Tech. J.* pp. 379–423.
- Shukla, V., Swarnakar, V. and Singh, A. R. (2021).** “Prioritization of Lean Six Sigma project selection criteria using Best Worst Method”. *Materials Today: Proceedings*
- Singh, J., Singh, H., Singh, D. and Singh, K. (2017)** ‘Evaluating lean thinking using value stream mapping in manufacturing industry – a case study’, *International Journal Productivity and Quality Management*, Vol. 22, No. 1, pp.101–116.
- Singh, M., Rathi, R., & Garza-Reyes, J. A. (2021).** “Analysis and prioritization of Lean Six Sigma enablers with environmental facets using best worst method: A case of Indian MSMEs”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 279, 123592.
- Snee, R. D. (1999).** “Why should statisticians pay attention to Six Sigma? “*Quality Progress*, Vol. 32, No. 9, pp. 100–103.
- Storch, R.L. and Lim, S. (1999),** “Improving flow to achieve lean manufacturing in shipbuilding”, *Production Planning & Control*, Vol. 10 No. 2, pp. 127-137.
- Swarnakar, V. and Vinodh, S. (2016),** "Deploying Lean Six Sigma framework in an

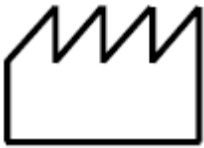
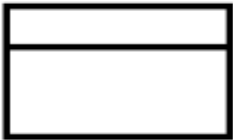
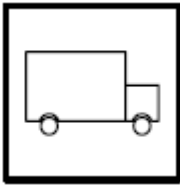
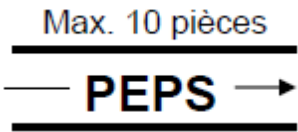
- automotive component manufacturing organization", *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 7 No. 3, pp. 267-293.
- Taiichi Ohno, (1988).** "Toyota production system: beyond large-scale production". *crc Press*.
- The US Department of Commerce, 2010,** "The International Trade Administration and The U.S. Department of Commerce's definition for Sustainable Manufacturing," Available via <http://www.trade.gov/competitiveness/sustainable-manufacturing/how-doc-defines-sm.asp>.
- Thomas, A., Barton, R. and Chuke-Okafor, C. (2009),** "Applying lean six sigma in a small engineering company – a model for change", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 20 No. 1, pp. 113-129.
- Torres A.S. and Gati A.M (2009)** "Environmental value stream mapping (EVSM) as sustainability management tool". In: *PICMET'09 2009 Portland international conference on management of engineering and technology, Oregon, USA*.
- Utne, I.B., (2009).** "Life cycle cost (LCC) as a tool for improving sustainability in the Norwegian fishing fleet". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No. 3, pp.335–344.
- Valdez-Vazquez, I., Gastelum, C. D. R. S., and Escalante, A. E. (2017).** "Proposal for a sustainability evaluation framework for bioenergy production systems using the MESMIS methodology". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, pp. 360-369.
- Valaki, J.B., Rathod, P.P., Sankhavar, C., (2016).** "Investigations on technical feasibility of Jatropha curcas oil based bio dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM)". *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 22, pp. 151-160.
- Verma, N. and Sharma, V., (2016),** 'Energy Value Stream Mapping a Tool to Develop Green Manufacturing'. *Procedia Engineering*, 149(June), pp.526–534.
- Vinodh, S., Ben Ruben, R. and Asokan, P., (2016),** 'Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: A case study', *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 18, No. 1,

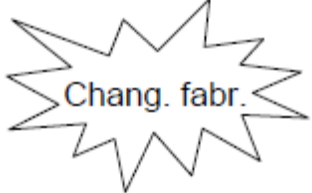
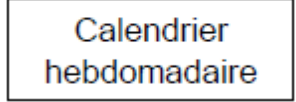
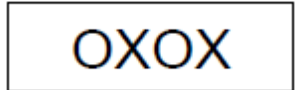
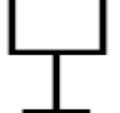
pp.279–295.

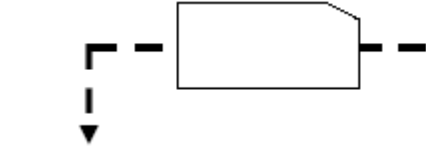
- Vinodh, S., Somanaathan, M. and Arvind, K.R. (2013)**, "Development of value stream map for achieving leanness in a manufacturing organization", *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 11 No. 2, pp. 129 - 141
- Vinodh, S. and Swarnakar, V (2015)**, "Lean Six Sigma project selection using hybrid approach based on fuzzy DEMATEL–ANP–TOPSIS", *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 6, No. 4, pp. 313 – 338
- Vinodh, S. and Chintha, S.K. (2011)** ‘Application of fuzzy QFD for enabling sustainability’, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol.4, No.4, pp.313-322.
- Womack, J.P. and Jones, D.T. (1996)**. “Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation”, New York: Simon and Shuster
- Womack, J. P., Jones, D. T. and Roos, D. (1990)**. The machine that changed the world. Simon and Schuster. New York.
- Worley, J. (2004)**, “The role of socio-cultural factors in a lean manufacturing implementation”, master thesis, Oregon State University, Corvallis, OH.
- Yadav, G. and Desai, T.N. (2016)**, “Lean Six Sigma: a categorized review of the literature”, *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 7 No. 1, pp. 2–24.
- Yadav, G., Seth, D. and Desai, T.N. (2018)**, "Prioritising solutions for Lean Six Sigma adoption barriers through fuzzy AHP-modified TOPSIS framework", *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 9 No. 3, pp. 270-300.
- Yadav, G. and Desai, T.N. (2017)**, "A fuzzy AHP approach to prioritize the barriers of integrated Lean Six Sigma", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 34 No. 8, pp. 1167-1185.
- Yousefi, A. and Hadi-Vencheh, A. (2016)**, "Selecting Six Sigma projects: MCDM or DEA?", *Journal of Modelling in Management*, Vol. 11 No. 1, pp. 309-325.
- Zhang Xiangxue, (2012)** "a new metric-based LCA method for assessing the sustainability performance of metallic automotive components". Theses and Dissertations-MechanicalEngineering.

Annexe

Annexe I : Symbole de la méthode Value Stream Mapping

Pictogramme	Description
	Clients et fournisseurs : représente le fournisseur quand il figure dans le coin supérieur gauche, le client quand est en haut à droite, le point final habituel pour le matériel.
	Processus ou activités : Un processus, une activité, une machine ou le département à travers lequel transitent les flux de matières.
	Expédition par camion : L'icône de camion représente une expédition extérieure vers des clients ou issue de fournisseurs
	Point d'inventaire (Stock) : montrer les stocks entre deux processus.
	Dépôt de stockage : Cette icône présente un stock géré selon la méthode Kanban
	Flèche de flux poussé : Représente la «poussée» des matériaux d'un processus à l'étape suivante.
	Produits acheminés vers le client : Représente le mouvement des matières premières depuis les fournisseurs vers la réception de l'usine. Ou, le mouvement des produits finis à la sortie de l'usine vers les clients
	Cellule de travail : indique que de multiples processus sont intégrés dans une cellule de travail.
	Cette icône représente un système FIFO (First-In-First-Out, « premier arrivé, premier sorti »)
	Flux tiré : Supermarchés connectent à des processus en aval.

	Stock de sécurité : Cette icône indique un stockage de sécurité temporaire, par opposition à un stockage permanent, destiné à prévenir les problèmes en cas de défaillance du système ou d'autres dysfonctionnements
	Opérateur : Représente un opérateur. Il indique le nombre d'opérateurs nécessaires pour traiter la tâche à un poste de travail particulier.
	Amélioration Kaizen : Utilisé pour mettre en évidence les besoins d'amélioration à des processus spécifiques qui sont essentielles pour atteindre l'état futur du VSM.
	Information transmise électroniquement : Cette flèche représente un flux électronique comme l'échange de données informatisées (EDI),
	Information transmise manuellement : Une flèche droite montre le flux d'information générale, de rapports ou de conversation.
	Calendrier de travail
	Case de lissage de la charge : Outil de création des lots de Kanbans permettant de niveler stabiliser la diversité et le volume de la production.
	Kanban de signalisation : Utilisé chaque fois que les niveaux de stocks dans le supermarché chutent à un niveau minimum.
	Poste Kanban : un endroit où les signaux (cartes) kanban serassemblent pour le ramassage.
	Go See : collecte d'informations par des moyens visuels.
	Carte Kanban de prélèvement

	Carte Kanban de production
	Carte Kanban par lots

Annexe II : Les valeurs nécessaires utilisées pour calculer le DPMO pondéré et le niveau sigma de chaque année

Année		Année 2012			Année 2014			Année 2016		
Atelier	opération	production	DPO	Cout	production	DPO	Cout	production	DPO	Cout
Atelier mécanique	Flanc	839406	1105	390	863276	1163	429.00	1011014	1616	459,92
	EMB SUP	246018	1059	416.91	289132	859	458.43	467620	1045	496,9
	EMB INF	278881	923	416.91	293087	876	458.43	464560	1141	509,99
	Pieds	284834	1088	187.83	306555	783	167.17	467875	2346	169,48
	Colliers	277770	577	155.73	305689	624	147.84	414872	697	169,68
Atelier soudage	Soudage pieds	277568	1084	47.97	287224	1083	54,8	440451	855	57,16
	Soudage collerettes	276082	870	41,12	288524	1335	142,45	442355	1241	169,66
	Soudage circulaire	275236	1672	115,28	287616	2290	135,37	414252	2064	108,93
	Soudage colliers	275347	229	61.225	284424	337	70,44	385919	285	70,43
Atelier finition	Four BAG	266353	0	69.24	284087	0	77	357737	0	59,16
	Banc d'épreuve	272917	387	56,32	278506	648	57,54	330201	570	34,6
	Grenaillage et Métallisation	271413	0	153,82	277858	0	152,06	302192	0	134,23
	Bag finie	273804	0	129,23	277287	0	492,43	273990	0	483,41

Annexe III. Questionnaire pour calculer l'indice de la charge physique (PLI) (Hollmann et al. 1999)

	Tronc	Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
<i>T</i>₁	droit					
<i>T</i>₂	légèrement incliné					
<i>T</i>₃	fortement incliné					
<i>T</i>₄	tordu					
<i>T</i>₅	plié latéralement					
	Les bras	Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
<i>A</i>₁	Les deux sous l'épaule					
<i>A</i>₂	Un bras au-dessus de l'épaule					
<i>A</i>₃	Les deux bras au-dessus de l'épaule					
	Jambes	Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
<i>L</i>₁	assis					
<i>L</i>₂	debout					
<i>L</i>₃	Squat					
<i>L</i>₄	S'agenouiller avec un ou les deux					
<i>L</i>₅	Marcher					
	Poids - debout	Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
<i>W</i>_{u1}	Legé					
<i>W</i>_{u2}	Moyenne					
<i>W</i>_{u3}	Lourd					
	Poids - Incliné	Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
<i>W</i>_{i1}	Legé					
<i>W</i>_{i2}	Moyenne					
<i>W</i>_{i3}	Lourd					
		Jamais	Rarement	parfois	Souvent	Très souvent
Scores assignables		0	1	2	3	4

L'équation de calcul de PLI :

$$PLI = 0.974 \times T_2score + 1.104 \times T_3score + 0.068 \times T_4score + 0.173 \times T_5score + 0.157 \times A_2score + 0.314 \times A_3score + 0.405 \times L_2score + 0.152 \times L_4score + 0.152 \times L_5score + 0.549 \times W_{u1}score + 1.098 \times W_{u2}score + 1.647 \times W_{u3}score + 1.777 \times W_{i1}score + 2.416 \times W_{i2}score + 3.056 \times W_{i3}score$$

Annexe IV. Analyses de relation entre les indicateurs de durabilité

L'objectif est de quantifier la relation de cause/effet d'indicateurs de durabilité, pour ce faire, il nécessaire d'évaluer qualitativement l'influence entre les indicateurs de durabilité, en utilisant la méthode DEMATEL floue.

Merci de répondre au questionnaire suivant :

TC	VH	H	M	L	VL	MP
						
	VH	H	M	L	VL	
						

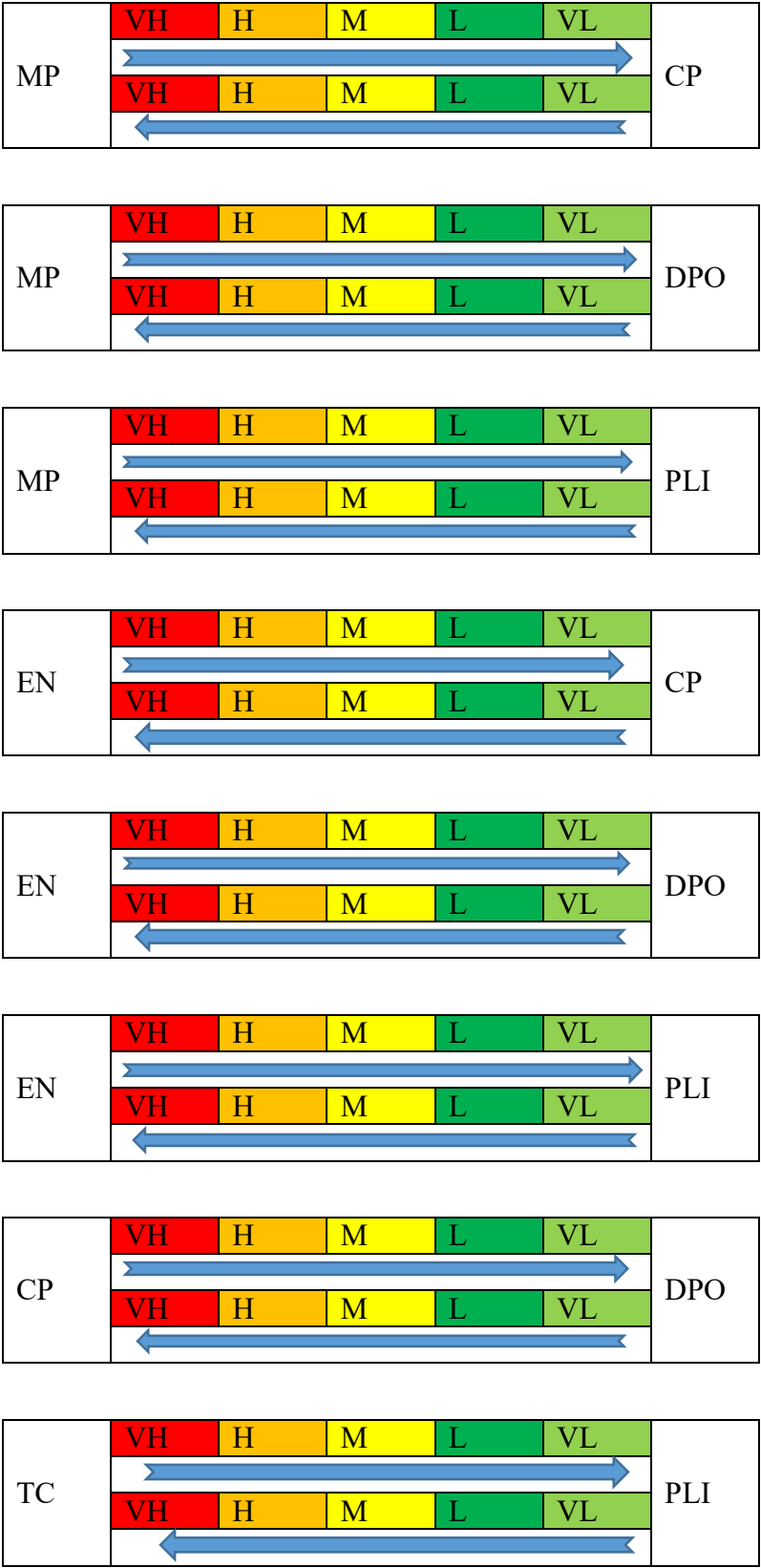
TC	VH	H	M	L	VL	EN
						
	VH	H	M	L	VL	
						

TC	VH	H	M	L	VL	CP
						
	VH	H	M	L	VL	
						

TC	VH	H	M	L	VL	DPO
						
	VH	H	M	L	VL	
						

TC	VH	H	M	L	VL	PLI
						
	VH	H	M	L	VL	
						

MP	VH	H	M	L	VL	EN
						
	VH	H	M	L	VL	
						



Annexe V. Analyses de l'influence des outils Lean Six Sigma sur les indicateurs de durabilité

L'objectif est de déterminer la priorité d'application des outils Lean Six Sigma proposés. Pour ce faire il faut évaluer qualitativement l'influence des outils Lean Six Sigma sur les indicateurs de durabilité en se basant sur la méthode QFD floue.

Merci de répondre questionnaire suivant :

5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'informations entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>TC</i>
5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'information entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>MP</i>

5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'information entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>EN</i>
5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'information entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>CP</i>
5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'information entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>DPO</i>

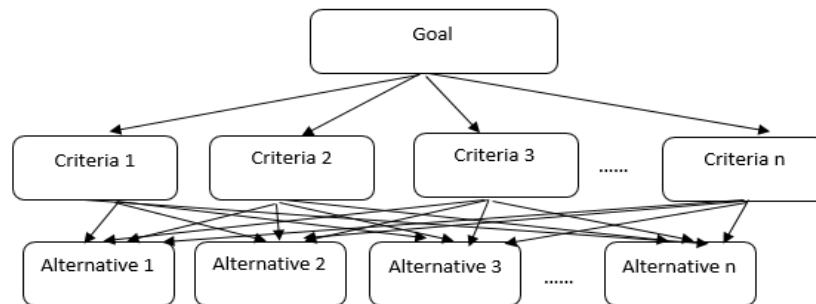
5S (Améliorer les conditions ergonomiques)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>
Kanban (Produire juste à la demande de client)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>
TPM (Améliorer le rendement de la machine et réduire le taux de panne)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>
MSP (Améliorer et contrôler la qualité du produit)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>
Poka Yoke (Produire sans défaut de qualité)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>
Contrôle Visuel (faciliter la transmission d'information entre employées)	VS	S	M	L	VL	NON	<i>PLI</i>

Annexe VI : les méthodes ajoutées dans la boîte à outil Lean Six Sigma conventionnelle pour améliorer leur processus d'application et surmonter quelques barrières dans le domaine de la production durable

La méthode AHP (Analythic hierarchy process)

La méthode AHP est une technique mathématique efficace développée par **Saaty en 1970**, elle est utilisée comme méthode de résolution des problèmes complexes liés à la prise de décision. Les détails d'application de la méthode AHP sont expliqués comme suit (**Rajesh et Malliga, 2013**).

- 1- Simplification du problème de décision en le structurant sous la forme d'une hiérarchie comme le montre la figure suivante :



- 2- Calcul du poids chaque critère basant sur les étapes suivantes :
 - a) Construction de la matrice de comparaison par paires en utilisant l'échelle en neuf points de Saaty (1-9), où 1 indique une importance égale, 3 modérément plus, 5 fortement plus, 7 très fortement et 9 indique extrêmement plus d'importance. Les valeurs de 2, 4, 6 et 8 indiquent les valeurs de compromis d'importance. La matrice par paires prend la forme suivante :

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & & p_{nn} \end{bmatrix}$$

- b) Normalisation de la matrice de comparaison par paires en divisant chaque élément de la matrice de décision par le total de leur colonne. La matrice de comparaison par paire normalisée est présentée comme suit :

$$P' = \begin{bmatrix} \frac{p_{11}}{\sum_{i=1}^n p_{11}} & \frac{p_{12}}{\sum_{i=1}^n p_{12}} & \dots & \frac{p_{1n}}{\sum_{i=1}^n p_{1n}} \\ \frac{p_{21}}{\sum_{i=1}^n p_{21}} & \frac{p_{22}}{\sum_{i=1}^n p_{22}} & \dots & \frac{p_{2n}}{\sum_{i=1}^n p_{2n}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{p_{n1}}{\sum_{i=1}^n p_{n1}} & \frac{p_{n2}}{\sum_{i=1}^n p_{n2}} & & \frac{p_{nn}}{\sum_{i=1}^n p_{nn}} \end{bmatrix}$$

- c) Obtention du poids de chaque critère en calculant la valeur moyenne de chaque ligne de la matrice normalisée.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{p_{11}}{\sum_{i=1}^n p_{11}} + \frac{p_{12}}{\sum_{i=1}^n p_{12}} + \dots + \frac{p_{1n}}{\sum_{i=1}^n p_{1n}}}{n} \\ \frac{\frac{p_{21}}{\sum_{i=1}^n p_{21}} + \frac{p_{22}}{\sum_{i=1}^n p_{22}} + \dots + \frac{p_{2n}}{\sum_{i=1}^n p_{2n}}}{n} \\ \vdots \\ \frac{\frac{p_{n1}}{\sum_{i=1}^n p_{n1}} + \frac{p_{n2}}{\sum_{i=1}^n p_{n2}} + \dots + \frac{p_{nn}}{\sum_{i=1}^n p_{nn}}}{n} \end{bmatrix}$$

3- Vérification de la composition AHP

- a) *Calcul du (λ_{max})* : λ_{max} est la plus grande valeur propre de la matrice de comparaison. Son calcul est effectué en multipliant le vecteur des poids des critères par la matrice de comparaison par paires. Ensuite, en divisant la somme des valeurs de la ligne i par le poids obtenu (w). Comme indiqué dans le calcul suivant.

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} \bar{w}_1 \\ \bar{w}_2 \\ \vdots \\ \bar{w}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{w_1 p_{11} + w_2 p_{12} + \dots + w_n p_{1n}}{w_1} \\ \frac{w_1 p_{21} + w_2 p_{22} + \dots + w_n p_{2n}}{w_1} \\ \vdots \\ \frac{w_1 p_{n1} + w_2 p_{n2} + \dots + w_n p_{nn}}{w_1} \end{bmatrix}$$

A ce point, pour trouver la valeur du (λ_{max}), on calcul la moyenne du vecteur de somme de poids obtenu, comme indiqué dans l'équation (5):

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i}{n} \quad (5)$$

- a) *Calcul d'indice de cohérence à l'aide de l'équation*

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$$

Où : n est le nombre de critères comparés,

b) Calcul de rapport de cohérence à l'aide de l'équation

$$CR = CI/RI$$

Avec : **RI** est l'indice de cohérence aléatoire déterminé en fonction de la taille de la matrice de comparaison (n) comme montre le tableau suivant :

Table: Random inconsistency indices (Saaty, 1970)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI(n)	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Si la valeur obtenue de CR est inférieure à 0,1, les évaluations effectuées dans la première étape sont cohérentes. Sinon les évaluations ou les jugements doivent être ajustées.

La méthode Entropy

Le méthode Entropy a été utilisée pour la première fois dans le domaine de thermodynamique, après Shannon l'a introduit dans la théorie de l'information (**Shannon, 1948; Fedajev et al, 2019**) et devenu comme une méthode multicritères très connue et plus utilisée pour obtenir les poids des critères.. La procédure d'application de l'algorithme Entropy est exprimée en quatre étapes, comme suit :

Étape 1: Normalisation de la matrice de décision

$$ind_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Étape 2: Calcul de la sortie d'entropie e_j du critère j

$$e_j = -k \sum_{j=1}^m ind_{ij} \times \ln(ind_{ij}), i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$K = 1/(\ln m) \quad (3)$$

Étape 3: Calcul du coefficient de variation.

$$g_i = (1 - e_j), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Étape 4: Calcul du poids d'entropie W_i de chaque critères.

$$W_i = \frac{g_i}{\sum_i^m g_i} \quad (5)$$

La méthode TOPSIS (Technique for order preference by similarity to ideal solution)

La méthode TOPSIS est une technique multicritères aide à la décision développée par **Hwang et Yoon (1981)**, elle est utilisée pour extraire le meilleur classement d'un ensemble de critères. Ainsi qu'aide également à déterminer une solution idéale positive et une solution idéale négative (**Vinodh et Swarnakar, 2015**). Le processus d'application de la méthode TOPSIS est appui sur un ensemble d'étapes, comme suit (**Hwang et Yoon 1981**) :

- a) Construction de la matrice de décision normalisée

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i^m x_{ij}^2}}, j= 1,2,3,\dots,n; i= 1,2,3,\dots,m$$

- b) Identification de la solution idéale positive et solution idéale négative

$$A_i^+ = \{(\max V_{ij}|j \in J), (\min V_{ij}|j \in J') | i = 1,2,3, \dots m\}$$

$$\{V_1^+, V_2^+, V_3^+, \dots, V_n^+\}$$

$$A_i^- = \{(\min V_{ij}|j \in J), (\max V_{ij}|j \in J') | j = 1,2,3, \dots n\}$$

$$\{V_1^-, V_2^-, V_3^-, \dots, V_n^-\}$$

Où J et J'présentent l'ensembles des critères bénéfiques et des critères non bénéfiques respectivement.

- c) Calcul des mesures de séparation de chaque alternative à partir de la solution idéale positive et de la solution idéale négative en utilisant les distances euclidiennes, comme suit :

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2}, j= 1,2,3,\dots,n; i= 1,2,3,\dots,m$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2}, j= 1,2,3,\dots,n; i= 1,2,3,\dots,m$$

- d) Calcul de la proximité relative de la solution idéale

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$$

- e) Classement des résultats de C_i dans un ordre décroissant

La méthode DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory)

La méthode DEMATEL est une méthode utilisée pour établir un modèle structurel impliquant des relations causales entre des critères complexes (Gabus et Fontela, 1972, 1973). DEMATEL a été développée par le programme des sciences et des affaires humaines du Battelle Memorial Institute de Genève entre 1972 et 1976. Le résultat final de la méthode DEMATEL est une représentation visuelle, qui sépare un ensemble des critères en groupe de cause et d'effet. Le processus d'application de la méthode DEMATEL est comme suit :

a) Étape 1: construction de la matrice de relations directes.

La construction de la matrice de relation directes est basée sur l'utilisation des cinq échelles pour mesurer la relation entre différents critères : 0 (aucune influence), 1 (très faible influence), 2 (faible influence), 3 (forte influence) et 4 (très forte influence).

b) Étape 2: Normalisation de la matrice de relations directes.

La normalisation est effectuée en utilisant l'équation suivante :

$$B = A \times \gamma$$

Avec,

$$\gamma = \min \left[\frac{1}{\max_{1 \leq i < n} \sum_{j=1}^n |A_{ij}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq i < n} \sum_{i=1}^n |A_{ij}|} \right]$$

c) Construire la matrice de relation floue totale (T) :

La matrice de relation totale (T) est obtenue en utilisant l'équation suivante

$$T = B \times (I - B)^{-1}$$

Où :I est désigné la matrice d'identité

d) Étape 4: Produire un diagramme causal.

Cette étape commence par le calcul de la somme des lignes (R) et de la somme des colonnes (C), comme suit :

$$C_i = \sum_{j=1}^n [t_{ij}]_{n \times 1}$$

$$R_i = \sum_{i=1}^n [t_{ij}]_{1 \times n}$$

Finalement, le diagramme de cause à effet est construit en cartographiant l'ensemble des données du (R + C) et (R-C). Les valeurs du (R + C) sont placés dans l'axe horizontal qui

mesure l'intensité de l'influence de chaque critère. (R-C) est l'axe vertical qui explique la classification de « cause-effet » les critères. Si (R-C) d'un critère est positif, ce dernier affecte les autres critères. Si (R-C) est négatif, le critère est influencé par les autres critères.