



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة  
Ecole Nationale Supérieure de Technologies Avancées  
قسم الهندسة الصناعية والصيانة

Département de Génie industriel et Maintenance



Department of Industrial  
Engineering & Maintenance

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

**D'INGÉNIEUR d'ÉTAT**

-Filière-

**Génie Industriel**

-Spécialité-

**Génie Industriel**

-Thème-

# Amélioration d'un Processus de Set Up: Une Approche Intégrée du Lean Six Sigma et d'apprentissage automatique

-Cas Tchin Lait-

Réalisé par :

**BEN ALI Nesrine**

**HAMOUCHE Narimane**

Les membres de Jury :

|                  |              |
|------------------|--------------|
| GHOMARI Leila    | Président    |
| RAHMOUNE Mahdi   | Encadrant    |
| BELAYADI Djahida | Co-Encadrant |
| BOUDHAR Hamza    | Examineur    |

Alger le 01/ 07/ 2024

Année universitaire 2023/2024

“

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À ma mère, mon rayon de soleil.*

*Tu as toujours été là pour moi.*

*Ma meilleure amie, la plus proche de moi.*

*Pendant 23 ans et 6 mois, tu as été mon bonheur et ma joie.*

*J'écris ces mots pour te dire merci mille fois pour tous tes efforts, ton soutien et surtout tes délicieux plats.*

*À mon père, mon phare lunaire.*

*Dans notre petit royaume, tu es le toit.*

*Qui nous protège du mal et du froid.*

*Pour moi tu es un héros, un sage roi.*

*Tu es le meilleur père pour tes enfants, les trois.*

*À mes étoiles,*

*Mon frère Nassim, mon bras droit.*

*Ma sœur Amel et sa belle voix.*

*À Nesrine, Nona, et moi.*

*À mes peines, mes larmes versées, mes émois.*

*À mes livres, mes rêves bercés, mes choix.*

*Et à tous ceux qui, près ou loin, ont croisé ma voie.*

*Merci pour votre soutien, aujourd'hui et à chaque fois.*

*Mais avant tout, Je dédie ce travail aux plus de 6000 étudiants palestiniens tués qui ont vu et vécu des périodes ardues.*

***BEN ALI Nesrine***

”

---

“

### *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*À ma chère mère, ma confidente, ma lumière, pour son amour inconditionnel, sa patience infinie et ses sacrifices quotidiens. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir soutenu tout au long de ma vie.*

*À mon cher père, pour sa sagesse, ses conseils précieux et sa force tranquille. Votre amour et vos sacrifices ont façonné mon chemin. Votre générosité et votre bonté ont toujours été un exemple pour moi.*

*À mes chers frères Islam, Akram, et Iheb, pour leur soutien constant et les moments de joie partagés. Merci d'être toujours là pour moi et de m'encourager à donner le meilleur de moi-même.*

*À mes amis, pour tous les moments partagés, vos encouragements et votre soutien sans faille.*

*À moi-même, pour tous les défis surmontés, les rêves poursuivis, ce mémoire est la preuve de ma persévérance.*

**HAMOUCHE Narimane**

”

---

“

## **Remerciement**

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude à Allah, le Miséricordieux, pour nous avoir accordé la force, la patience et la sagesse nécessaires pour réussir la réalisation de ce projet de fin d'études, qui résume 17 ans d'aventure, d'éducation et de recherche.*

*Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce projet et pour leurs remarques constructives, qui contribueront sans aucun doute à notre développement professionnel et personnel.*

*Nous souhaitons ensuite remercier les responsables de l'entreprise TchIn Lait, spécialement Monsieur FENGAL, le Directeur de la Production, pour nous avoir offert l'opportunité de réaliser le stage pratique au sein de l'unité 'Tchin Lait'. Nos sincères remerciements vont également à nos tuteurs de stage, Monsieur AMROUCHE et Monsieur ABNOUN, pour leur encadrement, leurs conseils précieux et leur soutien continu tout au long de ce projet. Leur expertise a été d'une aide précieuse pour surmonter les défis rencontrés.*

*Nous exprimons notre reconnaissance à nos encadrants, Madame BELAYADI et Monsieur RAHMOUNE pour leur suivi académique et leurs orientations méthodologiques, qui ont considérablement enrichi ce travail.*

*Enfin, nous souhaitons remercier toute l'équipe de TchIn Lait, ainsi que nos professeurs, collègues au sein de l'ENSTA, en particulier les professeurs du département GIM, pour leur soutien, leurs encouragements et leur coopération tout au long de cette expérience. Nous terminons en exprimant notre profonde gratitude envers nos familles pour leur amour, leur soutien et leur patience tout au long de nos études. Leur encouragement constant a été une source de motivation inestimable.*

*Merci à tous et à toutes pour votre confiance et votre aide précieuse. ”*

# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| Liste des abréviations . . . . .                                      | X         |
| Introduction générale . . . . .                                       | 1         |
| <b>1 Les fondements du Lean Six Sigma . . . . .</b>                   | <b>3</b>  |
| 1.1 Introduction . . . . .  | 4         |
| 1.2 Lean Management . . . . .   | 4         |
| 1.2.1 Définition . . . . .  | 4         |
| 1.2.2 Histoire et évolution . . . . .                                 | 5         |
| 1.2.3 Principe du Lean management . . . . .                           | 5         |
| 1.2.4 Concepts et application . . . . .                               | 6         |
| 1.3 Six Sigma . . . . .   | 7         |
| 1.3.1 Définition . . . . .  | 7         |
| 1.3.2 Histoire et évolution . . . . .                                 | 7         |
| 1.3.3 Principe de Six sigma . . . . .                                 | 7         |
| 1.3.4 Concepts et application . . . . .                               | 8         |
| 1.4 Lean Six Sigma . . . . .  | 9         |
| 1.4.1 Définition . . . . .  | 9         |
| 1.4.2 Historique de Lean six sigma . . . . .                          | 9         |
| 1.4.3 Principe de Lean six sigma . . . . .                            | 10        |
| 1.4.4 Technique, Méthode, Outils et domaines d'application . . . . .  | 10        |
| 1.4.5 Différence entre Lean, six sigma . . . . .                      | 11        |
| 1.5 Conclusion . . . . .  | 11        |
| <b>2 La démarche DMAIC . . . . .</b>                                  | <b>12</b> |
| 2.1 Introduction . . . . .  | 13        |
| 2.2 La démarche DMAIC . . . . .                                       | 13        |
| 2.2.1 Phase Définir . . . . .   | 14        |
| 2.2.2 Phase Mesurer . . . . .   | 17        |
| 2.2.3 Phase Analyser . . . . .  | 20        |
| 2.2.4 Phase Innover . . . . .   | 21        |
| 2.2.5 Phase Contrôler . . . . .                                       | 23        |
| 2.3 Etat de l'art : DMAIC pour l'amélioration des processus . . . . . | 24        |
| 2.4 Conclusion . . . . .  | 26        |
| <b>3 Apprentissage automatique . . . . .</b>                          | <b>29</b> |
| 3.1 Introduction . . . . .  | 30        |
| 3.2 L'intelligence artificielle . . . . .                             | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.2.1    | Définition . . . . .  | 30        |
| 3.2.2    | Évolution . . . . .   | 31        |
| 3.3      | Machine Learning . . . . .  | 32        |
| 3.3.1    | Définition . . . . .  | 32        |
| 3.3.2    | Catégories de l'apprentissage automatique . . . . .                         | 32        |
| 3.3.3    | Les principales étapes pour appliquer l'apprentissage automatique . . . . . | 34        |
| 3.4      | Les nouvelles technologies et DMAIC . . . . .                               | 35        |
| 3.5      | Conclusion . . . . .  | 36        |
| <b>4</b> | <b>Etude de l'existant . . . . .</b>  | <b>38</b> |
| 4.1      | Introduction . . . . .  | 39        |
| 4.2      | Environnement de l'étude . . . . .  | 39        |
| 4.2.1    | Description de l'unité de production . . . . .                              | 39        |
| 4.2.2    | Gestion de production . . . . .   | 39        |
| 4.3      | Notions de base pour comprendre le temps de set up . . . . .                | 39        |
| 4.3.1    | Nettoyage dans le secteur agroalimentaire . . . . .                         | 39        |
| 4.3.2    | La stérilisation dans le secteur agroalimentaire . . . . .                  | 42        |
| 4.3.3    | Facteur influent sur Nettoyage et stérilisation . . . . .                   | 43        |
| 4.3.4    | Le processus de set up : . . . . .  | 44        |
| 4.4      | Énoncé de la problématique . . . . .  | 44        |
| 4.5      | Conclusion . . . . .  | 44        |
| <b>5</b> | <b>Déploiement de la démarche DMAIC . . . . .</b>                           | <b>45</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .  | 46        |
| 5.2      | Phase 1 : Définir . . . . .   | 46        |
| 5.2.1    | Identification des CTQ . . . . .  | 46        |
| 5.2.2    | Détermination des limites de projet . . . . .                               | 47        |
| 5.2.3    | Cartographie de processus étudié . . . . .                                  | 48        |
| 5.2.4    | Charte de projet . . . . .  | 49        |
| 5.3      | Phase 2: Mesurer . . . . .  | 51        |
| 5.3.1    | Vérification du système de mesure . . . . .                                 | 52        |
| 5.3.2    | Collecte de données . . . . .   | 52        |
| 5.3.3    | Etude de capabilité . . . . .   | 53        |
| 5.4      | Phase 3: Analyser . . . . .   | 57        |
| 5.4.1    | Analyse des données . . . . .   | 57        |
| 5.4.2    | Identification des causes racines . . . . .                                 | 60        |
| 5.5      | Phase 4: Innover . . . . .  | 65        |
| 5.5.1    | Élaboration des solutions . . . . .   | 66        |
| 5.5.2    | Sélection des solutions . . . . .   | 67        |
| 5.5.3    | Implémentation de la solution . . . . .                                     | 69        |
| 5.6      | Phase 5: Contrôler . . . . .  | 73        |
| 5.7      | Conclusion . . . . .  | 74        |
|          | <b>Conclusion et perspectives . . . . .</b>                                 | <b>75</b> |
| 5.8      | Conclusion générale . . . . .   | 76        |
|          | <b>Bibliographie . . . . .</b>  | <b>78</b> |

|   |     |
|---|-----|
| Annexes . . . . .                               | 83  |
| A Boite à outils du Lean et six sigma . . . . . | 84  |
| B Présentation de l'entreprise . . . . .        | 88  |
| C Documentation de processus . . . . .          | 90  |
| D Apprentissage non supervisé . . . . .         | 95  |
| E Apprentissage supervisé . . . . .             | 98  |
| F Interface graphique . . . . .                 | 102 |
| G Métriques d'évaluation . . . . .              | 106 |
| H Indices de capacité et performances . . . . . | 107 |
| Résumé . . . . .                                | 109 |

# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Maison du Lean [55]  | 5  |
| 1.2  | Historique de Six Sigma                                      | 7  |
| 1.3  | Réduction de la variabilité par six sigma [41]               | 8  |
| 1.4  | Évolution de LSS [38]  | 9  |
| 1.5  | Domaines fonctionnels d'application du Lean Six Sigma[17]    | 10 |
| 2.1  | Les étapes de la démarche DMAIC                              | 13 |
| 2.3  | Diagramme de flux  | 15 |
| 2.4  | Cartographie SIPOC   | 16 |
| 2.5  | Rapport récapitulatif avec Minitab                           | 18 |
| 2.7  | Test d'adéquation de l'ajustement                            | 19 |
| 2.8  | Analyse de capabilité avec Minitab                           | 20 |
| 2.9  | Exemples d'outils de représentation graphique des données    | 21 |
| 2.10 | Exemple de diagramme Ishikawa                                | 22 |
| 2.11 | Exemple de la matrice Pick                                   | 23 |
| 2.12 | Exemple de Carte de contrôle                                 | 24 |
| 3.1  | Définition de l'intelligence artificielle [18]               | 30 |
| 3.2  | Les événements marquant dans l'histoire de l'IA              | 31 |
| 3.3  | Les branches de l'IA [12]                                    | 31 |
| 3.4  | Les catégories de l'apprentissage automatique                | 32 |
| 3.5  | Les étapes de ML   | 34 |
| 3.6  | Résumé de l'intégration des technologies avec Lean six sigma | 35 |
| 4.1  | Ligne de production petit format                             | 40 |
| 4.2  | La station multi-usages NEP de Tchiv Lait                    | 41 |
| 5.1  | Diagramme CTQ  | 47 |
| 5.2  | Diagramme SIPOC  | 49 |
| 5.3  | Processus de set up  | 49 |
| 5.4  | Processus de nettoyage de l'échangeur thermique              | 49 |
| 5.5  | Processus de nettoyage de la machine conditionneuse          | 50 |
| 5.6  | Processus de nettoyage de tank de stockage                   | 50 |
| 5.7  | Processus de stérilisation de l'échangeur thermique          | 50 |
| 5.8  | Processus de stérilisation de la conditionneuse              | 50 |
| 5.9  | Processus de stérilisation de tank de stockage               | 51 |
| 5.10 | Charte de projet   | 51 |
| 5.11 | Exemple de liste des évènements                              | 53 |
| 5.12 | Test de normalité  | 54 |



|      |  |     |
|------|--|-----|
| 5.13 | Test d'adéquation de l'ajustement . . . . .  | 54  |
| 5.14 | Test des valeurs aberrantes . . . . .  | 55  |
| 5.15 | Analyse de capacité pour temps transformé pour ligne 3 et 4 . . . . .                              | 55  |
| 5.16 | Diagramme de Gantt de processus de set up . . . . .  | 57  |
| 5.17 | Diagramme Pareto pour les causes de retard de ligne 3 . . . . .                                    | 59  |
| 5.18 | Diagramme Pareto pour les causes de retard de ligne 4 . . . . .                                    | 60  |
| 5.19 | Diagramme Ishikawa pour la cause "station CIP occupée" . . . . .                                   | 61  |
| 5.20 | Diagramme Ishikawa pour la cause "Échangeur thermique" . . . . .                                   | 62  |
| 5.21 | Diagramme Ishikawa pour la cause "Arrêt programme" . . . . .                                       | 63  |
| 5.22 | Diagramme Ishikawa pour la cause "Attente process" . . . . .                                       | 65  |
| 5.23 | Matrice Pick des solutions proposées . . . . .   | 69  |
| 5.24 | Échangeur thermique [5] . . . . .  | 69  |
| 5.25 | Représentation des variables utilisées pour l'apprentissage supervisé . . . . .                    | 70  |
| 5.26 | Extrait de l'ensemble des données télécharger . . . . .  | 70  |
| 5.27 | Nature de données . . . . .  | 71  |
| 5.28 | Description de données . . . . .   | 71  |
| 5.29 | L'ensemble de données après la création de variable "target" . . . . .                             | 72  |
|      |  |     |
| B.1  | Logo de l'entreprise . . . . .   | 88  |
| B.2  | Organigramme de l'entreprise et le service de Production . . . . .                                 | 89  |
|      |  |     |
| D.1  | Identification et suppression des valeurs aberrantes avec le logiciel WEKA . . . . .               | 95  |
| D.2  | Les bibliothèques utilisées . . . . .  | 96  |
| D.3  | Préparation des données . . . . .  | 96  |
| D.4  | Analyse des données . . . . .  | 96  |
| D.5  | Normalisation des données . . . . .  | 97  |
| D.6  | Entraînements de modèle isolation forest . . . . .   | 97  |
| D.7  | Enregistrement de nouveau dataset . . . . .  | 97  |
|      |  |     |
| E.1  | Les bibliothèques utilisées . . . . .  | 98  |
| E.2  | Préparation des données . . . . .  | 98  |
| E.3  | Analyse des données . . . . .  | 99  |
| E.4  | Matrice de Corrélation . . . . .   | 99  |
| E.5  | Entraînement, évaluation et optimisation de modèle de l'algorithme arbres<br>de décision . . . . . | 99  |
| E.6  | Les bibliothèques utilisées . . . . .  | 100 |
| E.7  | Entraînement, évaluation et optimisation des autres modèles . . . . .                              | 100 |
| E.8  | Optimisation des algorithmes . . . . .   | 101 |
|      |  |     |
| F.1  | Code l'interface graphique . . . . .   | 103 |
| F.2  | l'interface graphique 1 . . . . .  | 104 |
| F.3  | l'interface graphique 2 . . . . .  | 104 |
| F.4  | l'interface graphique 3 . . . . .  | 105 |
| F.5  | l'interface graphique 4 . . . . .  | 105 |

# Liste des tableaux

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1    | Tableau des abréviations . . . . .  | X   |
| 1.1  | Comparaison entre Lean et six sigma . . . . .   | 11  |
| 2.1  | Les techniques et les méthodes utilisées dans chaque phase de DMAIC<br>selon les articles . . . . . | 27  |
| 3.1  | Les méthodes de ML complémentaires aux méthodes classiques [36] . . . . .                           | 37  |
| 5.1  | Analyse QQQQCCP . . . . .   | 48  |
| 5.2  | Calcul de %R et R . . . . .   | 52  |
| 5.3  | Rapport récapitulatif de la statistiques descriptives pour les deux lignes . . . . .                | 53  |
| 5.4  | Résumé de l'analyse de capabilité et performance de ligne 3 et 4 . . . . .                          | 56  |
| 5.5  | Explication des causes . . . . .  | 58  |
| 5.6  | Répartition des causes de retard pour la ligne 3 . . . . .  | 59  |
| 5.7  | Répartition des causes de retard pour la ligne 4 . . . . .  | 60  |
| 5.8  | Les solutions proposées pour la station CIP . . . . .   | 66  |
| 5.9  | Les solutions proposées pour attente process . . . . .  | 66  |
| 5.10 | Les solutions proposées pour l'échangeur thermique . . . . .  | 67  |
| 5.11 | Les solutions proposées pour la Conditionneuse . . . . .  | 67  |
| 5.12 | Description des variables utilisées dans l'analyse des échangeurs thermiques . . . . .              | 71  |
| 5.13 | Les résultats d'évaluation des algorithmes selon divers métriques . . . . .                         | 73  |
| 5.14 | Les résultats d'évaluation des algorithmes après L'optimisation . . . . .                           | 73  |
| A.1  | Méthodes, Techniques et outils du Lean . . . . .  | 85  |
| A.2  | Méthodes, Techniques et outils de six sigma . . . . .   | 86  |
| C.1  | Documentation de processus . . . . .  | 91  |
| H.1  | Indices de performance et leurs formules . . . . .  | 107 |
| H.2  | Indices de capabilité et leurs formules . . . . .   | 108 |

# Liste des abréviations

Les principales notations et abréviations utilisées dans ce rapport sont détaillées dans le Tableau 1.

TAB. 1 : Tableau des abréviations

|           |   |
|-----------|---|
| ACP       | Analyse en composantes principales.   |
| Adaboost  | adaptive boosting.  |
| ANOM      | Analyse des moyennes.   |
| ANOVA     | Analyse de la variance.   |
| AMDE/FMEA | Analyse des modes de défaillance et de leurs effets/Failure Mode and Effect Analysis. |
| Cp        | Indice de capabilité du procédé.  |
| Cpk       | Indice de capabilité réel.  |
| Cpm       | Indice de capabilité centré.  |
| CTQ       | Critique pour la qualité (Critical to quality).                                       |
| DMADV     | Définir, Mesurer, Analyser, Concevoir, Vérifier.                                      |
| DFSS      | Design For Six Sigma.   |
| DMAIC     | Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler.                                     |
| DMAICS    | Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Contrôler, Standardiser.                       |
| DPMO      | Défauts par million d'opportunités.   |
| DT        | Arbre de décision/Data trees.   |
| UHT       | Ultra haute température.  |
| NEP / CIP | Nettoyage En Place (Clean-In-Place).  |
| COP       | Nettoyage hors place.   |

---

|       |   |
|-------|---|
| IA    | Intelligence artificielle.  |
| KNN   | K Nearest Neighbor/K plus proche voisin.  |
| LSS   | Lean Six Sigma.   |
| ML    | Machine learning / Apprentissage automatique .  |
| MSA   | Analyse du système de mesure (Measurement System Analysis ).  |
| PERT  | Technique d'évaluation et d'examen de programmes (Program Evaluation Review Technique).                     |
| Pp    | Indice de performance.  |
| Ppk   | Indice de performance réel.   |
| Ppm   | Indice de performance centré.   |
| PPM   | Part par million.   |
| PICK  | Possible, Implemente, Challenge, Kille.   |
| POS   | Procédure Opératoire Standard.  |
| RF    | Random Forest/Forêt aléatoire.  |
| SIPOC | Suppliers (fournisseurs), Inputs (entrées), Process (processus), Outputs (sorties), et Customers (clients). |
| SVM   | Support Vector Machine.   |
| VOC   | Voix de client (Voice of the customer).   |
| VSM   | La cartographie de la chaîne de valeur(Value Stream Mapping).   |
| 5S    | Trier, Ranger, Nettoyer, Standardiser, Maintenir.   |

# Introduction générale

Dans les industries agroalimentaires, cosmétiques et pharmaceutiques, l'hygiène est une condition cruciale pour assurer la conformité des produits. Pour cela, il est indispensable de nettoyer et stériliser les équipements de production de façon régulière, selon des fréquences définies et des protocoles variés. L'ensemble de ces tâches de nettoyage et de stérilisation est connu sous le nom de processus de set up. Ce dernier doit être réalisé dans un temps imparti afin de ne pas nuire à la continuité de la production.

L'entreprise laitière Tchén Lait, qui commercialise ses produits sous le label Candia, est confrontée à un défi majeur concernant le processus de set up. Les responsables de l'entreprise ont constaté des dépassements fréquents du temps alloué aux tâches de nettoyage et de stérilisation par rapport au temps exigé par le service de production. Cela affecte directement son rendement, sa gestion des stocks et la disponibilité de sa production. En effet, l'intégralité de la chaîne d'approvisionnement est fragilisée, rendant difficile toute sorte de planification. De plus, ces retards augmentent les pertes de l'unité de production en termes d'énergie, de temps et d'opportunités, car chaque minute perdue dans ces processus représente une opportunité manquée de produire de 200 à 400 unités de produits conformes.

Dans cette étude, nous nous attelons à résoudre ce problème en identifiant les causes profondes à l'aide de la démarche DMAIC (Définir - Mesurer - Analyser - Innover - Contrôler) dans le cadre de la philosophie Lean Six Sigma. Notre but est de réduire la variabilité des temps de set up et d'éliminer les gaspillages en nous concentrant exclusivement sur les activités constitutives du processus de set up.

Ce travail poursuit deux objectifs majeurs : tout d'abord, résoudre un problème concret rencontré par l'entreprise Tchén Lait, puis explorer la convergence des techniques innovantes de l'intelligence artificielle (IA) avec la démarche DMAIC. Ce projet est parmi les premiers de ce genre et pourrait ouvrir de nouvelles perspectives.

De plus, il apporte une contribution majeure en réduisant la variabilité des temps consacrés au processus de setup. Cette amélioration peut avoir un impact significatif sur l'efficacité opérationnelle, la qualité du produit et la satisfaction du client.

Nous avons développé ce travail sur cinq chapitres :

1. Le premier chapitre entame les fondements de la philosophie Lean Management, Six Sigma et Lean Six Sigma, leurs définitions, historiques et principes.

2. Le deuxième chapitre inclut une exploration détaillée de la démarche DMAIC et ses cinq phases. Pour chaque phase, on a présenté les diverses techniques qui existent pour réaliser les extrants nécessaires.
3. Le troisième chapitre explore les différentes branches de l'IA, en mettant l'accent sur l'apprentissage automatique. Il présente également des techniques alternatives basés sur cette branche qui peuvent remplacer les techniques traditionnelles de la démarche DMAIC.
4. Le quatrième chapitre présente notre problématique ainsi que des notions connexes et nécessaires pour la compréhension du problème.
5. Le cinquième chapitre présente la mise en œuvre pratique de la démarche DMAIC dans le cadre de l'étude et détaille les étapes de chaque phase de la démarche. La solution réalisée est basée sur l'apprentissage automatique et permet de diminuer de 15% les causes racines des retards dus au processus de set up.

# Chapitre 1

## Les fondements du Lean Six Sigma

### 1.1 Introduction

”Je suis fréquemment rembarré par des personnes qui me disent qu’elles sont trop occupées pour faire de l’amélioration. Je réponds en leur disant qu’elles seront trop occupées jusqu’à leur mort, ou jusqu’à ce que leur entreprise fasse faillite » Shigeo Shingo - Ingénieur industriel japonais. À cet égard, nous soulignons l’importance de l’action de rendre meilleur et d’évoluer vers le mieux. Ce fait d’amélioration, accompagné par la continuité, est très important car il favorise l’innovation et permet d’atteindre des niveaux d’efficience et d’efficacité plus élevés.

Dans ce chapitre, on doit présenter trois concepts fondamentaux appliqués par les entreprises pour atteindre des niveaux spectaculaires de qualité des produits et des processus. Nous commencerons par le Lean management, dont les origines remontent aux années 1950. Nous aborderons ensuite la méthodologie Six Sigma, qui a émergé trente ans plus tard. Enfin, nous explorerons la combinaison de ces deux méthodes dans le cadre du Lean Six Sigma.

### 1.2 Lean Management

#### 1.2.1 Définition

Une simple définition du Lean par Radu Demetrescoux” Un système qui cherche à satisfaire le client en utilisant le moins de ressources possible, ou en supprimant en permanence les gaspillages”[50]. Les gaspillages se présentent sous trois formes distinctes, qu’Ohno appela communément les « 3 Mu » : [14]

- Muda représente le gaspillage et se traduit directement du japonais par ”futilité” ou ”inutilité”.
- Mura est le concept de gaspillage dans le sens de l’inégalité. L’inégalité dans le flux de travail signifie des temps d’arrêt inutiles ou des périodes de stress inutile sur les équipements, les systèmes et la main-d’œuvre.
- Muri est le gaspillage créé par la surcharge ou par une méconnaissance des capacités.

L’image de la maison Lean, telle que présentée dans la Figure 1.1 , sert souvent d’outil pédagogique pour expliquer les concepts clés du Lean.



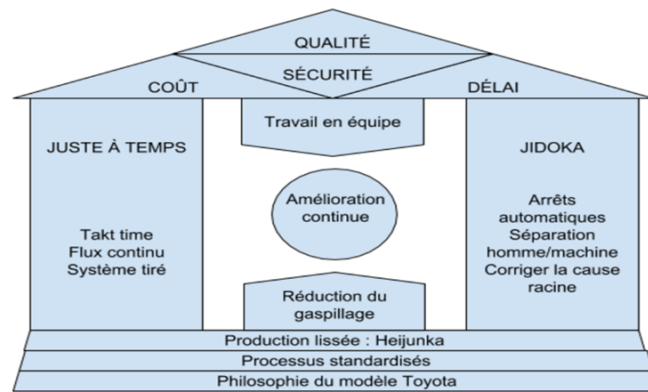


FIG. 1.1 : Maison du Lean [55]

### 1.2.2 Histoire et évolution

Les industries japonaises ont été confrontées à la récession après la Seconde Guerre mondiale en repensant leur entreprise. Dans ce contexte économique, Taiichi Ohno, un ingénieur industriel japonais et le dirigeant de Toyota, a développé un concept visant à diminuer les dépenses de production : le Toyota Production System (TPS). La base de ce concept est un système de production « au plus juste » qui est suffisamment souple pour s'ajuster aux variations des commandes des clients [22]. C'est en 1987 que cette nouvelle approche de pensée fut connue en Europe sous le nom de « Lean » créé par le Massachusetts Institute of Technology (MIT). Le concept de "Lean" est apparu pour la première fois dans « The machine that changed the world » en automne 1990.

La philosophie Lean apparaît alors comme une voie de progrès pour l'ensemble des industriels occidentaux et se généralise par la suite. Le Lean Manufacturing devenant ainsi l'un des principes de base pour toutes les entreprises dans le monde [41].

### 1.2.3 Principe du Lean management

Les principes du Lean ont été identifiés pour guider les organisations de tous les secteurs de l'économie, y compris les services, dans leur transformation [57] :

#### **Principe 1 : Spécifier la Valeur**

La valeur ne peut être définie que par le client final, en termes de produit (bien ou service) répondant à ses besoins à un certain prix et à un certain moment, en d'autres termes, déterminez ce que les clients valorisent (spécifiquement, ce pour quoi ils sont prêts à payer) dans le produit ou le service.

#### **Principe 2 : Identifier le Flux de Valeur**

Le flux de valeur est les processus de création, de production et de prestation d'un bien ou d'un service sur le marché, c'est l'identification de l'ensemble des étapes nécessaires pour amener un produit spécifique du concept au lancement, de la commande à la livraison, et des matières premières au client final, tout en identifiant et en éliminant les parties qui n'apportent aucune valeur. Ce principe est axé sur l'identification, la catégorisation et l'élimination des « muda » (gaspillages) le long de la chaîne de valeur. En fait, il existe huit types de « muda » [51] :

1. Surproduction : produire plus que la demande exigée par le client.
2. Temps d'attente : attendre inutilement ce qui signifie l'attente des produits dans un processus pour être traités ou consommés.
3. Transports et manutentions inutiles : transporter sans que le transport ait une réelle utilité.
4. Usinages inutiles ou mal fait : fabriquer des produits qui ne répondent pas aux caractéristiques exigées par la clientèle
5. Stock excédentaires : Stocker des quantités supérieures à la quantité nécessaire pour l'étape suivante du processus de fabrication.
6. Gestes inutiles : Réaliser des mouvements inutiles pour l'exécution du travail.
7. Production de pièces défectueuses : Fabriquer des produits défectueux ou devant être rectifiés
8. Créativité inexploitée : Perdre du temps, des idées, des compétences en ne prenant pas en compte les idées des employés.

### ***Principe 3 : Flux***

Sert à créer un flux continu en sorte que les étapes créatrices de valeur s'enchaînent de manière continue, sans interruption, délai ou attente entre elles. De plus, assurer une circulation fluide des produits et des informations du début à la fin du flux de valeur.

### ***Principe 4 : Flux tiré***

Permettre au client final de tirer la production du produit désiré quand il le souhaite, au lieu de pousser des produits vers le client autrement dit ne livrer que ce qui est réellement demandé (tiré) par le client plutôt que de servir à partir de stocks.

### ***Principe 5 : Perfection***

Chercher continuellement à améliorer les processus et les systèmes, en réduisant les efforts, le temps, l'espace, les coûts et les erreurs tout en proposant un produit toujours plus proche des attentes du client.

## 1.2.4 Concepts et application

Le concept Lean remonte au secteur de l'industrie automobile chez Toyota, il s'est aujourd'hui étendu à divers domaines d'activité. La pensée Lean continue de se propager à l'échelle mondiale et d'évoluer, avec des leaders adaptant ses outils et principes au-delà de la simple fabrication. Cette expansion englobe désormais des secteurs tels que la logistique, la distribution, les services, la vente au détail, la santé, la maintenance et même l'administration, comme souligné par [32]. Le Tableau A.1 dans l'annexe A regroupe diverses méthodes, techniques et outils du Lean en fonction de leur contribution à la mise en œuvre du Lean Management.

### 1.3 Six Sigma

#### 1.3.1 Définition

Est une approche méthodique et rigoureuse qui s'inspire de la science pour améliorer les systèmes de management et les processus d'entreprise. En favorisant la réduction des erreurs et la variabilité, elle permet aux employés de fournir une valeur optimale aux clients et aux propriétaires [9].

Les principaux objectifs de Six Sigma s'articulent autour de deux aspects principaux :

- Améliorer la rentabilité de l'entreprise
- Élever les niveaux de satisfaction des clients.

#### 1.3.2 Histoire et évolution

Six Sigma ne se limitent pas à être simplement une méthode, elle représente également un système de gestion focalisé sur une méthodologie robuste de résolution de problèmes et d'optimisation des processus. Conçue par Mikel Harry chez Motorola au milieu des années 80, cette approche n'a réellement gagné en notoriété qu'en 1995, lorsque Jack Welch, président de General Electric, l'a intégrée au cœur de la stratégie d'entreprise. Depuis lors, de nombreuses entreprises ont exprimé leur adhésion à l'approche Six Sigma, comme mentionné par Bounazef en 2012 [17]. Un aperçu est montré dans la Figure 1.2 des années d'adoption par quelques entreprises clés :

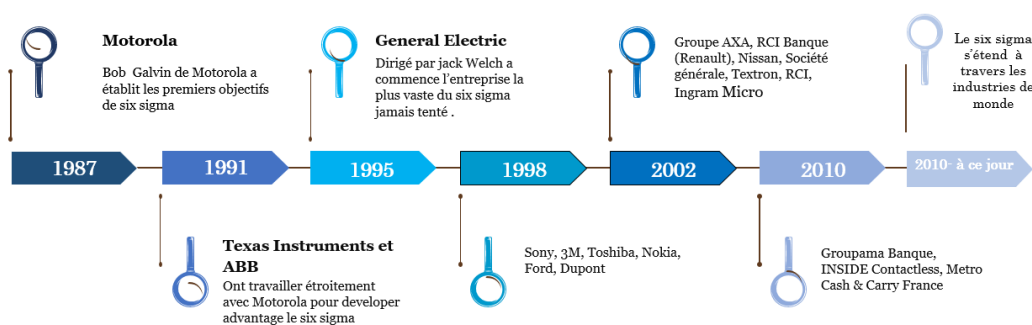


FIG. 1.2 : Historique de Six Sigma

#### 1.3.3 Principe de Six sigma

L'application de Six Sigma se base sur des principes et techniques de qualité éprouvés et elle vise à propulser les performances commerciales vers des sommets inatteignables. Au cœur de Six Sigma réside la notion de "sigma" ( $\sigma$ ), une lettre grecque utilisée dans la

statistique pour mesurer la variabilité d'un processus. Le niveau sigma d'une entreprise devient ainsi un indicateur précieux de sa performance globale. Plus le niveau sigma est élevé, plus la qualité des processus est irréprochable. L'ambition ultime de Six Sigma est d'atteindre un niveau sigma exceptionnel, synonyme d'une excellence opérationnelle quasi parfaite [9].

### 1.3.4 Concepts et application

#### Concepts de six sigma

Il en ressort également différentes dimensions : [41][45]

- Une dimension stratégique : Six sigma est tourné vers l'obtention d'un avantage compétitif.
- Une dimension « philosophique » d'amélioration de la qualité tournée vers la satisfaction du client : Six Sigma est une méthodologie conçue pour améliorer simultanément la rentabilité de l'entreprise et la satisfaction des clients. Même si les objectifs semblent clairs, leur mise en œuvre concrète nécessite une approche rigoureuse. Des nombreuses entreprises commettent l'erreur d'investir dans des améliorations inutiles tout en ignorant les fonctionnalités dont les clients ont réellement besoin. Pour éviter cet écueil, Six Sigma s'appuie sur l'approche DMAICS (Définir, Mesurer, Analyser, Innover/Améliorer, Contrôler, Standardiser).
- Une dimension statistique : Six sigma fait référence à la notion de variabilité et d'écart type.

**La variabilité :** Le principe fondamental de Six Sigma est que la variabilité est l'ennemi de la qualité, car toute variation dans les processus de fabrication ou de prestation conduit à des produits ou services de mauvaise qualité, compromettant ainsi la satisfaction des clients. Pour atteindre l'excellence Six Sigma, il est crucial de minimiser cette fluctuation (Figure 1.3) [41].

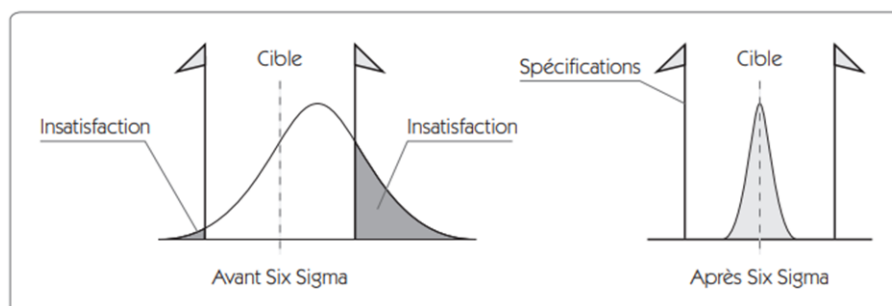


FIG. 1.3 : Réduction de la variabilité par six sigma [41]

**Niveau de qualité :** Afin de progresser il est nécessaire de mesurer le niveau de qualité actuel afin de se donner un objectif vérifiable. Le terme "Six Sigma" désigne donc le niveau de qualité que nous souhaitons atteindre. À titre d'exemple, le niveau de qualité « 6 Sigma » représente 3,4 DPMO (Défauts par million d'opportunités). Par conséquent, l'objectif de la méthodologie Six Sigma est d'atteindre un taux de non-conformité inférieur à 3,4 DPMO [41].

### La mise en œuvre de Six Sigma

La méthode Six Sigma intègre de nombreuses méthodes, techniques, outils et indicateurs pour optimiser la résolution des problèmes et assurer le contrôle statistique [55]. Le Tableau A.2 dans Annexe A présente les méthodes, les techniques et les outils du Lean Six Sigma, en détaillant la fonction de chaque élément.

## 1.4 Lean Six Sigma

### 1.4.1 Définition

Une approche large d'amélioration continue adoptée par de nombreuses organisations. Elle intègre un ensemble de méthodes, d'outils et de techniques provenant de divers horizons. Elle comprend des éléments de : la pensée Lean (Lean Thinking), Six Sigma, la gestion du changement, et la transformation digitale [40].

Le LSS permet aux entreprises de gagner un avantage concurrentiel en devenant plus rapides, meilleurs et moins coûteux que leurs concurrents. Lean permet aux entreprises d'économiser plus de temps pour répondre aux demandes des clients. Six Sigma aide à trouver et à corriger les erreurs, les fautes et les défauts liés à tous les aspects de la livraison conformément aux exigences du client. Ils forment un ensemble puissant d'outils pour maximiser la productivité, la rentabilité et la croissance [24].

### 1.4.2 Historique de Lean six sigma

La Figure 1.4 illustre l'évolution de la méthodologie LSS au fil des décennies. Elle met en évidence deux branches distinctes qui se sont finalement combinées pour donner naissance à la méthodologie Lean Six Sigma moderne.

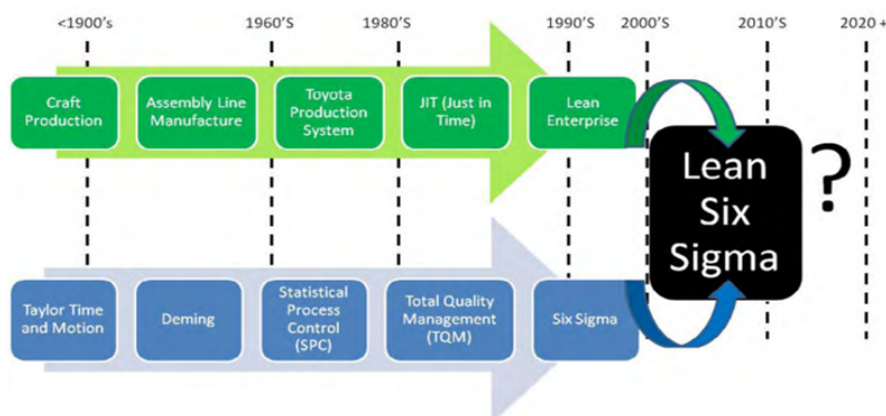


FIG. 1.4 : Évolution de LSS [38]

### 1.4.3 Principe de Lean six sigma

Le LSS fusionne les caractéristiques distinctes du Lean et du Six Sigma pour créer un ensemble cohérent de sept principes qui sont : [25]

- Se concentrer sur le client : Identifier les éléments critiques pour la qualité (CTQ) selon la perspective du client et améliorer la performance pour conserver les affaires.
- Identifier et comprendre comment le travail est réalisé : Cartographier le flux de valeur et observer directement sur le terrain pour identifier les problèmes et opportunités d'amélioration.
- Gérer, améliorer et lisser le flux de processus : Identifier et éliminer les obstacles qui entravent le flux de travail. De plus, adopter le flux de pièces unique pour réduire les retards et minimiser les stocks en cours.
- Éliminer les étapes à non valeur ajoutée et le gaspillage.
- Gérer par les faits et réduire la variation : Utiliser des données précises pour prendre des décisions éclairées, puis réduire la variation dans le processus pour améliorer la fiabilité.
- Impliquer et équiper les personnes dans le processus d'amélioration.
- Entreprendre des activités d'amélioration de manière systématique : Utiliser une approche méthodique comme DMAIC pour l'amélioration des processus.

### 1.4.4 Technique, Méthode, Outils et domaines d'application

#### Technique, Méthode, Outils du Lean six sigma

Ils sont généralement organisés en fonction de leur application aux différentes étapes du processus DMAIC [32]. Ils seront détaillés dans le chapitre 2.

#### Domaines d'application de Lean six sigma

Dans nos jours, LSS s'applique à tous les domaines fonctionnels illustré dans la Figure 1.5 :

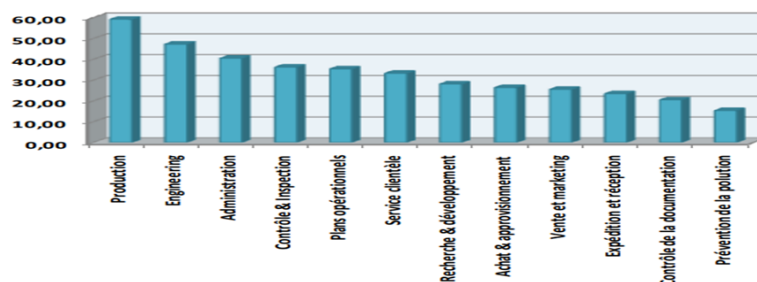


FIG. 1.5 : Domaines fonctionnels d'application du Lean Six Sigma[17]

### 1.4.5 Différence entre Lean, six sigma

Lean et Six Sigma sont tous deux des méthodologies d'amélioration, mais elles présentent des différences fondamentales importantes qui sont résumées dans le tableau 1.1 :

TAB. 1.1 : Comparaison entre Lean et six sigma

| Approche                      | Lean  | Six sigma   |
|-------------------------------|---|---|
| <b>Focus</b>                  | Éliminer les pertes et le gaspillage et rendre les opérations plus fluides  | Résoudre de manière scientifique un problème de qualité dans les produits ou services en réduisant la variabilité et en améliorant la qualité                                   |
| <b>Méthodes et techniques</b> | Lean utilise divers outils visuel (5S, Kanban, VSM...) pour comprendre les flux et identifier puis éliminer les gaspillages   | Six sigma utilise plusieurs démarches (DMAIC, DMADV, DFSS). Ainsi que les outils statistiques.  |
| <b>Applications</b>           | Le Lean est fréquemment employé dans les milieux de production et de fabrication, mais il peut également être appliqué à différents domaines afin d'améliorer les processus de flux de travail. | Les industries où la précision et la réduction des défauts sont essentielles, telles que la fabrication, les services financiers et la santé, font largement appel à Six Sigma. |

## 1.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté trois concepts fondamentaux que les entreprises peuvent adopter pour atteindre l'excellence opérationnelle : le Lean Management, Six Sigma et le LSS. Le Lean Management vise à éliminer les gaspillages et optimiser le flux de valeur pour le client. Six Sigma se concentre sur la réduction de la variabilité et l'amélioration de la qualité par une approche rigoureuse basée sur les données et les statistiques. Le LSS combine les forces du Lean et de Six Sigma pour une approche globale d'excellence opérationnelle axée sur la satisfaction du client. En fusionnant l'élimination des gaspillages, l'optimisation des flux et la réduction de la variabilité, LSS permet d'obtenir des processus plus rapides, moins coûteux et de meilleure qualité. Chacune de ces approches, qu'elle soit le Lean, Six Sigma ou leur combinaison LSS, fournit des méthodes et des outils structurés permettant aux entreprises d'améliorer continuellement leurs processus, produits et services pour gagner un avantage concurrentiel durable.

## Chapitre 2

### La démarche DMAIC



## 2.1 Introduction

Le Lean Six Sigma (LSS) est une approche intégrée qui vise à réduire les gaspillages et les variabilités des processus. L'implémentation du LSS suit la démarche DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Control) qui constitue l'ossature du LSS. Il s'agit d'un programme d'amélioration structuré qui vise à améliorer les processus grâce à la collecte et à l'analyse de données [14]. Dans ce chapitre, nous présenterons les outils utilisés dans chaque étape de la méthode DMAIC. En nous basant sur des études de cas ayant appliqué cette démarche, nous cherchons à déterminer quels sont les outils, techniques et méthodes les plus utilisés pour améliorer les processus.

## 2.2 La démarche DMAIC

Dans cette section, nous présentons les phases de la démarche DMAIC montré dans la Figure 2.1 :

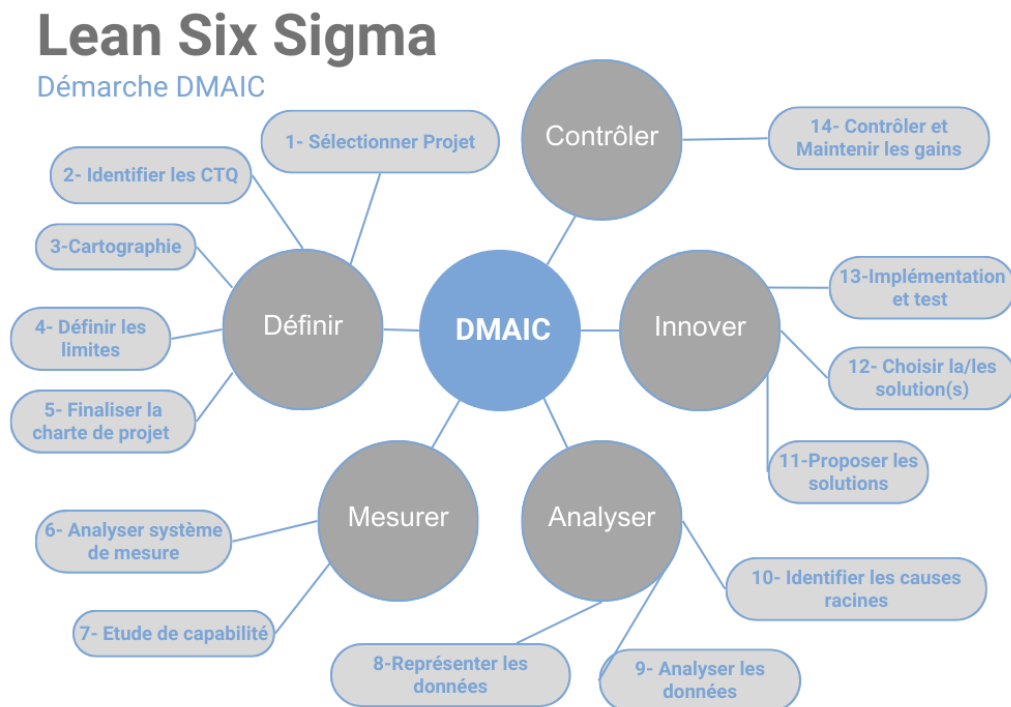


FIG. 2.1 : Les étapes de la démarche DMAIC

### 2.2.1 Phase Définir

#### But de la phase

Le but de cette étape est de déterminer les objectifs de l'activité d'amélioration ainsi que leur incorporation dans une charte de projet [9].

#### Liverable et extrait de la phase

Elle implique la production de plusieurs livrables et extraits essentiels pour cadrer le projet. Elle identifie les problèmes et les opportunités d'amélioration, et définit la stratégie à suivre. Parmi ces livrables on peut citer : [42][40]

- La charte de projet : Ce document formalise le projet, en précisant ses objectifs, sa portée (business case), ses délais, les ressources nécessaires, les rôles et responsabilités des parties prenantes...
- La cartographie de processus : Une représentation visuelle du processus cible permet d'identifier les différentes étapes, les acteurs impliqués, les points de décision et les flux de données. Elle sert à comprendre le fonctionnement actuel du processus et à cibler les zones d'amélioration potentielles.
- Les exigences critiques pour la qualité (CTQ) : Spécifications mesurables qui traduisent les besoins des clients en paramètres concrets que le processus doit respecter pour garantir la satisfaction du client.

#### Étapes et outils

1. **Sélectionner et valider le projet** : L'implémentation du LSS requiert une allocation considérable de ressources et d'économies (investissement). Il est donc essentiel d'évaluer et de donner la priorité aux projets potentiels afin de choisir le projet le plus adapté. Cette sélection rigoureuse permet d'optimiser l'utilisation des ressources et d'accroître les chances de succès du projet choisi [42].

Parmi les méthodes principales qui peuvent être employées afin de choisir le projet le plus prioritaire, on cite :

- Proposition de Pareto et Analyse multicritère.

En plus de la sélection du projet, cette étape comprend également des tâches essentielles telles que :

- Identification de l'équipe de travail et des parties prenantes.
- Clarifier les tâches et les responsabilités de chaque membre de l'équipe et établir un calendrier réaliste pour la réalisation du projet.
- Rédaction d'un premier brouillon de la charte du projet.

2. **Identifier les CTQ (critical to quality)** : Exigences critiques pour la qualité représente les différents paramètres et spécifications qui sont créés à partir des données recueillies auprès des clients (Voix du Client - VOC).

Les critères CTQ sont l'application concrète des besoins souvent flous ou mal définis

des clients [14].

### Outils

Il est essentiel d'écouter attentivement les clients afin d'identifier leurs besoins et leurs attentes. VOC constitue un outil précieux pour recueillir et analyser ces informations [42].

Les données VOC représentent les besoins du client. Une fois distillées en objectifs concrets, ces données brutes deviennent les exigences CTQ qui guident la définition et l'identification des défauts, ainsi que les spécifications de production. Les données de VOC peuvent être collectées de différentes manières, telles que les entretiens, les groupes de discussion, les observations sur le lieu d'utilisation et les enquêtes [14]. L'ensemble des exigences peuvent être présenté sous forme d'un tableau ou d'un arbre de CTQ illustré dans la Figure 2.2 :

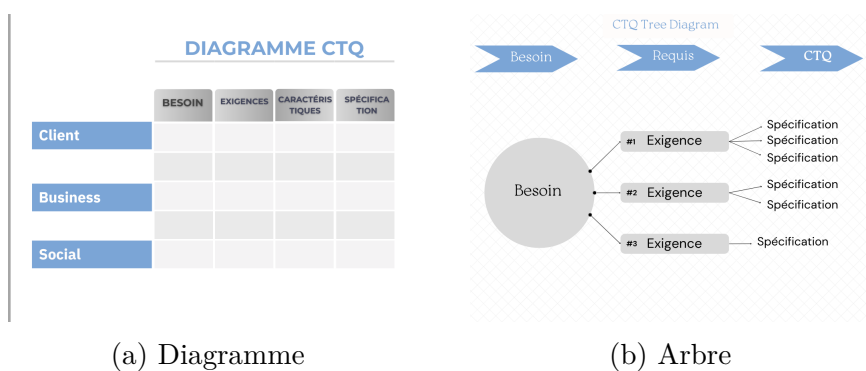


FIG. 2.2 : Diagramme et arbre CTQ

3. **Cartographier le processus** : La cartographie des processus implique simplement l'identification des différentes étapes du processus et l'utilisation de symboles graphiques. Un organigramme peut être interprété comme un idéal ou une perception plutôt que comme des étapes réelles [59].

**Outils** : Plusieurs outils permettent de cartographier un processus. Parmi les plus populaires, on trouve :

**Diagramme de flux** : C'est un outil qui vise à cartographier chaque processus simplement. La cartographie d'un processus, doit avoir un objectif en tête, et un rôle à la carte finale en tant qu'outil dans une optique d'amélioration globale de l'entreprise [14]. Un exemple d'un diagramme de flux est illustré dans la Figure 2.3 :

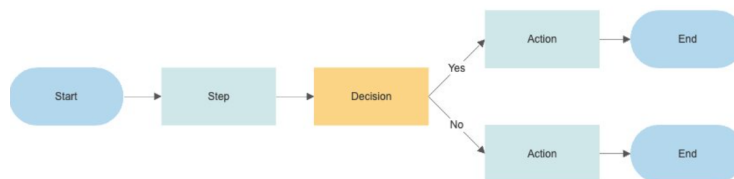


FIG. 2.3 : Diagramme de flux

De plus, Pour représenter des processus métiers, on peut utiliser le langage BPMN

(Business Process Model and Notation). Ce langage permet de représenter graphiquement les étapes du processus, les événements, les flux de séquence, les décisions et d'autres éléments clés d'un processus métier de manière plus détaillée et normalisée.

**Diagramme SIPOC (Supplier, Input, process, Output, Customer) :** Un SIPOC est une carte de processus de niveau supérieur qui offre un cadre pour nous aider à approfondir notre compréhension de processus, de clients et de fournisseurs. Il nous incite à prendre en compte ce qui doit être évalué dans le processus afin de saisir les performances et les opportunités d'amélioration [25]. Un exemple d'un diagramme SIPOC est illustré dans la Figure 2.4 :

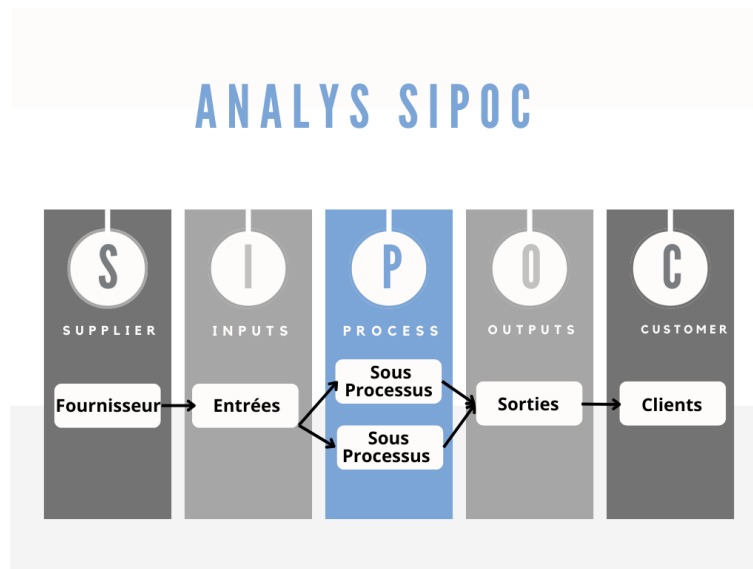


FIG. 2.4 : Cartographie SIPOC

4. **Définir les limites de projet :** Pour assurer le bon déroulement du projet six sigma, il faut délimiter le cadre et les limites de projet réalisés et pour cela plusieurs outils sont intégrés à titre d'exemple :

**Analyse QQQQCCP :** C'est l'outil qui incite à poser les questions correctes et à ne pas se contenter d'une solution triviale qui se révèle souvent être une fausse bonne idée [42].

**Quoi ?** Quel est le problème rencontré ?

**Qui ?** Qui sont les personnes ou les groupes concernés par le problème ?

**Où ?** Où se produit le problème ?

**Quand ?** Depuis quand le problème est-il apparu ?

**Comment ?** Comment se manifeste (se produit) le problème ?

**Combien ?** Combien pèse l'écart entre l'état cible et l'état actuel ?

**Pourquoi ?** Pourquoi ce projet est important ?

5. **Finaliser la charte de projet** La charte établit les raisons, les méthodes, les personnes et les moments d'un projet, et peut inclure les éléments suivants : [9]

**Définition du souci :** Le projet cherche à résoudre un problème ou une opportunité en donnant une description claire et concise.

**Le but du projet :** L'objectif du projet doit être clairement défini, incluant le besoin commercial auquel il répond.

**Portée :** Indiquer clairement les éléments qui sont inclus et exclus du projet.

**Composition de l'équipe :** Liste des membres de l'équipe de projet ainsi que de leurs fonctions.

**Planification du projet :** En général, les activités du projet sont planifiées en utilisant des diagrammes de Gantt ou de PERT.

**Business case :** qui est fourni par le Conseil de direction. C'est une justification du projet pour l'initiative Six Sigma. Elle offre une définition globale du problème identifié par la Ceinture Noire ou l'équipe, ainsi qu'une explication expliquant pourquoi ce projet spécifique devrait être une priorité commerciale majeure [54].

### 2.2.2 Phase Mesurer

#### But de la phase

Le but de cette étape est de vérifier les systèmes de mesures afin de garantir la fiabilité et la précision des données recueillies. De plus, établir les critères et les mesures requises pour évaluer les processus et leurs performances. Cela permet de mieux comprendre l'existant [9]. Ainsi, évaluer le processus à travers les données récoltées pour identifier les gaps de l'état actuel ainsi que les chutes de capacités [42].

#### Liverable et extrant de la phase :

Les extrants de cette phase : [42][40]

- Validation de système de mesure et accord sur le plan de collecte de données : Pour s'assurer que le système de mesure peut traduire les exigences et le niveau de satisfaction des clients.
- L'étude de capacité et performance : Pour connaître la performance réelle du système à long terme et à court terme.
- Valider les CTQ.
- La mesure de sortie (Y) et identification des mesures d'entrée (X).

#### Étapes et outils

##### Étapes

1. **Analyse de système de mesure (MSA Measurement System Analysis) :** Une fois que les CTQ ont été identifiés, il est nécessaire de trouver un critère d'évaluation pour les mesurer, ainsi que garantir la capacité de système de mesure à générer des données pertinentes. Le processus de mesure inclut quatre éléments essentiels (Main d'œuvre-Milieu-Mesurande Méthode) [42].

L'analyse du système de mesure est une approche mathématique qui permet d'identifier les fluctuations au sein du processus de mesure qui contribuent à la variabilité globale de celui-ci. Elle prend en considération les facteurs suivants : la justesse, la linéarité, la stabilité, la répétabilité et la reproductibilité [59].

L'une des techniques utilisées pour évaluer le processus de mesure est la méthode Gage RetR - répétabilité et reproductibilité-

La répétabilité représente la variation observée lorsque l'un et le même opérateur mesure la même chose à plusieurs reprises avec le même instrument, tandis que la reproductibilité correspond à la variation observée lorsque différentes personnes utilisent le même instrument pour évaluer la même chose [25].

2. **Etude de capacité** : On dit qu'un processus est capable lorsque la majorité (quasi-totalité) des mesures se confine aux limites de spécification [59]. Il existe plusieurs indices de capacité :

- Les indices de capacité (Cpk, Cp, Cpm) sont calculés à partir de la dispersion court terme. Tandis que les indices de performance (Ppk, Pp, Ppm) sont calculés à partir de la dispersion longue terme. [42]. L'ensemble de ces indices est expliqué dans les tableau H.1 et H.2 de l'annexe H.
- Défauts par million opportunité (DPMO)
- Le niveau de sigma : permet de déterminer le nombre de défauts qui se trouvent dans les limites des exigences du client [54].

**Outils** : L'analyse de capacité peut être fait facilement à l'aide de logiciel "Minitab" :

1. Importer les données dans Minitab.
2. Analyser les données : En réalisant un rapport récapitulatif 2.5, on peut avoir des calculs statistiques tels que la moyenne, écart type, médiane et des diagrammes tels que boîte à moustache.

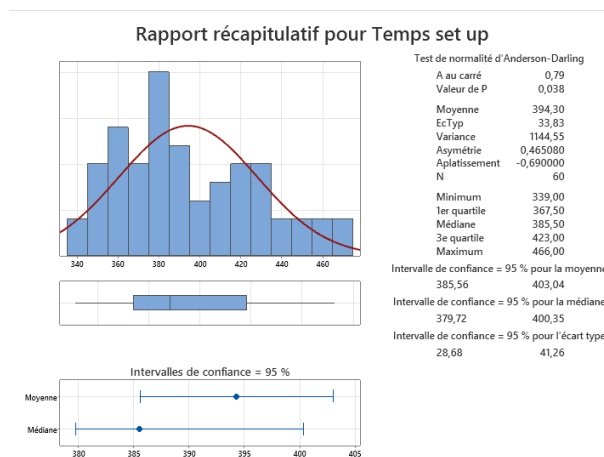


FIG. 2.5 : Rapport récapitulatif avec Minitab

3. Réaliser un test de normalité : Le test d'Anderson-Darling (2.6) est l'un des tests les plus utilisés pour vérifier si les données sont distribuées selon la loi normale. Si la valeur de  $p > 0,005$  donc les critères mesurables suivent une loi normale. Sinon : les critères mesurables ne suivent pas une loi normale.

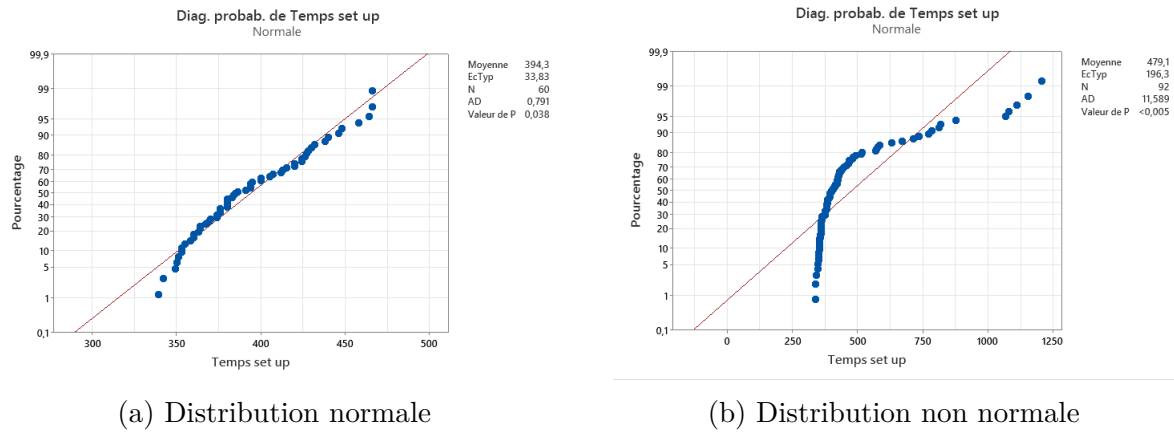


FIG. 2.6 : Test de normalité avec Minitab

4. Test d'adéquation de l'ajustement (cas des données qui ne suivent pas une loi normale) : Dans ce cas, on a deux solutions : [42]
- Transformer les données pour suivre une loi normale.
  - Utiliser une autre loi de distribution (loi bimodale, loi de Weibull, etc.).
- À titre d'exemple dans la Figure 2.7, on peut utiliser la transformation de Box-cox ou bien de Johnson. Ainsi que la loi exponentielle à deux paramètres ou Weibull à trois paramètres.

| Loi de distribution         | AD     | P      | Valeur de P LRT |
|-----------------------------|--------|--------|-----------------|
| Normale                     | 7,800  | <0,005 |                 |
| Transformation de Box-Cox   | 1,058  | 0,008  |                 |
| Log-normale                 | 5,233  | <0,005 |                 |
| Log-normale à 3 paramètres  | 0,248  | *      | 0,000           |
| Exponentielle               | 25,567 | <0,003 |                 |
| Exponentielle 2 paramètres  | 1,042  | 0,092  | 0,000           |
| Weibull                     | 8,270  | <0,010 |                 |
| Weibull 3 paramètres        | 0,934  | 0,020  | 0,000           |
| Plus petite valeur extrême  | 11,015 | <0,010 |                 |
| Plus grande valeur extrême  | 3,766  | <0,010 |                 |
| Gamma                       | 6,078  | <0,005 |                 |
| Gamma 3 paramètres          | 1,052  | *      | 0,000           |
| Logistique                  | 5,389  | <0,005 |                 |
| Log-logistique              | 3,649  | <0,005 |                 |
| Log-logistique 3 paramètres | 0,224  | *      | 0,000           |
| Transformation de Johnson   | 0,215  | 0,844  |                 |

FIG. 2.7 : Test d'adéquation de l'ajustement

5. À la fin on peut effectuer un analyse de capabilité (2.8) à court terme et à long terme avec les différents indices mentionnés précédemment.

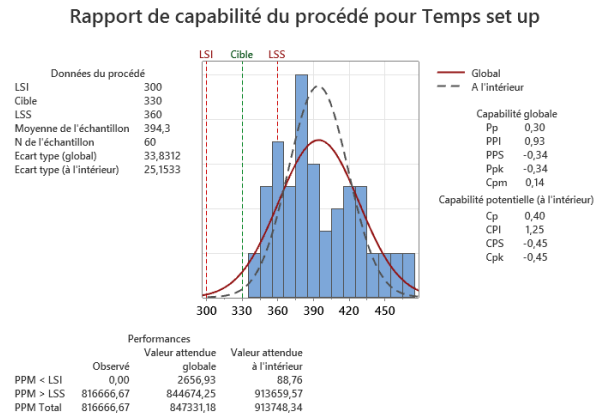


FIG. 2.8 : Analyse de capacité avec Minitab

### 2.2.3 Phase Analyser

#### But de la phase

Identification et vérification des causes racines affectant les variables clés d'entrée et de sortie liées aux objectifs du projet, autrement dit trouver les variables d'entrée X critiques [30].

#### Liverable et extrait de la phase

Les extraits de cette phase : [40]

- Identifier les sources de variation et les étapes non-valeur-ajoutées.
- Identification des causes racines.

#### Étapes et outils

1. **Visualisation et représentation des données** : Cette étape sert à traduire les données collectées à des représentations visuelles pour faciliter leurs interprétations.

##### Outils

Il existe divers outils pour représenter les données graphiquement. Parmi ces outils, on peut citer quelques exemples illustrés dans la Figure. 2.9 : [40] [42]

- Histogramme et histogramme à barres : il indique le nombre d'éléments d'une catégorie particulière qui ont été mesurés.
- Diagramme de Pareto : Selon la hiérarchie de Pareto, les problèmes sont classés de grande à petite, en prenant en compte le principe "80/20", 80% des problèmes sont causés par 20% des causes possibles.
- Boîte à moustache : utilisée pour représenter la distribution de la population.

2. **Analyser les données** : Des analyses statistiques peuvent être effectuées sur l'ensemble des données. Une analyse simple basée sur la statistique descriptive qui examine le centre, la forme et la dispersion des données. Elle permet également



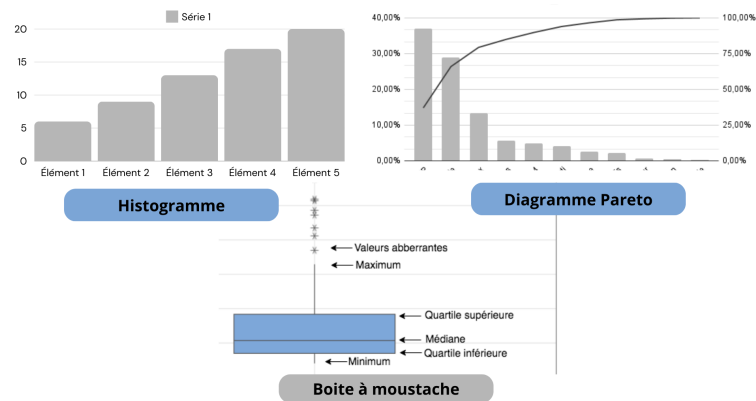


FIG. 2.9 : Exemples d'outils de représentation graphique des données

d'analyser l'impact des facteurs X sur le Y en exploitant les outils de la statistique inférentielle. La relation entre X et Y peut être identifiée par : les tests de comparaison (tel que test de khi-2, test Hartley...), l'ANVAR (Analyse de variance), les études de corrélation et les plans d'expérience [40] [42].

- 3. Identifier les causes racines** : Une étape essentielle consiste à déterminer les raisons profondes de la variabilité de notre système, et elle est en quelque sorte le résultat de la phase d'analyse qui doit être exploitée dans la prochaine étape afin de proposer des solutions pertinentes.

**Outils** : Parmi les outils utilisés dans cette étape :

- **Diagramme de cause à effet (Ishikawa/arête de poisson/5M)** : Le Dr Kaoru Ishikawa a développé une méthode simple illustrée dans la Figure 2.10 pour représenter graphiquement les causes de tout problème de qualité. Les diagrammes de cause à effet sont des outils utilisés pour organiser et afficher graphiquement toutes les connaissances qu'un groupe possède sur un problème particulier réparties dans des catégories déterminées [9].
- **Les 5 pourquoi ?** : Cette approche vise à encourager l'équipe à prendre du recul sur les causes profondes plutôt que de se limiter à des solutions superficielles qui ne résoudront pas le problème à long terme. Afin d'atteindre la source, il faut tout d'abord choisir n'importe quelle raison (à partir d'un diagramme cause-effet ou d'une barre haute sur un diagramme de Pareto). Ensuite, posez la question "pourquoi ce résultat survient-il" ? jusqu'à ce que vous atteignez une cause fondamentale éventuelle [30].

### 2.2.4 Phase Innover

#### But de la phase

Elle consiste à mettre en pratique les enseignements des pilotes de la ou de(s) solution(s) choisie(s) et mettre en place la solution à grande échelle [40] [30].

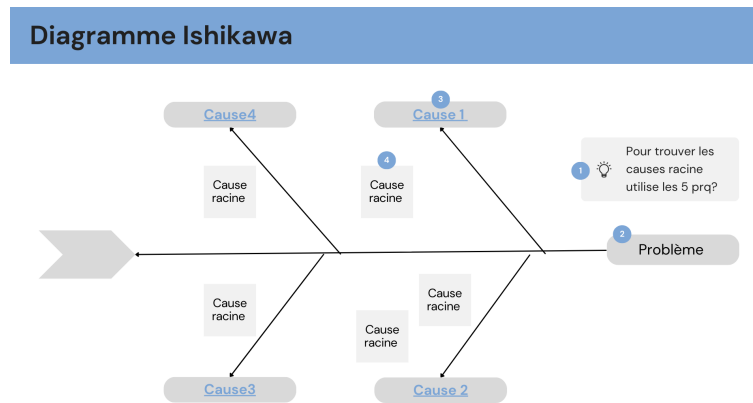


FIG. 2.10 : Exemple de diagramme Ishikawa

### Liverable et extrait de la phase

Les extraits de cette phase : [40] [42]

- Une liste des solutions est générée qui abordent réellement le problème.
- L'état futur du processus, la cartographie de la chaîne de valeur ou l'organigramme de déploiement.
- Présentation de l'étude coûts-avantages ainsi que l'étude des risques.
- Démonstration d'une méthode de sélection des solutions en utilisant, par exemple, une matrice de priorisation.
- Un plan pour l'implémentation des solutions.

### Étapes et outils

1. **Identifier les solutions possibles** : Avant de parvenir à la solution optimale, il faut d'abord générer, puis développer les idées. Ce travail généralement requiert un travail d'équipe où l'avis de chaque membre est important.

#### Outils :

Brainstorming (Déballage d'idées) : Une des méthodes les plus couramment employées pour produire des idées et des solutions. Elle consiste à rassembler un groupe pluridisciplinaire pour susciter la créativité par émulation [42] [25].

2. **Sélectionner les solutions à implémenter** : À la fin de la phase de génération des idées, un choix de la solution la plus faisable sera effectuée.

#### Outils :

Matrice Pick (Possible, Implement, Challenger, Kill) : Le schéma PICK (Figure 2.11) est l'une des méthodes les plus simples pour comparer ces solutions. Cela permet aux équipes de repérer l'effort nécessaire pour mettre en œuvre leurs idées et le type de répercussions qu'elles anticipent. Cette analyse permet d'évaluer les idées à mettre en œuvre, celles qui nécessitent davantage de travail et celles qui doivent être abandonnées. Le schéma divise les idées en quatre catégories : possible, réalisable, défiant et abandonnant [30].

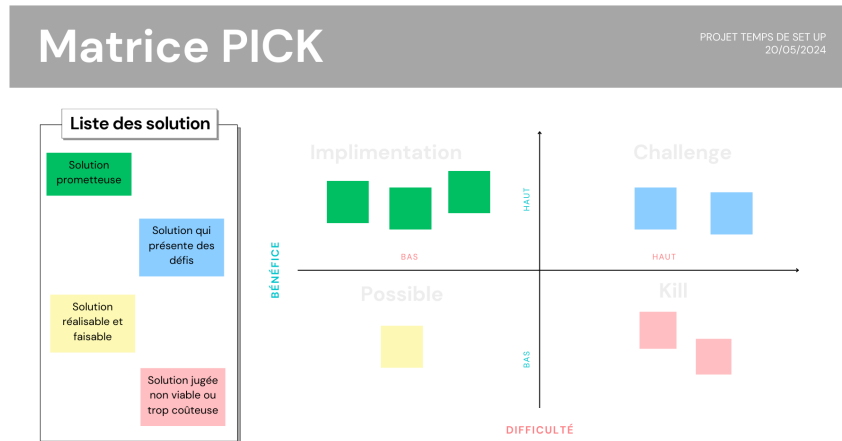


FIG. 2.11 : Exemple de la matrice Pick

3. **Tester et planifier les solutions** : La dernière étape consiste à passer à l'action et implémenter la solution choisie.

### 2.2.5 Phase Contrôler

#### But de la phase

Garantir que les solutions choisies sont mises en place conformément aux prévisions, qu'elles améliorent le processus et qu'elles peuvent être maintenues dans le temps et achever le travail du projet et transférer le processus amélioré au propriétaire du processus, avec des procédures pour maintenir les gains [40][30].

#### Liverable et extrant de la phase

Les extrants de cette phase : [30] [42]

- Un plan de suivi et de surveillance ainsi que des informations statistiques prouvent que le nouveau processus est "en bonne voie".
- Création d'un document de gestion du processus étudié, comprenant une cartographie de processus établie, un objectif précis axé sur le client reflétant les CTQ, un plan de collecte de données élaboré avec un équilibre adéquat entre les mesures des entrées X et le résultat Y, et un plan de réponse qui décrit les actions à entreprendre et les procédures à suivre à chaque étape du processus.
- Identification des principales leçons apprises.

#### Étapes et outils

**Contrôler et maintenir les gains** : Cette étape consiste à vérifier et surveiller statistiquement les processus et pour cela l'outil le plus fréquent est la carte de contrôle. Il est possible de la voir comme un graphique à série chronologique où les points de

données sont représentés dans l'ordre chronologique. Néanmoins, les cartes de contrôle illustrées dans la Figure 2.12 incluent des lignes supplémentaires (limites de contrôle) qui permettent d'interpréter les fluctuations des données. En somme, si des points sont en dehors des limites de contrôle, cela signifie qu'il y a une variation inhabituelle. Il est nécessaire d'enquêter immédiatement sur les événements qui se déroulent dans le processus [30].

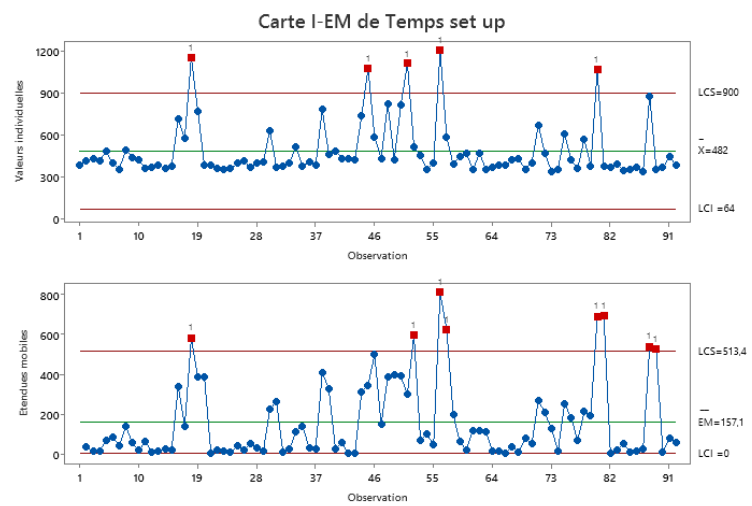


FIG. 2.12 : Exemple de Carte de contrôle

### 2.3 Etat de l'art : DMAIC pour l'amélioration des processus

Dans cette section, nous devons présenter les travaux ayant exploré l'utilisation de l'approche DMAIC dans le cadre des philosophies Six Sigma et Lean Six Sigma dans la littérature.

Trimarjoko et al.[2020] ont évalué la cohérence de l'application des étapes DMAIC en analysant les recherches de 2005 à 2019, ils ont conclu que 72% des études menées dans le secteur de la fabrication et 60% dans le secteur des services. Leur analyse a révélé que, dans le secteur de la fabrication, les problèmes étaient principalement causés par les facteurs 4M1E (Main d'œuvre, Matériel, Méthode, Machine, Environnement), alors que dans le secteur des services, les problèmes étaient souvent dus au comportement humain et à la mauvaise qualité des systèmes. [10].

Kowalik [2018] donne un exemple pour améliorer le processus d'un service client. Les résultats présentés dans l'article montrent que la méthodologie DMAIC trouve une application pratique dans l'amélioration des services [27].

Hassan et al.[2016] ont étudié l'application de la méthodologie LSS pour réduire les temps d'arrêt des machines, améliorer la productivité et la qualité des produits. En utilisant l'approche DMAIC, ils ont réussi à augmenter le niveau sigma à 2,85 [49].

De Jesús [2020] avait pour but l'amélioration des opérations des skids lors du processus de perfusion. Cependant, pour parvenir à cet objectif, une diminution d'au moins 6% le temps de traitement est requis. La mise en œuvre de la méthode DMAIC a permis de diminuer le temps de 10,43% [33].

Bhargava et al.[2021] avaient pour but l'amélioration de la qualité et la capacité du processus de fabrication des pièces de roulement en utilisant la méthodologie DMAIC. En conséquence, le niveau sigma a augmenté de 2,5 à 3,5 [53].

Dans l'étude de Patil et al.[2014] le processus étudié est un processus à usage spécial développé spécifiquement pour effectuer l'opération de rectification des faces sur les bagues intérieures et extérieures des roulements fabriqués. Par conséquent, l'objectif de l'étude était de minimiser le temps de changement de produit et de réduire l'écart de temps de cycle sans affecter la qualité du produit. Pour résoudre ces problèmes, la technique Six Sigma a été sélectionnée. L'utilisation de cette démarche a permis de réduire les temps de changement de produit par 42%[28].

Prabhakaran et al.[2020] ont travaillé pour améliorer la fabrication de comprimés. Afin de diminuer la perte de matériau lors de la fabrication de comprimés, la méthodologie DMAIC a été utilisée. En conséquence, la quantité moyenne de matériau économisée a été diminuée de 5,455 kg à 0,66 kg et le niveau sigma est passé de 3,68 à 4,07 [35].

Karandikar et al.[2014] ont employé la méthode DMAIC afin de diminuer le taux de rejet d'une ligne de production dans une entreprise spécialisée dans la fabrication de filtres. La mise en place de la démarche DMAIC a réussi et le processus de fabrication a amélioré ce qui a entraîné une augmentation du niveau sigma de 3,43 à 4,02 [58].

L'étude de González et al.[2023] a été menée au sein d'une société laitière pour l'objectif d'adopter la démarche DMAIC pour améliorer le nettoyage en place (NEP) et de diminuer la variation de la mesure de la conductivité, tout en augmentant l'efficacité du nettoyage de l'évaporateur. L'accent est mis principalement sur la mise en place et la surveillance de protocoles standardisés pour diverses tâches du NEP, ce qui peut permettre de réduire le problème de 33,5% [34].

L'article de Figueroa [2021] présente une étude qui a été réalisée dans une entreprise biopharmaceutique. Cette étude vise à réduire le temps de changement de ligne de remplissage. Son principal objectif est de combiner la recette NEP avec la recette de transfert de produit afin de réduire le temps de changement de ligne de remplissage des seringues et ceci à travers la méthode DMAIC. Après l'implémentation des actions correctives, les résultats estimés à atteindre le temps cible de changement de ligne, qui est de 4,75 heures, tout en améliorant l'efficacité et la flexibilité du processus [21].

Marin Alvarez [2021] à travers sa recherche voulait simplifier le processus de NEP et diminuer le temps nécessaire pour exécuter les recettes de NEP en regroupant les recettes

de rinçage et NEP en une seule transaction. L'application de la démarche DMAIC a permis d'atteindre cet objectif et de rendre les procédures de nettoyage plus simples et plus efficaces. En langage de chiffre, la durée totale a été réduite de 4,10 heures à 3,23 heures [39].

Le Tableau 2.1 présente les techniques et les méthodes associés à chaque phase de la démarche DMAIC, telles que décrites dans les articles mentionnés dans cette section. En analysant le tableau, on trouve que :

- La cartographie de processus et l'écoute de voix de client (VOC) sont prédominantes dans la phase Définir.
- Dans la phase Mesurer, l'analyse de capacité et les cartes de contrôle se démarquent, indiquant leur rôle crucial dans l'évaluation de la performance des processus.
- La phase Analyser privilégie le diagramme de cause à effet et le diagramme de Pareto, démontrant leur importance dans l'identification et la hiérarchisation des causes profondes des problèmes.
- La phase Innover fait appel principalement au Brainstorming, soulignant son efficacité pour générer des idées créatives et des solutions innovantes.
- Dans la phase de Contrôle, les cartes de contrôle et le plan de contrôle sont les techniques les plus utilisées, soulignant leur rôle clé dans le suivi des améliorations.
- Certains articles ne mentionnent pas de méthodes et techniques spécifiques pour certaines phases. De plus, les techniques et méthodes utilisées ne se limitent pas à une seule phase, par exemple, les cartes de contrôle sont utilisées à la fois dans les phases de mesure et de contrôle. Cela suggère une flexibilité dans l'approche.

## 2.4 Conclusion

Il existe une multitude d'outils performants pour chaque phase de la démarche DMAIC. Ces outils sont essentiels pour le succès du déploiement des projets LSS. De plus, l'application de la démarche DMAIC apparaît comme une méthode prometteuse pour définir et encadrer la problématique rencontrée, ainsi que pour évaluer la performance. Cela permet une meilleure compréhension de l'état actuel et facilite l'identification des écarts nécessaires pour atteindre les cibles fixées. Cependant, cela ne sera réalisable que si les causes profondes sont analysées et que des solutions pour les éliminer sont proposées et mises en œuvre.

TAB. 2.1 : Les techniques et les méthodes utilisées dans chaque phase de DMAIC selon les articles

| Article | Définir  | Mesurer  | Analyser   | Innover   | Contrôler   |
|---------|--|--|--|---|---|
| [27]    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Enquête</li> <li>• VOC</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• VSM</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme Pareto</li> <li>• Diagramme de cause à effet</li> <li>• FMEA ou AMDE</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Matrice et graphe d'impact et d'effort</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non mentionné</li> </ul>   |
| [49]    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme SIPOC</li> <li>• Diagramme de flux</li> <li>• Énoncé de problème</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Histogramme</li> <li>• Analyse de statistique descriptive</li> <li>• Diagramme camembert</li> <li>• Diagramme à barres multiples</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ANOVA</li> <li>• Diagramme cause à effet</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte de contrôle</li> </ul>   |
| [33]    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Énoncé de problème</li> <li>• Calendrier des phases</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte de contrôle</li> <li>• Tableau des activités de processus avec les durées</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme cause à effet</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> <li>• Système de gestion du changement</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Système de contrôle de processus</li> <li>• Carte de Contrôle</li> </ul> |
| [53]    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte de Contrôle</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme cause à effet</li> <li>• Questionnaire</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte de Contrôle</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non mentionné</li> </ul>   |
| [28]    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC</li> <li>• Énoncé de problème</li> <li>• Processus métier</li> </ul>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identification de goulot d'étranglement et étude d'efficacité</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme de Pareto</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non mentionné</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan de contrôle</li> <li>• Carte de contrôle</li> </ul>                 |

|      |  |   |   |   |  |
|------|--|---|---|---|--|
| [35] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie SI-POC</li> <li>• Diagramme de Pareto</li> <li>• Brainstorming</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie de processus</li> <li>• Test de normalité</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme cause à effet</li> <li>• Vote pondéré</li> <li>• Anova</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphiques des effets principaux</li> <li>• Niveau sigma</li> <li>• Analyse coût bénéfice</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Checklist de contrôle</li> </ul>                    |
| [58] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie de processus</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> <li>• Diagramme Pareto</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme Pareto</li> <li>• FMEA ou AMDE</li> <li>• Tests d'hypothèses</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte de contrôle</li> <li>• Graphique linéaire</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan de contrôle</li> <li>• FMEA ou AMDE</li> </ul> |
| [34] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interview</li> <li>• Diagramme de Pareto</li> <li>• Charte de projet</li> <li>• Diagramme des paramètres</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Boîte à moustaches</li> <li>• Teste de normalité</li> <li>• Cartes de contrôle</li> <li>• Analyse de capacité</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interview</li> <li>• Diagramme cause à effet</li> <li>• Les 5 pourquoi?</li> <li>• Analyse des variables critiques</li> <li>• Anom</li> <li>• Teste d'hypothèse</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Brainstorming</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan de contrôle</li> </ul>                         |
| [21] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Énoncé de problème</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non mentionné</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartographie de processus</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse des dangers</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tests et simulation</li> </ul>                      |
| [39] | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Énoncé de problème</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Histogramme</li> <li>• Analyse statistique</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Test d'hypothèse</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non mentionné</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédure opératoire standard (POS)</li> </ul>      |



# Chapitre 3

## Apprentissage automatique

## 3.1 Introduction

Alan Turing, souvent considéré comme le père de l'intelligence artificielle (IA), a formulé cette prédiction datant de la moitié du XXe siècle : 'Il est probable qu'une fois les machines capables de penser, elles surpassent rapidement nos capacités...' Cette affirmation a été suivie par des progrès impressionnants dans le domaine de l'IA. Ces progrès ont bouleversé tous les secteurs d'activité, notamment celui de l'industrie.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les concepts fondamentaux de l'IA et les notions qui lui sont associées. Nous nous intéresserons aussi à l'apprentissage automatique (ML), ses catégories, ses algorithmes les plus connus. Enfin, nous présenterons les étapes indispensables pour concevoir un programme basé sur ML. Avant de terminer par une conclusion, nous explorons les nouvelles technologies qui peuvent être combinées avec LSS en accordant une attention particulière à celles fondées sur ML.

## 3.2 L'intelligence artificielle

### 3.2.1 Définition

Le terme "intelligence artificielle" a été inventé en 1956 par deux informaticiens, Marvin Minsky et John McCarthy, lors de la création d'un projet intitulé Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence [13]. Ce projet partait de l'hypothèse que chaque aspect de l'apprentissage ou caractéristique de l'intelligence pouvait être décrit avec suffisamment de précision pour qu'une machine puisse le reproduire. L'objectif était donc de déterminer comment les machines pouvaient utiliser le langage, créer des abstractions et des concepts, résoudre des problèmes jusque-là réservés aux humains et se perfectionner [43].

Wang, dans son article, a souligné que la définition du terme « IA » était ambiguë et qu'elle englobait plusieurs domaines de recherche ayant des objectifs, des méthodes et des implications différents [47].

C'est pour cette raison que l'on trouve différentes définitions de l'IA, résumées dans la Figure 3.1 :

|   |  |
|---|--|
| <b>Systems that think like a human</b>  | <b>Systems that think rationally</b>   |
| <p>"The exciting new effort to make computers think ... machines with minds, in the full and literal sense" (Haugeland 1985)</p> <p>"[The automation of] activities that we associate with human thinking, activities such as decision-making, problem-solving, learning ..." (Bellman, 1978)</p> | <p>"The study of mental faculties through the use of computational models" (Chamiak and McDermott, 1985)</p> <p>"The study of the computations that make it possible to perceive, reason, and act." (Winston 1992)</p> |
| <b>A system that acts like humans</b>   | <b>A system that acts rationally</b>   |
| <p>"The art of creating machines that perform functions that require intelligence when performed by people." (Kurzweil, 1990)</p> <p>"The study of how to make computers do things at which, at the moment, people are better." (Ritch and Knight, 1991)</p>                                      | <p>"Computational Intelligence is the study of the design of intelligent agents." (Poole et al. 1998)</p> <p>"AI ... is concerned with intelligent behaviour in artefacts." (Nilsson, 1998)</p>                        |

FIG. 3.1 : Définition de l'intelligence artificielle [18]

### 3.2.2 Évolution

Dans l'article, "A brief history of artificial intelligence : On the past, present, and future of artificial intelligence"[13], les auteurs ont retracé l'évolution de l'intelligence artificielle (IA) depuis les années 1940 en la divisant en quatre périodes :

- Printemps : la période de l'émergence et de l'enthousiasme pour l'IA.
- Hiver et été : la période des alternances entre les succès et les échecs de l'IA.
- Automne : la période de la maturation et de l'exploitation de l'IA.

Nous avons synthétisé les principaux faits et événements de ces quatre périodes dans la Figure 3.2 :

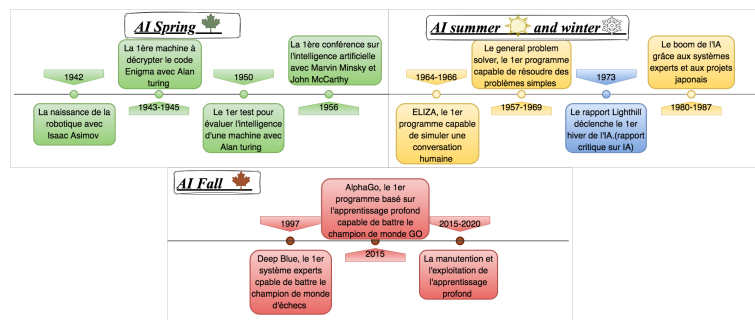


FIG. 3.2 : Les événements marquant dans l'histoire de l'IA

En raison de développement réalisé, l'intelligence artificielle (IA) peut être considérée comme un arbre qui possède plusieurs branches représenté dans la Figure 3.3. Parmi ces branches, on trouve l'apprentissage automatique, qui est le sujet de notre étude.

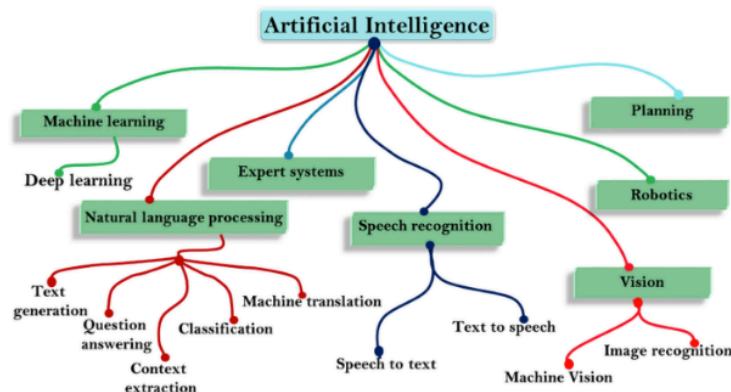


FIG. 3.3 : Les branches de l'IA [12]

## 3.3 Machine Learning

### 3.3.1 Définition

L'apprentissage automatique, également appelé machine learning (ML), a été défini pour la première fois par Arthur Samuel en 1959. Selon lui, l'apprentissage automatique est la science qui permet aux ordinateurs d'apprendre à partir d'expériences sans qu'il soit nécessaire de les programmer de manière explicite [31].

En d'autres termes, l'apprentissage automatique consiste à développer des algorithmes qui peuvent apprendre à partir des données historiques. Au lieu de programmer manuellement chaque étape, l'ordinateur s'ajuste automatiquement en fonction des exemples qu'il reçoit.

Peter Harrington, dans son livre intitulé « Machine Learning in Action », a donné une nouvelle définition pour l'apprentissage automatique :

ML consiste à transformer les données en informations, il se situe au carrefour de l'informatique, de l'ingénierie et des statistiques et apparaît souvent dans d'autres disciplines. C'est un outil qui peut être appliqué à de nombreux domaines et utilisé pour résoudre de nombreux problèmes. Tout domaine qui a besoin d'interpréter et d'agir sur les données peut bénéficier des techniques d'apprentissage automatique [48].

### 3.3.2 Catégories de l'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique se divise en plusieurs catégories selon l'approche d'apprentissage, type données d'entrées et sortie ainsi que le type de problème qu'on cherche à résoudre, ces catégories sont représentées dans la Figure 3.4 :

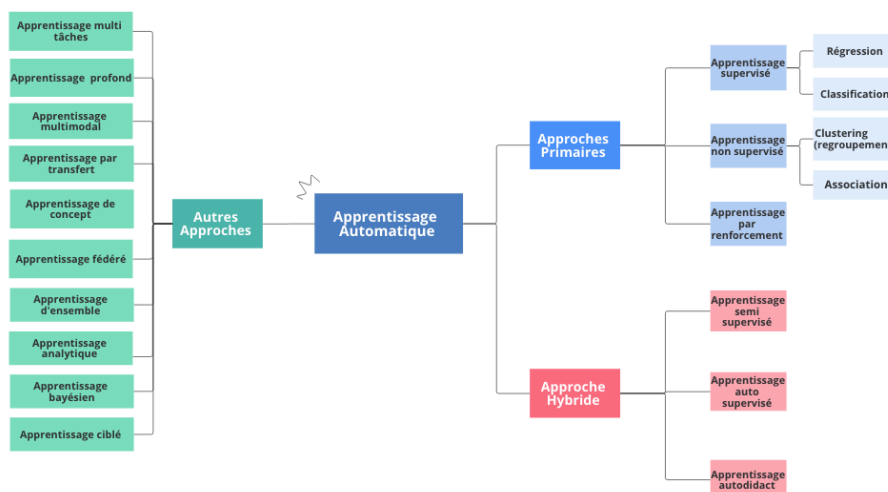


FIG. 3.4 : Les catégories de l'apprentissage automatique

**Supervised learning ou Apprentissage automatique supervisé :** L'apprentissage supervisé est une technique d'apprentissage qui détermine les relations entre des attributs indépendants et des attributs dépendants désignés (étiquettes). L'apprentissage supervisé crée un modèle de prédiction à l'aide d'un ensemble de données d'entraînement

en utilisant des données d'entrée et des valeurs de sortie. Ensuite, le modèle peut prédire les valeurs de sortie d'un nouvel ensemble de données. La taille et la variance de l'ensemble de données d'entraînement déterminent la performance des modèles développés en utilisant l'apprentissage supervisé. [29]. De façon simplifiée, les données dans le cas de l'apprentissage supervisé sont étiquetées c'est-à-dire chaque valeur qu'on cherche à prédire "target" est associée à des "features" (facteurs ou caractéristiques). De plus, en se référant au données utilisés, on peut distinguer deux type de problème :

- **Problème de régression** : Il s'agit de prédire une valeur continue, c'est-à-dire une valeur qui peut varier de manière infinie. À titre d'exemple prédire les demandes de client en basant sur l'historique des ventes.  
Les algorithmes utilisés sont : Régression linéaire, Régression par arbre de décision, Support Vector Machines (SVM regressor ), Arbre de décision...
- **Problème de classification** : Il s'agit de prédire une valeur discrète, c'est-à-dire une valeur qui appartient à un ensemble fini d'options catégorielles. À titre d'exemple, si on veut prédire la qualité d'un produit (comme le lait) en se basant sur plusieurs facteurs (PH, couleur, odeur, température...etc) , on utilise des algorithmes de classification.  
Les algorithmes utilisés sont : Arbre de décision, K plus proche voisin (KNN), Support vector machine (SVM), Régression logistique...

**Apprentissage automatique non supervisé ou Unsupervised learning** : L'apprentissage non supervisé est une technique d'apprentissage qui regroupe des entités sans caractéristiques dépendantes spécifiques. En général, les algorithmes de réduction de dimensionnalité et de regroupement ne sont pas supervisés [29].

- **Clustering** : La méthode de "clustering" est souvent désignée sous le terme de classification non supervisée, car elle aboutit à des résultats similaires à ceux de la classification, mais sans nécessiter de classes prédéfinies. C'est une forme d'apprentissage automatique non supervisé qui crée de manière autonome des groupes d'éléments semblables. Cela revient à effectuer une classification de façon automatique : plus les éléments regroupés sont proches les uns des autres, plus les groupes formés sont considérés comme étant de qualité [48].

**Apprentissage par renforcement ou Reinforcement learning** : une façon de programmer des agents par la récompense et la punition sans avoir besoin de spécifier comment la tâche doit être réalisée [46].

**L'apprentissage en ensemble ou Ensemble learning** : C'est une technique dans laquelle plusieurs modèles d'apprentissage machine de base sont combinés pour obtenir des connaissances supérieures et atteindre de meilleures performances [15].

Si les modèles en ensemble utilisent le même type de modèle d'apprentissage machine de base, l'apprentissage en ensemble est homogène, quant au second type, l'apprentissage en ensemble hétérogène, il combine différents types d'algorithmes de base. Les deux types sont divisés en ensembles parallèles et ensembles séquentiels. Les algorithmes d'ensembles

parallèles génèrent simultanément divers apprenants de base, par exemple les modèles de bagging et les forêts aléatoires, tandis que les ensembles séquentiels forment des modèles de base l'un après l'autre, comme c'est le cas pour les algorithmes de boosting et les modèles de stacking où le résultat d'un modèle peut être utilisé comme entrée pour un autre modèle [56].

Les fameux algorithmes de boosting sont : XGboost(extream gradient boosting), Ada-boost(adaptive boosting ), gradient boosting ...

Les fameux algorithmes de bagging sont : Forêt aléatoire(RF) et bagged SVM.

### 3.3.3 Les principales étapes pour appliquer l'apprentissage automatique

Le processus de développement d'un algorithme d'apprentissage automatique est un cycle composé de nombreuses étapes 3.5 : [4]

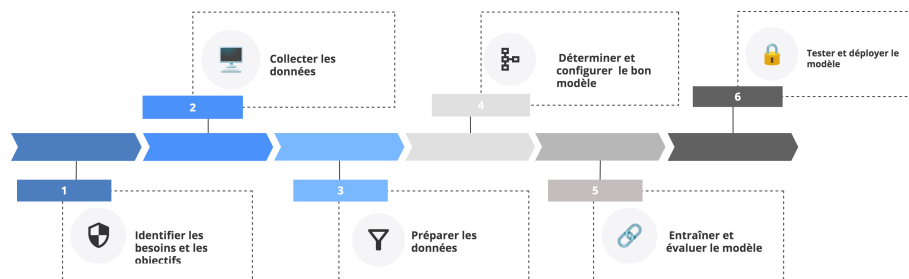


FIG. 3.5 : Les étapes de ML

#### 1. Identifier les besoins et les objectifs :

Définir clairement pourquoi la solution de machine learning est nécessaire et établir des objectifs mesurables et comprendre la problématique métier à résoudre. Cela permet de déterminer les types de données à collecter, les résultats attendus, et le type de modèle à utiliser.

#### 2. Collecter les données nécessaires :

Rassembler des données pertinentes et fiables en grande quantité. La qualité et la diversité des données sont cruciales pour l'efficacité du modèle.

#### 3. Préparer les données :

Nettoyer et prétraiter les données pour les rendre exploitables. Cela inclut la gestion des données manquantes, des doublons et des incohérences, ainsi que la normalisation des données.

#### 4. Déterminer le bon modèle :

Sélectionner l'algorithme approprié en fonction du problème à résoudre. De plus, ajuster les hyperparamètres pour optimiser les performances du modèle.

#### 5. Entraîner et évaluer le modèle :

Utiliser un ensemble de données d'entraînement représentatif pour entraîner le modèle et évaluer sa performance et l'affiner pour améliorer sa capacité à effectuer des prédictions précises.

6. **Tester et déployer le modèle :**

Tester le modèle avec un ensemble de données de test pour évaluer sa performance en conditions réelles. Puis, déployer le modèle en production pour qu'il puisse faire des prédictions sur de nouvelles données.

### 3.4 Les nouvelles technologies et DMAIC

Les techniques de l'intelligence artificielle telles que : la robotique, l'apprentissage automatique (ML), le traitement automatique du langage naturel (TALN) et la vision par ordinateur peuvent être intégrés avec la philosophie de LSS. Ensemble, ils offrent aux entreprises la possibilité d'améliorer leurs procédés, réduire les déchets, améliorer la qualité et prendre des décisions basées sur des données [59]. De plus, les technologies des systèmes d'information jouent un rôle essentiel dans la gestion de l'accès aux données et offrent des méthodes innovantes, variées et simples pour l'analyse des données dans les projets LSS, en mettant l'accent sur trois concepts essentiels : Les entrepôts de données (data Warehouse), Traitement analytique en ligne (OLAP) et Exploration et analyse de données (Data Mining)[9].

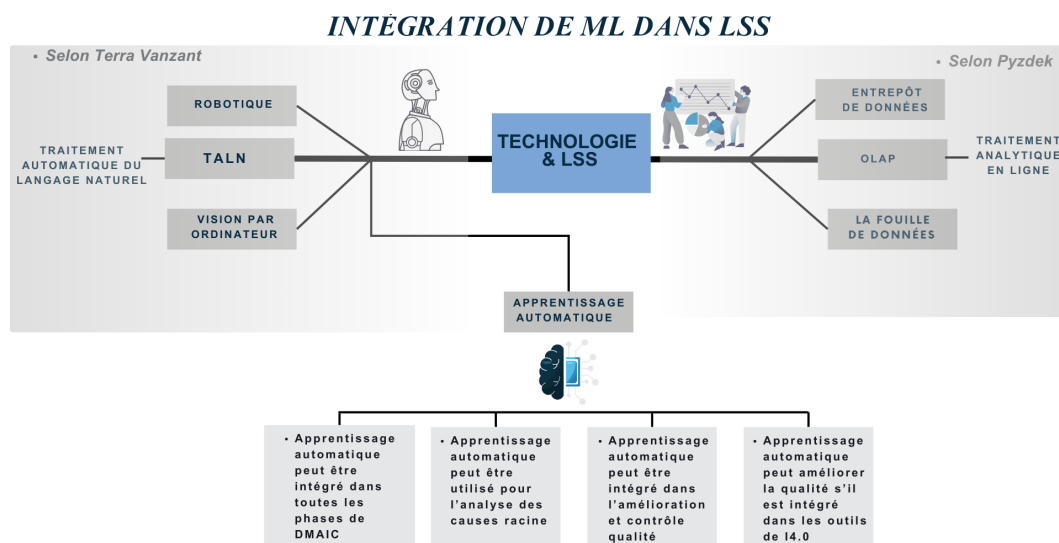


FIG. 3.6 : Résumé de l'intégration des technologies avec Lean six sigma

Dans la suite, on doit présenter quelques exemples d'intégration de ML dans LSS :

1. **Analyse des causes racines pour des problèmes de qualité :**

- L'apprentissage automatique peut être intégré à l'analyse des causes racines pour résoudre des problèmes de qualité [20].

L'étude [11] a montré que ML, associé à l'analyse statistique Anova (Analyse de la Variance) lors de la phase d'analyse du DMAIC, ont amélioré la qualité des bouteilles en plastique. L'utilisation conjointe du ML et de l'ANOVA se justifie par leurs capacités complémentaires pour identifier les causes racines des problèmes de

qualité. Le ML, et plus précisément les méthodes comme la régression et clustering, ont été utilisées pour analyser les données générées par les processus de fabrication. Les algorithmes tels que les arbres de décision, les réseaux de neurones et le KNN (K plus proches voisins) sont appliqués pour découvrir des modèles cachés et des corrélations entre les variables de processus et les défauts de production. Les modèles ML peuvent prédire les conditions qui mènent aux défauts, classer les défauts selon leur importance et ainsi identifier les causes racines.

### 2. Réduction des déchets et amélioration de la qualité :

Une autre étude a utilisé Six Sigma pour résoudre des problèmes de revêtement défectueux, conduisant à une amélioration de la qualité et à une réduction des déchets. Le deep learning a été intégré comme solution alternative, confirmant ainsi l'efficacité des améliorations Six Sigma. En utilisant Deep Learning pour analyser les données complexes et optimiser les processus, cette étude montre comment les technologies avancées peuvent améliorer considérablement les processus industriels[44].

### 3. Technologies de l'industrie 4.0:

Les technologies de l'industrie 4.0 contribuent à l'amélioration des outils LSS. ML et ANN sont particulièrement bénéfiques pour la phase d'analyse pour identifier les causes racines. En outre, dans cet article, le ML est présenté comme un outil puissant pour renforcer les initiatives LSS en intégrant les technologies de l'industrie 4.0. En exploitant les données en temps réel, en prédisant les défaillances, en optimisant les processus, ML permet aux entreprises de réaliser des améliorations significatives en termes d'efficacité, de qualité et de rentabilité [16]. Ainsi, ML peut également être utilisé dans les phases d'amélioration et de contrôle, où un algorithme non supervisé peut prédire quand un processus pourrait échapper à la surveillance, permettant ainsi de prendre des mesures préventives [19].

En somme, ML offre des opportunités significatives pour surpasser les méthodes traditionnelles du DMAIC et améliorer les processus grâce à une approche plus intelligente et basée sur les données [36].

Le Tableau 3.1 illustre des exemples d'outils ML pouvant se substituer aux approches classiques à chaque étape du DMAIC.

## 3.5 Conclusion

Le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA) est vaste et diversifié. Il englobe plusieurs branches. Parmi ces branches, l'apprentissage automatique qui offre plusieurs approches possibles d'être appliquées à une variété de domaines. Ces approches, lorsqu'elles sont employées conjointement avec les méthodes statistiques classiques de la démarche DMAIC peuvent conduire à des améliorations significatives en termes de qualité des produits et des processus, tout en contribuant à une réduction substantielle des déchets.



TAB. 3.1 : Les méthodes de ML complémentaires aux méthodes classiques [36]

| Phase     | Méthodes Traditionnels  | Méthodes d'apprentissage automatique  |
|-----------|---|---|
| Définir   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Graphiques de contrôle (Run Charts)</li> <li>• Analyse Pareto</li> <li>• Analyse de garantie</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Processus Analytique Hiérarchique à base de Réseau de neurones (NN-AHP)</li> <li>• Exploration de texte et traitement automatique du langage naturel (TALN)</li> <li>• Clustering</li> </ul> |
| Mesurer   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gage RR</li> <li>• Étude de linéarité</li> <li>• Cartes de contrôle</li> <li>• Capabilité du processus</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ACP (Analyse en composantes principales)</li> <li>• NN</li> </ul>  |
| Analyser  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diagramme cause à effet</li> <li>• Boite à moustache</li> <li>• Graphiques multivariés</li> <li>• Analyse de régression</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbres de décision</li> <li>• Réseaux de neurones profonds (Deep NN)</li> <li>• ACP</li> <li>• Détection de défauts</li> <li>• SVM (Support Vector Machine)</li> <li>• K means</li> </ul>    |
| Innover   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plans d'expériences</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clustering</li> <li>• LSTM-GA (Réseau à mémoire à long court Algorithme génétique)</li> <li>• Réseaux Transformer</li> </ul>   |
| Contrôler | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Procédures opératoires standard (SOP)</li> <li>• Cartes de contrôle</li> <li>• Plans de contrôle</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• ACP</li> <li>• Méthodes basées sur l'apprentissage profond pour les données numériques</li> </ul>  |

# Chapitre 4

## Etude de l'existant

### 4.1 Introduction

”Un problème bien posé est un problème à moitié résolu”[25]. Afin d’arriver à des solutions pertinentes pour un problème défini, il faut tout d’abord bien comprendre et bien délimiter le cadre de notre problème. Dans ce chapitre, nous devons présenter des notions de base ainsi que l’énoncé de problématique.

### 4.2 Environnement de l’étude

#### 4.2.1 Description de l’unité de production

L’unité de fabrication de lait est un système complexe qui comprend plusieurs étapes et ateliers pour garantir la qualité et la sécurité du produit final. L’unité de Tchén lait (Annexe B) est composée de quatre ateliers montrés dans la Figure 4.1, équipés de machines de deux fournisseurs : Tetra Pak et SIG Combibloc. Ces ateliers comprennent quatre lignes de production : deux pour les grands formats (1L) et deux autres pour les petits formats (200 ml et 125 ml).

#### 4.2.2 Gestion de production

**Programmation de la production :** La programmation de la production est centralisée et gérée par la direction centrale de Tchén Lait à Béjaïa. Elle s’effectue sur une période de 10 jours et peut être ponctuellement mise à jour par le service ordonnancement de l’unité de Baraki .

**Nettoyage et stérilisation :** Ce processus est effectué toutes les 48 heures sur les quatre lignes et prend 6 heures.

**Politique de stockage :** Afin de répondre à la demande élevée et en raison de la nécessité de nettoyer chaque 6 heures ou à chaque changement de produit, l’entreprise a adopté une politique de stockage en grandes quantités.

### 4.3 Notions de base pour comprendre le temps de set up

#### 4.3.1 Nettoyage dans le secteur agroalimentaire

Nettoyer dans le sens général selon Larousse est rendre net, propre en débarrassant de ce qui tache, salit, ternit [2]. Dans le secteur laitier on a plusieurs types de nettoyage qui visent à éliminer les impuretés, évacuer les résidus chimiques et tuer les micro-organismes parmi ces types on mentionne :

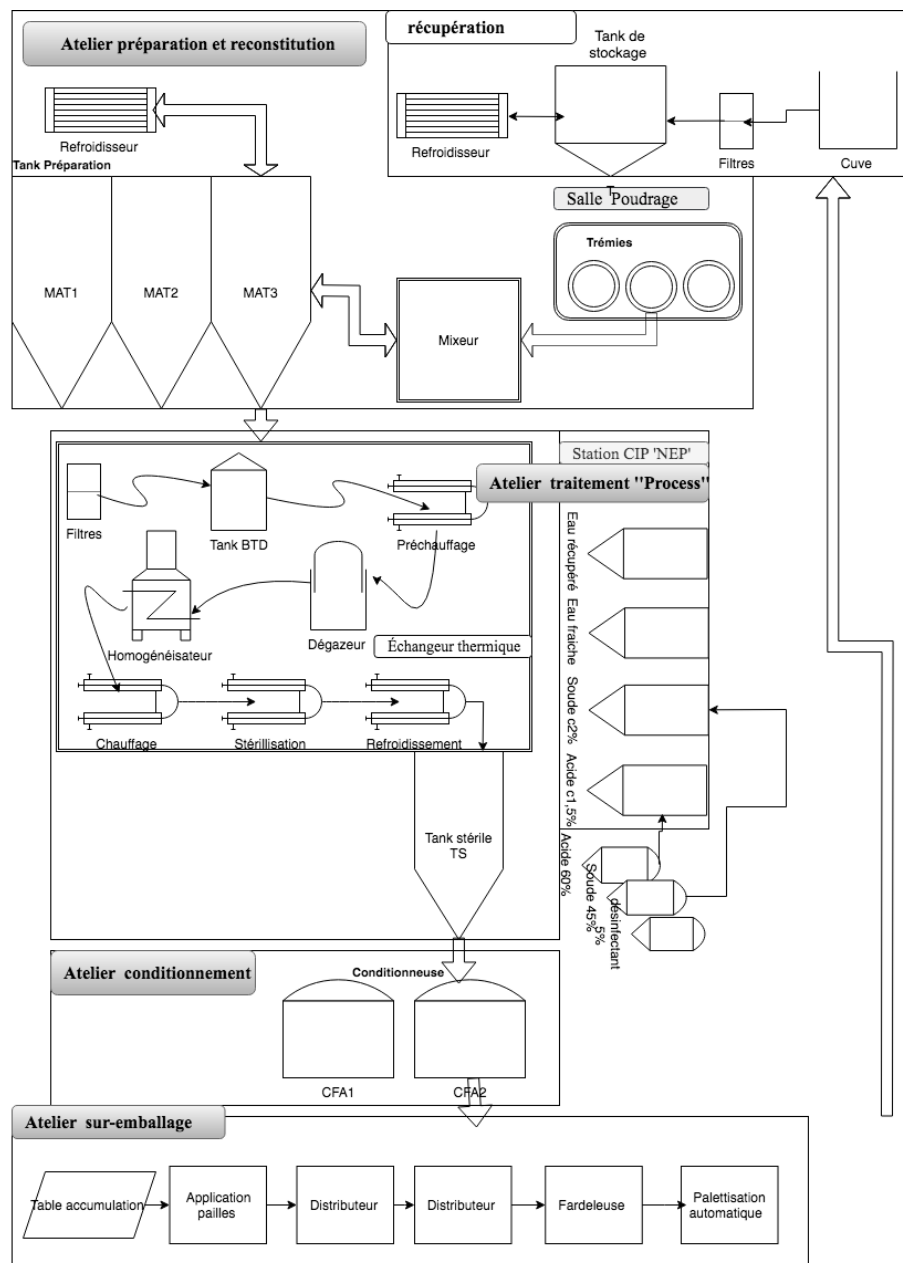


FIG. 4.1 : Ligne de production petit format

### Nettoyage hors place COP :

C'est une procédure de nettoyage manuelle qui se fait par la brosse, à l'aide de lances à jet haute pression, (remplissage, ébullition, agitation et vidange) [60]. Les équipements qui ne pourront être nettoyés que manuellement. Les équipements tels que les machines de remplissage, s'ils ne sont pas conçus pour être nettoyés en place (NEP), doivent être démontés et nettoyés hors place (COP). L'efficacité de ce nettoyage dépend principalement de trois facteurs majeurs : l'efficacité de frottement, concentration de détergent et le temps de contact [26].

### Nettoyage en place CIP :

Le nettoyage en place NEP (Cleaning in place CIP) est définie par la société de technologie laitière manuel CIP en 1990 comme étant le nettoyage d'éléments d'installation ou de circuit de canalisation sans démontage ni ouverture de l'équipement et avec peu ou absence de l'intervention manuelle de la part de l'opérateur[60]. Il inclut les étapes :

1. Prélavage (rinçage initial).
2. Préparation détergent.
3. Recirculation détergent (produit alcalin).
4. Rinçage intermédiaire avec l'eau pour éliminer les traces de solution soude.
5. Préparation solution deuxième détergent.
6. Recirculation solution détergente pour éliminer calcaire.
7. Rinçage avec l'eau fraîche.
8. Désinfection.
9. Rinçage final.

Ce type de nettoyage nécessite une station NEP ou station CIP (Figure 4.2) qui contient plusieurs équipements (Tanks stockage et de récupération des solutions de nettoyage, Vannes, Pompes, Pipelines, Instruments terrain pour permettre le nettoyage).

Il existe trois types de système CIP :[26]

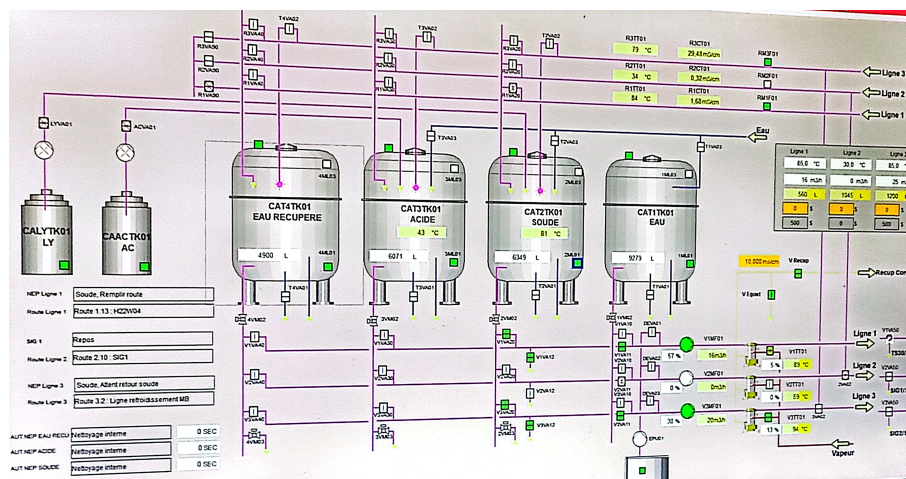


FIG. 4.2 : La station multi-usages NEP de Tchiv Lait

1. Systèmes à usage unique : Ces systèmes sont généralement de petites unités situées aussi près que possible de l'équipement à nettoyer.

2. Systèmes à réutilisation : Dans ces systèmes, les solutions de détergent et/ou d'acide sont récupérées et utilisées autant de fois que possible.
3. Systèmes multi-usages : Ces systèmes tentent de combiner toutes les caractéristiques des systèmes à usage unique et à réutilisation.

### Autres méthodes de nettoyage :

- Trempage.
- Traitement par ultrasons.
- Méthode par pulvérisation.
- Traitement enzymatique.

## 4.3.2 La stérilisation dans le secteur agroalimentaire

### La stérilisation

Le processus d'élimination de tous les micro-organismes en utilisant la vapeur ou l'eau chaude sous pression en exposant l'objet ou l'équipement à des températures (120°C à 150°C) pendant une demi-heure [52].

### La désinfection

Est le processus de traitement des surfaces avec des agents physiques ou chimiques qui tuent la plupart, mais pas nécessairement tous, les micro-organismes présents. La désinfection est généralement effectuée juste avant l'utilisation de contenants et d'équipements à usages multiples pour que les nombreux micro-organismes ne se développent pas [52].

### Techniques et méthodes pour stérilisation et/ou désinfection

- **Agents chimiques** : Les désinfectants chimiques se combinent avec les composants des cellules microbiennes et les désactivent, tuant ainsi les cellules. De nombreux types de désinfectants chimiques sont disponibles. Ceux-ci incluent des composés contenant du chlore, des mélanges de chlore-brome, de l'iode, des composés d'ammonium quaternaire et des désinfectants à base d'agents mouillants acides[52].  
À propos des agents chimique utilisé dans la stérilisation : [26]
  - Soude caustique (hydroxyde de sodium)
  - Formaldéhyde
  - Peroxyde d'hydrogène
- **Chaleur** : considérée comme la meilleure technique de stérilisation et désinfection. Pour la désinfection, cette technique utilise :[26][52]
  - L'eau chaude ou bouillante.

- La vapeur.
- L'air chaud.

Pour la stérilisation, elle utilise la vapeur ou l'eau chaude sous pression en exposant l'objet ou l'équipement à des températures (120°C à 150°C) pendant une demi-heure.

- **Désinfection avec de l'eau activée ou électrolysée** : l'application d'un courant électrique faible à l'eau peut ioniser les molécules d'eau, créant de l'eau activée qui aide à nettoyer les surfaces en délogeant les substances organiques[52].
- **Irradiation** : Le rayonnement ultraviolet (UV), notamment dans la bande 250-260 nm, s'est avéré efficace pour stériliser l'air entrant dans les zones de traitement et pour stériliser les matériaux d'emballage avant leur remplissage [26].
- **Pulvérisation** : brumisation ou fumigation avec des solutions contenant certains agents chimiques qui peuvent être utilisées pour pulvériser ou brumiser l'atmosphère des pièces fermées [26].

### 4.3.3 Facteur influent sur Nettoyage et stérilisation

L'efficacité de nettoyage dépend de plusieurs facteurs : [26]

1. Élimination des salissures : L'efficacité du nettoyage est réduite par la présence de matière organique (résidus de lait).
2. Méthode de nettoyage : Le système NEP (Nettoyage en Place) est conseillé pour un meilleur contrôle et une meilleure efficacité.
3. Temps de contact : Un temps de contact suffisant entre le détergent et les salissures est crucial (plusieurs minutes).
4. Température et concentration du détergent : Plus la température est élevée, plus l'action nettoyante est efficace (jusqu'à 105°C pour les installations ultra haute température UHT).
5. Vitesse ou débit : Un débit élevé améliore l'action de nettoyage physique dans un système NEP (minimum 1,5 m/s).
6. Composition chimique des détergents : La formulation et les propriétés fonctionnelles du détergent influencent l'efficacité du nettoyage.
7. Conception de l'usine.

Tandis que, le facteur influent sur la performance de détergent sont connus sous l'acronyme TACT et l'efficacité de nettoyage dépend sur l'interaction entre ces quatre facteurs : Temps, Action mécanique, Concentration et Température [60].

### 4.3.4 Le processus de set up :

Désigne l'ensemble des activités de nettoyage, de stérilisation et désinfection des équipements, des outils et des installations, réalisées entre deux cycles de production. Ce processus est essentiel pour garantir que les équipements de production soient exempts de contaminants et puissent fonctionner de manière optimale pour assurer la qualité, la sécurité et l'efficacité des opérations du cycle suivant.

## 4.4 Énoncé de la problématique

Pour les entreprises pharmaceutiques, cosmétiques et agroalimentaires, le respect des règles d'hygiène et de sécurité est crucial. Parmi ces entreprises, "Tchin Lait" se distingue par son engagement envers la qualité et la sécurité alimentaire. En effet, elle est certifiée ISO 22000, une norme internationale qui définit les exigences pour les industries alimentaires afin de garantir la sécurité des denrées alimentaires [1].

Le processus de set up, qui inclut le nettoyage, est une partie intégrante de l'activité des entreprises agroalimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques.

Le nettoyage des différents équipements s'effectue périodiquement selon des méthodes, des procédures et des fréquences variables. Ces dernières sont définies par le service ordonnancement en tenant compte des consignes des fournisseurs.

Le nettoyage des ateliers de process, conditionnement et suremballage est réalisé simultanément. En revanche, le nettoyage des ateliers de préparation et de récupération est effectué en décalé, car ces derniers sont occupés par la préparation de produits durant le nettoyage des autres ateliers.

Le temps imparti au set up (nettoyage, stérilisation) est de 6 heures maximum. Cependant, les responsables de l'entreprise ont constaté des dépassements réguliers de ce temps, ce qui engendre des retards dans le démarrage des nouveaux cycles de production.

Ces retards impactent directement la production. En effet, un retard d'une minute se traduit par une perte d'environ 200 unités pour les produits grand format (1 L et 0.5 L) et de plus de 400 unités pour les produits petit format (200ml et 125ml).

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les principes essentiels du nettoyage et stérilisation en place et les facteurs qui peuvent impacter le processus de set up. L'entreprise est confrontée à des défis concernant le temps de set up qui dépasse les spécifications prévues, ce qui a un effet direct sur la gestion de la production. Il est donc essentiel de trouver des solutions pour améliorer ce processus, ce qui permettra non seulement d'optimiser les opérations mais aussi d'assurer une plus grande flexibilité de gestion.



# Chapitre 5

## Déploiement de la démarche DMAIC

### 5.1 Introduction

Ce chapitre présente l'application de la démarche DMAIC dans le cadre de la philosophie Lean Six Sigma pour résoudre les problèmes de variation et de perte de temps de set up.

”Le Six Sigma est un moteur de progrès à condition de respecter son esprit, sa démarche, sa méthode et ses outils”[42]. Nous devons appliquer cela à chaque phase de la démarche adoptée, puis discuter des résultats et des extrants des différentes étapes afin d'arriver à la solution.

### 5.2 Phase 1 : Définir

”Si vous ne pouvez pas décrire ce que vous faites comme un processus, vous ne savez pas ce que vous faites” W. Edwards Deming[25].

En se référant au livre 'Six Sigma : comment l'appliquer'[42], une fois le projet sélectionné, l'objectif est de réaliser un état des lieux et de définir le cadre du projet d'amélioration. Tout d'abord, nous avons choisi de travailler sur les deux lignes petit format au lieu des deux autres lignes (grand format) en se basant sur trois critères.

Premièrement, la capacité de chacune des deux lignes petit format est de 24 000 unités de produits par heure, alors que celle des autres lignes est de 12 000 unités de produits par heure pour chaque ligne.

Deuxièmement, le profit unitaire des produits petit format est supérieur à celui des produits grand format. Ce profit représente une mesure de la rentabilité par unité de produit vendue. Il est calculé en soustrayant le coût de revient unitaire du prix de vente unitaire.

Troisièmement, les retards dus au processus de setup sont plus fréquents sur les lignes petit format.

En résumé, les pertes sur les lignes petit format sont plus importantes par rapport aux autres lignes.

Après avoir choisi de travailler sur les deux lignes de petit format (lignes 3 et 4), nous cherchons à définir le cadre de notre projet en utilisant trois outils : les CTQ, la méthode QQQQCCP et la cartographie des processus, pour finalement aboutir à la charte de projet qui résume notre travail dans la phase 'Définir'.

#### 5.2.1 Identification des CTQ

Le but de Six Sigma est de maximiser la valeur actionnariale en atteignant le taux d'amélioration le plus rapide en termes de satisfaction client, de coût, de qualité et de vitesse des processus [30]. Donc on commence par l'écoute de la voix du client (VOC)

pour comprendre et d'identifier les CTQ (Critique de qualité) illustrées dans la Figure 5.1, qui sont des contraintes, attentes ou exigences souhaitées par les clients.

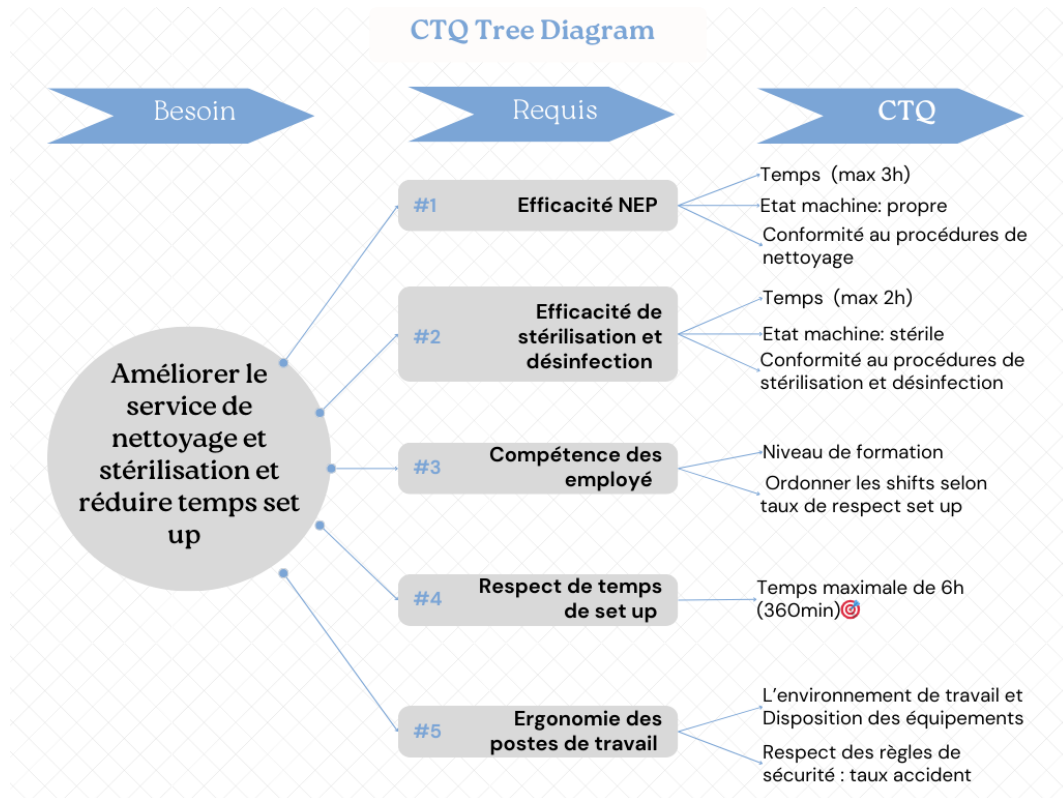


FIG. 5.1 : Diagramme CTQ

### 5.2.2 Détermination des limites de projet

La méthode QQQCCP (Tableau 5.1) sert à définir les limites du projet en réalisant un diagnostic de la situation de notre problématique.

TAB. 5.1 : Analyse QQQQCCP

| Question   | Réponse  |
|------------|--|
| Quoi ?     | Un écart très important dans les temps de set up des lignes de production, des observations tel que 300,339,400,466,1204 min ont été constaté sur la ligne trois et 316,360,388,458,1073 min sur ligne 4 durant la période janvier 2023 à mars 2024.   |
| Qui ?      | Les services concernés par ce problème : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Service de production : impact sur le temps de disponibilité des équipements ainsi que le rendement.</li> <li>• Service Approvisionnement : Les retards larges de temps de set up affecte la gestion des stocks tampons.</li> <li>• Service Commerciale : Affecte la planification à long terme de l'activité de l'entreprise.</li> </ul> Et en plus cela impact la globalité de la chaîne d'approvisionnement car les longs retards peuvent affecter l'expédition des produits aux bonnes quantités, au bon moment et au bon endroit. Ceci est mesuré par un indicateur de performances (OTIF : on time in full). |
| Où ?       | Atelier traitement et conditionnement au sein de l'entreprise Tchinelait qui se trouve à Baraki Alger.   |
| Quand ?    | Depuis une période de temps (environ 15 mois).   |
| Comment ?  | Le problème se manifeste dans la fluctuation observée dans les délais planifiés et réels ce qui affecte de façon directe le plan industriel et commercial établie ainsi que le planning de matériels et ressources.  |
| Combien ?  | Des retards de plus de 2 heures (Pour la ligne petit format 3, un écart de 138 min entre la moyenne souhaitée et la cible. Et pour la ligne petit format 4, un écart de 113 min).  |
| Pourquoi ? | Un projet crucial à l'hygiène qui impact le consommateur et l'état du matériel de plus il est bénéfique car il vise à : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduire les coûts supplémentaires de la main-d'œuvre, énergie et matériaux.</li> <li>• Améliorer la qualité et la compétitivité en assurant une réponse rapide à la demande des clients ainsi qu'offrir des produits de meilleure qualité.</li> <li>• Améliorer l'efficacité opérationnelle en réduisant le temps d'arrêt des équipements.</li> </ul>   |

### 5.2.3 Cartographie de processus étudié

Dans cette étape, nous avons cartographié notre processus avec le diagramme SIPOC (Figure 5.2), qui offre une vue holistique. Ensuite, nous avons détaillé ce dernier en utilisant une modélisation avec le langage BPMN (Business Process Model and Notation) dédié à la cartographie et à la modélisation des processus métiers. (Figure 5.3 à Figure 5.9),

La documentation de processus et sous processus est expliquée dans (Annexe C).

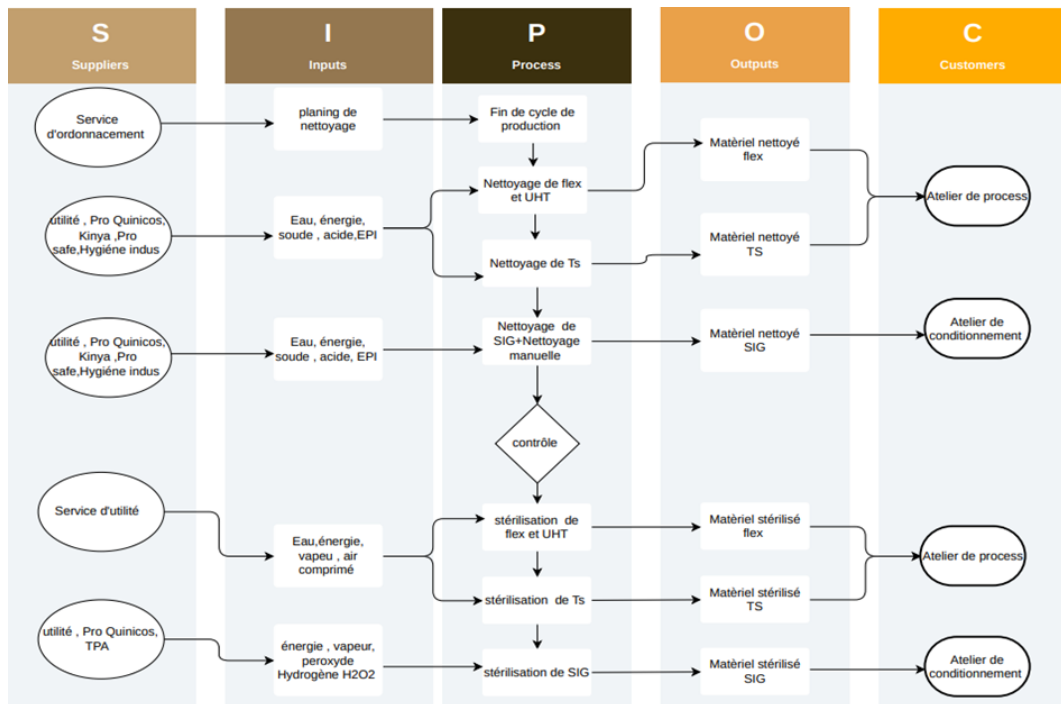


FIG. 5.2 : Diagramme SIPOC

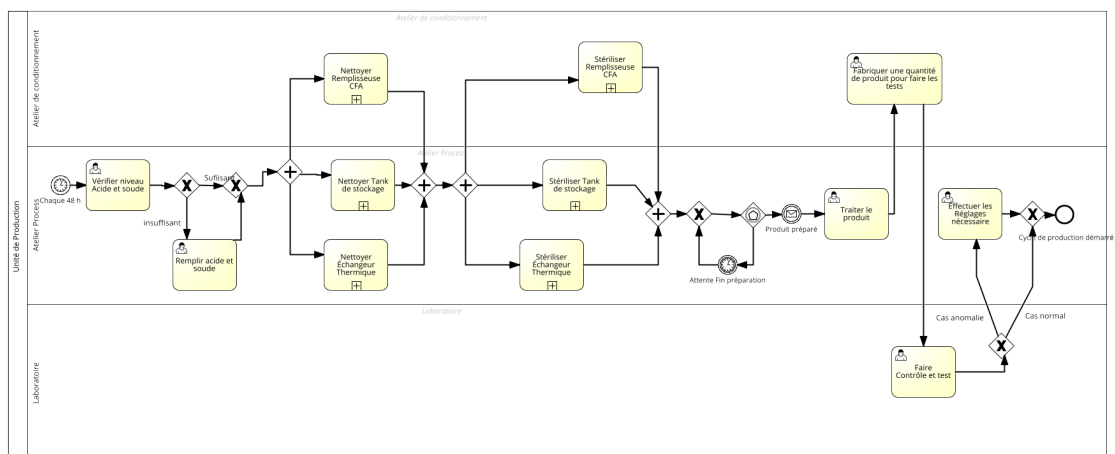


FIG. 5.3 : Processus de set up

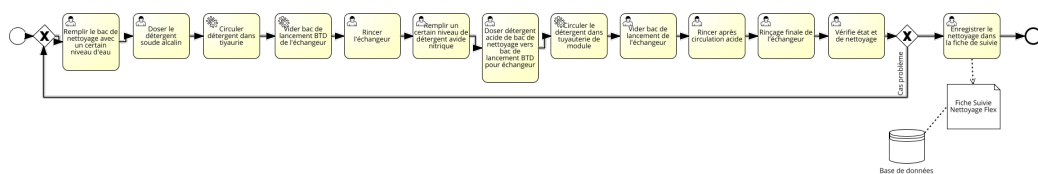


FIG. 5.4 : Processus de nettoyage de l'échangeur thermique

### 5.2.4 Charte de projet

À la fin de cette phase, on a finalisé la charte de projet illustré dans la figure 5.10 :

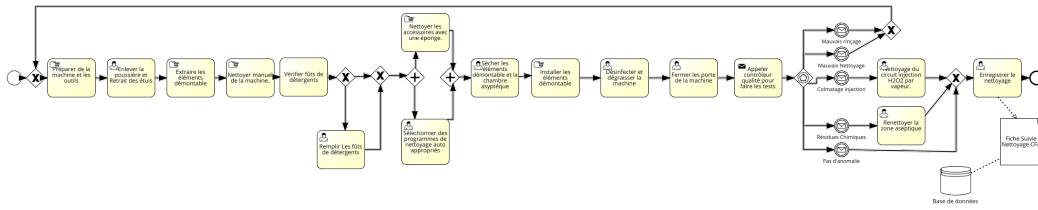


FIG. 5.5 : Processus de nettoyage de la machine conditionneuse

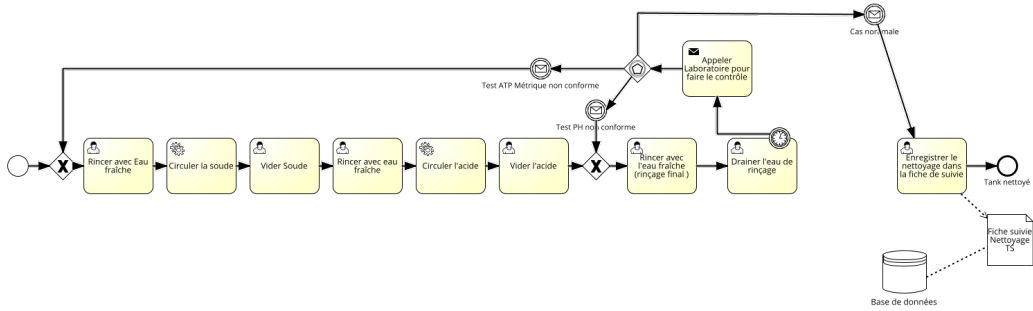


FIG. 5.6 : Processus de nettoyage de tank de stockage

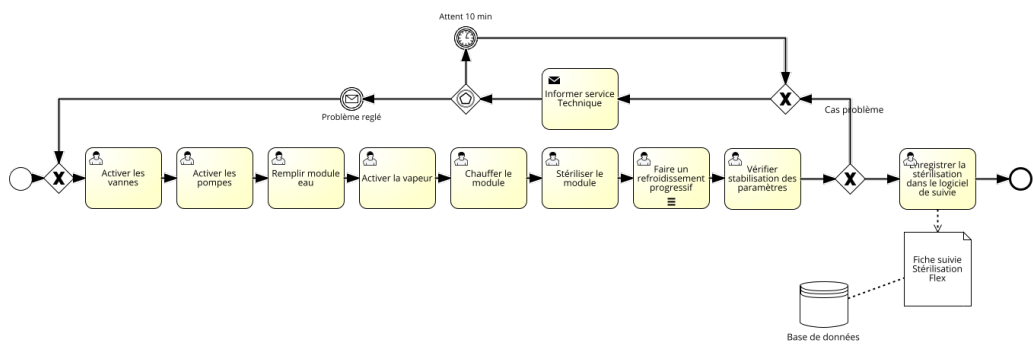


FIG. 5.7 : Processus de stérilisation de l'échangeur thermique

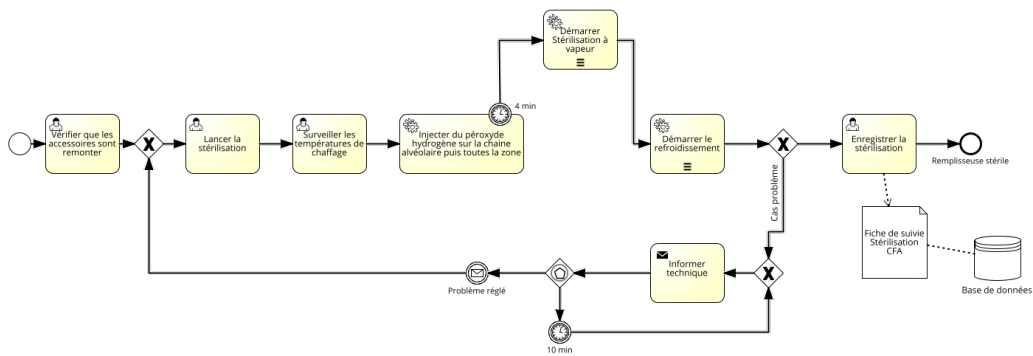


FIG. 5.8 : Processus de stérilisation de la conditionneuse

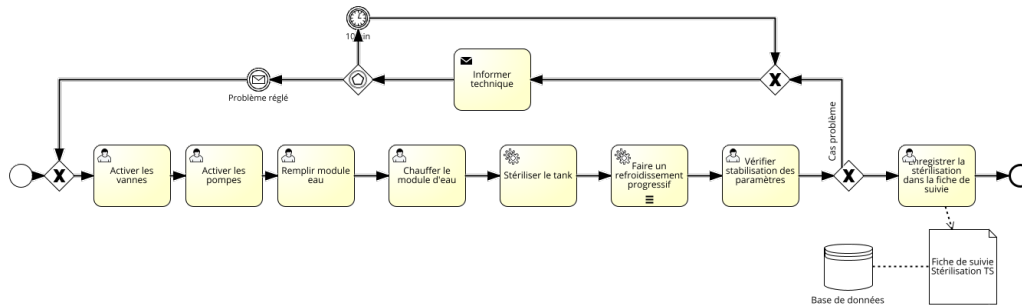


FIG. 5.9 : Processus de stérilisation de tank de stockage

| Charte de projet                |  |             |   |   |                 |   |   |   |   |
|---------------------------------|--|-------------|---|---|-----------------|---|---|---|---|
| <b>Titre de projet</b>          | Contribution à la diminution de la variabilité de temps de setup   |             |   |   |                 |   |   |   |   |
| <b>Objectif de projet</b>       | Diminution de variabilités de temps de setup dans les deux lignes de petits formats , Ceci vise à améliorer l'efficacité globale de la production et à minimiser les coûts associés aux retards de production.   |             |   |   |                 |   |   |   |   |
| <b>Business case</b>            | Pour une certaine période, une variation du temps de set up a été constatée. Cette variation a un impact significatif sur l'efficacité globale de la production. Les temps consacrés au nettoyage ont dépassé la valeur cible qui est de 6 h (360 min). Nous visons à réduire l'écart de temps qui existe entre les valeurs observées et la valeur cible, car chaque minute de retard génère des pertes. Le coût d'opportunité est d'environ 12 000 DZD pour les lignes de petit format (en estimant que le profit est de 30 DZD par unité). |             |   |   |                 |   |   |   |   |
| Groupe de Travail               |  |             |   |   |                 |   |   |   |   |
| <b>Intervenant</b>              |  |             |   |   | <b>Fonction</b> |   |   |   |   |
| Hamouche Narimane               |  |             |   |   | Stagiaire       |   |   |   |   |
| Benali Nesrine                  |  |             |   |   | Stagiaire       |   |   |   |   |
| Planification de projet (Gantt) |  |             |   |   |                 |   |   |   |   |
| Phases                          | Date de début  | Date de fin | 1 | 2 | 3               | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Définir                         | 04/03/2024   | 11/03/2024  |   |   |                 |   |   |   |   |
| Mesurer                         | 12/03/2024   | 26/03/2024  |   |   |                 |   |   |   |   |
| Analyser                        | 27/03/2024   | 10/04/2024  |   |   |                 |   |   |   |   |
| améliorer                       | 11/04/2024   | 25/04/2024  |   |   |                 |   |   |   |   |
| Contrôler                       |  |             |   |   |                 |   |   |   |   |

FIG. 5.10 : Charte de projet

### 5.3 Phase 2: Mesurer

“Lorsque vous pouvez mesurer ce dont vous parlez et l’exprimer par un nombre, vous en connaissez quelque chose” Lord kelvin-Physicien britannique[42].

La phase de mesure permet de comprendre le fonctionnement réel de notre processus grâce à une évaluation quantitative qui s'appuie sur des systèmes de mesure et des données collectées. Au cours de cette phase, nous procédons à la collecte, à l'analyse et à l'exploration des données afin d'évaluer la performance du processus étudié.

### 5.3.1 Vérification du système de mesure

Au cours de cette phase, une légère différence ayant été constatée entre les données saisies dans les listes d'événements (base de données) et celles saisies dans les fiches et registres. Par conséquent, une étude de répétabilité et de reproductibilité a été menée afin de valider le système de mesure existant.

- La variable mesurée : temps de set up.
- Opérateur : Opérateur de l'atelier de conditionnement et chef conditionnement.
- Référence : Listes des événements (base de données) et fiches de suivi.
- Moyen de mesure : Chronomètre

La méthode des rangs et moyennes a été appliquée et les résultats sont présentés dans le tableau 5.2 :

TAB. 5.2 : Calcul de %R et R

| Indices                                      | Loi   | La ligne 3 | La ligne 4 |
|--|---|------------|------------|
| Rang Moyen                                   | $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R(X_i)$   | 1,23       | -0,17      |
| Répétabilité (variation des équipements)     | $EV = \bar{R}k_1$<br>Avec $k_1 = \frac{1}{d_2}$   | 1,08       | -0,15      |
| Reproductibilité (variation de l'évaluateur) | $AV = \sqrt{(x_{diff}k_2)^2 - \frac{EV^2}{nr}}$<br>$n$ : nombre des parties<br>$R$ : nombre des essais<br>$k_2 = \frac{1}{d_2}$ | 0,09       | 0,07       |
| Total variation                              | $TV = \sqrt{(R\&R)^2 + (PV)^2}$   | 1,09       | 1,86       |
| Part Variation                               | $PV = \frac{R_{diff}}{d_2}$   | -0,12      | 1,85       |
| %R et R                                      | $R\&R = \sqrt{(EV)^2 + (AV)^2}$<br>$\%R\&R = \frac{R\&R}{TV} 100$   | 8,47%      | 9,05%      |

**Interprétation :** Dans les deux cas, le système est jugé acceptable. Dans la troisième ligne on a un pourcentage de 8,47% et pour la quatrième ligne on a un pourcentage de 9,05% les deux sont inférieure à 10% et donc le système de mesure est considéré comme acceptable.

### 5.3.2 Collecte de données

Afin d'estimer les temps de set up (incluant le nettoyage, la stérilisation et les réglages), nous avons analysé les listes d'événements (Figure 5.11) des deux lignes de production de



petits formats pour collecter les données du type continu, sur une période de 15 mois - de janvier 2023 à mars 2024.

À titre d'exemple, le 2 janvier 2024, nous constatons que le temps de set up est la somme de deux événements, dont l'un est un arrêt programmé "Nettoyage et stérilisation en place" et l'autre c'est le temps de retard. Donc, le temps de set up s'élève à 569 minutes.

| Date Début | Date Fin | Heure début | Heure fin  | Temps d'arrêt | Désignation              | Désignation Machine | Code équipe | Désignation Arret                 |
|------------|----------|-------------|------------|---------------|--------------------------|---------------------|-------------|-----------------------------------|
| 2/1/2024   | 2/1/2024 | 9:46:00 AM  | 3:46:00 PM | 360,00        | CONDITIONNEUSE CFA124/01 | ARRÊT PROGRAMMÉ     | D           | NEP Complet                       |
| 2/1/2024   | 2/1/2024 | 3:46:00 PM  | 7:15:00 PM | 209,00        | CONDITIONNEUSE CFA124/01 | CONDITIONNEUSE      | D           | Accouplement pivotant             |
| 2/1/2024   | 2/1/2024 | 7:15:00 PM  | 7:15:00 PM | 0,00          | CONDITIONNEUSE CFA124/01 | CONDITIONNEUSE      | D           | changement de palette d'emballage |
| 2/1/2024   | 2/1/2024 | 7:15:00 PM  | 7:19:00 PM | 4,00          | CONDITIONNEUSE CFA124/01 | LABO - QUALITE      | D           | Contrôle Produit                  |
| 2/1/2024   | 2/1/2024 | 7:25:00 PM  | 7:29:00 PM | 4,00          | CONDITIONNEUSE CFA124/01 | CONDITIONNEUSE      | D           | Chargeur pousseur                 |

FIG. 5.11 : Exemple de liste des évènements

Après plusieurs essais, nous avons obtenu le Tableau 5.3 qui résume les résultats de la statistique descriptive pour les deux lignes.

TAB. 5.3 : Rapport récapitulatif de la statistiques descriptives pour les deux lignes

| Les lignes                                   | Ligne 3 CFA 1 | Ligne 4 CFA 2 |
|--|---------------|---------------|
| Nombre d'instance dans l'ensemble de données | 92            | 102           |
| Moyenne                                      | 468           | 442,94        |
| Écart type                                   | 178,52        | 147,82        |
| Médian                                       | 400           | 388           |

On remarque que les arrêts programmés des deux machines sont planifiés à la même période et au même moment. La différence entre le nombre d'instances des deux tables de données est dû aux stocks excédentaires. Dans ce cas, la troisième ligne s'arrête pendant que la quatrième continue, ce qui explique cette différence.

### 5.3.3 Etude de capacité

Dans cette partie, on vise à estimer la capacité à court terme pour avoir une idée sur la meilleure performance possible du processus et s'il est centré et la capacité à long terme pour voir la reproductibilité soutenue du processus [54].

De plus, pour estimer le niveau de qualité de notre processus de set up et sa capacité à générer des temps qui respectent les spécifications limites définie par le service de production, on a suivi les étapes suivantes sous le logiciel Minitab.

#### 1. Le test de normalité

Hypothèses de test d'Anderson-Darling :

- H0 Les temps de set up se conforment à une loi normale.
- H1 Les temps de set up ne se conforment pas à une loi normale.

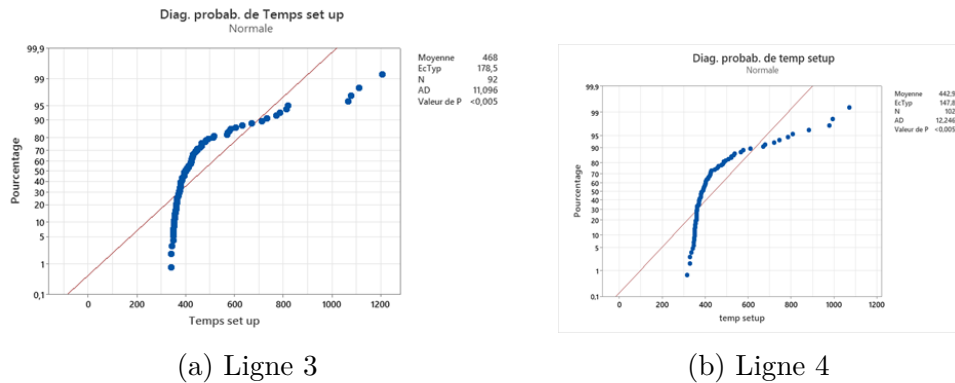


FIG. 5.12 : Test de normalité

Le test d'Anderson Darling illustré dans la Figure 5.12 montre que la valeur de P pour les deux lignes est inférieure à 0.5% ce qui signifie que l'hypothèse H0 est fausse. Cela indique que les données des temps de set up ne suivent pas une loi normale. Cependant, on doit gérer et évaluer ces valeurs après la transformation.

### 2. Adéquation et ajustement des données

Pour évaluer la capacité de notre processus dans le cas des données qui ne suivent pas une loi normale, on a deux solutions possibles :

- Transformer nos données à une loi normale.
- Utiliser une autre loi (loi bimodale, weibull ...)

Afin d'effectuer le choix optimal on a effectué une analyse des différents transformateurs (box cox et Johnson) ainsi que les différentes lois et les résultats sont montrés dans la figure 5.13 :

| Loi de distribution         | AD     | P      | Valeur de P LRT |
|-----------------------------|--------|--------|-----------------|
| Normale                     | 11,096 | <0,005 |                 |
| Transformation de Box-Cox   | 1,504  | <0,005 |                 |
| Log-normale                 | 7,304  | <0,005 |                 |
| Log-normale à 3 paramètres  | 0,372  | *      | 0,000           |
| Exponentielle               | 24,056 | <0,003 |                 |
| Exponentielle 2 paramètres  | 3,269  | <0,010 | 0,000           |
| Weibull                     | 10,580 | <0,010 |                 |
| Weibull 3 paramètres        | 1,500  | <0,005 | 0,000           |
| Plus petite valeur extrême  | 14,759 | <0,010 |                 |
| Plus grande valeur extrême  | 6,386  | <0,010 |                 |
| Gamma                       | 8,575  | <0,005 |                 |
| Gamma 3 paramètres          | 1,971  | *      | 0,000           |
| Logistique                  | 7,861  | <0,005 |                 |
| Log-logistique              | 5,237  | <0,005 |                 |
| Log-logistique 3 paramètres | 0,278  | *      | 0,000           |
| Transformation de Johnson   | 0,213  | 0,850  |                 |

(a) Ligne 3

(b) Ligne 4

FIG. 5.13 : Test d'adéquation de l'ajustement

Les résultats montrent que le seul et le meilleur choix pour ajuster les données est la transformation de Johnson.

### 3. Test des valeurs aberrantes

Après la transformation des données, on a effectué un test des valeurs aberrantes pour les données transformées des deux lignes 3 et 4 :

D'après la Figure 5.14 on n'a aucune valeur aberrante.

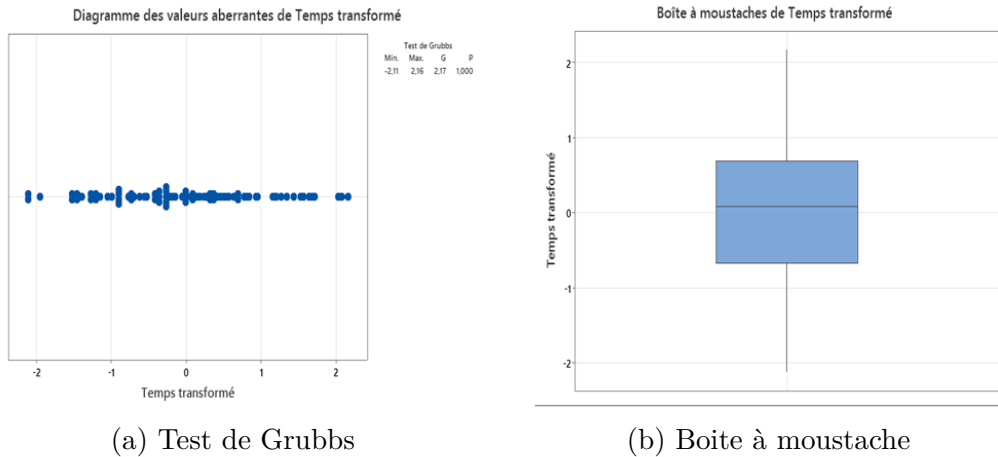
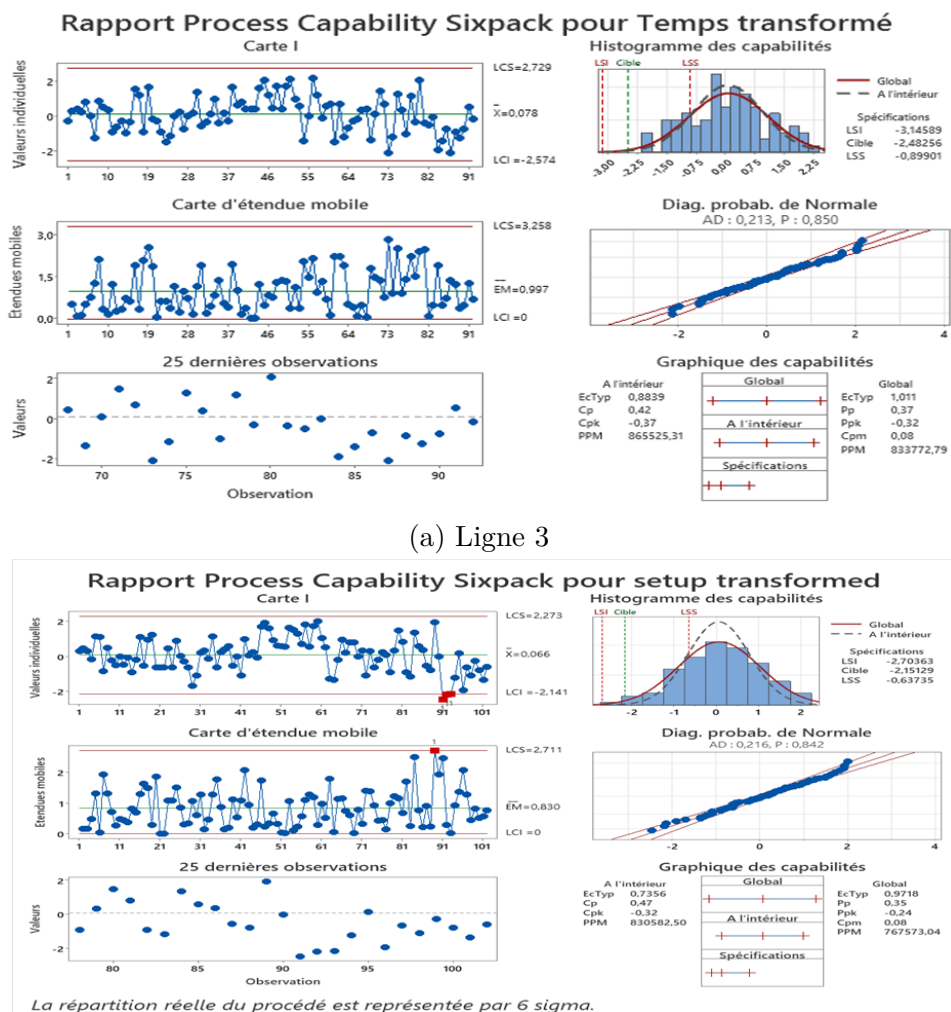


FIG. 5.14 : Test des valeurs aberrantes

4. Analyse de la capabilité et performance



(b) Ligne 4

FIG. 5.15 : Analyse de capabilité pour temps transformé pour ligne 3 et 4

Dans la Figure 5.15, on remarque dans l'histogramme que l'ensemble des observations surpassent la limite supérieure de spécification, ainsi le pic de la courbe de distribution est éloigné de la cible.

TAB. 5.4 : Résumé de l'analyse de capabilité et performance de ligne 3 et 4

|                                    | Ligne 3                              | Ligne 4                              |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Capabilité de processus</b>     | $C_p = 0,42$<br>$C_{pk} = -0,37$     | $C_p = 0,47$<br>$C_{pk} = -0,32$     |
| <b>Performance de processus</b>    | $P_p = 0,35$<br>$P_{pk} = -0,32$     | $P_p = 0,35$<br>$P_{pk} = -0,24$     |
| <b>PPM (LT)</b>                    | 833772,79                            | 767574,31                            |
| <b>PPM (CT)</b>                    | 865525,31                            | 830583,87                            |
| <b>Z référence</b>                 | $Z_{CT} = -1,11$<br>$Z_{LT} = -0,97$ | $Z_{CT} = -0,96$<br>$Z_{LT} = -0,73$ |
| <b>Écart type globale s</b>        | 1,011                                | 0,9718                               |
| <b>Écart type (à l'intérieure)</b> | 0,8839                               | 0,7356                               |
| <b>Cpm</b>                         | 0,08                                 | 0,08                                 |

**Interprétation :** L'analyse approfondie des résultats (Tableau 5.4) révèle des déficiences significatives en termes de capabilité et de performance avec une légère préférence pour la ligne 4 par rapport à la ligne 3. Et pour les deux ligne on a :

- $C_p < 1$  et  $P_p < 1,33$  procédé incapable, le processus ne satisfait pas les exigences du client.
- $C_{pk} < 0$  et  $P_{pk} < 0$  Cela signifie que non seulement la variation est importante, mais le processus est également décalé par rapport aux limites spécifiées.
- $C_{pm} < 1$ , ce qui indique que les conditions de centrage et de dispersion ne sont pas respectées
- L'écart type global de 0,9718 pour ligne 4 et 1.011 pour ligne 3. Ces mesure de la dispersion des données dans le processus de set up confirme une variabilité importante dans les résultats du processus.
- $C_p \neq C_{pk}$  et de plus il existe une chute entre  $P_p$  et  $P_{pk}$  et donc on a un problème de capabilité et un problème de centrage.

Les résultats obtenus s'alignent avec les valeurs de Z référence négatives. Cet indice permet de décrire le niveau sigma de processus. D'après les documentations de Minitab [8] et six sigma study guide [7], on peut conclure :

- Cette valeur négative est interprétée par le moyen de processus qui se situe en dehors des limites de spécifications (problème de centrage) à cause de la quantité significative des délais de set up qui dépasse les limites supérieures exigées par le service de la production.

- Le processus de set up est incapable et ne satisfait pas les exigences mais aussi nécessite une révision en termes des limites de spécifications.

Après l'analyse des capacités des deux lignes, on constate qu'on a deux problèmes :

- Problème de stabilité.
- Problème de centrage.

Notre objectif est de recentrer le processus (réduire le temps de set up à 5h30 min) et de le resserrer aux limites de spécifications (entre 5h et 6h). Donc approximativement une réduction de temps de set up actuelle 41,21% pour ligne 3 et une réduction 38,71% pour ligne 4 peuvent rendre les processus de set up capables.

### 5.4 Phase 3: Analyser

À moins que l'on puisse obtenir des faits et des données précises sur le lieu de travail, il ne peut y avoir d'amélioration ni de contrôle. Ishikawa Karou [25].

Avant d'analyser les causes racines du problème, nous avons commencé par la vérification des spécifications, car la majorité des valeurs, y compris la moyenne, dépassent la limite de spécification supérieure. Pour ce faire, nous avons tracé un diagramme de Gantt illustrant l'ordre et la durée des tâches (Figure 5.16). Selon notre analyse, le processus de set up peut se réaliser dans une durée de 5h30min.

Puis, pour déterminer les causes racines majeures qui causent les retards de cycle de set up, on réalise une analyse de pareto pour déterminer les 20% des causes qui sont responsables des 80% des retards. À la fin, on analyse chaque cause (parmi les 20%) en utilisant le diagramme d'ishikawa.

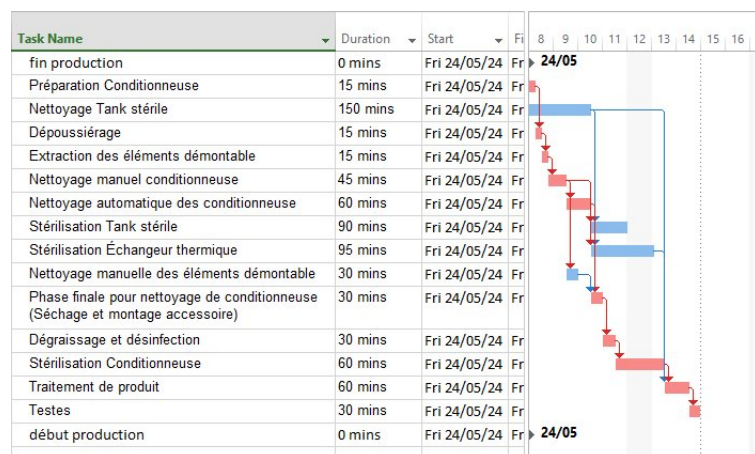


FIG. 5.16 : Diagramme de Gantt de processus de set up

#### 5.4.1 Analyse des données

L'explication et la signification de chaque cause dans le Tableau 5.5.

TAB. 5.5 : Explication des causes

| La cause                              | Explication  |
|---------------------------------------|--|
| Station CIP                           | Le système CIP (Cleaning In Place, nettoyage en place) est responsable du nettoyage et de la désinfection des équipements utilisés dans le processus de production. Un dysfonctionnement de la station CIP ou le nettoyage des objets simultanément au nettoyage de la ligne peut entraîner des retards de set up. |
| Arrêt programme                       | Cela signifie un arrêt de programme. Le redémarrage du programme se fait après une action corrective. Cela peut être dû à un certain nombre de facteurs, tels que des problèmes logiciels, des problèmes matériels (mécaniques, électriques...) ou des erreurs de l'opérateur.                                     |
| Panne                                 | Le fait que l'équipement ne puisse pas accomplir ses fonctions nécessaires.  |
| Attente Atelier Process               | Cela peut être dû à un certain nombre de facteurs, tels que le non-traitement de produits, attente que le tank stérile (tank de stockage) atteigne un certain niveau pour démarrer la production, une pénurie de matières premières.   |
| Attente conditionneuse sig 4          | Cela signifie attendre le Nep de la conditionneuse 4 pour démarrer la production.  |
| Non justifié                          | Cela fait référence aux retards injustifiés.   |
| Machine trop sale                     | Cela indique que la machine nécessite un nettoyage approfondi. Un cycle de production prolongé peut entraîner l'accumulation de sédiments, rendant le nettoyage plus ardu et causant ainsi des retards.  |
| Attente Labo (Libération de produits) | Signifie l'attente de libération de produit par le laboratoire avant de pouvoir procéder la production.  |
| Consommable                           | Il s'agit des consommables comme la matière première, les produits de nettoyage. Leur absence au moment requis peut entraîner des retards dans le temps de set up.   |

La répartition et les pourcentages des causes de retard sont montré dans les Tableaux 5.6 et 5.7 :

D'après les les Tableaux 5.6 et 5.7, On constat que le volume horaire perdu dans le set up est important, en moyenne on à 12h et 10h de temps perdu chaque mois à cause des retards de set up dans la ligne 3 et la ligne 4 respectivement.

Sachant que notre étude concentre seulement sur le set up qui inclut les nettoyages et stérilisations de la ligne complète et autre type d'arrêt (nettoyage hebdomadaire, nettoyage aseptique) sortent de cadre de l'étude.

TAB. 5.6 : Répartition des causes de retard pour la ligne 3

| Cause                            | Retard (minutes) | Pourcentage (%) | Pourcentage Cumulé (%) |
|----------------------------------|------------------|-----------------|------------------------|
| Station CIP occupé               | 3732             | 37,01%          | 37,01%                 |
| Arrêt programme                  | 2914             | 28,90%          | 65,91%                 |
| Panne Échangeur thermique (Flex) | 1353             | 13,42%          | 79,33%                 |
| Attente Atelier Process          | 565              | 5,60%           | 84,94%                 |
| Attente sig 4                    | 487              | 4,83%           | 89,76%                 |
| Panne conditionneuse             | 417              | 4,14%           | 93,90%                 |
| Panne suremballage               | 262              | 2,60%           | 96,50%                 |
| Panne Ts                         | 215              | 2,13%           | 98,63%                 |
| Panne Mixeur                     | 70               | 0,69%           | 99,33%                 |
| Causes non mentionnées           | 48               | 0,48%           | 99,80%                 |
| Machine trop sale                | 20               | 0,20%           | 100,00%                |
| Total                            | 10083            | 100,00%         | -                      |

Diagramme Pareto pour les causes de retard de la ligne 3

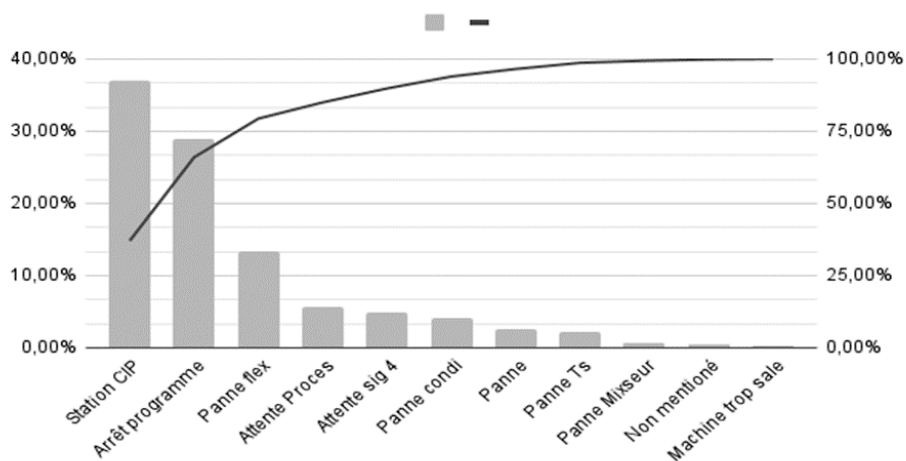


FIG. 5.17 : Diagramme Pareto pour les causes de retard de ligne 3

TAB. 5.7 : Répartition des causes de retard pour la ligne 4

| Cause                            | Retard (minutes) | Pourcentage (%) | Pourcentage Cumulé (%) |
|----------------------------------|------------------|-----------------|------------------------|
| Station CIP occupé               | 3635             | 41,70%          | 41,70%                 |
| Arrêt programme                  | 1450             | 16,63%          | 58,33%                 |
| Panne Échangeur thermique (Flex) | 1327             | 15,22%          | 73,56%                 |
| Attente Atelier Process          | 579              | 6,64%           | 80,20%                 |
| Consommable                      | 522              | 5,99%           | 86,19%                 |
| Panne conditionneuse             | 488              | 5,60%           | 91,79%                 |
| Attente conditionneuse sig 3     | 282              | 3,24%           | 95,02%                 |
| Panne Ts                         | 127              | 1,46%           | 96,48%                 |
| Panne suremballage               | 86               | 0,99%           | 97,46%                 |
| Attente labo                     | 86               | 0,99%           | 98,45%                 |
| Panne Mixeur                     | 70               | 0,80%           | 99,25%                 |
| Non justifié                     | 65               | 0,75%           | 100,00%                |
| Total                            | 8717             | 100,00%         | -                      |

Digramme de pareto ligne 4

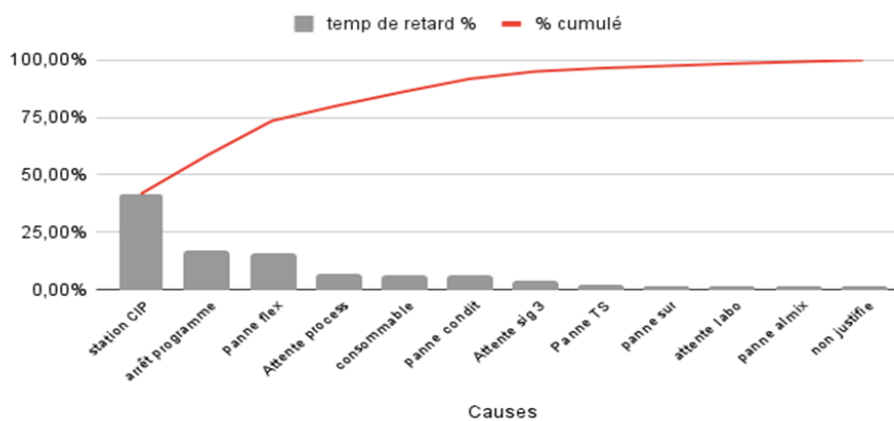


FIG. 5.18 : Diagramme Pareto pour les causes de retard de ligne 4

### 5.4.2 Identification des causes racines

D'après les résultats de l'analyse de Pareto, Les 20% des causes qui sont responsable sur 80% des retards sont :



### La station CIP

La station CIP est la 1ère cause des retards de set up et cela est dû à des diverses causes montré dans la Figure 5.19 :

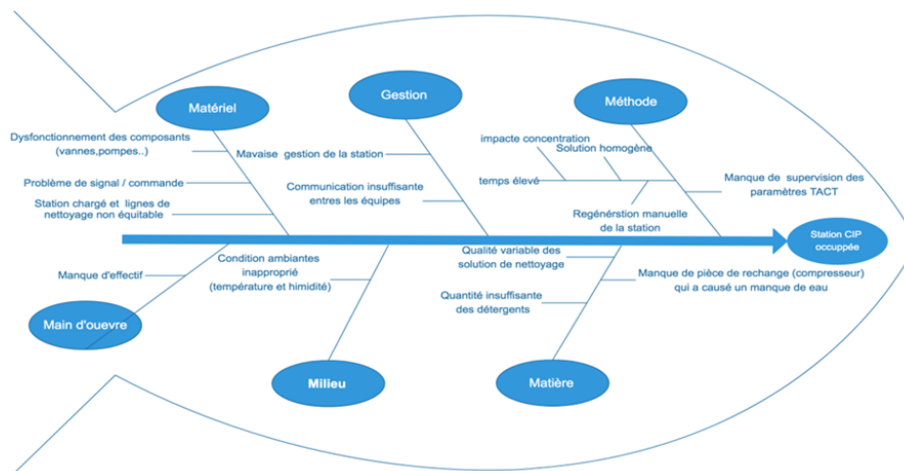


FIG. 5.19 : Diagramme Ishikawa pour la cause "station CIP occupée"

1. **Main d'oeuvre** : La station CIP est actuellement gérée par les superviseurs des ateliers process et préparation. Ces opérateurs ont diverses tâches à effectuer en plus de la gestion de la CIP, ce qui peut entraîner des erreurs humaines et des retards. Par exemple, si le nettoyage des tanks et des conditionneuses commence après deux heures et que l'opérateur choisit de nettoyer un autre objet juste avant le début du nettoyage, la station sera occupée, ce qui retardera le set up. De plus, dans d'autres usines de l'industrie laitière, cette station est gérée par un seul opérateur à temps plein.
2. **Méthode** : Pour un nettoyage réussi, il est essentiel de régler et de suivre attentivement en temps réel les variations des paramètres TACT. En effet, si ces paramètres dépassent les spécifications définies ou sont incorrectes, cela entraîne des retards. Un autre facteur de retard est la régénération de la station CIP et le traitement des solutions de nettoyage qui se fait manuellement.
3. **Matière** : La qualité et la quantité des détergents utilisés pour le nettoyage de la station CIP sont des éléments essentiels pour garantir l'efficacité. Si les détergents ne répondent pas aux normes de qualité ou si la quantité est insuffisante, le nettoyage risque d'être inefficace et prend plus de temps. Cela entraîne la nécessité de recommencer le processus, engendrant des retards dans la production. Une autre cause est le manque d'eau qui a comme cause racine l'indisponibilité de la pièce de rechange. Cet effet à provoquer des retards importants dans le set up.
4. **Matériel** : Les dysfonctionnements des composants de la station CIP cause des retards importants dans le processus de set up. En effet, la station CIP joue un rôle central en orchestrant et contrôlant les opérations de processus (maître), tandis que les objets et équipements connectés agissent comme des éléments périphériques (esclaves). Tout problème de communication entre la station CIP et ces éléments, tels

que des défauts de signal ou des commandes erronées, peut perturber le déroulement du processus et générer des retards. Ainsi, il y a environ 35 objets à nettoyer, ces objets sont répartis sur 3 lignes. La ligne 1 s'occupe de 15 objets, la ligne 2 s'occupe de 9 objets et la ligne 3 s'occupe de 9 objets. Cela signifie que la station est sur charge.

5. **Milieu** : L'environnement de la station CIP peut également être une source de retards dans le processus de set up car il peut influencer la station CIP. À titre d'exemple, l'impact de la température extérieure sur l'efficacité des cycles de nettoyage peut être observé, en particulier en ce qui concerne la température des solutions de nettoyage.
6. **Gestion** : La mauvaise gestion de la station entraîne des problèmes, si la station n'est pas propre ou mal gérée par les opérateurs cela provoque des retards.

### *Arrêt de l'échangeur thermique*

l'échangeur thermique joue un rôle crucial dans la fabrication de lait, En effet, il alimente les deux lignes de conditionnement (ligne 3 et 4) de manière continue, ce qui signifie que sa défaillance même minime peut engendrer l'arrêt immédiat de la production sur les deux lignes. Les cause de l'arrêt sont illustré dans la Figure 5.20 :

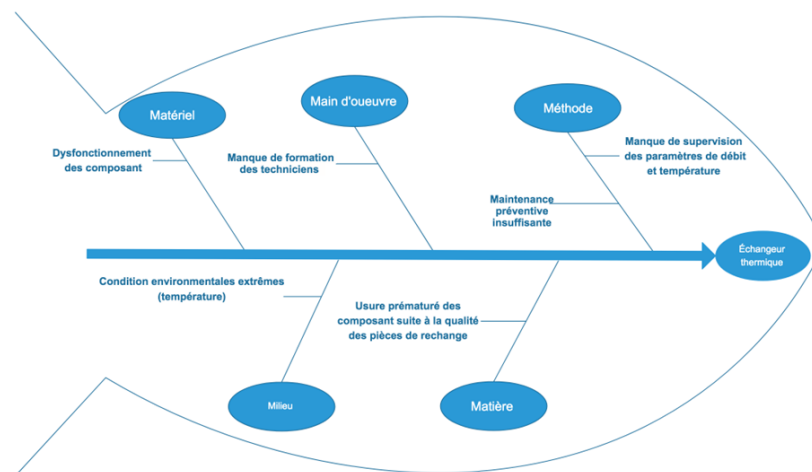


FIG. 5.20 : Diagramme Ishikawa pour la cause "Échangeur thermique"

1. **Main d'œuvre** : Un manque de formation des techniciens, si les techniciens ne sont pas correctement formés à l'utilisation de l'échangeur thermique, ou à la maintenance des composants, entraîne des erreurs. Ces erreurs peuvent endommager les composants et entraîner des dysfonctionnements et donc des retards.
2. **Méthode** : Si les paramètres de débit et de température ne sont pas correctement surveillés, cela peut entraîner une surchauffe ou un refroidissement excessif des composants. Cela peut l'endommager et entraîner des dysfonctionnements ce qui affecte le temps de setup. Selon le département de maintenance, les plans de maintenance préventive sont respectés. Mais après l'analyse, nous avons constaté que la maintenance préventive n'est pas suffisante pour prévenir les arrêt de l'échangeur thermique.

3. **Matière** : usure prématurée des composants à cause des pièces de rechange de mauvaise qualité qui sont utilisées.
4. **Matériel** : Le dysfonctionnement des composants peut être dû à plusieurs causes tel que : Les contraintes importantes liées aux changements de température et de pression, ce qui peut entraîner leur usure naturelle au fil du temps. Cela peut fragiliser les composants et les rendre plus susceptibles de se fissurer, de se corroder ou de se rompre. Ainsi que, la corrosion peut être causée par le contact avec des fluides agressifs, tels les produits chimiques (acide, soude) utilisés dans le nettoyage.
5. **Milieu** : Les conditions environnementales extrêmes.

**Les arrêts de programme de conditionneuse**

Nos observations ont révélé que la stérilisation et le nettoyage ne se terminent pas toujours correctement dans les conditionneuses, en raison de divers facteurs (Arrêt de programme). En cas d'échec de la stérilisation et nettoyage, il est impératif de recommencer l'intégralité du cycle de stérilisation à partir de zéro. En effet, la machine sera considérée comme contaminée et ne peut pas être utilisée en production pour assurer la sécurité des produits alimentaires. Les divers causes sont montré dans la Figure 5.21 :

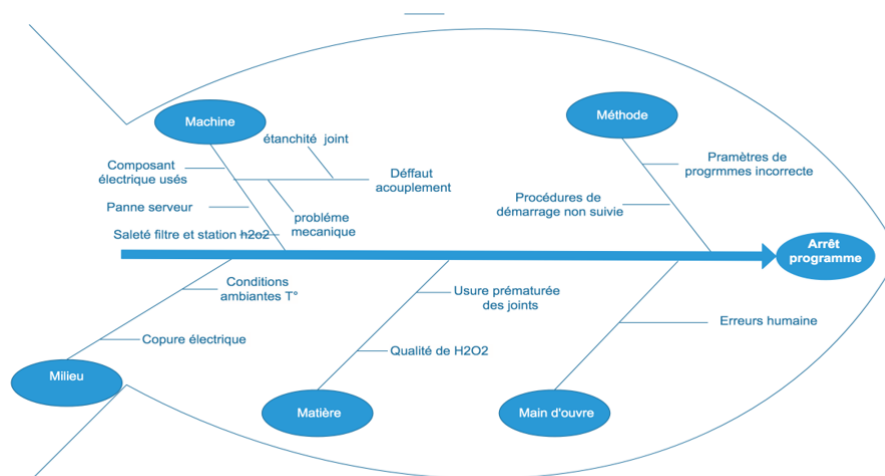


FIG. 5.21 : Diagramme Ishikawa pour la cause "Arrêt programme"

- **Main d'oeuvre** : Les erreurs humaines peuvent constituer un facteur de risque important pour le bon déroulement du processus de stérilisation. Divers types d'erreurs peuvent entraîner des échecs, compromettant ainsi la sécurité microbiologique des produits alimentaires.
  - Mauvaise manipulation : Une mauvaise manipulation des équipements, telle que le montage incorrect d'injection de vapeur, peut perturber le processus de stérilisation et empêcher l'atteinte des températures et des temps nécessaires à l'élimination des micro-organismes.
  - Mauvais réglage : Un mauvais réglage des paramètres de stérilisation, tels que la température, la pression ou la durée du cycle, peut également compromettre l'efficacité du processus et conduire à des échecs.

- **Méthode** : Le respect et le bon réglage des conditions de température et débit est crucial pour garantir le bon déroulement des processus industriels. Le non-respect de ces facteurs entraîne des perturbations dans le cycle de stérilisation et provoque des chutes de programme, compromettant ainsi l'efficacité du processus et la sécurité des produits.
- **Matière** : La qualité des pièces de rechange et du peroxyde utilisé jouent un rôle crucial dans le bon déroulement du processus de nettoyage et stérilisation. Des pièces de rechange défectueuses ou un peroxyde de qualité inférieure peuvent entraîner des dysfonctionnements, des fuites et des échecs, compromettant ainsi la sécurité des produits alimentaires. Pour l'impact de la qualité des pièces de rechange, on mentionne les joints d'étanchéité de mauvaise qualité, qui ne résistent pas aux produits chimiques agressifs utilisés pendant le nettoyage, peuvent se détériorer et provoquer des fuites. Ces fuites, notamment lors de l'injection de peroxyde et de vapeur, peuvent perturber le processus de nettoyage et entraîner des chutes de programme. Ainsi un peroxyde de qualité inférieure peut ne pas éliminer complètement les micro-organismes, ce qui met en danger la sécurité des produits alimentaires. Un peroxyde instable ou présentant des impuretés peut réagir de manière imprévisible, perturbant le processus de stérilisation et augmentant le risque d'échecs.
- **Matériel** : Des problèmes électriques tels que (les courts circuits) et mécaniques pouvant causer des chutes de programme. Ainsi, le mauvais positionnement de l'accouplement pivotant est une cause principale de chute programme, quand cet composant est bloqué et mal positionnée cela nécessite une action corrective de la part de l'opérateur pour le remettre à la bonne position, mais cette action nécessite l'ouverture des portes de la conditionneuse car elle s'effectue au niveau de la zone aseptique et donc la machine ne sera plus stérile et donc la stérilisation se redémarre à zéro.
  - Dysfonctionnements de la station de peroxyde : Des problèmes au niveau de la station de peroxyde, tels que des défauts de dosage ou des pannes de composants, peuvent perturber l'injection du peroxyde et entraîner des échecs de stérilisation.
  - Fuites sur les circuits de peroxyde.
  - Cas spécifique de la ligne 3 : Dans le cas de la conditionneuse de la ligne 3, il a été identifié qu'un décalage ou un défaut de conception dans la machine constituait l'une des principales causes de chutes de stérilisation. Ce défaut de conception perturbe le mouvement de la machine et entraîne des retards.
- **Milieu** : Un exemple d'impact indirect de l'environnement : la présence de poussière dans l'air ambiant peut s'avérer problématique pour la stérilisation. Elle peut s'infiltrer dans les filtres à air de la machine, les obstruer et réduire leur efficacité. Des filtres obstrués peuvent laisser passer des contaminants dans l'air stérile, compromettant ainsi la qualité du processus de stérilisation.

### *Attente de process*

Nous avons constaté des retards dans cet atelier pouvant perturber le processus de conditionnement des produits. Ces retards sont causés par plusieurs facteurs (figure 5.22)

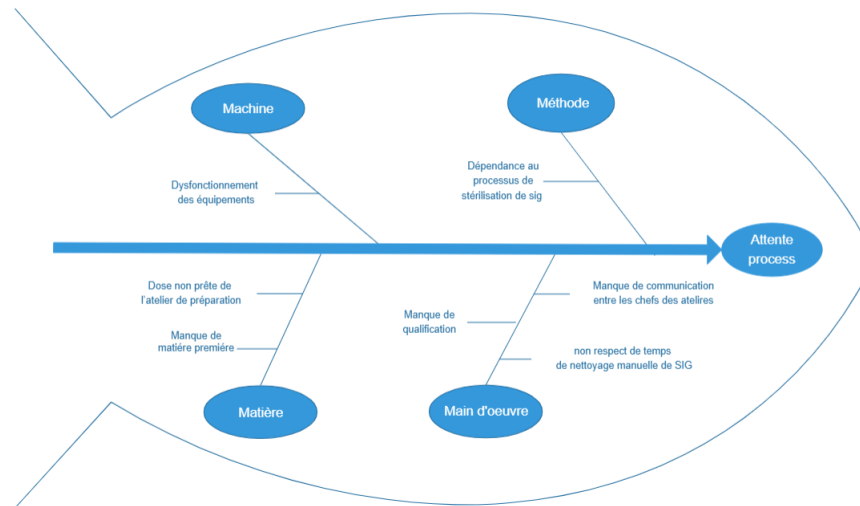


FIG. 5.22 : Diagramme Ishikawa pour la cause "Attente process"

- **Main d'œuvre** : une mauvaise communication entre les responsables des ateliers de processus et de conditionnement peut entraîner des retards dus à la dépendance des stérilisations des équipements de l'atelier process à la fin de la phase de nettoyage des conditionneuses. Cela se produit lorsque le chef d'atelier de conditionnement ne communique pas correctement les informations sur le moment où les conditionneuses sont nettoyées.

Le non-respect des temps de nettoyage manuel par les opérateurs de l'atelier de conditionnement a été observé. Lors de notre présence pendant les cycles de Set UP, nous avons constaté que les opérateurs dépassent le temps alloué pour le nettoyage manuel. Cela peut avoir un impact sur le temps de la stérilisation des équipements de processus et donc entraîner un retard pour le traitement des produits laitiers.

- **Méthode** : La dépendance de traitement de produit à la fin de la phase de stérilisation des conditionneuses peut entraîner des retards, car le superviseur de l'atelier de processus ne lance pas le traitement des produits tant que les conditionneuses ne sont pas prêtes alors qu'il peut traiter le produit juste après la fin de stérilisation de tank échangeur thermique et au même temps de stérilisation de la conditionneuse.
- **Matière** : Indisponibilité de la dose dans l'atelier de préparation, pouvant être causée par une pénurie de matière première.
- **Matériel** : En raison de la séquence et de l'interconnexion des phases, toute défaillance ou panne dans les composants, ainsi que toute intervention du service de maintenance, que ce soit dans l'atelier de processus ou de conditionnement, peuvent entraîner des retards.

### 5.5 Phase 4: Innover

"Tout ce qui est mesuré s'améliore." - Edward Deming [59].

### 5.5.1 Élaboration des solutions

Au cours de cette étape, nous allons identifier les sources de variabilité ayant l'impact le plus important sur les retards des processus de set up. Pour chaque source identifiée, nous avons proposé des solutions montrées dans les Tableaux 5.8, 5.9, 5.10 , 5.11 :

TAB. 5.8 : Les solutions proposées pour la station CIP

| Source de variabilité                      | Numéro-Solution proposé  |
|--|--|
| Ligne de station chargée                   | 1-Installer une nouvelle station de nettoyage pour les conditionneuses cela non seulement résoudre le problème de station CIP occupée mais aussi peut optimiser le temps.<br>2-Ajouter une autre ligne de nettoyage pour avoir une répartition équitable des objets sur les lignes de nettoyage. |
| Manque d'effectif                          | 3-Recruter un opérateur qui s'occupe seulement de la station CIP, cela contribue à une meilleure gestion de la station.  |
| Pannes de station et problème machine      | 4-Inspecter et tester les composants (les vannes et les pompes.) périodiquement pour assurer un bon fonctionnement.  |
| Qualité instable du détergent              | 5-S'approvisionner en agents de nettoyage de qualité constante et fiable et assurer un stockage dans des conditions appropriées pour assurer la stabilité de ces agents.   |
| Problème de signal                         | 6-Protéger les câbles de connexion et faire des vérifications régulières.  |
| Mauvaise gestion                           | 7-Mettre en place des procédures claires et des responsabilités bien définies.   |
| Manque de surveillance des paramètres TACT | 8-Formez le personnel à l'interprétation des données de surveillance.  |

TAB. 5.9 : Les solutions proposées pour attente process

| Source de variabilité   | Numéro-Solution proposé   |
|---|---|
| Le non-respect des temps de nettoyage manuels par les opérateurs            | 21-Former et informer les opérateurs de conditionnement sur le temps de nettoyage manuel qui doit être au maximum 45 minutes. |
| Manque de communication entre les ateliers de conditionnement et de process | 22-Améliorer la communication entre l'atelier de process et de conditionnement.   |
| Attente de niveau Tank stérile  | 23-Il faut commencer le traitement de produit dans la phase de refroidissement des machines conditionneuses.                  |

TAB. 5.10 : Les solutions proposées pour l'échangeur thermique

| Source de variabilité                                     | Numéro-Solution proposé  |
|---|--|
| Usure prématurée des composants                           | 9-Utiliser des matériaux de haute qualité.<br>10-Établir un calendrier et suivez le rigoureusement et remplacer les pièces usées avant qu'elles provoquent des pannes. |
| Le dysfonctionnement et anomalie de l'échangeur thermique | 11-Prédire les arrêts et identifier les anomalies avant qu'elles ne surviennent.   |
| Manque de formation des techniciens                       | 12-Organiser des sessions de formation des techniciens et assurer qu'ils comprennent les procédures de maintenance et réparation.                                      |
| Manque de supervision des paramètres                      | 13-En plus du système de suivi en temps réel, il faut former le personnel à l'interprétation des données de surveillance.  |

TAB. 5.11 : Les solutions proposées pour la Conditionneuse

| Source de variabilité                        | Numéro-Solution proposé   |
|--|---|
| Défaut accouplement pivotant                 | 14-Acheter le nouvel accouplement proposé par le fournisseur.<br>15-Former le personnel à l'installation correcte des accouplements et utilisation des gabarits ou des outils pour garantir un positionnement précis.   |
| Usure des joints                             | 16-Mettre en place un programme régulier pour inspecter et remplacer -si nécessaire- les joints.<br>17-Utiliser des joints qui peuvent résister aux solutions de nettoyage à haute température et concentration élevée. |
| Saleté de filtre et station de peroxyde H2O2 | 18-Vérifier les thermocoax (unité H2O2) ainsi que les filtres.  |
| Les erreurs Humaines                         | 19-Renforcer les contrôles de qualité et la supervision pour minimiser les erreurs humaines.  |
| La mauvaise qualité de Peroxyde H2O2 utilisé | 20-S'approvisionner en H2O2 de qualité supérieure et effectuer des tests réguliers pour vérifier sa concentration.  |

### 5.5.2 Sélection des solutions

La matrice PICK illustrée dans la Figure 5.23 inclut la répartition des solutions mentionnées dans les Tableaux 5.8, 5.9, 5.10 , 5.11.

Les solutions 9 et 2 en rouge sont des solutions à abandonner, car elles sont difficiles à implémenter et, même si elles sont mises en œuvre, elles auront soit un faible rendement, soit elles ne résoudront pas le problème. Par exemple, changer la répartition des lignes est non seulement difficile, mais cela ne s'aligne pas avec les projets futurs de l'entreprise qui souhaite intégrer plus d'objets, ce qui réintroduit le problème de ligne chargée.

D'autres solutions représentées en bleu ont un gain important malgré un certain degré de difficulté lors de l'implémentation. Par exemple, l'installation d'une nouvelle station nécessite beaucoup de ressources mais présente des gains très importants. De même, le recrutement de nouveaux opérateurs, l'organisation des sessions de formation et l'achat de nouveaux accessoires (Accouplement pivotant) proposés par le fournisseur.

Les solutions représentées en jaune sont possibles à implémenter mais avec un gain minime. Ces solutions nécessitent soit un changement de matière ou de source d'approvisionnement, soit des inspections et des contrôles réguliers. Par exemple, la solution 4 consiste à inspecter et tester régulièrement les composants pour prévenir les pannes, tandis que la solution 5 propose de s'approvisionner en agents de nettoyage de qualité constante pour assurer la stabilité des produits.

Enfin, les solutions faciles à implémenter avec un bénéfice important sont représentées en vert. Par exemple, la solution 23 suggère de changer la procédure de traitement sans affecter directement le produit, car même en cas d'anomalies, il y a des circuits de retour pour récupérer le produit. Cette solution vise à commencer le traitement du produit lors de la phase de refroidissement des machines conditionneuses, optimisant ainsi l'efficacité globale du processus. Ainsi, la solution 11 consiste à prédire les anomalies de l'échangeur thermique. Cette solution implique de mettre en place des systèmes de surveillance en temps réel pour identifier les problèmes avant qu'ils ne surviennent en intégrant des algorithmes de prédiction, l'entreprise peut anticiper les dysfonctionnements, réduisant ainsi les temps d'arrêt imprévus.

De plus, la mise en place de procédures claires et la formation des employés pour bien comprendre le fonctionnement de la station CIP apporteront une très grande valeur ajoutée. En suivant ces procédures, les opérateurs pourront facilement détecter les anomalies de la station et aider à les résoudre. Tout gain dans la station est bénéfique pour les deux lignes. De même, le suivi rigoureux et les programmes d'inspection des équipements dans les ateliers de traitement et de conditionnement (échangeur thermique et conditionneuse) sont très bénéfiques, car la majorité des retards sont causés par ces deux équipements. En outre, une autre solution simple mais très influente à appliquer est le respect du temps alloué au nettoyage manuel. Cette tâche est assez critique et les opérateurs perdent souvent beaucoup de temps sans être conscients des conséquences sur le processus de setup.



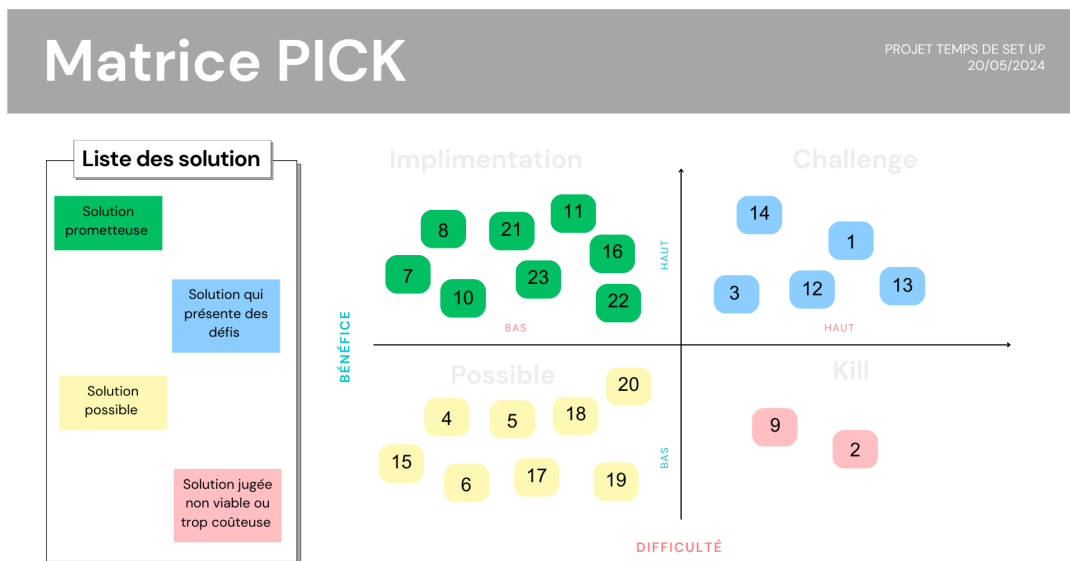


FIG. 5.23 : Matrice Pick des solutions proposées

### 5.5.3 Implémentation de la solution

À partir des solutions qu'on a proposé dans les sections précédentes on a essayé d'appliquer la solution qui consiste à prédire les arrêts de l'échangeur thermique pour réduire les retards avec 15%.

L'échangeur thermique (Figure 5.24) joue un rôle crucial dans la transmission de chaleur entre deux fluides, sans qu'ils ne se mélangent. Il y a diverses catégories d'échangeurs thermiques, qui sont employés dans divers secteurs.

Notre étude a porté sur un échangeur thermique tubulaire qui utilise l'eau comme fluide primaire. Ce fluide se déplace à contre-courant avec le secondaire [6].

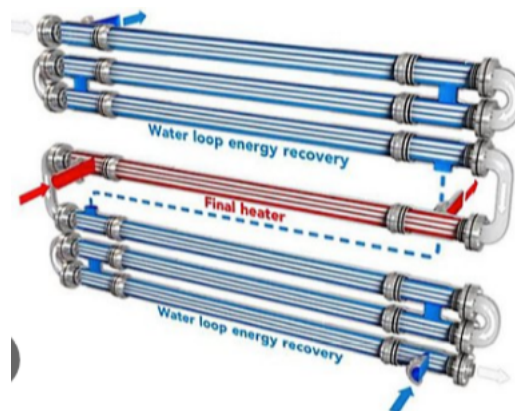


FIG. 5.24 : Échangeur thermique [5]

### Notre cas d'étude

- **Problème** : Notre problème réside dans les anomalies qui causent l'arrêt de l'échangeur thermique. Cet échangeur est un composant critique et lorsqu'il tombe en panne il cause un arrêt total de la production et prend beaucoup de temps pour être mis en marche une autre fois.
- **Objectif** : Prédire les anomalies de l'échangeur avant qu'ils surviennent avec les techniques de l'apprentissage automatique.
- **Outils** : Pour réaliser les modèles d'apprentissage automatique (ML) , on a utilisé divers outils :
  - Logiciel WEKA pour visualiser et préparer les données.
  - Logiciel Anaconda qui est un environnement de langage python.
- **Variables** : Les variables de dataset sont illustré dans la Figure 5.25 :

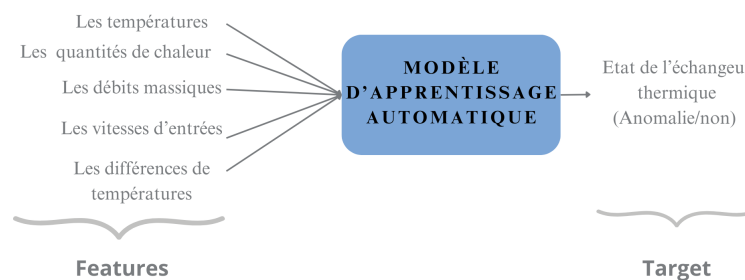


FIG. 5.25 : Représentation des variables utilisées pour l'apprentissage supervisé

### Les étapes d'implémentation de l'apprentissage automatique

1. **Collecte des données** : Les données qu'on a utilisé (Figure 5.26) sont extrait à partir d'une base de données télécharger d'un site web "Kaggle" : (<https://www.kaggle.com/datasets/raretechsea/raretechsea1c-60>)

```

Entrée [8]: # Visualiser les données
dataset.head()

Out[8]:

```

|   | Temp1In | Temp1Out | Temp2In | Temp2Out | Q      | Qr     | Lmtd  | Theta1 | Theta2 | m1    | m2    | dP1   | dP2   | V1In  | V2In  |
|---|---------|----------|---------|----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 68      | 63       | 57      | 67.98    | 409.91 | 68.32  | 1.011 | 4.95   | 10.87  | 39.16 | 8.88  | 31.12 | 0.06  | 0.923 | 0.193 |
| 1 | 61      | 56       | 50      | 60.97    | 272.18 | 68.05  | 1.125 | 4.45   | 9.75   | 26.00 | 12.70 | 80.97 | 42.66 | 0.409 | 0.207 |
| 2 | 22      | 27       | 32      | 22.06    | 647.96 | 129.59 | 1.127 | 4.44   | 8.81   | 31.90 | 34.98 | 1.05  | 69.90 | 0.363 | 0.448 |
| 3 | 72      | 77       | 83      | 72.03    | 474.49 | 118.62 | 1.154 | 4.33   | 9.50   | 45.33 | 21.39 | 70.97 | 41.94 | 1.603 | 0.792 |
| 4 | 69      | 62       | 56      | 68.90    | 610.08 | 76.26  | 1.455 | 4.81   | 8.86   | 41.63 | 22.60 | 33.62 | 7.84  | 0.327 | 0.178 |

FIG. 5.26 : Extrait de l'ensemble des données télécharger

L'ensemble de données initial comporte 32 colonnes (caractéristiques) et 59 265 instances. Afin d'optimiser l'analyse et de nous concentrer sur les aspects les plus

pertinents, nous avons limité notre étude à 15 variables clés, sélectionnées en collaboration avec l'expert en échangeurs thermiques en charge du stage. Ces variables, de nature réelle ou entière (Figure 5.27), représentent les paramètres les plus critiques influençant le fonctionnement des échangeurs thermiques. Les détails supplémentaires concernant ces variables clés sont résumés dans la Figure 5.28 :

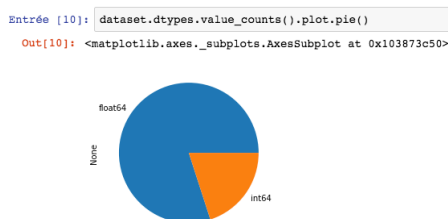


FIG. 5.27 : Nature de données

| Numéro | Nom de la colonne | Valeurs non nulles | Type de données | Valeurs uniques | Moyenne    |
|--------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------|
| 1      | Temp1In           | 59265              | int64           | 69              | 57.330060  |
| 2      | Temp1Out          | 59265              | int64           | 69              | 55.846942  |
| 3      | Temp2In           | 59265              | int64           | 76              | 54.874665  |
| 4      | Temp2Out          | 59265              | float64         | 7225            | 55.913445  |
| 5      | Q                 | 59265              | float64         | 50638           | 921.370001 |
| 6      | Qr                | 59265              | float64         | 48892           | 764.936175 |
| 7      | Lmtd              | 59265              | float64         | 23879           | 14.005340  |
| 8      | Theta1            | 59265              | float64         | 921             | 1.561173   |
| 9      | Theta2            | 59265              | float64         | 1034            | 1.185523   |
| 10     | m1                | 59265              | float64         | 4999            | 21.848763  |
| 11     | m2                | 59265              | float64         | 4993            | 28.819356  |
| 12     | dp1               | 59265              | float64         | 9635            | 37.115838  |
| 13     | dp2               | 59265              | float64         | 9612            | 36.861499  |
| 14     | v1In              | 59265              | float64         | 6041            | 1.771064   |
| 15     | v2In              | 59265              | float64         | 6859            | 2.572558   |

FIG. 5.28 : Description de données

TAB. 5.12 : Description des variables utilisées dans l'analyse des échangeurs thermiques

| Variable | Description                                     |
|----------|---|
| Temp1In  | Température d'entrée du fluide 1                |
| Temp1Out | Température de sortie du fluide 1               |
| Temp2In  | Température d'entrée du fluide 2                |
| Temp2Out | Température de sortie du fluide 2               |
| Q        | Quantité totale de chaleur                      |
| Qr       | Quantité de chaleur rayonnante                  |
| LMTD     | Différence de température logarithmique moyenne |
| Theta1   | (Temp1 Entrée - Temp1 Sortie)                   |
| Theta2   | (Temp2 Entrée - Temp2 Sortie)                   |
| m1       | Débit massique du fluide 1                      |
| m2       | Débit massique du fluide 2                      |
| dp1      | Perte de charge du fluide 1                     |
| dp2      | Perte de charge du fluide 2                     |
| v1In     | Vitesse d'entrée du fluide 1                    |
| v2In     | Vitesse d'entrée du fluide 2                    |

2. Préparation des données : cette méthode inclut le nettoyage des données tels que les valeurs manquantes et les valeurs aberrantes et pour cela on a utilisé le logiciel WEKA, avec le filtre Interquartile Range pour identifier les valeurs aberrantes et on les supprimer avec le filtre Remove Values.

Notre dataset n'inclut pas des valeurs manquantes, n'est des variables de types objet c'est pour ça on a seulement supprimer les valeurs aberrantes. Par conséquent la taille de dataset a été réduite de 59265 à 53435 instances.

3. Analyse des données : Dans cette étape, on a analysé la corrélation entre les variables. De plus, on a fait un rapport de statistiques descriptives (Annexe D).

On a observé une forte corrélation positive entre les températures d'entrées et de sortie, ainsi que pour les quantité de chaleur Qr et Q.

Après la transformation de dataset pour appliquer l'apprentissage supervisé, on a remarqué que la plus forte corrélation positive existe entre la quantité de chaleur Q et la variable "target" anomalie.

4. Entraîner le modèle : La technique "auto labelling" ou "self training" est la technique utilisé dans cette étude on a tout d'abord commencé par la création de la valeurs "Target" pour notre dataset après la séparation des données (20% pour le test). Pour le choix des algorithmes d'apprentissage non supervisé utilisés pour créer la variable target, on s'inspire de l'étude de MAHMUD et al. [37] pour détecter les anomalies. Pour les algorithmes d'apprentissage supervisé on a basé sur l'étude de ZOU et al.[23] pour choisir les algorithmes à implémenter (Annexe D).

Résultats :

```
Entrée [3]: # Visualiser les données
dataset.head()
```

```
Out[3]:
```

|   | Temp1In | Temp1Out | Temp2In | Temp2Out | Q      | Qr     | Lmtd  | Theta1 | Theta2 | m1    | m2    | dP1   | dP2   | V1In  | V2In  | Anomaly |
|---|---------|----------|---------|----------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0 | 68      | 63       | 57      | 67.98    | 409.91 | 68.32  | 1.011 | 4.95   | 10.87  | 39.16 | 8.88  | 31.12 | 0.06  | 0.923 | 0.193 | 1       |
| 1 | 61      | 56       | 50      | 60.97    | 272.18 | 68.05  | 1.125 | 4.45   | 9.75   | 26.00 | 12.70 | 80.97 | 42.66 | 0.409 | 0.207 | 1       |
| 2 | 22      | 27       | 32      | 22.06    | 647.96 | 129.59 | 1.127 | 4.44   | 8.81   | 31.90 | 34.98 | 1.05  | 59.90 | 0.363 | 0.448 | 1       |
| 3 | 72      | 77       | 83      | 72.03    | 474.49 | 118.62 | 1.154 | 4.33   | 9.50   | 45.33 | 21.39 | 70.97 | 41.94 | 1.603 | 0.792 | 1       |
| 4 | 69      | 62       | 56      | 68.90    | 610.08 | 76.26  | 1.455 | 4.81   | 8.86   | 41.63 | 22.60 | 33.62 | 7.84  | 0.327 | 0.178 | 1       |

FIG. 5.29 : L'ensemble de données après la création de variable "target"

5. Après la création de la valeur target on ré-entraîner notre dataset avec les d'autre algorithme d'apprentissage supervisé (Annexe E). Selon les métriques expliqué dans (Annexe G), on a obtenu les résultats résumés dans le Tableau 5.13 :

Puis, on a essayé d'optimiser les hyperparamètres (Annexe E.3 ) de chaque algorithme et on a obtenue les résultats de Tableau 5.14 :

6. Discussion : Le modèle Forêt aléatoire (RF) surpasse les autres en termes de toutes les métriques considérées (accuracy, recall, F1-score, précision), ce qui en fait le choix le plus performant pour ce dataset. SVM et KNN offrent des performances équilibrées, mais légèrement inférieures à RF. Adaboost, bien qu'ayant une bonne précision, est moins performant en termes de recall et F1-score que les arbres de décision. Forêt aléatoire serait probablement le meilleur choix global, suivi de SVM et KNN comme alternatives viables.

TAB. 5.13 : Les résultats d'évaluation des algorithmes selon divers métriques

| Algorithme        | Exactitude (accuracy) | Rappel (recall) | score F1 | Précision |
|-------------------|-----------------------|-----------------|----------|-----------|
| Arbre de décision | 0.93                  | 0.76            | 0.76     | 0.76      |
| Forêt Aléatoire   | 0.98                  | 0.99            | 0.97     | 0.96      |
| Adaboost          | 0.76                  | 0.70            | 0.74     | 0.80      |
| SVM               | 0.84                  | 0.79            | 0.83     | 0.88      |
| KNN               | 0.91                  | 0.97            | 0.92     | 0.87      |

TAB. 5.14 : Les résultats d'évaluation des algorithmes après L'optimisation

| Algorithme        | Exactitude (accuracy) | Rappel (recall) | F1-score | Précision |
|-------------------|-----------------------|-----------------|----------|-----------|
| Arbre de décision | 0.93                  | 0.75            | 0.77     | 0.79      |
| Forêt Aléatoire   | 0.98                  | 0.99            | 0.97     | 0.96      |
| Adaboost          | 0.79                  | 0.72            | 0.77     | 0.84      |
| KNN               | 0.96                  | 0.99            | 0.96     | 0.93      |

7. Implémentation : Parmi les algorithmes testés, l'algorithme de forêt aléatoire a obtenu les meilleurs scores sur les métriques d'évaluation choisies. Par conséquent, nous avons décidé de l'implémenter et de créer une interface conviviale (Annexe F) pour faciliter l'utilisation.

## 5.6 Phase 5: Contrôler

"La variation incontrôlée est l'ennemi de la qualité" Edward Deming [25]  
Contrairement aux phases précédentes, la phase de contrôle ne se termine jamais. C'est un ensemble d'opérations continues visant à maintenir et améliorer les gains réalisés. Dans le cas du processus de set up incluant le nettoyage et la stérilisation dans l'industrie laitière, après l'implémentation des solutions proposées, l'entreprise doit appliquer un certain nombre d'actions pour pérenniser les bénéfices obtenus grâce au projet Six Sigma[3]. Pour maintenir les gains réalisés par le projet Six Sigma, des outils de contrôle Lean peuvent être utilisés, notamment :[3]

1. 5S : Cette méthode permet de maintenir un environnement de travail ordonné et propre, ce qui est essentiel pour réduire les temps de set up. En organisant l'espace de travail, on élimine les gaspillages et on améliore l'efficacité.
2. Visual Factory : En utilisant des indicateurs visuels, tels que des panneaux, des affiches et des marquages au sol, on facilite la compréhension des processus et des

procédures par tous les employés. Cela permet de détecter rapidement les anomalies et de réagir en conséquence.

3. Standardized Work : La standardisation des tâches garantit que les procédures de nettoyage et de stérilisation sont effectuées de manière cohérente et efficace. Des instructions de travail claires et détaillées aident à minimiser les variations dans le processus.
4. Kaizen : L'approche Kaizen, ou amélioration continue, encourage les employés à proposer régulièrement des idées pour améliorer les processus. Cela permet de détecter et de corriger rapidement les inefficacités.
5. Kanban : Ce système de gestion des flux de travail permet de gérer les opérations de manière plus fluide, en évitant les surcharges et en assurant que les ressources nécessaires sont disponibles au bon moment.

L'utilisation des cartes de contrôle est également très utile pour détecter les causes spéciales qui rendent le processus hors de contrôle. Ces cartes permettent de prendre des actions correctives immédiates. Dans ce cas, les cartes individuelles (I-EM) et les cartes de moyennes et d'étendues (X-bar et R) semblent particulièrement appropriées.

Enfin, l'élaboration de plans de contrôle détaillés est essentielle pour documenter les mesures à suivre pour maintenir la stabilité du processus. Ces plans de contrôle doivent inclure des instructions claires pour la surveillance et la maintenance des équipements, ainsi que des protocoles pour la formation continue des employés.

### 5.7 Conclusion

En conclusion, dans cette partie expérimentale, nous avons appliqué les quatre premières phases de la démarche DMAIC. Nous avons commencé par l'identification des exigences et la cartographie des processus, puis nous avons effectué une analyse de capacité pour évaluer le processus existant. Dans la troisième phase, une analyse approfondie des différentes causes a permis d'identifier les causes racines des retards à l'aide des diagrammes de Pareto et de cause-effet.

Enfin, dans la phase d'innovation, nous avons proposé et évalué un ensemble de solutions pour les problèmes identifiés. De plus, nous avons essayé de mettre en œuvre une solution basée sur l'apprentissage automatique. Au-delà de la phase d'innovation, nous avons cherché à fournir des outils et des techniques à appliquer pour assurer et maintenir le contrôle du processus étudié.

# Conclusion et perspectives

### 5.8 Conclusion générale

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, notre objectif principal a été d'appliquer une démarche d'amélioration continue, ainsi que les divers outils étudiés tout au long de notre formation, afin d'apporter une amélioration significative et un gain tangible pour l'entreprise Tchén Lait. Au-delà de nos objectifs principaux, nous avons cherché à intégrer des outils d'intelligence artificielle pour consolider le succès de ce projet.

Premièrement, ces objectifs n'auraient pu être atteints sans la contribution essentielle du personnel de l'entreprise, tant cadres qu'opérateurs, qui ont été au cœur de ce projet. C'est une expérience riche en défis et en apprentissages.

Deuxièmement, l'application de la démarche DMAIC nous a guidés tout au long de notre projet visant à améliorer le processus de setup. La phase de définition nous a permis de bien comprendre le sujet et de délimiter notre cadre d'étude. La phase de mesure nous a permis d'évaluer le système de mesure utilisé pour calculer les temps de setup, ainsi que la capacité et la performance du processus.

Les résultats de cette phase montrent que le processus actuel de set up est loin de satisfaire les exigences établies par le service de production. Et c'est pour cette raison que durant la phase d'analyse, nous avons cherché à identifier les causes racines des retards, notamment l'attente de traitement des produits, les arrêts des machines conditionneuses, les arrêts de l'échangeur thermique, et la principale cause identifiée : Occupation station CIP (Clean-In-Place). Ces analyses ont facilité la phase d'innovation, où nous avons proposé et sélectionné un ensemble de solutions. La solution présentée dans ce mémoire consiste à prédire les anomalies de l'échangeur thermique en utilisant des techniques d'apprentissage automatique, ce qui pourrait réduire de 15% les retards dus au setup.

Bien que le résultat estimé pour l'application de la solution proposée soit prometteur, il ne suffit pas pour mettre le processus de setup sur la bonne voie. En se basant sur les calculs de la phase de mesure, l'entreprise doit consacrer davantage de ressources et d'efforts à cette anomalie. Néanmoins, il s'agit d'une bonne solution de départ. À notre niveau, nous recommandons d'appliquer au moins une solution pour chaque cause majeure identifiée.

Comme perspectives futures, des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les solutions proposées en termes de bénéfices, coûts et temps requis pour leur mise en œuvre.

Concernant la solution réalisée, l'intégration d'autres algorithmes d'apprentissage non supervisé, tels que K-means, pourrait permettre de créer différentes classes d'anomalies (encrassement, fuites, corrosion, prise d'air etc.). Ainsi, l'intégration des réseaux de neurones artificiels peut améliorer les résultats de l'apprentissage supervisé.

De plus, pour affiner les résultats, il serait pertinent de mettre en place des cartes de contrôle des temps de setup afin de vérifier si les écarts entre l'état actuel et la cible sont minimisés après l'implémentation de la solution.

En somme, l'application de la démarche DMAIC est une approche prometteuse qui



utilise divers outils efficaces. Cependant, avec l'évolution de l'industrie et l'essor des big data, il pourrait être nécessaire de recourir aux techniques d'intelligence artificielle. Des études futures intégrant ces techniques avec la philosophie Lean Six Sigma seraient très bénéfiques et permettraient d'exploiter pleinement le potentiel de l'amélioration continue dans un contexte industriel moderne.

# Bibliographie

- [1] Iso. URL <https://www.iso.org/fr/home.html>. Consulté le :8-3-2024.
- [2] Larousse. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/nettoyer>. Consulté le :15-3-2024.
- [3] Skill4all. URL <https://www.skills4all.com/certification/lean-six-sigma-yellow-belt-iassc>. Consulté le :27-05-2024.
- [4] Talend. URL <https://www.talend.com/fr/resources/etapes-machine-learning>. Consulté le :08-06-2024.
- [5] Tetrapak. URL <https://www.tetrapak.com/maghreb/solutions/integrated-solutions>. Consulté le :22-05-2024.
- [6] Totalenergie. URL <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie>. Consulté le :20-05-2024.
- [7] Six sigma study guide. URL <https://sixsigmastudyguide.com/process-capability-cp-cpk/>. Consulté le :27-03-2024.
- [8] Minitab. URL <https://support.minitab.com>. Consulté le :27-05-2024.
- [9] Pyzdek Thomas & Keller Paul A. *The Six Sigma handbook : A complete guide for Green Belts, Black Belts, and managers at all levels (3rd ed.)*. McGraw-Hill Professional, 2009.
- [10] Trimarjoko A., Hardi Purba H., and Nindiani A. Consistency of dmaic phases implementation on six sigma method in manufacturing and service industry : a literature review. *Management and Production Engineering Review*, Vol 41, no 1:pp 1–18, (2020).
- [11] Zahran Abd Elnaby, Amal Zaher, Ragab K Abdel-Magied, and Heba I. Elkhoully. Improving plastic manufacturing processes with the integration of six sigma and machine learning techniques : a case study. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol 41, no 1:pp. 1–18, (2024).
- [12] Kayid Amr. The role of artificial intelligence in future technology. *Department of Computer Science, The German University in Cairo*, (2020).

- [13] Haenlein Michael & Kaplan Andreas. A brief history of artificial intelligence : On the past, present, and future of artificial intelligence. *California management review*, vol. 61, no 4:pp. 5–14, (2019).
- [14] Sweeney Benjamin. *Lean Six Sigma QuickStart Guide : The Simplified Beginner's Guide to Lean Six Sigma (2ème éd)*. ClydeBank Media LLC, 2017.
- [15] Tanawadee Boonchai-Empl, Jiju Antony, Jose Arturo Garza-Reyes, Han Liu, Alexander Gegov, and Mihaela Cocea. Rule based systems for big data : a machine learning approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*, Vol 41, no 1:pp. 63–73, (2016).
- [16] Tanawadee Boonchai-Empl, Jiju Antony, Jose Arturo Garza-Reyes, et al. Integration of industry 4.0 technologies into lean six sigma dmaic : A systematic review. *Production Planning Control*, Vol 41, no 1:pp. 1–26, (2023).
- [17] D Bounazef. Application de la méthode six sigma sur un système de management intégré qse Étude de cas : Chiali tubes. Master's thesis, École des Hautes Études Commerciales, (2012).
- [18] Tsinaraki Chrysi & Kostic Uros Delipetrev Blagoj. Historical evolution of artificial intelligence. (2020).
- [19] Omer Faruk Dogan, Onur& Gurcan. Data perspective of lean six sigma in industry 4.0 era : A guide to improve quality. *Proceedings of the international conference on industrial engineering and operations management, Southfield, MI, USA : IEOM Society*, Vol 41, no 1:pp. 943–953, (2018).
- [20] Weichert Dorina, Link Patrick, Rüping Stefan Stoll Anke, Ihlenfeldt Steffen, and Wrobel Stefan. A review of machine learning for the optimization of production processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, no 5-8:pp. 1889–1902, (2019).
- [21] Figueroa Perez E. Syringe filling line changeover time reduction by cip recipe overlap with product transfer recipe. *Management*, (2021).
- [22] Aizier Emilie. Adaptation du lean manufacturing dans un environnement gmp : ses opportunités et ses limites. Master's thesis, Université de Lorraine, (2012).
- [23] Zou J.and Hirokawa T.and An J.and Huang L.and Camm J. Recent advances in the applications of machine learning methods for heat exchanger modeling : a review. *Frontiers in Energy Research*, Vol 11:pp. 1294531, (2023).
- [24] Arthur Jay. *Lean six sigma demystified (2nd ed.)*. McGraw Hill, 2011.
- [25] Brenig-Jones Martin & Dowdall Jo. *Lean Six Sigma For Dummies*. John Wiley Sons, 2021.
- [26] Britz T & Robinson R. K. *Advanced Dairy Science and Technology*. Wiley-Blackwell, 2008.

- [27] Kowalik K. Six sigma as a method of improving the quality of service process. *Production Engineering Archives*, Vol 19, no 19:pp. 10–15, (2018).
- [28] Patil A. B.& Alok I. K. Process improvement using DMAIC approach : case study in downtime reduction. *International Journal of Engineering Research Technology (IJERT)*, Vol 3, no 3, (2014).
- [29] Awad Mariette & Rahul Khanna. *Efficient Learning Machines : Theories, Concepts, and Applications for Engineers and System Designers*. Apress, 2015.
- [30] George Michael L. *Lean Six Sigma : An Introduction and Toolkit*. McGraw Hill LLC, 2011.
- [31] Samuel Arthur L. Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of research and development*, Vol.44, no 1.2, :pp. 206–226, (2000).
- [32] Ewa Leseure-Zajkowska. *Contribution à l'implantation de la méthode Lean Six Sigma dans les Petites et Moyennes Entreprises pour l'amélioration des processus*. PhD thesis, École Centrale de Lille, (2012).
- [33] De Jesús J. M. Improvements to perfusion skids 66501/66502/66503 operations used for enbrel product in aml-06. *Manufacturing Engineering*, (2020).
- [34] González D.& Márquez M. Improvement of clean-in-place (cip) in the evaporation process of a dairy company using six sigma. (2023).
- [35] Prabhakaran M., Kattimani P., Nayakappa Patil A., and Mehrotra K. Process improvement in a pharmaceutical company using dmaic approach. *IOSR Journal of Engineering*, pages pp. 42–50, (2020).
- [36] Ahmed Maged, Salah Haridy, Mahmoud Awad, and Mohammad Shamsuzzaman. Machine learning aided six sigma : Perspective and practical implementation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol 71:pp. 1519–1530, (2023).
- [37] I. Mahmud J. S., Birihanu E. & Lendak. A semi-supervised framework for anomaly detection and data labeling for industrial control systems. In *In Conference on Information Technology and its Applications*, pages pp. 149–160, (2024).
- [38] Antony Jiju & Kumar Maneesh. *Lean six sigma : Research and Practice*. Bookboon.com, 2011.
- [39] C Marin Alvarez. Clean in place recipe optimization. manufacturing competitiveness program. *prepository*, (2021).
- [40] Dowdall Jo & Brenig-Jones Martin. *Lean Six Sigma for Leaders : A Practical Guide for Leaders to Transform the Way They Run Their Organization*. John Wiley Sons, 2018.
- [41] Pillet Maurice. *Six sigma : comment l'appliquer*. Éditions d'Organisation, 2004.
- [42] Pillet Maurice. *Six sigma : comment l'appliquer (2ème éd)*. Groupes Eyrolles, 2013.

- [43] Rochester N. McCarthy J., Minsky M. and Shannon C. A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence. (1955).
- [44] Altuğ Mehmet. Application of six sigma through deep learning in the production of fasteners. *International Journal of Lean Six Sigma*, Vol. 14, no 7:pp. 1376–1402, (2023).
- [45] Volck Nicolas. *Déployer et exploiter Lean Six Sigma*. Groupe Eyrolles, 2009.
- [46] Kaelbling Leslie Pack, Littman Michael, and Moore Andrew W. Reinforcement learning : A survey. *Journal of artificial intelligence research*, Vol 4:pp. 237–285, (1996).
- [47] Wang Pei. On defining artificial intelligence. *Journal of Artificial General Intelligence*, Vol. 10, no 2:pp. 1–37, (2019).
- [48] Harrington Peter. *Machine Learning in Action*. :Manning Publications, 2012.
- [49] Hassan R., Marimuthu M., and Mahinderjit-Singh M. Improving plastic manufacturing processes with the integration of six sigma and machine learning techniques : a case study. *Application of Six-Sigma for process improvement in manufacturing industries : A case study*, (2016).
- [50] Demetrescoux Radu. *Lean Management*. Dunod, 2017.
- [51] Ripley P. & Neal D. Ray B. Lean manufacturing - a systematic approach to improving productivity in the precast concrete industry. *PCI journal*, Vol. 51, no 1:pp 62, (2006).
- [52] Campbell J.R.& Marshall R.T. *Dairy Production and Processing : The Science of Milk and Milk Products*. Waveland Press, 2016.
- [53] Bhargava M & Gaur S. Process improvement using six-sigma (dmaic process) in bearing manufacturing industry : à case study. In *In IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume Vol. 1017, No. 1,, page p. 012034. IOP Publishing, (2021).
- [54] Pande Peter S, Neuman Robert P, and Cavanagh Roland R. *The Six Sigma way team fieldbook : an implementation guide for project improvement teams*. McGraw Hill Professional, 2002.
- [55] M Souillard. *Résolution de problème selon la philosophie Lean Six Sigma : étude de cas appliquée à la viscosité d'une solution à usage externe*. PhD thesis, Université de Bordeaux, (2018).
- [56] Ibomoiye Domor Mienye & Yanxia Sun. A survey of ensemble learning : Concepts, algorithms, applications, and prospects. *IEEE Access*, (2022).
- [57] Womack James P & Jones Daniel T. *Lean Thinking : Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. First Free Press Edition, 2003.
- [58] Karandikar V, Sane S, Jahagirdar S, and Shinde S. Process improvement in a filter manufacturing industry through a six sigma dmaic approach. *International Journal of Current Engineering and Technology*, Vol 4, no 4:pp 2546–2556, (2014).

## Bibliographie

---

- [59] Stern Terra Vanzant. *Lean Six Sigma : International Standards and Global Guidelines*. Productivity Press, 2023.
- [60] Tamime Adnan Y. *Cleaning-in-place : dairy, food and beverage operations*. John Wiley Sons, 2009.

# Annexes

# Annexe A

## Boite à outils du Lean et six sigma



TAB. A.1 : Méthodes, Techniques et outils du Lean

| Domaine D'application   | Méthode, techniques et outils   | But  |
|---|---|--|
| Représenter les processus dans le temps et dans l'espace      | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Value Stream Mapping VSM</li> <li>-Lead time</li> <li>-Takt time</li> <li>-Temps de cycle</li> <li>-Goulot d'étranglement</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Illustrer une cartographie de la chaîne de la valeur.</li> <li>- Calculer le délai depuis la réception de la commande client jusqu'à la livraison du produit final.</li> <li>-Donner le rythme de la demande du client qui correspond à la cadence de fabrication d'un produit.</li> <li>-Calculer le temps total de fabrication d'un produit par un opérateur dans sa cellule ou dans la ligne de production.</li> <li>-Identifier l'activité la plus lente de la chaîne logistique pour augmenter son rendement.</li> </ul>   |
| Maintenir les améliorations et développer le potentiel humain | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Standardisation du travail</li> <li>-Work-In-Process WIP</li> <li>-Cross training</li> <li>-Kaizen</li> <li>-Système de suggestions du personnel</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Exécuter la séquence d'opérations de la meilleure façon possible identifiée jusqu'à maintenant</li> <li>-Respecter la taille minimale du stock en-cours qui assure l'exécution régulière d'opérations (sans arrêt du flux de matières)</li> <li>-Partager les connaissances au sein du groupe de travail</li> <li>-Poursuivre la démarche d'amélioration continue</li> <li>-Développer le potentiel humain et améliorer les performances.</li> </ul>   |
| Régulariser les flux et stabiliser les processus              | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Système 5S</li> <li>-Flux continu</li> <li>-Taux de rendement synthétique TRS</li> <li>-Single Minute Exchange of Dies SMED</li> <li>- Système Kanban</li> <li>-Heijunka</li> <li>-Juste-à-temps</li> <li>-Poka-Yoke</li> <li>-Contrôle visuel</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Organiser le poste de travail pour le rendre ergonomique et performant</li> <li>-Éliminer les stocks et les attentes des opérateurs</li> <li>-Calculer le taux d'utilisation de machines</li> <li>-Changer la série de production en moins de 10 minutes</li> <li>-Fabriquer la quantité strictement nécessaire pour réaliser la commande</li> <li>-Effectuer le lissage de la production pour éviter les périodes de travail intenses et les périodes d'inactivité</li> <li>-Livrer au bon moment le produit nécessaire</li> <li>-Réduire au minimum les défauts grâce au feedback et à l'action corrective immédiate</li> <li>-Prévenir et réagir rapidement aux non-conformités.</li> </ul> |
| Evaluer la satisfaction client                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Valeur ajoutée VA</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Calculer la valeur du produit du point de vue du client.</li> </ul>  |

TAB. A.2 : Méthodes, Techniques et outils de six sigma

| Domaines d'application                        | Méthode, techniques et outils  | But  |
|---|--|--|
| Générer des idées et rechercher des solutions | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Brainstorming</li> <li>-SIPOC</li> <li>-Benchmarking</li> <li>-Voix du Consommateur VOC</li> <li>-Diagramme CTQ</li> <li>-Déploiement de la Fonction Qualité QFD</li> <li>-Diagramme de Gantt</li> <li>-Diagramme de relations ID</li> <li>-Diagramme Pareto</li> <li>-5 pourquoi ?</li> <li>-Diagramme d'Ishikawa</li> <li>-Diagramme d'arbre</li> <li>-Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)</li> <li>-Diagramme des affinités</li> <li>-Analyse du champ de force</li> <li>-Diagramme de flux</li> <li>-Graphique en toile d'araignée</li> <li>-Graphique du temps</li> <li>-Diagramme de matrice</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Favoriser la génération d'idées créatives et innovantes en encourageant la collaboration et le partage d'idées au sein d'une équipe.</li> <li>- Définir les relations entre l'entreprise et les parties prenantes.</li> <li>-Identifier les meilleures pratiques et les opportunités d'amélioration.</li> <li>-Comprendre les attentes, besoins et perceptions des clients.</li> <li>-Identifier et décrire les besoins et spécifications du client.</li> <li>-Détecter les exigences du marché personnaliser les caractéristiques du produit ou du service pour correspondre aux attentes des clients .</li> <li>-Gérer le planning des tâches et respecter les délais.</li> <li>- Identifier, analyser et classer régulièrement les relations causes-résultats qui déterminent les problèmes clés.</li> <li>-Prioriser les actions d'amélioration en fonction de leur impact.</li> <li>-Trouver les causes racines du problème.</li> <li>-Identifier et éliminer les causes profondes des problèmes.</li> <li>-Simplifier la prise de décision et l'analyse en représentant graphiquement les tâches et leurs interrelations.</li> <li>-Identifier et classer les défauts dans les produits ou processus, puis, développer des actions correctives pour éliminer les défauts potentiels.</li> <li>-Agréger et organiser un grand nombre d'idées.</li> <li>-Évaluer les impacts positifs et négatifs des changements.</li> <li>-Présenter graphiquement les processus et identifier les tâches simultanées.</li> <li>-Évaluer la performance, visualiser l'écart entre la performance actuelle et idéale.</li> <li>-Surveiller les tendances des données de processus sur une période définie.</li> <li>-Identifier les relations entre les informations.</li> </ul> |

|  |  |   |
|--|--|---|
| <p>Effectuer le traitement statistique</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Analyse du Système Mesure MSA</li> <li>-Répétabilité et Reproductibilité R et R</li> <li>-Feuille de contrôle</li> <li>-Histogramme</li> <li>-Test d'hypothèse</li> <li>-Cartes de contrôle</li> <li>-Capabilité du processus</li> <li>-Analyse de corrélation</li> <li>-Régression linéaire simple</li> <li>-Plan d'expériences</li> <li>-Analyse de la variance ANOVA</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Évaluation des erreurs induites par le système de mesure.</li> <li>-Évaluation de la précision du système de mesure.</li> <li>-Compilation régulière et calcul des données.</li> <li>-Analyse de la distribution et de la forme du processus.</li> <li>-Confirmation de la normalité des échantillons.</li> <li>-Détection des variations et surveillance du processus dans le temps.</li> <li>-Mesure de la conformité aux spécifications et réduction de la variabilité.</li> <li>-Identification et mesure des relations entre deux variables.</li> <li>-Modélisation et étude des relations entre deux variables.</li> <li>-Évaluation simultanée de diverses configurations de facteurs pour choisir la meilleure solution.</li> <li>-Étude des variations liées à plusieurs facteurs.</li> </ul> |
| <p>Evaluer la satisfaction client</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Pièces Défectueuses Par Million (PPM).</li> <li>-Défauts Par Million Opportunités (DPMO).</li> <li>-Niveau de sigma.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Calculer le nombre d'éléments défectueux pour un million de pièces.</li> <li>-Calculer le nombre de défauts pour un million de possibilités de leur apparition.</li> <li>-Calcule de niveau de la qualité.</li> </ul>   |

# Annexe B

## Présentation de l'entreprise

### *La Fiche Technique de Tchîn lait*

- Nom : Tchîn Lait
- Forme juridique : SPA
- Logo :



FIG. B.1 : Logo de l'entreprise

- Slogan : "C'est sain, c'est simple" "Garantie de qualité".
- Date de Fondation : 1999 par Fawzi BERKATI.
- Secteur : Agroalimentaire et fabrication de boissons.
- Activité : production et commercialisation du lait longue conservation UHT (ultra haute température) et les produits dérivés.
- Tchîn lait sous le label de Candia à 3 unités dans l'une créé en 2015 et se trouve à BARAKI Alger avec plus de 300 Salariés et une superficie totale de 30.000m<sup>2</sup>. Cette unité produit des gammes riches des produits laitiers sous différents formats.
- Les produits Laitiers (lait blancs tel que Lait écrémé, Lait demi écrémé, Silhouette et entier).
- Les produits laits aromatisés, lait additionné au jus fruits et lait au chocolat.
- Ces produits peuvent être disponibles sous différents formats. Grand format : 1L et 0.5 L et petit format : 200 ml et 125 ml.

### *Historique de Tchîn lait*

- Fondée par M. Fawzi BERKATI en 1999, Tchîn-Lait est une entreprise privée de droit algérien. Elle est située sur l'ancien site de la limonaderie Tchîn-Tchîn, une entreprise familiale fondée en 1952, à l'entrée de la ville de Bejaia. Depuis mai 2001, Tchîn Lait fabrique et vend du lait longue conservation UHT (Ultra Haute Température) sous le label Candia. Le groupe Tchîn-lait se constitue de 4 unités réparties à Béjaïa, Alger et Sétif.
- En 2015, le deuxième site de production, Générale Laitière Jugurta (GLJ), a vu le jour, avec son siège à Baraki (Alger).
- Au mois de novembre 2017, les deux entreprises Tchîn-Lait et Générale Laitière Jugurta ont été fusionnées en une société par actions appelée « SPA Tchîn-Lait », avec un capital social d'un milliard de dinars algériens.
- En 2019, Tchîn-agro a été fondée afin de promouvoir l'agriculture et la production de lait cru.
- 2022 : Acquisition de l'usine de Ramdy à Akbou, spécialisée dans la fabrication de fromage, de yaourt, de lben et de raib.

### *L'organigramme de l'entreprise et le service de Production*

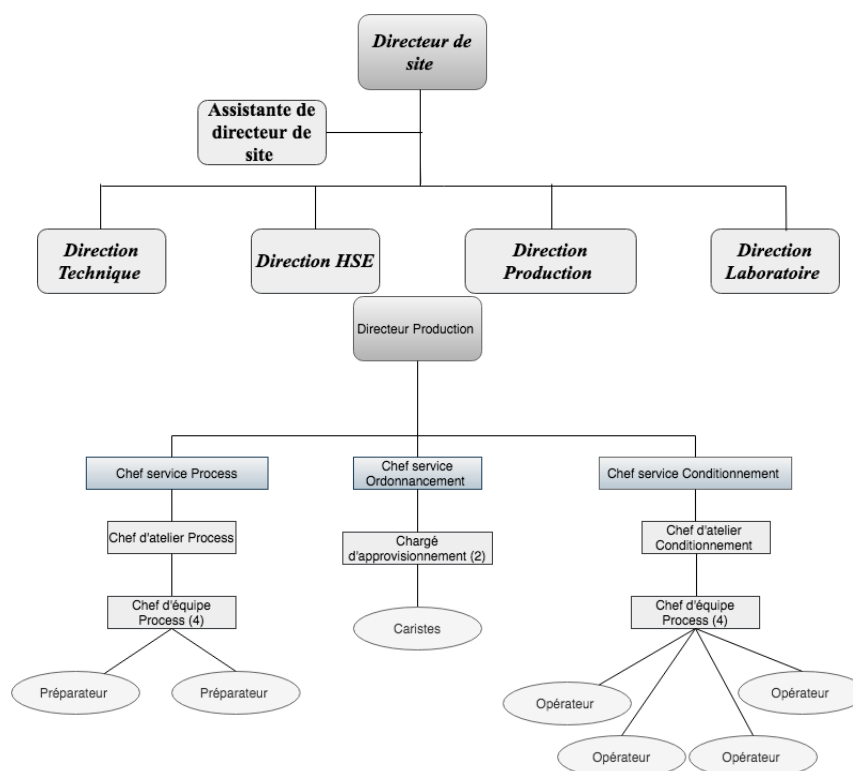


FIG. B.2 : Organigramme de l'entreprise et le service de Production

# Annexe C

## Documentation de processus

TAB. C.1 : Documentation de processus

|                         |   |
|-------------------------|---|
| Nom de processus :      | Processus de set up   |
| Propriétaire :          | Service de production de l'entreprise Tchén Lait -Candia-   |
| Créé par :              | BEN ALI Nesrine   |
| Mise à jour :           | BEN ALI Nesrine   |
| Date de Création :      | 08/03/2024  |
| Dernière révision :     | 11/03/2024  |
| Description             | L'entreprise nettoie ses équipements fréquemment pour assurer la sécurité alimentaire et maintenir la qualité de ses produits.  |
| Acteur :                | Atelier de conditionnement, traitement.   |
| Objectif du Processus : | Le but de ce processus est la modélisation et la visualisation de processus de nettoyage en appliquant toutes les notions de BPMN afin d'étudier et optimiser -si c'est possible- les temps de nettoyage. De plus, dans le cadre de la démarche appliquée, cette modélisation permet de clarifier les périmètres de projet et donc avoir une vision holistique de processus ainsi que ses flux. Ainsi, elle peut aider à identifier les problèmes et anomalies de processus actuel.   |
| Porté du processus :    | <p>-Le processus modélise seulement les étapes de nettoyage et stérilisation qui concernent les équipements de l'atelier de conditionnement et traitement (process), et concerne seulement le type de nettoyage réalisé entre deux cycles de production et ne prend pas en compte les nettoyages intermédiaires et le nettoyage hebdomadaire. Donc, les autres plans de nettoyage et les autres ateliers sortent du cadre de ce processus.</p> <p>-La raison pour laquelle l'atelier de suremballage sort de cadre de processus est : le nettoyage de cette atelier prends au max 2h et donc n'a pas un influence directe sur les temps de set up.</p> <p>-La raison pour laquelle l'atelier de préparation et récupération sortent de cadre de ce processus est : lors de nettoyage de ligne (traitement-conditionnement-suremballage ) les autres atelier sont en mode préparation de la matière.</p> |
| Entrées :               | <p>Les entrées de ce processus de set up sont : Eau, Produits chimiques de nettoyage (tel qu'acide et soude), Énergie , Personnel , Protocole de nettoyage.</p> <p>Une fois ces éléments sont présents et la fréquence de nettoyage a lieu(48h) , le processus commence.</p>  |

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <p>Limites du processus :</p> | <p>Les activités suivant l'input et précédent l'output définissent les limites du ce processus de nettoyage, donc, la limite de départ est la fréquence de nettoyage planifié par le service ordonnancement selon les consignes de constructeurs des équipements pour que ces derniers soient utilisés dans le prochain cycle de production. La limite de fin peut être la préparation pour démarrer un nouveau cycle de fabrication.</p>  |
| <p>flux de processus :</p>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nettoyage de l'échangeur de chaleur thermique "Flex" et des lignes UHT . (prend environ 120 min) se fait automatiquement dont les étapes détaillées :             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Remplir le bac de nettoyage avec de l'eau jusqu'à un certain niveau.</li> <li>2. Dosage du détergent alcalin (soude).</li> <li>3. Circulation du détergent dans les tuyauteries.</li> <li>4. Vidange du bac de lancement BTD de l'échangeur.</li> <li>5. Rinçage de l'échangeur.</li> <li>6. Remplissage à un certain niveau de détergent acide (nitrique).</li> <li>7. Dosage du détergent acide du bac de nettoyage vers le bac de lancement BTD pour l'échangeur.</li> <li>8. Circulation du détergent dans les tuyauteries du module.</li> <li>9. Vidange du bac de lancement de l'échangeur.</li> <li>10. Rinçage de l'échangeur.</li> <li>11. Rinçage final de l'échangeur.</li> <li>12. Vérification de l'état et enregistrement du nettoyage (contrôle des résidus chimiques et de Ph) Si les valeurs obtenues sont acceptables le sous processus se termine sinon, le nettoyage sera répété.</li> <li>13. Remplir l'affiche de suivi avec les paramètres enregistré durant le nettoyage.</li> </ol> </li> <li>• Nettoyage automatique des tanks stériles(144 min)             <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rinçage avec eau fraîche : 600 s</li> <li>2. Circulation de soude : 1800 s</li> <li>- Lorsque le niveau atteint 1500 PF et 3000 GF, l'agitateur aide à la continuation de la circulation pour 1720 s.</li> <li>3. Vidange de soude</li> <li>4. Vidange</li> <li>5. Rinçage : 900 s</li> <li>6. Circulation d'acide : 900 s</li> <li>7. Rinçage avec eau fraîche : 600 s (à 420 s' ajouter un certain volume d'acide)</li> <li>8. Vidange</li> <li>9. Rinçages avec l'eau fraîche</li> <li>10. Derniers 120 s : test ATP métrique et pH</li> <li>11. Remplir l'affiche de suivie</li> </ol> </li> <li>• Durant le nettoyage de tank stérile(stockage), les machine remplisseuse aseptiques sont aussi nettoyées dans un premier temps manuellement puis automatiquement.</li> </ul> |



|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <p>flux de processus(suite) :</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Préparation de la machine et des outils de nettoyage : rassembler le matériel nécessaire.</li> <li>2. Dépoussiérage et retrait des étuis du magasin de la machine.</li> <li>3. Démontage des accessoires.</li> <li>4. Nettoyage manuel de la machine.</li> <li>5. Vérification des fûts de détergent et remplissage si nécessaire pour le nettoyage de la chaîne alvéolaire.</li> <li>6. Sélection des programmes de nettoyage appropriés.</li> <li>7. Nettoyage manuel des accessoires avec une éponge, puis rinçage.</li> <li>8. Sécher et installer les éléments démontables (accessoires).</li> <li>9. Dégraissage et désinfection de la machine.</li> <li>10. Fermeture des portes de la machine.</li> <li>11. Remplir l’affiche de suivi avec les paramètres enregistré durant la stérilisation. - Après le nettoyage, un contrôle de qualité est effectué avant de passer à la stérilisation.             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stérilisation de l’échangeur thermique(durée généralement de 95 minutes) :                 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Activation des vannes.</li> <li>2. Mise en marche des pompes.</li> <li>3. Remplissage du module avec de l’eau.</li> <li>4. Activation de la vapeur.</li> <li>5. Chauffage du module.</li> <li>6. Stérilisation du Tank.</li> <li>7. Refroidissement progressif.</li> <li>8. Vérification de la stabilisation des paramètres.</li> <li>9. Remplir l’affiche de suivi avec les paramètres enregistré durant la stérilisation.</li> </ol> </li> <li>• Stérilisation de tank de stockage(90 min)                 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Activation des vannes.</li> <li>2. Activation des pompes.</li> <li>3. Préchauffage.</li> <li>4. Stérilisation : 1800 s.</li> <li>5. Refroidissement progressif.</li> <li>6. Vérifier les paramètres.</li> <li>7. Remplir l’affiche de suivie.</li> </ol> </li> <li>• Stérilisation de la remplisseuse aseptique CFA (environ 1 heure) :                 <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Avant de lancer la stérilisation de la CFA, un test de concentration de peroxyde est effectué ainsi que la vérification de remontage de tous les accessoires de la machine.</li> <li>2. Lancement de la stérilisation.</li> <li>3. Surveillance des températures des unités de chauffage sur le pupitre jusqu’à ce que les mesures soient atteintes et que la stérilisation commence.</li> <li>4. Une fois les températures de chauffe atteintes (270°C), la stérilisation débute par l’injection de peroxyde d’hydrogène dans la chaîne alvéolaire, puis dans toute la zone aseptique de la machine (séchage, remplissage, ultrasons, injecteur de vapeur et conduite d’air stérile).</li> </ol> </li> </ul> </li> </ol> |
|-----------------------------------|---|

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| flux de processus(suite) :      | <p>Avant la fin de l'étape H2O2:</p> <p>5. la stérilisation à la vapeur démarre pour stériliser l'accouplement pivotant, les doseurs, le système de remplissage, le réservoir et les 2 filtres PALL.</p> <p>6. Un contrôle final est effectué avant de démarrer un nouveau cycle de fabrication.</p> <p>7. Remplir fiche de suivie.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• À la fin de stérilisation des conditionneuses, l'atelier process reçoit et traite le produit puis une simulation est réalisée et une certaine quantité est produite pour faire les tests avant de démarrer le nouveau cycle de la production.</li> </ul> |
| Sorties :                       | L'output de ce processus est des équipements industriels propres et prêts pour la fabrication sans risque de contamination.   |
| Exception :                     | Dans la stérilisation, le cas d'anomalie, le service technique est informé et généralement le technicien intervient sur place, on a ajouté le timer event pour éviter le blocage de notre process.  |
| Points de contrôle et mesures : | <p>1. Dans le processus on constat plusieurs points de mesures après les étapes de nettoyage et stérilisation des trois équipement (Flex : échangeur de chaleur thermique, Tank de stockage ou stérile TS et les remplisseuses CFA), en cas d'anomalie au niveau de ces points , le processus sera répété dès la première activité.</p> <p>2. On constate aussi que durant le nettoyage manuelle des machines CFA (remplisseuses) il faut vérifier et superviser certains paramètres (température, débit, durée et concentration)</p>   |

# Annexe D

## Apprentissage non supervisé

### D.1 Préparation des données

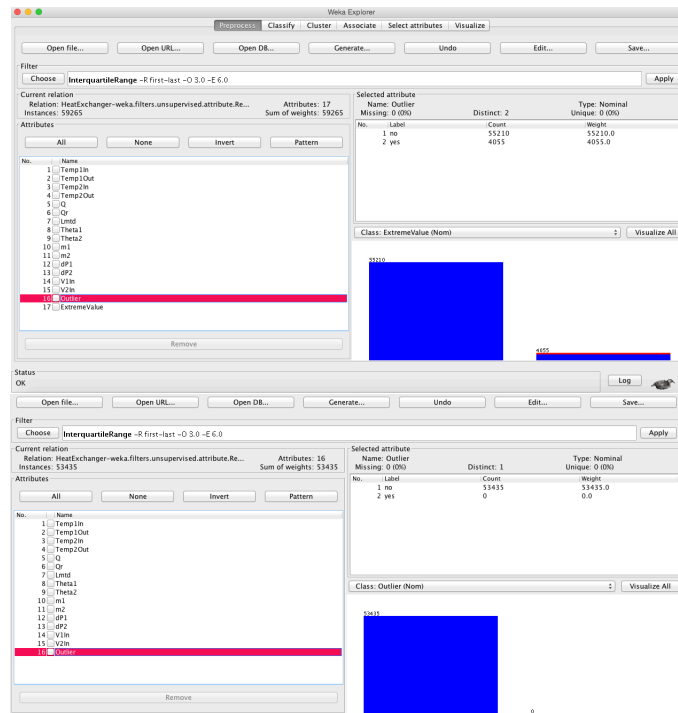


FIG. D.1 : Identification et suppression des valeurs aberrantes avec le logiciel WEKA

## D.2 Les codes utilisés

```

from pandas import *
from numpy import *
from matplotlib.pyplot import *
from seaborn import *
from scipy import stats
from sklearn.ensemble import IsolationForest
from sklearn.preprocessing import StandardScaler

```

FIG. D.2 : Les bibliothèques utilisées

```

data=read_csv('HeatExchanger_cleanest.csv')
# =====
# Préparation des données : Analyse de Forme
# =====
# Créer copie de dataset
dataset=data.copy()
dataset=dataset.drop(['Outlier'],axis=1)

# Visualiser les données
print(dataset.head())
print(dataset.shape)
# Le types des variable
print(dataset.dtypes)
print(dataset.dtypes.value_counts())

#Pour afficher les valeurs manquantes
print(set_option('display.max_row',15))
print(set_option('display.max_column',15))
# s'affiche None donc on a pas des valeurs manquantes
# Teste des valeurs abberantes : Les valeurs abberantes sont supp avec WEKA
figure()
dataset.boxplot()
show()

```

FIG. D.3 : Préparation des données

```

# =====
# Analyse de fond des données
# =====
# histogrammes des variables continues
for colonne in dataset.select_dtypes('float'):
    figure()
    distplot(dataset[colonne])
    show()

# Matrice de corrélation
print(dataset.corr())
# Relation variable-variable
Tcolumns=['Temp1In', 'Temp1Out', 'Temp2In', 'Temp2Out', 'Q', 'Qr', 'Lmtd','Theta1',
Pcolumns=['m1','m2','dP1', 'dP2', 'V1In', 'V2In']
pairplot(dataset[Tcolumns])
pairplot(dataset[Pcolumns])

# Sélection des caractéristiques
features = ['Temp1In', 'Temp1Out', 'Temp2In', 'Temp2Out', 'Q', 'Qr', 'Lmtd',
'Theta1', 'Theta2', 'm1', 'm2', 'dP1', 'dP2', 'V1In', 'V2In']

X = dataset[features]

```

FIG. D.4 : Analyse des données

```
# =====  
# Traitement des données  
# =====  
# Normalisation des données  
scaler = StandardScaler()  
X_scaled = scaler.fit_transform(X)  
..
```

FIG. D.5 : Normalisation des données

```
# =====  
# Entraînement du modèle Isolation Forest  
# =====  
  
''' ici contamination est calculer selon le nb de pannes qu'on a dans notre  
dataset et random state signifie '''  
model = IsolationForest(contamination=0.15, random_state=0)  
model.fit(X_scaled)  
  
# Prédiction des anomalies  
dataset['Anomaly'] = model.predict(X_scaled)  
dataset['Anomaly'] = dataset['Anomaly'].map({1: 0, -1: 1}) # 0: normal, 1: anomaly  
print(dataset.head())  
  
# Visualisation des anomalies  
figure(figsize=(10, 6))  
scatter(dataset.index, data['Temp10out'], c=dataset['Anomaly'], cmap='coolwarm')  
xlabel('Index')  
ylabel('Temp10out')  
title('Détection des anomalies dans la température d\'entrée')  
show()  
figure(figsize=(10, 6))  
scatter(dataset.index, data['Temp20out'], c=dataset['Anomaly'], cmap='coolwarm')  
xlabel('Index')  
ylabel('Temp20out')  
title('Détection des anomalies dans la température d\'entrée')  
show()  
# Compter le nombre d'anomalies détectées et non anomalie  
print("Nombre d'anomalies détectées :", dataset['Anomaly'].sum())  
print(dataset['Anomaly'].value_counts())
```

FIG. D.6 : Entraînements de modèle isolation forest

```
1 # =====  
2 # Enregistrer le nouveau dataset avec la variable target  
3 # =====  
4 dataset.to_csv('ÉchangeurThermique2_Clean.csv', index=False)  
5
```

FIG. D.7 : Enregistrement de nouveau dataset

# Annexe E

## Apprentissage supervisé

### E.1 Modèle Arbre de décision (DT)

```
from pandas import *
from numpy import *
from matplotlib.pyplot import *
from seaborn import *
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
from sklearn.metrics import f1_score, confusion_matrix, classification_report, recall_score
from sklearn.model_selection import learning_curve
from sklearn.model_selection import RandomizedSearchCV
from sklearn.utils import resample
```

FIG. E.1 : Les bibliothèques utilisées

```
# =====
# Importation des données
# =====
data=read_csv('ÉchangeurThermique2_Clean.csv',)
# Créer copie de dataset
dataset=data.copy()
# =====
# Préparation des données
# =====
# Visualiser les données
print(dataset.head())
print(dataset.shape)
# Le types des variable
print(dataset.dtypes)
print(dataset.dtypes.value_counts())
trainset,testset=train_test_split(dataset,test_size=0.2,random_state=0)
print(trainset['Anomaly'].value_counts())
print(testset['Anomaly'].value_counts())

# Suréchantillonnage de la classe minoritaire
majority=dataset[dataset['Anomaly']==0]
minority=dataset[dataset['Anomaly']==1]
#réchantillonnage
minority_upsampled=resample(minority,replace=True,n_samples=len(majority),random_state=0)
dataset=concat([majority,minority_upsampled])
print(dataset['Anomaly'].value_counts())

# Analyse statistique descriptive
descriptive_stat=dataset.describe()
print(descriptive_stat)
```

FIG. E.2 : Préparation des données

```

# =====
# Visualisation des données
# =====
# Relation variable variable

Tcolumns=['Temp1In', 'Temp1Out', 'Temp2In', 'Temp2Out','Q', 'Qr', 'Lmtd','Theta1',
Pcolumns=['m1','m2','dP1', 'dP2', 'V1In', 'V2In']
T_df = dataset[Tcolumns]
P_df = dataset[Pcolumns]
pairplot(dataset[Tcolumns])
pairplot(dataset[Pcolumns])

#ou bien heat map de la matrice de correlation
print(dataset.corr())
# il existe une corr entre anomaly et Q

for col in T_df:
    figure()
    lmpot(x='Q',y=col,hue='Anomaly',data=dataset)
# =====

```

FIG. E.3 : Analyse des données

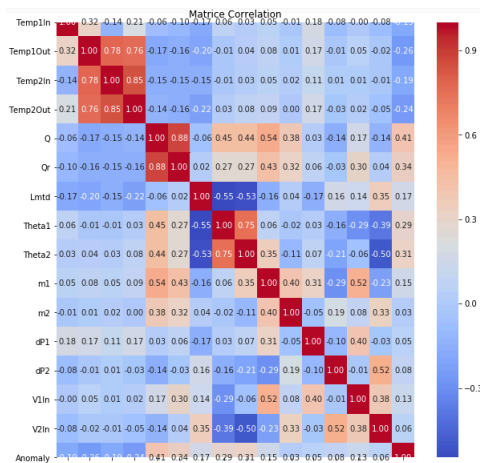


FIG. E.4 : Matrice de Corrélation

```

# =====
# Entraîner et évaluer le modèle
# =====
model=DecisionTreeClassifier(random_state=0)
# afficher les hyperparamètres
print(model.get_params())

# Hyperparameter Tuning with RandomizedSearchCv
param = {
    'max_depth': [3, 5, 7, 10,15],
    'min_samples_split': [2, 5, 10,20],
    'min_samples_leaf': [1, 2, 5, 10],
    'max_features': ['auto','sqrt','log2',None],
    'criterion':['gini','entropy']
}

# Randomizedsearch with cross-validation
Randomized_search = RandomizedSearchCV(model, param, cv=5, scoring='f1')
Randomized_search.fit(x_train, y_train)

# Best parameters
print("Best parameters found:", Randomized_search.best_params_)

# Initialize the model with the best parameters
best_model = Randomized_search.best_estimator_

#procédure d'évaluation
def evaluation(model):
    model.fit(x_train,y_train)
    ypred=model.predict(x_test)
    print(confusion_matrix(y_test,ypred))
    print(classification_report(y_test,ypred))
    print('Accuracy:', accuracy_score(y_test,ypred))
    print('Recall:', recall_score(y_test,ypred))
    print('F1:', f1_score(y_test,ypred))
    print('Precision:', precision_score(y_test,ypred))
    N,train_score,val_score=learning_curve(model,x_train,y_train,cv=4,scoring='f1',tra
    figure()
    title('Learning Curve')
    plot(N,train_score.mean(axis=1),label='train score')
    plot(N,val_score.mean(axis=1),label='validation score')
    legend()

# on a un peu de overfitting selon la courbe tracé
evaluation(model)
evaluation(best_model)
# =====

```

FIG. E.5 : Entraînement, évaluation et optimisation de modèle de l’algorithme arbres de décision

## E.2 Les autres modèles (KNN/SVM/RF/Adaboost)

```

from sklearn.metrics import f1_score, accuracy_score, recall_score, precision_score
from sklearn.metrics import confusion_matrix, classification_report
from sklearn.model_selection import learning_curve
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier, AdaBoostClassifier
from sklearn.svm import SVC
from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
from sklearn.pipeline import make_pipeline
from sklearn.feature_selection import SelectKBest, f_classif
from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures, StandardScaler
from sklearn.model_selection import train_test_split
from pandas import *
from numpy import *
from matplotlib.pyplot import *
from seaborn import *
from sklearn.utils import resample

data=read_csv('ÉchangeurThermique2.csv')
# Créer copie de dataset
dataset=data.copy()
trainset, testset=train_test_split(dataset, test_size=0.2, random_state=0)

```

FIG. E.6 : Les bibliothèques utilisées

```

# Modélisation
#
# on commence par la création de liste de modèle de ML
# SVM sont efficace pour les minidataset

# Dans ce cas il faut utiliser pipeline avec tous les algo pour entraîner et évaluer les
preprocesseur=make_pipeline(PolynomialFeatures(2, include_bias=False), SelectKBest(f_classif))
RF=make_pipeline(preprocesseur, RandomForestClassifier(random_state=0))
# Adaboost=make_pipeline(preprocesseur, AdaBoostClassifier(random_state=0))
SVM=make_pipeline(preprocesseur, StandardScaler(), SVC(random_state=0))
KNN=make_pipeline(preprocesseur, StandardScaler(), KNeighborsClassifier())

# list_of_models={'Random Forest':RF, 'Adaboost':Adaboost, 'Support vector machine':SVM, 'KNN':KNN}
list_of_models={'Random Forest':RF}
def evaluation(model):
    model.fit(x_train, y_train)
    ypred=model.predict(x_test)
    print(confusion_matrix(y_test, ypred))
    print(classification_report(y_test, ypred))
    print('Accuracy:', accuracy_score(y_test, ypred))
    print('Recall:', recall_score(y_test, ypred))
    print('F1:', f1_score(y_test, ypred))
    print('Precision:', precision_score(y_test, ypred))
    '''
    N, train_score, val_score=learning_curve(model, x_train, y_train, cv=4, scoring='f1', train_size=0.8)
    figure()
    title('Learning Curve')
    plot(N, train_score.mean(axis=1), label='train score')
    plot(N, val_score.mean(axis=1), label='validation score')
    legend()
    '''
    '''
for name, model in list_of_models.items():
    print('-----'+name+'-----')
    evaluation(model)
    '''

```

FIG. E.7 : Entraînement, évaluation et optimisation des autres modèles



```

} # optimisation des autres algorithmes :
} from sklearn.model_selection import GridSearchCV, RandomizedSearchCV
} #RF
} print(RF)
} print(RF.get_params())
} # on crée un dict qui inclut les valeurs des hyperparamètres
} hyper_params = {'randomforestclassifier_max_depth': [None,10,20,30,100],
}                 'randomforestclassifier_min_samples_split':[1,2,10,20],
}                 'randomforestclassifier_min_samples_leaf':[1,2,3],
}                 'randomforestclassifier_n_estimators':[5,10,15]}
} # Randomizedsearch pour chercher les meilleure param
} Randomized_search =RandomizedSearchCV(RF,hyper_params,n_iter=10, cv=10)
} #Entrainer le modèle avec les meilleure paramètres
} Randomized_search.fit(x_train,y_train)
} #Meilleure paramètres
} print("Best parameters found:",Randomized_search.best_params_)
}
}
} #KNN
} print(KNN)
} print(KNN.get_params())
} # on crée un dict qui inclut les valeurs des hyperparamètres
} hyper_params = {'kneighborsclassifier_n_neighbors': [1,10,20],
}                 'kneighborsclassifier_weights': ['uniform', 'distance'],
}                 'kneighborsclassifier_algorithm': ['auto', 'ball_tree', 'kd_tree', 'brute
}
} # Randomizedsearch pour chercher les meilleure param
} Randomized_search =RandomizedSearchCV(KNN,hyper_params,n_iter=10, cv=10,scoring='accur
} Randomized_search.fit(x_train, y_train)
} #Meilleure paramètres
} print("Best parameters found:",Randomized_search.best_params_)
} #Adaboost
} print(adaboost)
} print(adaboost.get_params())
} # on crée un dict qui inclut les valeurs des hyperparamètres
} hyper_params = {'adaboostclassifier_n_estimators': [10,20,50,60,100],
}                 'adaboostclassifier_learning_rate': [0.1, 1.0, 10],
}                 'adaboostclassifier_n_estimators':[20,50,100,150]}
}
} # Randomizedsearch pour chercher les meilleure param
} Randomized_search =RandomizedSearchCV(Adaboost,hyper_params,n_iter=10, cv=10,scoring='
} Randomized_search.fit(x_train, y_train)
}
} #Meilleure paramètres
} print("Best parameters found:",Randomized_search.best_params_)
}
}

```

FIG. E.8 : Optimisation des algorithmes

### E.3 Les meilleurs hyperparamètres

**Pour le modèle : Arbres de décision**

min\_samples\_split : 5  
 min\_samples\_leaf : 10  
 max\_features : None  
 max\_depth : 80  
 criterion : 'gini'

**Pour le modèle : Forêts aléatoires**

n\_estimators' : 10  
 min\_samples\_split' : 2  
 min\_samples\_leaf : 1  
 max\_depth : 100

**Pour le modèle KNN**

weights : 'distance'  
 n\_neighbors : 1  
 algorithm : 'auto'

**Pour le modèle Adaboost**

n\_estimators : 150  
 learning\_rate : 1.0

# Annexe F

## Interface graphique

### F.1 Code

```

from PIL import *
from pandas import *
import joblib
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from tkinter import *
from tkinter import messagebox

# Charger le modèle sauvegardé
model = joblib.load('RF_model.pkl')
# Charger les données
data = read_csv('EchangeurThermique2_Clean.csv')
def lp():
    def clear():#pour effacer le contenu des cases
        e1.delete(0,END)
        e2.delete(0,END)
    def ok():
        n = e1.get()
        p = e2.get()
        if n == '' or p == '':
            messagebox.showerror('','Remplir les informations ')
        elif n!= 'Admin' or p!= '1371113':
            messagebox.showerror('','Erreur! \n Accès Refusé ')
        else:
            messagebox.showinfo('','Accès Autorisé')
            log_in.destroy()
            mp.destroy()
            Prediction()
            log_in=Tk()
            log_in.title('Login')
            log_in.geometry('400x300')
            global e1
            global e2
            l=Label(log_in,text='Nom d\'utilisateur : ')
            l2=Label(log_in,text='Mot de passe : ',padx=50,pady=50)
            e1=Entry(log_in,width=20,bg='white',fg='black')
            e2=Entry(log_in,width=20,show='*',bg='white',fg='black')
            b2=Button(log_in,text='Réinitialiser',command=clear).place(x=280,y=200)
            b=Button(log_in,text='OK',command=ok)
            l.grid(row=2,column=0)
            l2.grid(row=4,column=0)
            e1.grid(row=2,column=6)
            e2.grid(row=4,column=6)
            b.grid(row=36,column=0)
            log_in.mainloop()
# Initialiser la fenêtre Tkinter
mp=Tk() #main page
mp.title("Heat Exchanger Anomaly Detection")
mp.geometry("800x600")
wlc= Label(mp,text='BN')
wlc.config(text="Bienvenue dans cette application", bg='blue',fg='white',relief= SUNKEN)
wlc.config(text="Bienvenue dans cette application", bg='blue',fg='white',relief= SUN)
wlc.pack()
#ajouter une photo
img=PhotoImage(file='HE.png')
l=Label(mp, image=img, relief=RIDGE, border=5)
l.pack(padx=10, pady=20)
Continue=Button(mp, text='Clicker pour continuer',bg='blue',fg='black',command=lp)
Continue.place(x=350,y=500)
def Prediction():
    def predict_anomaly():
        try:
            # Récupérer les valeurs entrées par l'utilisateur
            inputs = [float(entry.get()) for entry in entries]
            # Créer un DataFrame à partir des entrées
            input_df = DataFrame([inputs], columns=feature_names)
            # Faire la prédiction
            prediction = model.predict(input_df)[0]
            # Afficher le résultat
            if prediction == 1:
                result = "Détection d'anomalie "
            else:
                result = "Pas d'anomalie "
            messagebox.showinfo("Résultats", result)
        except Exception as e:
            messagebox.showerror("Erreur", str(e))
    # Page prédictio :
    pp=Tk()
    pp.title("Prédiction")
    pp.geometry("800x600")
    # Définir les noms des caractéristiques
    feature_names = ['Temps1In', 'Temps1Out', 'Temps2In', 'Temps2Out', 'Q', 'Qr', 'LM']
    # Créer des champs pour chaque paramètre
    entries = []
    for feature in feature_names:
        frame = Frame(pp)
        frame.pack(fill="x")
        label = Label(frame, text=feature, width=20)
        label.pack(side="left")
        entry = Entry(frame)
        entry.pack(side="left", fill="x", expand=True)
        entries.append(entry)
    # Fonction pour faire la prédiction
    # Bouton pour lancer la prédiction
    predict_button=Button(pp, text="Prédiction",bg='blue',fg='black', command=predict)
    predict_button.pack(fill="x")
    pp.mainloop()
# Lancer la boucle Tkinter
mp.mainloop()

```

FIG. F.1 : Code l'interface graphique

## F.2 Résultats

FIG. F.2 : l'interface graphique 1

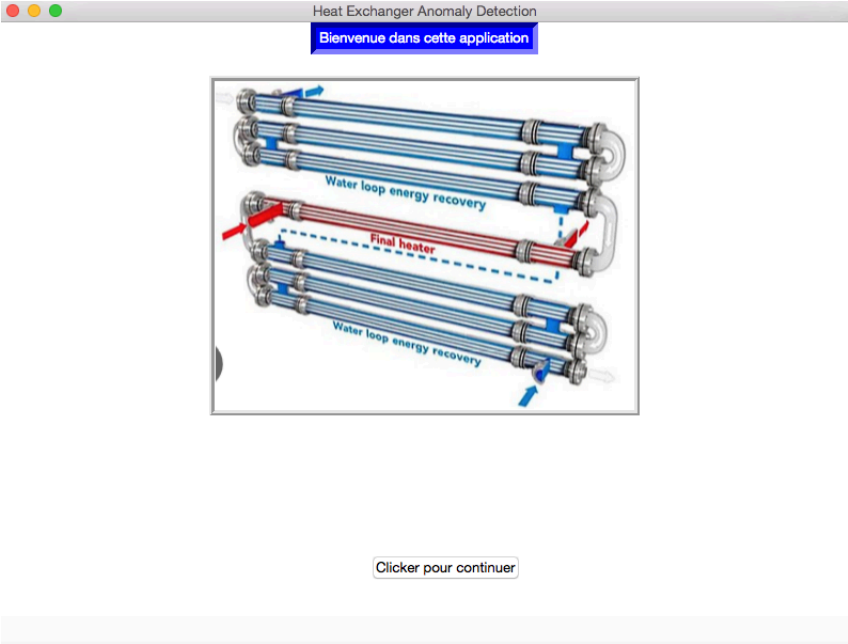


FIG. F.3 : l'interface graphique 2

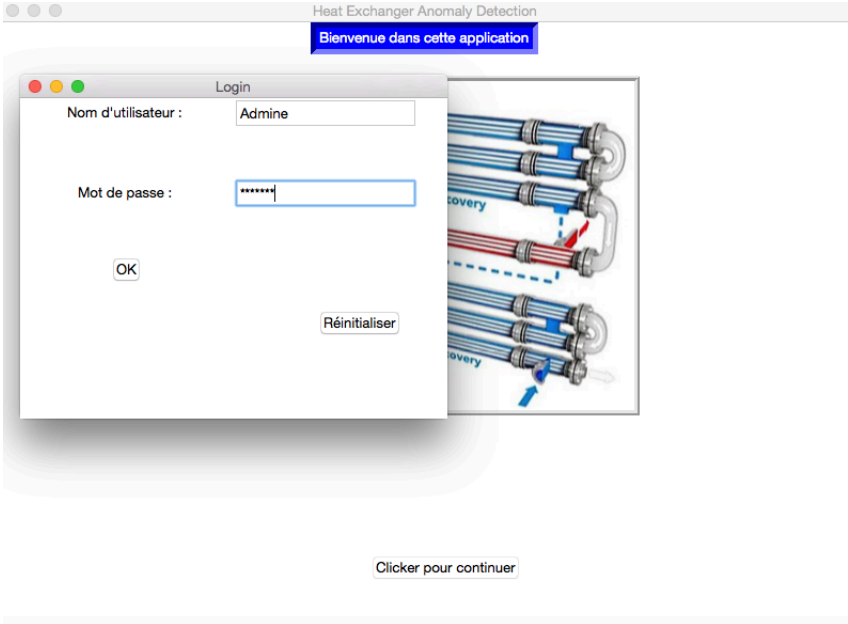


FIG. F.4 : l'interface graphique 3

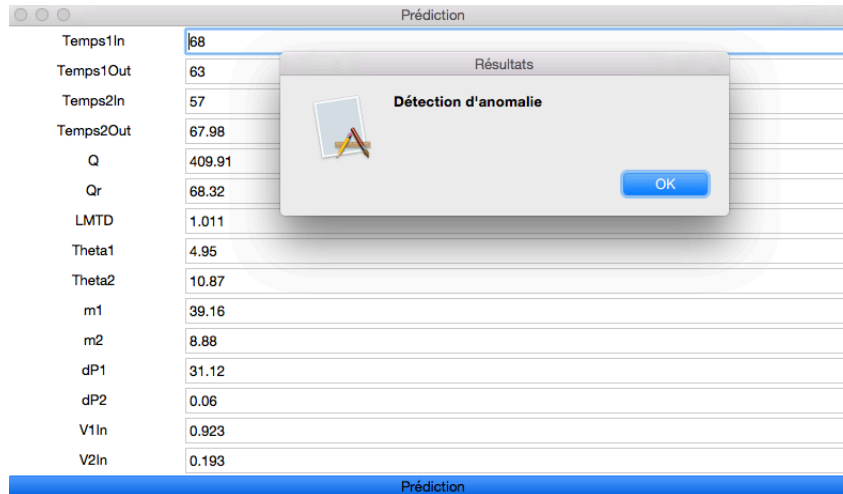
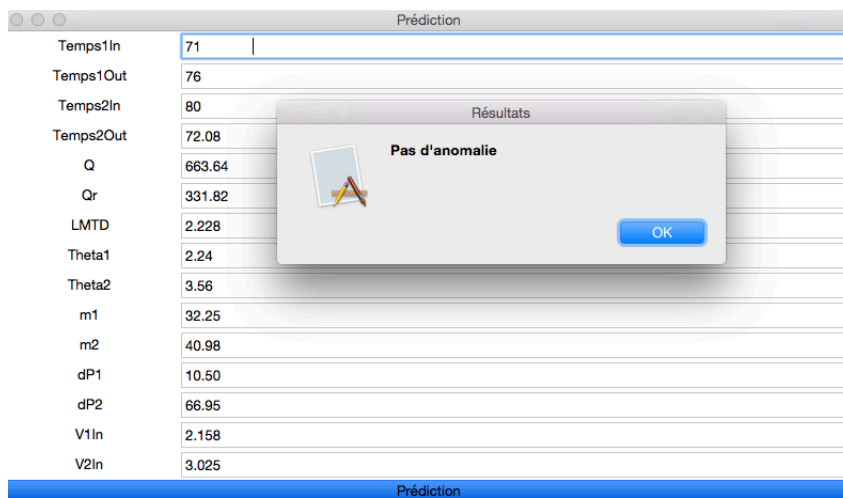


FIG. F.5 : l'interface graphique 4



# Annexe G

## Métriques d'évaluation

Les métriques qu'on a utilisé pour évaluer la performance des algorithmes sont calculé à partir de la matrice de confusion selon les lois :

### **Accuracy (Exactitude) :**

Calcule l'efficacité d'un modèle en tant que pourcentage des résultats réels par rapport au nombre total d'instances.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (\text{G.1})$$

### **Score F1:**

C'est une mesure qui combine la précision et le rappel d'un modèle de classification pour fournir une évaluation globale de sa performance.

$$F1 = 2 \cdot \frac{\text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (\text{G.2})$$

### **Recall (Rappel) :**

Le rappel, également connu sous le nom de sensibilité, est la proportion de vraies prédictions positives parmi toutes les instances positives réelles. Cela mesure la capacité du modèle à identifier correctement toutes les instances positives.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (\text{G.3})$$

### **Précision :**

La précision est la proportion de vraies prédictions positives parmi toutes les prédictions positives effectuées par le modèle. Cela mesure la capacité du modèle à éviter les faux positifs.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (\text{G.4})$$

Avec : - *TP* : True Positives (Vrais positifs) - *TN* : True Negatives (Vrais négatifs) - *FP* : False Positives (Faux positifs) - *FN* : False Negatives (Faux négatifs)

# Annexe H

## Indices de capabilité et performances

TAB. H.1 : Indices de performance et leurs formules

| Indice     | Formule   | Signification                | Interprétation  |
|------------|---|------------------------------|---|
| <b>Pp</b>  | $Pp = \frac{LSS - LSI}{6\sigma_{Long\ terme}}$  | Indice de performance        | Pp > 2 Très performant<br>1.34 < Pp < 2 Bon<br>1 < Pp < 1.33 Minimum acceptable<br>Pp < 1 Procédé incapable                                     |
| <b>Ppk</b> | $Ppk = \min\left(\frac{LSI - \mu}{3\sigma_{Long\ terme}}, \frac{LSS - \mu}{3\sigma_{Long\ terme}}\right)$ | Indice de performance réel   | Ppk > 2.5 Très performant<br>1.33 < Ppk < 2 Bon<br>Ppk = 1.33 Minimum acceptable<br>1 < Ppk < 1.33 juste capable<br>Ppk < 0.8 Procédé incapable |
| <b>Ppm</b> | $Ppm = \frac{LSS - LSI}{6\sqrt{\sigma_{Long\ terme}^2 + (\mu - cible)^2}}$                                | Indice de performance centré | -Ppm ≥ 1.33 Minimum acceptable<br>Ppm < 1.33 Procédé nécessite des améliorations  |

Avec :

LSS : Limite Spécification Supérieure

LSI : Limite Spécification Inférieure

( $\sigma$ ) : Écart-type

( $\mu$ ) : Moyenne du processus

TAB. H.2 : Indices de capabilité et leurs formules

| Indice     | Formule   | Signification  | Interprétation   |
|------------|---|--|--|
| <b>Cp</b>  | $Cp = \frac{LSS - LSI}{6\sigma_{court\ terme}}$   | Indice de capabilité du procédé : mesure la variabilité réelle du processus par rapport aux spécifications.  | Cp > 2 Très performant<br>1.34 < Cp < 2 Bon<br>1 < Cp < 1.33 Minimum acceptable<br>Cp < 1 Procédé incapable  |
| <b>Cpk</b> | $Cpk = \min\left(\frac{LSI - \mu}{3\sigma_{court\ terme}}, \frac{LSS - \mu}{3\sigma_{court\ terme}}\right)$ | Indice de capabilité du procédé réel :: tient compte du centrage du processus par rapport à la limite de spécification   | Cpk > 2.5 Très performant<br>1.33 < Cpk < 2 Bon<br>Cpk = 1.33 Minimum acceptable<br>1 < Cpk < 1.33 juste capable<br>Cpk < 0.8 Procédé incapable                    |
| <b>Cpm</b> | $Cpm = \frac{LSS - LSI}{6\sqrt{\sigma_{court\ terme}^2 + (\mu - cible)^2}}$                                 | Indice de capabilité centré (capabilité instantanée) : mesure la capacité du processus à respecter les spécifications par rapport à la variabilité totale des données. | Cpm ≥ 1.33 Données ciblées et se situe à l'intérieur des spécifications<br>Cpm < 1.33 Procédé nécessite des améliorations<br>Cpm ≈ Ppk Procédé centré sur la cible |



# Résumé

---

## ملخص

في صناعات الألبان والتجميل والأدوية، تُعد عملية الإعداد ضرورية للحفاظ على جودة المنتجات. تشمل هذه العملية أنشطة تنظيف وتعقيم المعدات. ومع ذلك، إذا لم يتم الالتزام بالوقت المخصص لهذه المهام، فقد يؤثر ذلك على توفر المعدات ويضر بالإنتاج. يهدف هذا العمل إلى تطبيق نهج DMAIC (تحديد، قياس، تحليل، ابتكار، تحكم) في إطار فلسفة Sigma Six Lean لتقليل التباين في أوقات الإعداد والقضاء على هدر الوقت. بدءًا من تعريف العملية المدروسة وحدودها، بالإضافة إلى دراسة أداء وقدرة هذه العملية على احترام الاوقات المحددة لها، تمكنا من تحديد الأسباب الجذرية للتأخيرات واقتراح عدة حلول. وقد قادتنا هيكلية النهج المعتمد إلى حل يعتمد على التعلم الآلي، والذي يمكن أن يقلل من التأخيرات الناتجة عن عملية الإعداد بنسبة 15%.

كلمات مفتاحية: DMAIC, CIP, Lean Six Sigma, إعداد , تعلم آلي

---

## Abstract

In the dairy, cosmetic, and pharmaceutical industries, a setup process is crucial to maintain product compliance. This process includes cleaning and sterilizing equipment. However, if the time dedicated to these tasks is not adhered to, it can affect equipment availability and harm production. This work aims to apply the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Innovate, Control) approach within the Lean Six Sigma philosophy to reduce setup time variability and eliminate time waste. Starting with the definition of the studied process and its limits, along with performance and capability studies, we identified the root causes of delays and proposed several solutions. The adopted approach structure led us to a machine learning-based solution, which can reduce setup process delays by 15%.

**Keywords :** Lean Six Sigma, DMAIC, machine learning, setup, CIP.

---

## Résumé

Dans les industries laitières, cosmétiques et pharmaceutiques, un processus de set up est crucial pour maintenir la conformité des produits. Ce processus inclut des activités de nettoyage et de stérilisation des équipements. Cependant, si le temps consacré à ces tâches n'est pas respecté, cela peut impacter la disponibilité des équipements et nuire à la production. Ce travail vise à appliquer la démarche DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler) dans le cadre de la philosophie Lean Six Sigma pour réduire la variabilité des temps de set up et éliminer les gaspillages de temps. En commençant par la définition du processus étudié ainsi que ses limites, et en plus de l'étude de performance et de la capacité de ce dernier, nous avons pu identifier les causes racines des retards et proposer plusieurs solutions. La structure de la démarche adoptée nous a guidés vers une solution basée sur l'apprentissage automatique, qui peut réduire de 15% les retards dus au processus de set up.

**Mots clés :** Lean Six Sigma, DMAIC, apprentissage automatique, set up, CIP.

---