الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
Ecole Nationale Supérieure des Technologies avancées
قسم الهندسة الصناعية والصيانة
Département de Génie industriel et Maintenance

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

D'INGÉNIEUR d'État

-Filière-

Génie Industriel

-Spécialité-

Génie Industriel

- Thème -

Optimisation de la Performance Industrielle par l'Intégration des Outils du Lean Manufacturing

Cas Pratique : ECCBC Algérie

Réalisé par :

BOUDJENOUN Chaima

SAIB Malak

Soutenu le 23 / 06 /2025

Membres de Jury :

Prénom NOM	Université	Qualité
Dr. BOUDHAR Hamza	ENSTA	Président
Dr. REZGUI Wail	ENSTA	Promoteur
Dr. GHOMARI Leila	ENSTA	Co-Promoteur
Dr. BELAYADI Djahida	ENSTA	Examinateur

2024/2025

Dédicace

Je dédie ce travail, fruit de tant d'efforts et de persévérance :

À mes très chers parents :
À ma maman, pour sa présence inestimable, sa patience, son amour inconditionnel et son dévouement inébranlable, véritable pilier de ma vie.
À mon papa, pour son immense soutien moral, ses encouragements constants et la confiance qu'il a toujours placée en moi.

À mes frères, Islam et Yasser, ainsi qu'à ma petite et adorable sœur Nada, pour leur affection, leur fierté et leur présence réconfortante.

À ma grand-mère, pour son amour, ses prières et son soutien tendre et silencieux.
À la mémoire de mon grand-père, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis.

À mes amis, compagnons de route fidèles, avec qui j'ai partagé tant de moments de joie, mais aussi les périodes de doute. Leur bienveillance, leur écoute sincère et leur énergie positive ont été un véritable soutien tout au long de ce parcours.

À mon binôme de projet, merci du fond du cœur pour ta présence constante, ta solidarité sincère et ton engagement à chaque étape. Ce fut un réel bonheur de partager avec toi cette aventure intense, faite d'apprentissages, de défis et de complicité.

Et enfin, à moi-même.
Pour avoir avancé malgré les doutes, affronté les peurs silencieuses et persévéré quand tout semblait flou. Pour chaque effort discret, chaque pas hésitant mais déterminé, chaque victoire intérieure. Pour ce chemin parcouru avec ténacité, et pour celle que je deviens aujourd'hui : une jeune ingénieure, consciente du chemin restant mais fière de celui déjà accompli avec fois gratitude.

« BOUDJENOUN Chaima »

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma chère maman, ma confidente, mon pilier, toujours à mes côtés. Ton amour, ton soutien

Inconditionnel et tes sacrifices silencieux m'ont portée durant toutes ces années. Aucun mot ne pourra exprimer toute ma reconnaissance.

Mon cher père, toujours présent, patient et fort, même quand je t'ai parfois fatigué par mes doutes ou mes silences. Merci pour ta présence rassurante.

Ma seule sœur, Nada, ma meilleure amie, et mes chers frères, Rafik, Chahine et Amine, pour votre affection, votre humour et votre soutien constants.

Mes grands-parents, dont les prières m'accompagnent chaque jour et m'apportent force et sérénité.

Mes amis, avec qui j'ai partagé les instants de joie comme les périodes de doute, et qui ont toujours su m'encourager avec bienveillance.

Mon binôme de projet, pour ta solidarité, ton implication et les bons moments vécus ensemble durant ce travail exigeant et formateur.

À moi-même, pour les défis surmontés, les peurs dépassées, les rêves réalisés et pour l'ingénieure que je deviens aujourd'hui, avec fierté et humilité.

« SAIB Malak »

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour arriver à ce jour, marquant la fin de notre parcours d'ingénieur en génie industriel. Un chemin loin d'être facile, jalonné d'efforts, d'obstacles mais aussi d'expériences enrichissantes.

Nous exprimons notre profonde gratitude aux membres du jury pour l'honneur que vous nous faites en acceptant d'évaluer ce travail et pour le temps que vous y consacrez.

Nos remerciements les plus sincères vont également à nos encadrants,

Dr. REZGUI Wail et Dr. GHOMARI Leila, pour leur accompagnement constant, leurs conseils avisés et leur encadrement rigoureux tout au long de ce projet. Nous remercions aussi Dr. TALBI Tayeb pour sa disponibilité, sa bienveillance et son aide précieuse, toujours apportée sans la moindre hésitation.

Nous tenons à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants et des membres du département GIM pour la qualité de l'enseignement dispensé et leur engagement. Merci également à notre école, l'ENSTA, de nous avoir formés et préparés à devenir des ingénieurs compétents et confiants.

Nous exprimons également toute notre reconnaissance à nos responsables de stage au sein d'ECCBC Algérie, M. BELIAD Kamel et M. BELOUAHEM Abderraouf, pour leur confiance, leur encadrement de qualité et l'opportunité qu'ils nous ont offerte de travailler sur un projet aussi significatif. Nos remerciements s'adressent également à M. AMRAR Nacim, Directeur Industriel, pour nous avoir permis de vivre cette expérience professionnelle inoubliable, ainsi qu'à l'ensemble du staff de Fruital pour leur accueil et leur soutien.

Enfin, nous remercions du fond du cœur nos parents, nos frères, nos sœurs et nos amis, pour leur soutien indéfectible et leur patience tout au long de ce parcours.

Merci à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cette aventure humaine et académique.

ملخص : في الوقت الحاضر، يدفع التنوع المتزايد في احتياجات العملاء الشركات إلى إنتاج مجموعة متنوعة من المنتجات، مما يزيد من تعقيد إدارتها وتطويرها. في هذا السياق، تصبح تحسينات عمليات الإنتاج عاملاً أساسياً لتحقيق التنافسية. تسمح فلسفة *Lean*، من خلال أدواتها ومبادئها، بالتقليل المستمر من الهدر وتحقيق تحسينات مستدامة في الأداء. تبرز هذه الحاجة بشكل خاص في قطاع الصناعات الغذائية، الخاضع لمتطلبات صارمة من حيث الجودة واحترام المواعيد النهائية. وفي هذا السياق الصناعي الكبير، يُعد التحكم في التوقفات المرتبطة بتغييرات السلاسل وتحسينها تحدياً أساسياً للأداء.

يهدف هذا العمل إلى تقليل أوقات التوقف المخطط لها بالاعتماد على طريقة **SMED** والمعروفة تغيير العدة في اقل من 10 دقائق، المنظمة وفقاً لنهج **DMAIC** (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) إطار منهجي يُستخدم في مشاريع التحسين المستمر ، يبدأ العمل بتحديد مشكلة التوقفات بوضوح، وقياس الفروقات، وتحليل مصادر فقدان الوقت، ثم تحسين العملية، وأخيراً التحكم في النتائج من خلال محاكاة الأحداث المنفصلة.

كما يركز التفكير على موثوقية إعادة تشغيل الإنتاج، من خلال تنفيذ أجهزة **Poka-Yoke** (الوقاية من الأخطاء) وإجراء تدقيقات **5S** (تنظيم ونظافة بيئة العمل). تسلط هذه المقاربة المتكاملة الضوء على البعد الاستراتيجي وقيمة الاستثمار في التحسين المستمر .وقد أسفر تطبيقها بحالتنا في شركة **ECCBC** عن أرباح كبيرة تُقدَّر بأكثر من 750 ألف قارورة مشروب غازي، وأكثر من 25 ساعة إنتاج إضافية خلال سنة واحدة.

الكلمات المفتاحية:

SMED، DMAIC، محاكاة الأحداث المنفصل، بوكايوكي , التصنيع اللين، التوحيد القياسي، التحسين المستمر

Abstrait : De nos jours, la diversité croissante des besoins des clients pousse les entreprises à produire une large gamme de produits, ce qui complexifie leur gestion et leur développement. Dans ce contexte, l'amélioration des processus de production devient un facteur clé de compétitivité. La philosophie *Lean*, à travers ses outils et ses principes, permet de réduire continuellement les gaspillages et d'améliorer durablement la performance.

Ce besoin se manifeste de manière particulièrement marquée dans le secteur de l'industrie agroalimentaire, soumis à des exigences strictes en matière de qualité et de respect des délais. Dans ce contexte industriel à grande échelle, la maîtrise et l'optimisation des arrêts liés aux changements de série représentent un défi majeur en matière de performance.

Ce travail vise à réduire les temps d'arrêt planifiés en s'appuyant sur la méthode **SMED** (*Single-Minute Exchange of Die*), connue pour permettre un changement d'outillage en moins de 10 minutes. Cette démarche est structurée selon la démarche **DMAIC** (*Define, Measure, Analyze, Improve et Control*), un cadre méthodologique utilisé dans les projets d'amélioration continue. L'étude commence par une définition claire de la problématique des arrêts, suivie par la mesure des écarts, l'analyse des sources de pertes de temps, l'amélioration du processus, puis le contrôle des résultats à l'aide d'une simulation à événements discrets.

La réflexion porte également sur la fiabilité du redémarrage de la production, notamment à travers la mise en place de dispositifs **Poka-Yoke** (prévention des erreurs) et la réalisation d'audits **5S** (organisation et propreté de l'environnement de travail). Cette approche intégrée met en lumière l'importance stratégique et la valeur de l'investissement dans l'amélioration continue. Sa mise en œuvre dans notre cas, au sein de l'entreprise **ECCBC** a généré d'importants bénéfices, estimés à plus de 750 000 bouteilles de boisson gazeuse et à plus de 25 heures de production supplémentaires en une seule année.

Mots clés : SMED, DMAIC, Simulation à événements discrets, Poka Yoka, 5S, Lean Manufacturing, Standardisation, Amélioration continue.

Abstract: Nowadays, the growing diversity of customer needs is pushing companies to produce an increasingly wide variety of products, making their management and development more complex. In this context, improving production processes becomes a key lever for competitiveness. The Lean philosophy, through its tools and principles, allows for the continuous elimination of waste and sustainable performance improvement. This need is particularly evident in the agri-food sector, which is subject to strict quality and deadline

requirements. In such large-scale industrial settings, managing and optimizing downtime related to changeovers is a major performance challenge.

This study aims to reduce planned downtime using the **SMED** (Single-Minute Exchange of Die) method, which enables changeovers in under ten minutes. The methodology is structured according to the **DMAIC** demarche (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control), a systematic framework used in continuous improvement projects. The study begins with a clear definition of the changeover issue, followed by measuring discrepancies, analyzing the root causes of time losses, improving the process, and finally controlling the results through discrete-event simulation. The analysis also focuses on the reliability of production restarts, particularly through the implementation of **Poka-Yoke** (error-proofing devices) and **5S** audits (workplace organization and cleanliness). This integrated approach highlights the strategic importance and the value of investing in continuous improvement. The implementation in the context of our study at **ECCBC** company led to substantial benefits, including an estimated increase of over 750,000 bottles of soft drinks and more than 25 additional production hours within a single year.

Keywords: SMED, DMAIC, Discrete event simulation, Poka Yoka, 5S, Lean Manufacturing, Standardization, Continuous improvement.

Table de matière

Liste des figures I
Liste des tableaux III
Liste des abréviations IV
Introduction générale 1
Chapitre I 3
Cadre théorique 3
I.1 Introduction 4
I.2 Lean : Pilier, Méthodes et Outils 4
I.3 La démarche DMAIC 11
I.4 La simulation des systèmes industriels 12
I.4.1 Simulation d'événements discrets 13
I.5 Les systèmes d'exécution de la fabrication MES 13
I.5.1 Evolution des systèmes MES 14
I.6 Conclusion 15
Chapitre II 16
Implémentation de la méthode SMED selon la démarche DMAIC 16
II.1 Introduction 17
II.2 Contexte du projet fin d'études 17
II.3 Définir (Define) 18
II.3.1 Sélection du projet : Choix de la ligne 18
II.3.2 Identification des CTQ (Critical to Quality) : Choix de type d'arrêt 20
II.3.3 Fonctionnement de la ligne de production 20-18 22
II.3.4 Définition des limites 23
II.3.5 La charte projet 25
II.4 Mesurer (Measure) 25
II.4.1. Diagnostic des temps des arrêts de changement de série historique 25
II.4.2. Collecte de données sur le terrain (Gemba) : 27
II.4.3. Mesure des temps de changement de série 28
II.5 Analyser (Analyze) 31
II.5.1 Analyse des résultats des checklists 31
II.5.2 Analyse des résultats des mesures des temps de changement de série 32
II.6 Innover (Improve) 32

II.6.1 Identification des pistes d'amélioration 32
II.6.2 Standardisation de processus de changement de série 36
II.6.3 Validation de la solution SMED 37
II.7 Contrôler (Control) 37
II.8 Conclusion 38
Chapitre III 39
Impact du SMED : Étude par Simulation à évènements discrets 39
III.1 Introduction 40
III.2 Approche de simulation 40
III.2.1 Phase de Préparation et Analyse 40
III.2.2 Modélisation sous Arena 45
III.2.3 La simulation des différents scénarios et à la visualisation des résultats 47
III.3 Conclusion 50
Chapitre IV : 51
Fiabilisation des redémarrages de production par Poka-Yoke et audit 5S 51
IV.1 Introduction 52
IV.2 Analyse des arrêts opérationnels 52
IV.3 Réduction des erreurs post-redémarrage par Poka-Yoke 54
IV.4 Désordre opérationnel : structuration par un audit 5S 56
IV.5 Conclusion 58
Conclusion générale 59
Annexes 61
Annexe A : Technologies des systèmes MES 62
Annexe B : Supports techniques et documents SMED 64
Annexe C : Détail de l'analyse statistique 70
Annexe D : Audit 5S 80
Références : 83

Liste des figures

Figure 1 : Démarche méthodologique du Projet de Fin d'Études 2
Figure 2 : Outils Lean utilisés dans ce travail 5
Figure 3 : Structures de changement 7
Figure 4: SMED stade conceptuel et techniques pratiques [7] 8
Figure 5: Le temple du Lean [6] 9
Figure 6: Les principes de Poka-yoke 10
Figure 7 : Processus de mise en œuvre du Poka-Yoke 10
Figure 8 : Systèmes d'information et de gestion pour la planification et le contrôle [23] 14
Figure 9 : Pyramide d'automatisation CIM 14
Figure 10 : Schéma illustrant l'application du SMED dans la démarche DMAIC 17
Figure 11 : Résultats de la méthode ABC 21
Figure 12 : Diagramme BPMN de la ligne de production 20–18 23
Figure 13 : Diagramme des types de changement et définition des objectifs 24
Figure 14 : Charte projet 25
Figure 15 : Différence entre Evocon et rapport de production 26
Figure 16 : Changement de parfum 1ET 26
Figure 17 : Changement de parfum 3ET 26
Figure 18 : Changement de format 1ET sans volume 27
Figure 19 : Changement de format 1ET avec volume 27
Figure 20 : Changement de format 3ET 27
Figure 21 : Diagramme d'Ishikawa pondéré 32
Figure 22 : Exemple checklist des tâches externes de la souffleuse 36
Figure 23 : Exemple du mode opératoire de la souffleuse 37
Figure 24 : Schéma illustrant l'approche de simulation 40
Figure 25 : La distribution de temps inter-arrivés (avant SMED) 43
Figure 26 : Les distributions des temps changements (avant SMED) 44
Figure 27 : La distribution de de temps inter-arrivés (après SMED) 44
Figure 28 : Les distributions des temps changements (après SMED) 44
Figure 29 : Le modèle final sous Arena 46
Figure 30 : Simulation pour la Validation du modèle 47
Figure 31 : Résultats des graphiques sur Process analyzer - Arena 48
Figure 32 : Pourcentage des durées des arrêts pour ajustements par équipement 53
Figure 33 : Réglage de la hauteur de la balance A2 55
Figure 34 : Réglage des guides du convoyeur entrée bouteilles en ajustant les valeurs (A24, A25, A26, A27) 55
Figure 35 : Réglage de la hauteur de séparateur de caisse en ajustant la valeur F1 55
Figure 36 : Audit 5S sur la machine étiqueteuse 58
Figure 37 : Technologies et fonctionnalités des IMES 62
Figure 38 : Exemple d'une checklist de changement de série de la souffleuse 64
Figure 39 : Exemple d'une checklist de changement de série de la souffleuse remplie par l'opérateur 64
Figure 40 : Matrice des temps de changement de série de la ligne 20–18 65
Figure 41 : Matrice de sanitation de Fruital Coca Cola 66

Figure 42 : Distribution de la loi Inter arrivées -avant SMED 74
Figure 43 : Niveau de validation d'échantillons 74
Figure 44 : Boite à moustaches -distribution des temps par type de changement..... 75
Figure 45 : Analyse comparative des 5 temps de changement..... 75
Figure 46 : Distribution de la loi Inter arrivées - après SMED 76
Figure 47 : Niveau de validation d'échantillons 76
Figure 48 : Boite à moustaches -distribution des temps par type de changement..... 77
Figure 49 : Analyse comparative des 5 temps de changement..... 77

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre le MES traditionnel et le MES intelligent 15
Tableau 2 : Cadence de production par ligne 18
Tableau 3: Production des lignes de Fruital 19
Tableau 4 : Taux de rendement synthétique des lignes de production de Fruital 19
Tableau 5 : Arrêts de la ligne 20-18 par type 20
Tableau 6: Arrêts planifiés 20
Tableau 7 : Arrêts opérationnels..... 21
Tableau 8 : Application de la méthode ABC..... 21
Tableau 9 : Résultats du chronométrage du changement de format 1ET avec changement de volume..... 29
Tableau 10 : Résultats du chronométrage du changement de format sans changement de volume..... 30
Tableau 11 : Résultats du chronométrage du changement de format sans changement de volume..... 30
Tableau 12 : Transformation des tâches du changement de série de la soutireuse 33
Tableau 13 : Transformation des tâches du changement de série de la souffleuse 33
Tableau 14 : Résultats des temps de changement de série après SMED..... 38
Tableau 15 : les écarts entre les mesures via Evocon et rapports de production..... 41
Tableau 16 : Récapitulatif des données de Changements via Evocon 42
Tableau 17: Les 'échantillons des données..... 42
Tableau 18 : Résumé des informations à introduire dans le modèle 45
Tableau 19 : Résultats des simulations sur les temps de changements 47
Tableau 20 : Résultats des simulations sur le nombre de changements (répétitions par OF) .. 48
Tableau 21 : Gain de SMED en minutes 49
Tableau 22 : Gain de SMED en Bouteilles..... 49
Tableau 23 : Durées des arrêts des ajustements par équipement..... 52
Tableau 24 : Durés des arrêts des ajustements sur la fardeleuse 53
Tableau 25 : Analyse QQOQCP – Arrêts répétitifs 54
Tableau 26 : Analyse 5 pourquoi – Arrêts répétitifs 54
Tableau 27 : Code visuel - référence pour les ajustements 56
Tableau 28 : Les valeurs correspondant à chaque réglage 56
Tableau 29 : Résultats du chronométrage des tâches de la soutireuse du changement de parfum 3ET sans changement de volume (Passage du Coca 1L vers Fanta pomme 1L) . 67
Tableau 30 : Résultats du chronométrage des tâches de la soutireuse du changement de format 3ET avec changement de volume (Passage du Sprite 1L vers Coca 1.5 L)..... 67
Tableau 31 : Résultats du chronométrage des tâches de l'étiqueteuse du changement de format avec changement de volume (Passage du Sprite 1L vers Coca 1.5 L)..... 68
Tableau 32 : Explication de code d'analys de données (temps d'inter arrivées et chacune des cinq classes de temps de changement) 71
Tableau 33 : Rappel des concepts statistiques fondamentaux..... 78

Liste des abréviations

SMED	Single Minute Exchange of Die
DMAIC	Define, Measure, Analyze, Improve, Control
5S	Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke
MES	Manufacturing Execution System
IMES	Intelligent Manufacturing Execution System
TPS	Toyota Production System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
JIT	Just-in-Time
SIPOC	Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers
DES	Discrete Event Simulation
ABS	Agents Based Simulation
SD	System Dynamics
GPAO	Gestion de Production Assistée par Ordinateur
ERP	Enterprise Resource Planning
PLC	Programmable Logic Controller
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
CIM	Computer Integrated Manufacturing
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
TRS	Taux de Rendement Synthétique
AI	Artificial Intelligence
IoT	Internet of Things
BDA	Big Data Analytics
ML	Machine Learning
RFID	Radio Frequency Identification
GPS	Global Positioning System
SCM	Supply Chain Management
PET	Polyethylene Terephthalate
CTQ	Critical To Quality
BPMN	Business Process Model and Notation
CIP	Cleaning In Place
COP	Cleaning On Place
USLE	Utilisation Standard de la Ligne Équivalente
AGV	Automated Guided Vehicle
ET	Étapes de Traitement
COPIL	Comité de pilotage
AIC	Akaike Information Criterion
BIC	Bayesian Information Criterion
KS	Kolmogorov Smirnov
AD	Anderson Darling
SW	Shapiro Wilk
CVM	Cramer Von Mises
EXPO	Exponentielle
TRIA	Triangulaire
OF	Ordres de Fabrication
QQOQCP	Qui ? Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?

Introduction générale

De nos jours, il existe une tendance à l'augmentation du nombre de types de produits à fabriquer due à la diversification des besoins des clients. Cela rend la satisfaction de ces besoins devient de plus en plus complexe. Les entreprises doivent faire face à des défis majeurs concernant leur management et leur développement.

Par conséquent, l'amélioration des processus de production devient un facteur clé dans la compétitivité des entreprises. Le système d'outils et de règles de la philosophie Lean permet d'améliorer les processus et de réduire les gaspillages de manière continue, ce qui permet de gagner un avantage compétitif significatif, sous l'intitulé de «l'amélioration continue» [1][2].

Le secteur agroalimentaire, en particulier, est soumis à des normes strictes en termes de qualité et de délais, qui obligent ce type d'entreprises à s'aligner sur cette philosophie [3].

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un projet d'amélioration continue au sein d'ECCBC Algérie (Equatorial Coca-Cola Bottling Company), principal embouteilleur de Coca-Cola en Afrique du Nord et de l'Ouest. En Algérie, ECCBC opère à travers sa filiale Fruital, spécialisée dans la production et la distribution de boissons gazeuses non alcoolisées. Leader du marché national avec environ 50 % de parts de marché, Fruital commercialise plus de 50 références sous des marques internationales telles que Coca-Cola, Fanta, Sprite, Vimto, Schweppes, Pulpy ou Minute Maid.

Dans ce contexte industriel à haut volume, une problématique majeure a été identifiée : les dépassements récurrents des durées prévues de changement de série sur la ligne de production 20–18. Cette situation engendre des retards opérationnels et des pertes économiques significatives. À titre d'exemple, une cadence de 30 000 bouteilles/heure signifie qu'un simple retard d'une minute provoque la perte d'environ 500 bouteilles. La maîtrise et l'optimisation de ces arrêts programmés constituent donc un enjeu clé de performance industrielle.

Comment optimiser durablement les arrêts liés au changement de série dans un environnement de production agroalimentaire à haut volume, tout en posant les bases d'une standardisation des bonnes pratiques industrielles ?

Ce travail s'intègre dans un projet Kaizen visant à réduire les temps d'arrêt programmés. Il repose sur l'application de la méthode SMED pour rationaliser les changements de série, et sur une réflexion complémentaire visant à fiabiliser les redémarrages de production à travers l'implémentation de dispositifs Poka-Yoke et d'audits 5S.

L'objectif est double : d'une part, optimiser les performances de la ligne de production en fiabilisant les arrêts programmés et les redémarrages ; d'autre part, poser les bases d'une approche reproductible à l'échelle du groupe ECCBC, dans le cadre d'une stratégie de standardisation internationale des pratiques industrielles.

Ce projet adopte une approche intégrée, combinant les deux piliers du Lean Manufacturing : le Juste-à-temps, déjà partiellement mis en œuvre à travers la réduction des stocks tampons et l'application du SMED ; et le Jidoka, activé par l'introduction de dispositifs anti-erreur (Poka-Yoke) et de bonnes pratiques d'organisation (5S).

Enfin, des outils avancés comme les systèmes MES, pour la collecte des données de production en temps réel, et la simulation à événements discrets (DES), pour modéliser et anticiper les effets des optimisations, viennent renforcer cette démarche dans une logique d'excellence opérationnelle locale et globale.

Ainsi, le travail sera structuré autour de quatre chapitres complémentaires (voir Figure 1)

Le premier chapitre établira les fondements conceptuels du projet. Il développera les principes du Lean Manufacturing, en présentant ses piliers, méthodes et outils clés, notamment la méthode SMED, le Poka-Yoke et la démarche 5S. Il abordera également les notions de simulation des systèmes industriels, avec un focus sur la simulation à événements discrets, ainsi que les systèmes MES pour la collecte des données de production en temps réel.

Le deuxième chapitre marquera le début de la phase d'application, en se concentrant sur la réduction des temps de changement de série. Il s'appuiera sur l'implémentation progressive de la méthode SMED, selon les étapes structurées de la démarche DMAIC.

Le troisième chapitre visera à visualiser et évaluer l'impact des améliorations mises en œuvre. Il développera une simulation comparative à l'aide du logiciel Arena, à partir des données collectées sur le terrain, afin d'estimer les gains de performance et d'analyser l'effet du SMED sur les arrêts planifiés et l'efficacité globale du système de production.

Enfin, le dernier chapitre portera sur la fiabilisation des redémarrages de production, en intégrant des dispositifs Poka-Yoke pour éliminer les erreurs d'ajustement, et en mettant en place un audit 5S afin de structurer durablement l'environnement de travail.

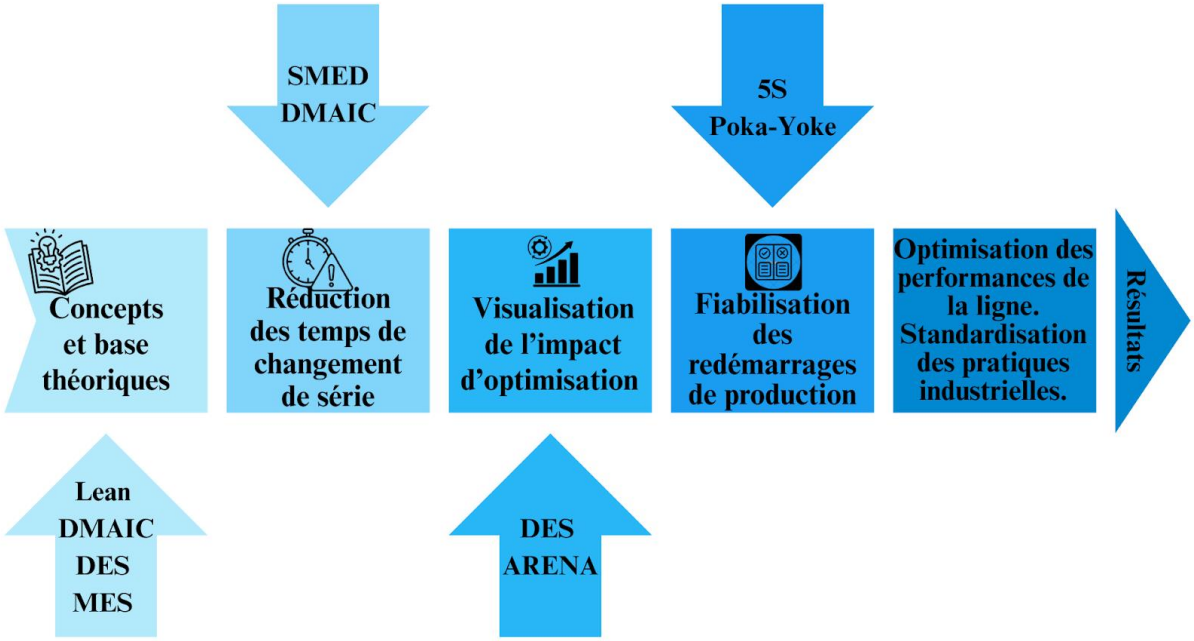


Figure 1 : Démarche méthodologique du Projet de Fin d'Études

Chapitre I
Cadre théorique

I.1 Introduction

Ce chapitre jouera un rôle essentiel dans la construction du projet, car il permettra d'établir une base théorique solide sur lequel s'appuiera toute la démarche d'amélioration. Il servira à définir les concepts fondamentaux qui guideront les choix méthodologiques et techniques tout au long du travail. Une bonne compréhension de ces notions sera nécessaire pour justifier les actions mises en œuvre dans les chapitres suivants.
Ainsi, le chapitre présentera tout d'abord les fondements du Lean, ses piliers, ses méthodes et ses outils, en distinguant le Lean Manufacturing du Lean Management, avant de détailler la méthode SMED, ainsi que le deuxième pilier du Lean, le Jidoka, et l'outil Poka-Yoke. La méthodologie 5S sera également introduite comme un levier de structuration de l'environnement de travail (voir Figure 2).
Ensuite, la démarche DMAIC, structure centrale de l'approche d'amélioration continue, sera décrite. Le chapitre abordera également la simulation des systèmes industriels, en particulier la simulation à événements discrets, qui jouera un rôle clé dans l'évaluation des impacts des améliorations proposées. Enfin, une section sera consacrée aux systèmes MES, qui permettront la collecte des données de production en temps réel.

I.2 Lean : Pilier, Méthodes et Outils

La philosophie Lean est une méthode d'amélioration de la production issue du Toyota production system dont l'objectif principal est d'éliminer systématiquement les gaspillages, qui sont des activités sans valeur ajoutée (Muda en japonais). Pour ce faire, elle se concentre sur la maximisation de la performance de l'entreprise.
Le Lean vise à satisfaire le client en fournissant des produits ou services de meilleure qualité, à des coûts réduits et dans des délais plus courts, tout en utilisant le moins de ressources possible (physiques, humaines, financières, temps) [1].
L'approche Lean améliore l'efficacité, optimise le temps de cycle, augmente la productivité, réduit les délais de réponse, diminue les coûts des matériaux et permet un débit élevé. Elle vise à optimiser les processus en réduisant les temps sans valeur ajoutée, les causes de non-qualité et la complexité. Le concept Lean se concentre sur l'amélioration du processus de production pour atteindre la fiabilité, l'efficacité et la capacité [2].
Les gaspillages se présentent sous trois formes distinctes, communément appelées les «3 Mu» par Ohno [4] :

- **Muda** représente le gaspillage, la futilité ou l'inutilité. Il s'agit d'activités sans valeur ajoutée qui constituent un obstacle dans le processus de production. Il existe plusieurs types de Muda, notamment [5] :
    - ✓ Surproduction : produire plus que la demande exigée par le client.
    - ✓ Temps d'attente : attendre inutilement.
    - ✓ Transports et manutentions inutiles : transporter sans utilité réelle.
    - ✓ Opérations inutiles (usinages inutiles) : fabriquer des produits non conformes ou avec des étapes inutiles.
    - ✓ Stocks excédentaires : Stocker plus que nécessaire.
    - ✓ Mouvements ou gestes inutiles : Réaliser des mouvements inutiles pour l'exécution du travail.
    - ✓ Non qualité (Production de pièces défectueuses ou Rebuts): Fabriquer des produits défectueux.
    - ✓ Démotivation (créativité inexploitée) : Perdre du temps, des idées, des compétences des employ

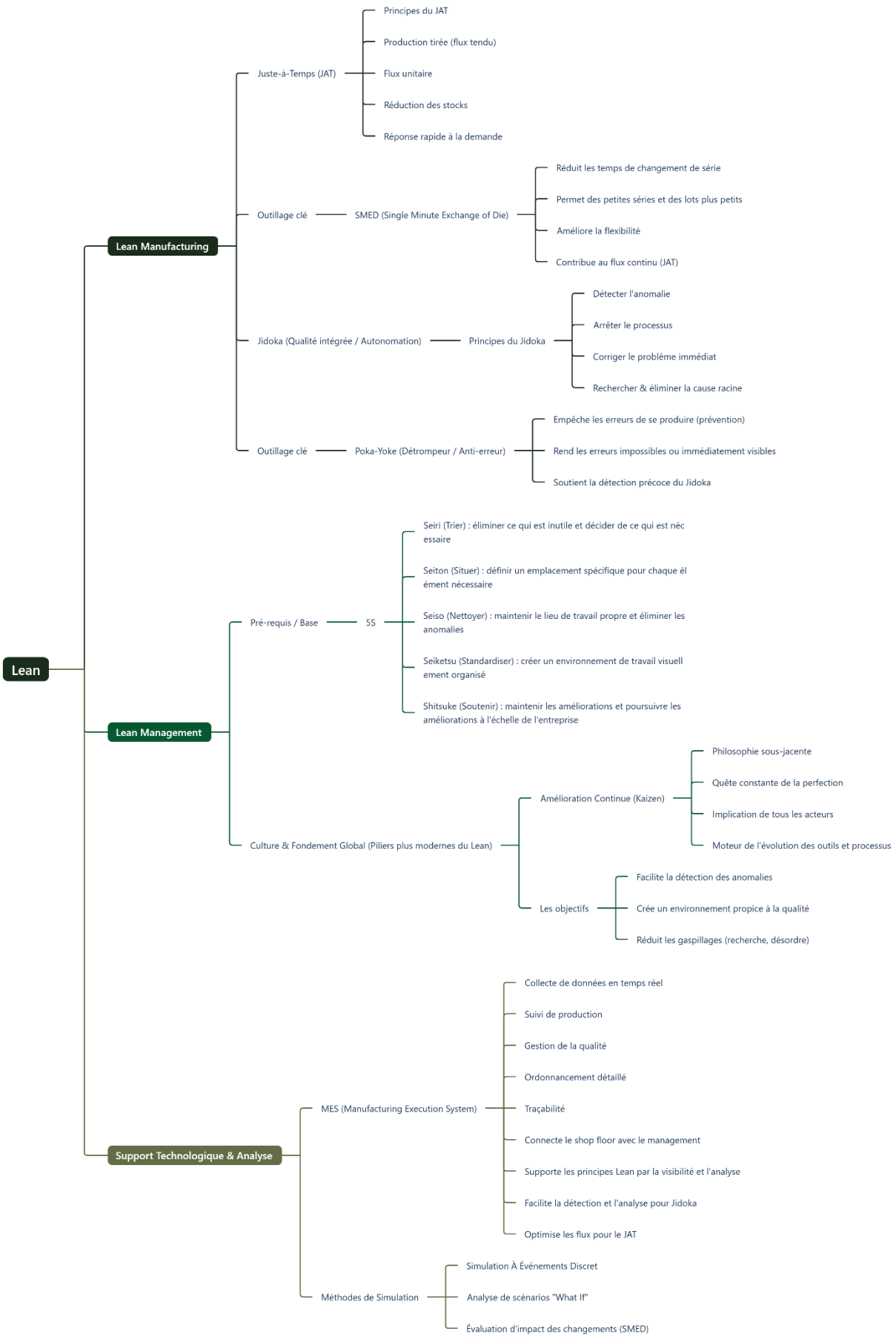


Figure 2 : Outils Lean utilisés dans ce travail

- **Mura** désigne un type de gaspillage lié aux inégalités ou irrégularités dans le flux de travail.
- **Muri** correspond à un gaspillage généré par la surcharge de travail ou une mauvaise estimation des capacités disponibles.

Les origines du Lean remontent aux années 1950 dans les industries japonaises confrontées à la récession après la Seconde Guerre mondiale. À la fin des années 1940, Toyota a posé les bases du « Lean », dans l'objectif de réduire les processus qui n'apportent pas de valeur au produit final.
Taiichi Ohno, un ingénieur industriel et dirigeant de Toyota, a développé le Toyota Production System (TPS), un concept visant à diminuer les dépenses de production. Le TPS était un système de production « au plus juste » suffisamment souple pour s'ajuster aux variations des commandes des clients. Dès 1960, Taiichi Ohno avait mis en œuvre la production Lean dans les installations de Toyota, et l'étape suivante fut pour les fournisseurs de Toyota d'adopter également le système Lean. C'est en 1987 que cette approche a été connue en Europe sous le nom de « Lean », créé par le Massachusetts Institute of Technology (MIT). La philosophie Lean est alors apparue comme une voie de progrès pour les industriels occidentaux et s'est généralisée par la suite. Le Lean est ainsi devenu l'un des principes de base pour les entreprises dans le monde [6].

I.2.1 Lean Manufacturing

Le Lean Manufacturing représente l'application industrielle de la philosophie Lean. Il en constitue une composante essentielle, centrée sur l'optimisation des processus de production, dans le cadre plus large de l'amélioration continue de l'ensemble de l'organisation [7].
Le terme "Lean Manufacturing" apparaît pour la première fois dans les années 70 avec le livre « The Machine That Changed the World » des auteurs Womack, Jones et Ross. Le Lean Manufacturing aussi appelée Lean production est une démarche d'organisation du travail centrée sur l'amélioration du système de production par l'élimination des activités n'apportant pas de valeur ajoutée aux processus [8].
Les techniques du Lean Manufacturing reposent sur des principes fondamentaux visant à rendre les processus de production plus efficaces et plus flexibles. Il se concentre principalement sur les aspects opérationnels de l'entreprise, c'est-à-dire les activités de production et de transformation nécessaires à la création de valeur pour l'entreprise et pour le client [7].

I.2.2 Lean Management

Le Lean Management puise ses origines dans le Lean Manufacturing, dont il est une évolution apparue ultérieurement. Il constitue une extension du Lean Manufacturing au-delà du périmètre de la production, en s'appliquant aux processus de gestion et de pilotage. Son objectif est de simplifier ces processus en éliminant les tâches à faible valeur ajoutée, afin de rendre le management plus léger et l'organisation plus productive [9].
Le Lean Management adopte une vision globale de l'entreprise et s'intéresse aux modes de décision et de gouvernance. Il vise à améliorer la performance en réduisant les gaspillages et les erreurs, en renforçant la qualité et la productivité, tout en favorisant la satisfaction et l'implication des collaborateurs [10].

I.2.3 La méthode SMED

La norme AFNOR NF X 50-310, définit la méthode SMED comme une méthode d'organisation qui cherche à réduire de façon systématique le temps de changement de série, avec un objectif quantifié. C'est-à-dire passer moins de temps à changer les outils ou les séries, et plus de temps à produire.
La méthode SMED, acronyme de Single Minute Exchange of Die, a été développée au Japon par Shigeo Shingo dans les années 1950. Elle constitue à la fois une méthode d'organisation et un outil du Lean Manufacturing et de l'Excellence Opérationnelle. Son objectif principal est de réduire drastiquement les temps de changement de série ou de processus, tout en maintenant une qualité de production satisfaisante [8] [11].
Le terme SMED peut être traduit en français par « changement d'outil en moins de dix minutes ». L'objectif est donc de réaliser ce changement en moins de 10 minutes, c'est-à-dire en un nombre de minutes à un chiffre [12].
Le temps de changement de série correspond au temps nécessaire pour configurer un système de production en vue de fabriquer un produit différent, tout en répondant aux exigences requises. Autrement dit, il s'agit du temps écoulé entre la dernière pièce conforme produite à la cadence et l'efficacité normale de l'opération précédente, et la première pièce conforme produite à la cadence et l'efficacité normale de la nouvelle série [7], Figue 03.

Figure 3 : Structures de changement

Lors des différentes phases du changement de série, deux types d'opérations peuvent être distingués [8] :
Les opérations internes : ce sont celles qui ne peuvent être réalisées que lorsque la machine est à l'arrêt, c'est-à-dire hors production.
Les opérations externes : ce sont celles qui peuvent être effectuées pendant que la machine est en fonctionnement, donc sans interrompre la production.
La réduction du temps de changement de série permet de limiter les arrêts de production et de garantir un fonctionnement optimal des machines. Pour y parvenir, la méthode SMED s'appuie sur quatre étapes conceptuelles (voir Figure 4) définies par Shigeo Shingo :

- **Stade préliminaire : Réglage internes et externes non distingués**
  À ce premier stade, les opérations internes et externes ne sont pas encore différenciées. Il s'agit avant tout d'observer le processus tel qu'il se déroule réellement, sans chercher à l'optimiser immédiatement. Cette phase repose sur une observation minutieuse et factuelle des activités réalisées lors d'un changement de série.
  L'objectif est d'identifier, observer et analyser l'ensemble des opérations effectuées, qu'elles soient manuelles, automatiques ou liées à des déplacements. Chaque tâche élémentaire est repérée, puis décrite de manière précise afin de constituer une base d'analyse fiable [7].

- **Stade 1 : Séparation réglages internes et externes**
  Dans cette deuxième étape de la méthode SMED, l'ensemble des tâches identifiées lors de l'observation initiale est répertorié et analysé afin de distinguer clairement les opérations internes des opérations externes. Cette étape constitue le point de départ de l'optimisation [7] [11].

- **Stade 2 : Conversion de réglages internes en externes**
  Ce stade, correspondant à la troisième étape de la méthode SMED, consiste à convertir

les opérations initialement considérées comme internes en opérations externes, dès lors qu'il est possible de les réaliser sans arrêter la machine.
Pour cela, les tâches internes sont analysées en détail afin d'identifier celles qui pourraient être effectuées en amont ou en parallèle du fonctionnement de l'équipement. On se pose alors des questions clés telles que :

- Quelles tâches l'opérateur peut-il effectuer pendant que la machine fonctionne ?
- Quelles préparations peuvent être anticipées ?
- Quelles actions peuvent être menées simultanément avec d'autres opérations ?

La méthode des « 5 pourquoi » peut être utilisée à ce stade pour identifier les causes fondamentales qui empêchent certaines tâches d'être externalisées, et ainsi faciliter leur transformation. Cette démarche peut être appliquée non seulement dans l'analyse des processus existants, mais aussi dès la phase de conception d'un système, afin d'intégrer une logique d'optimisation dès l'origine.
Cette étape joue un rôle central dans la réduction effective des temps d'arrêt, en déplaçant autant que possible les activités vers des moments où la machine reste productive [11] [12] [7].

➢ **Stade 3 : Rationalisation de tous les aspects de l'opération de réglage**
Ce dernier stade de la méthode SMED, correspondant à la quatrième étape dans l'autre décomposition, consiste à réduire au minimum l'ensemble des opérations restantes, qu'elles soient internes ou externes. L'objectif est d'optimiser globalement le système de changement de série. Cette phase repose sur trois axes complémentaires :

- Éliminer les tâches inutiles, telles que celles générées par des défauts ou des perturbations répétitives.
- Simplifier les tâches nécessaires, en adoptant de nouvelles idées, en réorganisant les méthodes de travail ou en automatisant certaines opérations.
- Combiner certaines tâches, en les exécutant en parallèle lorsque cela est possible, afin de gagner en efficacité.

Ainsi, la rationalisation permet d'améliorer en profondeur l'ensemble du processus, non seulement en le rendant plus rapide, mais aussi plus fluide et plus fiable. Ce stade final marque la transition d'un simple changement de pratiques vers une véritable amélioration continue intégrée dans la logique du Lean Manufacturing [7] [11] [12].

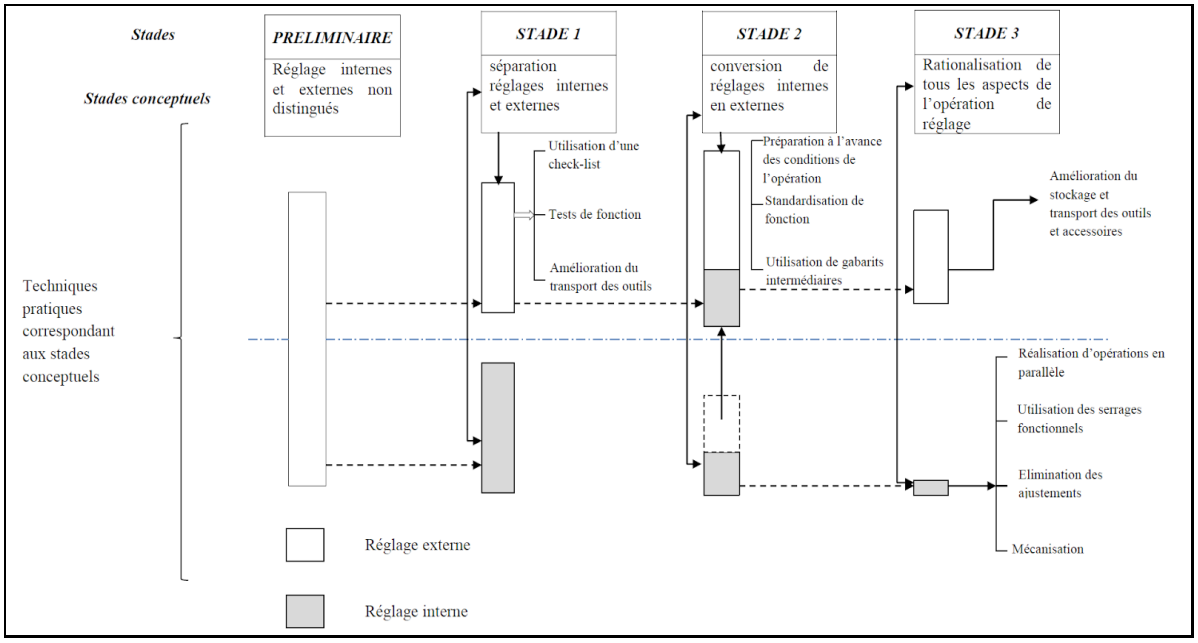


Figure 4: SMED stade conceptuel et techniques pratiques [7]

I.2.4 Deuxième pilier du Lean : Jidoka

Le concept de Jidoka, souvent traduit par "automatisation avec intelligence humaine", est l'un des deux piliers essentiels du Lean Manufacturing (voir Figure 5) et du Toyota Production System (TPS), aux côtés du Just-in-Time (JIT) [13]. Son objectif est de détecter et d'arrêter automatiquement les anomalies dans les processus, afin de garantir la qualité et d'éviter la propagation des erreurs. Ce principe a été introduit par" Sakichi Toyoda" en 1902, avec une machine à tisser capable de s'arrêter lorsqu'un fil se casse, l'idée principale de ce dernier repose sur la collaboration entre les machines et les humains, pour identifier rapidement les défauts dès leur apparition, permettant ainsi une résolution immédiate et prévenant la production de biens défectueux. Jusqu'à aujourd'hui, Jidoka a évolué pour intégrer des technologies modernes telles que les capteurs, les systèmes Andon et les dispositifs Poka-Yoke [14][15]. Avec l'avènement de l'ère numérique, on parle aujourd'hui de Jidoka 4.0, qui tire parti de solutions comme l'Internet des objets et l'automatisation avancée, ce système responsabilise les opérateurs en leur permettant d'intervenir directement. Exemple en tirant une corde pour arrêter la chaîne de production. Il encourage également une culture d'amélioration continue, contribuant à réduire les déchets, à optimiser les ressources, et à renforcer la sécurité et la fiabilité des processus [14][16].

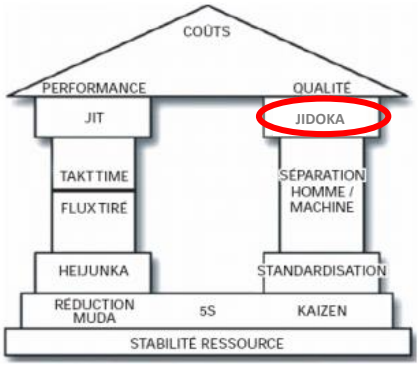


Figure 5: Le temple du Lean [6]

Pour atteindre cet objectif, le Jidoka s'appuie sur plusieurs outils parmi les : Management visuel (Mieruka), Systèmes Andon, et Poka-yoke.

Poka-yoke (Détrompeur ou Anti-erreur) :

- Le Poka-yoke est un composant essentiel du Jidoka et est considéré comme l'un des outils principaux de la "boîte à outils" Lean. Il s'agit d'un outil qui soit empêché les erreurs ou les défauts de se produire, soit se concentre sur l'élimination des causes de leur apparition.
- Le mot japonais "poka-yoke" est dérivé de "poka" (erreurs non intentionnelles) et de "yoke" (évitement) et a remplacé le terme ancien "baka-yoke" (à l'épreuve des imbéciles) car il était moins péjoratif [13] [15].
- A la base des systèmes Jidoka de 1ère génération (Jidoka 1.0) figuraient des dispositifs mécaniques que sont des Poka-yokes, permettant, lorsqu'un état anormal ou indésirable est détecté dans le processus de fabrication, d'arrêter ce processus en vue d'éviter la fabrication de produits défectueux [16].
- Le Poka-yoke est en faveur d'une qualité zéro défaut. Il induit une gestion de la qualité par une inspection à 100% de fabrication en découlant plutôt que par le contrôle statistique de la qualité [13].
- Les solutions Poka-yokes traditionnelles doivent être simples, peu coûteuses et intégrées dans le processus afin de prévoir une mise en œuvre rapide et assurer leur rentabilité.

La conception des systèmes Poka-yokes intégrés dans les systèmes Jidoka requiert à la fois de la science et de l'art afin d'envisager des solutions innovantes pour détecter et éviter les erreurs [13] [15].

- Les dispositifs Poka-yoke se classent selon deux types :
  1. La prévention, qui a pour objet d'écarter les erreurs avant leur survenance, et la détection, qui indique la survenance des erreurs par des alertes visuelles ou sonores.
  2. En fonction de leur mode d'action, on peut les appliquer par un moyen : d'arrêt automatique du processus en cas d'erreur, de contrôle des conditions conduisant aux défauts, d'alarme signalant à l'opérateur une anomalie sans stopper instantanément la production.
- Il existe six principes de la méthodologie Poka-yoke [18], les six principes sont organisés selon le degré de désirabilité de la correction des erreurs sur la Figure 6 suivante, du plus préférable au moins désirable, mais toujours utile :

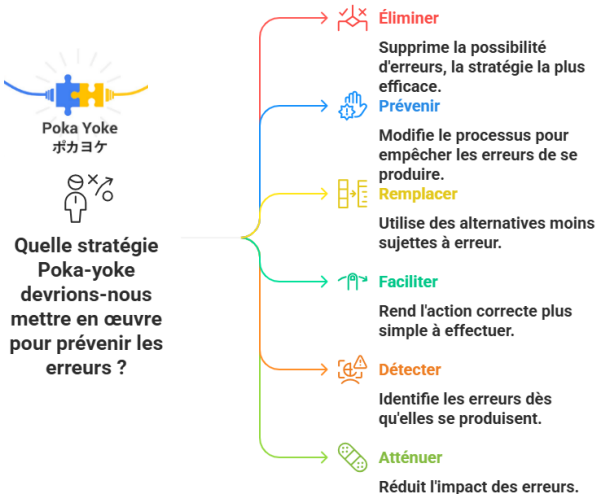


Figure 6: Les principes de Poka-yoke

En somme, la méthode Poka-Yoke vise à prévenir les erreurs à la source à l'aide de dispositifs simples et fiables. La manière structurée dont elle est conçue, comme le montre la Figure 07, fait partie des leviers à actionner pour améliorer la qualité des processus.

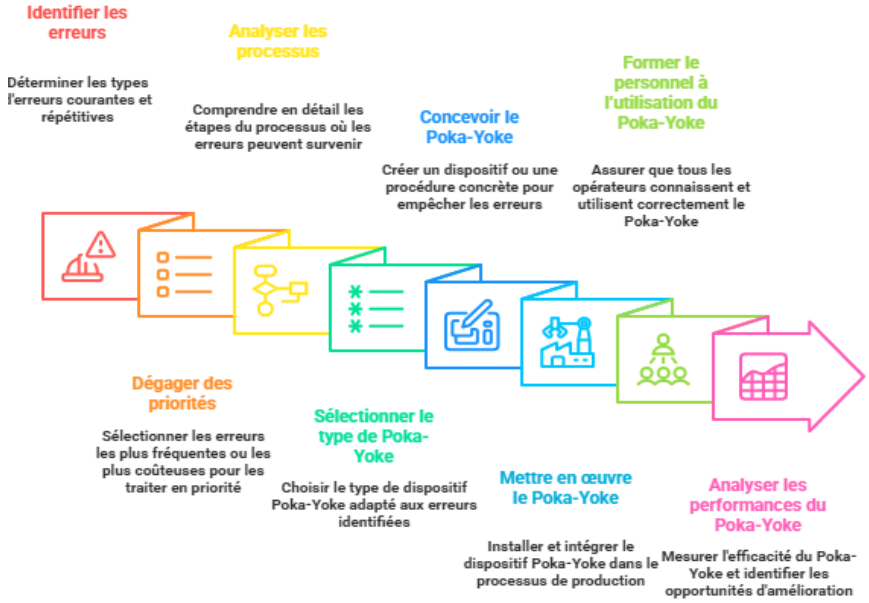


Figure 7 : Processus de mise en œuvre du Poka-Yoke

I.2.5 Méthodologie 5S

La méthodologie 5S est une méthodologie de base du Lean, qui vise à créer un environnement de travail propre, rangé, standardisé et pérenne. Son appellation vient de 5 mots japonais :

1) Seiri (Trier) : éliminer ce qui est inutile et décider de ce qui est nécessaire
2) Seiton (Situer) : définir un emplacement spécifique pour chaque élément nécessaire
3) Seiso (Nettoyer) : maintenir le lieu de travail propre et éliminer les anomalies
4) Seiketsu (Standardiser) : créer un environnement de travail visuellement organisé
5) Shitsuke (Soutenir) : maintenir les améliorations et poursuivre les améliorations à l'échelle de l'entreprise

La méthodologie 5S facilite la détection des anomalies, crée un environnement propice à la qualité et réduit les gaspillages en raison de recherche et de désordre. Le 5S contribue également à améliorer :

- la productivité (en réduisant le temps perdu),
- la qualité (en réduisant les erreurs),
- la sécurité (en réduisant les risques d'accidents),
- le bien-être des équipes (en créant un cadre de travail plus agréable),
- et à la protection de l'environnement.

L'audit 5 est un outil d'évaluation qui permet de vérifier l'application effective de la méthode 5 S dans les ateliers, bureaux ou zones de production. Il s'effectue en général de façon régulière (hebdomadaire ou mensuelle) à partir d'une grille d'audit fondée sur les 5 S.

I.3 La démarche DMAIC

La démarche DMAIC est une méthodologie structurée utilisée principalement dans le cadre des philosophies Six Sigma et Lean Six Sigma pour la conduite de projets d'amélioration continue et de résolution de problèmes [12][19].

Le DMAIC est une méthode scientifique axée sur les données "data-driven". Il constitue la structure du LSS et sert de programme d'amélioration structuré qui vise à améliorer les processus grâce à la collecte et à l'analyse de données. C'est un modèle d'amélioration standard qui fournit une feuille de route pour le déploiement des améliorations dans une entreprise [7][19] .

L'acronyme DMAIC représente les cinq phases ou étapes principales de cette méthode :

- **Définir (Define) :** Cette phase consiste à déterminer les objectifs de l'activité d'amélioration et à les intégrer dans une charte de projet. Elle implique d'identifier les problèmes, les opportunités d'amélioration et de définir la stratégie à suivre, ainsi que le cadre du projet (périmètre, objectifs, équipe) [20]. Pour structurer cette étape, plusieurs outils méthodologiques sont utilisés, notamment :
    - Diagramme SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers), qui permet de cartographier le processus dans sa globalité [7] .
    - Diagramme de flux, pour visualiser les enchaînements d'activités et détecter les sources potentielles de dysfonctionnements [7].
    - Énoncé de problème, qui sert à formuler de manière précise et concise la situation à corriger [12].

- **Mesurer (Measure) :** Le but est de comprendre le fonctionnement réel du processus grâce à une évaluation quantitative s'appuyant sur des systèmes de mesure et des données collectées. Cette phase permet de recueillir les données nécessaires pour évaluer la performance actuelle du processus et identifier ce qui pose problème [20]. Plusieurs outils analytiques sont mobilisés pour soutenir cette démarche :

- Tableau des activités de processus avec les durées permet de visualiser chaque tâche, d'identifier les étapes critiques ou chronophages, et de repérer les gaspillages de temps.
- Histogramme est utilisé pour représenter graphiquement la distribution des données, facilitant ainsi l'identification de tendances ou d'anomalies.
- Analyse statistique descriptive (moyenne, médiane, écart-type, minimum, maximum, etc.) fournit une lecture synthétique des performances du processus et permet de poser un diagnostic basé sur des faits mesurables.

➢ **Analyser (Analyze) :** L'objectif est d'identifier et de vérifier les causes racines affectant les variables clés liées aux objectifs du projet. On y analyse les données collectées pour comprendre les dysfonctionnements du processus [20]. Divers outils graphiques et statistiques sont utilisés pour cette analyse, notamment :
- Diagramme de causes à effet (ou diagramme d'Ishikawa), aide à structurer la recherche des causes potentielles en les classant par catégories (main-d'œuvre, méthodes, machines, matières, milieu).
- Diagramme de Pareto, permet de visualiser les causes les plus fréquentes ou les plus impactantes, selon le principe des 80/20 (80 % des effets sont souvent dus à 20 % des causes).

➢ **Innover / Améliorer (Improve / Innovate) :** Durant cette phase, l'équipe développe, teste et met en œuvre les solutions proposées pour les causes racines identifiées. Le but est de transformer le processus pour obtenir une meilleure performance [20]. Divers outils et techniques peuvent être utilisés pour générer et évaluer les solutions.
- Brainstorming, qui favorise l'émergence d'idées innovantes en mobilisant l'intelligence collective de l'équipe projet.
- Matrice de priorisation, qui permet de classer les solutions en fonction de leur impact potentiel et de leur faisabilité.

➢ **Contrôler (Control) :** Cette phase est continue et vise à maintenir et améliorer les gains réalisés par le projet. Elle consiste à mettre en place des actions pour pérenniser les bénéfices obtenus et s'assurer de la continuité de la performance améliorée. Il s'agit de prévenir tout retour aux anciennes pratiques et de garantir que les solutions mises en place restent efficaces et durables [19][20]. Pour cela, plusieurs outils de suivi et de standardisation sont utilisés :
- Checklist de contrôle, permet de vérifier régulièrement le respect des nouvelles procédures et d'assurer la rigueur dans l'exécution des tâches.
- Les outils Lean comme 5S, Travail standard et Kaizen.

I.4 La simulation des systèmes industriels

La simulation industrielle s'inscrit dans le domaine plus large de la modélisation et de la simulation. Ce domaine englobe les méthodes, les outils et les techniques utilisés pour représenter, expérimenter et étudier des systèmes complexes. La simulation est une approche spécifique pour étudier des modèles ou expérimenter avec un modèle en fonction de divers objectifs [21]. Les modèles de simulation sont des représentations informatiques qui permettent de reproduire le fonctionnement d'un système réel à un certain niveau d'agrégation.
Parmi les principales techniques de simulation utilisées, on distingue trois approches fondamentales : la simulation à événements discrets (DES), la simulation basée sur les agents (ABS) et la dynamique des systèmes (SD), chacune adaptée à des types spécifiques de systèmes et de problématiques [21].

La simulation est souvent considérée comme l'outil le plus utile dans les domaines de l'ingénierie industrielle, de la recherche opérationnelle et des sciences de gestion. Elle est fréquemment le moyen le plus efficace en termes de temps et de coûts, et souvent le seul moyen, de détecter les effets causaux, de stipuler des estimations de paramètres critiques et de clarifier comment les processus se développent au fil du temps [21].
La simulation permet d'analyser et de comprendre les systèmes avant leur mise en œuvre, ce qui en fait une technique largement utilisée pour caractériser les configurations et contraintes de processus complexes. Elle offre la possibilité d'étudier le comportement d'un système dans un contexte d'incertitude et à travers différents scénarios, notamment lorsque les problèmes sont trop complexes pour être formulés mathématiquement [22]. Dans le domaine de la fabrication, la simulation s'impose particulièrement dans les situations où réaliser des expériences sur le système réel est difficile, voire impossible, en raison des coûts ou du temps que cela impliquerait. Lorsqu'elle est associée à un système d'optimisation, elle devient un outil précieux pour s'assurer qu'une ligne de fabrication automatisée peut atteindre les objectifs commerciaux, aussi bien avant qu'après sa mise en service. Les technologies de fabrication numérique, comme les modèles de simulation, jouent un rôle clé dans l'amélioration des performances des équipements et des processus automatisés. Grâce à la simulation, il est possible de tester et valider les améliorations avant leur application concrète, la simulation contribue à éviter des modifications longues et coûteuses. Elle aide également les concepteurs à identifier, dès les premières étapes du projet, les facteurs et paramètres clés permettant d'assurer une performance optimale de la ligne de production [22] [23].

I.4.1 Simulation d'événements discrets

La Simulation d'événements discrets est une méthode de simulation très courante, particulièrement appliquée aux systèmes de fabrication, mais aussi utilisée dans des applications techniques et de services. C'est une approche pour modéliser des systèmes qui peuvent représentés par une série d'événements discrets [21].
Le concept principal de la DES est que le système est souvent modélisé comme un processus, c'est-à-dire une séquence d'opérations effectuées sur des entités et des ressources. Le but est de reproduire la structure du système pour étudier ses résultats dans différentes situations. Ce type de simulation permet de modéliser des systèmes où des états qui changent uniquement à des instants discrets, dépendent à l'occurrence d'événements spécifiques. Dans un contexte industriel, ces événements peuvent être : l'arrivée d'une commande, un arrêt pendant la fabrication, ou une panne d'une machine [22].
ARENA est explicitement répertorié parmi les divers logiciels de simulation, gratuits et commerciaux, qui prennent en charge la modélisation de la Simulation d'événements discrets [21] [24]. Ce logiciel permet de modéliser des systèmes où les entités peuvent être distinctes et avoir des caractéristiques hétérogènes, une capacité avantageuse de la DES [24].

I.5 Les systèmes d'exécution de la fabrication MES

En termes de compétitivité manufacturière, les entreprises industrielles s'efforcent d'utiliser des techniques avancées permettant d'améliorer l'efficacité, la qualité, ainsi que d'atteindre une plus grande flexibilité et durabilité. Les industries modernes s'inspirent de la vision de l'Industrie 4.0 pour atteindre un haut niveau de capacités numériques afin de relever les défis de la transformation, tels que l'interconnectivité, la gestion du big data, l'intégration de l'information en temps réel, et l'assurance d'une adaptabilité entre les usines intelligentes, l'infrastructure informatique et les logiciels [25]. Dans la plupart des usines intelligentes, on retrouve deux types de logiciels :

- Le système de gestion de l'entreprise, généralement composé d'un ERP et d'un GPAO (Gestion de Production Assistée par Ordinateur) [26].
- Le système de supervision, qui permet un contrôle en temps réel des ressources de production, tel que les automates programmables (PLC) et les systèmes SCADA.

La Figure 08 illustre les connexions entre ces systèmes ainsi que le flux d'informations entre eux. Elle met en évidence leurs temporalités distinctes, les niveaux de prise de décision, et la manière dont les détails et la portée de l'information partagée évoluent au fur et à mesure que l'on progresse dans les différentes couches.

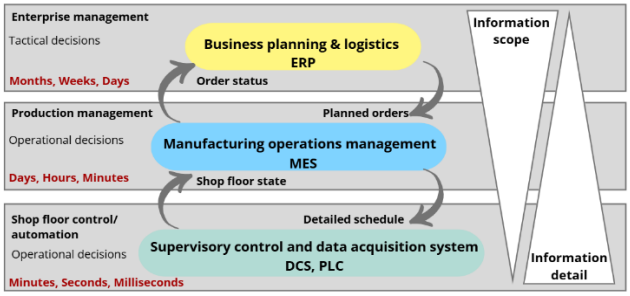


Figure 8 : Systèmes d'information et de gestion pour la planification et le contrôle [23]

Le MES est né du besoin de communication numérique entre ces deux couches fonctionnelles, assurant leur alignement et leur synchronisation. Il sert également de lien bidirectionnel entre la planification d'entreprise et l'atelier de production, englobant les systèmes de contrôle et d'automatisation [27]. Il se situe au troisième niveau de la pyramide d'automatisation CIM (Computer Integrated Manufacturing) (voir Figure 09)

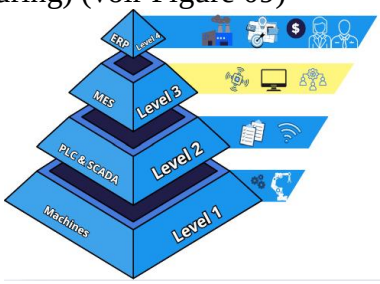


Figure 9 : Pyramide d'automatisation CIM

I.5.1 Evolution des systèmes MES

Le MES a évolué, passant de simples systèmes de suivi à des solutions logicielles centrées sur les processus, capables de collecter et de gérer des informations en temps réel provenant des processus de fabrication [25][28]. Cela permet une gestion en temps réel des activités de l'atelier en utilisant des données sur les équipements, les ressources et les ordres de fabrication pour optimiser la production [25]. Le MES s'est enrichi au fil du temps, intégrant des extensions pour exécuter des activités de production grâce aux technologies avancées de l'information. La fonction principale d'un MES est de fournir des informations précises sur l'état réel du système de production, accompagnées d'outils d'analyse permettant d'améliorer à la fois les aspects quantitatifs et qualitatifs de la production [29]. Portée par les technologies avancées, l'Industrie 4.0 marque une transformation majeure du paysage industriel. Par conséquent, pour soutenir la nouvelle génération de systèmes de production, la numérisation du MES est essentielle [25] [30]. Le MES s'est transformé, passant de simples systèmes de suivi à des solutions intégrées avancées. Un MES intelligent (IMES) représente une évolution des systèmes de production traditionnels, intégrant des technologies de pointe pour améliorer les processus en temps réel. En utilisant des standards tels que l'ISA-95 et l'OPC UA (Object Linking and Embedding for Process Control) [26], il s'intègre également à divers systèmes, notamment les ERP et les

systèmes de contrôle automatisés, offrant une vision intégrée des activités industrielles [31]. Pour mieux comprendre l'évolution du MES traditionnel vers le IMES, le Tableau 1 met en évidence les principales différences entre ces deux générations de systèmes. Il facilite la comparaison de leurs objectifs principaux, la gestion des données, l'analyse, la prise de décision, l'intelligence, l'autonomie, ainsi que leur intégration, leurs capacités de diagnostic et leur réactivité.

Tableau 1 : Comparaison entre le MES traditionnel et le MES intelligent

Caractéristique	MES traditionnel	MES intelligent
Objectif principal	Simplifier l'exécution de la production et relier la planification (ERP) aux systèmes de contrôle (PLC, capteurs).	Maximiser les données de production pour l'amélioration continue et l'optimisation grâce à l'analyse de données massives (big data analytics).
Gestion des données	Collecter et stocker les données de production, principalement utilisées pour le calcul des indicateurs de performance.	Gestion et analyse en temps réel d'un grand volume de données diverses provenant de multiples sources grâce au big data, afin d'en extraire des informations utiles.
Analyse et décision	Calcul des indicateurs de performance (TRS) avec un support diagnostique limité, s'appuyant sur l'expertise humaine.	Visibilité et analyse des performances en temps réel ave un support diagnostique avancé, permettant une prise d décision rapide et intelligente à tous les niveaux.
Intelligence et autonomie	Réactif et basé sur des règles, dépendant de l'expertise humaine.	Fonctionnement autonome et intelligent grâce à l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique
Intégration	Interopérabilité via l'intégration avec l'ERP et les systèmes de traçabilité, selon la norme ISA-95.	Intégration rapide et sécurisée avec un vaste écosystèm de systèmes et d'équipements, permettant une intégration verticale dans le cadre de l'Industrie 4.0.
Diagnostic	Diagnostic de pannes limité et prédéfini, avec peu d'analyse des problèmes de performance et de qualité.	Capacités de diagnostic avancées utilisant des modèles probabilistes pour identifier les causes des écarts de performance.
Réactivité	Réactivité basée sur des informations et des alertes préconfigurées.	Réactivité en temps réel grâce à une analyse continue des données.

Le MES traditionnel se concentre sur l'exécution de la production, en assurant la liaison entre les systèmes ERP et les dispositifs de contrôle de l'atelier, tels que les PLC et les capteurs. Avec des capacités de diagnostic limitées et une approche réactive reposant sur l'expertise humaine, il collecte et stocke les données de production afin de calculer des indicateurs de performance comme le taux de rendement synthétique TRS.
En revanche, l'IMES utilise l'analyse de données massives (big data) pour gérer et analyser de grands volumes de données en temps réel provenant de diverses sources, facilitant ainsi l'intégration verticale avec l'Industrie 4.0. Cela permet une intégration intuitive des systèmes et des dispositifs, une prise de décision autonome et des capacités de diagnostic avancées. De plus, il améliore les diagnostics et la flexibilité grâce à l'analyse continue des données et à l'utilisation de modèles probabilistes. Les IMES se distinguent par l'intégration des technologies avancées de l'Industrie 4.0, notamment l'intelligence artificielle (IA), l'Internet des objets (IoT), l'apprentissage automatique (ML) et l'analyse de données massives (Big Data Analytics - BDA) (Annexe A).

I.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre du projet d'amélioration. Il a introduit les principes fondamentaux du Lean, en mettant en avant ses piliers, ses outils et ses méthodes, notamment la méthode SMED, le Jidoka, le Poka-Yoke et la démarche 5S. Il a également présenté la démarche DMAIC, qui constituera le fil conducteur du projet, ainsi que les apports de la simulation à événements discrets et des systèmes MES.

Le chapitre suivant sera dédié à l'identification et à la sélection du projet d'amélioration, ainsi qu'à la mise en œuvre de la méthode SMED selon une approche structurée basée sur la démarche DMAIC. Il permettra de passer de la phase théorique à l'analyse concrète du terrain.

Chapitre II
Implémentation de la méthode SMED selon la démarche DMAIC

II.1 Introduction

Après avoir présenté les bases théoriques du projet dans le chapitre précédent, en expliquant les principes du Lean, la démarche DMAIC, la simulation à événements discrets et les systèmes MES, ce chapitre marque le début de la phase d'application. Il est important car il permet de mettre en application ces concepts pour répondre à l'objectif principal : réduire les temps de changement de série sur la ligne de production 20-18. Il sera donc consacré à l'application de la méthode SMED sur cette ligne, en suivant les étapes de la démarche DMAIC.

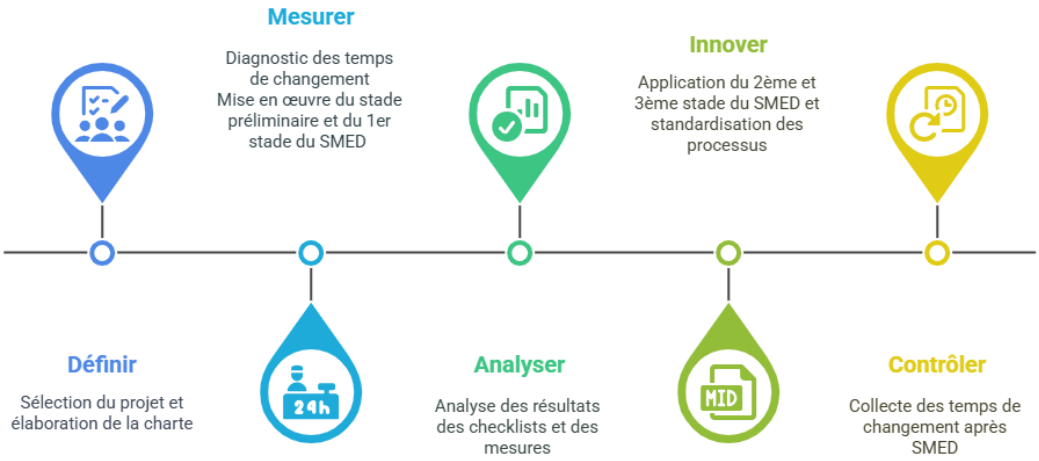


Figure 10 : Schéma illustrant l'application du SMED dans la démarche DMAIC

La figure 10 illustre l'application concrète de la méthode DMAIC (Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler) dans le cadre de ce projet, en synergie avec la méthode SMED. Chaque étape est structurée pour guider de manière logique et progressive l'amélioration du processus de changement de série. D'abord, la phase Définir consiste à sélectionner le projet pertinent et établir une charte claire. Ensuite, l'étape Mesurer permet de diagnostiquer les temps actuels de changement et de mettre en œuvre les premières étapes du SMED. Dans la phase Analyser, les résultats sont examinés à l'aide de checklists et de mesures pour identifier les sources principales de gaspillage. L'étape Innover vise à appliquer les deux derniers stades du SMED en standardisant les opérations pour les rendre plus efficaces. Enfin, la phase Contrôler assure le suivi des résultats en collectant les temps de changement après la mise en œuvre des améliorations. Cette méthode rigoureuse permet ainsi d'atteindre l'objectif principal de réduction durable des pertes de temps tout en renforçant la performance globale de la ligne. Mais avant d'aborder le cœur du travail, il convient de présenter le contexte du projet de fin d'études en décrivant brièvement l'organisme d'accueil.

II.2 Contexte du projet fin d'études

Le stage du projet fin d'études a été réalisé au sein de Fruital Coca-Cola. Cette entreprise, spécialisée dans la production et la distribution de boissons gazeuses non alcoolisées, a été fondée en 1993. Depuis 2006, Fruital est majoritairement détenue par le groupe espagnol ECCBC, ce qui en fait le principal embouteilleur de Coca-Cola en Algérie. En juillet 2022, ECCBC a fusionné ses activités avec le groupe Castel, renforçant sa position sur le marché national. L'entreprise compte trois usines (Alger, Skikda, Oran) et emploie environ 2000 collaborateurs. Les produits de Fruital se distinguent selon deux axes principaux : d'une part, la variété des parfums proposés, incluant les gammes Coca-Cola, Sprite, Fanta, Schweppes, Vimto et Minute Maid Refresh. D'autre part, la diversité des formats d'emballage, qui se

répartissent entre les canettes en 25 Cl et 33 Cl, les bouteilles en plastique PET (poly téréphtalate d'éthylène) disponibles en 0.25L, 0.33L, 0.5L, 1L, 1.5L et 2L, et les bouteilles en verre de 25 Cl, 30 Cl et 1L. Chaque combinaison unique d'un parfum et d'un format constitue une unité de gestion des stocks SKU (Shipping key unit), à l'image de "Coca Cola PET 1L" . L'usine est équipée de sept lignes de production : cinq pour les bouteilles PET, une pour les bouteilles en verre RGB et une pour les canettes. Chaque ligne est équipée de diverses machines effectuant des tâches spécifiques pour aboutir à un produit fini correctement emballé, prêt pour le transport et la commercialisation. La cadence de production varie selon la ligne et le format des produits traités (voir Tableau 02).

Tableau 2 : Cadence de production par ligne

Ligne	Cadence (Bouteilles\h)
PET 10–10	10000
PET 10–14	16000 - 18000
PET 14–20	28000
PET 20–18	40000 – 30000 – 26000
PET 20–18 KHS	45000
Canettes	43000 - 72000
RGB (Verre)	16000 - 32000

II.3 Définir (Define)

Cette phase constitue le point de départ de la démarche DMAIC. Elle permet de cadrer le projet d'amélioration de manière structurée, en l'alignant avec les objectifs stratégiques de l'entreprise. Dans ce cadre, le projet sélectionné sera clairement défini et justifié. Cette phase comprend également l'identification des exigences critiques pour la qualité (CTQ – Critical To Quality), avec un focus particulier sur les types d'arrêts à optimiser. Afin de mieux comprendre le fonctionnement de la ligne de production concernée, un diagramme BPMN sera réalisé pour modéliser l'ensemble du processus. Les limites du périmètre du projet seront également précisées, afin de délimiter clairement son champ d'action. Enfin, une charte projet sera élaborée, définissant les objectifs, les parties prenantes, les indicateurs de performance et le planning prévisionnel. Cette charte constitue un référentiel essentiel pour garantir la cohérence et la réussite des phases suivantes du projet.

II.3.1 Sélection du projet : Choix de la ligne

L'usine Fruital Coca-Cola dispose de sept lignes de production, chacune opérant à une cadence différente, comme précédemment mentionné. Parmi elles, la ligne 20-18, souvent désignée comme le « cerveau » de l'usine, occupe une place stratégique. Elle assure à elle seule 25 % de la production totale en termes de caisses physiques et 27 % en termes de volumes produits (voir Tableau 03). Cette performance s'explique par sa spécialisation dans l'embouteillage de formats PET de grande capacité : 1L, 1.5L et 2L. Ces éléments mettent en évidence la position stratégique de la ligne 20-18 dans l'activité de Fruital, ce qui justifie pleinement les efforts d'optimisation de ses performances.

Tableau 3: Production des lignes de Fruital

Ligne	Caisses physiques Net	Unités de caisses net
Ligne Canette	16%	9%
Ligne Verre RGB	1%	2%
PET 10/10	8%	8%
PET 10/14	14%	24%
PET 14/20	11%	6%
PET 20/18	25%	27%
PET 20/18 KHS	25%	24%

Cependant, malgré son importance dans la chaîne de valeur, la ligne 20-18 présente l'un des TRS les plus faibles parmi l'ensemble des lignes de l'usine. En effet, son TRS atteint 50 % après celui de la ligne canette 40 % et celui de la ligne RGB 39% (voir Tableau 04). Il convient toutefois de noter que la ligne RGB opère uniquement en deux shifts, contrairement aux autres lignes qui fonctionnent en trois shifts. Pour cette raison, les comparaisons de performance avec la RGB vont être négligées.
Ce faible TRS, associé au rôle stratégique de la ligne 20-18, met en évidence l'urgence et l'importance de son optimisation. Toute amélioration sur cette ligne aurait un effet amplifié sur l'ensemble de la production de l'usine, ce qui en fait une priorité majeure dans une démarche de performance industrielle.

Tableau 4 : Taux de rendement synthétique des lignes de production de Fruital

Ligne	TRS
Ligne Canette	40%
Ligne Verre RGB	39%
PET 10/10	72%
PET 10/14	62%
PET 14/20	65%
PET 20/18	50%
PET 20/18 KHS	65%

Afin d'identifier les leviers d'amélioration de la ligne 20-18, il est essentiel d'analyser en détail les différents types d'arrêts qui impactent sa performance. Ces arrêts, qui influencent directement le TRS, peuvent être classés en trois grandes catégories : arrêts techniques, arrêts opérationnels, et les arrêts planifiés (voir Tableau 05). Chacune de ces catégories reflète une nature spécifique d'interruption de la production, qu'elle soit liée à une défaillance technique, à une perturbation dans le processus de production ou à des interventions prévues. L'analyse de ces arrêts permettra de cibler les principales sources de pertes de performance et de définir les axes d'optimisation adaptés à cette ligne stratégique.

Tableau 5 : Arrêts de la ligne 20-18 par type

Mois	Arrêts techniques	Arrêts opérationnels	Arrêts planifiés
Janvier	13	16	10
Février	11	19	8
Mars	18	16	9
Avril	20	17	10
Mai	22	19	11
Juin	24	17	11
Juillet	25	19	12
Août	25	23	13
Septembre	23	15	10
Octobre	21	23	11
Novembre	17	20	10
Décembre	14	21	12
Total	19%	20%	11%

II.3.2 Identification des CTQ (Critical to Quality) : Choix de type d'arrêt

Fruital a exprimé son besoin d'améliorer la performance de la ligne de production 20-18, qui est essentielle en raison de sa position stratégique, en optimisant les arrêts planifiés. Pour cela, une analyse détaillée a été réalisée, examinant à la fois les arrêts planifiés (voir Tableau 06) et les arrêts opérationnels (voir Tableau 07), afin de diagnostiquer les principales causes de pertes de disponibilité et de proposer des actions d'amélioration spécifiques.

Tableau 6: Arrêts planifiés

Arrêts planifiés	11%
CIP (hors changement de parfum, changement de format ou redémarrage)	1
Changement de parfum ou de format	5
Réunions pendant le temps de production	0.1
Autres	1
Nettoyage planifié – pendant le temps de production	0.6
Simulation d'usine en cas d'incident	0.2
Maintenance préventive – pendant le temps de production	0.4
Arrêt complet	1
Redémarrage	1.7

Tableau 7 : Arrêts opérationnels

Arrêts opérationnels	20%
Coupure de courant – externe	**0.4**
Manque de services de chariot élévateur	**3**
Manque d'autres matériaux d'emballage	**0**
Manque de palettes	**0.2**
Insuffisance de main-d'œuvre	**0.5**
Manque de vapeur – hors panne	**0**
Manque de sirop – hors panne	**0.3**
Manque d'eau – origine externe	**0**
Manque d'eau – hors panne	**0.1**
Indisponibilité du réseau SAP (origine externe)	**0.2**
Qualité des matières premières	**1.2**
Autres	**3**
Réglages ou ajustements	**12**

Afin d'approfondir l'analyse, la méthode de Pareto, aussi appelée loi des 80/20, est un outil d'analyse permettant d'identifier les causes les plus significatives d'un problème ou d'un phénomène donné. La méthode a été mise en œuvre sur les arrêts planifiés (voir Tableau 08). Cette approche permet d'identifier les 20 % des causes qui sont à l'origine de 80 % des problèmes. Elle facilite ainsi la priorisation des actions correctives en ciblant les sources de pertes les plus significatives.

Tableau 8 : Application de la méthode ABC

Causes	Arrêts	Pourcentage	Cumulé	Catégorie
Changement de série	5,0	45,45454545	45,45454545	A
Redémarrage	1,7	15,45454545	60,90909091	
CIP	1,0	9,090909091	70	
Arrêt complet	1,0	9,090909091	79,09090909	
Autres	1,0	9,090909091	88,18181818	B
Nettoyage	0,6	5,454545455	93,63636364	
Maintenance préventive	0,4	3,636363636	97,27272727	
Simulation	0,2	1,818181818	99,09090909	C
Réunions	0,1	0,909090909	100	
Total	11,0	100		

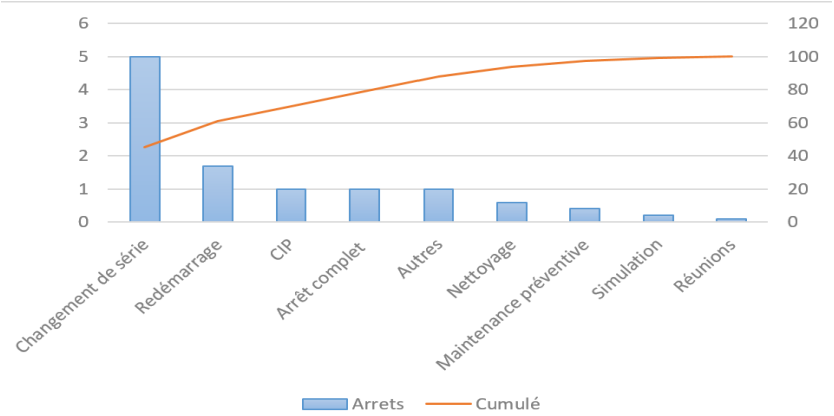


Figure 11 : Résultats de la méthode ABC

Les résultats de l'application de la méthode pareto (voir Figure 11) montrent que les arrêts liés aux changements de série, au redémarrage de la production et au nettoyage CIP (Cleaning In Place) représentent 20 % des causes engendrent 80 % des arrêts planifiés. Ce qui souligne l'importance d'agir en priorité sur l'optimisation des temps de changement de série. En effet, améliorer cette étape a un impact direct sur la réduction des temps de redémarrage, ainsi que des temps d'ajustement, qui à eux seuls représentent 57,14 % des arrêts opérationnels. Ces ajustements, souvent nécessaires après l'arrêt de production, sont une source significative de pertes de disponibilité qu'il est important de maîtriser pour améliorer la performance globale de la ligne. Ainsi, le projet d'amélioration retenu porte sur la réduction des temps de changement de série de la ligne de production 20-18, identifiée comme un levier majeur pour limiter les arrêts planifiés et améliorer la disponibilité globale de la ligne. Pour atteindre cet objectif, la méthode SMED a été choisie comme approche d'optimisation, et sera appliquée de manière structurée à travers la démarche DMAIC, afin de garantir une mise en œuvre méthodique et durable des actions d'amélioration.

II.3.3 Fonctionnement de la ligne de production 20-18

La ligne de production 20-18, conçue par KRONES en 2013 et mise en service en 2015, est dédiée à l'embouteillage de bouteilles PET de 1L, 1.5L et 2L pour les marques Coca-Cola, Fanta, Sprite et Minute Maid. Sa cadence varie selon le format, atteignant jusqu'à 40 000 bouteilles/heure pour le 1L. Elle doit son nom à son système de soufflage composé de 20 moules et 18 fours. La performance de la ligne est évaluée via l'indicateur USLE (Utilisation Standard de la Ligne Équivalente), fixé à 65 %. Les rendements attendus sont de 99,65 % pour les préformes et de 99,85 % pour le sirop.

Le processus de production commence par le soufflage des préformes en PET (31g, 36g ou 41g selon le format), qui sont d'abord chauffées dans un four de 3000 W, puis transférées dans des moules. Une tige les étire avant qu'elles ne soient soufflées en trois phases successives (7, 15, puis 35 bars) pour former la bouteille. Les bouteilles ainsi obtenues sont ensuite acheminées vers la suite du processus via un convoyeur à air.

Les bouteilles soufflées sont dirigées vers la station d'étiquetage, équipée de deux postes opérant simultanément pour maintenir une cadence élevée. Les étiquettes sont découpées, encollées puis apposées sur les bouteilles en rotation, avant d'être lissées et orientées vers la station de soutirage via le convoyeur à air.

Après l'étiquetage, les bouteilles passent à la soutireuse puis à la rinceuse, où elles sont nettoyées à l'eau chlorée. Elles sont ensuite remplies avec précision, bouchées, puis codées au laser avec les informations de fabrication. Un capteur 3D assure à la fois un positionnement précis pour le marquage et le contrôle du niveau de remplissage, garantissant la conformité des produits avant leur emballage final.

Les bouteilles sont regroupées par la fardeleuse en lots de 6 ou 8 selon le type de pack, puis enveloppées d'un film thermo-rétractable. Ce film est resserré autour des bouteilles dans un four de rétraction, formant des fardeaux compacts prêts à être palettisés et expédiés.

Les fardeaux sont transportés vers le palettiseur, où un robot les organise sur des palettes selon le type de pack et le format de bouteille, avec un intercalaire entre chaque couche pour assurer la stabilité. Une fois la palette constituée, elle est enrubannée par la banderoleuse puis étiquetée avec toutes les informations nécessaires. Enfin, des chariots élévateurs automatisés (AGV) les acheminent vers la zone de stockage, prêtes à être distribuées ou expédiées.

Le processus de production peut être interrompu à des dates et heures précises pour effectuer un changement de série. Cet événement planifié permet le passage d'une production à une autre (par exemple, du format 1,5L Coca-Cola au format 2L Fanta). Le changement de série nécessite l'arrêt temporaire de la ligne afin d'effectuer des opérations spécifiques telles que le

remplacement des moules de soufflage, le réglage des équipements (étiqueteuse, remplisseuse, fardeleuse, etc.) et l'ajustement des paramètres de production aux caractéristiques du nouveau produit. Une fois ces opérations réalisées, la ligne redémarre la production en suivant exactement le même enchaînement d'étapes que précédemment, comme une boucle de production réinitialisée pour un nouveau produit (Figure 12).

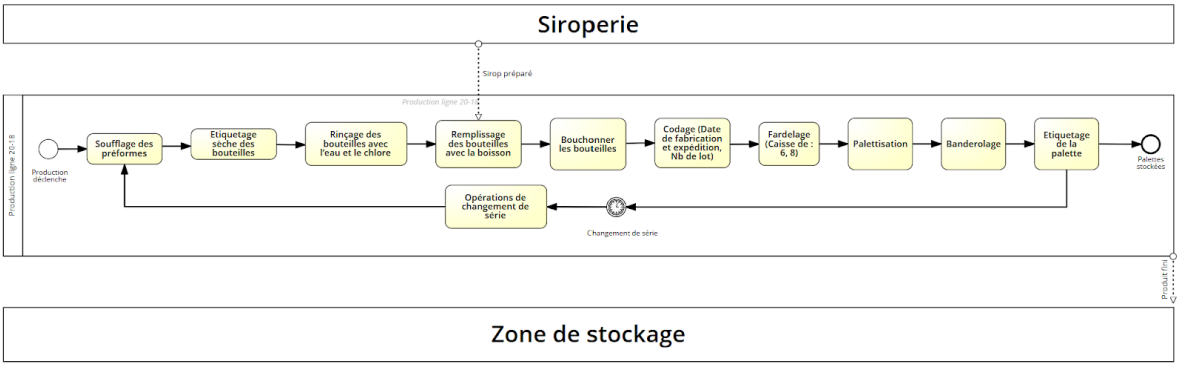


Figure 12 : Diagramme BPMN de la ligne de production 20–18

II.3.4 Définition des limites

La ligne de production 20-18 dispose d'une matrice des temps de changement de série (Annexe B), établie par le service supply chain. Cette matrice repose sur une étude du processus de changement de série de la machine soutireuse, lequel se décompose en trois phases principales :

- **Phase de fin de production :** estimée à 30 minutes.
  - **Phase de sanitation :** divisée en deux cas :
  - **Une étape de sanitation 1ET :** consiste en un rinçage à l'eau traitée pendant 15 minutes. La durée totale du processus est estimée à 30 minutes.
- **Trois étapes de sanitation 3ET :** comprend un premier rinçage à l'eau traitée pendant 10 minutes, suivi d'une circulation de soude caustique additionnée du Nodsan (EAS) à 65 °C pendant 15 minutes. La concentration est de 1,5 à 2 % pour la soude et 0,5 % pour l'EAS. Un rinçage final à l'eau traitée est ensuite effectué pendant 10 minutes. La durée totale du processus est estimée à 90 minutes.

Les conditions de sanitation sont définies par le laboratoire de qualité. Les cas de 1ET ou 3ET dépendent du parfum précédent et du parfum suivant ; en fonction de cela, une matrice de sanitation a été élaborée par le laboratoire de qualité (Annexe B).

- **Préparation de la nouvelle boisson** calculée à 55 min.

Ainsi, deux durées de changement de série sont identifiées :

- 115 minutes dans le cas d'un processus de sanitation 1ET.
- 175 minutes dans le cas d'un processus de sanitation 3ET.

Dans le cas d'un changement de volume, un temps de changement de 175 minutes est requis, quelle que soit la combinaison de parfums (1ET ou 3ET).

Pour cela l'étude va être basée sur les temps de changement de série de la soutireuse avec ses trois phases : fin production, sanitation et préparation.

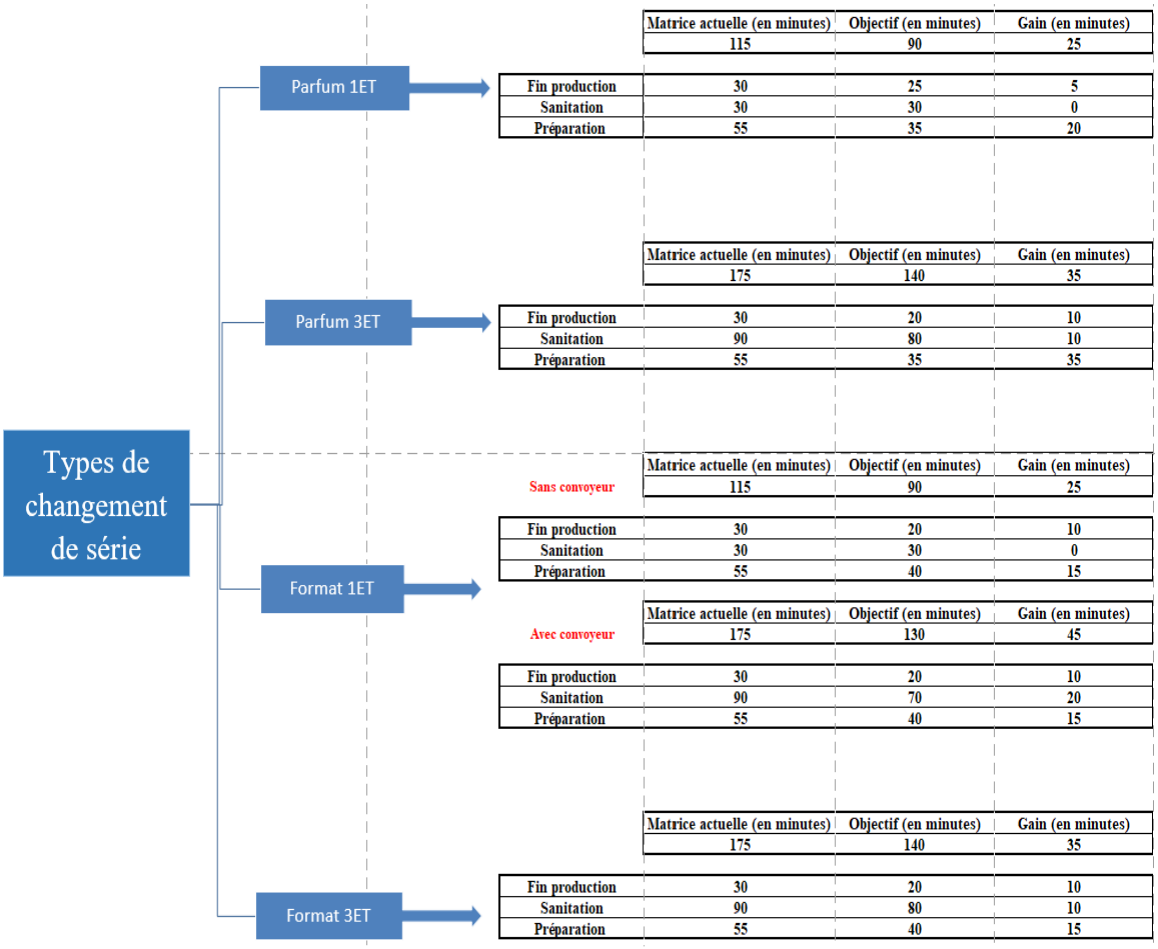
À partir de l'analyse croisée de la matrice des changements de série et de la matrice de sanitation, cinq types de changements ont pu être identifiés :

- Changement de parfum 1ET
- Changement de parfum 3ET
- Changement de format 1ET sans changement de volume (sans convoyeur)
- Changement de format 1ET avec changement de volume (avec convoyeur)
- Changement de format 3ET sans ou avec changement de volume

Un changement de format désigne un changement de la gamme de produits ou du volume des bouteilles produites. En revanche, un changement de parfum correspond à un changement d'arôme, sans modification de la gamme ni du volume. Chacun de ces types de changement correspond à des configurations spécifiques du processus, influençant directement les durées nécessaires à la reconfiguration des équipements.

Dans le cas du changement de format 3ET, les temps de changement de série sont équivalents, qu'il y ait ou non un changement de volume. Par conséquent, un seul type de changement a été retenu pour l'analyse.
Pour chaque type de changement identifié, un temps de changement de série a été relevé, puis comparé à un objectif de temps cible. Ces informations sont synthétisées dans la Figure 13 ci-dessous, qui met en évidence les écarts éventuels entre les temps actuels et les objectifs visés, afin d'identifier les pistes d'amélioration en termes de performance et de réduction des temps d'arrêt.
Afin de garantir le démarrage de la production dans les délais souhaités, il est essentiel d'analyser en profondeur le processus de changement de série des machines souffleuse et étiqueteuse, puis de proposer des pistes d'amélioration en vue de réduire leur temps de changement de série. En effet, la souffleuse fournit des bouteilles PET soufflées, tandis que l'étiqueteuse produit des bouteilles PET étiquetées ; ces deux outputs constituent l'input de la soutireuse. Autrement dit, les opérations de changement de série de la souffleuse et de l'étiqueteuse doivent impérativement être finalisées avant de procéder à celles de la soutireuse.

Cette séquence justifie notre choix des machines concernées par l'application de la méthode SMED, à savoir : la souffleuse, l'étiqueteuse et la soutireuse.



	Matrice actuelle (en minutes)	Objectif (en minutes)	Gain (en minutes)
	115	90	25
Fin production	30	25	5
Sanitation	30	30	0
Préparation	55	35	20

	Matrice actuelle (en minutes)	Objectif (en minutes)	Gain (en minutes)
	175	140	35
Fin production	30	20	10
Sanitation	90	80	10
Préparation	55	35	35

Sans convoyeur	Matrice actuelle (en minutes)	Objectif (en minutes)	Gain (en minutes)
	115	90	25
Fin production	30	20	10
Sanitation	30	30	0
Préparation	55	40	15

Avec convoyeur	Matrice actuelle (en minutes)	Objectif (en minutes)	Gain (en minutes)
	175	130	45
Fin production	30	20	10
Sanitation	90	70	20
Préparation	55	40	15

	Matrice actuelle (en minutes)	Objectif (en minutes)	Gain (en minutes)
	175	140	35
Fin production	30	20	10
Sanitation	90	80	10
Préparation	55	40	15

Figure 13 : Diagramme des types de changement et définition des objectifs

II.3.5 La charte projet

Dans le but de structurer efficacement la démarche d'amélioration et d'en garantir la cohérence tout au long du projet, l'élaboration d'une charte projet s'impose comme une étape essentielle. Celle-ci permet de clarifier les objectifs à atteindre, d'identifier les acteurs clés impliqués et de définir le planning (voir Figure 14). Cette formalisation constitue un cadre de référence partagé entre tous les intervenants, facilitant le pilotage, le suivi et la communication autour du projet de réduction des temps de changement de série sur la ligne 20-18.

Charte projet

Date: 02/02/2024

1.1. Titre du projet	1.2. Départment & Machine impliquée	1.3. Description du problème Quel problème/Pourquoi est-ce un porblème	1.4. Date début/fin
SMED ligne PET 20/18	Ligne PET 20/18	Taux des arrets planifiés élevé	Début : 02/02/2025 Fin : 02/04/2025

2.1. Personnes impliquées (nom & rôle)	2.2. Client interne (sponsor du projet)
SAIB Malak (Pilote) BOUDJENOUN Chaima (Pilote)	Nacim Amrar (Directeur Industriel)

3. Objectifs Didactiel/Apprentissage (methodes/outils à utiliser)
Parcours du réduction de temps de changement de séries Diagramme de Pareto, Diagramme d'Ishikawa Evocon
4. Livrables attendus du projet (en 6 mois)
Réduction de temps de changement de séries Mettre en place des standars et OPL

5.Objectifs quantitatifs (long therme - 4 mois) du projet (à atteindre avec la mise de œuvre de toutes les contre-mesures)	6. Gains potentiels (KEuro/an)
Amélioration USLE & Standards	

7. Validation du Directeur Industriel (bénéfices attendus, implication, et allocation des ressources)
- Directeur Industriel : AMRAR Nacim
8. Validation du Coordinateur ExiM (bénéfices attendus, implication, et allocation des ressources)
- Kamel BELAID
9. Validation du Chef de Zone (bénéfices attendus, implication, et allocation des ressources)
- GRABA Samir
10. Validation du pilote (bénéfices attendus, implication, et allocation des ressources)
- Pilote du projet : SAIB Malak / BOUDJENOUN Chaima

Figure 14 : Charte projet

II.4 Mesurer (Measure)

Après avoir posé les bases du projet et clarifié les objectifs d'amélioration, cette phase aura pour but de réaliser un diagnostic objectif des temps de changement de série. Elle s'appuiera sur l'analyse des données historiques des arrêts et sur des observations terrain. L'objectif sera d'évaluer la variabilité des temps de changement entre les différents formats et équipes, en croisant les données du système Evocon avec les rapports de production. Cette étape permettra également de mesurer les temps de changement de série à travers des chronométrages sur le terrain, et de décomposer le processus actuel en identifiant précisément les tâches internes et externes, afin de mettre en œuvre la méthode SMED.

II.4.1. Diagnostic des temps des arrêts de changement de série historique

Collecte de données sur le terra : la collecte des temps d'arrêt liés au changement de série s'appuie sur deux sources principales : les rapports de production journaliers remplis par les chefs de ligne et l'IMES Evocon, récemment installé et opérationnel depuis début février. Une comparaison des temps de changement de série, recueillis à la fois via le système Evocon et à partir des rapports de production, a été réalisée durant les mois de février et mars, la Figure 15.

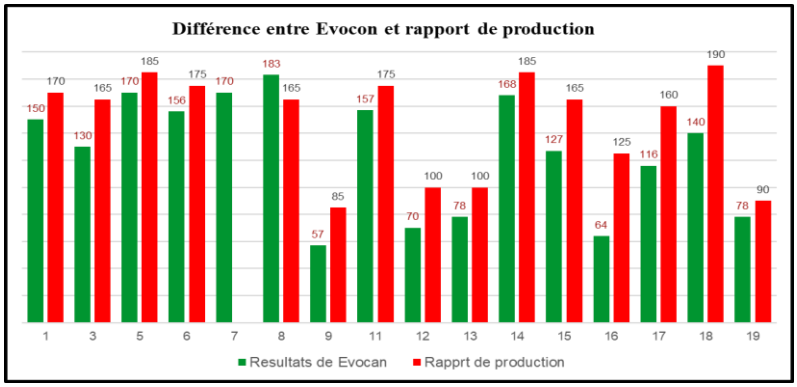


Figure 15 : Différence entre Evocon et rapport de production

Le deuxième et le quatrième changement n'ont pas été déclarés, car ils sont associés à un COP dont la durée dépasse 400 minutes. Le septième changement n'a pas été pris en compte en raison de l'absence de rapport de production. Cependant, une divergence notable a été observée entre les temps d'arrêt enregistrés par Evocon et ceux consignés dans les rapports de production, remettant en question la fiabilité de ces derniers. En conséquence, la collecte des données a été exclusivement basée sur l'IMES Evocon, sur une période de 40 jours allant du 16 février au 27 Mars. Cette période a vu 16 changements de série incluant les cinq types existants, les résultats de collecte des temps de chaque type est distingué dans les figures ci-dessous : Figure 16, Figure 17, Figure 18, Figure 19 et Figure 20.

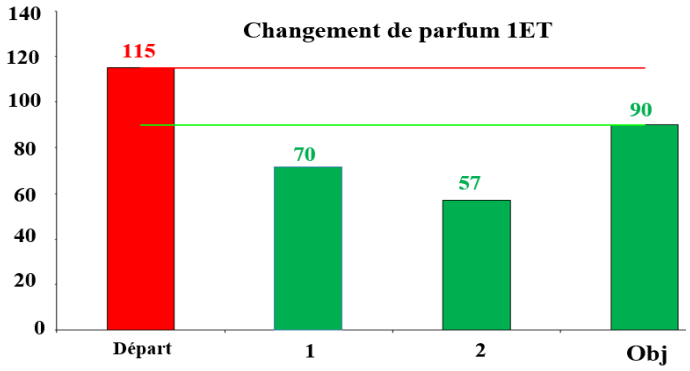


Figure 16 : Changement de parfum 1ET

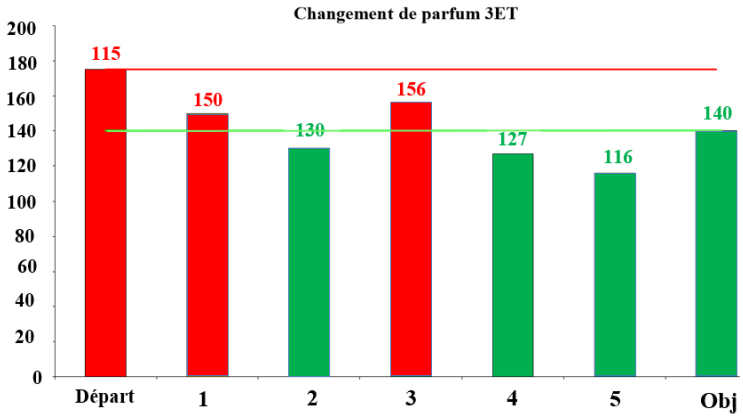


Figure 17 : Changement de parfum 3ET

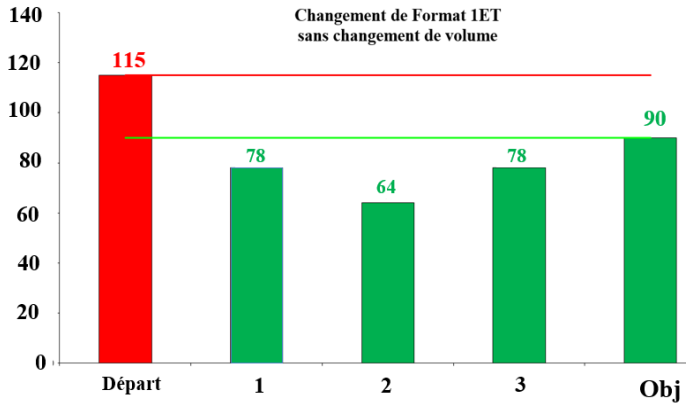


Figure 18 : Changement de format 1ET sans volume

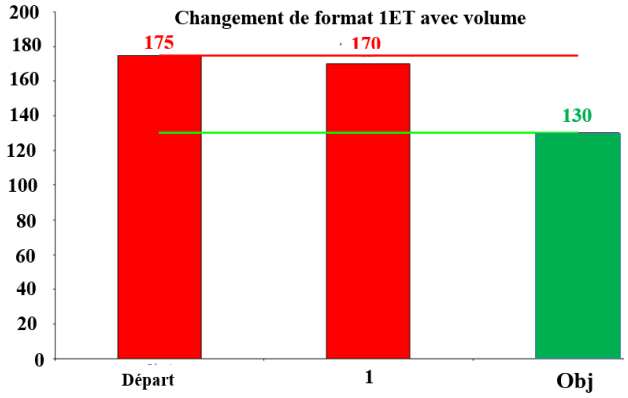


Figure 19 : Changement de format 1ET avec volume

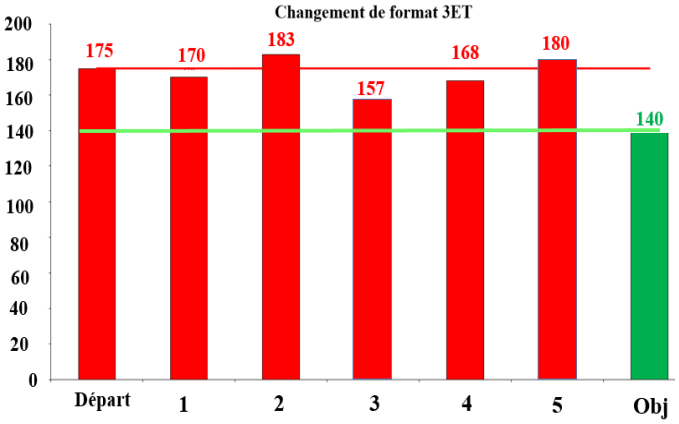


Figure 20 : Changement de format 3ET

Ces résultats indiquent que les temps réels de changement de série n'étaient pas stables. Dans certains cas, ils étaient inférieurs aux temps standards indiqués dans la matrice. Dans d'autres cas, ces temps étaient supérieurs aux valeurs standards. Ces écarts sont principalement dus aux ajustements, aux différences de niveau de compétence entre les opérateurs ainsi qu'à divers problèmes techniques et opérationnels. L'analyse des données collectées confirme la faisabilité du projet et la pertinence des objectifs fixés.

II.4.2. Collecte de données sur le terrain (Gemba) :

Après avoir collecté des données historiques sur les changements de série, cette phase consiste à collecter les données du terrain afin d'analyser en profondeur le processus de changement de série actuel.

Stade préliminaire du SMED : Réglage internes et externes non distingués

L'analyse s'est articulée autour de trois volets complémentaires : l'étude documentaire, les interventions sur le terrain et la mise à jour des données. Ces étapes ont permis de croiser les

informations théoriques et pratiques, d'identifier les écarts éventuels, et de constituer une base fiable pour l'optimisation du processus.

- **Étude documentaire :** À partir de la documentation technique fournie par le constructeur « KRONES », les différentes étapes de changement de série propres à chaque machine ont été identifiées et analysées. Cette analyse a permis de comprendre les opérations nécessaires et leur enchaînement.
- **Intervention sur le terrain :** Cette phase a consisté à interroger les opérateurs de production et à leur fournir des checklists à compléter. Ces checklists incluaient le nom de l'opérateur, le type de changement réalisé, les différentes étapes suivies dans l'ordre d'exécution, l'outillage utilisé, ainsi qu'un espace dédié aux remarques ou commentaires (Annexe B). L'objectif était d'identifier les éventuelles différences dans l'exécution du processus de changement de série entre les quatre shifts. Cette démarche a permis de mettre en évidence un manquement de standardisation dans l'application du processus de changement. Parallèlement, des observations directes ont été menées sur le terrain afin de compléter et valider les informations recueillies, en tenant compte des pratiques réelles et des éventuelles divergences par rapport à la documentation théorique.
- **Mise à jour des données :** Les informations collectées ont été actualisées à la suite de l'analyse approfondie et des interventions menées directement sur la ligne de production ainsi qu'au laboratoire qualité. Cette mise à jour a permis d'affiner la compréhension des pratiques réelles, de corriger certaines incohérences relevées initialement, et d'enrichir les données avec des éléments observés sur le terrain, garantissant ainsi une base fiable pour la suite de l'étude.

À l'issue de cette analyse, il apparaît que chaque machine est impactée différemment selon les types de changement de série identifiés. La souffleuse est concernée par deux types principaux : le changement de format, avec ou sans changement de volume. L'étiqueteuse, quant à elle, est soumise à trois types de changement : changement de parfum et changement de format avec ou sans changement de volume, chacun pouvant s'accompagner ou non d'une variation de volume. Enfin, la soutireuse est la machine la plus concernée, puisqu'elle est impliquée dans l'ensemble des scénarios suivants :

- Changement en 1ET, avec ou sans changement de volume
- Changement en 3ET, avec ou sans changement de volume

II.4.3. Mesure des temps de changement de série

La simulation des changements de série sur le terrain est une condition essentielle pour l'application de la méthode SMED, qui consiste principalement à décomposer le processus en petites étapes, puis à mesurer le temps nécessaire à l'exécution de chacune d'elles. Pour mieux identifier les causes des pertes de temps lors des changements de série, une phase de mesure a été réalisée sur le terrain. Cette étape a utilisé deux méthodes complémentaires : le chronométrage et l'enregistrement vidéo. Ces outils, permettent d'obtenir des données objectives et exploitables pour notre analyse. Les mesures ont été effectuées sur trois machines clés du processus de production : la souffleuse, la soutireuse et l'étiqueteuse. Pour chacune d'elles, différents types de changements de série ont été observés afin de couvrir une variété de cas réels. Cette approche a permis de mesurer avec précision le temps associé à chaque étape du changement, tout en révélant les différences entre les opérateurs, les tâches non standardisées, et les gaspillages possibles. Les résultats obtenus ont ensuite servi de point de départ pour l'application de la méthode SMED.

- **Mesure des temps de changement de série de la soutireuse :**

Pour la soutireuse trois simulations ont été effectué illustrant différents types de changements de série sur la soutireuse : un changement en 1ET avec changement de volume passant du Coca 2L au Sprite 1L (voir Tableau 09), un changement en 3ET sans changement de volume porte sur un passage du Coca 1L au Fanta pomme 1L (Annexes A), et un changement en 3ET avec changement de volume concerne le passage du Sprite 1L au Coca 1,5L (Annexes A). Ces simulations ont été sélectionnées afin de mettre en évidence les principales différences entre les scénarios de changement, tout en couvrant les deux protocoles de sanitation (1ET et 3ET) ainsi que les cas avec ou sans changement de volume.

Tableau 9 : Résultats du chronométrage du changement de format 1ET avec changement de volume

Tâche	Durée
Fin production mixeur (par valeur de Brix)	5 min
Fin production soutireuse (par nombre de récipient produit)	7 min
Drainage	2 min
Vidage bouchons distributeur	1 min
Vidage des bouchons	52 min 52s
Rinçage ET (Mixeur et Soutireuse)	15 min
Evacuation d'eau de rinçage	5 min
Préparation des structures du prochain format (temps masqué)	5 min
Changement de format	13 min
Préparation de la boisson (Mixeur)	12 min
Préparation de la boisson (Soutireuse)	17 min
Test laboratoire de qualité (Brix, CO2)	13min
Réglage codeur	36 min

Les résultats de la simulation révèlent un dépassement de 8 minutes par rapport au temps cible défini dans la matrice de changement de série, qui prévoit une durée de 175 minutes pour ce type de changement. En réalité, le changement a nécessité 183 minutes. Ce retard est principalement dû à une durée excessive du vidage des bouchons, qui a pris plus de 52 minutes, au réglage du codeur qui a duré 36 minutes, ainsi qu'au test qualité de la boisson, réalisé en 13 minutes.

- **Mesure des temps de changement de série de la souffleuse :**

Une simulation a été effectuée sur la machine souffleuse pour un changement de format sans changement de volume. Ce changement concernait le passage de Coca-Cola 1L à Fanta 1L.Cette simulation, mesurée par enregistrement vidéo, a donné les résultats présentés dans le Tableau 10 ci-dessous.

Cette simulation a permis d'identifier le temps nécessaire pour le montage et le démontage du moule, estimé à 1 minute au total, n'oublie pas qu'il existe 20 moules, ainsi que la durée requise pour le test de conformité des bouteilles, qui s'élève à 10 minutes.

Tableau 10 : Résultats du chronométrage du changement de format sans changement de volume

Tâche	Durée
Préparation du prochain format	5 min
Activation du mode manuel et fermeture des portes	2 min
Démontage les anciens moules (20 moules)	10 min
Montage les nouveaux moules (20 moules)	10 min
Démontage et montage des fonds de moules (20 fonds de moules)	15 min
Test manuel et vérification du positionnement des moules et fonds de moules	2 min
Choix de type de recette et ajustements	7 min
Test laboratoire de qualité (Soufflage)	10 min

- **Mesure des temps de changement de série de l'étiqueteuse :**

Pour l'étiqueteuse deux simulations ont été effectuées illustrant des scénarios distincts de changement de série sur l'étiqueteuse : l'un correspondant à un changement de format sans changement de volume concerne le passage de Fanta Orange 1L à Sprite 1L (voir Tableau 11). L'autre intégrant un changement de format avec variation de volume passant du Sprite 1L au Coca-Cola 1,5L (Annexes A). Ces simulations ont été choisies pour mettre en lumière les principales différences entre ces configurations, en couvrant les deux cas de figure, avec et sans changement de volume.

Tableau 11 : Résultats du chronométrage du changement de format sans changement de volume

Tâche	Durée
Arrêt machine passage au mode manuel	2 min
Désactivation des deux postes et vérification des alarmes	3 min
Démonter la brosse et le cylindre du transfert du poste 1	6 min
Démonter la brosse et le cylindre du transfert du poste 2	7 min
Monter la brosse et le cylindre du transfert du poste 2	7 min
Monter la brosse et le cylindre du transfert du poste 1	6 min
Réglage mécanique des postes	14 min
Changement des bobines des deux postes et raccordement	6 min
Activation du mode automatique et établissement de la position de coupe	5 min
Contrôle visuel et ajustement de la position de l'étiquette	7 min

Ce changement, initialement estimé à 115 minutes, a été réalisé en seulement 63 minutes, soit un gain de 52 minutes. Cette performance s'explique principalement par l'expérience de l'opérateur, qui a su optimiser les réglages mécaniques avec efficacité.

Stade 1 du SMED : Séparation réglages internes et externes

Après le chronométrage des différentes opérations de changement de série sur les trois machines sélectionnées (soutireuse, souffleuse et étiqueteuse), une analyse approfondie a été menée afin de distinguer les opérations internes, des opérations externes et des opérations en temps masqué (réalisées en parallèle avec d'autres opérations internes). Chaque simulation a été suivie d'une classification des tâches. Cette étape est essentielle dans l'application de la méthode SMED, car elle permet d'identifier les possibilités de réduction du temps d'arrêt en transformant certaines opérations internes en externes ou en temps masqué.

- **Classification des tâches de changement de série de la soutireuse :**

Afin de couvrir l'ensemble des types de changements applicables à la soutireuse, deux simulations ont été sélectionnées : Un changement en 1ET avec variation de volume, illustré par le passage du Coca 2L au Sprite 1L. Qui a été réalisé en interne, sauf la préparation des structures du nouveau format, effectuée en parallèle avec l'étape de sanitation.

Pour le changement en 3ET sans variation de volume, concernant le passage du Fanta Fraise 1L au Sprite 1L, la préparation de la soude ainsi que le test de conformité ont été effectués en externe.

- **Classification des étapes de changement de série de la souffleuse :**

La machine souffleuse a fait l'objet d'une classification de changement de format, réalisée sans changement de volume, concernant le passant du Coca-Cola 1L au Fanta 1L. Toutes les tâches ont été effectuées en interne, à l'exception de la préparation et du nettoyage des moules et fonds de moules du nouveau format.

- **Classification des étapes de changement de série de l'étiqueteuse :**

Pour la machine étiqueteuse deux scénarios de changement de format ont été analysés : l'un sans changement de volume, illustré par le passage du Fanta Orange 1L au Sprite 1L, et l'autre avec changement de volume, représenté par le passage du Sprite 1L au Coca-Cola 1,5L. Les observations effectuées sur le terrain ont révélé que l'ensemble des tâches liées au changement de série sur cette machine sont réalisées en interne.

II.5 Analyser (Analyze)

Après avoir défini clairement les contours du projet et collecté les données opérationnelles actuelles de la ligne de production, cette phase d'analyse reposera principalement sur l'interprétation des résultats issus des checklists terrain, ainsi que sur l'analyse des temps de changement mesurés pour chaque machine. L'objectif sera d'identifier les principales sources de perte de temps, les écarts entre équipes, et les opportunités d'optimisation dans l'organisation des opérations de changement de série.

II.5.1 Analyse des résultats des checklists

La phase d'analyse des checklists a mis en évidence les écarts et les causes principales des pertes de temps lors du changement de série, principalement le manque de standards, la différence d'expérience entre les opérateurs ainsi que la variation dans la façon d'exécuter les tâches, ce qui crée des écarts de temps significatifs d'une équipe à une autre.

Par exemple, sur la machine souffleuse, certains opérateurs préfèrent transporter les moules à l'aide d'un chariot afin d'éliminer les mouvements inutiles, tandis que d'autres déplacent de grands box contenant les moules, ce qui gêne la circulation et entraîne des retards notables.

En ce qui concerne la machine soutireuse, certains opérateurs préfèrent faire un rinçage à l'eau froide pendant 10 minutes avant la préparation de la boisson. Cela garantit que la boisson respecte les niveaux de Brix et de CO2. D'autres, en revanche, négligent cette étape, ce qui peut entraîner une préparation non conforme et nécessiter une reprise complète, entraînant ainsi une perte de temps.

Enfin, pour la machine étiqueteuse, la méthode de changement varie entre le démontage complet du matériel afin de dégager de l'espace, suivi du montage de toutes les pièces, tandis que d'autres procèdent pièce par pièce pour éviter le désordre, ce qui entraîne également des écarts de performance.

Une autre source de perte de temps réside dans le désordre des emplacements des portes-structures de format pour certaines machines, et l'absence de ces emplacements pour d'autres. Cela contribue à un environnement de travail encombré. De plus, le manque d'identification claire des structures de format, comme l'absence d'étiquettes (par exemple : étoile Coca-Cola 1L, étoile Fanta 1.5L, etc.), complique la recherche des outils et entraîne des pertes de temps.

II.5.2 Analyse des résultats des mesures des temps de changement de série

Dans le cadre de l'analyse des sources des pertes de temps de changement de série, un diagramme d'Ishikawa pondéré a été élaboré (voir Figure 21). Cette approche a permis non seulement de classer les causes potentielles selon les catégories classiques (Main-d'œuvre, Méthode, Machine, Milieu, Matériel), mais aussi de leur attribuer une pondération en fonction de leur impact (faible, moyen ou élevé). Les résultats montrent que la catégorie Méthode est la principale source de pertes, avec un score de 18 points, suivie par Machine (14 points) et Main-d'œuvre (12 points). Parmi les causes les plus critiques dans la catégorie Méthode, l'absence de mode opératoire standardisé, les pannes fréquentes du codeur dans la catégorie Machine, ainsi que le manque d'expérience ou de coordination entre les opérateurs dans la catégorie Main-d'œuvre. Cette analyse souligne l'importance de prioriser les actions correctives sur les méthodes de travail et la fiabilité des équipements pour réduire de manière significative les temps de changement de série.

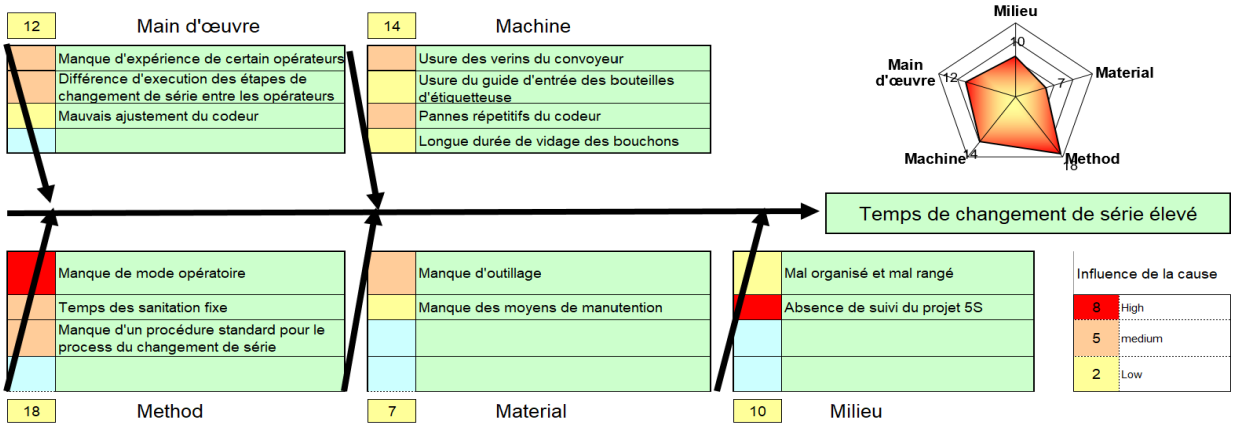


Figure 21 : Diagramme d'Ishikawa pondéré

II.6 Innover (Improve)

À l'issue de l'analyse détaillée du processus de changement de série, cette phase s'appuiera sur la conversion d'un maximum de tâches internes en tâches externes ou en temps masqué, ce qui permettra de réduire significativement le temps d'arrêt nécessaire lors des changements de série. Elle inclura également la mise en œuvre de pistes d'optimisation opérationnelles ainsi que la standardisation du nouveau processus.

II.6.1 Identification des pistes d'amélioration

L'identification des pistes d'amélioration repose sur la conversion maximale des tâches internes en tâches externes, accompagnée d'une analyse critique des opérations internes restantes. Cette démarche vise à proposer des solutions d'optimisation concrètes pour réduire les temps de changement de série. Par ailleurs, des améliorations organisationnelles sont également envisagées afin de renforcer l'efficacité du processus global.

Stade 2 du SMED: Conversion de réglages internes en externes

Cette étape clé de la méthode SMED vise à transformer un maximum de tâches internes celles qui nécessitent l'arrêt de la machine en tâches externes c'est à dire réalisables pendant que l'équipement fonctionne ou en temps masqué, en parallèle avec d'autres actions.

Elle s'appuie aussi sur la simplification des tâches complexes en opérations plus courtes et mieux organisées, avec un objectif d'atteindre un temps de changement inférieur à dix minutes, ce qui est le principe fondamental de la méthode SMED.

- **Transformation des tâches internes en tâches externes de la soutireuse**

Cette étape concerne les simulations présentées dans la section précédente de changement de série de la soutireuse (voir Tableau 12).

Tableau 12 : Transformation des tâches du changement de série de la soutireuse

Tâches externes	Tâches internes	Tâches en temps masqués
Préparation des structures du prochain format	Fin production sur le mixeur et la soutireuse	Vidage des ancien bouchons
Préparation des moyens de manutention	Drainage	Vidage des bouchons du distributeur de la visseuse
Préparation des box vides pour le vidage des bouchons	Sanitation et évacuation	Réglage du codeur
Préparation des nouveaux bouchons	Changement de format	Test laboratoire de qualité (CO2)
Préparation de la soude	Préparation de la boisson (Mixeur)	
Test de conformité de la soude	Préparation de la boisson (Soutireuse)	
	Test laboratoire de qualité (Brix)	

- **Transformation des tâches internes en tâches externes de la souffleuse :**

Pour la machine souffleuse, la transformation des tâches internes en tâches externes et en tâches en temps masqué a été appliquée au deux types de changement concerné par la souffleuse (voir Tableau 13).

Tableau 13 : Transformation des tâches du changement de série de la souffleuse

Tâches externes	Tâches internes	Tâches en temps masqué
Nettoyage des nouveaux moules	Activation du mode manuel et fermeture des portes	Vidage des préformes de la rail de chargement
Préparation des nouveaux moules	Vidage des préformes de la trémie	
Préparation des moyens de manutention	Démontage les anciens moules	
Préparation des clés	Montage les nouveaux moules	
Nettoyage des anciens moules	Démontage et montage des fonds de moules	
Préparation des box de vidage des préformes	Test manuel et vérification du positionnement des moules et fonds de moules	
	Choix de type de recette et ajustements	
	Test laboratoire de qualité	

- **Transformation des tâches internes en tâches externes de l'étiqueteuse :**

En dernier lieu, la machine étiqueteuse, la transformation des tâches internes en tâches externes et en tâches en temps masqué est similaire dans l'ensemble de type de changement de série. La transformation a porté sur plusieurs tâches préparatoires, notamment la préparation des nouvelles structures de format, des bobines de la nouvelle étiquette. Toutes ces tâches ont été reclassées en tâches externes, réalisées en amont du changement de format.

Stade 3 du SMED : Rationalisation de tous les aspects de l'opération de réglage

À la suite de la mesure des temps, de la classification et de la transformation des tâches internes en tâches externes ou en temps masqué, cette phase vise à identifier les leviers concrets permettant de réduire davantage le temps de changement de série. Les pistes d'amélioration

s'appuient sur divers éléments : les résultats du chronométrage, les tâches transformées, les retours d'expérience des opérateurs, et un brainstorming avec les responsables de production. Cette méthode a permis d'identifier les points critiques du processus et à orienter les actions d'optimisation de façon efficace et réaliste.

- **Analyse critique des tâches restantes internes sur la machine soutireuse :**

La matrice des temps de changement de série est fortement influencée par le temps de changement de la soutireuse, ce qui rend les améliorations sur cette machine importantes. Le processus de changement sur la soutireuse inclut des étapes de sanitation indispensables, avec des durées fixes, en raison de leur impact direct sur la sécurité alimentaire. Ces étapes ne peuvent donc pas être ni supprimées ni réduites. Cependant, certaines tâches liées à la sanitation ont été transformées en activités externes pour améliorer le processus. La préparation et le chauffage de la soude, ainsi que le contrôle de sa concentration et de sa température, se font avant le changement de série. Cette anticipation permet d'utiliser la solution immédiatement lors de la sanitation, ce qui aide à réduire le temps de changement dans son ensemble.

- **Leviers d'amélioration du processus de changement de série de la soutireuse :**

Dans le cadre d'une optimisation globale du changement de série, la soutireuse est un élément critique qui nécessite une attention particulière. Plusieurs actions ont été identifiées pour améliorer l'efficacité de cette phase, en se concentrant sur la conversion des tâches internes en externe et en temps masqué. Ainsi, il est crucial que le temps de changement de la souffleuse et de l'étiqueteuse soit inférieur à celui de la soutireuse. Cela permet à la ligne de redémarrer dès que la soutireuse est prête, sans attendre d'autres machines.

- **Réalisation des ajustements de la souffleuse et de l'étiqueteuse en parallèle avec la préparation de la boisson :** Étant donné que la souffleuse et l'étiqueteuse terminent leurs opérations de changement de série avant la soutireuse, la souffleuse peut, en temps masqué, effectuer les tests de qualité, ajuster la recette et valider la conformité des bouteilles. L'étiqueteuse peut ensuite, également en temps masqué, ajuster le positionnement des étiquettes sur les bouteilles reçues directement de la souffleuse.
- **Réalisation des interventions sur le convoyeur en temps masqué :** Les interventions sur le convoyeur doivent être effectuées pendant que d'autres opérations sont en cours (sanitation, préparation de la boisson) Cela permet de ne pas prolonger le temps de changement de série.

Des améliorations ont été proposées concernant la soutireuse en mettant en œuvre la méthode 5S, qui vise à rendre l'environnement de travail plus organisé. Cela comprend l'ajout de portes-formats avec un étiquetage clair (comme : étoiles 1L, 1,5L, 2L), le marquage au sol pour indiquer les emplacements des portes-formats et du chariot, ainsi que la standardisation du processus de changement de série.

- **Analyse critique des tâches restantes internes sur la machine souffleuse :**

En cas de changement de volume nécessitant une intervention sur le convoyeur, le vidage des préformes doit se faire en interne. Pour minimiser le temps consacré à cette opération, il est important de préparer à l'avance une box vide pour accueillir les préformes de la trémie. Il est également nécessaire de vider la box situé au niveau du rail de chargement. Cette organisation permet de réaliser le vidage de la trémie et du rail de chargement en parallèle, ce qui optimise le temps de changement de série et diminue les arrêts.

- **Leviers d'amélioration du processus de changement de série de la souffleuse :**

Pour optimiser le processus de changement de série de la souffleuse, plusieurs actions ont été identifiées afin de diminuer le temps d'arrêt et d'améliorer la fiabilité des opérations. Ces leviers se concentrent surtout sur le renforcement de la préparation externe, la réduction des déplacements inutiles, et l'exploitation efficace des temps masqués.

- **Optimisation des temps masqués avec les tests qualité :** Avant d'envoyer les premières bouteilles au laboratoire pour les tests de conformité, une partie de la production initiale est dirigée vers l'étiqueteuse. Cela permet à l'opérateur de commencer à ajuster l'étiquetage pendant que les tests qualité sont en cours, utilisant ainsi un temps qui serait autrement perdu.
- **Traçage et marquage du sol :** Des marquages au sol indiquent clairement où doivent se trouver les chariots pendant la préparation et le changement de série. L'objectif est d'optimiser l'espace, de limiter les mouvements inutiles, et de garantir un accès aisé à la machine, notamment pour ouvrir et fermer les portes.

➢ **Analyse critique des tâches restantes internes sur la machine étiqueteuse :**

Le changement de série sur la machine étiqueteuse implique principalement des ajustements mécaniques, comme le démontage et le remontage de pièces, l'ajustement des hauteurs et l'alignement des éléments de guidage. Ces opérations nécessitent un arrêt complet de la machine, ce qui les classe comme des tâches internes selon la méthode SMED. Pour minimiser le temps d'arrêt, il est donc essentiel d'instaurer une phase de préparation externe, qui représente un levier important pour optimiser le processus et réduire le temps d'arrêt.

➢ **Leviers d'amélioration du processus de changement de série de l'étiqueteuse :**

Afin d'optimiser le processus de changement de série de l'étiqueteuse, plusieurs axes d'amélioration ont été identifiés. L'approche adoptée vise à anticiper les tâches réalisables en amont, à organiser efficacement les éléments nécessaires et à exploiter les temps masqués pour certaines opérations. Ces leviers permettent de réduire significativement la durée d'arrêt de la machine et de sécuriser les différentes étapes du changement de format.

- **Exploitation des temps masqués pour les réglages de la position de l'étiquette :** Certains ajustements mécaniques ou paramétriques de l'étiqueteuse peuvent être réalisés en parallèle avec les tests qualité du soufflage et la préparation de la boisson. En exploitant ces temps masqués, on réduit efficacement le temps global de changement de série de la ligne.

Dans le cadre de l'application de la méthode 5S, plusieurs actions ont été mises en œuvre pour améliorer l'organisation autour de la machine étiqueteuse. Des étagères dédiées ont été recommandées pour le rangement des portes-structures de format, chaque étagère étant réservée à un type de pièce spécifique, clairement identifié par une étiquette (par exemple : "cylindres de transfert"). De plus, chaque composant est lui-même étiqueté selon le format correspondant (Coca-Cola 1L, 1.5L, 2L, Fanta 1L, etc.), ce qui facilite grandement leur identification et leur accès lors de la préparation.

➢ **Améliorations organisationnelles**

Le brainstorming a permis de proposer la mise en place des checklists des préparations à réaliser avant le changement de série (voir Figure 22). Celles-ci seront distribuées aux opérateurs et vérifiées par les chefs de ligne avant le démarrage du processus, afin de garantir l'exécution complète des tâches externes.

Afin de garantir un processus de changement de série plus fluide, une communication efficace entre les équipes est essentielle. Dans le cas d'un changement de série réparti sur deux shifts (fin du premier et début du suivant), l'utilisation de tableaux de communication permet d'indiquer clairement l'étape où le processus a été interrompu même au cas des remarques supplémentaires, facilitant ainsi la reprise sans perte d'informations. De plus, une coordination étroite entre le service planification, les chefs de ligne et les opérateurs est nécessaire pour anticiper le prochain changement de série et son heure prévue. Cela permet, par exemple, d'éviter de remplir inutilement le bac de bouchons pour la soutireuse et les préformes pour la

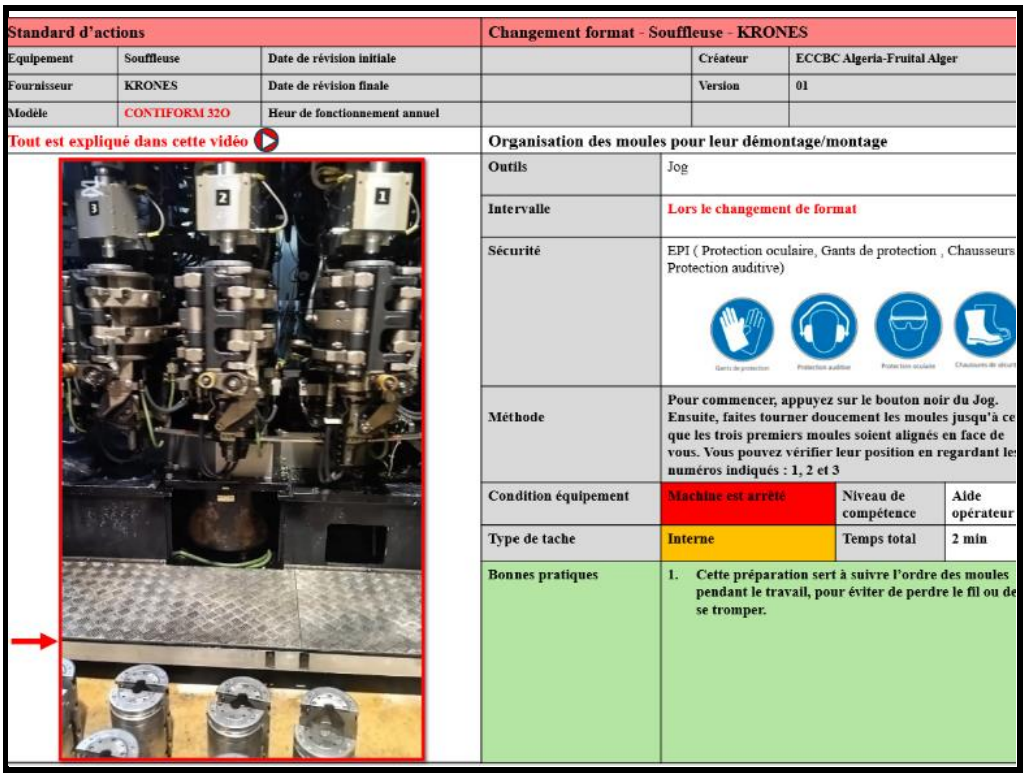
souffleuse, juste avant un changement, ce qui réduirait le temps requis pour leur vidage et limiterait les pertes de temps.
Parmi les suggestions issues du terrain, les opérateurs de la souffleuse ont recommandé l'utilisation d'un produit dégraissant pour faciliter le nettoyage des moules et fonds de moules, ainsi que la mise à disposition un chariot pour le transport des structures de format. Ces retours ont été bien accueillis par la direction, qui a validé un budget dédié à l'acquisition des équipements et consommables manquants, dans une logique d'amélioration continue.

N°	Action	Quand	Date	Opérateur	Etat
1	Préparer le prochain format et la mettre dans la placé dédié.	Avant changement de format			
2	Vérifier l'état des piéces de formats dans les portes formats et les nettoyer si nécéssaire	Avant changement de format			
3	Préparer des outillages nécéssaire (Chiffon - Clé 8 - Chariot)	Avant changement de format			
4	Préparer des nouveaux boxs préformes	Avant changement de format			
5	Nettoyer des moules et fond de moule	Aprés changement de format			
6	Remettre les moules sur les boxes des formats	Aprés changement de format			

Figure 22 : Exemple checklist des tâches externes de la souffleuse

II.6.2 Standardisation de processus de changement de série

La dernière étape de la méthode SMED consiste à standardiser le processus de changement de série. L'objectif est d'assurer sa reproductibilité, de minimiser la variabilité entre les opérateurs et de sécuriser les bonnes pratiques établies. Cette standardisation s'appuie sur la conversion des tâches internes en externe et en temps masqué, sur les améliorations repérées durant le projet, ainsi que sur les retours d'expérience des opérateurs, du chef de zone et des responsables de la performance.
Pour la première fois au sein du groupe ECCBC, un mode opératoire audiovisuel a été développé afin de formaliser le standard. Celui-ci concerne les trois machines critiques de la ligne : la souffleuse, l'étiqueteuse et la soutireuse. Chaque fiche standard présente la tâche à réaliser, son type (interne, externe, temps masqué), sa durée, les bonnes pratiques associées, ainsi que le détail des étapes de réalisation. Cette fiche est accompagnée d'une vidéo explicative réalisée par le meilleur opérateur de chaque machine, qui sert de référence visuelle et pédagogique pour tout le personnel (voir Figure 23). Grâce à cette initiative, le processus de changement de série devient non seulement standardisé, mais aussi clairement documenté, accessible et durable.
L'adoption d'un mode opératoire audiovisuel offre de nombreux avantages dans le secteur industriel, notamment lors de l'application de la méthode SMED. Tout d'abord, cela améliore la compréhension des procédures grâce à une représentation visuelle claire des gestes et des enchaînements, ce qui réduit toute ambiguïté par rapport à une simple instruction écrite. Cette clarté aide également à minimiser les erreurs et les écarts d'exécution, garantissant ainsi une meilleure conformité aux standards établis. En unifiant les pratiques entre les opérateurs, le mode opératoire audiovisuel assure une exécution cohérente des tâches, peu importe l'expérience de l'opérateur. De plus, il simplifie la formation des nouveaux arrivants en réduisant le temps d'apprentissage et en leur fournissant un support pédagogique visuel. En outre, ce type de support met en valeur le savoir-faire interne en soulignant le travail des opérateurs expérimentés, ce qui renforce l'engagement et la reconnaissance du personnel.



Standard d'actions			Changement format - Souffleuse - KRONES		
Equipement	Souffleuse	Date de révision initiale		Créateur	ECCBC Algeria-Fruital Alger
Fournisseur	KRONES	Date de révision finale		Version	01
Modèle	CONTIFORM 32O	Heur de fonctionnement annuel			
Tout est expliqué dans cette vidéo			Organisation des moules pour leur démontage/montage		
			Outils	Jog	
			Intervalle	Lors le changement de format	
			Sécurité	EPI (Protection oculaire, Gants de protection , Chausseurs Protection auditive)	
			Méthode	Pour commencer, appuyez sur le bouton noir du Jog. Ensuite, faites tourner doucement les moules jusqu'à ce que les trois premiers moules soient alignés en face de vous. Vous pouvez vérifier leur position en regardant les numéros indiqués : 1, 2 et 3	
			Condition équipement	Machine est arrêté	Niveau de compétence / Aide opérateur
			Type de tache	Interne	Temps total / 2 min
			Bonnes pratiques	1. Cette préparation sert à suivre l'ordre des moules pendant le travail, pour éviter de perdre le fil ou de se tromper.	

Figure 23 : Exemple du mode opératoire de la souffleuse

II.6.3 Validation de la solution SMED

Une réunion COPIL (Comité de pilotage) a été organisée et animée par le responsable des performances, en présence de tous les managers de la direction industrielle ainsi que du directeur industriel. L'objectif de cette réunion était de faire le point sur l'avancement des projets au sein de Fruital Coca-Cola, dont le projet d'application de la méthode SMED sur la ligne de production 20-18.

Le directeur industriel, impressionné par la qualité du travail réalisé, et en particulier par les modes opératoires en format audiovisuel, a validé la solution technique proposée dans le cadre de la démarche SMED. Il a donné son accord pour le lancement de la formation des opérateurs selon le nouveau standard, profitant de l'arrêt prévu pour la maintenance annuelle du 6 au 21 avril. Le directeur industriel a également pris la décision de consacrer un budget spécifique pour l'achat de tablettes destinées à chaque machine. Ces dispositifs numériques permettront de diffuser les modes opératoires directement sur le site et serviront de support pour la formation continue des opérateurs actuels ainsi que des nouvelles recrues.

II.7 Contrôler (Control)

Après la formation des opérateurs des machines souffleuse, étiqueteuse et soutireuse des quatre équipes de la ligne 20–18 sur le nouveau processus de changement de série standardisé, présenté sous forme de modes opératoires audiovisuels, réalisée pendant l'arrêt de maintenance annuelle, une phase de suivi a été engagée. Une collecte des temps de changement de série via le système Evocon a été effectuée sur une période de 37 jours, allant du 26 avril au 2 juin (voir Tableau 14), afin d'évaluer les résultats et de valider l'efficacité des améliorations apportées.

Tableau 14 : Résultats des temps de changement de série après SMED

Date	Nature de changement	Heure	Type	Durée
06/04/2025	**Maintenance annuelle**			
21/04/2025	**Démarrage de production**			
26/04/2025	**Période d'essai**			
27/04/2025	Coca cola 1L -> Coca cola 1.5L	14:30	Format 1ET avec v	**154 min**
01/05/2025	Coca cola 1L.5-> Coca cola 1L	06:04	Format 1ET avec v	132 min
02/05/2025	Coca cola 1L -> Coca ZERO 1L	19:15	Parfum 3ET	112 min
03/05/2025	Coca ZERO 1L -> Coca ZERO 1L	01:30	Parfum 1ET	58 min
05/05/2025	Coca ZERO 1L -> Coca 1L	11:06	Parfum 3ET	139 min
11/05/2025	Coca cola 1L -> Sprite 1L	08:35	Format 1ET	63 min
13/05/2025	Sprite 1L -> Fanta 1L	07:42	Format 1ET	61 min
14/05/2025	Fanta 1L -> Coca cola 1L	01:56	Format 3ET	147 min
15/05/2025	Coca cola 1L -> Coca cola1.5L	15:12	Format 1ET avec v	136 min
26/05/2025	Coca cola 1.5L -> Sprite 1L	19:14	Format 1ET avec v	122 min
29/05/2025	Sprite 1L -> Coca cola 1L	07:20	Format 3ET	**152 min**
02/06/2025				

Au cours de cette période, 11 changements de série ont été réalisés, couvrant les cinq types de changement identifiés. Les résultats observés se situent globalement dans les limites de la nouvelle matrice de référence, avec de légers dépassements de 2 à 3 minutes, considérés comme acceptables dans le cadre d'une phase de lancement. Toutefois, deux exceptions ont été constatées :

- Le premier changement de format 1ET avec changement de volume a enregistré un retard de 24 minutes. En raison d'un problème de réglage des vérins du convoyeur à air. Une grande partie des vérins de ce convoyeur avait été remplacée lors de la maintenance annuelle, mais reste encore une partie à remplacer.
- Le dernier changement de format 3ET, réalisé en 152 minutes, a connu un dépassement de 12 minutes causé par un problème technique du codeur.

Ces écarts, bien que ponctuels, serviront de base pour des actions correctives ciblées dans la démarche d'amélioration continue.

II.8 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, la méthode SMED a été appliquée à la ligne de production 20-18 de l'usine Fruital Coca-Cola dans le but de réduire les temps de changement de série, en suivant les étapes de la démarche DMAIC.

La phase Définir a permis de cadrer le projet en identifiant la ligne 20-18 comme cible prioritaire, en raison de sa place stratégique, représentant à elle seule 25 % de la production totale de Fruital. Les arrêts liés aux changements de série ont été reconnus comme l'une des principales causes d'inefficacité, représentant 20 % des causes, à l'origine de 80 % des problèmes liés aux arrêts planifiés. Mesurer a consisté à établir un diagnostic précis des arrêts historiques et à collecter des données terrain afin de quantifier les pertes. Analyser a permis d'identifier les principales sources de gaspillage, mettant en évidence l'absence de standards comme un facteur majeur. La phase Innover a conduit à l'implémentation d'actions concrètes, telles que la conversion des réglages internes en réglages externes et la mise en place de standards clairs. Enfin, la phase Contrôler a assuré le suivi après implémentation à travers la collecte et l'analyse des temps de changement de série sur une période de 40 jours. Ce chapitre représente donc la phase opérationnelle du projet, traduisant les concepts du Lean et de l'amélioration continue en actions concrètes et mesurables sur le terrain.

Le chapitre suivant sera consacré à la simulation à événements discrets à l'aide du logiciel Arena dans le but de visualiser les effets de l'optimisation du processus de changement de série sur le gain en productivité et les performances de la ligne de production.

Chapitre III
Impact du SMED : Étude par Simulation à évènements discrets

III.1 Introduction

Au chapitre précédent, l'implémentation de la méthode SMED permettra d'aboutir à une réduction significative des temps de changement. Pour mieux visualiser ces résultats et analyser leur impact sur la performance globale du système de production à long terme, ce travail développera une simulation comparative à partir des données collectées. Cette simulation visera à estimer les gains obtenus et à analyser l'influence du SMED sur l'efficacité du processus.

Pour concrétiser cette analyse, ce chapitre présentera une simulation à événements discrets, qui sera élaborée à l'aide du logiciel Arena. Cet outil se révélera particulièrement adapté pour modéliser le fonctionnement du système, explorer différents scénarios d'amélioration et anticiper les effets des optimisations mises en œuvre [32][33]. Grâce à Arena, l'étude modélisera les changements apportés par la méthode SMED, estimera les bénéfices attendus et analysera leur impact sur la performance globale du processus de production.

III.2 Approche de simulation

À ce stade, la simulation est utilisée comme un outil pour évaluer l'impact de la mise en œuvre de la méthode SMED. Pour cela, une approche méthodologique en trois phases a été suivie, comme illustré dans la Figure 24.

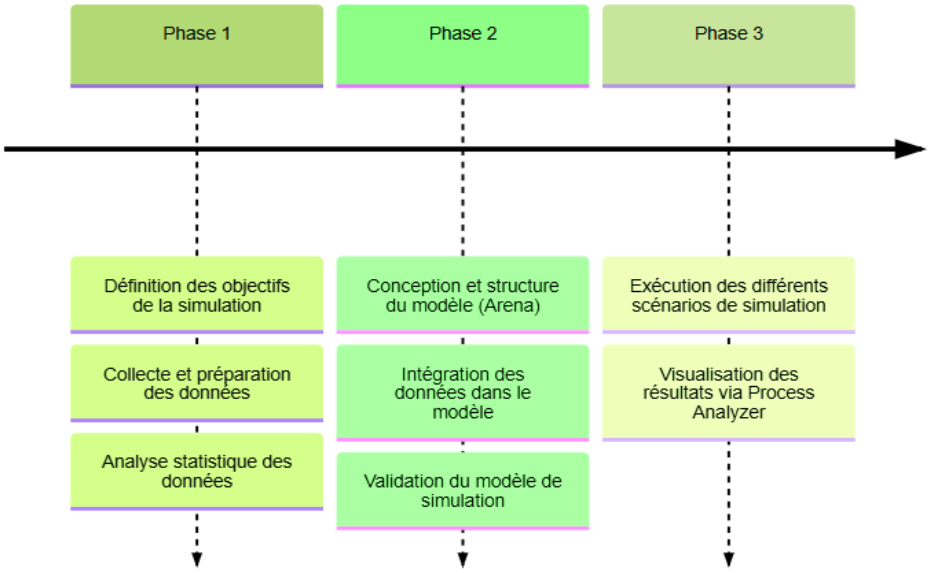


Figure 24 : Schéma illustrant l'approche de simulation

III.2.1 Phase de Préparation et Analyse

a. Définition des objectifs : la simulation a été développée afin d'évaluer l'efficacité de la méthode SMED sous plusieurs aspects. Elle a pour objectif d'analyser et de mesurer les gains en productivité résultant de la réduction des temps de changement de série. Cette démarche permet de valider les résultats du projet en s'appuyant sur des données concrètes et quantifiables.

b. La collecte des données : cette étape consiste à sélectionner les données nécessaires pour construire le modèle de simulation.

- L'objectif est d'évaluer l'impact de la méthode SMED sur le taux des arrêts planifiés. Pour cela, deux scénarios seront définis : avant et après l'implémentation de la méthode. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel Arena serviront de base pour cette analyse.

- Il est donc important d'identifier les processus concernés, les données associées, la période de collecte, ainsi que des sources d'information fiables :

  Les processus clés sont les cinq types de changements de série sont identifiés :
  - Changement de parfum 1ET
  - Changement de parfum 3ET
  - Changement de format 1ET sans changement de volume.
  - Changement de format 1ET avec changement de volume.
  - Changement de format 3ET sans ou avec changement de volume

  Tous ces changements affectent directement la machine soutireuse, considérée comme un maillon critique du processus, ce qui justifie sa connexion directe au système d'exécution de production Evocon.
- Les données à collecter, liées au processus de changement de série, concernent principalement la durée écoulée entre deux changements consécutifs, ainsi qu'un échantillon représentatif des durées spécifiques à chaque type de changement.
  - La collecte sera effectuée sur deux périodes : avant SMED du 16/02 au 27/03 (40 jours) et après du 27/04 au 02/06 (37 jours) de l'année 2025.
  - Les données seront extraites du MES Evocon, une source fiable grâce à son horodatage automatique.

c. **L'analyse des données :** l'analyse des données sera réalisée avec R-Studio, un environnement de calcul statistique libre et puissant basé sur le langage R. Cet outil est reconnu pour sa capacité à effectuer des analyses statistiques, à gérer de grands volumes de données et à produire des graphiques clairs facilitant l'interprétation, grâce à ses nombreuses bibliothèques spécialisées.

- La **validation de notre source de données** a été une étape critique. Elle a impliqué une analyse statistique rigoureuse des écarts entre les mesures automatisées d'Evocon et les rapports de production manuels, en utilisant un échantillon de changements avant le projet SMED, le synthétise est dans le Tableau 15 ci-dessous.

Tableau 15 : les écarts entre les mesures via Evocon et rapports de production

Type de changement	Différence des temps (mn)
parfum (**fraise 1L** -> f.citron 1L)	20
f.citron 1L -> f.cidre 1L	35
f.cidre 1L -> Coca Cola 1L	15
Coca Cola 1L -> Coca zéro 1L	19
Coca 2L -> Sprite 1L	18
Fanta Orange 1L -> Fanta Pomme 1L	28
Fanta Fraise 1L -> Coca 1L	18
F.pomme 1L -> F.Orange 1L	30
F.Orange 1L -> Sprite1L	28
Sprite 1L -> Coca Cola1L	17
Coca Cola 1L -> Coca Cola zero 1L	38
Coca Cola zero 1L -> F.ananas 1L	61
F.ananas 1L -> F.fraise 1L	44
F.fraise 1L -> Sprite 1L	10
Coca 1.5 L -> Fanta orange 1.5 L	12

L'étude révèle des divergences critiques des rapports de production avec une erreur relative moyenne de 43,67%, dépassant largement le seuil industriel acceptable de 10%. Le coefficient de variation de 52,65% indique une dispersion excessive tandis que 60% des mesures présentent des erreurs critiques supérieures au seuil de tolérance, le test de Student confirme statistiquement la significativité de ces écarts ($t = 7,36$, $p < 0,001$), validant définitivement la supériorité des données Evocon pour la modélisation des processus industriels (Annexe C). Fort de cette validation, l'étape suivante consiste à

extraire et structurer les données nécessaires à la construction du modèle de simulation. Cette analyse porte sur les durées de changement et les temps inter-arrivées collectés durant les deux périodes d'observation.

- **Analyse des données nécessaires à la modélisation :** après validation de la source, les données nécessaires ont été extraites depuis Evocon. Le Tableau 16 présente les durées de changement, leur type, ainsi que les durées entre chaque deux changements, pendant deux périodes : avant et après le projet SMED.

Tableau 16 : Récapitulatif des données de Changements via Evocon

Date	Nature de changement	Heure	Type	Durée	Distribution
16/02/2025	Fanta.Fraise 1L -> F.citron 1L	05:00	Parfum 3ET	150 min	-
17/02/2025	F.Citron 1L -> F.Cidre 1L	13:37	Parfum 3ET	130 min	1 957
17/02/2025	F.Cidre 1L -> Coca cola 1L	22:00	Format 3ET	170 min	503
21/02/2025	Coca cola 1L -> Coca ZERO 1L	22:27	Parfum 3ET	156 min	5787
23/02/2025	Coca cola 2L -> Sprite 1L	01:23	Format 1ET avec V	170 min	2994
04/03/2025	F.Orange 1L -> F. Pomme 1L	11:19	Format 3ET	183 min	12 116
06/03/2025	F.Fraise 1L -> Coca 1L	20:13	Parfum 1ET	57 min	3 414
08/03/2025	F.Pomme 1L -> F.Orange 1L	23:01	Format 3ET	157 min	3 048
17/03/2025	F.Orange 1L -> Sprite1L	12:00	Parfum 1ET	70 min	13 619
18/03/2025	Sprite 1L -> Coca cola1L	11:08	Format 1ET	78 min	1 388
19/03/2025	Coca cola 1L -> Coca ZERO 1L	07:13	Format 3ET	168 min	1 205
20/03/2025	Coca ZERO 1L -> F.Ananas 1L	22:43	Parfum 3ET	127 min	2 370
21/03/2025	F.Ananas 1L -> F.Fraise 1L	02:29	Format 1ET	64 min	226
22/03/2025	F.Fraise 1L -> Sprite 1L	02:00:00	Parfum 3ET	116 min	1 409
24/03/2025	Coca cola 1.5 L -> F.Orange 1.5 L	10:54	Format 3ET	180 min	3 414
27/03/2025		16:04	Format 1ET	78 min	4 630
06/04/2025	**Maintenance annuelle**				
21/04/2025	**Démarrage de production**				
26/04/2025	**Période d'essay**				
27/04/2025	Coca cola 1L -> Coca cola 1.5L	14:30	Format 1ET avec conv	**154 min**	-
01/05/2025	Coca cola 1L.5-> Coca cola 1L	06:04	Format 1ET avec conv	132 min	5254
02/05/2025	Coca cola 1L -> Coca ZERO 1L	19:15	Parfum 3ET	112 min	2231
03/05/2025	Coca ZERO 1L -> Coca ZERO 1L	01:30	Parfum 1ET	58 min	375
05/05/2025	Coca ZERO 1L -> Coca 1L	11:06	Parfum 3ET	139 min	3456
11/05/2025	Coca cola 1L -> Sprite 1L	08:35	Format 1ET	63 min	8489
13/05/2025	Sprite 1L -> Fanta 1L	07:42	Format 1ET	61 min	2827
14/05/2025	Fanta 1L -> Coca cola 1L	01:56	Format 3ET	147 min	1094
15/05/2025	Coca cola 1L -> Coca cola1.5L	15:12	Format 1ET avec conv	136 min	2236
26/05/2025	Coca cola 1.5L -> Sprite 1L	19:14	Format 1ET avec conv	122 min	16082
29/05/2025	Sprite 1L -> Coca cola 1L	07:20	Format 3ET	**152 min**	3606
02/06/2025					

A partir de ce Tableau 17 en distinguant les 6 échantillons des temps :

Tableau 17: Les 'échantillons des données

Type de temps	l'échantillon de période avant	l'échantillon de période après
Temps inter-arrivées (entre les changements)	1957, 503, 5787, 2994, 12116, 3414, 3048, 13619, 1388, 1205, 2370, 226, 1409, 3414, 4630	5254, 2231, 375, 3456, 8489, 2827, 1094, 2236, 16082, 3606
Temps de changement parfum 1ET	57, 70	58
Temps de changement parfum 3ET	150, 130, 156, 127, 116	112, 139
Temps de changement format 1ET sans convoyeur	78, 64, 78	63, 61
Temps de changement format 1ET avec convoyeur	170	154, 132, 136, 122
Temps de changement format 3ET	170, 183, 157, 168, 180	147, 152

Le traitement de ces données a pour objectif de modéliser les distributions des temps inter-arrivées et des durées associées aux différents types de changements dans un contexte de simulation de processus industriels. Cette analyse statistique, réalisée à l'aide du logiciel R-Studio, repose sur une méthodologie rigoureuse afin de garantir la robustesse des résultats intégrés dans le logiciel Arena. Les principales étapes incluent :

1. **Validation des échantillons :** évaluation systématique de la taille des échantillons pour s'assurer de leur fiabilité. Ils sont classifiés selon leur niveau de validation (critique < 5, insuffisant < 10, acceptable 10≤ n < 20, bon 20≤ n <50, excellent n ≥ 50), ce qui guide les choix méthodologiques ultérieurs. La taille des échantillons a été systématiquement évaluée pour garantir leur fiabilité et guider nos choix méthodologiques ultérieurs. Comme indiqué, des échantillons de taille 'critique' (<5) ou 'insuffisante' (<10) nécessitent des approches de modélisation plus prudentes et sont identifiés comme des limites potentielles de l'analyse.
2. **Ajustement de distributions théoriques :** test d'un ensemble de distributions candidates notamment : exponentielle, gamma, normale, log-normale, uniforme, bêta redimensionnée et triangulaire ; ces distributions sont ajustées aux données observées pour identifier celles qui offrent le meilleur compromis entre adéquation et simplicité.
3. **Comparaison des ajustements :** l'application des critères d'information Akaike (AIC) et de Bayésien (BIC) permet de comparer objectivement les performances des distributions candidates ; ces critères permettent de pénaliser les modèles complexes, tout en avantageant ceux qui maximisent l'adéquation aux données.
4. **Tests statistiques de validité :** application de plusieurs tests statistiques rigoureux pour valider l'adéquation des distributions ajustées ; ces tests incluent le test de Kolmogorov-Smirnov (KS), le test d'Anderson-Darling (AD), le test de Shapiro-Wilk (SW) et le test de Cramer-Von Mises (CVM) ; chaque test apporte une perspective complémentaire sur la qualité de l'ajustement.
5. **Calcul des intervalles de confiance bootstrap :** estimation des intervalles de confiance pour la moyenne, la médiane et l'écart-type à l'aide de méthodes bootstrap

   Cette approche, de nature non paramétrique, contribue à renforcer la fiabilité des résultats, en tenant compte des situations impliquant des échantillons de taille réduite. L'ensemble de cette analyse permet d'identifier, pour chaque série de données, la loi de probabilité la plus approprié, à partir de ces lois, une expression compatible avec Arena est automatiquement générée (par exemple : EXPO (...), TRIA (...)…), facilitant ainsi la modélisation et la simulation des processus tout en intégrant les incertitudes liées aux données observées. Pour plus de détails sur le code utilisé, voir Annexe (C)

Les résultats obtenus sur R studio pour l'échantillon de temps inter-arrivés (avant SMED), dans la Figure 25 :

```
MODULE CREATE d'Arena :
  ├─ Type: Expression
  ├─ Units ; Minutes
  ├─ Value: 226 + (13393) * BETA(0.3904, 1.0437)
  ├─ Distribution choisie (AIC): Beta (Redimensionnée)
  ├─ Validation Échantillon: ACCEPTABLE
  ├─ Taille échantillon: 15
```

Figure 25 : La distribution de temps inter-arrivés (avant SMED)

La distribution Beta redimensionnée est identifiée comme le meilleur ajustement pour les temps d'inters-changements, avec une validation acceptable, l'intervalle de confiance large [2261 ; 6002] minutes reflète une certaine incertitude autour de la moyenne, mais cela reste acceptable compte tenu de la taille de l'échantillon.

Les résultats obtenus sur R studio pour les échantillons des temps de changements (avant SMED), dans la Figure 26 :

Loi	Nom_Type	N_obs	Moyenne	Distribution_Choisie	Validation_Echantillon	Expression_Arena
Loi N°2	Parfum 1ET	2	63.50	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(57, 63.5, 70)
Loi N°3	Parfum 3ET	5	135.80	Uniforme	INSUFFISANT	UNIF(116, 156)
Loi N°4	Format 1ET Sans Convoyeur	3	73.33	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(64, 78, 78)
Loi N°5	Format 1ET Avec Convoyeur	1	170.00	CONSTANTE	CRITIQUE	170
Loi N°6	Format 3ET	5	171.60	Uniforme	INSUFFISANT	UNIF(157, 183)

Figure 26 : Les distributions des temps changements (avant SMED)

Les résultats des ajustements pour les temps de changement avant SMED (Figure 23) mettent en évidence une hétérogénéité dans la qualité de l'ajustement statistique. Pour les types 1, 3 et 4, des distributions de secours (fallback) triangulaire pour les types 1 et 3, constante pour le type 4, ont été retenues en raison de la taille réduite des échantillons. Les types 2 et 5 ont été modélisés par des distributions uniformes, mais leur niveau de validation reste insuffisant, comme le montrent les larges intervalles de confiance associés. Cette variabilité reflète les limites liées à la collecte de données pour certains types de changements, ce qui peut affecter la précision des prédictions dans ces cas spécifiques. Néanmoins, l'utilisation de la méthode bootstrap a permis d'estimer des intervalles de confiance, malgré les contraintes d'échantillonnage.
Les graphiques associées à cette analyse sont disponibles dans l'Annexe (C).

Les résultats obtenus sur R studio pour l'échantillon de temps inter-arrivés (après SMED) dans la Figure 27 :

```
MODULE CREATE d'Arena :
  ├─ Type: Expression
  ├─ Units ; Minutes
  ├─ Value: 375 + (15707) * BETA(0.3962, 1.0892)
  ├─ Distribution choisie (AIC): Beta (Redimensionnée)
  ├─ Validation Échantillon: ACCEPTABLE
  ├─ Taille échantillon: 10
```

Figure 27 : La distribution de de temps inter-arrivés (après SMED)

La distribution Beta redimensionnée est identifiée comme le meilleur ajustement pour les temps d'inters-changements, avec une validation acceptable, l'intervalle de confiance bootstrap large [2348 ; 7897] minutes reflète une certaine incertitude autour de la moyenne, mais reste raisonnable compte tenu de la taille modérée de l'échantillon.
La courbe de densité ajustée correspond bien aux données observées, confirmant une bonne adéquation de la distribution.
Les résultats obtenus sur R studio pour les échantillons des temps de changements (après SMED) dans la figure 28 :

Loi	Nom_Type	N_obs	Moyenne	Distribution_Choisie	Validation_Echantillon	Expression_Arena
Loi N°2	Parfum 1ET	1	58.0	CONSTANTE	CRITIQUE	58
Loi N°3	Parfum 3ET	2	125.5	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(112, 125.5, 139)
Loi N°4	Format 1ET Sans Convoyeur	2	62.0	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(61, 62, 63)
Loi N°5	Format 1ET Avec Convoyeur	4	136.0	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(122, 134, 154)
Loi N°6	Format 3ET	2	149.5	Triangulaire (Fallback)	CRITIQUE	TRIA(147, 149.5, 152)

Figure 28 : Les distributions des temps changements (après SMED)

Les distributions ajustées pour les temps de changement après la mise en œuvre du SMED (voir Figure 28) révèlent une prévalence des distributions triangulaires de type fallback pour les types 1, 3, 4 et 5. Le type 1, quant à lui, a été modélisé à l'aide d'une distribution constante, en raison de la taille très réduite de l'échantillon, ne permettant pas l'identification d'une distribution optimale. La faiblesse de certains échantillons se traduit par des intervalles de confiance plus larges, indiquant une incertitude plus élevée sur les estimations moyennes. Malgré ces limitations, les données ont été validées et modélisées sous forme de lois de probabilité compatibles avec Arena. Les tests statistiques réalisés et les ajustements appliqués permettent d'atteindre un niveau de

fiabilité jugé suffisant pour alimenter les simulations. Ces distributions fournissent ainsi une base cohérente pour la modélisation du processus de changement.

Les graphiques associées à cette analyse sont disponibles dans l'Annexe (C).

III.2.2 Modélisation sous Arena

a. Structure du modèle : dans cette simulation réalisée avec Arena, le concept repose sur l'arrivée d'ordres de fabrication **(OF)** du module **Create**, **répartis en cinq types distincts correspondant chacun à un type de changement de série**. Chaque OF est ensuite acheminé par un module **Route** utilisant des modules **Station,** vers une phase de délai d'attente, représentée dans Arena par un module **Delay**, simulant le temps nécessaire au changement de série. Ce délai est déterminé en fonction d'une séquence prédéfinie des cinq types d'OF et chaque type étant associé à une distribution spécifique de temps de changement. La distribution des arrivées des OF est définie dans un module **Create** tandis que les pourcentages de répartition des différents types d'OF sont spécifiés dans un module **Assign**. Ce dernier permet d'affecter dynamiquement ces paramètres au moment de la création des entités, assurant ainsi une modélisation flexible et réaliste du processus de changement.

b. Entrées et données: avant le lancement de la simulation sous Arena il faut incorporer les données nécessaires à la modélisation, car elles servent à paramétrer les modules et paramètres du modèle en vue de rendre fidèle une certaine vision du système. Le Tableau 18 ci-dessous récapitule les éléments d'informations utilisés en entrée du modèle.

Tableau 18 : Résumé des informations à introduire dans le modèle

Module	Delay type	Value (minutes)	Name	Type	Observation
Create	Expression	**Scénario 1:** **375 + (15707) * BETA (0.3962, 1.0892)** **Scénario 2 :** **226 + (13393) * BETA (0.3904, 1.0437)**	Create of	Entity type: Entity 1	Les autres éléments restent
Assign	Assignments				

	Type	Attribute Name	New Value
1	Attribut	OF index	DISC(0.125,1 , 0.4375,2 , 0.625,3 , 0.6875,4 , 1,5
2	Attribute	Entity.Sequenc	OF sequences (OF index)
3	Attribute	Entity.Type	entity types (OF index)
4	Attribute	Entity.Picture	OF pictures (OF index)

Station

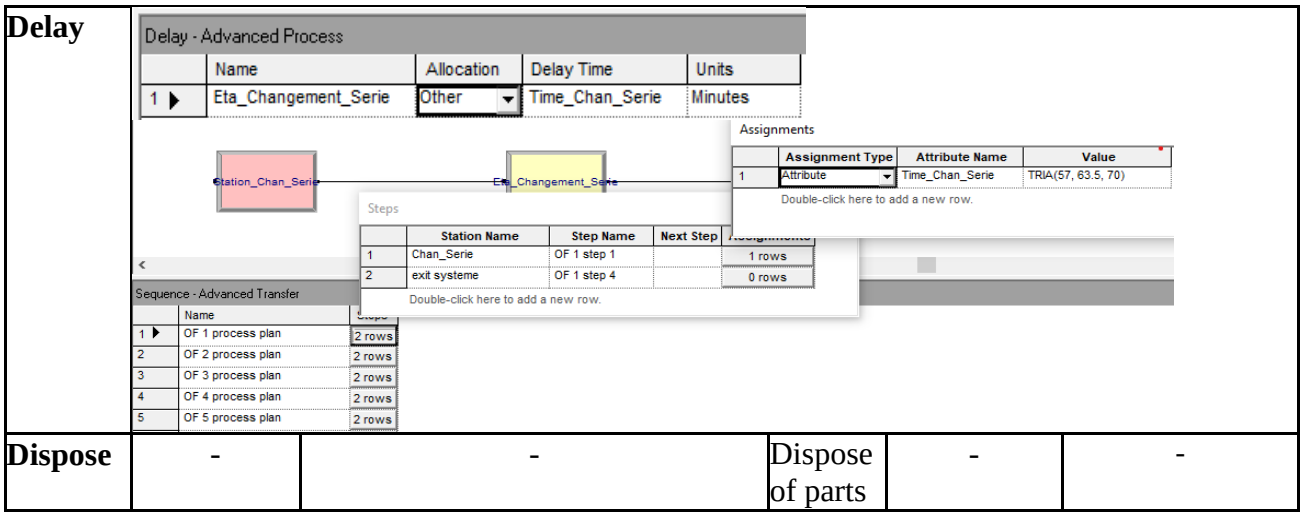
Station - Advanced Transfer

	Name	Station Type	Station Name
1	order release station	Station	order release
2	Station_Chan_Serie	Station	Chan_Serie
3	exit systeme station	Station	exit systeme

Route

Route - Advanced Transfer

	Name	Route Time	Units	Destination Type
1	start sequence	2	Seconds	By Sequence
2	route from Chan_Serie	2	Seconds	By Sequence



Delay	Delay - Advanced Process Name: Eta_Changement_Serie Allocation: Other Delay Time: Time_Chan_Serie Units: Minutes Assignments: Assignment Type: Attribute; Attribute Name: Time_Chan_Serie; Value: TRIA(57, 63.5, 70) Steps: Station Name: Chan_Serie; Step Name: OF 1 step 1; Next Step: 1 rows Station Name: exit systeme; Step Name: OF 1 step 4; 0 rows Sequence - Advanced Transfer: OF 1 process plan, OF 2 process plan, OF 3 process plan, OF 4 process plan, OF 5 process plan				
Dispose	-	-	Dispose of parts	-	-

Voici la modélisation de processus de changement de série sous Arena, Figure 29

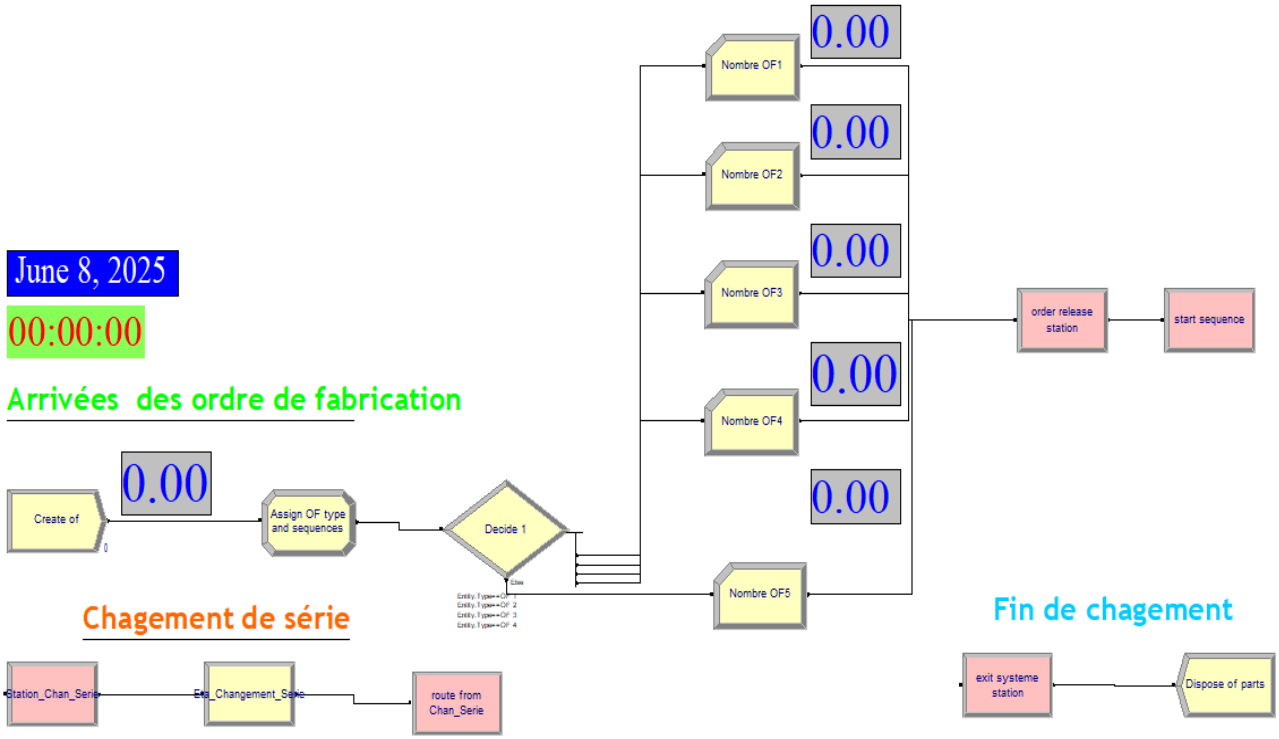


Figure 29 : Le modèle final sous Arena

c. **La validation de modèle** : les étapes suivantes sont mises en place afin de valider le modèle :

- La simulation de ce modèle sur Arena, utilisant les données recueillies durant la période avant à la mise en place du SMED.
- La simulation est effectuée pour une durée identique à celle de la collecte des données (40 jours) avec une seule réplique, de cette façon, il devient possible de comparer les résultats simulés avec les données réelles afin d'apprécier la précision et la pertinence du modèle, Les résultats sont présentés sur la Figure 30.

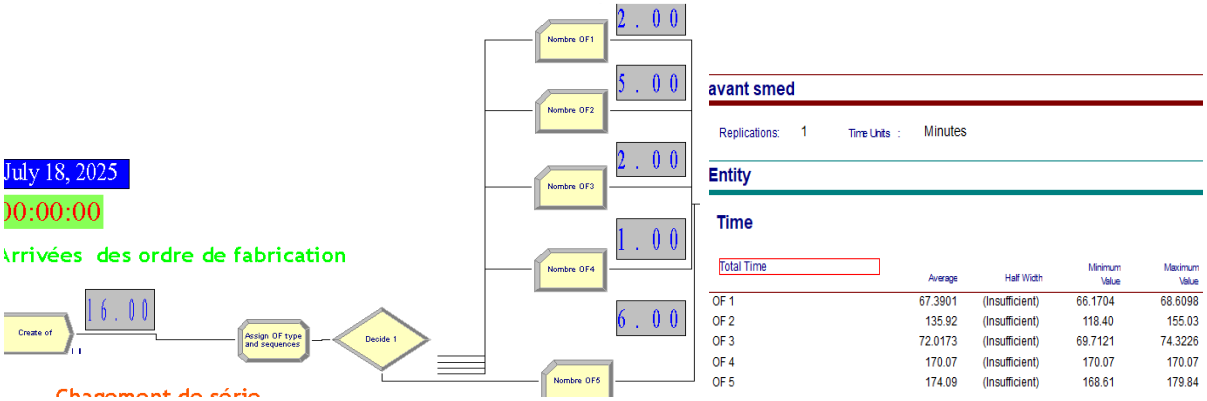


Figure 30 : Simulation pour la Validation du modèle

Avant l'application de la méthode SMED, l'analyse des 16 ordres de fabrication simulés dans Arena révèle une cohérence notable avec les données terrain. Les temps de changement simulés pour chaque type d'OF se situent dans les intervalles observés en conditions réelles. Par exemple, OF1 présente un temps moyen de 67,39 minutes, contenu dans l'intervalle [57;70], correspondant aux changements de parfum 1ET. De même, OF2 135,92 min se situe dans [116;156], intervalle réel des changements de parfum 3ET. OF3 a un moyen de 72,02min est compris dans [64;78], correspondant aux changements de format 1ET sans convoyeur, tandis que OF4 avec un moyen de 170,07 min rest constant et OF5 avec un moyen de 174,09 min apparaît à l'intervalle [157;183], correspondant aux changements de format 3ET. Cette conformité des temps moyens simulés aux intervalles réels, ainsi que la répartition des entités OF1 à OF5, confirme la validité du modèle dans sa configuration initiale.

III.2.3 La simulation des différents scénarios et à la visualisation des résultats

Cette section se concentre sur les résultats des simulations effectuées afin de permettre une analyse comparative entre l'état initial et l'état optimisé. Les scénarios simulés mettent en évidence les gains potentiels en termes de réduction des temps de changement de série en des périodes scalables. Les deux scénarios ont été simulés et les résultats comparatifs, présentés dans les (voir Tableaux 19 et 20), couvrent quatre périodes d'observation distinctes : période réelle de collecte 40 jours, 120 jours, 180 jours et 365 jours.

Tableau 19 : Résultats des simulations sur les temps de changements

		40 jours		120 jours		180 jours		365 jours	
OF	Données	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant	Après
OF1	Min	66.17	58.06	57.6	58.06	57.6	58.06	57.6	58.06
	Moyen	67.39	58.06	66.03	58.06	65.22	58.06	63.97	58.06
	Max	68.6	58.06	69.36	58.06	69.36	58.06	69.36	58.06
OF2	Min	118.4	116.68	118.05	116.68	116.46	116.68	116.46	116.68
	Moyen	135.92	118.52	137.16	123.41	135.77	125.95	135.81	126.43
	Max	155.03	120.35	155.03	135.04	155.03	135.04	155.03	135.04
OF3	Min	69.71	62.32	69.71	61.76	69.4	61.76	69.4	61.26
	Moyen	72.01	62.32	74.16	62.17	74.06	62.14	74.52	62.09
	Max	74.32	62.32	78.05	62.77	78.05	62.77	78.05	62.77
OF4	Min	170.07	139.51	170.07	139.51	170.07	128.81	170.07	128.81
	Moyen	170.07	140.82	170.07	140.82	170.07	140.3	170.07	138.93
	Max	170.07	141.69	170.07	141.69	170.07	152.87	170.07	152.87
OF5	Min	168.61	149.69	160.85	148.71	160.85	147.68	159.24	147.68
	Moyen	174.09	150.29	172.16	149.77	171.84	149.41	170.61	149.48
	Max	179.84	150.88	182.8	150.88	182.8	150.88	182.8	150.9

Tableau 20 : Résultats des simulations sur le nombre de changements (répétitions par OF)

Num out des OF pendant	40 jours		120 jours		180 jours		365 jours	
OF1	2	3	9	8	10	9	25	19
OF2	5	2	17	6	23	10	37	19
OF3	2	1	7	11	15	12	34	38
OF4	1	3	6	3	8	7	14	13
OF5	6	2	9	5	11	9	17	16
Total Num out	16	11	48	33	67	47	127	105

Pour une comparaison détaillée des résultats par type de changement, un graphique distinct a été élaboré pour chaque catégorie. Ces visualisations, générées via Process Analyzer dans Arena, modélisent le temps moyen associé à chaque modification. Leur pertinence repose sur la durée de la simulation et celle de la collecte de données, Figure 31.

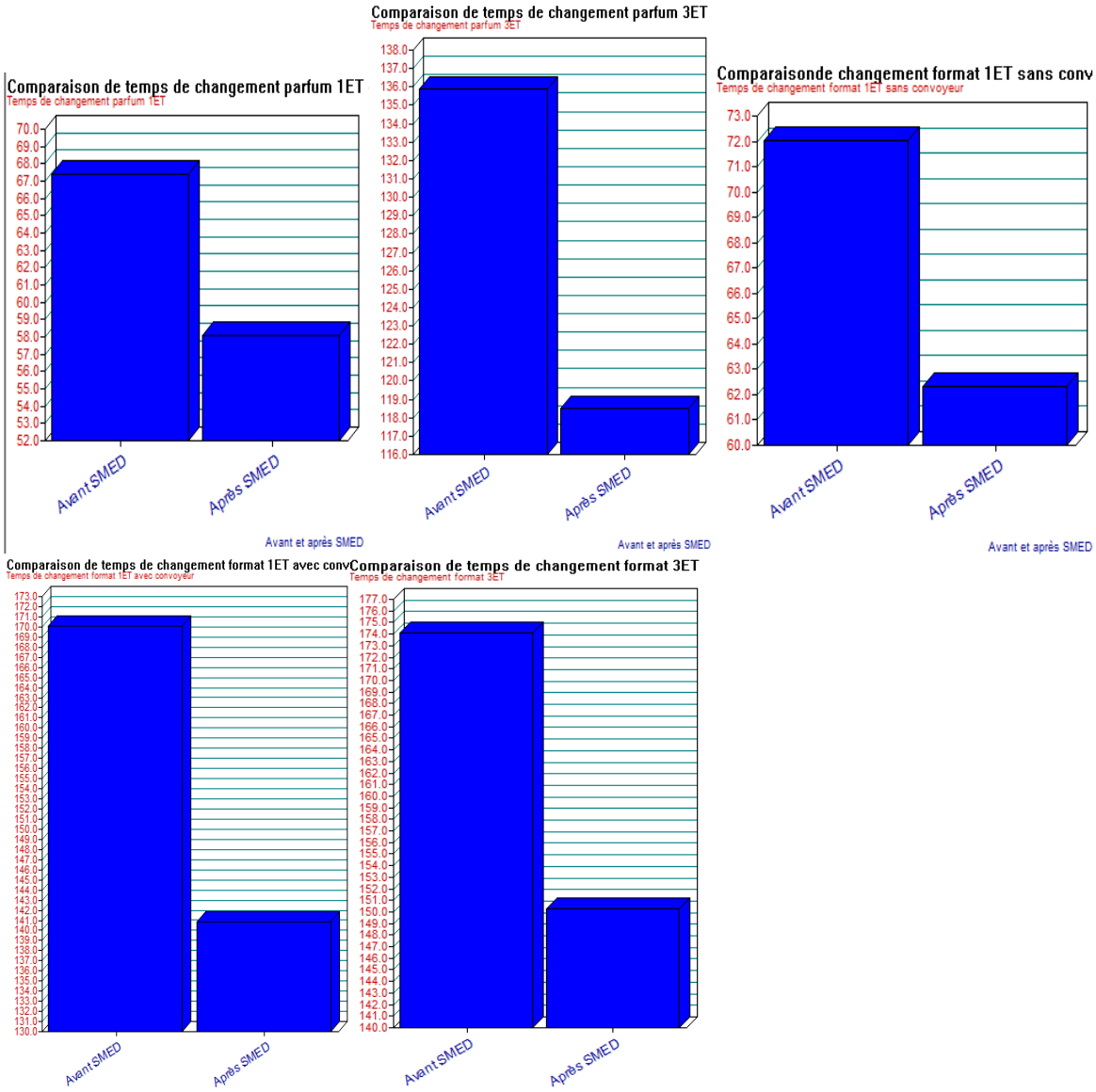


Figure 31 : Résultats des graphiques sur Process analyzer - Arena

Les simulations montrent une réduction notable des temps de changement après l'application de la méthode SMED. Les gains moyens observés sont :

- **OF1** : 7,6 à 9,3 min
- **OF2** : 12,6 à 17,4 min
- **OF3** : 9,7 à 11,5 min
- **OF4** : 29,3 à 29,9 min
- **OF5** : 22,4 à 23,8 min.

Ces simulations, effectuées sur différentes périodes (40, 120, 180 et 365 jours), confirment les bénéfices mesurables à long terme de la méthode SMED, validant son efficacité comme levier d'optimisation industrielle.

Pour calculer les gains de productivité, on multiplie l'écart moyen des temps de changement (avant/après SMED) par le nombre de changements, représenté par la répétition de chaque OF. Cette méthode est appliquée aux quatre périodes d'analyse. Les résultats obtenus sont présentés dans le (voir Tableau 21), avec les totaux des gains par période indiqués en vert.

Tableau 21 : Gain de SMED en minutes

OF	40 jours		Ecart	Gain Total par type	120 jours		Ecart	Gain Total par type	180 jours		Ecart	Gain Total par type	364 jours		Ecart	Gain Total par type
1	67,39	58,06	9,33	27,99	66,03	58,06	7,97	63,76	65,22	58,06	7,16	64,44	63,96	58,06	5,9	112,1
2	135,92	118,52	17,4	34,8	137,16	123,41	13,75	82,5	135,77	125,95	9,82	98,2	135,8	126,4	9,37	178,03
3	72,01	62,32	9,69	9,69	74,16	62,17	11,99	131,89	74,06	62,14	11,92	143,04	74,51	62,09	12,42	471,96
4	170,07	140,82	29,25	87,75	170,07	140,82	29,25	87,75	170,07	140,3	29,77	208,39	170,07	138,9	31,14	404,82
5	174,09	150,29	23,8	47,6	172,16	149,77	22,39	111,95	171,84	149,41	22,43	201,87	170,61	149,5	21,13	338,08
				207,83				477,85				715,94				1504,99

Évolution des gains de temps :

- Sur 40 jours, le gain total cumulé est de 207,83 minutes, ce qui correspond à un début d'amélioration visible, mais encore limité.
- Sur 120 jours, le gain cumulé grimpe à 477,85 minutes, ce qui indique une stabilisation progressive de la méthode SMED avec des effets plus marqués.
- Sur 180 jours, le gain continue à progresser pour atteindre 715,94 minutes, traduisant une meilleure intégration de la méthode dans la routine de production.
- Sur 364 jours (1 an), le gain total atteint 1 504,99 minutes, soit plus de 25 heures de temps de production récupérées.

Pour estimer le nombre de bouteilles supplémentaires produites grâce aux gains de temps obtenus par la méthode SMED, on convertit chaque gain de temps en nombre de bouteilles, en utilisant la vitesse nominale de la ligne, soit 30 000 bouteilles par heure. Cette conversion est appliquée aux gains cumulés pour chacune des quatre périodes d'analyse. Les résultats sont présentés dans le (voir Tableau 22).

Tableau 22 : Gain de SMED en Bouteilles

	40 jours	**120 jours**	**180 jours**	**365 jous**
Minute	207,83	477,85	715,94	1504,99
Heure	3,463833333	7,964166667	11,93233333	25,08317
Bouteilles	**103915**	**238925**	**357970**	**752495**
Vitesse Bts /h	30000			

L’estimation des gains permet de transposer les économies de temps en quantités de production supplémentaires, ce qui rend les résultats plus concrets et plus parlants.
Sur une période de 40 jours, le gain observé dépasse les 100 000 bouteilles, ce qui témoigne de l’efficacité immédiate de la méthode SMED.
Lorsqu’on étend cette analyse à des périodes moyennes de 120 et 180 jours, les gains cumulés varient entre 238 925 et 357 970 bouteilles, confirmant ainsi l’impact significatif et durable de cette approche sur la performance productive.
Sur une année complète, les gains de 25 heures représentent une production supplémentaire de plus de 752 495 bouteilles, ce qui est hautement significatif pour la rentabilité de la ligne.

III.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence, à travers une analyse approfondie et une simulation rigoureuse, l’efficacité de la méthode SMED en tant que levier d’optimisation des changements de série. Les résultats obtenus sont significatifs à plusieurs niveaux :
Un gain à court terme de plus de 100 000 bouteilles sur une période de 40 jours.
Un gain cumulé de 1 504,99 minutes, soit environ 25 heures de production récupérées sur une année. Ce temps réinvesti permettrait la fabrication de 752 495 bouteilles supplémentaires, en se basant sur une cadence nominale de 30 000 bouteilles par heure.
Ces résultats valident la pertinence de la démarche engagée et démontrent qu'une organisation mieux structurée des processus peut générer des gains substantiels.
Le chapitre suivant s’attachera à résoudre la problématique des arrêts répétitifs post-changement, qui nuisent à la stabilité et à la reprise efficace de la production.
Il visera également à renforcer la standardisation des pratiques, dans le but de consolider durablement les améliorations obtenues et de progresser vers une performance plus stable et maîtrisée.

Chapitre IV : Fiabilisation des redémarrages de production par Poka-Yoke et audit 5S

IV.1 Introduction

Après avoir réduit les temps de changement de série grâce à l'application de la méthode SMED, et évalué les gains en productivité et en performance de la ligne 20-18 à travers une simulation à événements discrets réalisée avec le logiciel Arena, l'attention se porte désormais sur une autre source majeure d'indisponibilité : les arrêts opérationnels.
Ce chapitre revêt une importance particulière, car ces arrêts, identifiés dans la phase "Définir" (chapitre 2), représentent une part significative des pertes, notamment dues à des erreurs humaines lors des redémarrages de production. Leur impact nuit à la stabilité des performances obtenues après l'optimisation du processus de changement de série.
Dans cette optique, le chapitre s'intéressera à des leviers d'amélioration complémentaires, en lien avec l'approche Jidoka, afin de fiabiliser les opérations. Il portera sur la mise en place d'un système Poka-Yoke pour éliminer les erreurs d'ajustement, ainsi que sur le déploiement d'un audit 5S visant à structurer l'environnement de travail. Ces actions, orientées vers la standardisation des redémarrages, contribueront à renforcer la fiabilité des équipements et à ancrer une culture d'amélioration continue au sein de la ligne de production 20-18.

IV.2 Analyse des arrêts opérationnels

L'analyse menée dans le deuxième chapitre a mis en évidence deux types de perturbations récurrentes affectant la ligne 20-18. La première concerne les arrêts liés aux changements de série, pour lesquels une démarche d'amélioration a déjà été engagée à travers l'application de la méthode SMED. En revanche, un second dysfonctionnement persiste : les arrêts opérationnels. En effet, 57 % de ces arrêts sont dus à des réajustements survenant après le redémarrage de la production (voir Tableau 7). Ces interruptions traduisent une instabilité du processus lors de la phase de reprise, mettant en évidence la nécessité de mettre en place un traitement spécifique afin de garantir un redémarrage fluide, sans perte de performance.
Les données collectées avant l'implémentation de la méthode SMED montrent que plusieurs équipements de la ligne, notamment l'étiqueteuse, la fardeleuse et la souffleuse, se retrouvaient largement impactés par les arrêts inhérents aux opérations de changement de format. Les durées des arrêts recensés ont été synthétisées par équipement dans le Tableau 23 et la Figure 32 afin de visualiser la contribution de chaque poste aux pertes totales ; comme le montre le graphique, l'étiqueteuse à elle seule concentrait 35 % de l'ensemble du temps d'arrêt, suivie de la fardeleuse 22 % et de la souffleuse 17 %.

Tableau 23 : Durées des arrêts des ajustements par équipement

Étiquettes de lignes	Somme de Durée (min)
Codeur	34
Etiqueteuse	119
Fardeleuse	74
Mixeur	5
Palettiseur	46
Souffleuse	57
Soutireuse	5
Total général	340

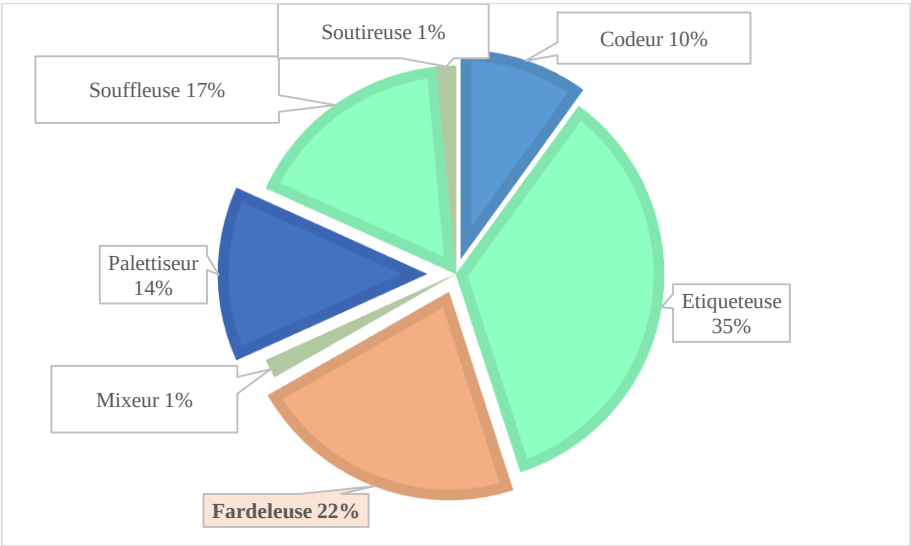


Figure 32 : Pourcentage des durées des arrêts pour ajustements par équipement

La mise en place de la méthode SMED entraîne une réduction significative des arrêts sur l'étiqueteuse et la souffleuse, permise par des standards audiovisuels et la formation ciblée des opérateurs, facilitant le redémarrage des lignes et réduisant les temps d'ajustement. En revanche la fardeleuse est encore très impactée avec un pourcentage de 22% et une durée totale de 74 minutes, ce qui souligne la nécessité d'intervention pour compenser les arrêts récurrents. Une étude des causes des arrêts constatés au niveau de la fardeleuse a été conduite en ce sens dans le but de déterminer l'origine des dérives.

Tableau 24 : Durés des arrêts des ajustements sur la fardeleuse

La cause de l'arrêt	La durée (min)	Pourcentage
Froissement filme dans le rouleau presseur	13	17.5%
Réglage après changement de format	17	75.7%
Réglage après changement de format	20	
Réglage après changement de format	19	
Fardeaux cassé à la sortie	8	10.8%

L'analyse présenté dans le Tableau 24, révèle que la majorité d'entre eux sont liés aux réglages résiduels après format, trois ayant donné lieu à un cumul de durée totalisant près de 76 % du temps d'arrêt, soit 56 minutes, avec un autre incident, de froissement du film dans le rouleau presseur, à 13 minutes (17,5 %), et les casses de fardeaux à la sortie qui ont généré 8 minutes (10,8 %). Ces résultats révèlent un problème traditionnellement connu qui consiste à avoir un encadrement clair, standardisé des ajustements techniques récursifs après chaque changement de format, ajustements sensibles et non de seules erreurs humaines. En effet, si ces ajustements ne sont pas maîtrisés, ils peuvent entraîner des incidents types désalignements, casses en sortie. Cela justifie le recadrage de la dernière phase, notamment par la mise en place de normes de réglage, de dispositifs Poka-Yoke et autres aides techniques à la fixation. Cela vise à stabiliser cette séquence critique de fabrication par la conception de supports visuels, gabarits ou autres aides physiques favorisant les réglages et garantissant leur reproductibilité.

IV.3 Réduction des erreurs post-redémarrage par Poka-Yoke

Dans l'objectif de fournir une solution professionnelle répondant aux exigences de la situation rencontrée, utilisant la méthodologie décrite précédemment.

A. Dans le but de résoudre la problématique d'arrêts récurrents, en lien avec les réglages techniques post changement de format, principalement sur la fardeleuse, il est proposé d'implémenter une solution de type Poka-Yoke afin de faciliter et standardiser les opérations de réglage.
B. Ce système Poka-Yoke est mis en place pour répondre à trois objectifs : éliminer le risque d'erreurs génératrices d'ajustements en phase de changement de format, permettre une réduction importante des temps consacrés au réglage, et simplifier et rendre plus intuitive, rapide et répétable l'opération de réglage.
C. L'identification des étapes du processus de changement de format s'appuie sur la checklist collectée précédemment (Annexe B).
   L'analyse de contenu de la checklist révèle l'existence de deux catégories d'ajustements : ceux réalisés pendant le changement de format, d'une part, et ceux reportés lors de la mise en ligne des bouteilles pleines. On pourra ainsi identifier les causes des arrêts qui surviennent après le changement et envisager le cas échéant des actions ciblées pour les réduire.
   En prenant appui sur les éléments de causalité des interruptions liées aux besoins d'arrivage, des travaux d'analyse ont également été conduits afin d'investiguer leurs causes racines. Pour cela, une double approche a été adoptée : d'une part, l'application de la méthode QQOQCP pour structurer la compréhension du problème (voir Tableau 25), et d'autre part, la technique des 5 Pourquoi pour remonter à l'origine fondamentale de ces ajustements (voir Tableau 26).

Tableau 25 : Analyse QQOQCP – Arrêts répétitifs

Questions	Réponses
Qui ?	Les opérateurs de ligne, principalement ceux affectés à la fardeleuse.
Quoi ?	Ajustements mécaniques ou de positionnements effectués après le changement de format, une fois que les bouteilles pleines arrivent sur la ligne.
Ou ?	Au niveau de la fardeleuse, plus précisément à l'entrée de la machine où les bouteilles sont regroupées avant l'emballage.
Quand ?	Juste après la mise en route de la production, après un changement de format, et dès que les premières bouteilles pleines sont convoyées vers la fardeleuse.
Comment ?	Les opérateurs observent le comportement de la machine avec les nouvelles bouteilles (parfois désalignées, ou mal regroupées), et procèdent à des ajustements manuels (réglage des guides, pression, capteurs, etc.).
Pourquoi ?	Absence de consignes visuelles ou de standards de réglage préétablis pour cette phase. Chaque format nécessite des ajustements spécifiques non documentés.

Tableau 26 : Analyse 5 pourquoi – Arrêts répétitifs

Questions	Réponses
Pourquoi ?	Des arrêts surviennent régulièrement après un changement de format, au niveau de la fardeleuse, en raison d'ajustements nécessaires lors de la mise en ligne des bouteilles remplies.
Pourquoi ?	Parce que les réglages spécifiques à chaque format ne sont pas correctement anticipés ou effectués pendant le changement de format.
Pourquoi ?	Parce qu'il n'existe pas de guide standardisé ou de procédure visuelle claire pour assurer ces réglages de manière fiable.
Pourquoi ?	L'ancien guide de réglages, qui indiquait les valeurs correspondant à chaque format, n'est plus utilisable.
Pourquoi ?	Les étiquettes et les repères de valeurs sont devenus illisibles avec le temps et l'usure.

Cause racine identifiée : L'absence de support visuel fiable et lisible pour guider les réglages spécifiques à chaque format, suite à la détérioration du guide initial.

D. Description de la solution proposée : Système de Repérage Physique Codé

La solution consiste à utiliser un système simple de repérage codé par couleurs et formes, placé sur les parties réglables de la fardeleuse.

Chaque format de bouteille (1 L caisse de 6 bouteilles et autre de 8, 1,5 L, 2 L) est associé à un code visuel unique (couleur + forme) indiquant la position correcte des réglages. Ce système aide les opérateurs à ajuster rapidement et sans erreur la machine d'une façon préventif, grâce à des repères clairs signalent les valeurs d'ajustement sur la hauteur de la balance en ajustant la valeur A2, les guides du convoyeur entrée bouteilles en ajustant les valeurs (A24, A25, A26, A27), et l'ajustement de la hauteur de séparateur de caisse en ajustant la valeur F1. Ces repères sont présentés dans les Figures 33 à 35.

Figure 33 : Réglage de la hauteur de la balance A2

Figure 34 : Réglage des guides du convoyeur entrée bouteilles en ajustant les valeurs (A24, A25, A26, A27)

Figure 35 : Réglage de la hauteur de séparateur de caisse en ajustant la valeur F1

La conception d'un dispositif de prévention des erreurs (Poka-Yoke visuel) : Pour cela, un code visuel est proposé comme référence pour les ajustements, tel que présenté dans le Tableau 27 ci-dessous.

Tableau 27 : Code visuel - référence pour les ajustements

Format bouteille	Repère visuel sur machine	Mémorisation
1 litre – caisse de 6 bts	▶	**Triangle rouge = petit format pack1**
1 litre – caisse de 8 bts	●	**Cercle rouge = petit format pack2**
1,5 litre	▶	**Triangle Jaune = format moyen**
2 litres	▶	**Triangle Blue = grand format**

Pour recueillir les valeurs de réglage adaptées à chaque format, une Gemba a été réalisée sur la ligne de production, afin de rencontrer deux opérateurs expérimentés de la fardeleuse. Ils ont partagé les données qu'ils avaient notées dans un carnet. Auparavant, ces réglages étaient écrits sur des feuilles volantes, souvent perdues et peu pratiques.
Les valeurs correspondant à chaque réglage associées à un code visuel unique en (cm) (voir Tableau 28) :

Tableau 28 : Les valeurs correspondant à chaque réglage

Format	Repère visuel	La hauteur de la balance A2	Les guides convoyeurs				De la hauteur de séparateur de caisse F1
			A24	A25	A26	A27	
1 litre_ Caisse 6	▶	36	45.3	53.1	44.4	45.4	34
1 litre_ Caisse 8	●	36	33.2	32	42.5	41.5	33
1,5 litre	▶	40	49.8	50	45.5	48	40
2 litres	▶	44	35.5	36	32	33	40

Ce dispositif visuel permet de fiabiliser les réglages sur la fardeleuse en réduisant les risques d'erreur humaine. Il constitue une solution simple, économique et facilement intégrable par les opérateurs.

IV.4 Désordre opérationnel : structuration par un audit 5S

L'application de la méthode 5S est essentielle pour la ligne 20–18. Plusieurs problèmes identifiés ont clairement montré la nécessité de structurer l'organisation de la ligne de manière durable. Bien que la méthode 5S a déjà été mise en œuvre auparavant, le manque de suivi a entraîné de nombreuses lacunes. Ces observations ont conduit à la réalisation d'un audit 5S sur les trois machines concernées par l'application du SMED : la souffleuse, la soutireuse et l'étiqueteuse. Cet audit, qui repose sur une grille d'évaluation (voir Tableau 30) organisée autour des cinq piliers du 5S (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke), a permis d'évaluer l'état actuel de l'organisation à chaque machine et de définir un plan d'actions adapté pour améliorer durablement la performance de chaque machine.

Tableau 30 : Grille d'évaluation de l'audit 5S

Score obtenu	Niveau global	Interprétation
0 - 40	**Très faible**	Désorganisation importante, 5S non appliqué
41 - 60	**Insuffisant**	Démarche partielle, des bases sont posées mais non maîtrisées
61 - 80	**Satisfaisant**	5S bien entamé, mais des améliorations à stabiliser
81 - 100	**Excellent**	5S maîtrisé et soutenu au quotidien

L'audit 5S effectué sur l'étiqueteuse a révélé un score de 51 sur 100, ce qui indique un niveau insuffisant et une mise en œuvre partielle de la méthode 5S. Les observations soulignent un manque d'organisation visuelle (comme le marquage au sol et l'étiquetage), la présence d'éléments superflus sur le poste, ainsi qu'un manque de standardisation. Bien que les opérateurs ont reçu une formation sur la méthode, son application sur le terrain reste limitée (voir Figure 36). Pour corriger les insuffisances identifiées, il est conseillé de renforcer l'organisation visuelle du poste avec un marquage clair des zones et des emplacements, d'établir des normes de nettoyage avec un planning dédié, de former à nouveau les opérateurs à la méthode 5S, et de mettre en place un suivi régulier à travers des audits sur le terrain.

Audite 5S Machine Etiquetteuse

Seiri (Trier) : éliminer ce qui est inutile et décider de ce qui est nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Le poste d'étiquettage est il encombré par les bobines d'étiquette, les structures de format ou de produits finis inutiles ?						Les bobines des anciennes ou nouvelles étiquettes n'ont pas un emplacement spécial
Y a-t-il des pièces présents sur le lieu de travail qui ne sont pas nécessaires ?						Insuffisence des portes structures de format
Y a-t-il des outils, formats ou accessoires (clés, dégraissant, gants...) inutiles dans la zone d'étiquettage ?						
Y a-t-il d'autres équipements non utilisés sur le lieu de travail ? (tables de travail, étagères, chaises,etc.)						Equipements mal utilisé
Y a-t-il des instructions, procédures ou affichages visuels obsolètes dans les classeurs ou sur les murs ?						

0	Non respect
1	Très faible respect
2	Un certain respect
3	Respect notable
4	Respect total

Seiton (Situer) : définir un emplacement spécifique pour chaque élément nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les éléments autour de l'étiqueteuse (les portes format, les étiquettes et la table de travail) sont-ils identifiés et organisés de manière visuelle ?						Ils ne sont pas tous identifiés et ne sont pas utilisés correctement
Les accessoires, format et outils sont-ils rangés et organisés de manière rationnelle, afin qu'ils puissent être facilement pris et remis à leur place, en fonction de leur fréquence d'utilisation et de leur emplacement ?						Certaines structures de format encombrent l'espace, bien qu'elles soient rarement utilisées (Format 2L)
Y a-t-il des marquages pour identifier les zones au sol, les passages et les zones de rebut ?						Aucun marquage
Y a-t-il des étiquettes indiquant l'emplacement de tous les outils, étiquettes et formats ?						Ne sont pas respectés
Les documents essentiels à l'opération d'étiquettage sont-ils bien rangés et clairement identifiés ?						

Seiso (Nettoyer) : maintenir le lieu de travail propre et éliminer les anomalies

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les outils de nettoyage, les équipements et les produits sont-ils disponibles, accessibles et adaptés ?						
Les formats, poste de travail, armoires et portes format sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						
Les causes de contamination et de saleté (colle, humidité, poussières) ont-elles été identifiées et traitées ?						Pas d'indication
Les sols, postes, allées et zone de maintenance sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						
La propreté est-elle une préoccupation constante de l'équipe ? Le nettoyage est-il une activité continue et partagée par l'équipe ?						

Seiketsu (Standardiser) : créer un environnement de travail visuellement organisé

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Existe-t-il des standards et un système de codification partagé pour le marquage des zones, des outils, des format et des équipements ?						
Les routines de nettoyage, les standards de rangement et les routines d'inspection ont-ils été standardisés visuellement ?						Ils manquent de standardisation visuelle, mais restent identifiables sur le pupitre de la machine
Les procédures opérationnelles et les normes d'étiquetage sont-elles claires et accessibles ?						
Existe-t-il des standards clairs pour la gestion et l'approvisionnement des consommables et matières premières utilisés au poste d'étiquettage (étiquettes, lubrifiants, produits de nettoyage, colle et PdR) ?						
Les standards des trois premiers 3S sont-ils clairs et à jour ?						Un faible respect

Shitsuke (Soutenir) : maintenir les améliorations et poursuivre les améliorations à l'échelle de l'entreprise						
Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
La vision des 5S est-elle partagée dans le plan et les objectifs sont-ils clairement communiqués ?						
Tous les opérateurs ont-ils été formés aux 5S et y a-t-il une activité continue autour des 5S dans toute la ligne ?						Les opérateurs sont formés à la méthode 5S, mais elle n'est pas appliquée sur le terrain
Les suggestions d'amélioration, projets et plans d'action ont-ils été structurés et affichés visuellement, et sont-ils visibles par tous ?						
Tout le monde est-il informé des réussites passées et actuelles du poste de travail ?						
Un système d'audit et de reporting est-il en place ?						Il existe un système gembawalks sur terrin mais ne focalise pas sur l'application 5S
			Score totale:	51/100		

Figure 36 : Audit 5S sur la machine étiqueteuse

L'audit 5S a été effectué sur la machine souffleuse, le score obtenu est de 81 sur 100, ce qui indique un niveau excellent. Cela montre que la mise en œuvre de la démarche 5S est globalement bien maîtrisée. La plupart des zones de travail sont correctement identifiées et étiquetées, et des check-lists de nettoyage sont en place. Cependant, quelques anomalies subsistent, comme la présence d'équipements inutilisés, une organisation partielle des armoires à outils, et un manque de clarté dans la gestion des consommables. De plus, il est essentiel de mettre à jour régulièrement les documents (Annexe D). Pour renforcer ces acquis, il est conseillé de mettre à jour les marquages visuels après les changements liés au SMED, d'améliorer l'approvisionnement en consommables, et de renforcer le management visuel des bonnes pratiques 5S avec des rappels affichés et des audits plus ciblés.
L'audit 5S réalisé sur la machine soutireuse effectue un score de 68 sur 100, ce qui reflète un niveau satisfaisant, mais il y a encore plusieurs aspects à améliorer. L'environnement de travail est généralement bien organisé, mais il reste des lacunes : le marquage visuel des espaces partagés entre les opérateurs est insuffisant, les documents sont partagés avec une autre ligne sans distinction claire, et l'identification des outils n'est pas systématique. En outre, l'absence de check-lists de nettoyage et le manque de régularité des audits limitent le maintien des standards (Annexe D). Il est donc conseillé de structurer l'organisation documentaire, d'implanter un marquage visuel clair des zones de travail, de créer des check-lists de nettoyage, et d'instaurer un audit 5S soutenu par un tableau de bord visuel, afin de garantir la pérennité des bonnes pratiques sur le poste.

IV.5 Conclusion

En complément de la méthode SMED et de la simulation à événements discrets, ce dernier chapitre a démontré que l'intégration du Jidoka, à travers la mise en place d'un système Poka-Yoke et d'un audit 5S, renforce considérablement la fiabilité des changements de série. Le Poka-Yoke permet de limiter les erreurs d'ajustement lors des redémarrages, en agissant comme un dispositif préventif contre les écarts opérationnels. Parallèlement, l'audit 5S structure l'environnement de travail, réduisant les anomalies liées au désordre ou au manque de standardisation. Les résultats obtenus sur les différents équipements montrent une progression variable dans l'application des principes 5S. L'étiqueteuse, avec un score de 51/100, présente un niveau insuffisant : la démarche est amorcée, mais reste partielle et non maîtrisée. En revanche, la souffleuse a atteint un score de 81/100, indiquant un niveau excellent, avec des pratiques 5S bien intégrées et soutenues au quotidien. La soutireuse, quant à elle, a obtenu 68/100, traduisant un niveau satisfaisant, avec une démarche bien engagée mais nécessitant encore des efforts de stabilisation. Ensemble, ces deux actions renforcent la standardisation, la fiabilité des redémarrages de production, contribuant ainsi à l'excellence opérationnelle et à l'ancrage durable des principes du Lean sur la ligne de production 20–18.

Conclusion générale

Face à un paysage industriel en constante évolution, caractérisé par la diversification rapide des produits et l'accroissement incessant des exigences client, l'optimisation continue des processus de production s'affirme non seulement comme un avantage concurrentiel, mais comme un enjeu majeur, voire une condition de survie, pour la compétitivité des entreprises. Dans ce contexte globalisé et hyperconcurrentiel, chaque inefficacité se traduit directement par des pertes financières et une érosion de la part de marché.

Ce Projet de Fin d'Études s'est inscrit avec pertinence dans cette optique, en s'attaquant à la problématique pressante des dépassements des temps de changement de série sur la ligne de production 20-18 au sein d'ECCBC Algérie (Fruital), un acteur majeur du secteur agroalimentaire dont la position de leader national exige une performance opérationnelle irréprochable.

L'objectif primordial de ce travail était double et profondément stratégique : d'une part, optimiser les performances intrinsèques de la ligne en fiabilisant ses arrêts planifiés et ses redémarrages, et d'autre part, établir une approche méthodologique robuste et reproductible. Cette reproductibilité vise à servir de modèle pour la standardisation des pratiques industrielles à une échelle bien plus large, celle du groupe ECCBC, contribuant ainsi à une synergie et une excellence opérationnelle trans-site. Pour ce faire, nous avons mobilisé une approche intégrée du Lean Manufacturing, conjuguant de manière synergique les piliers fondamentaux du Juste-à-temps (JIT) visant à produire uniquement ce qui est nécessaire, quand c'est nécessaire, et du Jidoka, principe d'autonomisation et de détection/prévention des anomalies.

Cette démarche a été enrichie par l'apport stratégique d'outils avancés tels que les systèmes MES pour une collecte de données de production en temps réel, et la simulation à événements discrets, permettant de modéliser et d'anticiper les effets des optimisations avant leur implémentation physique.

Le premier chapitre a solidement posé les fondations conceptuelles de notre démarche, fournissant le cadre théorique indispensable à la compréhension et à la réussite du projet. Il a introduit en détail les principes fondamentaux du Lean Manufacturing, en détaillant ses piliers, ses outils essentiels et ses méthodes clés. Nous avons notamment exploré la méthode SMED pour la réduction drastique des temps de changement de série, le Poka-Yoke pour la prévention des erreurs humaines par des dispositifs anti-erreurs, et la démarche 5S pour l'organisation et la standardisation de l'environnement de travail. La méthode DMAIC a été présentée comme la structure méthodologique rigoureuse et itérative guidant l'ensemble du projet, assurant une approche systématique de résolution de problèmes. Le chapitre a également souligné l'importance croissante des systèmes MES dans le suivi de production et de la simulation à événements discrets comme outil de validation et d'anticipation des gains.

Le deuxième chapitre a concrétisé cette approche théorique par l'application effective de la méthode SMED sur la ligne 20-18. En suivant rigoureusement les phases du DMAIC, nous avons d'abord pu Définir précisément la problématique des changements de série comme une cause majeure d'inefficacité, identifiant la ligne 20-18 comme une cible prioritaire pour son impact stratégique. La phase Mesurer a ensuite permis de quantifier objectivement les pertes qu'ils engendraient, en établissant un diagnostic précis des arrêts historiques. L'Analyse a mis en lumière les sources de gaspillage prédominantes, avec une emphase particulière sur l'absence de standards clairs comme facteur aggravant. La phase Innover a conduit à l'implémentation d'actions correctives concrètes et créatives, telles que la conversion méthodique des réglages internes en réglages externes, la standardisation des outils et des procédures, et la mise en place de formations spécifiques. Enfin, la phase Contrôler a assuré le suivi post-implémentation, validant par la collecte et l'analyse de données sur 40 jours une réduction mesurable et durable

des temps de changement. Cette phase opérationnelle a ainsi traduit les concepts du Lean en actions concrètes et mesurables sur le terrain.

Les retombées de cette optimisation des changements de série ont été visualisées et quantifiées de manière éloquente dans le troisième chapitre grâce à une simulation comparative exhaustive réalisée sous le logiciel Arena. Cette modélisation a permis de comparer les scénarios avant et après implémentation du SMED, fournissant une preuve irréfutable de son efficacité. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'efficacité redoutable du SMED, se traduisant par un gain significatif de plus de 100 000 bouteilles sur une période de 40 jours seulement. Plus impressionnant encore, une récupération cumulée d'environ 1 504,99 minutes, soit plus de 25 heures de production additionnelle par an, a été projetée, permettant la fabrication potentielle de 752 495 bouteilles supplémentaires. Ces chiffres non seulement attestent de l'impact direct et substantiel d'une meilleure structuration des processus sur la performance industrielle, mais soulignent également le potentiel stratégique de la simulation pour la prise de décision et l'investissement dans l'amélioration continue.

Enfin, le quatrième chapitre a complété notre démarche en s'attaquant à la problématique cruciale de la fiabilité des redémarrages post-changement, souvent source de micro-arrêts et de défauts qualité. L'intégration de dispositifs Poka-Yoke, agissant comme des mécanismes anti-erreurs et de détection des anomalies, a permis de minimiser les risques d'erreurs d'ajustement, garantissant ainsi des reprises de production plus fluides et plus robustes. Parallèlement, la mise en place d'un audit 5S a structuré et amélioré durablement l'environnement de travail, réduisant le désordre, favorisant la propreté et instaurant une culture de la standardisation. Les scores obtenus sur les différents équipements, allant d'un niveau insuffisant sur l'étiqueteuse à un niveau excellent sur la souffleuse, ont illustré les progrès variables mais significatifs dans l'intégration des principes 5S. Ces résultats mettent en lumière l'importance d'une persévérance et d'un suivi continu pour ancrer ces pratiques dans la culture d'entreprise, renforçant ainsi la standardisation et la stabilité des opérations.

Cela étant dit, certaines limites ont restreint la portée immédiate du projet. La phase de déploiement du système MES étant toujours en cours sur la ligne 20–18, la quantité de données disponibles pour l’analyse statistique a été insuffisante. Cela a limité la profondeur des études de performance et la précision des indicateurs obtenus. Le temps imparti au stage, relativement court au regard de l’ampleur du sujet, n’a pas permis un suivi sur le long terme des actions mises en œuvre, ni leur généralisation à d’autres lignes. De plus, certaines améliorations proposées nécessitaient l’intervention de prestataires ou des investissements matériels, qui n’ont pas pu être réalisés durant la période du projet.

En conclusion, ce Projet de Fin d'Études a démontré avec succès comment l'application rigoureuse des principes du Lean Manufacturing, à travers des méthodes éprouvées et complémentaires comme le SMED et l'intégration des piliers du Jidoka par le Poka-Yoke et le 5S, peut transformer une problématique opérationnelle en un puissant levier d'excellence. Les gains tangibles en productivité, la fiabilisation accrue des processus sur la ligne 20-18 de Fruital, et la capacité à modéliser et valider ces améliorations par la simulation, valident non seulement la pertinence de l'amélioration continue dans un secteur aussi exigeant que l'agroalimentaire, mais posent également les bases solides d'une stratégie de standardisation internationale des pratiques industrielles au sein du groupe ECCBC. Ce travail ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour l'extension de cette démarche à d'autres lignes ou sites du groupe, consolidant la position de l'entreprise dans un marché en constante évolution et garantissant une performance durablement optimisée et une culture de l'excellence opérationnelle ancrée.

Annexes

Annexe A : Technologies des systèmes MES

Cette section présente ces technologies, leur intégration au sein des MES, ainsi que les fonctionnalités résultant de cette intégration (voir Figure 37).

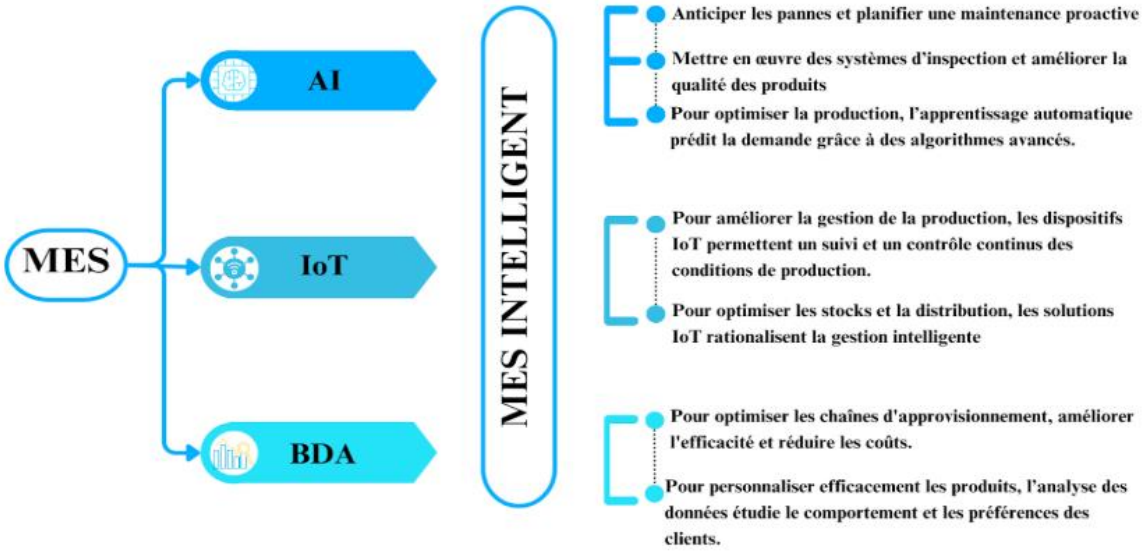


Figure 37 : Technologies et fonctionnalités des IMES

L'intelligence artificielle, domaine clé de l'informatique, permet de reproduire des tâches humaines complexes grâce à des technologies formant l'acronyme ABCDE (Analytics technology, Big Data, Cloud Computing, Domain knowledge and Evidence) [34]. IMES, elle améliore la planification, la surveillance, la maintenance prédictive, le contrôle qualité et la prévision de la demande [35] [36] [37]. L'IA exploite les données issues des capteurs, machines et systèmes pour détecter les pannes, optimiser les maintenances [27][38], automatiser les inspections visuelles grâce à la reconnaissance d'image [28][29][39], et prévoir la demande à partir des historiques et tendances du marché [31][40]. Cette combinaison IA avec IMES favorise la flexibilité, la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité et une gestion intelligente de la chaîne logistique.

L'Internet des objets, permet la collecte de données en temps réel pour surveiller et contrôler les processus en facilitant la communication entre machines, méthodes et produits, et leur interaction avec le cloud pour un traitement efficace des données [41][37][42]. Intégré à l'IMES, l'IoT permet le suivi continu des paramètres de production grâce à des capteurs et étiquettes RFID, optimisant la localisation des flux et le contrôle des ressources [25][43]. Les données collectées sont visualisées via des interfaces graphiques pour améliorer la collaboration et assurer l'intégration des technologies opérationnelles et informatiques [34][44]. Le cloud favorise la communication rapide du réseau pour une prise de décision en temps réel [34]. En logistique, l'IoT assure le suivi des produits à travers toute la chaîne grâce aux capteurs et RFID, avec une localisation précise via GPS, et optimise le transport des marchandises en garantissant sécurité, qualité et rapidité des livraisons [40][44][45].

Le Big Data Analytics, fondé sur l'IA et le ML, permet de traiter en temps réel de grandes quantités de données afin d'optimiser les processus, ajuster automatiquement les paramètres de production et soutenir la prise de décision stratégique [46][47]. Intégré à l'IMES, il renforce l'efficacité de la chaîne logistique grâce à une visibilité en temps réel sur les stocks, les performances machines et les retards, tout en facilitant la coordination entre SCM (Supply Chain Management) et ERP [45][47]. Il permet également l'analyse des tendances, la

planification optimisée, la maintenance prédictive, la traçabilité, et une réactivité rapide face aux perturbations [28][49]. Côté client, l'IMES exploite le BDA pour analyser les comportements, personnaliser l'offre, améliorer la gestion des commandes et introduire des innovations comme les étagères intelligentes, renforçant ainsi la fidélité et la rentabilité [25][50][51].

Bien que l'IA, la BDA et l'IoT forment la fondation technologique, le véritable pouvoir de l'IMES émerge de leur intégration avec des innovations complémentaires de l'Industrie 4.0 au sein du MES. Ceux-ci incluent :

- **Cyber Physical Systems (CPS) :** permet des usines intelligentes en intégrant des capacités cybernétiques avec des systèmes physiques. IMES intègre CPS composants (machines, capteurs et plus) pour communication continue, prise de décision, et contrôle du processus [41][65].
- **Cloud Computing (CC) :** Les plateformes cloud permettent le partage des données et la surveillance des processus à travers chaînes d'approvisionnement. Pour améliorer l'automatisation et bénéficier accès aux données de production en temps réel, IMES applique des solutions basées sur le cloud [27].
- **Fabrication additive :** IMES prend en charge production flexible en intégrant l'impression 3D pour la fabrication à la demande et le prototypage rapide [41].
- **Réalité augmentée (AR) :** améliore l'IMES fonctionnalité en fournissant aux opérateurs du temps réel instructions d'assemblage ou de réparation, améliorant interaction homme-machine [27].
- **Simulation et jumeaux numériques :** créer des virtuels répliques de systèmes physiques, alimentant en temps réel données à IMES. Cela permet une maintenance prédictive, optimisation, et détection d'anomalies [27][40].
- **Robots Autonomes (Cobots) :** IMES gère la collaboration humain-robot, assurant la sécurité et intégration efficace de systèmes autonomes dans les flux de travail de production [27].
- **Cyber-sécurité :** IMES repose sur une cyber-sécurité fiable mesures pour protéger les systèmes interconnectés et assurer une communication sécurisée entre machines et processus [66].
- **Communication de machine à machine (M2M)** : les réseaux permettent la communication directe entre les machines, améliorant l'efficacité opérationnelle. IMES utilise les données M2M pour prendre des décisions en temps réel [67].
- **Technologie RFID :** les étiquettes RFID fournissent un temps réel le suivi et la traçabilité des ressources, améliorant la précision IMES et la réduction des délais de production [39][66].
- **Protocoles de communication industrielle (OPC-UA, Fieldbus) :** IMES utilise des protocoles comme OPC-UA pour collecter et transférer les données de la production, assurant l'interopérabilité entre IT et systèmes OT [41].
- **Logique floue des réseaux de neurones :** IMES emploie outils d'IA comme les réseaux de neurones pour analyser les données générées par la machine, et identifier des motifs, et optimiser les processus de production [51].
- **Informatique visuelle :** permet la visualisation avancée grâce à des outils intégrés dans l'IMES améliorant les interfaces homme-machine permettant un affichage et une analyse intuitifs des données [66].
- **Technologie Blockchain :** Bien que pas directement lié à IMES, la blockchain peut améliorer l'offre transparence de la chaîne et des données de production sécurisées, soutenir indirectement les opérations IMES [41].

Annexe B : Supports techniques et documents SMED

Souffleus — **Nom Opérateur**

Type de changement	Changement/ inverse	Ordre	Check	Organe	Etape	Outillage	In / Ex	Temps	Commentaire
Changement de parfum (meme volume)	Coca, Coca zero				Arret machine	Pupitre Souffleuse			
					Changement de recette	Pupitre Souffleuse			
	Coca et Coca zero vers Fanta et Sprite				Arret machine	Pupitre Souffleuse			
					Arret convoyeur	Pupitre Convoyeur à air			
					Préparation de prochaine format	Moules			
					Porter EPI	Gants			
					Preparations outillages	Chiffon, Pompe à graisse, Clé 8			
					Fermeture eau refroidissement: Fermeture vannes	Manuelle			
					Démontage moules	Clé 8			
					Nettoyage moules	Chiffon, Alchool			
					Remettre moules à leurs places	Manuelle			
					Montage moules	Clé 8			
					Nettoyage nouveaux moules	Chiffon			
					Teste manuelle de fonctionnement de moule: Positionnement du commutateur en mode manuelle	Jog			
					Choix de type de recette pour le format qui convient	Pupitre Souffleuse			
					Fermeture des portes	Manuelle			
					Teste de fonctionnement lancer la machine pour quelques bouteilles	Pupitre Souffleuse			

Souffleuse | Etiquetteuse | Soutireuse | Fardeleuse | Palettiseur

Figure 38 : Exemple d'une checklist de changement de série de la souffleuse

Etiqueteuse — **Nom de l'opérateur :** BELKIN

Type de changement	Changement	Ordre	Check	Organe	Etape	Pièce	Outillage	Commentaire
Changement de parfum (meme volume)	Sprite, Coca, Coca zero (1L) Tous parfums (pour 1.5L)				Changement etiquette. la même recette			1°. les parametres propre a la recette se fait manuelle
	Sprite, Coca, Coca zero vers Fanta (1L)	1	ok	Cylindres de transfert étiquettes (tombour)	Démonter le tombour étiquettes		Manuelle	5 Ajustement porte bobine 1
		3			Monter le nouveau tombour étiquettes		Manuelle	Ajustement porte bobine 2.
		2	ok	Les brosses	Démonter les brosses		Manuelle	inclinaison (A)
		4			Monter les brosses		Manuelle	Réglage du guide - bande (C)
Changement de format (meme parfum)	1L, 1.5L, 2L		ok	Les guides	Démonter les guides 1		Manuelle	Avant / Arrière (D)
		1			Monter les nouveaux guides 6		Manuelle	
			ok.	Les brosses	Démonter les brosses 2		Manuelle	
		2			Monter les nouvelles brosses 7		Manuelle	
		6		Hauteur de table	Réglage de la hauteur de la table par le choix de recette sur pupitre 11		Automatique	
		3	ok	Les étoiles d'entrée	Démonter les étoiles d'entrée 3		Manuelle	
					Monter les nouvelles étoiles d'entrée 10		Manuelle	
		4	ok	Cylindres de transfert des étiquettes	Démonter le tombour étiquettes 4		Manuelle	
					Monter le nouveau tombour étiquettes 8		Manuelle	
		5	ok.	Selettes de transfert des bouteilles	Démonter les selettes étiquettes 5		Manuelle	
					Monter le nouveau tombour étiquettes 9		Manuelle	
Changement de format et de parfum				Les guides	Démonter les guides		Manuelle	
					Monter les nouveaux guides		Manuelle	
				Les brosses	Démonter les brosses		Manuelle	
					Monter les nouvelles brosses		Manuelle	
				Hauteur de table	Réglage de la hauteur de la table par le choix de recette sur pupitre		Automatique	
				Porte bobine 1	Ajustement de porte bobine 1		Manuelle	
				Porte bobine 2	Ajustement de porte bobine 2		Manuelle	
				Pupitre étiquetteuse	Réglage de la recette de format équivalente		Automatique	
				Les étoiles d'entrée	Démonter les étoiles d'entrée		Manuelle	

Figure 39 : Exemple d'une checklist de changement de série de la souffleuse remplie par l'opérateur

Article	SKU	Pack & Size	2081	3081	1210	3272	8133	9209	9210	1250	9274	9360	1082	1016	3016	8135	9380	9659	1054	2016
			SPRITE PET 1L	F ORANGE PET 1L	FANTA WTF 1L	F CITRON PET 1L	COCA ZERO PET 1L	F FRAISE PET 1L	F POMME PET 1L	F MANGUE PET 1L	F CASSIS PET 1L	F ANANAS PET 1L	COCA PET 1L - PACK 8	COCA PET 1,5L	F ORANGE PET 1,5L	COCA ZERO PET 1,5L	F POMME PET 1,5L	F FRAISE PET 1,5L	COCA PET 2L	SPRITE PET 1,5L
			Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P6	Pet 100 -P8	Pet 150	Pet 150	Pet 150	Pet 150	Pet 150	Pet 200	Pet 150
2081	SPRITE PET 1L	Pet 100 -P6	-	115	115	115	175	115	115	115	115	115	175	175	175	175	175	175	175	175
3081	F ORANGE PET 1L	Pet 100 -P6	115	-	115	115	175	115	115	115	115	115	175	175	175	175	175	175	175	175
1210	FANTA WTF 1L	Pet 100 -P6	175	175	-	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
3272	F CITRON PET 1L	Pet 100 -P6	115	115	115	-	175	115	115	115	115	115	175	175	175	175	175	175	175	175
8133	COCA ZERO PET 1L	Pet 100 -P6	115	115	115	115	-	115	115	115	115	115	115	175	175	175	175	175	175	175
9209	F FRAISE PET 1L	Pet 100 -P6	175	175	175	175	175	-	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
9210	F POMME PET 1L	Pet 100 -P6	115	115	115	115	175	115	-	115	115	115	175	175	175	175	175	175	175	175
1250	F MANGUE PET 1L	Pet 100 -P6	175	175	175	175	175	175	175	-	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175
9274	F CASSIS PET 1L	Pet 100 -P6	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175	175	175	175	175	175	175	175	175
9360	F ANANAS PET 1L	Pet 100 -P6	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175	175	175	175	175	175	175	175
1082	COCA PET 1L - PACK 8	Pet 100 -P8	115	115	115	115	175	115	115	115	115	115	-	175	175	175	175	175	175	175
1016	COCA PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	115	175	115	175	175	115
3016	F ORANGE PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175	115	115	175	115
8135	COCA ZERO PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175	175	175	175
9380	F POMME PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	115	175	-	115	175	115
9659	F FRAISE PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175	175
1054	COCA PET 2L	Pet 200	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	-	175
2016	SPRITE PET 1,5L	Pet 150	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	175	115	175	115	115	175	-

Figure 40 : Matrice des temps de changement de série de la ligne 20–18

De / A	Coca cola	F.Orange	F.Citron	F.Pomme	Sprite	F.Fraise	F.Annanas	Coca cola zero	MM.Blue berry	MM.Citron	MM.tropical
Coca cola		ET	ET	ET	ET	ET	ET	3ET (test clinistix)	3ET	3ET	3ET
F.Orange	3ET		ET	ET	ET	ET	ET	3ET (test clinistix)	3ET	3ET	3ET
F.Citron	3ET	ET		ET	ET	ET	ET	3ET (test clinistix)	3ET	3ET	3ET
F.Pomme	3ET	ET	ET		ET	ET	ET	3ET (test clinistix)	3ET	3ET	3ET
Sprite	3ET	ET	ET	ET		ET	ET	3ET (test clinistix)	3ET	3ET	3ET
F.Fraise	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET		3ET	3ET	3ET	3ET	3ET
F.Annanas	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET		3ET	3ET	3ET	3ET
Coca cola zero	3ET	ET	ET	ET	ET	ET	ET		3ET	3ET	3ET
Minute Maid Blue berry	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET		3ET	3ET
MM.Citron	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET		3ET
MM.tropical	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	3ET	

Figure 41 : Matrice de sanitation de Fruital Coca Cola

Tableau 29 : Résultats du chronométrage des tâches de la soutireuse du changement de parfum 3ET sans changement de volume (Passage du Coca 1L vers Fanta pomme 1L)

Tâche	Temps	Durée
Démarrage fin production (Mixeur et Soutireuse)	**6 :12**	**1 min**
Indiquer le nombre de bouteilles restants dans la remplisseuse	**6 :17**	**1 min**
Jeter le reste du sirop dilué	**6 :25**	**3min 32**
Dernière bouteille bonne sortante	**6 :28**	**-**
Drainage automatique	**6 :30**	**2 min**
Procédure de nettoyage COP	**6 :32**	**256 min**
Rinçage eau traité 3ET (Mixeur et Soutireuse)	**10 :48**	**10 min**
Evacuation	**10 :58**	**10 min**
Rinçage avec soude + NODSAN	**11 :08**	**15 min**
Evacuation	**11 :23**	**25 min**
Rinçage eau traité	**11 :48**	**10 min**
Appel labo pour vérifier les traces de la soude	**11 :54**	**-**
Test labo et validation	**11 :56**	**1 min**
Inverser les coudes vers le mode production	**11 :57**	**1min 20**
Ouvrir la pompe de refroidissement	**11 :57**	**-**
Démarrage rinçage eau froide	**11 :58**	**10 min**
Fin rinçage eau froide	**12 :10**	**-**
Ouvrir la pompe CO2	**12 :10**	**-**
Appel siroperie	**12 :10**	**-**
Mixeur en position de base	**12 :11**	**-**
Libération pompe sirop	**12 :11**	**-**
Soutireuse en position de base	**12 :13**	**-**
Arrivé sirop	**12 :17**	**-**
Ajustement valeur Brix par remplissage partiel	**12 :28**	**5 min**
Fin ajustement	**12 :33**	**-**
Confirmer la réception du boisson soutireuse	**12 :33**	**-**
Remplissage réservoir soutireuse	**12 :36**	**6 min**
Fin de remplissage du réservoir de la soutireuse	**12 :42**	**-**
1 ère Bouteille du premier tour	**13 :18**	**-**
Test laboratoire (Brix, CO2)	**13 :19**	**5 min**
Démarrage production	**13 :25**	**-**

Tableau 30 : Résultats du chronométrage des tâches de la soutireuse du changement de format 3ET avec changement de volume (Passage du Sprite 1L vers Coca 1.5 L)

Tâche	Temps	Durée
Démarrage fin production mixeur (par valeur de Brix)	**09 :38**	**1 min**
Libération sirop	**09 :39**	**1 min**
Écoulement d'eau	**09 :40**	**3 min**
Fin production soutireuse (par nombre de récipient produit)	**09 :40**	**-**
Dernière bouteille de la souffleuse	**09 :45**	**-**
Préparation des structures du nouveau format	**09 :51**	**5 min**
Réception des bouteilles de la souffleuse	**10 :03**	**-**
Dernière bouteille remplie	**10 :08**	**-**
Drainage	**10 :08**	**2 min**
Rinçage fin production	**10 :09**	**10 min**

Activation du vidage des bouchons	**10 :11**	
Vidage bouchons distributeur	**10 :17**	**1min**
Changement de format	**10 :19**	**10 min**
Fin changement de format	**10 :29**	**-**
Rinçage fin production (Cloche + Robinets)	**10 :30**	**10 min**
Démarrer le COP	**10 :40**	**60 min**
Pivoter les fausses bouteilles vers l'intérieur	**11 :38**	**1 min**
Inverser les coudes « mode CIP »	**11 :38**	**1 min**
Evacuation soutireuse et mixeur	**11 :42**	**15 min**
Rinçage avant la soude	**11 :57**	**1 min**
Evacuation (Circulation conduite, cloche)	**11 :59**	**1 min**
Démarrage circuit fermé de la soude	**12 :06**	**15 min**
Fin circulation de la soude	**12 :21**	**-**
Vidage du mixeur et de la soutireuse avec l'air stérile	**12 :21**	**6 min**
Début rinçage après la soude	**12 :27**	**2 min**
Evacuation et vidage	**12 :29**	**10 min**
Désactiver les fausses bouteilles	**12 :39**	**-**
Désactiver le démarrage externe	**12 :39**	**-**
Ouvrir les vannes du froid	**12 :40**	**-**
Drainage soutireuse	**12 :41**	**2 min**
Rinçage sans fausses bouteilles avant préparation	**12 :43**	**10 min**
Préparation et choix de la nouvelle recette	**12 :53**	**1 min**
Arrivé sirop	**12 :57**	**-**
Echantillonnage labo avant soutirage	**13 :06**	**2 min**
Remplissage partiel et ajustement	**13 :13**	**4 min**
Fin ajustement et libération production	**13 :17**	**-**
Confirmer la réception du boisson soutireuse	**13 :17**	**-**
Remplissage du réservoir de la soutireuse	**13 :17**	**17 min**
Démarrage premier tour	**13 :35**	**-**
1ère bouteille bonne	**13 :36**	**-**
Test laboratoire (Brix, CO2)	**13 :37**	**5 min**
Démarrage production	**13 :42**	**-**

Tableau 31 : Résultats du chronométrage des tâches de l'étiqueteuse du changement de format avec changement de volume (Passage du Sprite 1L vers Coca 1.5 L)

Tâches	Temps	Durée
Porter les gants (EPI)	**10 :13**	**2 min**
Désactiver le bouton marche	**10 :13**	
Mettre la machine en mode manuelle	**10 :13**	
Désactiver les deux postes	**10 :14**	
Préparer le prochain format	**10 :15**	
Démonter la brosse du poste numéro 1	**10 :16**	
Nettoyage	**10 :18**	**30 sec**
Démonter le cylindre de transfert du poste numéro 1	**10 :19**	**1 min**
Démonter la brosse du poste numéro 2	**10 :19**	**30 sec**
Démonter les étoiles d'entrée	**10 :19**	**4 min**
Démonter les guides d'entrée	**10 :23**	
Choisir le type de la recette et le nombre de poste activé	**10 :24**	
Afficher les paramètres de chaque poste sur le pupitre	**10 :25**	
Vérification des messages d'alarmes affichées et éliminer les taches faites	**10 :25**	

Nettoyage	**10 :25**	**19 min**
Hauteur de la table (B) du poste numéro 1	**10 :25**	**15 min**
Réglage porte bobine 1 du poste numéro 1	**10 :25**	
Réglage porte bobine 2 du poste numéro 1	**10 :25**	
Réglage du guide bande (C) du poste numéro 1	**10 :25**	
Hauteur de la table (B) du poste numéro 2	**10 :25**	
Réglage porte bobine 1 du poste numéro 2	**10 :25**	
Réglage porte bobine 2 du poste numéro 2	**10 :25**	
Réglage du guide bande (C) du poste numéro 2	**10 :25**	
Démonter le cylindre de transfert du poste numéro 2	**10 :47**	**1 min**
Nettoyage	**10 :48**	
Monter le cylindre de transfert du poste numéro 2		
Monter la brosse de poste numéro 2		
Monter le cylindre de transfert numéro 1		
Nettoyage		
Monter la brosse du poste numéro 1		
Nettoyage		
Monter les étoiles de transfert	**11 :04**	**7 min**
Monter les guides d’entrée	**11 :10**	
Nettoyage	**11 :10**	**5 min**
Démonter l’ancienne bobine poste 2	**11 :15**	
Nettoyage du rouleau renvoi du poste numéro 2	**11 :15**	**5 min**
Préparer les étiquettes	**11 :20**	**5 min**
Raccorder la bobine du poste numéro 2	**11 :25**	**2 min**
Activer le porte bobine du poste numéro 2	**11 :26**	**1 min**
Démonter l’ancienne bobine poste 1	**11 :26**	
Nettoyage du rouleau renvoi du poste numéro 1	**11 :26**	**2 min**
Raccorder la bobine du poste numéro 1	**11 :28**	**2 min**
Activer la porte bobine du poste numéro 1	**11 :30**	**1 min**
Nettoyage	**11 :31**	**2 min**
Ajuster les postes de coupes postes 1,2	**11 :33**	**7 min**
Contrôler visuellement et ajuster la position de l’étiquette	**11 :40**	**2 min**
Préparer les sellettes	**11 :42**	**1 min**
Changer les sellettes + nettoyage emplacement	**11 :43**	**17 min**
COP	**12 :00**	
Démonter et monter les guides de sortie	**12 :29**	**10 min**
Intervenir sur le convoyeur à air		
Ajustement étiquette essayes avec bouteilles	**12 :55**	
Fin ajustement	**13 :08**	

Annexe C : Détail de l'analyse statistique

C.1. Validation de choix de plateforme Evocon

Afin de justifier statistiquement le choix des données Evocon et la négligence des rapports de production, Procédant à une série de tests statistiques sur les écarts observés entre les deux sources de données. Cette approche quantitative permet d'objectiver la fiabilité relative de chaque source.

Analyse quantitative des écarts

Calcul de l'erreur relative moyenne : l'erreur relative constitue l'indicateur principal de fiabilité des données dans le contexte industriel. Elle se calcule selon la formule :

Erreur relative (%) = (|Écart observé| / Temps de référence) × 100

Avec un écart moyen de 26,2 min et un temps de référence estimé à 60 minutes, l'erreur relative moyenne des rapports de production atteint 43,67% ce taux dépasse largement le seuil d'acceptabilité de 10% généralement admis pour les données industrielles, démontrant l'inadéquation manifeste des rapports pour une modélisation précise des processus de changement de série.

Évaluation de la dispersion des données : le coefficient de variation des écarts est calculé par le ratio entre l'écart-type 13,8 min et la moyenne (26,2 min), s'élève à 52,65% cette valeur, largement supérieure au seuil critique de 30%, indique une dispersion excessive des données, révélant l'incohérence systématique et l'imprévisibilité des rapports de production. Cette variabilité excessive compromet toute tentative de modélisation fiable.

Test de significativité statistique : le test de Student pour échantillons appariés permet de vérifier statistiquement si les écarts observés sont significativement différents de zéro, les résultats obtenus sont sans équivoque :

- Valeur t calculée : 7,36
- Valeur critique : 1,761 ($\alpha = 0,05$)
- p-value : $1,79 \times 10^{-6}$

Avec une valeur “ t “ largement supérieure à la valeur critique, rejetant catégoriquement l'hypothèse nulle d'égalité entre les deux sources. La différence est statistiquement significative avec un niveau de confiance de 95%, confirmant que les écarts observés ne relèvent pas du hasard mais d'un biais systématique des rapports de production.

Analyse de la criticité des erreurs

Taux d'erreurs critiques : en définissant un seuil critique d'erreur à 30% du temps réel (soit 18 minutes), l'analyse révèle des résultats alarmants concernant les rapports de production :

- **Nombre d'erreurs critiques** : 9 sur 15 observations
- **Taux d'erreurs critiques** : 60%
- **Seuil acceptable** : 5%

Ce taux, considérablement supérieur au maximum acceptable de 5% dans l'industrie, confirme définitivement l'inadéquation des rapports de production pour une utilisation en simulation ou en modélisation prédictive.

C.2. Code sur R- studio :

Méthodologique du traitement des données à l'introduire sur Arena

Ce code à usage sur R-studio met en œuvre à chacun des blocs de données (temps d'inter arrivées et chacune des cinq classes de temps de changement) Ces étapes sont détaillées ci-dessous :

Tableau 32 : Explication de code d'analys de données (temps d'inter arrivées et chacune des cinq classes de temps de changement)

N°	Phase/Étape	Fonctions R / Concepts Clés du code	Description de l'Action
0	**Initialisation de l'environnement**	if (!require()), install.packages(), library()	Chargement conditionnel et activation des bibliothèques R nécessaires.
1	**Chargement et Vérification Initiale des Données**	Définition directe des vecteurs de données : (temps_interarrivee, temps_type1,… temps_type5), length(), cat()	Les données brutes (temps d'inter arrivées et 5 types de temps de changement, en minutes) sont chargées. Une vérification préliminaire du nombre d'observations (n) par ensemble est affichée.
2	**Validation de la Taille de l'Échantillon**	valider_taille_echantillon <- function(data, nom_dataset = "") { n <- length(data) cat("\n VALIDATION TAILLE ÉCHANTILLON ") cat("\n Dataset:", nom_dataset) cat("\n Taille échantillon:", n) # Critères de validation validation <- list(suffisant_base = n >= 10, suffisant_distributions = n >= 20, excellent = n >= 50, critique = n < 5)	Évaluation de la taille de l'échantillon (n) pour chaque ensemble. Attribution d'un niveau de validation (CRITIQUE, INSUFFISANT, ACCEPTABLE, BON, EXCELLENT) basé sur des seuils prédéfinis. Ce niveau contextualise la fiabilité et guide les analyses subséquentes (e.g., limitation de l'analyse pour "CRITIQUE").
3	**Statistiques Descriptives et Analyse Exploratoire**	mean(), median(), sd(), min(), max(), quantile(), cat()	Calcul et affichage de statistiques descriptives de base (moyenne, médiane, écart-type, CoV, min/max, quartiles) pour chaque ensemble, offrant un aperçu de la tendance centrale, dispersion et forme.

4	**Ajustement d'un Large Éventail de Distributions Théoriques**	tester_distributions(data, nom_dataset), fitdist() (package fitdistrplus), fit_beta_custom(), fit_triangular_custom()	Ajustement de distributions standards (Exponentielle, Gamma, Normale, Uniforme, Weibull, Log-Normale) via fitdist() (MML). Ajustement de distributions étendues (Beta redimensionnée, Triangulaire). Calcul des AIC/BIC. Gestion des erreurs et conditions spécifiques (e.g., données positives). Identification des cas de données "Constantes".
5	**Sélection de la Meilleure Distribution**	Logique interne à tester_distributions (basée sur which.min(aic_values))	La distribution avec l'AIC le plus faible est considérée comme la meilleure candidate, conditionnée par la réussite de l'ajustement. Le BIC est fourni à titre informatif.
6	**Tests de Validité Statistique (Goodness-of-Fit)**	effectuer_tests_validite(data, distribution_fit_object, nom_dataset), ks.test(), shapiro.test(), ad.test() (package nortest), cvm.test() (package nortest)	Réalisation de tests d'adéquation (KS ; et pour normalité : Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Cramer-von Mises) pour la distribution sélectionnée, si n le permet (généralement n ≥ 8). Les p-values (>0.05) indiquent une adéquation acceptable. Interprétation des résultats et applicabilité signalée.
7	**Calcul d'Intervalles de Confiance par Bootstrap**	calculer_ic_bootstrap(data, nom_dataset, n_bootstrap, conf_level), boot() (package boot), boot.ci()	Application de la technique de ré-échantillonnage bootstrap (si n ≥ 5, 1000 réplications par défaut) pour estimer la variabilité (IC à 95% par défaut) des statistiques clés (moyenne, médiane, écart-type).

8	**Génération de l'Expression Arena**	generer_expression_arena(dist_key, params_ou_objet, data_vector)	Construction de la syntaxe d'expression Arena pour la meilleure distribution identifiée (ou valeurs pour constante/triangulaire). Stratégie de repli (constante, triangulaire, moyenne) pour petits échantillons/échecs d'ajustement, garantissant une proposition d'expression avec avertissements si base statistique limitée.
9	**Visualisation des Résultats**	Package ggplot2 (ggplot(), geom_histogram(), geom_density(), geom_col(), geom_errorbar(), geom_boxplot(), etc.), gridExtra (pour l'agencement potentiel de graphiques)	Génération de graphiques pour l'interprétation : histogramme des interarrivées (avec densité ajustée, moyenne, médiane, IC), diagrammes en barres des temps de changement (moyenne, IC, distribution choisie, niveau de validation), boxplots comparatifs (avec niveau de validation), graphique des niveaux de validation.
10	**Récapitulatif Final**	cat(), print() (pour le tableau_resultats)	Présentation d'un résumé consolidé listant pour chaque loi (temps inter-arrivées et temps de changement) : le nom, la distribution choisie, le niveau de validation de l'échantillon, et l'expression Arena générée.

Cette démarche structurée et automatisée permet une analyse statistique approfondie des données, même en présence de contraintes sur la taille des échantillons. Elle fournit les entrées nécessaires pour le modèle de simulation Arena, tout en offrant une évaluation transparente de la fiabilité statistique des distributions et paramètres choisis. Les résultats de cette analyse forment la base de la paramétrisation stochastique du modèle de simulation développé dans le cadre de ce projet.

C.3. Les graphiques résultats sur R-studio :

3.1Simulation données avant l'implémentation de projet SMED :

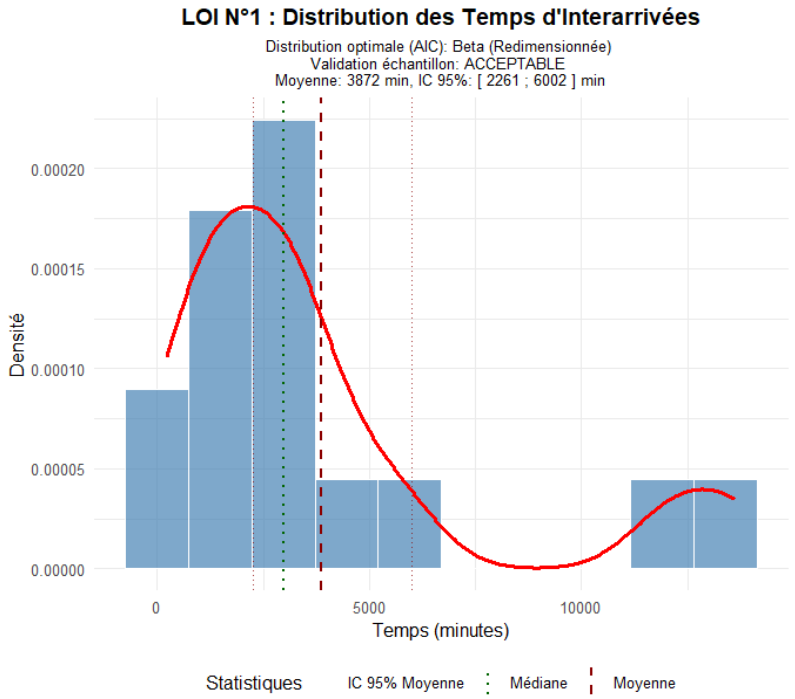


Figure 42 : Distribution de la loi Inter arrivées -avant SMED

La courbe de densité ajustée correspond bien aux données observées, indiquant une bonne adéquation de la distribution.

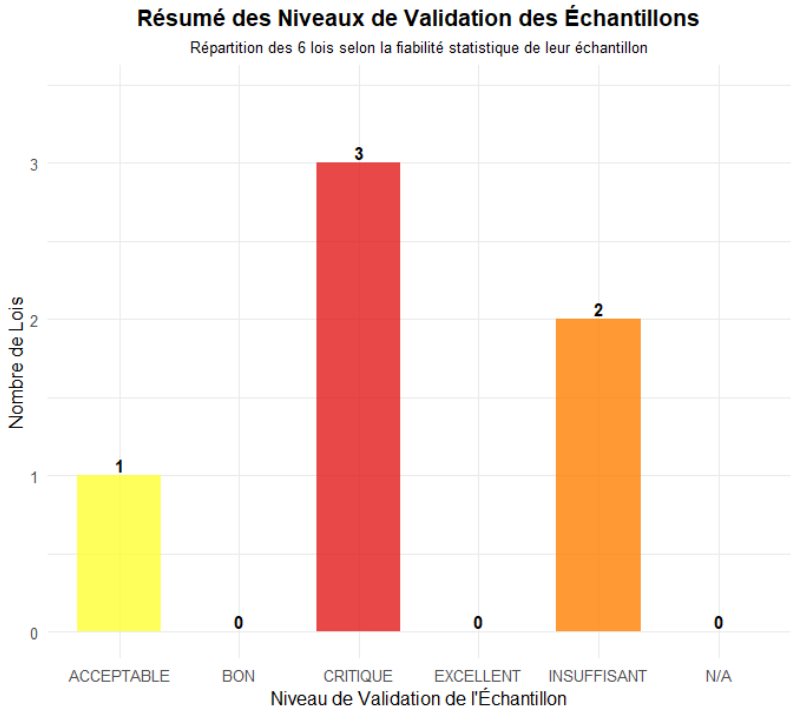


Figure 43 : Niveau de validation d'échantillons

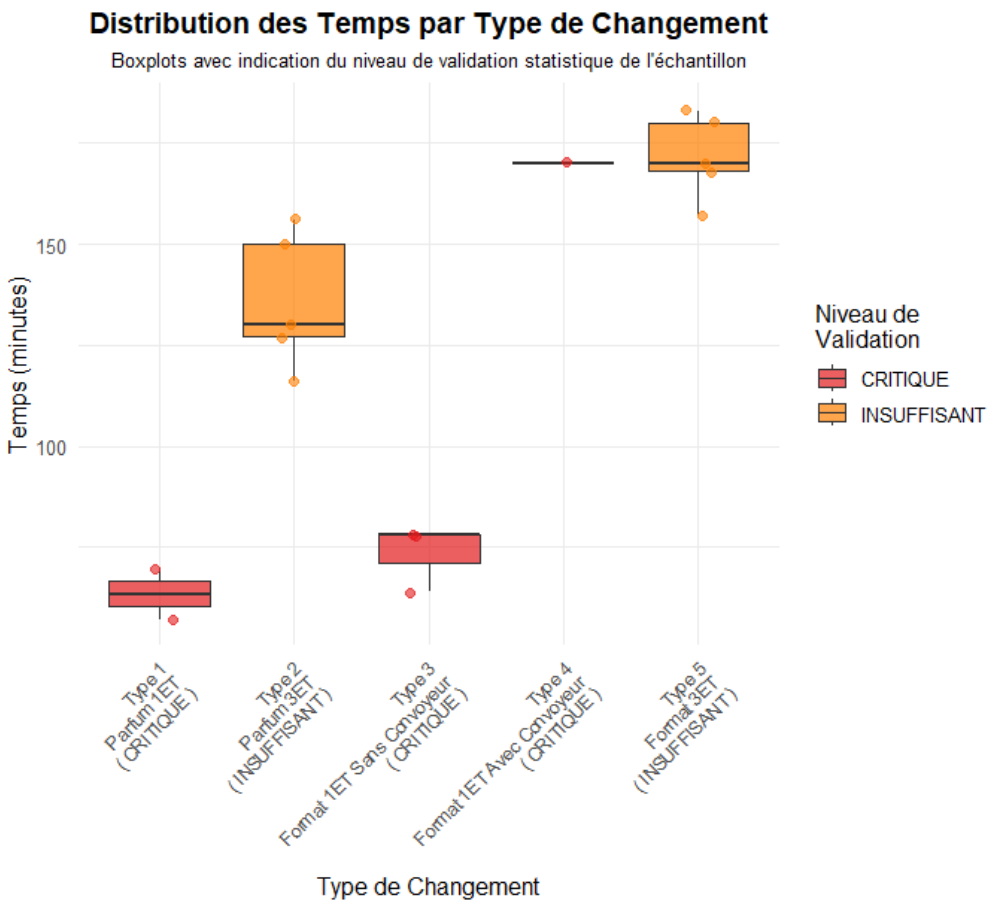


Figure 44 : Boite à moustaches -distribution des temps par type de changement

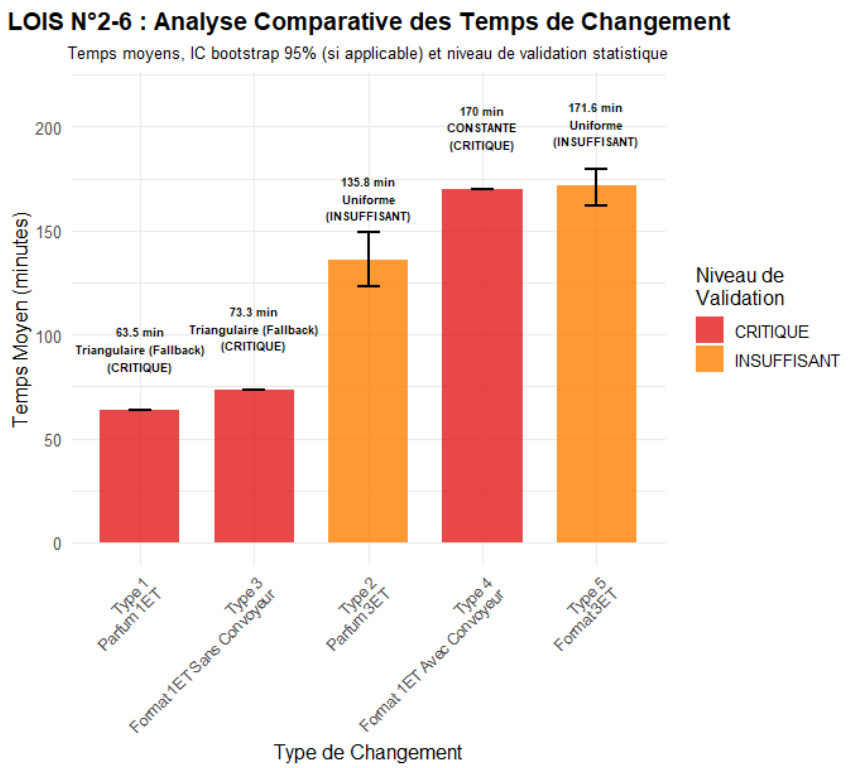


Figure 45 : Analyse comparative des 5 temps de changement

3.2 Simulation des données après l'implémentation de projet SMED

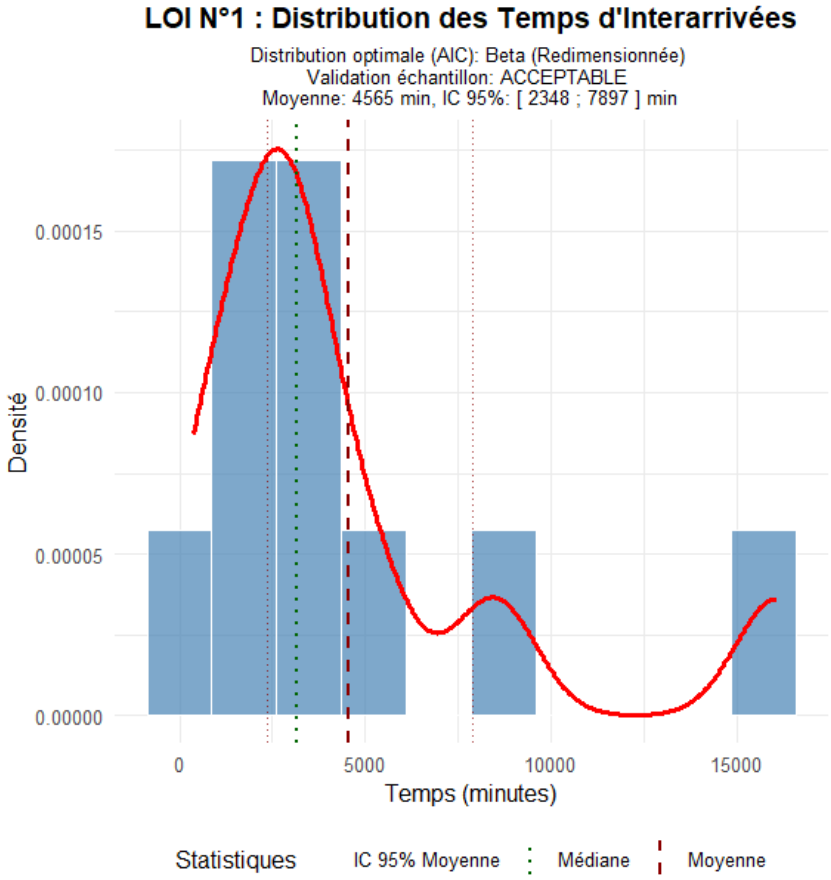


Figure 46 : Distribution de la loi Inter arrivées - après SMED

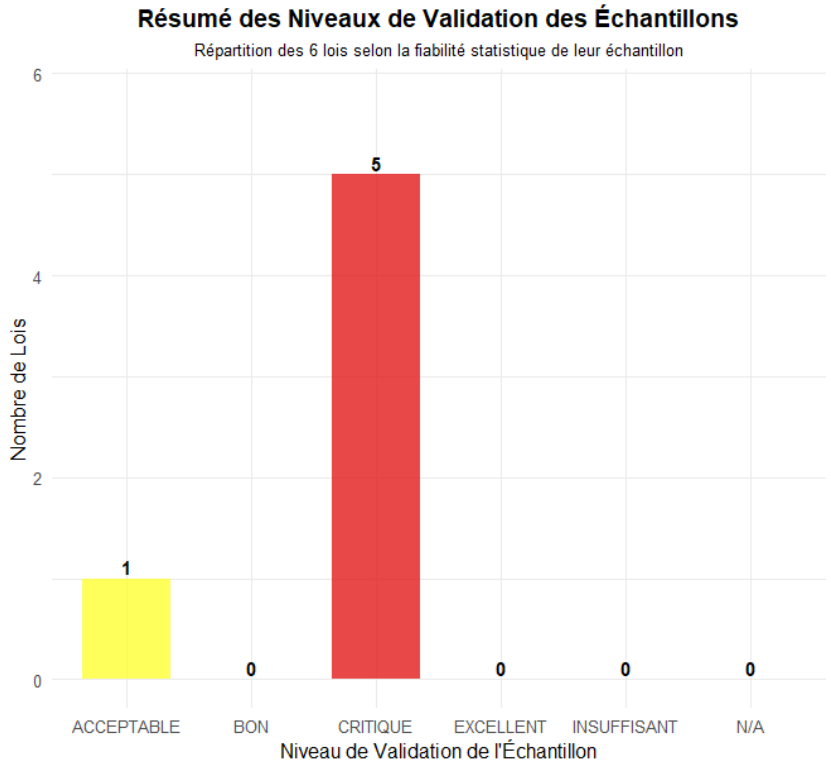


Figure 47 : Niveau de validation d'échantillons

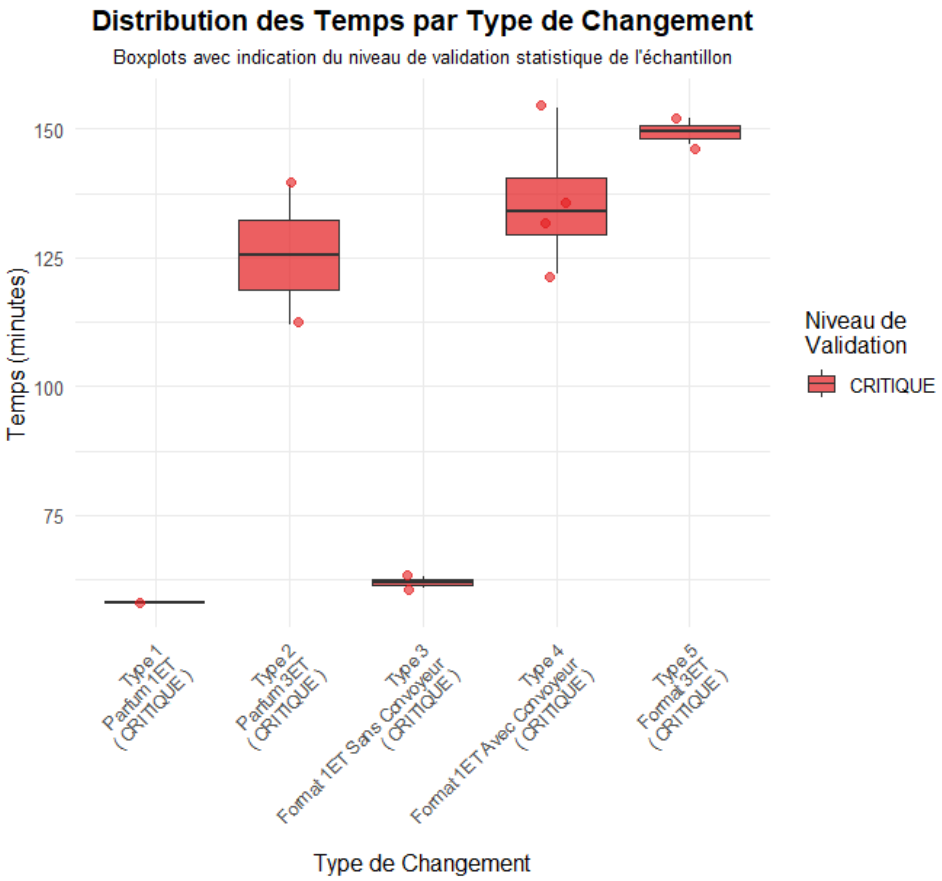


Figure 48 : Boite à moustaches -distribution des temps par type de changement

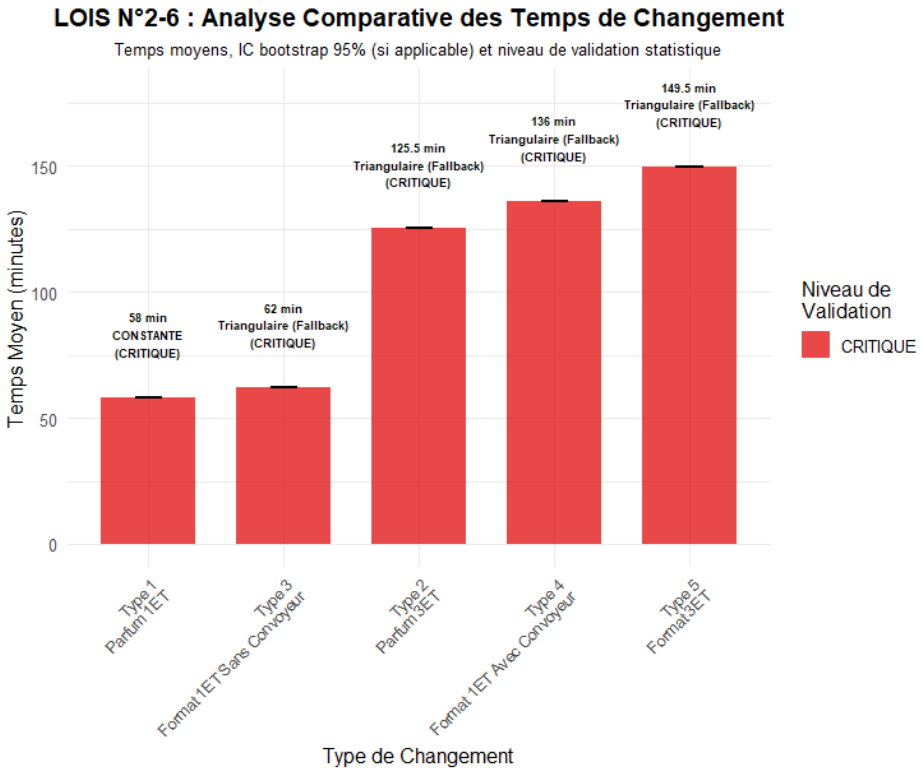


Figure 49 : Analyse comparative des 5 temps de changement

C.4. Rappel

Tableau 33 : Rappel des concepts statistiques fondamentaux

Concept	Définition académique	Formule(s) avec commentaires
Traitement des données	Processus préalable à toute analyse statistique, consistant à organiser, nettoyer, corriger et structurer les données brutes pour les rendre exploitables [52].	Étapes : suppression des doublons, gestion des valeurs manquantes, transformation des variables, codage [53].
Statistique descriptive	Ensemble de techniques utilisées pour résumer et caractériser un ensemble de données. On distingue les mesures de tendance centrale (moyenne, médiane) et de dispersion (étendue, écart-type, variance) [54].	Moyenne (μ) : $\mu = (1/n) \times \Sigma x_i$ Écart-type (σ) : $\sigma = \sqrt{[\Sigma(x_i - \mu)^2 / n}$ Médiane : Si n impair : $\text{médiane} = x_{(n+1)/2}$ Si n pair : $\text{médiane} = (x_{(n/2)} + x_{(n/2+1)})/2$ Les données doivent être triées par ordre croissant pour calculer la médiane [55].
Erreur relative moyenne (ERM)	Mesure de l'écart moyen relatif entre les valeurs observées et une valeur de référence, exprimée en pourcentage. Elle évalue la performance d'un modèle ou d'une méthode[56].	**ERM =** $(1/n)\ \Sigma\ \lvert(y_i - \hat{y}_i) / y_i\rvert \times 100\%$ où : - n est le nombre total d'observations, - y_i est la valeur réelle à l'indice i, - ŷ_i est la valeur prédite correspondante [56].
Coefficient de variation (CoV)	Mesure de la dispersion relative d'un jeu de données, indépendante de l'unité de mesure. Permet de comparer la variabilité de séries différentes [57].	$\text{CoV (\%)} = (\sigma / \mu) \times 100$ Plus CoV est faible, plus la série est homogène. – CoV < 10% : faible dispersion – CoV > 30% : forte dispersion [57]
Erreur critique	Seuil d'erreur au-delà duquel les résultats sont considérés comme non exploitables ou erronés. Elle peut invalider une analyse si elle est ignorée [58].	Exemples : ERM ou CoV > 30% peuvent signaler une erreur critique. À ce stade, la fiabilité des résultats est fortement remise en question [58].
Taille d'échantillon suffisante	Nombre minimal de données nécessaires pour garantir la robustesse et la validité statistique d'une analyse [59].	– n < 10 : trop faible – n ≥ 30 : seuil minimal accepté en statistique descriptive – n ≥ 50–100 : souhaitable pour tests statistiques [59]
Test t de Student apparié	Test statistique permettant de comparer deux moyennes issues d'observations appariées (même individu avant/après, par ex.) [60] .	$t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) / (s / \sqrt{n})$ Utilisé pour vérifier si une variation est statistiquement significative [60]

p-value (valeur p)	Probabilité d'obtenir un résultat aussi extrême que celui observé si l'hypothèse nulle est vraie [61].	Seuils usuels : – $p < 0,05$: effet significatif – $p \geq 0,05$: pas de preuve d'effet Ne signifie pas importance ou validité pratique [61]
Ajustement de lois de probabilité	Démarche consistant à identifier une loi théorique (normale, exponentielle…) qui modélise les données observées [62].	Repose sur : histogrammes, estimations par moindres carrés ou maximum de vraisemblance [62]
Tests d'adéquation	Tests permettant de vérifier si les données suivent une distribution théorique donnée [60].	Tests : Kolmogorov, Smirnov, Anderson Darling, Khi², Interprétation : $p > 0,05$ bonne adéquation [60]
Critères AIC / BIC	Outils de comparaison de modèles statistiques prenant en compte la complexité (nombre de paramètres) [63].	**$AIC = 2k - 2\ln(L)$,** **$BIC = k \ln(n) - 2\ln(L)$** Moins les valeurs sont élevées, plus le modèle est adapté [63].
Méthode Bootstrap	Technique de ré-échantillonnage permettant d'estimer la précision d'un estimateur sans hypothèse de distribution [64].	Tirages aléatoires avec remise et le calcul des estimateurs. Approximation de l'intervalle de confiance ou erreur-type. Méthode robuste, très utilisée en cas de petits échantillons ou hypothèses non vérifiables [64]

Annexe D : Audit 5S

D.1. Audit 5S de la machine souffleuse

Audite 5S Machine Souffleuse

Seiri (Trier) : éliminer ce qui est inutile et décider de ce qui est nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Le poste de soufflage est il encombré par les préformes, les boueilles non conformes ou de produits finis inutiles ?						Les box de préformes et des bouteilles non conformes sont présent dans la zone de soufflage mais dans des zones spécifiques et marqués
Y a-t-il des pièces présents sur le lieu de travail qui ne sont pas nécessaires ?						
Y a-t-il des outils, moules ou accessoires (clés, dégraissant, gants...) inutiles dans la zone de soufflage ?						
Y a-t-il d'autres équipements non utilisés sur le lieu de travail ?						Présence d'une armoire vide et non utilisée
Y a-t-il des instructions, procédures ou affichages visuels obsolètes dans les classeurs ou sur les murs ?						Certaines fiches datent de 2024 à mettre à jour et à archiver correctement.

Seiton (Situer) : définir un emplacement spécifique pour chaque élément nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les éléments autour de la machine de soufflage (les portes format, les box des préformes et la table de travail) sont-ils identifiés et organisés de manière visuelle ?						Il est possible d'améliorer l'organisation des étagères des armoires d'outillage.
Les accessoires, moules et outils sont-ils rangés et organisés de manière rationnelle, afin qu'ils puissent être facilement pris et remis à leur place, en fonction de leur fréquence d'utilisation et de leur emplacement ?						
Y a-t-il des marquages pour identifier les zones au sol, les passages et les zones de rebut ?						La majaurité des zones sont identifiés, il manque les nouvelles zones après l'application de la méthode SMED
Y a-t-il des étiquettes indiquant l'emplacement de tous les outils et moules ?						Tout est étiquetté
Les documents essentiels à l'opération de soufflage sont-ils bien rangés et clairement identifiés ?						Manque de document claire

Seiso (Nettoyer) : maintenir le lieu de travail propre et éliminer les anomalies

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les outils de nettoyage, les équipements et les produits sont-ils disponibles, accessibles et adaptés ?						Le nettoyage s'effectue par l'alcool mais il est mieux d'utiliser un produit dégraisson
Les moules, poste de travail, armoires et portes format sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						Présence des check-lists de nettoyage standardisées et visibles, permettant de suivre les tâches effectuées
Les causes de contamination et de saleté (huile, humidité, poussières) ont-elles été identifiées et traitées ?						
Les sols, machine, allées et zone de maintenance sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						
La propreté est-elle une préoccupation constante de l'équipe ? Le nettoyage est-il une activité continue et partagée par l'équipe ?						

Seiketsu (Standardiser) : créer un environnement de travail visuellement organisé

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Existe-t-il des standards et un système de codification partagé pour le marquage des zones, des outils, des format et des équipements ?						
Les routines de nettoyage, les standards de rangement et les routines d'inspection ont-ils été standardisés visuellement ?						
Les procédures opérationnelles et les normes de soufflage sont-elles claires et accessibles ?						
Existe-t-il des standards clairs pour la gestion et l'approvisionnement des consommables et matières premières utilisés au poste de soufflage(préformes, lubrifiants, produits de nettoyage et PdR) ?						Les standards de gestion des consommables ne sont pas suffisamment formalisés. L'approvisionnement repose encore en partie sur l'expérience des opérateurs.
Les standards des trois premiers 3S sont-ils clairs et à jour ?						

Shitsuke (Soutenir) : maintenir les améliorations et poursuivre les améliorations à l'échelle de l'entreprise

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
La vision des 5S est-elle partagée dans le plan et les objectifs sont-ils clairement communiqués ?						
Tous les opérateurs ont-ils été formés aux 5S et y a-t-il une activité continue autour des 5S dans toute la ligne ?						Mettre en place des rappels visuels des bonnes pratiques 5S.
Les suggestions d'amélioration, projets et plans d'action ont-ils été structurés et affichés visuellement, et sont-ils visibles par tous ?						
Tout le monde est-il informé des réussites passées et actuelles du poste de travail ?						Les principes de management visuel sont appliqués dans toute l'usine.
Un système d'audit et de reporting est-il en place ?						Il existe un système gembawalks sur terrin mais ne focalise pas sur l'application 5S

Score totale:	***81/100***

D.2. Audit 5S de la machine étiqueteuse

Audite 5S Machine Soutireuse

Seiri (Trier) : éliminer ce qui est inutile et décider de ce qui est nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Le poste de soutirage est il encombré par les bouchons et les bouteilles non conformes ou de produits finis inutiles ?						
Y a-t-il des pièces présents sur le lieu de travail qui ne sont pas nécessaires ?						
Y a-t-il des outils, formats ou accessoires (clés, transpalettes, gants...) inutiles dans la zone de soutirage ?						
Y a-t-il d'autres équipements non utilisés sur le lieu de travail ? (tables de travail, étagères, chaises,etc.)						
Y a-t-il des instructions, procédures ou affichages visuels obsolètes dans les classeurs ou sur les murs ?						

Seiton (Situer) : définir un emplacement spécifique pour chaque élément nécessaire

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les éléments autour de la soutireuse (les portes format, les box des bouchons et la table de travail) sont-ils identifiés et organisés de manière visuelle ?						
Les accessoires, format et outils sont-ils rangés et organisés de manière rationnelle, afin qu'ils puissent être facilement pris et remis à leur place, en fonction de leur fréquence d'utilisation et de leur emplacement ?						Nécissite un organisme standard entre les quatre équipe
Y a-t-il des marquages pour identifier les zones au sol, les passages et les zones de rebut ?						L'espace commun entre les opérateurs n'est pas clairement délimité par un marquage visuel
Y a-t-il des étiquettes indiquant l'emplacement de tous les outils et format ?						Les étiquettes d'identification des outils et formats sont présentes mais ne sont plus lisibles.
Les documents essentiels à l'opération de souftirage sont-ils bien rangés et clairement identifiés ?						Les documents sont rangés au même emplacement que ceux d'une autre ligne, ce qui n'est pas pratique pour les opérateurs.

Seiso (Nettoyer) : maintenir le lieu de travail propre et éliminer les anomalies

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Les outils de nettoyage, les équipements et les produits sont-ils disponibles, accessibles et adaptés ?						
Les formats, poste de travail, armoires et portes format sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						Mettre en place des check-lists de nettoyage standardisées et visibles, permettant de suivre les tâches effectuées
Les causes de contamination et de saleté (Fuites de boissons huile, humidité, graisses) ont-elles été identifiées et traitées ?						
Les sols, machine, allées et zone de maintenance sont-ils nettoyés conformément au planning de nettoyage ?						
La propreté est-elle une préoccupation constante de l'équipe ? Le nettoyage est-il une activité continue et partagée par l'équipe ?						

Seiketsu (Standardiser) : créer un environnement de travail visuellement organisé

Critère	0	1	2	3	4	Commentaires / actions à prendre
Existe-t-il des standards et un système de codification partagé pour le marquage des zones, des outils, des format et des équipements ?						Un marquage est présent, mais avec le temps il est devenu peu lisible ou négligé.
Les routines de nettoyage, les standards de rangement et les routines d'inspection ont-ils été standardisés visuellement ?						
Les procédures opérationnelles et les normes de brix et CO2 pour chauqe recette sont-elles claires et accessibles ?						Un guide simple des valeur de brix selon la recette est disponible sur le poste du mixeur, mais absentes
Existe-t-il des standards clairs pour la gestion et l'approvisionnement des consommables du poste de soutirage(bouchons, produits de nettoyage et PdR) ?						Les standards de gestion des consommables ne sont pas suffisamment formalisés. L'approvisionnement repose encore en partie sur l'expérience des opérateurs.
Les standards des trois premiers 3S sont-ils clairs et à jour ?						

Shitsuke (Soutenir) : maintenir les améliorations et poursuivre les améliorations à l'échelle de l'entreprise							
	Critère	0	1	2	3	4	**Commentaires / actions à prendre**
	La vision des 5S est-elle partagée dans le plan et les objectifs sont-ils clairement communiqués ?						
	Tous les opérateurs ont-ils été formés aux 5S et y a-t-il une activité continue autour des 5S dans toute la ligne ?						
	Les suggestions d'amélioration, projets et plans d'action ont-ils été structurés et affichés visuellement, et sont-ils visibles par tous ?						
	Tout le monde est-il informé des réussites passées et actuelles du poste de travail ?						
	Un système d'audit et de reporting est-il en place ?						Audit irrégulier, planifier un audit 5S mensuel avec tableau de bord visuel.
			Score totale:		***68/100***		

Références :

[1] Ghaithan, A. M., Alshammakhi, Y., Mohammed, A., et al. Integrated impact of circular economy, industry 4.0, and lean manufacturing on sustainability performance of manufacturing firms. International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 20, no 6, p. 5119, 2023.

[2] Fontanille, O., Chassende-Baroz, É., De Cheffontaines, C., et al. Pratique du lean. Réduire les pertes en conception, production et industrialisation. 2010.

[3] Stimec, A.8.«Excellence productive» et santé au travail: le cas du lean management. In : Les mutations du travail. La Découverte, 2019. p. 155-175.

[4] Sweeney, B. Lean Six Sigma QuickStart Guide : The Simplified Beginner's Guide to Lean Six Sigma (2e éd.). Clyde Bank Media LLC, 2017.

[5] Riess, R., Pasquier, R., Jeannerat, C. Halte au surdimensionnement ! Comment gérer la sobriété énergétique en industrie ?. Bulletin SEV/AES : revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse et AES, vol. 6, 2018.

[6] Aizier, E. Adaptation du lean manufacturing dans un environnement GMP : ses opportunités et ses limites. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2012.

[7] Belorgey, M. Déploiement et pérennisation de la méthode SMED sur une ligne de conditionnement. 2020.

[8] Ulutas, B. An application of SMED methodology. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 79, p. 100–103, 2011.

[9] Bhasin, S. "Performance of Lean in large organisations". *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3), 349-357, 2012.

[10] Leseure-Zajkowska, E. Z. Contribution à l'implantation de la méthode Lean Six Sigma dans les Petites et Moyennes Entreprises pour l'amélioration des processus. Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2012.

[11] Sousa, E., Silva, F. J. G., Ferreira, L. P., et al. Applying SMED methodology in cork stoppers production. Procedia Manufacturing, vol. 17, p. 611–622, 2018.

[12] Slim, R., Houssin, R., Coulibaly, A. Une approche d'intégration de la méthode SMED dans la conception des systèmes de production. In : AIP PRIMECA, Les Karellis-Vallée de la Maurienne, France, janvier 2019, 2019.

[13] Baudin, M. Working with machines : the nuts and bolts of lean operations with jidoka. Productivity Press, 2007.

[14] Tekin, M., Arslandere, M., Etlioğlu, M., Koyuncuoğlu, Ö., & Tekin, E. An application of SMED and Jidoka in lean production. In : Proceedings of the International Symposium for Production Research 2018, Springer, 2019, p. 530–545.

[15] Sordan, J. E., Chiabert, P. From Jidoka to Jidoka 4.0. In : Lean Manufacturing in Latin America : Concepts, Methodologies and Applications. Cham : Springer, 2024, p. 151–174.

[16] Romero, D., Gaiardelli, P., Powell, D., Wuest, T., & Thürer, M. Rethinking jidoka systems under automation & learning perspectives in the digital lean manufacturing world. IFAC-PapersOnLine, vol. 52, no 13, p. 899–903, 2019.

[17] Bruère, S. Les liens entre le système de production lean manufacturing et la santé au travail : une recension de la littérature. Revue multidisciplinaire sur l'emploi, le syndicalisme et le travail, vol. 8, no 1, p. 21–49, 2013.

[18] Melgar -Morales, M. A., Erazo-Rondinel, A., Abregu-Gonzales, J. J., et al. A review of poka yoke in construction projects : classification, benefits and barriers.

[19] Azzabi, L. Contribution à l'amélioration d'un système de production: intégration de la méthode Six Sigma et approche multicritère d'aide à la décision dans Sidelec internationale. Diss. Université d'Angers, 2010.

[20] Pyzdek, T., et al. The Six Sigma Handbook : a complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels. McGraw-Hill, 2003.

[21] Scheidegger, A. P. G., Pereira, T. F., De Oliveira, M. L. M., et al. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. Computers & Industrial Engineering, vol. 124, p. 474–492, 2018.

[22] Ruane, P., Walsh, P., Cosgrove, J. Using simulation optimization to improve the performance of an automated manufacturing line. Procedia Computer Science, vol. 217, p. 630–639, 2023.

[23] García-García, J. A., Enríquez, J. G., Ruiz, M., et al. Software process simulation modeling : systematic literature review. Computer Standards & Interfaces, vol. 70, p. 103425, 2020.

[24] Kelton, W. D., Sadowski, R. P., et al. Simulation with Arena : Fourth edition, 2015.

[25] Mantravadi, S., Møller, C. An overview of next-generation manufacturing execution systems : How important is mes for industry 4.0 ? Procedia Manufacturing, vol. 30, p. 588–595, 2019.

[26] Tran, N. H. Extension des systèmes MES au diagnostic des performances des systèmes de production au travers d'une approche probabiliste bayésienne. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, 2018.

[27] Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., Yaghoubi, M., , Ardeshir, et Najjaran, H. Intelligent manufacturing execution systems : a systematic review. Journal of Manufacturing Systems, vol. 62, p. 503–522, 2022.

[28] Mohamed, M. M., Alraddadi, A. S. Agile factor flexible industry 4.0 with mes manufacturing execution system along with erp back-end integration : Ready-made garments as a case study. American Journal of Operations Research, vol. 14, no 4, p. 137–150, 2024.

[29] Chen, X., Voigt, T. Implementation of the manufacturing execution system in the food and beverage industry. Journal of Food Engineering, vol. 278, p. 109932, 2020.

[30] Kohler, D., Weisz, J.-D. Industrie 4.0 : comment caractériser cette quatrième révolution industrielle et ses enjeux ? In : Annales des Mines-Réalités industrielles, no 4, p. 51–56, 2016.

[31] Jaskó, S., Skrop, A., Holczinger, T. Development of manufacturing execution systems in accordance with industry 4.0 requirements : a review of standard- and ontology-based methodologies and tools. Computers in Industry, vol. 123, p. 103300, 2020.

[32] Jerbi, A. Simulation à événements discrets : Concepts et réalisation en Arena. ISTE Group, 2024.

[33] www.rockwellautomation.com, consulté en mai 2025

[34] Goecks, L. S., Habekost, A. F., Coruzzolo, A. M., Sellitto, M. A. Industry 4.0 and smart systems in manufacturing : Guidelines for the implementation of a smart statistical process control. Applied System Innovation, vol. 7, no 2, p. 24, 2024.

[35] Abdoune, K. Vers un jumeau numérique soutenable pour la surveillance et la détection robuste d'anomalies dans les systèmes de production. Thèse de doctorat, Nantes Université, 2023.

[36] Karima, A. K. S. A., BOUHAFNA, K., BELAYATI, S., and DJEGHAR, D. Vers une nouvelle révolution industrielle : Industrie 4.0. Revue Méditerranéenne des Télécommunications, vol. 11, no 1, 2021.

[37] Nurdiyanto, H., Kindiasari, A. Critical role of manufacturing execution systems in digital transformation of manufacturing industry. Journal of Electrical Systems, vol. 20, no 7s, p. 2432–2436, 2024.

[38] Rahmatulloh, I., Noviaristanti, S., & Awaluddin, M. Industry 4.0 readiness and roadmap in food industry : Insights from Indonesian manufacturing enterprises using explanatory sequential mixed-method design. Eduvest-Journal of Universal Studies, vol. 4, no 2, p. 396–419, 2024.

[39] Menezes, S., Creado, S., & Zhong, R. Y. Smart manufacturing execution systems for small and medium-sized enterprises. Procedia CIRP, vol. 72, p. 1009–1014, 2018.

[40] Vyskočil, J., Douda, P., Novák, P., & Wally, B.Novák, D. P., Vyskočil, J., Wally, B. A digital twin-based distributed manufacturing execution system for industry 4.0 with AI-powered on-the-fly replanning capabilities. Sustainability, vol. 15, no 7, p. 6251, 2023.

[41] Kopeinig, J., Woschank, M., & Olipp, N. Industry 4.0 technologies and their implications for environmental sustainability in the manufacturing industry. Procedia Computer Science, vol. 232, p. 2777–2789, 2024.

[42] Fatorachian, H., Kazemi, H. Impact of industry 4.0 on supply chain performance. Production Planning & Control, vol. 32, no 1, p. 63–81, 2021.

[43] Zolotová, I., Bundzel, M., Lojka, T. Industry IoT gateway for cloud connectivity. In : APMS 2015, IFIP WG 5.7 International Conference, Tokyo, Japan, September 7–9, 2015, p. 59–66.

[44] Urbanization, E. N., & Wealth, C. Intelligence Empowerment. Applied Mathematics and Nonlinear Sciences,
2025.

[45] Sishi, M., Telukdarie, A. Implementation of industry 4.0 technologies in the mining industry – a case study. International Journal of Mining and Mineral Engineering, vol. 44, no 11, p. 1931–1943, 2018.

[46] Detwal, P. K., Agrawal, R., Samadhiya, A., Kumar, A., & Garza-Reyes, J. A. Revolutionizing healthcare organizations with operational excellence and healthcare 4.0 : a systematic review of the state-of-the-art literature. International Journal of Lean Six Sigma, vol. 15, no 1, p. 80–102, 2024.

[47] D'Antonio, G., Bedolla, J. S., & Chiabert, P. A novel methodology to integrate manufacturing execution systems with the lean manufacturing approach. Procedia Manufacturing, vol. 11, p. 2243–2251, 2017.

[48] Franzosa, R., Hestermann, C. Magic quadrant for manufacturing execution systems. Gartner Inc., 2019.

[49] Naik, S., Sony, M., Antony, J., McDermott, O.,Tortorella, G. L., & Jayaraman, R. Operational excellence framework for sustainability in the organisation : a design science approach. Production Planning & Control, vol. 35, no 11, p. 1215–1231, 2024.

[50] Andersen, R., Napoleone, A., Andersen, A. L., Brunoe, T. D., & Nielsen, K. A systematic methodology for changeable and reconfigurable manufacturing systems development. Journal of Manufacturing Systems, vol. 74, p. 449–462, 2024.

[51] Rivest, L., Danjou, C., Rivest, L., Pellerin, R. Des pistes pour aborder l'ère du 4.0. 2018.

[52] Larini, M., Barthes, A. Statistiques et traitement de données quantitatives en éducation : de la collecte au traitement des données. Londres : ISTE Group, 2018.

[53] Co, V. Méthodes statistiques et informatiques pour le traitement de données manquantes. Thèse de doctorat, CNAM Paris, 1997.

[54] Baccini, A. Statistique descriptive multidimensionnelle (pour les nuls). Toulouse : Institut de Mathématiques de Toulouse - UMR CNRS 5219, 2010.

[55] Monino, J.-L., Kosianski, J.-M., Le Cornu, F. Statistique descriptive. Paris : Dunod, 2010.

[56] Frontier, S. Calcul de l'erreur sur un comptage de zooplancton. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, vol. 8, no 2, p. 121–132, 1972.

[57] Abdi, H. Coefficient of variation. Encyclopedia of Research Design, vol. 1, no 5, p. 169–171, 2010.

[58] Luzzati, V. Traitement statistique des erreurs dans la détermination des structures cristallines. Acta Crystallographica, vol. 5, no 6, p. 802–810, 1952.

[59] Gerville-Réache, L., Couallier, V. Échantillon représentatif (d'une population finie) : définition statistique et propriétés. Montpellier, 2011.

[60] Ingrand, P. Le test t de Student. Journal d'imagerie diagnostique et interventionnelle, vol. 1, no 2, p. 81–83, 2018.

[61] Thiese, M. S., Ronna, B., Ott, U. P value interpretations and considerations. Journal of Thoracic Disease, vol. 8, no 9, p. E928, 2016.

[62] Morlat, G., Les lois de probabilités de Halphen. Revue de statistique appliquée, vol. 4, no 3, p. 21–46, 1956.

[63] Lancelot, R., Lesnoff, M. Sélection de modèles avec l'AIC et critères d'information dérivés. Montpellier : CIRAD, 2005.

[64] Bottard, S., Application de la méthode du Bootstrap pour l'estimation des valeurs extrêmes dans les distributions de l'intensité des séismes. Revue de statistique appliquée, vol. 44, no 4, p. 5–17, 1996.

[65] Frédéric, R., Vers le Lean 4.0 : Renforcement du processus décisionnel par les technologies de l'Industrie 4.0 PhD thesis, HESAM Université, 2022.

[66] Jaskó, S., Skrop, A., & Holczinger, T. *Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools*. *Computers in Industry*, vol. 123, p. 103300, 2020.

[67] Noviaristanti, S. R., Iman, & Awaluddin, M. *Industry 4.0 readiness and roadmap in food industry: Insights from Indonesian manufacturing enterprises using explanatory sequential mixed-method design*. *Eduvest - Journal of Universal Studies*, vol. 4, no 2, p. 396–419, 2024.