



Département de Génie Industriel et Maintenance

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

## D'INGENIEUR d'État

-Filière-

**Génie Industriel**

-Spécialité -

**Management et Ingénierie de la Maintenance Industrielle**

- Thème -

# **Implémentation et Adaptation de la Démarche RCM dans le Contexte des Entreprise HENKEL-Reghaia et SCSEG- GICA**

Réalisé par

**FLIH Khadidja  
YAHIAOUI Lydia**

### **Membres de Jury :**

GOURI Rabah  
AMRANI Mohammed  
BOUDHAR Hamza

MCA ENSTA  
MCA ENSTA  
MCA ENSTA

Président  
Examinateur  
Encadrant

**Alger, le 01/07/2024**

**Année universitaire 2023–2024**

## **Remerciements**

Nous souhaitons exprimer notre gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre encadrant, Monsieur BOUDHAR Hamza, pour son soutien, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Ses remarques constructives et son expertise ont été précieuses pour la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les entreprises Henkel-Reghaia et la SCSEG-GICA, qui nous ont accueilli durant nos stages. Nous sommes reconnaissantes envers Monsieur KHELDOUNE Amine (SCSEG), Monsieur TOUHAMI Ahmed (Henkel-Reghaia) ainsi que les staffs des départements de maintenance des entreprises pour nous avoir encadré et accompagné avec autant de professionnalisme et de bienveillance.

Nous souhaitons aussi exprimer notre reconnaissance au jury de soutenance, pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, nous voudrions remercier nos familles et nos amis pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de cette aventure académique. Sans leur aide et leur compréhension, ce mémoire n'aurait pas vu le jour.

## Abstract

This thesis aims to implement and adapt the RCM strategy in Henkel-Reghaia and the SCSEG-GICA. We first defined the scope of the study by selecting the cement kiln firing zone (SCSEG) and the MARIN line (Henkel) for a functional analysis. The UNAX rotary kiln and cooler (SCSEG) and the filling unit (Henkel) were then defined as critical equipment, on which we carried out a dysfunctional analysis using a machine FMEA and root cause analysis. On this basis, we proposed maintenance actions in order to improve the preventive maintenance plans. This work is concluded by proposing KPIs that are significant to the strategy and a monitoring dashboard.

**Keywords :** RCM - CBM - TBM - Preventive Maintenance Plan - Multi-criteria Analysis - Criticality Analysis - FMEA.

## Résumé

Ce mémoire vise à implémenter et adapter la stratégie RCM chez Henkel-Reghaia et la SCSEG-GICA. Nous avons d'abord défini le périmètre de l'étude en sélectionnant la zone de cuisson (SCSEG) et la ligne MARIN (Henkel) pour une analyse fonctionnelle. Le four rotatif et refroidisseur UNAX (SCSEG) et l'unité de remplissage (Henkel) étaient ensuite définis comme équipements critiques, sur lesquels nous avons effectué une analyse dysfonctionnelle grâce à une AMDEC-machine et à l'analyse des causes racines. Sur cette base, nous avons proposé des actions de maintenance afin d'améliorer les plans de maintenance préventive. Le travail est cloturé par la proposition des KPIs significatifs à la stratégie et un tableau de bord de surveillance.

**Mots clés :** RCM - CBM - TBM - plan de maintenance préventive - analyse multicritères - Analyse de criticité - AMDEC.

## ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى تنفيذ و تكيف استراتيجية RCM في شركتي Henkel-Reghaia و SCSEG-GICA . قمنا أولاً بتحديد نطاق الدراسة من خلال تحديد منطقة تكليس الإسمنت (SCSEG-GICA) و خط الإنتاج MARIN (Henkel-Reghaia) لإجراء تحليل وظيفي. تم تعريف الفرن الدوار والمبرد (SCSEG-GICA) ووحدة التعبئة (Henkel-Reghaia) كأجهزة حيوية، والتي أجرينا عليها تحليل خلال استخدام AMDEC-Machine وتحليل الأسباب الجذرية. بناءً على ذلك، اقترحنا إجراءات صيانة لتحسين خطط الصيانة الوقائية. اختتم العمل باقتراح مؤشرات الأداء الرئيسية ذات الصلة بالاستراتيجية ولوحة مراقبة.

# Table des matières

<b>Liste des tableaux</b>	<b>i</b>
<b>Table des figures</b>	<b>ii</b>
<b>Liste des acronymes</b>	<b>iv</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte et Présentation des Entreprises</b>	<b>4</b>
1 Présentation de l'entreprises Henkel . . . . .	4
1.1 Processus général de Production . . . . .	5
1.2 Motivation du choix de la stratégie RCM pour Henkel-Reghaia . . . . .	6
2 Présentation de la SCSEG - GICA . . . . .	7
2.1 Processus général de production . . . . .	7
2.2 Motivation du choix de la stratégie RCM pour la SCSEG . . . . .	8
3 La maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) . . . . .	9
3.1 Définition de la maintenance centrée sur la fiabilité . . . . .	9
3.2 Historique et évolution de la RCM . . . . .	10
3.3 Méthodologie d'implémentation de la RCM . . . . .	11
3.4 Méthodologie et outils proposés pour l'implémentation de la RCM . . . . .	12
4 Comparaison des cas d'études (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia) . . . . .	15
<b>2 Périmètre d'étude et Sélection de l'équipement critique</b>	<b>17</b>
1 Sélection et définition du système . . . . .	17
1.1 Critères de sélection des systèmes . . . . .	17
1.2 Description et délimitation des systèmes . . . . .	20
1.3 Normes et réglementations de performance . . . . .	21
2 Analyse fonctionnelle . . . . .	22

2.1	Diagramme de pieuvre . . . . .	23
2.2	Diagramme FAST . . . . .	24
2.3	Bloc Diagramme Fonctionnel . . . . .	26
3	Sélection de l'équipement critique . . . . .	28
4	Description et fonctionnement des Équipements Critiques . . . . .	32
4.1	Description des équipements critiques : . . . . .	32
4.2	Analyse fonctionnelle de l'équipement critique : . . . . .	33
5	Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia) . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Analyse Dysfonctionnelle</b>	<b>38</b>
1	Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC-Machine)	38
1.1	Préparation de l'analyse . . . . .	39
1.2	Résultats de l'analyse . . . . .	40
2	Analyse des causes Racines de défaillance . . . . .	51
2.1	Diagramme de causes à effets . . . . .	51
2.2	Arbre de défaillance . . . . .	53
3	Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia) . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Sélection des actions de maintenance et Proposition d'un tableaux de bord</b>	<b>59</b>
1	Classification des politiques de maintenance et du plan d'actions . . . . .	59
2	Diagramme de décision de la RCM . . . . .	60
3	Sélection des actions de maintenance préventive . . . . .	63
3.1	Cas Henkel-Reghaia : . . . . .	63
3.2	Cas de la SCSEG-GICA : . . . . .	66
4	Les indicateurs clés de performance des entreprises . . . . .	73
4.1	Proposition des KPIs et d'un tableaux de bord . . . . .	74
5	Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia) . . . . .	77
	<b>Conclusion générale</b>	<b>79</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>81</b>
	<b>Annexe</b>	<b>i</b>
1	Annexe A.1 . . . . .	i
2	Annexe A.2 . . . . .	iii

3	Annexe A.3 . . . . .	iv
4	Annexe A.4 . . . . .	vi
5	Annexe B . . . . .	viii
6	Annexe C.1 . . . . .	x
7	Annexe C.2 . . . . .	xv

# Liste des tableaux

2.1	Désignation des fonctions cas Henkel-Reghaia . . . . .	23
2.2	Désignation des fonctions cas SCSEG . . . . .	24
2.3	MTBF par machine pour la ligne MARIN . . . . .	29
2.4	Coefficient de la qualité par machine pour la ligne MARIN . . . . .	30
2.5	Résultats de la méthode TOPSIS . . . . .	30
2.6	Résultats de l'analyse multicritères . . . . .	32
3.1	AMDEC - Remplisseuse Henkel-Reghaia . . . . .	40
3.4	AMDEC - Four rotatif et refroidisseur à ballonnets (ID : W1W01) - SCSEG-GICA . . . . .	45
4.2	Action de maintenace préventive Henkel-Reghaia . . . . .	65
4.6	Actions de maintenace préventive SCSEG-GICA . . . . .	71
4.7	Actions préventives hybrides . . . . .	72
1	Échelle pour le degré d'impact des défaillances des machines sur la qualité . . . . .	iv
2	Echelle et poids des critères pour l'analyse multicritères . . . . .	v
3	Echelle de Gravité (G) . . . . .	viii
4	Echelle de Fréquence (F) . . . . .	viii
5	Echelle de Détection (D) . . . . .	ix
6	Echelle de Gravité (G) . . . . .	ix
7	Echelle de Fréquence (F) . . . . .	x
8	Echelle de Détection (D) . . . . .	x
9	Chemain suivi selon le plan RCM Remplisseuse Henkel-Reghaia . . . . .	xii
10	Chemain suivi selon le plan RCM Four rotatif et refroidisseur SCSEG-GICA . . . . .	xiv

# Table des figures

1.1	Modelisation du Processus général de Production Henkel-Reghaia . . . . .	6
1.2	Modelisation du Processus général de Production SCSEG_GICA . . . . .	8
1.3	Chronologie de l'évolution de la RCM . . . . .	11
1.4	Méthodologie proposée pour l'implémentation de la RCM . . . . .	14
2.1	Visualisation de nombre des pannes et Coûts de maintenance par ligne . . . . .	18
2.2	Diagramme de pieuvre cas Henkel-Reghaia . . . . .	23
2.3	Diagramme de pieuvre cas SCSEG-GICA . . . . .	24
2.4	Diagramme FAST cas Henkel-Reghaia . . . . .	25
2.5	Diagramme FAST cas SCSEG-GICA . . . . .	26
2.6	Bloc Diagramme Fonctionnel cas Henkel-Reghaia . . . . .	27
2.7	Bloc Diagramme Fonctionnel cas SCSEG-GICA . . . . .	28
2.8	coûts de maintenance par équipement . . . . .	29
2.9	Unité de remplissage . . . . .	32
2.10	Four rotatif et refroidisseur UNAX . . . . .	33
2.11	Diagramme FAST de l'unité de remplissage . . . . .	34
2.12	Diagramme FAST de four rotatif et refroidisseur . . . . .	35
3.1	Diagramme Ishikawa cas Henkel-Reghaia . . . . .	52
3.2	Diagramme Ishikawa cas SCSEG-GICA . . . . .	52
3.3	Arbre de défaillance des problèmes de dosage . . . . .	53
3.4	Arbre de défaillance du mauvais positionnement . . . . .	54
3.5	Arbre de défaillance des problèmes de connexion . . . . .	54
3.6	Arbre de défaillance de l'effet vilebrequin de la virole . . . . .	55
3.7	Arbre de défaillance du couple insuffisant du moteur . . . . .	56
3.8	Arbre de défaillance de l'ovalisation de la virole . . . . .	56
4.1	représentation des Politiques de la maintenance . . . . .	60

4.2	Diagramme de décision RCM . . . . .	62
4.3	Page du plan de maintenance . . . . .	75
4.4	Page du tableau de bord . . . . .	76
1	SADT cas Henkel-Reghaia . . . . .	i
2	SADT cas SCSEG-GICA . . . . .	ii
3	Remplisseuse : Vue Schématique . . . . .	iii
4	Four rotatif et refroidisseur : Vue Schématique . . . . .	iii
5	Code Python TOPSIS . . . . .	vi
6	Logigramme de l'analyse multicritères . . . . .	vii

---

## Liste des acronymes

- **SCSEG** : Société des Ciments de Sour El Ghozlane
- **RCM** : Reliability Centered Maintenance
- **AMDEC** : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité
- **CBM** : Condition Based Maintenance
- **TBM** : Time Based Maintenance
- **D** : Failure Detection
- **R** : Redesign
- **OEE** : Overall Equipment Effectiveness
- **MTBF** : Mean Time Between Failure
- **MTTR** : Mean Time To Repair
- **A** : Availability
- **P** : Impact sur la Production
- **S** : Impact sur la Sécurité
- **V** : Valeur de l'équipement
- **TOPSIS** : Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
- **AP** : Actions Préventives
- **AC** : Actions Correctives
- **MP** : Maintenance Préventives
- **H** : Hidden Failure
- **FTA** : Fault Tree Analysis
- **RAM** : Reliability, Availability, Maintainability

## Introduction générale

Dans un monde industriel en constante évolution, la bonne gestion de la maintenance des équipements est un élément pivot dans la compétitivité et la performance des entreprises. En effet, durant ces dernières décennies, les industries ont compris que le profit n'est pas tiré que des ventes de leurs produits, mais aussi de l'optimisation de leurs processus et opérations. C'est pourquoi, elles montrent de plus en plus d'intérêt envers l'amélioration de leurs stratégies de maintenance. Les interruptions répétitives de production, les pannes imprévues et les coûts de maintenance des équipements sont des défis auxquels les entreprises font face quotidiennement et qui affectent considérablement leur rentabilité et efficacité. Compromettent ainsi leurs places sur le marché.

La Société des Ciments de Sour El Ghozlane (SCSEG) du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) et Henkel - Reghaia sont de parfaits exemples d'industries où la maintenance des équipements est un facteur clé pour garantir leur notoriété sur le marché. La demande accrue de leurs produits et la complexité de leurs systèmes de production nécessitent l'adoption d'une stratégie de maintenance réfléchie, structurée et rigoureuse afin de garantir la fiabilité des équipements et de bien gérer les activités de maintenance tout en optimisant les coûts de ces dernières. C'est dans cette perspective que la méthode de maintenance centrée sur la fiabilité ou Reliability Centered Maintenance (RCM) se révèle être une solution prometteuse.

La méthode RCM offre un cadre méthodologique et systématique qui permet d'analyser et d'améliorer la maintenance des équipements en se focalisant sur les systèmes critiques, aidant ainsi à réduire les coûts liés à la maintenance et améliorer la fiabilité. Son application sur les deux entreprises ( SCSEG et Henkel-reghaia) vise à montrer l'apport qu'elle peut avoir et la flexibilité qu'elle offre dans deux contextes industriels différents en abordant des problèmes réels tels que l'amélioration de la fiabilité des équipements, la gestion des pannes et des risques et la prévention des défaillances.

L'objectif de ce travail est d'implémenter la démarche RCM dans deux industries différentes et de l'adapter aux contextes opérationnels des équipements, afin d'améliorer leur fiabilité et performance sur le long terme. Pour ce faire, nous visons à proposer un ensemble d'actions préventives et correctives dans le cadre d'une stratégie proactive.

La réalisation de ce projet était faite dans le cadre d'un stage au sein des départements de maintenance de la SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia. La première est une industrie cimentière située à Bouira et la seconde est consacrée à la production des détergents et produits de soins de la maison. Ce projet est

constitué de quatre chapitres principaux. Le premier chapitre, intitulé “ contexte et présentation des entreprises” , va d’abord présenter les entreprises mentionnées auparavant ainsi que les défis qu’elles rencontrent et la motivation du choix de la thématique proposée comme solution. Ensuite une brève étude bibliographique est réalisée afin de définir la RCM, sa méthodologie d’implémentation et son évolution à travers les dernières décennies. Un ensemble de six étapes d’implémentation de la RCM est ensuite proposé et utilisé lors de la réalisation de ce projet. Le deuxième chapitre va être consacré à la sélection et définition des systèmes dans les deux cas d’études, le périmètre de l’étude et l’analyse fonctionnelle des systèmes ainsi que la sélection des équipements critiques des entreprises respectives. Le troisième chapitre vise à accomplir l’analyse dysfonctionnelle et l’analyse des causes racines des défaillances qui nous permettront de proposer les améliorations de maintenance nécessaires pour chaque cas d’étude. Le projet est clôturé par la proposition d’un ensemble d’indicateurs clés de performance pour le suivi et l’amélioration continue de la stratégie RCM implémentée. Ceux-là sont visualisés et monitorés à l’aide d’un tableau de bord. A la fin de chaque chapitre, une partie sera consacrée à la comparaison des deux cas d’étude pour souligner les défis rencontrés et les différences constatées lors de la réalisation de chaque étape dans les deux entreprises.

---

# **Chapitre 1 : Contexte et Présentation des Entreprises**

---

# Chapitre 1: Contexte et Présentation des Entreprises

## Introduction

Ce chapitre présente les entreprises Henkel-Reghaia et la Société des Ciments de Sour El Ghozlane-GICA (SCSEG). Henkel, un leader mondial dans les adhésifs, les produits de beauté et les soins ménagers, et GICA, un des principaux producteurs de ciment en Algérie, opérant dans des secteurs industriels où l'efficacité et la fiabilité des équipements sont essentielles. L'objectif de ce chapitre est de justifier le choix de la méthode de Maintenance Centrée sur la Fiabilité (Reliability Centred Maintenance, RCM) pour ces entreprises ainsi que l'exploration des principes fondamentaux de la méthode RCM, en exposant ses étapes clés et les outils utilisés dans chaque phase. Ce chapitre sera clôturé par la proposition d'une démarche composée de six étapes pour l'implémentation de la RCM.

## 1. Présentation de l'entreprises Henkel

Le groupe Henkel est une entreprise allemande multinationale fondée en 1876 par Fritz Henkel, renommée opérant dans le domaine des produits chimiques et des biens de consommation. Avec une présence mondiale, Henkel est impliquée dans divers secteurs, notamment les produits de beauté et de soins personnels, les produits d'entretien ménager et les adhésifs industriels. Elle opère dans diverses régions telles que l'Europe, l'IMEA (Inde, Moyen-Orient, Afrique), l'Amérique du Nord, l'Amérique latine et l'Asie-Pacifique ainsi que dans 125 pays à travers le monde. L'entreprise se distingue par son engagement envers l'innovation, la durabilité et la responsabilité sociale.

En 2002, l'entreprise a marqué sa présence en Algérie par une joint-venture avec l'entreprise ENAD (Entreprise Nationale Algérienne des Détergents), elle dispose d'un siège social et de deux usines de production, dont une dans la zone industrielle Reghaia à Alger, qui produit des détergents liquides et l'autre à Chelghoum laïd à Mila consacrée à la fabrication des produits en poudre.

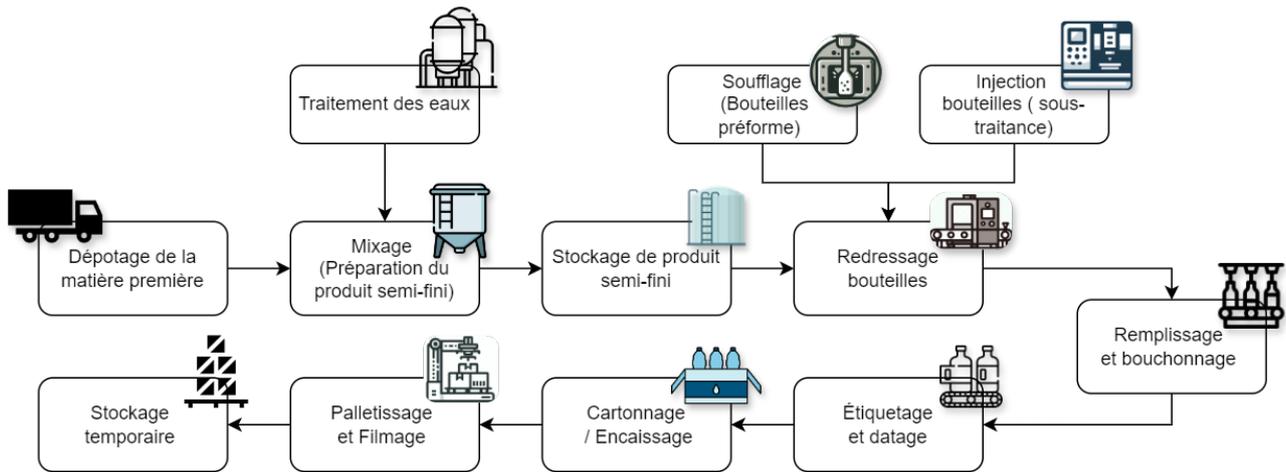
Avec plus de 700 employés, Henkel Algérie a réussi à couvrir l'ensemble du territoire algérien. L'entreprise met un accent particulier sur l'optimisation de l'utilisation de l'énergie et de l'eau, tout en respectant rigoureusement les normes environnementales, notamment à travers le traitement des déchets. Henkel s'engage à réduire son empreinte écologique en adoptant des pratiques durables et

innovantes. Ces efforts incluent la mise en place de technologies modernes pour surveiller et réduire la consommation d'énergie, ainsi que des systèmes de gestion de l'eau visant à minimiser l'utilisation et à maximiser le recyclage. En outre, Henkel traite efficacement ses déchets pour prévenir la pollution et protéger l'environnement, illustrant ainsi son engagement envers la durabilité et la responsabilité environnementale. Le site de production des détergents liquides situé à Reghaia, est une unité de production dédiée aux produits d'entretien ménager et aux détergents liquides. Cette usine fabrique des produits pour les marques ISIS, Pril, Le Chat et Bref avec quatre lignes de production qui sont :

- **Ligne Marin** : pour la production des bouteilles du javel Bref.
- **Ligne Ronchi 1 et Ronchi 2** : pour la production de Pril isis de différent format.
- **Ligne CMI** : pour la production de liquide machine Isis et le chat.

### **1.1. Processus général de Production**

Le processus de l'usine de Reghaia commence par le dépotage des matières premières, transportées par des camions-citernes, dans la zone de dépotage équipée d'une balance. En parallèle, le traitement des eaux se fait dans des cuves spéciales. Ensuite, la préparation du produit semi-fini se déroule via le mixage, chaque produit ayant une formule précise vérifiée par les spécialistes de laboratoire. Les préformes sont soufflées par des machines souffleuses pour les bouteilles de pril isis ,Isis et le chat.Pour les flacons du javel un sous-traitant prépare les bouteilles avec une méthode d'injection. Les quatre lignes de production débutent par le redressage, suivi du remplissage et du bouchage, puis de l'étiquetage et du codage. Le processus se termine par le cartonnage et l'encaissement, ainsi que le palettisage et le filmage afin d'être stocké et la distribuer. le processus est illustré dans la **figure 1.1**.



**FIGURE 1.1 :** *Modelisation du Processus général de Production Henkel-Reghaia*

## 1.2. Motivation du choix de la stratégie RCM pour Henkel-Reghaia

Pendant la pandémie de COVID-19, l'utilisation de produits de lessive et d'entretien ménager a connu une augmentation significative, plaçant les entreprises de détergents dans une situation critique en raison de l'augmentation considérable de la demande pour leurs produits. Henkel Algérie, avec ses 70 000 points de vente couvrant l'ensemble du territoire algérien, a dû relever un immense défi pour répondre à cette demande accrue des consommateurs, d'autant plus que l'usine Henkel de Reghaia est la seule usine produisant des détergents liquides. Cette situation souligne l'importance de mettre en œuvre une stratégie qui assure la fiabilité des équipements en termes de productivité et de qualité, pour cela on a choisi la maintenance basée sur la fiabilité (RCM).

Les principales questions qui nous ont guidé vers la RCM incluent la nécessité d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements pour répondre à la demande accrue, de réduire les coûts de maintenance en évitant les réparations d'urgence coûteuses et d'améliorer la sécurité et la qualité des produits. Henkel a déjà intégré des technologies modernes telles que l'Internet des objets (IoT) pour la surveillance en temps réel et la maintenance prédictive qui offre une base de données fiable aidant à prendre des décisions durant l'implémentation de cette méthode. En adoptant RCM, Henkel Algérie peut optimiser ses opérations, assurer une production continue et fiable et maintenir sa position à la pointe de l'innovation en matière de maintenance industrielle.

## 2. Présentation de la SCSEG - GICA

La société des ciments de Sour El Ghazlane (SCSEG) est une filiale du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (GICA) et partenaire du groupe italien BUZZI UNICEM depuis 2008. Construite par FLSMIDTH et active depuis 1983 dans le développement, la recherche, la production et la commercialisation du ciment, la SCSEG est considérée comme le fournisseur principal de ciment pour plusieurs wilayas du nord, centre et sud du pays, Cela grâce à sa position géographique stratégique. En effet, L'usine de Sour El Ghazlane est située à 120 Km du sud-est d'Alger, et à 25Km de Bouira, chef-lieu de Wilaya. La société produit annuellement 1 000 000 de tonnes de ciment et emploie plus de 300 employés.

La SCSEG occupe une place stratégique dans la Supply Chain et opère dans les trois grands secteurs de production voire :



**Le secteur primaire** : extraction de la matière première (calcaire).



**Le secteur secondaire** : Production de ciment.



**Le secteur tertiaire** : Vente de clinker et de ciment en sac et en Vrac.

L'usine est divisée en cinq zones, chacune dédiée à une étape principale du processus de production du ciment :

- secteur de concassage (zone 100),
- secteur de broyage cru (zone 200),
- secteur de four (zone 300),
- secteur de broyage ciment (zone 400),
- secteur d'expédition (zone 500).

### 2.1. Processus général de production

Consacré à la production de ciment par voie sèche, le processus de production **figure 1.2** de l'entreprise est déclenché par l'extraction de la matière première (Calcaire) qui constitue 80% de la composition du ciment, et l'approvisionnement en ajouts tels que l'argile, le gypse et le minerai de fer. Ces derniers sont ensuite concassés dans la zone 100 afin d'avoir des roches qui vont être broyées dans un broyeur

à boulets afin d'obtenir une farine (zone 200). Cette dernière est stockée dans des silos dédiés afin d'alimenter le four pour accomplir la phase de cuisson à 1400°C (zone 300). Cette étape s'accomplira par l'obtention de la matière semi-finie ou le clinker qu'est soumis à un deuxième broyage duquel résulte le ciment ou la matière finie. Le ciment est enfin stocké et expédié. La vente du produit se fait de deux manières ; l'expédition en Vrac ou l'expédition en sac qu'est précédée par un processus d'ensachage et de conditionnement dans la zone 500.

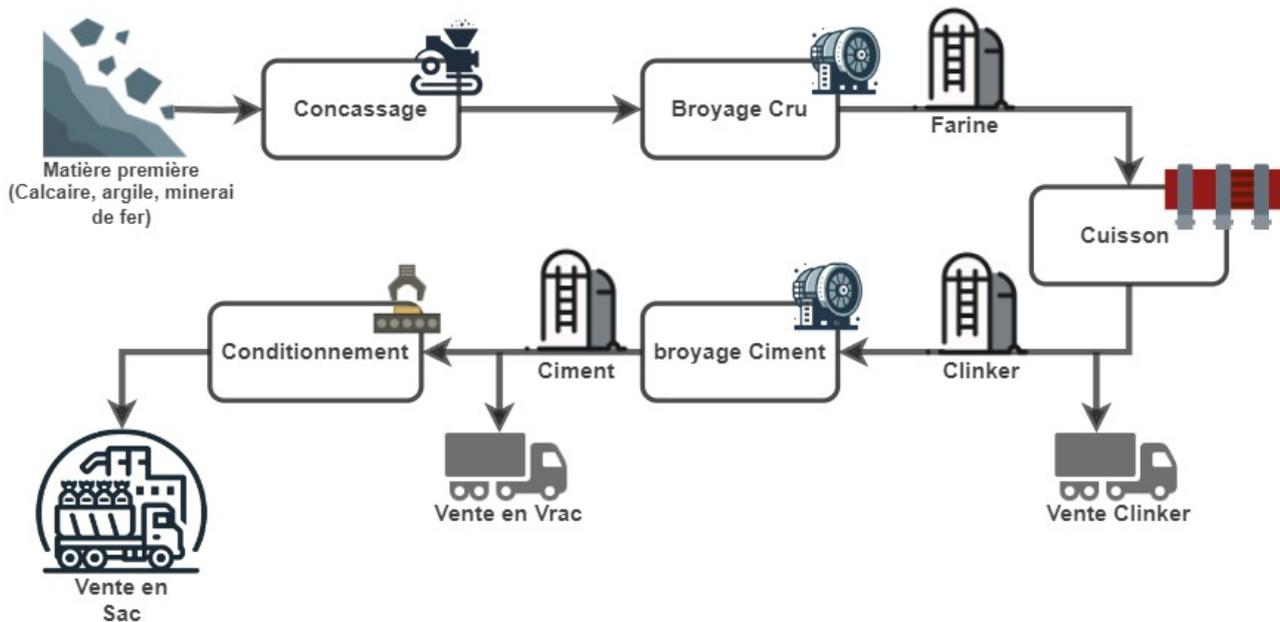


FIGURE 1.2 : Modelisation du Processus général de Production SCSEG\_GICA

## 2.2. Motivation du choix de la stratégie RCM pour la SCSEG

L'Algérie, un pays en pleine croissance économique, connaît de plus en plus de projets de développement d'infrastructures tels que la construction de routes, de ponts et de logements. La SCSEG-GICA se retrouve donc face à une demande importante et continue. Afin de répondre aux besoins de ses clients et de garder sa notoriété sur le marché, l'entreprise doit constamment concentrer ses efforts sur la fiabilité de ses équipements et optimiser ses processus. Pour ce faire, investir dans la maintenance des équipements se révèle être un atout primordial.

La production cimentière fait partie des industries lourdes les plus importantes. Autrement dit, il s'agit d'une industrie qui exige des capitaux et équipements substantiels. En effet, les machines nécessaires à la production du ciment tels que les concasseurs, les broyeurs et le four sont particulièrement coûteuses et sont conçues pour avoir une longue durée de vie. Additionnellement, les temps d'arrêts de ces équipements qui sont sollicités en permanence sont extrêmement dispendieux vu les pertes de

production qu'ils engendrent d'une part, et la complexité de la maintenance qu'ils nécessitent d'une autre. En outre, les vibrations et la poussière auxquels les équipements de la SCSEG-GICA sont exposés impactent significativement leur performance et fiabilité et rendent leur entretien encore plus compliqué.

Plus important encore, l'environnement et les conditions de travail dans la cimenterie sont rudes et difficiles, l'exposition aux hautes températures, au bruit et à la poussière en plus des interventions sur des équipements lourds représentent un danger majeur sur la sécurité et la santé des employés.

L'ensemble de ces défis font de la RCM la méthode parfaite à adopter pour optimiser les processus et la fiabilité des équipements de cette entreprise. La méthode RCM, étant une stratégie qui combine efficacité et efficacité, permet d'optimiser la maintenance en focalisant les efforts sur les équipements critiques tout en prenant compte de leurs conditions et environnement de fonctionnement et, éventuellement, améliorer leur fiabilité. De plus, elle va faciliter l'intégration des solutions technologiques de la maintenance prédictive afin de détecter les défaillances avant leur apparition et garantir la productivité de l'entreprise et la sécurité des employés. Enfin, la RCM peut aussi contribuer au respect des normes d'émission et aux réglementations environnementales que la SCSEG-GICA doit obligatoirement respecter en garantissant un fonctionnement conforme des équipements et une efficacité énergétique.

### **3. La maintenance centrée sur la fiabilité (RCM)**

Dans cette section, une étude bibliographique est présentée afin de définir la RCM, son évolution ainsi que ses principes fondamentaux. A la fin, un ensemble d'étapes d'implémentation de la RCM est proposé.

#### **3.1. Définition de la maintenance centrée sur la fiabilité**

La maintenance centrée sur la fiabilité (Reliability Centered Maintenance, RCM) est généralement définie comme une stratégie qui vise à développer ou optimiser un plan de maintenance préventive pour un équipement ou un ensemble d'actifs ou biens physiques. Il est important de noter que la RCM se concentre sur la "fiabilité inhérente" ou la fiabilité intrinsèque de l'équipement, autrement dit la RCM sert à exploiter et tirer un maximum d'avantages de cette dernière. Cela étant, la RCM ne sera pas capable d'améliorer cette fiabilité, puisque celle-ci peut uniquement être modifiée grâce à une

refonte ou reconception de l'équipement[1].

L'objectif principal de la RCM est de réduire les coûts de maintenance en concentrant les efforts et actions de maintenance sur les principales fonctions du système et éviter toute maintenance inutile[2].

De nombreux chercheurs conviennent que la RCM est une stratégie qui se concentre principalement sur les éléments critiques et leurs fonctions. La criticité de l'équipement dépend de sa complexité, de ses mécanismes de dégradation et de défaillance, et l'ampleur de leurs conséquences[3, 4, 5]

La définition du système critique est suivie par une analyse RCM, cette analyse sert d'outil complet pour répondre à sept questions importantes sur la fonctionnalité du système. Tout d'abord, les fonctions de l'équipement et les critères de performance pertinents sont expliqués dans les conditions de fonctionnement actuelles. Ces caractéristiques sont ensuite examinées pour identifier les lacunes et les erreurs de performance. Les causes racines des défaillances sont également analysées. L'analyse met aussi en évidence l'impact de chaque erreur et démontre son effet. Enfin, et afin de réduire proactivement ces défaillances, des mesures préventives pour chaque défaillance identifiée sont adoptées[1].

La RCM est donc une stratégie qui garantit l'optimisation des ressources, l'amélioration de la sécurité, l'augmentation de la disponibilité des équipements, la réduction des coûts, l'amélioration des performances et l'adoption d'une approche proactive. En priorisant la fiabilité, cette méthode assure que les approches de maintenance soient performantes, efficaces et en accord avec les objectifs de maintien d'opérations continues et productives.

Actuellement, la RCM continue d'être une pratique importante au sein des industries de divers secteurs, notamment la fabrication des équipements militaires[6], l'énergie nucléaire[7], la production des ciments[8], l'industrie des produits alimentaires[9], les détergents et la fabrication pharmaceutique[10].

### **3.2. Historique et évolution de la RCM**

La maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) est apparue dans les années 1960 au sein de l'industrie aéronautique en réponse à la complexité croissante des avions. Les pratiques de maintenance de l'époque, caractérisées par des interventions planifiées, étaient insuffisantes pour empêcher l'apparition des pannes critiques. Les études réalisées ont indiqué que des approches de maintenance plus stratégiques peuvent conduire à des résultats dans lesquels la sécurité est améliorée concrètement et une réduction des coûts est obtenue. En 1978, un rapport révolutionnaire de Nolan et Heap a été élaboré pour United Airlines, qui décrivait formellement cette approche et donna naissance à la codification d'un processus de maintenance plus efficace pour assurer la sécurité des avions[11, 12]. Ce rapport est l'une des raisons pour lesquelles la Society Automotive Engineers a développé sa norme

JA1011, qui constitue toujours une référence importante pour la RCM moderne[13].

Ces dernières années, la méthode RCM a connu un développement important avec l'émergence de l'industrie 4.0. Les nouvelles technologies, comme l'Internet des objets (IoT), sont devenues de précieux outils d'accompagnement à l'implémentation de cette méthode. De plus, la gestion des risques a également pris une place importante dans l'approche RCM, permettant une maintenance prédictive et proactive[14].

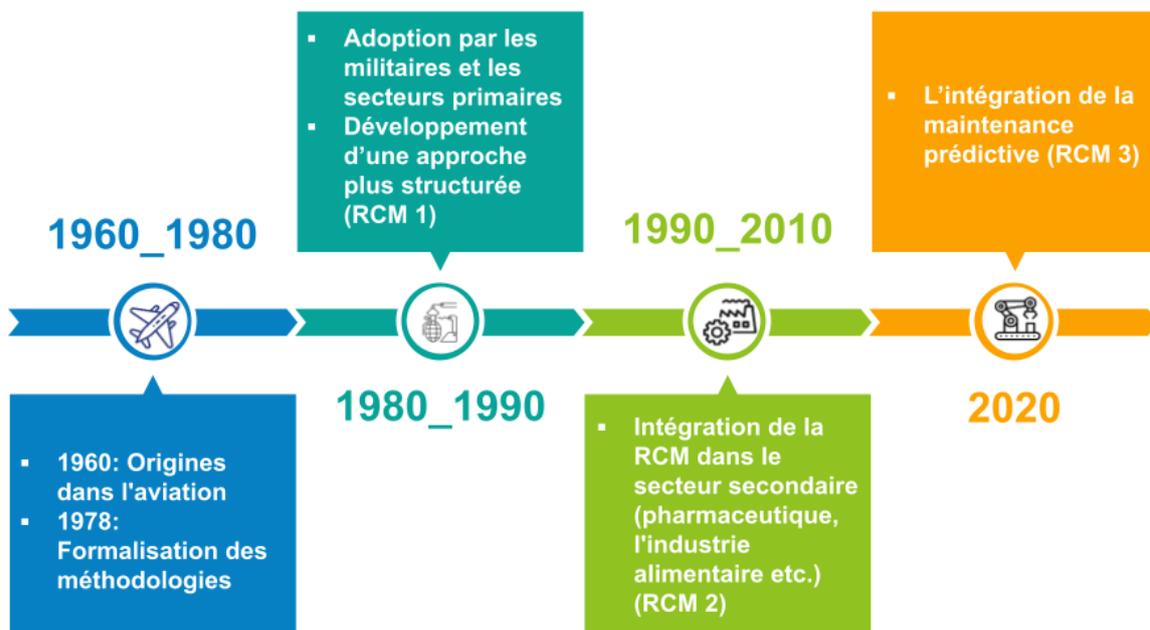


FIGURE 1.3 : Chronologie de l'évolution de la RCM

### 3.3. Méthodologie d'implémentation de la RCM

L'implémentation de la RCM repose sur un cadre méthodologique structuré qui permet d'identifier, d'analyser et de gérer les risques de défaillance des équipements critiques.

Une analyse RCM fournit essentiellement des réponses aux sept questions suivantes[15] :

1. Quelles sont les fonctions et les normes de performance associées de l'équipement dans son état opérationnel ?
2. De quelles manières peut-il tomber en panne ?
3. Quelle est la cause de chaque défaillance ?
4. Que se passe-t-il à chaque mode de défaillance ?
5. Pourquoi chaque défaillance est-elle importante ?

6. Que peut-on faire pour éviter chaque défaillance ?
7. Que faut-il faire si une tâche préventive appropriée n'est pas trouvée ?

Afin de répondre à ces questions, un processus structuré a été mis en place, détaillant les réponses nécessaires. Plusieurs méthodologies sont proposées pour atteindre cet objectif, mais la méthode la plus couramment utilisée comprend 12 étapes spécifiques[15] :

- Préparation de l'étude
- sélection et définition de système
- Analyse des défaillances fonctionnelles
- Sélection des éléments critiques
- Collecte et analyse des données AMDEC
- Sélection des actions de maintenance
- Détermination des intervalles de maintenance
- Analyse comparative de la maintenance préventive
- Traitement des éléments non critiques
- Mise en œuvre
- Collecte et mise à jour des données en service

### 3.4. Méthodologie et outils proposés pour l'implémentation de la RCM

Afin d'intégrer cette méthodologie dans notre travail, nous proposons un cadre qui synthétise cette stratégie en six phases (voir **figure 1.4**) qui sont comme suit :

1. **Choix et définition du système** : Le choix et la définition du système constituent le pilier fondamental de toute étude. Cette étape consiste à identifier précisément le périmètre de l'étude en déterminant le milieu de réalisation. Il s'agit de sélectionner les systèmes, en tenant compte de leurs rôles et de leurs interactions dans le processus global.
2. **Analyse fonctionnelle** : L'analyse fonctionnelle vise à représenter le système dans son environnement et contexte de fonctionnement normal en représentant les entrées et les sorties, ses composants et les interactions et relations entre eux et avec le milieu extérieur, afin de répondre à la première question de la RCM[16, 17].

Pour réaliser cette étape, des outils comme le bloc diagramme fonctionnel (BDF), l'arborescence hiérarchique et le diagramme SADT (Structured Analysis and Design Technique) sont

employés pour visualiser la structure détaillée du système et analyser les fonctions et solutions technologiques nécessaires à son fonctionnement.

- Sélection de l'équipement critique** : Etant de nature orientée détail, la méthode RCM exige de centrer les efforts sur un système bien défini, et vu l'investissement que son implémentation implique et afin que celle-ci améliore réellement la performance de l'entreprise, il est important que le système ou équipement choisi soit jugé critique. Ce processus débute par une analyse de criticité entre les équipements pour évaluer l'impact de chacun sur la sécurité, l'environnement, la production et les coûts. Cette phase s'appuie fortement sur l'expertise du personnel de maintenance et sur l'exploitation des données historiques[18].

Des outils comme l'analyse Pareto et les méthodes d'aide à la décision multicritères comme l'AHP[19] et TOPSIS[20] sont utilisés pour identifier les systèmes critiques en maintenance, en classant les actifs selon leur valeur et en tenant compte de multiples critères. L'analyse de criticité qui combine les approches qualitatives et quantitatives est d'une utilité majeure pour évaluer rigoureusement les équipements en fonction de leur impact sur la production et la sécurité[21].

- Analyse dysfonctionnelle** : Dans cette étape, l'étude se fait sur les conditions de dysfonctionnement où les modes de défaillance possibles sont analysés et les causes et effets de chacun sont déterminés, cela répond aux questions 2,3,4 et 5 de la RCM cités plus haut.

La méthode AMDEC est l'une des approches les plus utilisées dans cette étape, elle représente les modes de défaillance avec leurs causes et effets tout en quantifiant leur importance avec un coefficient de criticité. Des outils complémentaires comme l'arbre de défaillance (Fault Tree Analysis, FTA) [22] et le diagramme d'Ishikawa[23] aident à identifier les causes environnantes et les causes racines des pannes, facilitant ainsi la prise de décision et la création d'un plan de maintenance efficace.

- Sélection des actions de maintenance** : Cette phase vise à décider, pour chaque mode de défaillance, si une tâche de maintenance préventive est appropriée et efficace, ou s'il est plus avantageux de laisser l'élément tomber en panne délibérément et d'effectuer ensuite une maintenance corrective. Le plan de maintenance est construit à partir d'informations basées sur l'expérience, la documentation technique des équipements, les actions de maintenance antérieures[24] et des résultats collectés lors des étapes précédentes de la RCM. A la fin de cette étape un plan de maintenance préventive est élaboré ou optimisé. pour aider à la décision, le diagramme de décision ou la logique RCM est utilisé afin de déterminer les actions de maintenance adéquates, en posant des questions directes sur les modes de défaillance. Cela orientera vers un plan de

maintenance incluant des tâches de maintenance prédictive pour anticiper les problèmes et ainsi minimiser le risque de pannes, des tâches préventives planifiées qui minimisent le risque des pannes et des tâches correctives pour remettre en marche les systèmes dont la défaillance est non critique[25].

6. **Monitoring du programme et amélioration continue** : Pour assurer l'efficacité du programme proposé et mesurer sa valeur ajoutée, une surveillance et une amélioration continue doit être mise en place. Cela implique l'utilisation des outils de surveillance en temps réel, ainsi que la collecte et l'analyse des données de performance. Les retours d'expérience doivent être intégrés régulièrement pour ajuster et optimiser les stratégies de maintenance.

Un tableau de bord est couramment proposé dans les phases de monitoring et de surveillance. Cet outil va permettre de visualiser le développement des performances des équipements durant la réalisation du plan de la RCM à l'aide des indicateurs de performances judicieusement définis.



FIGURE 1.4 : Méthodologie proposée pour l'implémentation de la RCM

## 4. Comparaison des cas d'études (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia)

Les deux entreprises occupent des places différentes dans la supply chain. La SCSEG-GICA opère dans le secteur primaire de production, cela fait d'elle une industrie lourde qui nécessite l'emploi d'équipements complexes et des infrastructures de grande envergure. Contrairement à l'entreprise Henkel-Reghaia qui est active dans le secteur secondaire voire, la transformation de la matière première en produits de lessives et d'entretien de la maison. Chose qui fait d'elle une industrie légère. La SCSEG-GICA, comme Henkel-Reghaia opère aussi dans le secteur secondaire en transformant la matière première extraite en ciment fini. De plus, elles sont toutes les deux actives dans le secteur tertiaire opérant dans la vente de leurs produits finis. Cependant, elles diffèrent significativement en termes de nature de clientèle. En effet, la SCSEG vend principalement ses produits à des entreprises de constructions étatiques et privées et aux distributeurs. Hors que, la vente des produits de Henkel-Reghaia se fait aux distributeurs et points de ventes. Cette différence entre le type de clientèle fait que les exigences du marché pour les deux entreprises ne sont pas de la même échelle. Par exemple, un retard de réponse aux besoins des clients de la SCSEG-GICA, en plus d'affecter sa réputation, peut avoir un impact désastreux sur l'avancement des grands projets de construction en Algérie. Tandis que, le non-respect des délais dans le cas de Henkel risque de compromettre la réputation et la notoriété de l'entreprise.

## Conclusion

En conclusion, la maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) se révèle être une stratégie puissante pour améliorer la fiabilité des systèmes et des équipements grâce à l'optimisation des plans de maintenance. De plus, notre analyse de la littérature relative à cette approche nous a révélé que la méthodologie RCM offre une flexibilité en termes des secteurs d'applications, des critères de criticité et de sélection des outils au sein de chaque phase. Cette flexibilité souligne l'importance d'une approche adaptée au contexte et met en évidence la diversité des outils disponibles pour mettre en œuvre efficacement la RCM. Pour cette raison, l'implémentation de cette approche dans les entreprises Henkel-Reghaia et SCSEG-GICA est particulièrement pertinente compte tenu de leurs positions critiques dans la supply chain.

---

## **Chapitre 2 : Périmètre d'étude et Sélection de l'équipement Critique**

---

## Chapitre 2: Périmètre d'étude et Sélection de l'équipement critique

### Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder les trois premières phases d'implémentation de la RCM. Dans un premier temps, une sélection et définition des systèmes à analyser dans les deux contextes (Henkel-Reghaia, SCSEG-GICA) sera effectuée pour délimiter le cadre de notre projet. Le choix du système se basera sur des facteurs significatifs à l'entreprise. Par la suite, une description des systèmes choisis, basée sur une analyse fonctionnelle sera réalisée permettant d'explorer en détail les fonctions des systèmes sélectionnés et leurs interactions. Enfin, La sélection de l'équipement critique sera réalisée grâce à une analyse de criticité des équipements et en employant des méthodes de l'analyse multicritères.

### 1. Sélection et définition du système

Dans cette partie, nous allons définir les critères de sélection des systèmes. Ceci sera suivi par une définition du cadre de l'étude, des systèmes et des normes qui régissent leur performance.

#### 1.1. Critères de sélection des systèmes

##### Cas Henkel-Reghaia :

Après une observation attentive du milieu de travail et des échanges avec le personnel de l'usine, il a été noté que la ligne de production de javel (ligne MARIN) est la plus critique. Cette constatation découle principalement de la nature délicate du produit fabriqué sur cette ligne. une décision influencée par plusieurs paramètres, notamment :

##### 1. La nature de la matière produite :

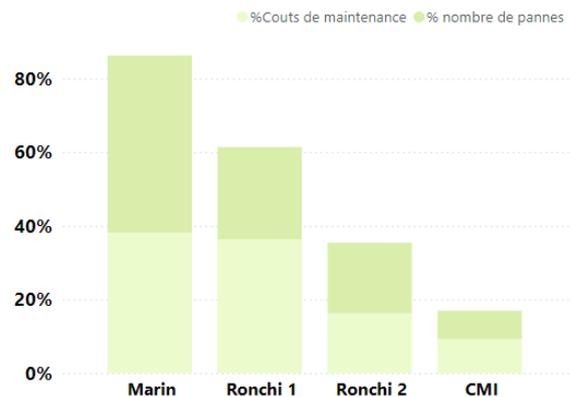
- **Impact sur l'être humain** : L'eau de Javel est un produit chimique toxique, elle peut provoquer une irritation de la peau, des yeux et des voies respiratoires en l'absence de mesures de protection adéquates. Lorsque les vapeurs d'eau de Javel sont inhalées, elles

peuvent provoquer une irritation des voies respiratoires, des maux de tête, des nausées et des complications respiratoires. Un contact prolongé ou une exposition excessive à l'eau de Javel peuvent provoquer des brûlures chimiques sur la peau. Dans certains cas, chez les personnes présentant une sensibilité accrue, l'eau de javel peut provoquer des réactions allergiques dangereuses[26].

- **Impact sur les équipements** : En raison de sa nature corrosive, lorsque l'eau de javel entre en contact direct avec les équipements par faute de remplissage, elle peut provoquer corrosion et dégradation rapide des composants de ces derniers. Cela est dû à la réaction chimique qui aurait lieu, dans le cas d'un contact entre les composants abrasifs du javel et ceux des matériaux qui constituent les machines[27].

## 2. Coûts de maintenance :

En se basant sur les données et historiques enregistrés dans la base de données du progiciel de ressources intégrés de l'entreprise (SAP ERP), nous avons pu déterminer le nombre des pannes et coûts de maintenance de chaque ligne. La ligne de production de javel(MARIN) s'est révélée être la plus problématique en termes de nombre de pannes et de coûts de maintenance.



**FIGURE 2.1** : Visualisation de nombre des pannes et Coûts de maintenance par ligne

## Cas de la SCSEG-GICA :

Après longue réflexion et discussion avec les ingénieurs de maintenance et de production ainsi que les techniciens de l'usine afin de définir le système stratégique qui fera le sujet de notre étude, le choix s'est penché sur la zone de cuisson ou la zone 300. Ce choix s'est appuyé sur un ensemble d'arguments et de facteurs comme suit :

### 1. Impact sur la production :

La zone de cuisson est située au cœur de l'usine. Elle est alimentée par un stock de farine crue et suivie d'un stock de clinker. Il est donc important qu'elle reste fonctionnelle afin d'éviter un surstock en amont et que le stock de clinker puisse répondre à la demande de clinker et de

ciment. Par ailleurs, lors de l'arrêt de la zone, un effet domino des arrêts est engendré tel que l'amont de la chaîne de production s'arrête entièrement. De plus, dans des cas de défaillances complexes, les arrêts peuvent durer jusqu'à un ou deux mois, tandis que les silos de stockage de clinker, quand pleins, parviennent à répondre à la demande moyenne d'une semaine uniquement. L'entreprise se retrouve donc face à l'obligation de s'approvisionner en clinker pour répondre aux besoins de ses clients.

## **2. Coût de maintenance :**

Les équipements de la zone sont les plus grands de l'usine et donc les plus compliqués à maintenir en termes de logistique et de transport. En effet, le déplacement des pièces de rechange et certaines interventions nécessitent une planification logistique adéquate et des moyens de transports convenables (camions, grues, etc.).

La zone de cuisson engendre les coûts de maintenance les plus importants. Cela est principalement dû au coût élevé de la pièce de rechange et à la nécessité de recourir à des prestataires de maintenance pour effectuer certaines tâches de maintenance dans la zone par faute d'effectif d'employés.

## **3. Environnement de fonctionnement des équipements :**

Bien que certains équipements de la zone soient conçus pour fonctionner dans des températures très hautes, l'exposition constante des moteurs et systèmes de lubrifications aux hautes températures affecte souvent négativement leur performances et réduit leurs durées de vie. De surcroît, la présence de fuites de ciment rend l'environnement poussiéreux. Outre le fait que cette poussière recouvre entièrement les équipements et durcit lorsqu'elle entre en contact avec le graissage de certains composants, elle finit souvent par contaminer les lubrifiants, causant leur dégradation précoce. chose qui risque d'endommager les équipements.

## **4. Sécurité, accidents de travail et risque sur la santé de l'humain :**

La nature des équipements de la zone et la lourdeur des pièces font de la maintenance une tâche extrêmement dangereuse sur l'intervenant. Les accidents de travail sont communs lors des interventions, notamment lors des travaux à chaud, comme c'est le cas durant les opérations de soudage où le risque d'inflammation est élevé. Pareillement, le risque de chute et de blessures permanentes est souvent présent pendant les interventions en hauteurs importantes, si les instructions de sécurité ne sont pas respectées.

L'exposition constante à la poussière et au bruit causé par les équipements tels que le four rotatif et les broyeurs à proximité représente un danger majeur sur la santé des employés de la zone. En effet, plusieurs cas d'asthme et de dommages auditifs sont enregistrés chez les employés.

## 1.2. Description et délimitation des systèmes

### Cas Henkel-Reghaia :

La fonction principale de la ligne est de produire des bouteilles d'eau de Javel à partir de matières premières (bouteilles, bouchons, étiquettes, plastique, carton, films, eau de javel). Ces éléments permettent de réaliser un produit fini et emballé, prêt à être transporté.

La ligne du production de l'eau de javel contient 6 machines en séries :

- **Redresseuse POSIMAT** : cet équipement positionne les flacons d'une façon correcte pour la prochaine étape du processus. Les flacons sont transportés sur le POSIMAT où ils glissent sur un disque incliné avant d'être positionnés horizontalement. L'air comprimé dans la zone de sélection assure un mouvement sans friction. les bouteilles tombent, ensuite, des cales dans les entonnoirs. Une zone de détection élimine les bouteilles défectueuses.
- **Remplisseuse/boucheuse MARIN** : Cette machine réalise les fonctions de remplissage et de bouchonnage. Elle dispose d'un réservoir pour la matière semi-fini, contrôlé par une vanne. Unité de remplissage, un système de bouchage et un groupe de lavage.
- **Étiqueteuse PE** : L'étiqueteuse est une partie intégrante du processus de production des produits. Elle applique les étiquettes sur les flacons, assurant ainsi l'identification précise des produits avec un code.
- **Sleeveuse SLEEVE** : Cette machine est utilisée pour envelopper les bouchons avec des manchons en plastique, cette opération permet de fournir une protection contre les fuites. La sleeveuse utilise des techniques de chauffage et de rétraction pour appliquer les manchons de manière précise et sécurisée sur les produits.
- **Encasseuse ETT** : Cette machine est utilisée pour former des cartons plats, placer les flacons à l'intérieur, puis fermer et scotcher les cartons.
- **Palettiseur(Palettiseur/fardeleuse Cleverttech** : Cette machine est constituée d'un convoyeur qui amène les cartons jusqu'à la zone de palettisation où ils sont structurés et descendent jusqu'à la palette. Ensuite, le lot est déplacé vers la zone de filmage pour être emballé.

### Cas de la SCSEG-GICA :

Pour cette étude, les équipements de la zone de cuisson étudiés sont ceux chargés directement de la cuisson de la farine crue et de la transportation du clinker aux silos dédiés. Les équipements de transport de la matière à partir des silos d'homogénéisation, de dosage de la farine crue avant le démarrage de préchauffage ainsi que les équipements de filtrage et de soutien sont omis de cette étude afin de concentrer l'analyse sur le processus de cuisson.

Composée de 03 équipements principaux en série, la zone de cuisson comprend :

- **Préchauffeur à cyclones** : le préchauffage de la farine crue se fait dans un préchauffeur à 04 étages et deux lignes de cyclones. La tour de préchauffage sert d'outil d'optimisation d'énergie en préchauffant la farine crue avant son arrivée au four. Cela réduit la quantité de combustible nécessaire à atteindre la température de Clinkérisation. A l'entrée, la farine crue rencontre les gaz chauds provenant du four et voyage à travers les cyclones à partir du quatrième étage. à la sortie, la température est déjà à 800°C.
- **Four rotatif et refroidisseur à ballonnets UNAX** : pour une production journalière de 3000 tonnes de clinker, le four rotatif est d'une longueur de 89 m et d'un diamètre de 5.5 m. Dix ballonnets du refroidisseur entourent le four et sont de même longueurs et diamètres de 25.2 m x 2.25 m. la farine crue entre dans le four et est calcinée ensuite clinkérisée à 1450°C. à la sortie du refroidisseur, la température des granulats de clinker est à 175°C.
- **Transporteurs à augets** : à la sortie du four, le clinker est transporté jusqu'au sommet des silos de stockage dédiés, via deux lignes de transporteurs à augets. Ce système permet aussi de décharger le clinker dans un silo en tôle qui sert de réservoir intermédiaire pour la vente de clinker ou pour l'évacuation du clinker mal cuit.

### 1.3. Normes et réglementations de performance

#### Cas Henkel-Reghaia :

Chaque ligne dans l'usine Henkel est encadrée par des critères qui sont mis en place pour assurer un système de management intégré. Ces critères sont soit intégrés par les accords de normalisation tels que :

- **Norme ISO 9001 :2015** : Systèmes de management de la qualité ;

- **Norme ISO 14001 :2015** : Système de management environnemental ;
- **Norme ISO 45001 :2018** : Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail ;
- **Norme ISO 50001 :2018** : Systèmes de management de l'énergie.

Ils peuvent également être définis par l'entreprise elle-même, comme c'est le cas pour les références Henkel HPS Standards et le Manuel SHEQ qui ont comme but d'assurer la sécurité, la santé, la performance et le progrès social tout en réduisant les énergies et les déchets matériels.

### **Cas de la SCSEG-GICA :**

Actuellement en phase projet, la SCSEG travaille sur l'amélioration de ses processus de sorte à répondre aux normes suivantes :

- **Norme ISO 9001 :2015** : Systèmes de management de la qualité ;
- **Norme ISO 14001 :2015** : Système de management environnemental ;
- **Norme ISO 45001 :2018** : Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail ;

En vue de futures perspectives, la SCSEG a lancé des demandes de consultations externes dans le but de se conformer à la **Norme ISO 50001 :2018** : Systèmes de management de l'énergie.

En plus des normes internationales, le fonctionnement et entretien des équipements de la zone de cuisson sont régis par les instructions de fonctionnement, entretien et sécurité du constructeur de l'usine (FLSmidth)

## **2. Analyse fonctionnelle**

L'analyse fonctionnelle dans la méthode RCM est une phase essentielle pour la décomposition du système en ses différentes fonctions et pour la compréhension des interactions internes et externes entre les composants du système et l'environnement externe. Cette analyse détaillée permet de prioriser les équipements et de se focaliser sur les sous-systèmes critiques. Afin de réaliser cette étape nous avons effectué un ensemble d'analyses en utilisant divers outils.

## 2.1. Diagramme de pieuvre

Dans le but de bien tracer les limites de notre système, il est important de définir l'environnement dans lequel il fonctionne. Pour ce faire, nous avons opté pour une modélisation du système et ses interactions avec le milieu extérieur. Le diagramme de pieuvre est un outil simple et représentatif des différents acteurs externes qui agissent sur notre système et nous permet de souligner leurs impacts sur ce dernier pendant l'accomplissement de sa fonction principale.

### Cas Henkel-Reghaia :

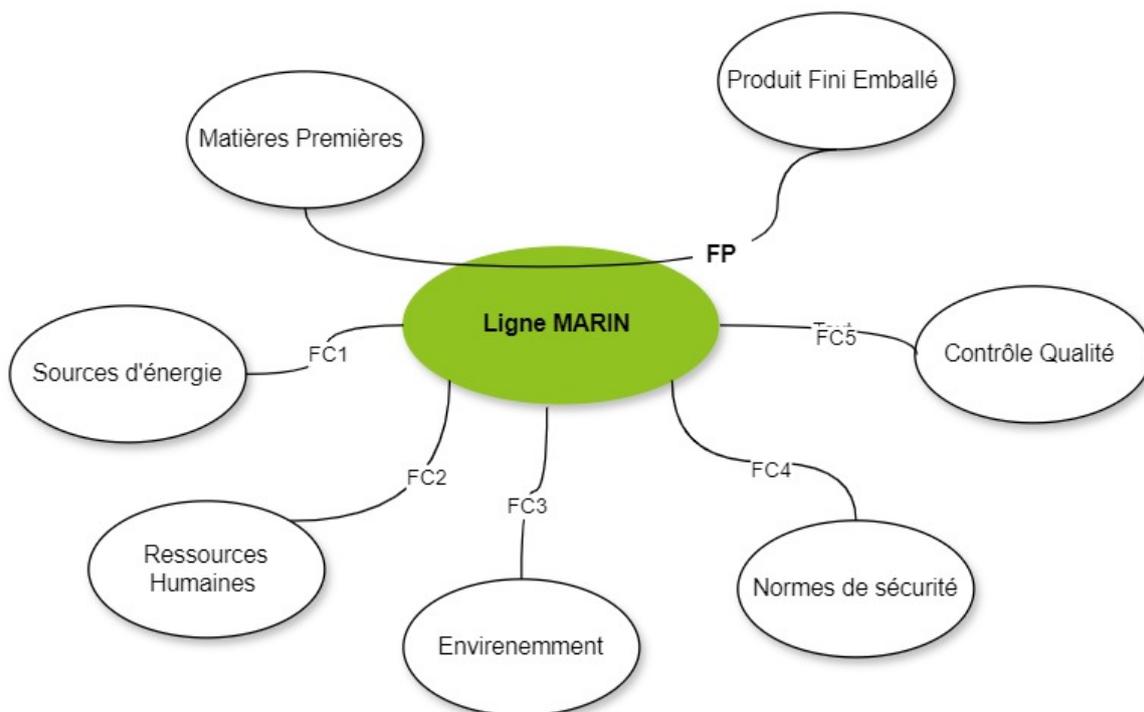


FIGURE 2.2 : Diagramme de pieuvre cas Henkel-Reghaia

Fonction	Désignation
FP	Produire des bouteilles de javel emballées à partir des matières premières.
FC1	Alimenter la ligne.
FC2	Opérer et maintenir la ligne.
FC3	Influencer la ligne.
FC4	Protéger la ligne.
FC5	Évaluer le fonctionnement de la ligne.

TABLE 2.1 : Désignation des fonctions cas Henkel-Reghaia

## Cas de la SCSEG-GICA :

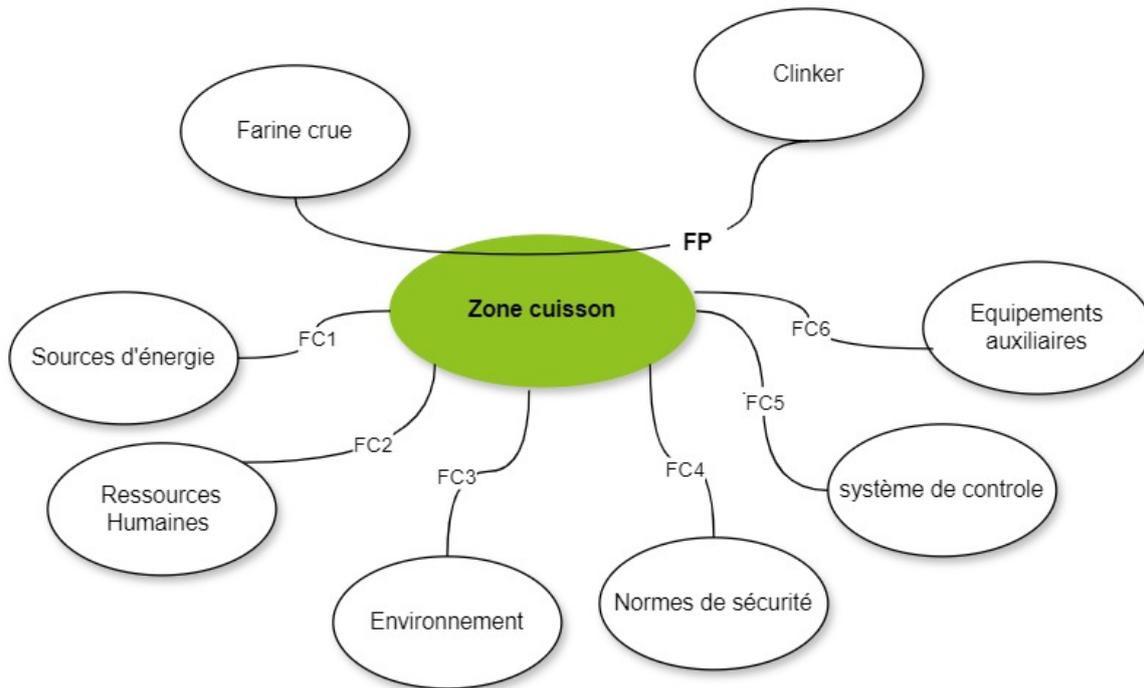


FIGURE 2.3 : Diagramme de pieuvre cas SCSEG-GICA

Fonction	Désignation
FP	Effectuer la cuisson de la farine crue et produire le clinker.
FC1	Alimenter les équipements de la zone en combustible et énergie électrique.
FC2	Opérer et maintenir les équipements.
FC3	Recevoir les émissions du système et influencer sur le système.
FC4	Assurer un fonctionnement correct et conforme.
FC5	Contrôler les paramètres de production ( température, pression, etc)
FC6	Ventiler et filtrer les poussières.

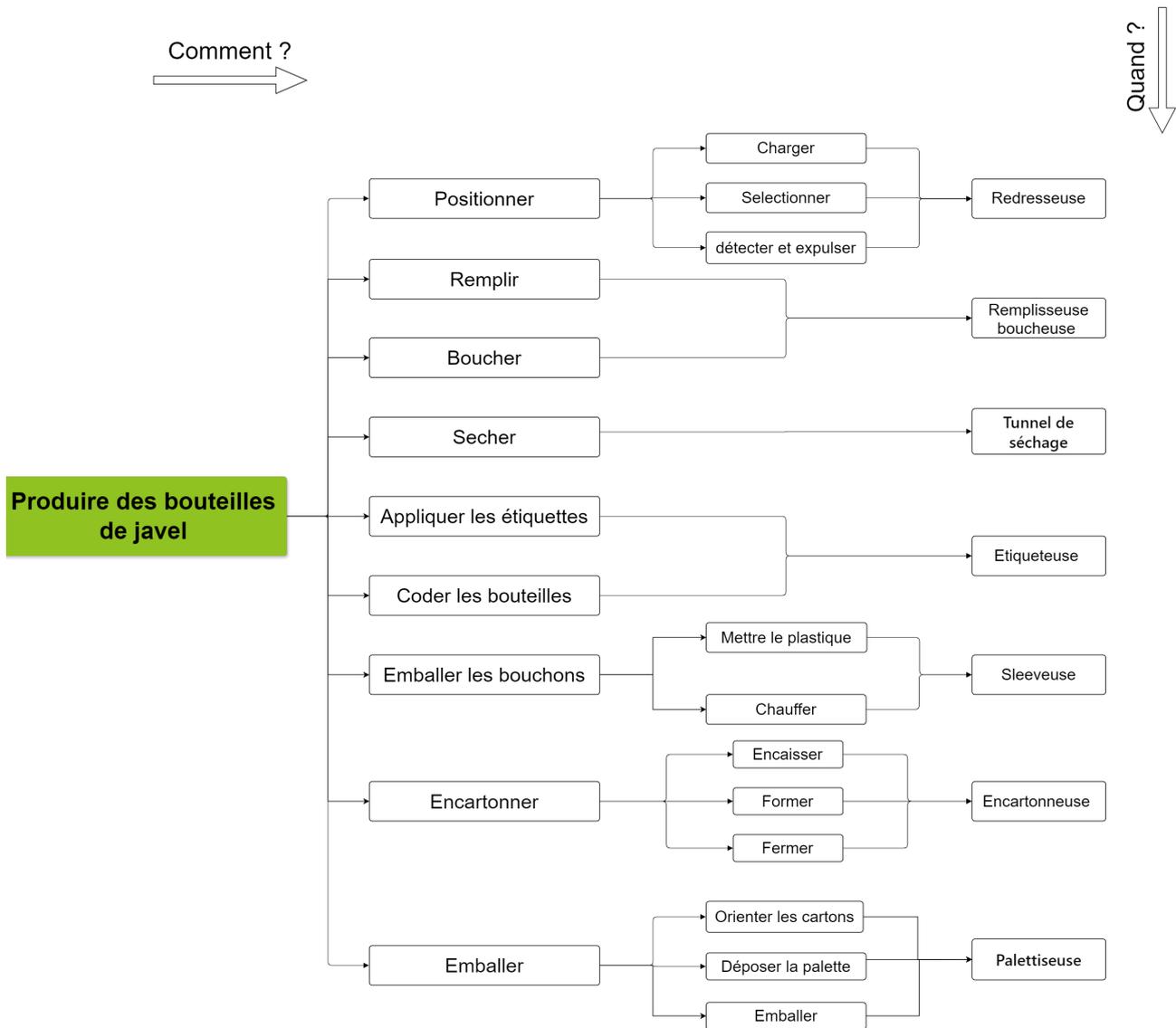
TABLE 2.2 : Désignation des fonctions cas SCSEG

## 2.2. Diagramme FAST

Le diagramme FAST va nous aider à mettre en évidence les fonctions principales et secondaires du système ainsi que les relations logiques entre elles, voire comment et quand elles sont réalisées. En lisant le diagramme de gauche à droite, on distingue les fonctions principales, leurs fonctions secondaires et les solutions technologiques nécessaires à leur réalisation ou l'équipement responsable

de la fonction. Parallèlement, la lecture de haut en bas va permettre de comprendre la succession logique des fonctions[28].

**Cas Henkel-Reghaia :**



**FIGURE 2.4 :** *Diagramme FAST cas Henkel-Reghaia*

### Cas de la SCSEG-GICA :

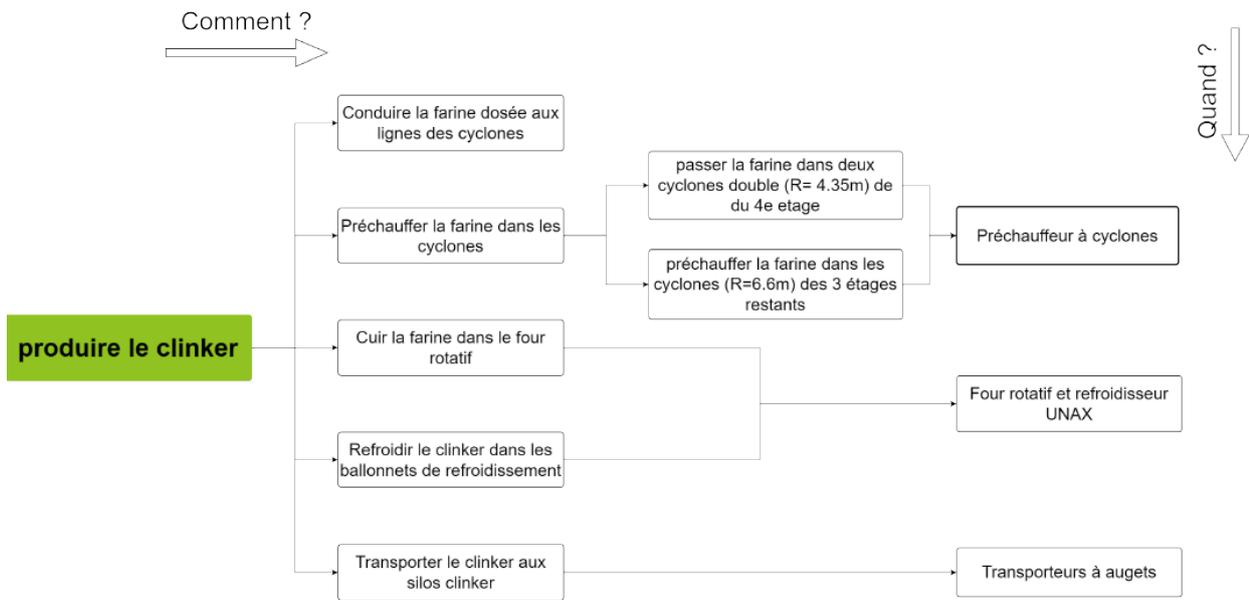


FIGURE 2.5 : Diagramme FAST cas SCSEG-GICA

### 2.3. Bloc Diagramme Fonctionnel

Pour mieux comprendre les entrées et les sorties des systèmes sélectionnés, nous avons réalisé des diagrammes SADT de niveau A-0 pour chaque cas (voir **Annexe 1** ). Cependant, pour des raisons pratiques, nous avons créé des Bloc diagrammes fonctionnels.

Le bloc diagramme fonctionnel met l'accent sur les flux d'informations, d'énergies et de matière entre les fonctions du système. Il sert à représenter les fonctions du système (chaque fonction est représentée par un bloc) et les différentes relations et interactions qui occurred entre celles-ci avec des flèches d'entrée et sortie[29]. la possibilité de représenter les différents flux va nous permettre de cibler plus facilement les équipements critiques.

Cas Henkel-Reghaia :

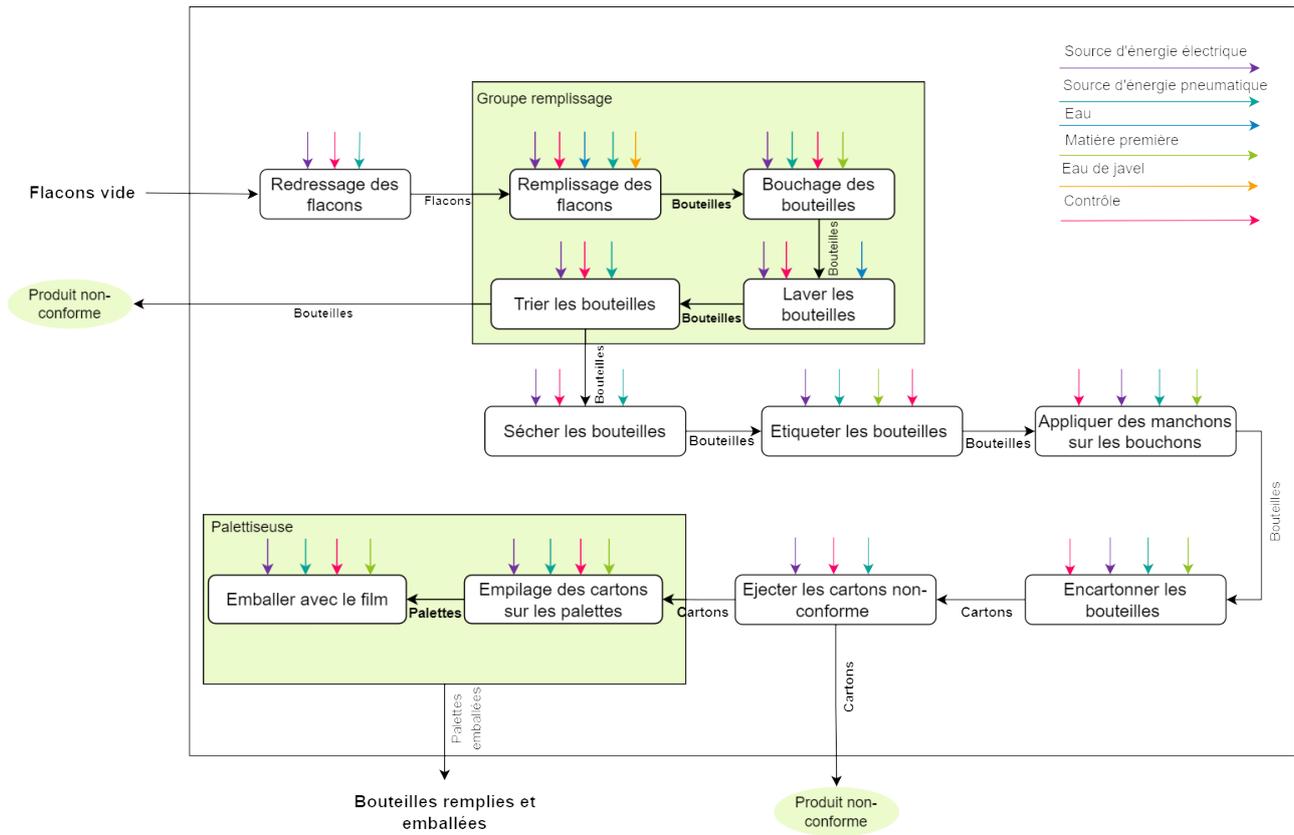


FIGURE 2.6 : Bloc Diagramme Fonctionnel cas Henkel-Reghaia

### Cas de la SCSEG-GICA :

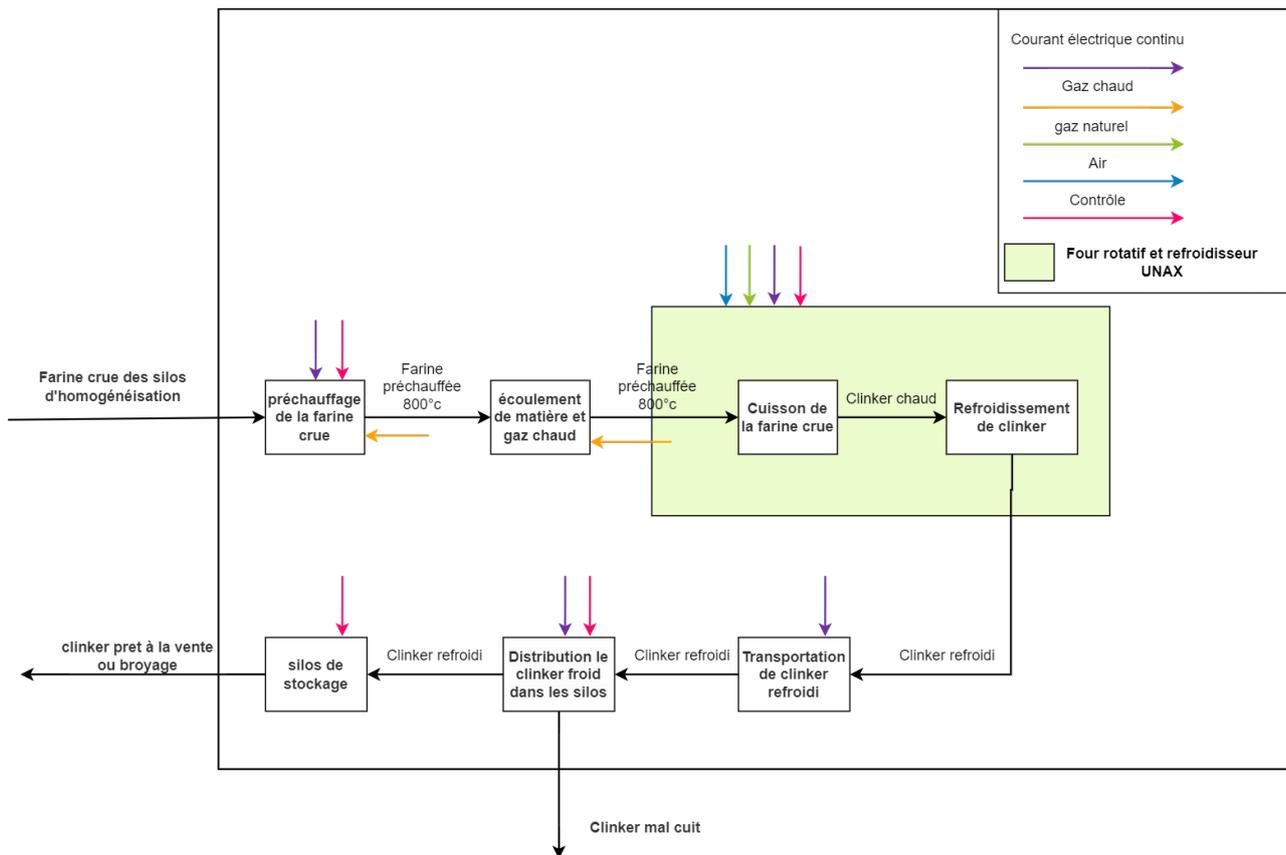


FIGURE 2.7 : Bloc Diagramme Fonctionnel cas SCSEG-GICA

## 3. Sélection de l'équipement critique

Afin de définir les équipements critiques, des critères spécifiques ont été choisis afin de réaliser une analyse multi-critères. Celle-ci nous permettra de faire le choix judicieux des équipements significatifs à la stratégie RCM.

### Cas Henkel-Reghaia :

Plusieurs critères peuvent être pris en considération lors de la sélection de l'équipement critique, dans notre cas, nous avons pris en compte trois critères essentiels qui sont :

#### 1. La fiabilité :

Dans la méthode RCM, la fiabilité est considérée comme le critère le plus important durant la sélection de l'équipement critique, à cause de sa capacité de quantifier le fonctionnement et

l'efficacité de l'équipement.

Parmi les KPIs qui permettent de visualiser la fiabilité, on retrouve le MTBF( temps moyen entre deux défaillances), qui est déjà un KPI employé par l'entreprise. Mais il était nécessaire de le recalculer sans prendre en considération les micro-arrêts qui ne sont pas des défaillances. Donc, les données du système sont exportées vers un fichier excel et elles ont été filtrés avec les ingénieurs méthodes.

Physiquement le MTBF se calcule par **l'équation 2.1** [30] :

$$MTBF = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (2.1)$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

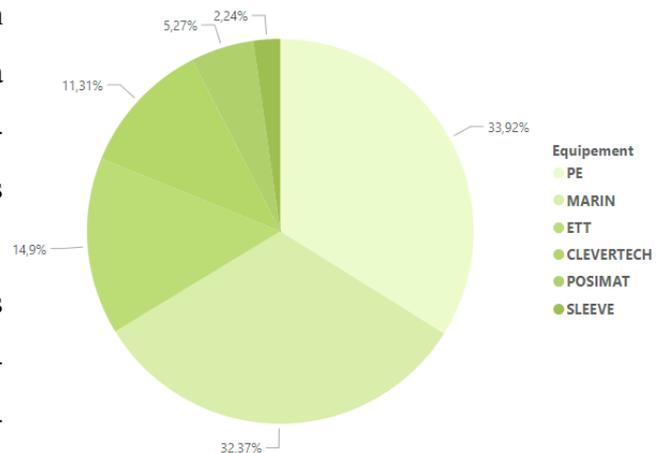
Equipement	Redresseuse POSIMAT	Unité de remplissage MARIN	Etiqueteuse PE	Sleeveuse SLEEVE	Encaisseuse ETT	Palettiseur CLEVER- TECH
MTBF(jours)	27.6	3.05	3.17	13.27	3.94	25.41

**TABLE 2.3 : MTBF par machine pour la ligne MARIN**

## 2. Le coûts de maintenance :

L'objectif de la méthode RCM est d'élaborer un plan de maintenance optimisé, cette optimisation se concrétise par une réduction des coûts de la maintenance. Ainsi, la prise en compte de ces derniers, comme critère de sélection des équipements critiques, semble un choix très évident.

Afin de mieux distinguer les équipements par leurs dépenses de maintenance et de déterminer l'équipement le plus onéreux, nous avons choisi de représenter les dépenses de maintenance de chaque équipement, proportionnellement aux dépenses de la ligne contenant l'équipement en question.



**FIGURE 2.8 : coûts de maintenance par équipement**

## 3. Impact sur la qualité :

Comme l'usine ne calcule pas les rebuts par équipement, il a été décidé d'aborder la question

de la qualité avec les ingénieurs qualité. Ces derniers ont fourni des coefficients (Evaluation qualitative) en fonction du degré d'impact des défaillances des équipements sur la qualité du produit (voir **Annexe 3**). les coefficients attribués à chaque équipement sont montrés dans le **tableau 2.4**.

Equipement	Redresseuse POSIMAT	Unité de remplissage MARIN	Etiqueteuse PE	Sleeveuse SLEEVE	Encaisseuse ETT	Palettiseur CLEVER- TECH
Coefficient	6	1	3	2	4	5

**TABLE 2.4** : Coefficient de la qualité par machine pour la ligne MARIN

Pour sélectionner l'équipement critique selon plusieurs critères, nous avons utilisé **la méthode TOPSIS** comme un outil d'aide à la décision multicritère. La méthode TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) classe les alternatives en fonction de leur proximité avec une solution idéale. En évaluant les distances euclidiennes entre chaque option et les solutions idéales, TOPSIS fournit une évaluation équilibrée. Cette approche permet une prise de décision objective et optimisée.

Il est vrai que, dans notre cas, les calculs ne sont pas particulièrement compliqués. Cependant, nous avons utilisé un code Python (voir **Annexe 4**) pour calculer les Scores de Similarité et effectuer le classement[31].

Les résultats de cette analyse sont présentées dans le **tableau 2.5**.

Equipement	Redresseuse POSIMAT	Unité de remplissage MARIN	Etiqueteuse PE	Sleeveuse SLEEVE	Encaisseuse ETT	Palettiseur CLEVER- TECH
Score de Similarité	0.034124	<b>0.982350</b>	0.750757	0.585262	0.591275	0.178994
Classement	6	1	2	4	3	5

**TABLE 2.5** : Résultats de la méthode TOPSIS

## Cas de la SCSEG-GICA :

Afin de déterminer l'équipement critique de notre système, nous avons adopté l'algorithme d'analyse multicritères de criticité [21] représenté dans l'**Annexe 4**. Cette analyse se fait en attribuant des poids par ordre d'importance aux critères :

1. **Impact sur la qualité** : noté (P) dans l'algorithme et présenté dans l'algorithme de référence par l'impact sur la production(P), ce critère représente les pertes de production ou de matière première causées par la défaillance de l'équipement et il lui est attribué le poids de 30%.
2. **Impact sur la sécurité** : noté (S) dans l'algorithme et ayant un poids de 30%, l'impact sur la sécurité dépend significativement de la taille de l'équipement et ses composants, de la difficulté d'accès à certains équipements et surtout du risque lié à sa défaillance sur l'intervenant.
3. **Disponibilité d'un équipement redondant** : noté (A) dans l'algorithme, l'existence d'un équipement qui peut accomplir la même fonction que celle d'un autre équipement (Stand-by) augmente systématiquement la disponibilité et en l'occurrence, la fiabilité du bloc et permet une certaine marge d'indulgence. De plus , la disponibilité d'un équipement en stand-by permet aussi de diminuer les charges sur les équipements. D'où l'attribution d'un poids de 25% à ce critère.
4. **valeur de l'équipement** : notée (V) avec un poids de 15%, la valeur de l'équipement est aussi importante. une machine est jugée importante quand elle implique un grand investissement lors de son acquisition et quand elle est également sollicitée à plein temps.

Une échelle dont les valeurs varient de 1 à 3 est attribuée à chaque critère(voir **Annexe 3**).

La classification des équipements sera faite par le calcul des criticités des machines (C) tel que ;

$$C = \frac{0.3 \times P + 0.3 \times S + 0.25 \times A + 0.15 \times V}{3} \quad (2.2)$$

On rappelle que le parc machines de la zone de cuisson est constitué des équipements suivants :

- Une tour de préchauffage à cyclones de 4 étages
- Un four rotatif et un refroidisseur à ballonnets UNAX
- Transporteurs à augets

Les équipements critiques choisis seront ceux appartenant à la classe A dont la criticité  $C > 85\%$ . L'attribution des niveaux d'importance a été faite avec l'aide de l'ensemble personnels de la zone de cuisson. Les classes de criticité des équipements sont illustrées dans le **tableau 2.6**.

Cette analyse nous a permis de définir Le four rotatif et le refroidisseur à ballonnets UNAX (C=90%) comme équipement critique qui fera le sujet de l'AMDEC- Machine.

Equipement	P	S	A	V	C	Classe
Tour de préchauffage	2	2	3	2	75%	C
Four rotatif et refroidisseur UNAX	3	2	3	3	<b>90%</b>	A
Transporteur à augets	1	2	1	2	48%	D

**TABLE 2.6 :** Résultats de l'analyse multicritères

## 4. Description et fonctionnement des Équipements Critiques

### 4.1. Description des équipements critiques :

#### Cas Henkel-Reghaia :

L'unité de remplissage permet le remplissage automatique des flacons de javel, suivi du capsulage. Le processus débute lorsque le convoyeur d'entrée amène les flacons à l'intérieur de la machine pour le remplissage, où le fluide descend par gravité, contrôlé par un débitmètre. Ensuite, les flacons passent par la boucheuse pour le vissage des bouchons, puis par une station de lavage. Les flacons remplis et bouchés sont ensuite transportés pour le contrôle des bouchons et du dosage avant d'être séchés à l'air comprimé (Voir l'annexe 2.



**FIGURE 2.9 :** Unité de remplissage

## Cas de la SCSEG-GICA :

La fonction principale du **four rotatif et refroidisseur UNAX** est la cuisson et le refroidissement du clinker ainsi que la transportation de celui-ci. Le corps du four est constitué d'une virole de 89 m de longueur et 5.5 m de diamètre qui est revêtu à l'intérieur de briques réfractaires. Pendant son fonctionnement, il est en rotation permanente et repose sur 4 supports numérotés de I à IV à partir de la sortie (Voir **Annexe 2**).



**FIGURE 2.10 :** *Four rotatif et refroidisseur UNAX*

Chaque support est constitué de :

- 2 galets supports,
- 4 paliers de galets (2 pour chaque galet),
- Un bandage (anneau) posé sur les galets sur lequel repose la virole.

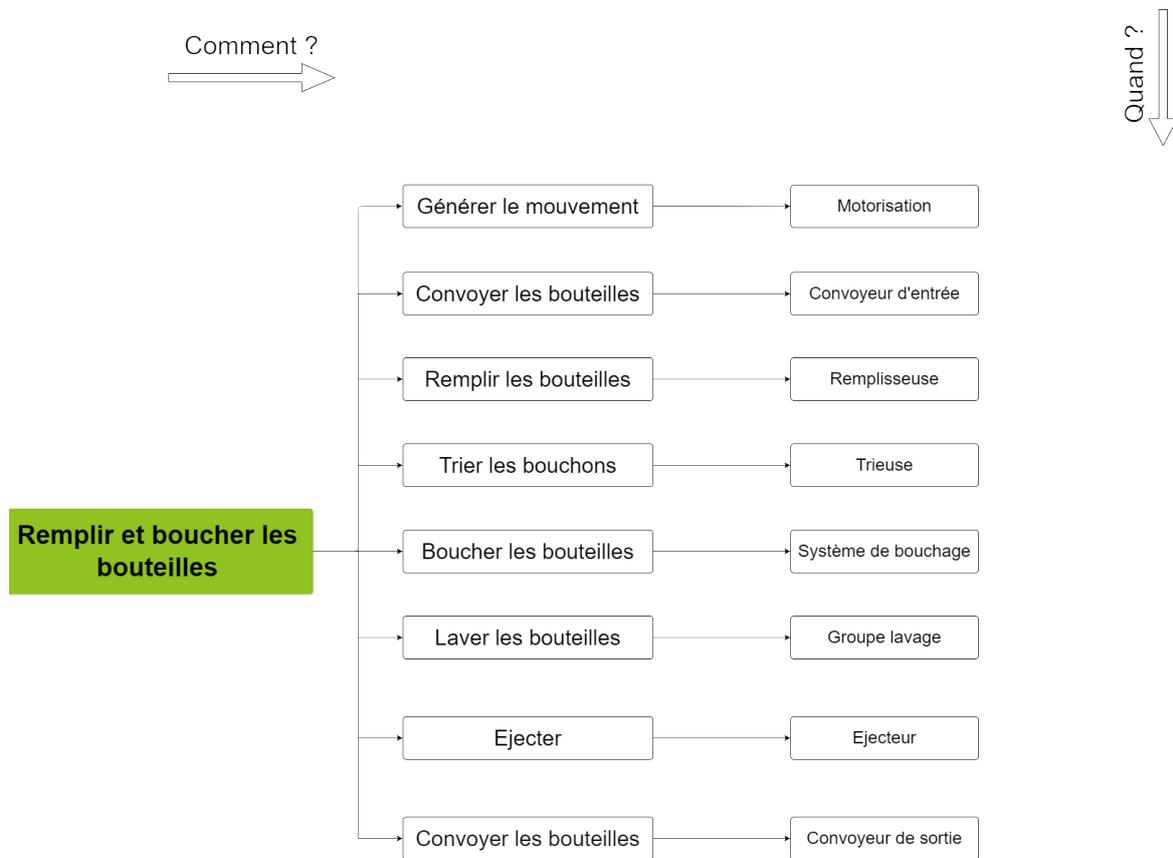
La rotation du four est assurée par un moteur à courant continu qui fait tourner un engrenage (couronne d'entraînement).

Dix (10) ballonnets de refroidissement de clinker de 25.2 m de longueur et 2.25 m de diamètre chacun sont attachés autour de la virole entre les 2 premiers supports.

## 4.2. Analyse fonctionnelle de l'équipement critique :

Afin de mieux comprendre le fonctionnement et les composants des équipements critiques, une analyse fonctionnelle sera réalisée, incluant le diagramme FAST pour deux équipements : l'unité de remplissage et le four rotatif avec refroidisseur. Cette analyse facilitera la phase suivante, qui est l'analyse dysfonctionnelle.

**Cas Henkel-Reghaia :**



**FIGURE 2.11 :** *Diagramme FAST de l'unité de remplissage*

## Cas de la SCSEG-GICA :

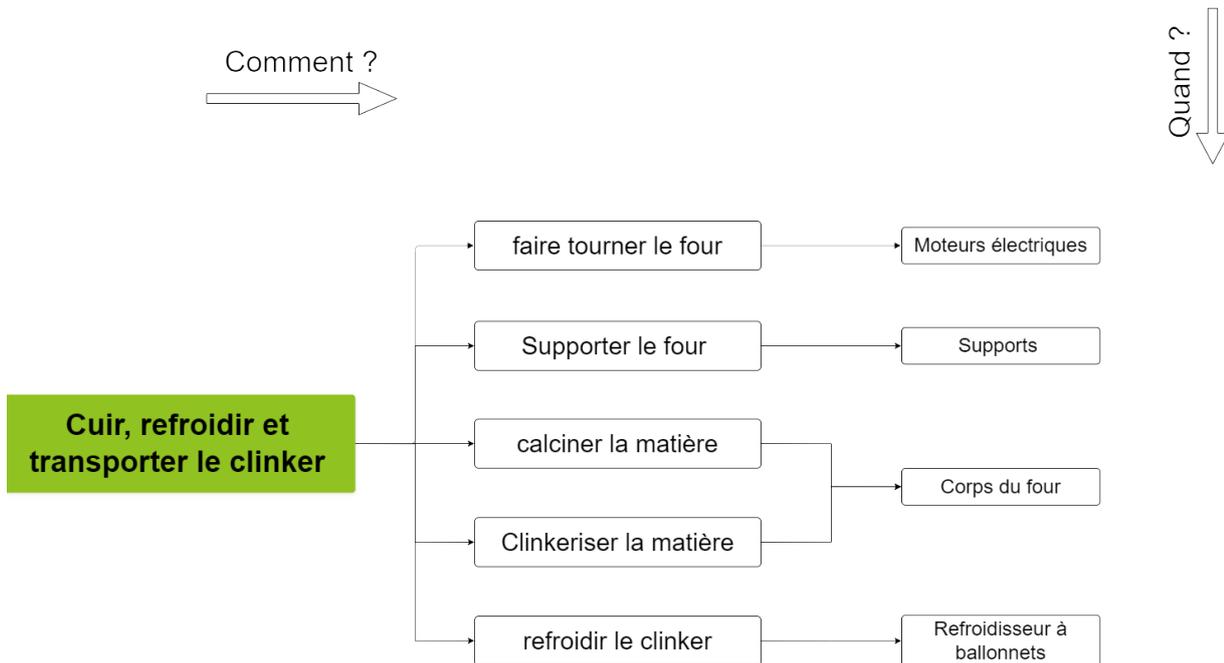


FIGURE 2.12 : Diagramme FAST de four rotatif et refroidisseur

## 5. Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia)

- Environnement de fonctionnement :** La description des systèmes et l'analyse fonctionnelle réalisées dans ce chapitre nous ont permis de souligner les différences significatives qui existent entre les environnements de fonctionnement des systèmes dans la SCSEG et Henkel-reghaia. En effet, les équipements de la SCSEG-GICA fonctionnent dans un environnement rude, poussiéreux et à de hautes températures. Pour cette raison les machines sont conçues pour supporter ces conditions de travail pendant de longues durées et sont donc plus lourdes, robustes et durables. Tandis que les équipements de l'usine de Henkel-Reghaia doivent fonctionner dans un environnement contrôlé avec des régulations strictes de températures et des conditions afin d'assurer la qualité des produits. De plus, la nature corrosive de l'eau de javel peut avoir un impact négatif sur les machines et accélérer leur usure et par conséquent diminuer leurs durées de vie.
- Complexité de la maintenance :** La lourdeur des équipements de la SCSEG font de la main-

tenance une tâche extrêmement complexe qui exige une planification rigoureuse, la conformité à des instructions de sécurité strictes et des connaissances spécialisées en ingénierie de la mécanique. D'autre part, les équipements à Henkel-reghaia sont automatisés et nécessitent des compétences et expertise en automatisation et la maintenance des équipements peut et doit se faire à des fréquences plus élevées que dans la SCSEG en raison des cycles de production qui sont relativement plus courts et les normes de qualité strictes.

- **Critères de sélection des équipements critiques :** Les critères choisies lors de la sélection des équipements critiques diffèrent d'un cas d'étude à l'autre. Ceci revient au fait que les critères sont spécifiques à l'entreprise en question et ses objectifs et philosophie de travail. Il est donc important de veiller à ce que les critères de choix des équipements critiques soient, d'une part, relatifs à la RCM, et qu'ils convergent avec l'idéologie de l'entreprise, d'une autre.

## Conclusion

Au fil de ce chapitre, nous avons réussi à délimiter le cadre de notre étude en sélectionnant la ligne de production de l'eau de javel dans le cas de Henkel-Reghaia et la zone de cuisson de ciment dans le cas de SCSEG-GICA, comme systèmes critiques et sujets d'implémentation de la RCM. La définition de ses systèmes et leurs analyses fonctionnelles nous ont permis de voir de plus près comment les fonctions sont réalisées et les équipements qui y sont impliqués d'une part, et de mettre la lumière sur les différences entre les deux systèmes d'une autre. Les informations récoltées nous ont permis de définir l'unité de remplissage dans le cas de Henkel et le four rotatif et refroidisseur à ballonnets UNAX dans le cas de la SCSEG, comme équipements critiques qui feront l'objet de l'étape suivante.

---

## **Chapitre 3 : Analyse Dysfonctionnelle**

---

## **Chapitre 3: Analyse Dysfonctionnelle**

### **Introduction**

Ce chapitre sera consacré à l'analyse dysfonctionnelle des équipements critiques sélectionnées dans le chapitre précédent. Pour ce faire, une AMDEC machine est réalisé afin de déterminer les causes, effets et criticité des modes de défaillance des équipements critiques. A l'issue de cette analyse, nous allons mettre la lumière sur les modes de défaillances les plus critiques, en appliquant sur ces derniers des méthodes d'analyse des causes racines de défaillances, à savoir le diagramme de causes à effets et l'analyse par arbre de défaillance pour pouvoir identifier leurs causes racines et les potentiels liens entre ces dernières et les autres composants et leurs mécanismes de défaillance.

### **1. Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC-Machine)**

L'AMDEC Machine a pour but principal de mettre en évidence les différents composants de l'équipement et leurs modes de défaillances ou la manière dont ils peuvent échouer d'effectuer leurs fonctions d'une part. Par ailleurs, elle permet de comprendre en profondeur les modes de défaillance en mettant en lumière les causes de défaillances et leurs effets.

Cette analyse va aussi faciliter la quantification de la criticité (C) des défaillances qui est calculée après la définition des coefficients de gravité (G), détection (D) et probabilité d'occurrence des défaillances ou fréquence (F), selon des échelles prédéterminées par l'équipe de travail. Nous permettant ainsi de prioriser les défaillances les plus importantes.

## 1.1. Préparation de l'analyse

### Cas Henkel-Reghaia :

Comme mentionné précédemment, l'analyse des dysfonctionnements repose sur une étude de l'historique des pannes et sur un brainstorming avec les experts de l'entreprise. Tout d'abord, à l'aide de la documentation technique, nous avons pu décomposer la machine en équipements et sous-équipements, en détaillant leur fonctionnement. Les modes de défaillance sont remplis à partir de l'historique des pannes, puis les causes et les effets sont discutés avec les ingénieurs. Ensuite, les échelles de gravité, de détection et de fréquence sont établies et complétées (voir **Annexe 5**)

Pour évaluer la criticité de chaque mode de défaillance dans l'AMDEC, un seuil de criticité spécifique est défini. Ce seuil, fixé à  $C \geq 36$ , permet de déterminer les modes de défaillance qui nécessitent une attention particulière et des mesures correctives immédiates.

### Cas de la SCSEG-GICA :

Nous avons effectué cette analyse avec l'aide des ingénieurs de maintenance de l'atelier de cuisson. Une échelle de 1 à 5 a été déterminé pour définir les coefficients de gravité (G), détection (D) et Fréquence (F) (voir **Annexe 5**).

L'attribution des coefficients est rendue possible grâce à l'expertise des techniciens et ingénieurs de maintenance, l'analyse des données historiques de l'équipement des 6 dernières années (2023-2018) ainsi que la consultation de la documentation technique de la machine et de ses composants.

Afin d'évaluer la criticité des modes de défaillance. Nous avons jugé judicieux de définir un seuil de criticité afin de prioriser les modes de défaillance les plus critiques.

Les modes de défaillance ayant une criticité  $C > 35$  feront l'objet d'une étude plus approfondie des causes racines de défaillances.

Les résultats de l'AMDEC nous ont permis de souligner les modes de défaillances suivants :

- Effet Vilebrequin de la virole du four,
- Couple insuffisant du moteur électrique,
- Ovalisation de la virole du four.

## 1.2. Résultats de l'analyse

**TABLE 3.1 : AMDEC - Remplisseuse Henkel-Reghaia**

Equipement	Sous-équipement	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	G	D	F	C
Groupe de transfert	Convoyeur d'entrée/Sortie	Transférer les flacons vers la vis sans fin (entrée)/ transférer les flacons vers la machine en aval (sortie)	Arrêt du convoyeur	Panne électrique	Interruption du processus	2	3	2	12
				Défaillance mécanique	Interruption du processus	2	3	2	12
	Vis sans fin	Séparer et orienter les flacons vers la remplisseuse	Bourrage des flacons	Mauvais alignement	Arrêt de production	3	3	3	27
	Etoile	Convoyer les flacons avec un pas donné et par ordre à l'intérieur de la remplisseuse	Mauvais positionnement	Usure des composants, mauvais réglage	Décalage des flacons	4	3	3	36
Mauvaise synchronisation				Décalage des flacons	4	3	3	36	

Groupe remplissage	Débitmètre	contrôler le dosage de javel	perturbation de mesure	Calibrage défectueux	Dosage inexact de javel	4	2	3	24
	Piston doseur (vanne)	Doser le flux de fluide	Problème de dosage	Usure	dosage incorrect du javel	5	2	4	40
				Défaut de joint	Fuite	5	2	4	40
	Bec	Guider	Egouttage	Usure ou dommage du bec	Déversement de javel	4	3	2	24
Trieuse	Elévateur	Déplacer les bouchons	Blocage de l'élévateur	Défaillance mécanique	Retard dans le bouchage	3	2	4	24
	Redresseur bouchon	Redressement des bouchons dans la position de bouchage	Blocage des bouchons	Mauvaise orientation de bouchon	Interruption du processus	1	2	3	6
	Groupe manomètre	Mesurer et Contrôler la pression du système	Mauvaise régulation de la pression	Calibration incorrecte	fonctionnement inefficace	4	3	2	24
				usure du capteur de pression	risque de rupture de l'équipement	4	3	2	24

Boucheuee	Tête visseuse	Serrer les bouchons	Mauvais serrage	Usure mécanique	Non-conformité du produit	4	1	4	16
	Prise des bouchons	Aligner les bouchons et les transporter vers le disque de positionnement	Problème d'alimentation des bouchons	Défaillance du disque de positionnement	Interruption de l'alimentation des bouchons	3	2	2	12
				Usure des composants	Interruption de l'alimentation des bouchons	3	2	2	12
Ventilation	Extracteur	Aspirer la vapeur de l'hypochlorite	Aspiration insuffisante	Obstruction du conduit	Accumulation de vapeur de l'hypochlorite	5	1	1	5
	Souffleur	Propulser de l'air	Débit d'air insuffisant	Panne du souffleur	Mauvaise évacuation des vapeurs	4	1	1	4

Motorisation	Motoréducteur	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique	Panne de moteur	Usure	Arrêt de la machine	5	1	2	10
				surcharge électrique	Arrêt de la machine	5	2	1	10
	Embrayage	Assurer la connexion/déconnexion automatique en cas de brouillage	Défaillance de l'embrayage automatique	Usure excessive	Dompage au moteur	4	2	1	8
	Série d'engrenage	Transmettre le mouvement	rupture des dents	Frottement et usage continu	Transmission irrégulière	4	1	2	8
Réservoir	Pompe électrique	Transfert de produit (l'hypochlorite)	Défaillance de la pompe	Panne électrique	Interruption du transfert de l'hypochlorite	4	1	1	4
Groupe lavage	Pompe pneumatique	Déplacer le fluide (l'eau)	Dysfonctionnement de la pompe	Défaillance mécanique	Interruption dans le transfert d'eau	3	2	2	12
				Fuite d'air	Interruption dans le transfert d'eau	3	2	2	12

Ejecteur	Ejecteur	Éjecter automatiquement les flacons qui ne sont pas correctement remplis ou bouchés	Echec d'éjecté les flacons non conforme	Problème de capture	Produit final non conforme	4	2	4	32
				Usure des composants mécaniques	Produit final non conforme	4	2	4	32
Composant électrique	Câblage	Fournir l'alimentation électrique et transmettre les signaux	Problème de connexion	court circuit	Risque de choc électrique	4	4	3	48
				Usure	arrêt de l'équipement	4	4	3	48
	Collecteur électrique	Transmettre l'électricité et les signaux entre la partie fixe et la partie rotative	Défaillance électrique	Corrosion	Pannes électriques	4	4	2	32
				Usure	Mauvaise connexion	4	4	2	32
				Accumulation de poussière ou de débris	Dysfonctionnement des systèmes	4	4	2	32

TABLE 3.4 : AMDEC - Four rotatif et refroidisseur à ballonnets (ID : WIW01) - SCSEG-GICA

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	G	D	F	C
Moteur électrique	Faire tourner la couronne d'entraînement et les galets	Couple insuffisant	Charge excessive	Faible vitesse de rotation du four	3	3	5	45
			Erreur de contrôle/ réglage	Risque de colmatage	2	2	4	16
			Défauts internes	Perte de production	2	4	4	32
Bandage	Supporter le poids du four et transmettre la rotation	Fissuration	Usure excessive	Affaiblissement de résistance	5	3	1	15
			Mauvais contact bandage/ galet	Rupture du bandage	5	3	2	30
	Diminuer le flux de chaleur transmis de la virole aux galets	Glissement incorrecte	Augmentation de température de virole ou bandage	Dégradation des briques réfractaires Ovalisation de la virole	4	2	4	32
			Plaques compensations insuffisantes	Déformation permanente de la virole	4	3	2	24

Pignon / Courronne d'entraînement	faire tourner le corps du four	Usure et cassure des dentures	mauvaise lubrification	Vibration	4	2	3	24
			désalignement dentures pi- gnon/courronne	Rendement en puissance di- minué	4	2	1	8
			augmentation du vide en fond de dent	Résistance affaiblie des den- tures	4	3	1	12
		Fissure au niveau de la soudure des lames (bretelle)	Fatigue des dents	Usure des bandages et galets à long terme	2	2	1	4
		Usure de l'axe de fixation des lames	Vibration des lames de fixa- tion	Bruit anormal entre l'axe de fixation et les bretelles	3	1	2	6
		Détachement de la cornière d'étan- cheité	Cisaillement des boulons de fixation sur la couronne den- tée	Débordement de graisse Bruit anormal (claquage entre la cornière et la couronne dentée)	2	1	3	6
Joints amont	Assurer l'étanchéité du four	Étanchéité insuffi- sante	Usure du cerceau(migration four)	Entrée de l'air faux dans le four	4	2	3	24
			Cisaillement des boulons de fixation des joints amont	Ouverture du joint	4	1	3	12

Galets	supporter le four	Fissure	Effet vilebrequin	Rupture et diminution de la durée de vie	4	2	2	16
			Fatigue	Résistance affaiblie	4	1	1	4
			Charge excessive	Résistance affaiblie	4	2	1	8
		Fléchissement	Effet vilebrequin	Fissuration	4	2	2	16
			Charge élevée	Risque de rupture élevé	4	2	1	8
			Bandage oscillant	Risque de rupture élevé	4	2	1	8
		Température élevée au palier	Refroidissement inefficace	Dégradation du coussinet	4	2	4	32
			Frottement axial/radial	Micro Soudure ou soudure entre coussinet et arbre	4	1	4	16
			Lubrification insuffisante	Micro soudure ou soudure entre coussinet et arbre	4	1	4	16
Brûleurs	Produire la flamme et la chaleur nécessaire à la cuisson	Usure prématuré de la tuyère	Chute de clinker sur la tuyère	Arrachement du béton Cisaillement ou chute de la tuyère	3	1	5	15
		Obstruction des brûleurs	Accumulation de matière et de poussière	Température de cuisson inadéquate	3	2	2	12

Virole	Contenir la matière pendant la cuisson	Ovalisation	Jeu relatif excessif	Dommmage des briques(cisaillement) Fissuration longitudinale	4	3	3	36
		Fissuration au niveau des viroles porteuses du bandage	Endommagement de la soudure de transition entre deux épaisseurs différentes de la virole	Risque de rupture de la virole	5	3	1	15
			Mauvais alignement de l'axe du four	Fuite de matière à très haute température	5	3	1	15
			Corrosion	Fuite de matière à très haute température	5	3	1	15
		Fissuration au niveau des viroles =25mm	Mauvais alignement de l'axe du four	Fuite de matière à très haute température	4	3	1	12
			Corrosion	Fuite de matière à très haute température	4	3	1	12

		Effet vilebrequin	Corps de virole non uniforme	Risque de rupture du galet	4	3	4	48
			Vilebrequin de température	Flexion importante de l'arbre du galet	4	3	5	60
Les Briques	Limiter le transfert de chaleur	Usure des briques	Choc thermique	Apparition de points chauds	5	2	3	30
			Ovalisation de la virole	Chute des briques	5	2	3	30
Butée hydraulique	Garder la position axiale du four	Rupture des vis	Fatigue des vis	Perte de maintien en position de la butée	3	1	1	3
			Surcharge du four	Perte de maintien en position de la butée	3	3	1	9
	permettre la translation longitudinale du four	Surpression	Charge du four élevé	Risque de rupture des vis à long terme	3	3	1	9
		Blocage en descente	Alignement du four incorrect	Usure des bandages et galets à long terme	2	2	1	4
Capteurs de contrôle	Surveiller en temps réel les paramètres critiques	Usure des composants électriques	Exposition continue aux températures élevées	Arrêt total ou partiel des capteurs	2	1	2	4
			Milieu poussiéreux	Lecture incorrecte des paramètres	2	3	2	18

Refroidisseur à ballonnets UNAX	Refroidir efficacement le clinker	Usure de béton	Température élevée du Clinker (plus de 1200°C)	Taches rouges sur le coude + goulotte	3	2	3	18
		Usure des briques	Température élevée du Clinker (plus de 1200°C)	Calcination au niveau des viroles des ballonnets	4	1	4	16
		Usure des plaques de blindage	Cisaillement des boulons de fixation	Calcination au niveau des viroles des ballonnets	3	1	3	9
		usure du cadre de sortie	Contact avec clinker très chaud	Cisaillement boulons de fixation Détachement complet du cadre de sortie	3	1	4	12
Secteur conique	Faciliter la décharge du clinker dans le refroidisseur	Chute de tronçon du secteur conique	Cisaillement des boulons d'assemblage du cône	Bourrage de clinker	4	1	3	12

## 2. Analyse des causes Racines de défaillance

Bien que l'AMDEC explique les modes de défaillance et leurs causes, elle ne parvient pas à identifier les causes profondes des défaillances. Par conséquent, l'analyse des causes racines de défaillance agit comme un complément parfait pour l'AMDEC grâce à des outils comme le diagramme Ishikawa et l'analyse des arbres de défaillances (Fault Tree Analysis, FTA) .

L'emploi de ces outils va nous aider à mieux comprendre les modes de défaillances critiques de nos équipements afin de pouvoir atténuer les risques associés à ces derniers en nous focalisant sur leurs causes racines et non leurs symptômes.

### 2.1. Diagramme de causes à effets

Le diagramme Ishikawa, également connu sous le nom de diagramme de causes à effet ou diagramme en arête de poisson, aide à répartir les causes potentielles des problèmes en catégories, telles que les matériaux, les méthodes, les machines, le personnel, l'environnement et les mesures [32, 33].

Les causes listées dans les diagrammes étaient définies après une réunion de brainstorming avec les équipes de travail des deux entreprises. Nous avons aussi pu constater certaines de ces dernières, notamment les causes liées au milieu, méthodes et main d'œuvre, lors de notre période de stage dans l'entreprise.

Cette analyse nous a permis d'organiser, de définir et de visualiser les facteurs contributifs et les causes potentielles de la défaillance du four rotatif et le refroidisseur et l'unité de remplissage. nous facilitant ainsi la visualisation des problèmes liés à l'environnement du fonctionnement des équipements ainsi que tous les facteurs qui ont un impact sur leur fonctionnement qu'ils soient liés aux matériaux utilisés, aux équipements, aux méthodes de l'entreprise , à l'environnement ou à la main-d'œuvre.

## Cas Henkel-Reghaia

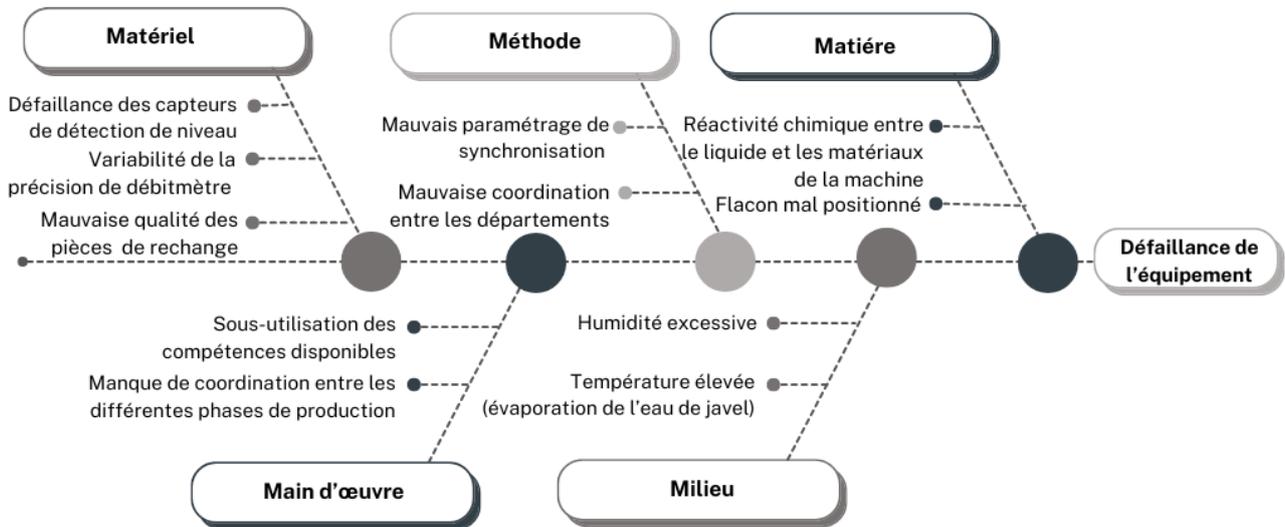


FIGURE 3.1 : Diagramme Ishikawa cas Henkel-Reghaia

## Cas de la SCSEG-GICA

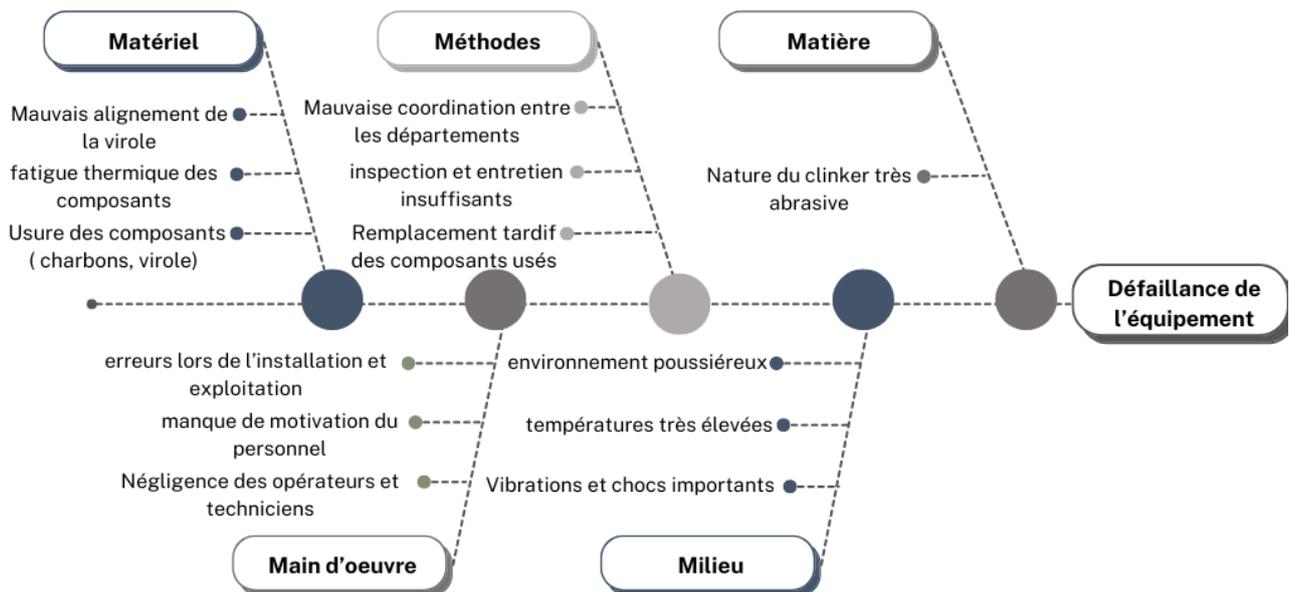


FIGURE 3.2 : Diagramme Ishikawa cas SCSEG-GICA

## 2.2. Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance est un diagramme logique dans lequel un phénomène peut être détaillé jusqu'à ses causes profondes. Il permet d'identifier et d'analyser les différentes causes possibles des pannes du système. L'arbre de défaillance, avec une structure de haut en bas, commence par un événement redoutable, tel qu'une panne du système, et décompose systématiquement les causes possibles via des portes logiques (ET, OU) pour identifier toutes les causes sous-jacentes possibles[34].

Les modes de défaillance dont la criticité est élevée nécessitent un plan d'actions réfléchi et rigoureux. Il est donc essentiel de les examiner de manière approfondie. C'est la raison pour laquelle nous avons fait appel à cet outil.

### Cas Henkel-Reghaia

Pour approfondir notre compréhension des défaillances potentielles de notre machine, nous avons effectué une analyse des arbres de défaillance des trois modes critiques identifiés dans l'AMDEC. Les trois arbres de défaillance élaborés illustrent les problèmes de dosage (**Figure 3.3**), le mauvais positionnement (**Figure 3.4**), et les problèmes de connexion (**Figure 3.5**). Cette analyse met en évidence la redondance des causes, révélant des facteurs communs influençant plusieurs modes de défaillance et fournissant des points de focalisation pour les actions correctives et préventives.

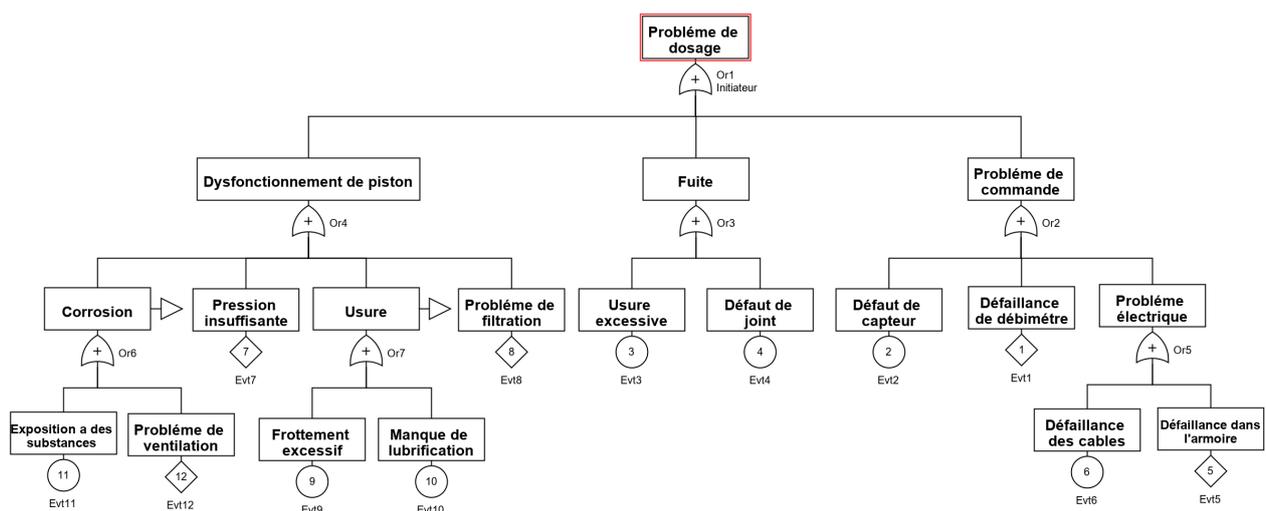


FIGURE 3.3 : Arbre de défaillance des problèmes de dosage

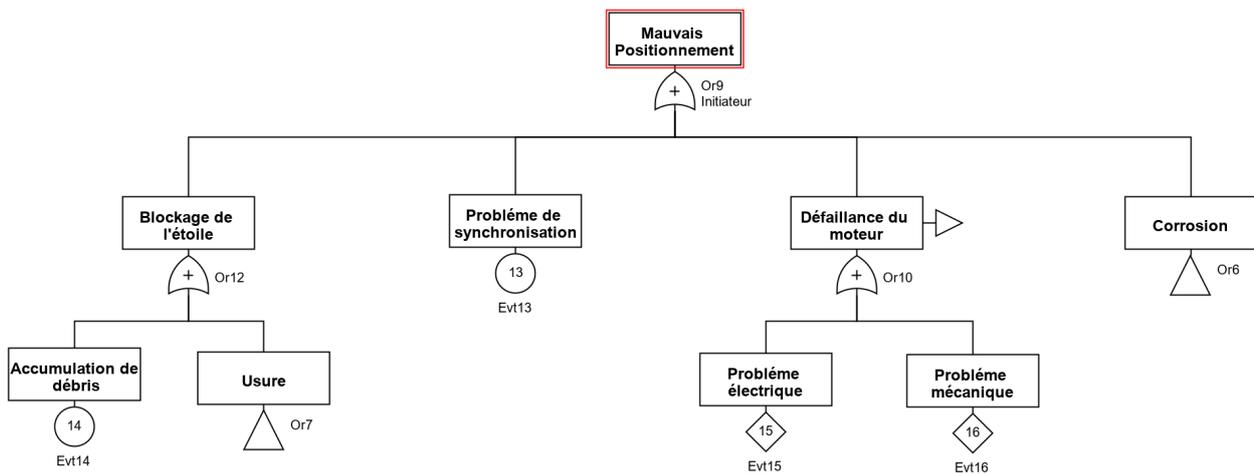


FIGURE 3.4 : Arbre de défaillance du mauvais positionnement

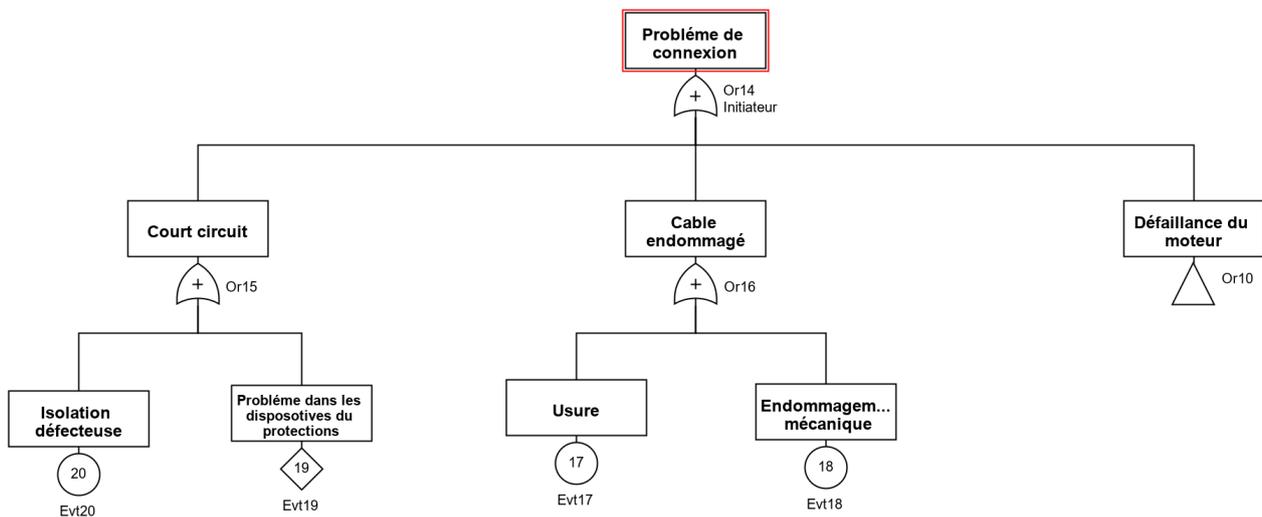


FIGURE 3.5 : Arbre de défaillance des problèmes de connexion

## Cas de la SCSEG-GICA

L'analyse des arbres de défaillance nous a permis de déceler les causes racines des modes de défaillances critiques. Cependant, dû au manque de données nécessaires sur l'occurrence des évènements de base, nous nous sommes contentés de l'analyse qualitative uniquement.

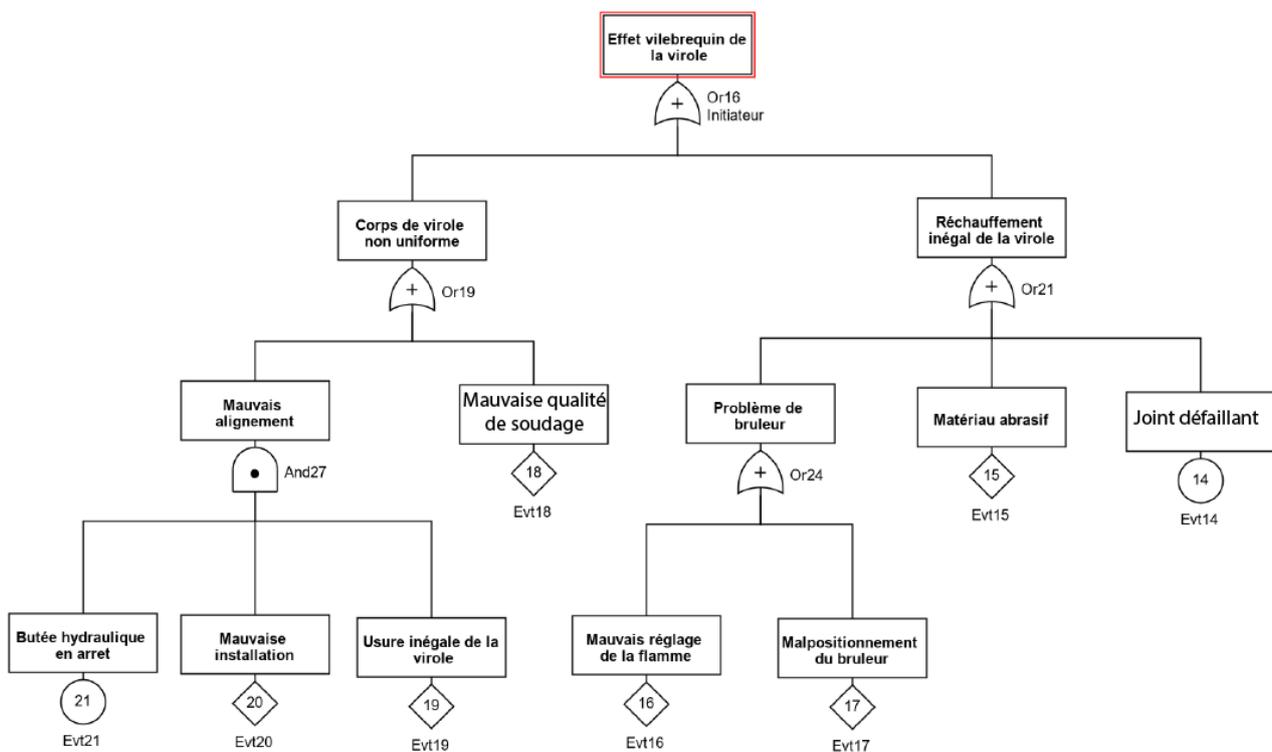
Il a été constaté que les causes racines des trois modes de défaillance sont souvent des causes liées à la mauvaise exploitation de l'équipement (mauvaise qualité de soudage (**Figure 3.6**), mauvais réglage, mauvais suivi de démarrage (**Figure 3.8**) ceci est expliqué dans l'analyse des causes à effets (voir **Figure 3.2**) par la négligence des opérateurs et la mauvaise coordination entre les départements de

maintenance et de production. De plus, l'environnement poussiéreux s'avère être extrêmement désavantageux vu que la poussière est le contaminant principal des lubrifiants des composants.

Cependant, la défaillance du moteur (**Figure 3.7**) est souvent due à ses composants (usure des balais). Ceci peut être expliqué par la nature problématique du moteur à courant continu vu la complexité de sa maintenance et son incompatibilité avec le contexte opérationnel.

l'arbre de défaillance de l'ovalisation (**Figure 3.8**) nous a permis de faire le lien entre l'ovalisation de la virole et la défaillance du bandage lors du glissement incorrect de ce dernier et de tracer la source de ce mode de défaillance au mauvais contrôle des démarrages à chaud et à froid.

La nature abrasive du clinker (**Figure 3.6**) produit dans la SCSEG est la cause principale de la dégradation du revêtement, qui provoque à son tour l'apparition de l'effet vilebrequin. l'entreprise pourrait remédier à ça en revoyant la constitution du ciment produit, mais ceci sort du cadre de notre étude.



**FIGURE 3.6 :** Arbre de défaillance de l'effet vilebrequin de la virole

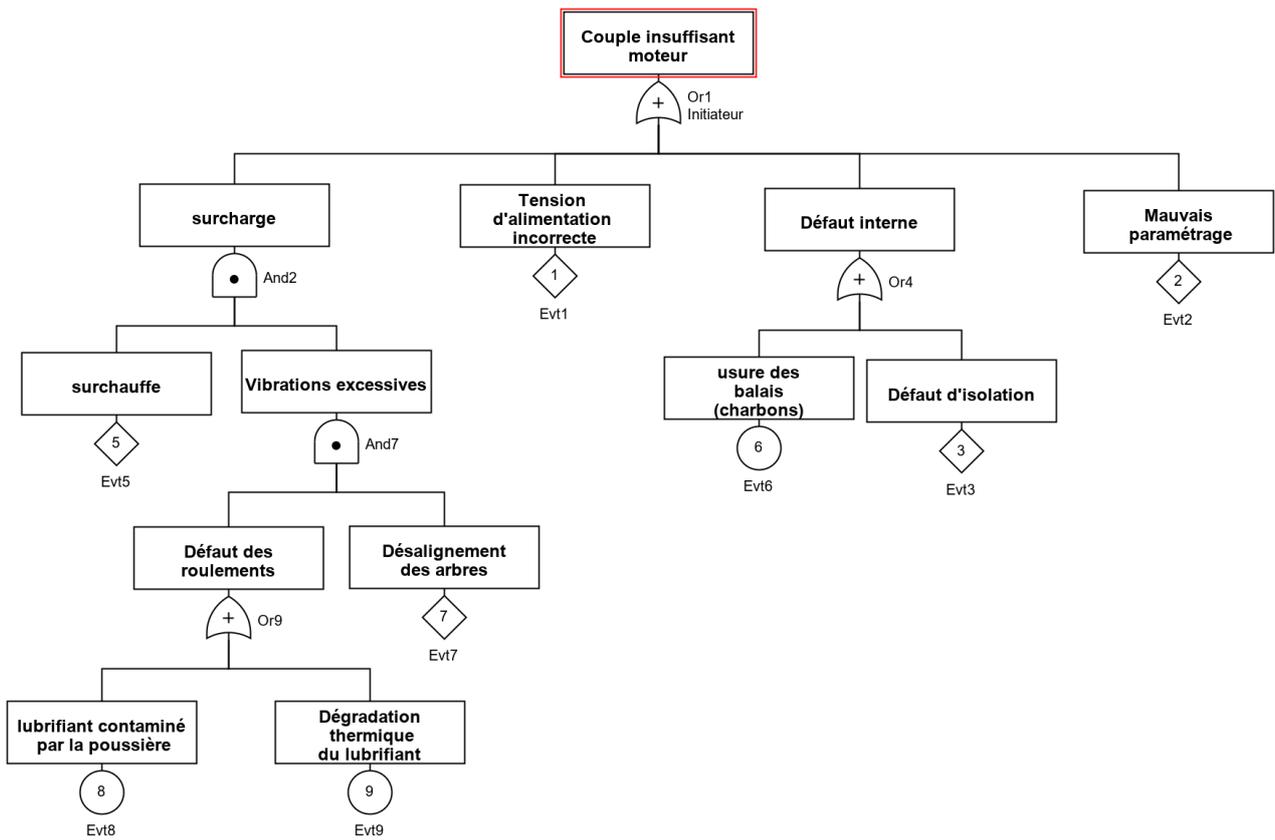


FIGURE 3.7 : Arbre de défaillance du couple insuffisant du moteur

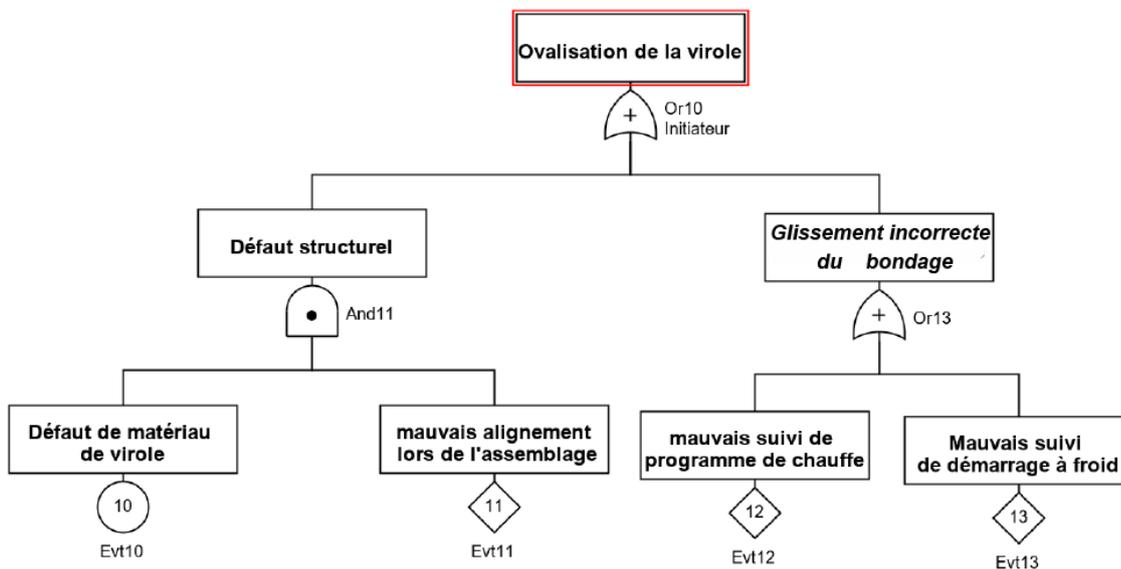


FIGURE 3.8 : Arbre de défaillance de l'ovalisation de la virole

### 3. Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia)

- **Défis rencontrés** : Lors de l'analyse dysfonctionnelle, le même problème a été rencontré dans les deux entreprises et c'était l'indisponibilité des données nécessaires à l'analyse quantitative des arbres de défaillances pour nous permettre de détecter rigoureusement les causes principales des modes de défaillances les plus critiques. Cependant, grâce à l'expertise des ingénieurs des entreprises, nous avons pu analyser et cibler les causes les plus problématiques, afin de pouvoir les traiter dans le prochain chapitre.
- **Définition des échelles (G, D, F) pour l'AMDEC-Machine** : Les échelles d'évaluation de la gravité, fréquence et détection que nous avons élaborées pour l'AMDEC-Machine diffèrent significativement d'une entreprise à l'autre. Ceci est facilement expliqué par les natures différentes des équipements et leurs conditions de fonctionnement distincts.
- **Les causes racines de défaillance** : L'analyse des causes à effets ou le diagramme ishikawa nous a permis de distinguer plusieurs points en communs entre les deux cas d'études, notamment les causes liées aux catégories : Méthodes et Main d'œuvre qui ont un fort lien avec le facteur humain et les traditions de travail des deux entreprises. En effet, la mauvaise coordination entre les départements, la négligence des opérateurs et techniciens et la sous-utilisation des compétences disponibles s'avèrent désavantageux lors de l'implémentation de la RCM. Étant donné que cette dernière est une stratégie qui exige l'investissement total du personnel, l'expertise et compétences techniques et le respect des plans et délais.

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir les modes de défaillances des équipements et leurs criticités ainsi que la compréhension profonde des modes de dysfonctionnement les plus critiques tels que le problème de dosage de l'unité de remplissage (Henkel) et l'effet vilebrequin de la virole (SCSEG), par l'utilisation de l'analyse de l'arbre de défaillance et le diagramme Ishikawa. Ce chapitre constitue une base solide pour le développement des stratégies d'amélioration continue et des plans d'action qui seront présentés dans le chapitre qui suit.

---

**Chapitre 4 : Sélection des Actions de  
Maintenance et Proposition d'un Tableau de  
Bord**

---

## **Chapitre 4: Sélection des actions de maintenance et Proposition d'un tableaux de bord**

### **Introduction**

Après avoir compris le fonctionnement des équipements et leurs dysfonctionnements, il est nécessaire de trouver des solutions appropriées. Dans ce chapitre, nous allons établir un diagramme de la logique RCM qui facilitera le choix de la politique de maintenance (proactive ou réactive), tout en prenant en compte les différents impacts des défaillances. L'objectif est d'améliorer les plans de maintenance des équipements. De plus, afin de suivre l'avancement et l'impact des actions mises en place, nous proposerons un tableau de bord basé sur les KPIs de maintenance, permettant de monitorer la progression de la mise en place du plan proposé.

### **1. Classification des politiques de maintenance et du plan d'actions**

Deux types de politiques peuvent être adoptées pour la prise d'actions et la définition du plan de maintenance à savoir la politique proactive et la politique réactive. La première est une approche anticipative qui vise à prédire ou prévenir l'apparition des défaillances avant qu'elles ne surviennent, en mettant en œuvre : des actions préventives (Maintenance conditionnelle, maintenance basée sur le temps ou combinaison des deux) afin de prévenir l'apparition des causes de non conformités probables ; des actions correctives ( Reconception ou Redesign et détection de la défaillance) qui éliminent les causes des non conformités récidivistes. La seconde, quant à elle, implique de répondre à l'apparition d'une défaillance et de réagir seulement après que celle-ci survienne, on parle alors du fonctionnement jusqu'à la panne ou de détection de la défaillance et en conséquence, une politique basée sur la maintenance corrective.

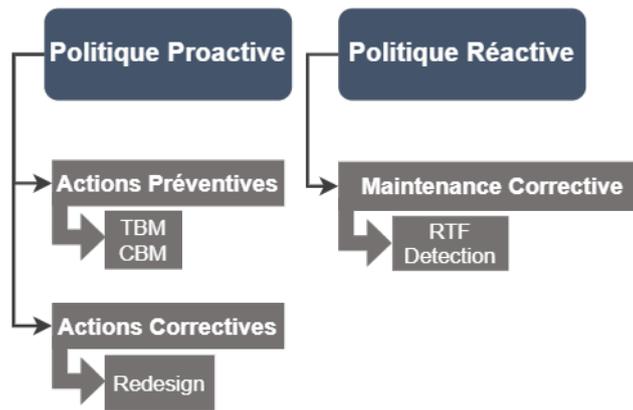


FIGURE 4.1 : représentation des Politiques de la maintenance

## 2. Diagramme de décision de la RCM

Afin de déterminer la politique de maintenance appropriée à chaque mode de défaillance, on a fait recours au diagramme de décision de la RCM que nous avons réalisé (Voir **Figure 4.2**) qui nous a permis de sélectionner les actions adéquates, d'abord en divisant les défaillances en défaillance visible et défaillance cachée[13].

- **Défaillance cachée(H)** : il s'agit des défaillances qui se sont déjà produites, mais qui ne sont pas encore visibles à l'opérateur dans des conditions opérationnelles normales, puisque la fonction est toujours accomplie. Ceci peut être le cas d'un composant redondant défaillant. dans ce cas il est important de détecter la défaillance avant l'occurrence d'une défaillance totale et perte de la fonction.
- **Défaillance visible** : il s'agit de la défaillance qui est facilement perçue par l'opérateur quand le composant ou l'équipement cesse d'accomplir sa fonction. Il est important de distinguer entre ces deux types de défaillances, étant donné qu'une défaillance cachée peut avoir un impact important sur la sécurité des opérateurs et les intervenants, quand elle devient visible.

Ensuite, la logique RCM va faire en sorte de prioriser les modes de défaillances critiques selon leurs conséquences. Ces dernières sont présentées selon leur importance[13], comme suit :

- **Impact sur la sécurité et environnement (S)** : il s'agit des défaillances visibles qui peuvent impacter l'humain (impact physique ou psychologique), l'environnement (les autres équipements) ou qui peuvent potentiellement affecter les objectifs environnementaux de l'entreprise. Ces défaillances doivent obligatoirement être soulignées et traitées de façon spéciale afin d'éviter leur occurrence.

- **Impact sur la production (P)** : on juge qu'une défaillance a un impact sur la production lorsque les coûts liés aux pertes de production excèdent les coûts nécessaires à la réparation.
- **Impact sur la maintenance (M)** : la défaillance dont la réparation coûte plus chère que la perte de production appartient à cette catégorie.

Les défaillances ayant un impact sur la production et maintenance sont de nature purement économiques. On leur confère alors une importance équivalente et elles seront notées (P.M) dans le diagramme de décision.

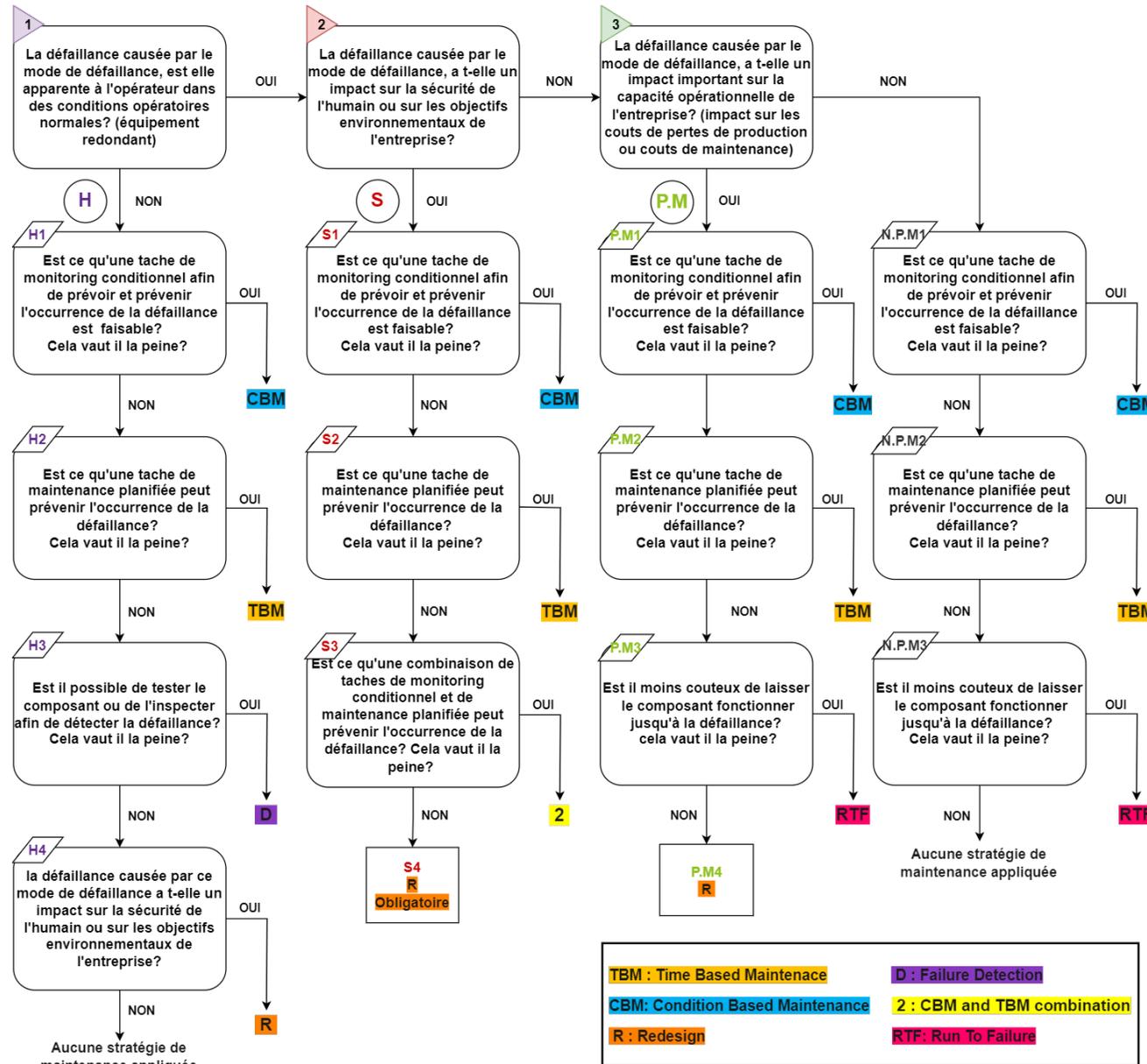


FIGURE 4.2 : Diagramme de décision RCM

### 3. Sélection des actions de maintenance préventive

#### 3.1. Cas Henkel-Reghaia :

Avant de proposer un plan préventif, il est nécessaire de mettre l'accent sur les actions fréquentes exigées par le constructeur dans la documentation technique de la machine. La négligence de ces instructions peut rendre le plan de maintenance inefficace. Nous avons résumé ces instructions comme suit :

- **Hebdomadaire**

- Inspecter les connexions mécaniques (boulons et vis) pour s'assurer qu'elles sont bien serrées.
- Vérifier les dispositifs de sécurité installés sur la machine et s'assurer qu'ils fonctionnent correctement.

- **Mensuel**

- Effectuer un contrôle complet de la machine, incluant les structures, les dispositifs de sécurité, et les connexions pneumatiques et hydrauliques.
- Graisser les éléments mécaniques selon les spécifications de la documentation technique.

- **Trimestriel**

- Effectuer une maintenance approfondie des systèmes pneumatiques et hydrauliques.
- Vérifier l'état des éléments mobiles (Elément de transmission de mouvement) et des dispositifs de protection.

- **Annuel**

- Réaliser une révision complète de la machine, incluant le démontage et l'inspection des composants internes.
- Mettre à jour la documentation technique et les plans de maintenance en fonction des observations faites pendant l'année.
- Former le personnel sur les nouvelles procédures de maintenance et de sécurité si nécessaire.

En suivant la logique RCM que nous avons proposé, chaque mode de défaillance est orienté vers un type spécifique d'action, cela est représenté dans l'**annexe 6**.

Le plan préventif détaillé est présenté dans le **tableau 4.2** :

	<b>Mode de défaillance</b>	<b>Action préventive</b>	<b>Fréquence / Condition</b>	<b>Description</b>
TBM	Arrêt du convoyeur	Changement de roulement de convoyeur	26 Semaines	nécessite une bonne gestion de stock
		Changement d'huile de moto-réducteur de convoyeur	52 Semaines	Vérifier le type d'huile dans le manuel technique
	Bourrage des flacons	Changement des roulements de transmission de vis sans fin	26 Semaines	nécessite une bonne gestion de stock
		Changement de la chaîne à rouleau de la vis sans fin	26 Semaines	nécessite une bonne gestion de stock
	Mauvais positionnement	Changement de roulement et joint d'étoile	52 Semaines	nécessite une bonne gestion de stock
	Mauvaise régulation de la pression	Calibration et inspection détaillée des manomètres	12 Semaines	Il est important de différencier la panne du mauvais paramétrage, déjà abordé dans l'analyse Ishikawa
	Mauvais serrage	Changement de roulement des têtes visseuses	26 Semaines	nécessite une bonne gestion de stock
	rupture des dents	Contrôle et graissage des engrenages	6 Semaines	Changement d'engrenage en cas d'endommagement
	Défaillance électrique	Poncer légèrement la surface du collecteur	26 Semaines	Le ponçage se fait avec un papier de verre fin

		Assurer que les balais (charbons) sont bien en place	26 Semaines	Laisser l'équipement hors tension pendant un certain temps pour permettre à l'énergie résiduelle de se dissiper naturellement
CBM	Aspiration insuffisante	surveillance continu de pression et vibrations	Pression et vibrations	<b>Pression</b> : Si la pression descend en dessous de 80% des valeurs nominales <b>Vibration</b> : Si les vibrations dépassent les niveaux acceptables.
	Débit d'air insuffisant	surveillance continu du débit et des vibrations	Débit et vibrations	<b>Débit</b> : Si le débit descend en dessous de 90% des valeurs nominales <b>Vibration</b> : Si les vibrations dépassent les niveaux acceptables
	Panne de moteur	surveillance continu de la température et les vibrations	Température et vibrations	<b>Température</b> : Si la température du moteur dépasse 85°C <b>Vibration</b> : Si les vibrations dépassent les niveaux acceptables

TABLE 4.2 : Action de maintenance préventive Henkel-Reghaia

- **Action corrective pour le problème de dosage :**

La logique RCM nous a guidé vers la reconception (Redesign). Lors de la discussion de l'analyse d'arbre de défaillance avec les ingénieurs de maintenance, il a été constaté que le principal problème était la nature corrosive du produit. Les pistons actuels sont fabriqués en PVC (polychlorure de vinyle), un matériau résistant à la corrosion, mais l'agressivité de l'eau de javel dépasse la capacité de résistance du PVC. Par conséquent, il a été proposé de remplacer ces

pistons par des pistons en Titane, un métal extrêmement résistant à la corrosion. Bien que ce matériau soit coûteux, le retour sur investissement à long terme justifie cet investissement.

### 3.2. Cas de la SCSEG-GICA :

Les instructions d'entretien préventif du constructeur peuvent être résumées en fonction de leurs natures et intervalles comme suit :

- **Journalières**

- Inspection audio et Visio-tactile pour vérifier qu'il n'y a pas de bruits anormaux et sur-chauffe,
- Inspecter visuellement les supports du four,
- S'assurer qu'il n'y a pas de corps étrangers entre les composants.

- **Hebdomadaire**

- Vérification des niveaux d'huile et remplissage si nécessaire,
- Nettoyage de la poussière des surfaces externes des différents composants,
- Contrôle des températures de sortie de l'eau de refroidissement des supports.

- **Mensuel**

- Nettoyage approfondi des paliers,
- Graissage et lubrification des roulements selon les manuels du constructeur,
- Test des systèmes électriques.

- **Trimestriel**

- Inspection approfondie des briques pour détecter les dégradations,
- Etalonnage des capteurs,
- Contrôle des forces axiales des supports,
- Contrôle de l'alignement des composants rotatifs.

- **Annuel**

- Maintenance majeure et démontage de l'équipement pour faire une inspection approfondie de tous les composants,
- Contrôle et correction de l'alignement de l'axe du corps du four,
- Remplacer les composants mécaniques usés,

- Vidange des huiles et nettoyage approfondi suivant les instructions du constructeur

Après avoir soumis chaque mode de défaillance au diagramme de décision, nous sommes parvenus à sélectionner la démarche optimale à adopter pour chacun de ces derniers (voir **Annexe 6**) en essayant d'établir un équilibre entre les différentes actions et en prenant en considération les coûts et la faisabilité de chacune.

- **Action corrective pour le problème du couple insuffisant des Moteurs :**

Grâce à l'arbre de défaillance du moteur nous avons pu constater que les problèmes liés aux moteurs du four sont indépendants du reste des composants du four d'une part, et qu'ils sont intimement liés à la nature des moteurs, d'autre part. Les moteurs du four sont des moteurs à courant continu de type GN 355 L35. L'usure des charbons de ces moteurs sont la raison principale de leur défaillance récidive. Cette usure est principalement due aux hautes températures et charges auxquelles sont continuellement exposés les moteurs du four. Additionnellement, le changement des charbons nécessite l'arrêt du moteur et donc l'arrêt du four, chose que l'entreprise ne peut pas se permettre puisque le four rotatif et refroidisseur est sollicité 24/7. Il est donc clair que les moteurs à courant continu ne sont pas adaptés à l'environnement difficile de l'usine et ne sont pas capables d'assurer le fonctionnement continu de l'équipement.

Pour ces raisons, et grâce au diagramme de décision de la RCM, nous avons conclu que la démarche appropriée serait la reconception ou Redesign (R). Dans ce cas, il serait judicieux de remplacer les moteurs à courant continu par des moteurs à courant alternatif qui sont considérablement moins coûteux et qui ont déjà prouvé leur efficacité dans les cimenteries de renom. En effet, outre leur maintenance qui est relativement plus simple, les moteurs à courant alternatif sont plus robustes et fiables puisqu'ils sont conçus pour fonctionner dans des environnements sévères et offrent un meilleur couple de démarrage même sous charge élevée, chose qui les rend parfaitement adaptés à notre machine.

Le plan détaillé des actions à appliquer afin de prévenir les modes de défaillances dans chaque cas est montré dans le **tableau 4.6**.

	<b>Mode de défaillance</b>	<b>Action préventive</b>	<b>Fréquence / Condition</b>	<b>Description</b>
TBM	Usure des briques	Changement des briques	26 Semaines	Isolation du four. Enlèvement des anciennes briques endommagées. Couper et ajuster les briques pour qu'elles s'adaptent à la forme de la virole.
	Usure de béton	Renouvellement de la surface	48 Semaines	Appliquer une nouvelle couche de protection sur le béton
	Usure des briques (ballonnet de refroidisseur)	Changement des briques	48 Semaines	Isolation du four Enlèvement des anciennes briques endommagées Couper et ajuster les briques pour qu'elles s'adaptent à la forme de la virole
	Usure des plaques de blindage	Remplacement des plaques	48 Semaines	Remplacer les plaques endommagées
	usure du cadre de sortie	Contrôle des boulons de fixations	12 Semaines	Vérifier l'état des boulons de fixation Serrer si nécessaire et remplacer les boulons défectueux

	Chute de tronçon du secteur conique	Nettoyage des tronçons	1 Semaines	Nettoyage pneumatiques des tronçons et éliminations des dépôts de matière
		Renforcement des structures	48 semaines	Appliquer des renforts sur les tronçons pour éviter leur chute
	usure des composants électriques	Tester le fonctionnement des capteurs	1 Semaine	Utiliser un multimètre pour vérifier la continuité et les résistances des circuits internes Vérifier les connexions des câbles
Calibrage des capteurs		4 Semaines	Effectuer des tests de calibrage pour régler les capteurs	
Remplacement des composants défectueux		48 Semaines	Identifier et remplacer les composants électriques usés	
CBM	Fissuration du bandage	Surveillance en temps réel	Vibrations/ température	Un niveau de vibration anormal indique la présence d'une fissure  Detecter les températures anormales qui pourraient engendrer des fissurations
	Fissure des galets	Surveillance en temps réel	Vibrations/ Température	Un niveau de vibration anormal au niveau des arbres de galet peuvent indiquer la présence d'une fissure  Détecter les températures anormales qui pourraient engendrer des fissurations

Fléchissement des galets	Surveillance en temps réel	Déformation/ vibrations/ température	Installer des capteurs de déformation sur les galets pour Détecer les anomalies vibratoires qui pourraient indiquer un fléchissement
Température élevée au palier	Surveillance en temps réel	Température	Détecer les hautes températures du palier
	Contrôle de l'alignement	Alignement des axes	Réglage de l'alignement des paliers de galets diminue les charges et prévient la surchauffe
Étanchéité insuffisante	Surveillance en temps réel	Température / pression	Installés près des joints, les capteurs de température et de pression indiquent les fluctuations de température et changements de pression indicateur de mauvaise étanchéité
Ovalisation	surveillance en temps réel	Température	Détecer les zones de surchauffe au niveau des viroles porteuses du bandage et la surchauffe des bandages grâce au CEMScanner
	Contrôle des conditions de fonctionnement	Glissement	Mesurer le glissement du bandage pour indiquer la présence d'ovalisation
Fissuration au niveau des viroles =25mm	Surveillance en temps réel	Température	Capteurs de température ou SEMscan pour indiquer les zones chaudes qui pourrait provoquer des fissures

Usure prématuré de la tuyère	Surveillance en temps réel	Etat de la tuyère	La caméra du four peut être utilisé pour voir l'état de la tuyère et de la flamme pour indiquer l'usure
Obstruction des brûleurs	Surveillance en temps réel	Pression/ débit	Surveiller la pression et le débit des gaz combustibles. Les variations anormales peuvent indiquer l'obstruction des brûleurs

**TABLE 4.6 : Actions de maintenance préventive SCSEG-GICA**

Les actions de maintenance définies pour les modes de défaillances pour lesquels une politique proactive hybride de maintenance basée sur le temps(TBM) et maintenance conditionnelle(CBM) a été adoptée sont montrées dans le **tableau** 4.7, tel que F représente la fréquence en semaines (s) et en jours (j).

Mode de défaillance	Tâches TBM	F	Tâches CBM	Description
Usure et cassure des dentures	Inspection visuelle pour détecter les signes d'usure	1j	Surveillance des vibrations	A l'aide des capteurs de vibrations pour indiquer l'usure et désalignement
	Nettoyage de la couronne et entourage des débris	1s		
	Vérification de l'alignement effectuer le graissage si nécessaire	4s	surveillance de la température	à l'aide des capteurs de températures pour détecter les frottements ou manque de lubrification
	contrôler le jeu en fond des dents	12s		

Glissement incorrecte du bandage	Inspection visuelle de l'alignement et usure	1j	surveillance des vibrations	Les capteurs de vibrations pour mesurer les vibrations du bandage et détecter le désalignement
	vérification de l'alignement nettoyage	1s		
	Inspection des fixations du bandage mesure du profil de bandage	4s	surveillance de température	Capteurs de températures peuvent aider à détecter le frottement excessif
Effet vilebrequin de la virole	vérifier si le bandage est continuellement en contact avec les galets pendant la rotation	1j	surveiller les températures de la virole et les déformations de la virole	L'utilisation de l'outil CEMScanner permet d'identifier les points chauds de la virole avant qu'ils n'engendrent de vilebrequin de température
	Examen des supports pour vérifier la fixation et ajustements	1s		
	Contrôle de l'alignement de la virole	12s		

TABLE 4.7 : Actions préventives hybrides

L'adoption d'une approche hybride permet de fusionner les actions périodiques et conditionnelles et, par conséquent, améliore la fiabilité de l'équipement. De plus, l'intégration de la TBM et CBM permet de rendre les programmes de TBM plus flexibles et de les mettre à jour en fonction de l'état de la machine.

En addition aux opérations de maintenance conditionnelles de monitoring proposées il est aussi crucial de prendre en compte les analyses vibratoires des différents points critiques du four et ses composants et l'analyse d'huile qui doivent se faire de façon régulière (1 fois par trimestre ou 1 fois par semestre). il est aussi important de mettre le point sur les tâches de contrôle non destructif qui doivent se faire annuellement ou semestriellement tels que :

- **La technique de ressuage** : Pendant les arrêts du four, le ressuage est un outil important qui permet de détecter les fissures de la virole et leurs longueurs.

- **La technique des ultrasons** : afin de mesurer la profondeur des fissures et de détecter les fissures dans les bandages et supports du four qui peuvent ne pas être visibles à l'oeil nu, on a recours au contrôle par ultrasons, les ondes ultrasonores émises par la sonde traversent la profondeur du composant et permettent de détecter les défauts et fissures en profondeur.
- **La radiographie** Par rayons X ou Gamma, l'utilisation de la technique de radiographie permet de mesurer les variations des épaisseurs des sections de la virole et donc détecter les signes d'usure et de corrosion des matériaux constituant la virole ainsi que les défauts internes des différents composants.

## 4. Les indicateurs clés de performance des entreprises

Les KPIs(Key Performance Indicators) ou indicateurs clés de performance, permettent de mesurer la performance et évaluer l'efficacité des actions. Chaque entreprise choisit d'utiliser les KPIs qui conviennent à ses objectifs. Cependant, il n'est pas toujours efficace de garder les mêmes indicateurs, surtout quand ceux-ci ne fournissent pas une vue globale sur la performance. les indicateurs de performance utilisés actuellement dans les entreprises sont comme suit :

### Cas Henkel-Reghaia

- **MTBF( Mean Time Between Failures)** : ou temps moyen entre les défaillances, est l'un des indicateurs les plus importants pour le département maintenance. Il mesure le bon fonctionnement des équipements (Voir l'équation 2.1).
- **MTTR (Mean Time To Repair)** : ou temps moyen de réparation, Il représente le temps pendant lequel une équipe de maintenance peut réparer un équipement après une panne ou une correction. Sa formule est donnée comme suit[13] :

$$MTTR = \frac{\text{Temps d'arrêt total dû aux pannes}}{\text{Nombre de pannes}} \quad (4.1)$$

- **OEE (Overall Equipment Effectiveness)** : Il représente la productivité globale de l'équipement en prenant en compte le temps perdu en raison des arrêts non planifiés, les pertes opérationnelles liées à la qualité, aux performances et à la disponibilité. Sa formule est donnée

comme suit[13] :

$$OEE = Disponibilit(\%) \times Performance(\%) \times Qualit(\%) \quad (4.2)$$

## Cas de la SCSEG-GICA

- **Taux de disponibilité** : Noté (A), il évalue la disponibilité de l'équipement, c'est-à dire le temps pendant lequel l'équipement est en état d'accomplir sa fonction dans des conditions données

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

### 4.1. Proposition des KPIs et d'un tableaux de bord

Pour suivre l'avancement de notre démarche, une analyse RAM (Reliability, Availability, and Maintainability) peut être réalisée. Cela consiste à surveiller les trois paramètres à travers leurs KPI respectifs : le MTBF pour la fiabilité, le taux de disponibilité pour la disponibilité et le MTTR pour la maintenabilité.

Pour cela nous avons proposé de suivre l'avancement des plans proposés, dans les deux entreprises, en utilisant les KPIs déjà définis dans le cas de Henkel-Reghaia voire, le MTBF, le MTTR et l'OEE, ces derniers représentent les trois paramètres de l'analyse RAM vu que la disponibilité est incluse dans l'OEE. Ces KPIs vont donc nous permettre d'évaluer l'efficacité du plan en termes de disponibilité, qualité et performance.

En plus de ces trois, le KPI taux de réalisation est proposé pour mieux visualiser l'état d'avancement de la RCM dans les entreprises et le rapport entre la réalisation des actions proposées et l'amélioration de l'efficacité des équipements.

Il est évident que la réduction du temps de réparation (MTTR) permet de remettre rapidement le système en marche. Ceci dit, cela peut impliquer une négligence de certaines tâches lors de l'intervention, qui peuvent être de l'ordre de la sécurité ou de la qualité, et qui risquent à leur tour d'engendrer des défaillances plus catastrophiques. D'autre part, essayer de maximiser la disponibilité ne garantit pas toujours un bon OEE, car cela peut nuire à la qualité ou à la performance. Il est donc important de trouver un terrain d'entente ou un optimum pour les différents indicateurs composant le OEE afin de concrètement améliorer le rendement.

Pour faciliter cette tâche, un tableau de bord est proposé. Cela permet de visualiser le taux de réalisation en lien avec les autres paramètres. D'autre part, nous avons mis en place une interface permettant de modifier les actions de maintenance planifiées et d'indiquer leur état (complété, en attente ou planifié). En d'autres termes, nous allons réaliser l'analyse RAM en se basant sur le taux de réalisation du plan. Cela permet une évaluation continue qui contribue à une amélioration continue.

Cette démarche a été mise en œuvre à l'aide de la bibliothèque Streamlit avec Python. Il est toujours possible d'améliorer l'application pour qu'elle s'adapte aux besoins spécifiques de l'entreprise. L'intégration de cette application peut être réalisée en temps réel avec une mise à jour automatique des données collectées.

### Add a New Task

Task Name

Scheduled Date

Completion Date

Status

### Maintenance Tasks

Check Sensors	Scheduled Date for Check Sensors <input type="text" value="2023/12/01"/>	Completion Date for Check Sensors <input type="text" value="2023/12/01"/>	Status for Check Sensors <input style="border: none; background-color: #f0f0f0; padding: 2px 5px; width: 100%;" type="text" value="Completed"/>	Completed	<input type="button" value="Delete"/>
Lubricate Bearings	Scheduled Date for Lubricate Bearings <input type="text" value="2023/12/07"/>	Completion Date for Lubricate Bearings <input type="text" value="2023/12/07"/>	Status for Lubricate Bearings <input style="border: none; background-color: #f0f0f0; padding: 2px 5px; width: 100%;" type="text" value="Completed"/>	Completed	<input type="button" value="Delete"/>
Inspect Hydraulic System	Scheduled Date for Inspect Hydraulic System <input type="text" value="2023/12/15"/>	Completion Date for Inspect Hydraulic System <input type="text" value="2023/12/16"/>	Status for Inspect Hydraulic System <input style="border: none; background-color: #f0f0f0; padding: 2px 5px; width: 100%;" type="text" value="Completed"/>	Completed	<input type="button" value="Delete"/>
Align Components	Scheduled Date for Align Components <input type="text" value="2023/12/20"/>	Completion Date for Align Components <input type="text" value="2023/12/21"/>	Status for Align Components <input style="border: none; background-color: #f0f0f0; padding: 2px 5px; width: 100%;" type="text" value="Completed"/>	Completed	<input type="button" value="Delete"/>
Check Interlocks	Scheduled Date for Check Interlocks <input type="text" value="2023/12/25"/>	Completion Date for Check Interlocks <input type="text" value="YYYY/MM/DD"/>	Status for Check Interlocks <input style="border: none; background-color: #f0f0f0; padding: 2px 5px; width: 100%;" type="text" value="Pending"/>	Pending	<input type="button" value="Delete"/>

**FIGURE 4.3 :** Page du plan de maintenance

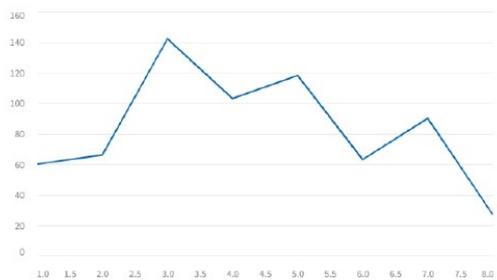
## Preventive Maintenance Plan Dashboard

### Mean Time Between Failures (MTBF)

MTBF Hours

27

↓ -70.00%

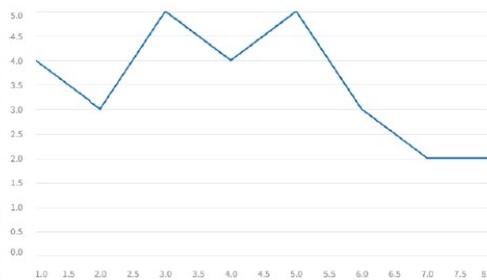


### Mean Time to Repair (MTTR)

MTTR Hours

2

↑ 0.00%

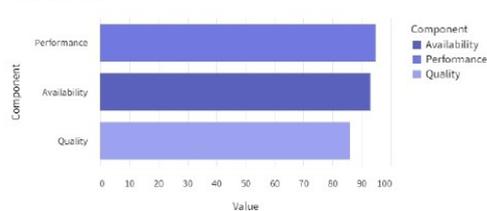


### Overall Equipment Effectiveness (OEE)

OEE

75.85%

OEE Components



### Completion Rate

Completion Rate

80.00%

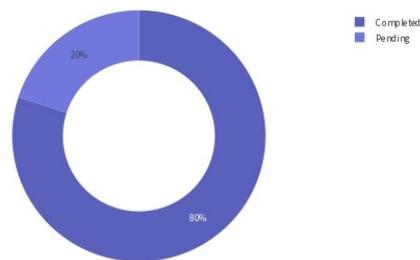


FIGURE 4.4 : Page du tableau de bord

Un code QR est disponible dans l'**annexe 7** pour accéder à l'interface du tableau de bord.

Pour établir une connexion entre une application Streamlit et des données en direct, on peut utiliser des API, des webhooks ou des bases de données en temps réel pour récupérer les données des capteurs et les afficher de manière dynamique en tirant parti des mécanismes de mise à jour et d'actualisation automatiques.

## 5. Comparaison entre les cas d'étude (SCSEG-GICA et Henkel-Reghaia)

- **Impact des modes de défaillance :** La standardité du diagramme de décision de la RCM nous a donné la possibilité de l'appliquer dans les deux cas d'études. Cela nous a permis de mettre en évidence une différence importante entre les modes de défaillances des deux équipements étudiés en termes de leurs impacts et conséquences. En effet, les conséquences des modes de défaillances de l'unité de remplissage Marin du cas Henkel (voir **Annexe 6**) sont principalement opérationnelles à l'exception du problème de dosage et des modes de défaillances de nature pneumatique. Ceci revient toujours aux exigences de production et de qualité strictes, et au fait que l'équipement soit automatisé. Il n'y a donc pas de risque important sur l'opérateur. Par ailleurs, les modes de défaillances du four rotatif et refroidisseur à ballonnets du cas SCSEG ont essentiellement un impact direct sur la sécurité et l'environnement (voir **Annexe 6**). Cela est surtout dû à la lourdeur et taille importante de l'équipement, au danger lié aux défaillances mécaniques et aux hautes températures de fonctionnement du four.
- **Sélection des politiques de maintenance :** Un autre point de comparaison important est le choix des politiques de la maintenance dans les deux cas. Dans le cas Henkel-Reghaia, en plus des modes de défaillances pour lesquels nous avons sélectionné une politique réactive, les actions préventives sélectionnées sont principalement basées sur le temps (TBM). Nous avons, en effet, déjà mentionné dans le deuxième chapitre que la nature de l'industrie offre la possibilité d'effectuer des interventions sur les équipements plus fréquemment à cause des courts cycles de production. Cependant, la politique choisie pour le four rotatif est principalement proactive et s'appuie fortement sur la maintenance conditionnelle (CBM) ou sur une politique hybride (TBM et CBM). On peut facilement justifier cela par la complexité des modes de défaillances, leur impact sur la sécurité et la difficulté d'accéder aux composants. De plus, la sollicitation permanente de l'équipement et la chronophagie des interventions de maintenance préventive obligent l'entreprise à planifier les arrêts préventifs du four pour effectuer tout changement de pièces ou corrections nécessaires.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons apporté des améliorations aux plans de maintenance préventive pour les équipements critiques de Henkel Reghaia et SCSEG GICA en utilisant la logique RCM et les résultats des chapitres précédents, notamment le chapitre 3. Nous avons également proposé un tableau de bord flexible pour le suivi de ces plans, permettant une surveillance continue et une mise à jour en temps réel. Ce tableau de bord garantit que la RCM reste en phase avec l'état et les besoins de chaque entreprise, assurant ainsi une maintenance efficace, économique et sécuritaire.

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce projet était d'implémenter la stratégie RCM sur le Four rotatif et refroidisseur à ballonnets UNAX (SCSEG-GICA) et l'unité de remplissage MARIN (Henkel-Reghaia) d'une part, et d'adapter la méthodologie proposée de la RCM à deux contextes industriels différents, d'autre part. Tel que l'un est une industrie lourde du secteur primaire et l'autre est une industrie légère du secteur secondaire. Ce travail s'était appuyé sur une méthodologie rigoureuse qui a impliqué l'utilisation d'outils d'analyse fiables et pertinents. Cette démarche nous a permis de proposer des solutions de maintenance proactives, économiquement efficaces et efficientes, qui visent à contribuer à améliorer la fiabilité et disponibilité des équipements sur le long terme.

Afin de concentrer nos efforts, nous avons adopté une démarche de travail graduellement approfondie. D'abord en définissant le périmètre global de l'étude en sélectionnant la zone de cuisson dans le cas de la SCSEG et la ligne de production d'eau de javel dans le cas de Henkel-reghaia comme focus de notre étude et en analysant leur fonctionnement. Ceci était suivi par la définition des équipements critiques grâce à une analyse multicritères. Nous avons ensuite appliqué une AMDEC-Machine et une analyse des causes racines de défaillance. Ces analyses nous ont servi de base solide pour la dernière étape qui représente le résultat de notre projet et qui consistait à améliorer les plans de maintenance des équipements critiques en mettant l'accent sur la politique proactive. Pour ce faire, des actions de maintenance conditionnelle, maintenance basée sur le temps ou une fusion des deux étaient proposées. Nous avons également recommandé la reconception des moteurs du four rotatif (cas SCSEG) et des pistons (Cas Henkel) en investissant dans des moteurs à courant alternatif, pour le premier cas, et des pistons en Titane pour le second. Le choix des politiques de maintenance s'est basé sur un diagramme de décision RCM réaliste et objectif qui a permis de prioriser les modes de défaillances les plus critiques. Nous avons conclu ce projet par la proposition d'indicateurs de performance significatifs à la stratégie implémentée et d'un tableau de bord de surveillance afin de monitorer l'avancement et l'efficacité de cette dernière.

Par ailleurs, il est important de souligner que nous avons fait face à plusieurs difficultés lors de la réalisation de ce projet, notamment l'indisponibilité des données nécessaires pour mesurer exactement l'impact et l'occurrence de certaines causes de défaillances et les données liées aux coûts de maintenance des équipements. De plus, la période limitée des stages ne nous a pas permis de concrètement suivre l'évolution des actions proposées et de mesurer leurs apports grâce au tableau de bord proposé.

Bien que les résultats obtenus soient prometteurs, certaines limitations doivent être mentionnées. L'implémentation de la RCM, dans les deux contextes, et la mise en œuvre des actions proposées nécessitent un effort collectif et une ouverture d'esprit envers le changement de la part des équipes techniques de maintenance. Une meilleure coordination entre les départements des entreprises, notamment entre les départements de production et de maintenance, doit aussi être travaillée. d'autre part, afin que la stratégie ait un impact significatif sur le long terme et afin de permettre une mise à jour continue de celle-ci, une meilleure gestion des données devrait être mise en place, les équipes de travail devraient continuellement mettre à jour les bases de données de l'historique des équipements et surveiller plus rigoureusement le fonctionnement des équipements et enregistrer toutes les anomalies. Pour ce faire, les logiciels de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) devraient être mieux exploités et employés. De plus, il serait avantageux d'intégrer le tableau de bord proposé dans ce projet dans ces derniers (GMAO) afin de faciliter la mise à jour des KPIs.

Pour aller plus loin, il serait intéressant pour la SCSEG d'adopter de nouvelles technologies telles que l'intelligence artificielle et l'Internet des Objets (IoT) afin d'améliorer la maintenance prédictive des équipements critiques tels que le four rotatif. Il est aussi important de mentionner que l'entreprise Henkel-Reghaia dispose déjà de la technologie IoT mais celle-ci n'est pas pleinement exploitée, il serait donc important de convaincre les employés de l'importance de cette technologie.

Par ailleurs, il est nécessaire de souligner le fait que la RCM, étant une stratégie technique et orientée détail, ne parviendra pas à éliminer les difficultés et problèmes externes au périmètre de son implémentation, même si ces derniers ont un impact important sur les équipements. Néanmoins, elle peut servir d'une base solide qui facilite l'implémentation de stratégies plus holistiques et globales telles que la Maintenance Totale Productive (Total Productive Maintenance).

Pour conclure, ce projet démontre que la RCM est une stratégie flexible et offre la possibilité d'utiliser plusieurs outils efficaces et qui aident à la décision. De plus, quand elle est rigoureusement implémentée, la RCM peut être adaptée à des environnements industriels différents et de différents secteurs (primaire ou secondaire). Elle promet une amélioration significative et économique de la fiabilité des équipements et ainsi la productivité et l'efficacité des entreprises. L'application et la mise en œuvre rigoureuse et correcte des solutions proposées permettra de pérenniser ces avantages sur le long terme et de frayer le chemin à une maintenance efficiente et plus intelligente.

## Bibliographie

- [1] Farnaz Ghazi Nezami and Mehmet Bayram Yildirim. A sustainability approach for selecting maintenance strategy. *International Journal of Sustainable Engineering*, 6(4) :332–343, 2013.
- [2] Randall G Wilmeth and Michael W Usrey. Reliability-centered maintenance : A case study. *Engineering Management Journal*, 12(4) :25–31, 2000.
- [3] Javad Gholami, Ahmad Razavi, and Reza Ghaffarpour. Decision-making regarding the best maintenance strategy for electrical equipment of buildings based on fuzzy analytic hierarchy process ; case study : elevator. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 28(3) :653–668, 2022.
- [4] John Woodhouse. Combining the best bits of rcm, rbi, tpm, tqm, six-sigma and other ‘solutions’. *The Woodhouse Partnership Ltd*, 2001.
- [5] Abdulrahim Shamayleh, Mahmoud Awad, and Aidah Omar Abdulla. Criticality-based reliability-centered maintenance for healthcare. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(2) :311–334, 2020.
- [6] Filipe Silva, Énio Chambel, Virginia Infante, and Luís Andrade Ferreira. Rcm 3 methodology application to armored military vehicle cooling system. *U. Porto Journal of Engineering*, 7(4) :46–60, 2021.
- [7] Colin Bookless and Michael Sharkey. Rcm-streamlined rcm in the nuclear industry-the maintenance optimisation tool (mot) is the streamlined version of rcm that has been developed by british energy and used in their power stations to. *Maintenance and Asset Management*, 14(1) :27–30, 1999.
- [8] Madhab Jena. Application of industry 4.0 in reliability centred maintenance (rcm), 12 2023.
- [9] Bashir Salah, Mohammed Alnahhal, and Mujahid Ali. Risk prioritization using a modified fmea analysis in industry 4.0. *Journal of Engineering Research*, 11(4) :460–468, 2023.
- [10] Madhab Jena. Application of industry 4.0 in reliability centred maintenance (rcm), 12 2023.
- [11] Manjinder Singh. A comparative review of relationship between six sigma, tpm and rcm on performance in the organizations.
- [12] J. Moubray. *Reliability-centered Maintenance*. G - Reference, Information and Interdisciplinary Subjects Series. Industrial Press, 2001.

- [13] Jesus R Sifonte and James V Reyes-Picknell. *Reliability Centered Maintenance–Reengineered : Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R®*. Productivity Press, 2017.
- [14] M. Basson and Aladon. *RCM3 : Risk-based Reliability Centered Maintenance*. G - Reference, Information and Interdisciplinary Subjects Series. Industrial Press, Incorporated, 2019.
- [15] Arnljot Hoyland and Marvin Rausand. *System reliability theory : models and statistical methods*. John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Scott Hall, Jose Gil, and Omar Vizcarra. Boosting runtime and production factors with reliability centered maintenance. In *2021 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference (IAS/PCA)*, pages 1–11. IEEE, 2021.
- [17] Mo Mansouri, Brian Sauser, and John Boardman. Applications of systems thinking for resilience study in maritime transportation system of systems. In *2009 3rd Annual IEEE Systems Conference*, pages 211–217. IEEE, 2009.
- [18] N Cotaina, M Gabriel, D Richet, and K O’Reilly. The practical application of reliability centred maintenance (rcm) and system simulation in the sawmill industry. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(15) :981–985, 1998.
- [19] Hamed Taherdoost and Mitra Madanchian. Multi-criteria decision making (mcdm) methods and concepts. *Encyclopedia*, 3(1) :77–87, 2023.
- [20] Sajjad Moradi-Sarvestani, Mohammad Reza Dehbozorgi, and Mohammad Rastegar. A three-stage reliability-centered framework for critical feeder identification, failure modes prioritization, and optimal maintenance strategy assignment in power distribution system. *Electric Power Systems Research*, 230 :110215, 2024.
- [21] Islam H Afefy, A Mohib, AM El-Kamash, and MA Mahmoud. A new framework of reliability centered maintenance. *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering*, 13(3), 2019.
- [22] Zhen Chen, Xiaona Wu, and Jianguo Qin. Risk assessment of an oxygen-enhanced combustor using a structural model based on the fmea and fuzzy fault tree. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32 :349–357, 2014.
- [23] A Mariajayaprakash and T Senthilvelan. Failure detection and optimization of sugar mill boiler using fmea and taguchi method. *Engineering Failure Analysis*, 30 :17–26, 2013.
- [24] Flávio Piechnicki, Eduardo Loures, and Eduardo Santos. A conceptual framework of knowledge conciliation to decision making support in rcm deployment. *Procedia Manufacturing*, 11 :1135–1144, 2017.

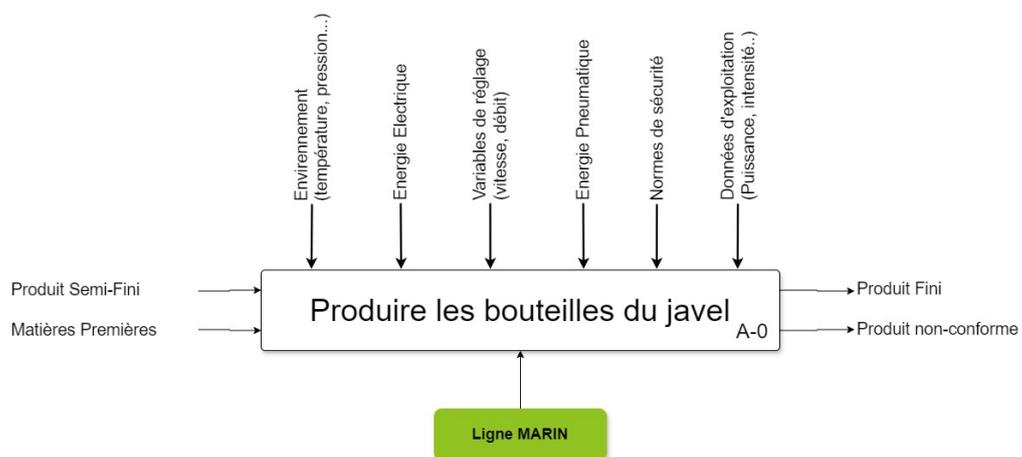
- [25] Stanley Fore and A Msipha. Preventive maintenance using reliability centred maintenance (rcm) : A case study of a ferrochrome manufacturing company. *South African Journal of Industrial Engineering*, 21(1) :207–234, 2010.
- [26] I Chung, H Ryu, SY Yoon, and JC Ha. Health effects of sodium hypochlorite : review of published case reports. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 37(1) :e2022006–0, Mar 2022. Epub 2022 Mar 30.
- [27] L Kerherve, G Daufin, and Françoise Michel. Corrosion des aciers inoxydables par les solutions d'eau de javel. *Le Lait*, 63(625-626) :129–147, 1983.
- [28] Manuel Lambert, Bernard Riera, and Gregory Martel. Application of functional analysis techniques to supervisory systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 64(2) :209–224, 1999.
- [29] Anthony M Smith and Glenn R Hinchcliffe. *RCM–Gateway to world class maintenance*. Elsevier, 2003.
- [30] Marcello Braglia, Gionata Carmignani, Marco Frosolini, and Francesco Zammori. Data classification and mtbf prediction with a multivariate analysis approach. *Reliability Engineering System Safety*, 97(1) :27–35, 2012.
- [31] Renato A Krohling and André GC Pacheco. A-topsis—an approach based on topsis for ranking evolutionary algorithms. *Procedia Computer Science*, 55 :308–317, 2015.
- [32] JFW Peeters, Rob JI Basten, and Tiedo Tinga. Improving failure analysis efficiency by combining fta and fmea in a recursive manner. *Reliability engineering & system safety*, 172 :36–44, 2018.
- [33] A Mariajayaprakash and T Senthilvelan. Failure detection and optimization of sugar mill boiler using fmea and taguchi method. *Engineering Failure Analysis*, 30 :17–26, 2013.
- [34] JFW Peeters, Rob JI Basten, and Tiedo Tinga. Improving failure analysis efficiency by combining fta and fmea in a recursive manner. *Reliability engineering & system safety*, 172 :36–44, 2018.

## Annexe

### 1. Annexe A.1

## Diagrammes SADT

### Cas Henkel-Reghaia



**FIGURE 1 :** SADT cas Henkel-Reghaia

## Cas SCSEG-GICA



FIGURE 2 : SADT cas SCSEG-GICA

## 2. Annexe A.2

### Vue Schématique des équipements critiques

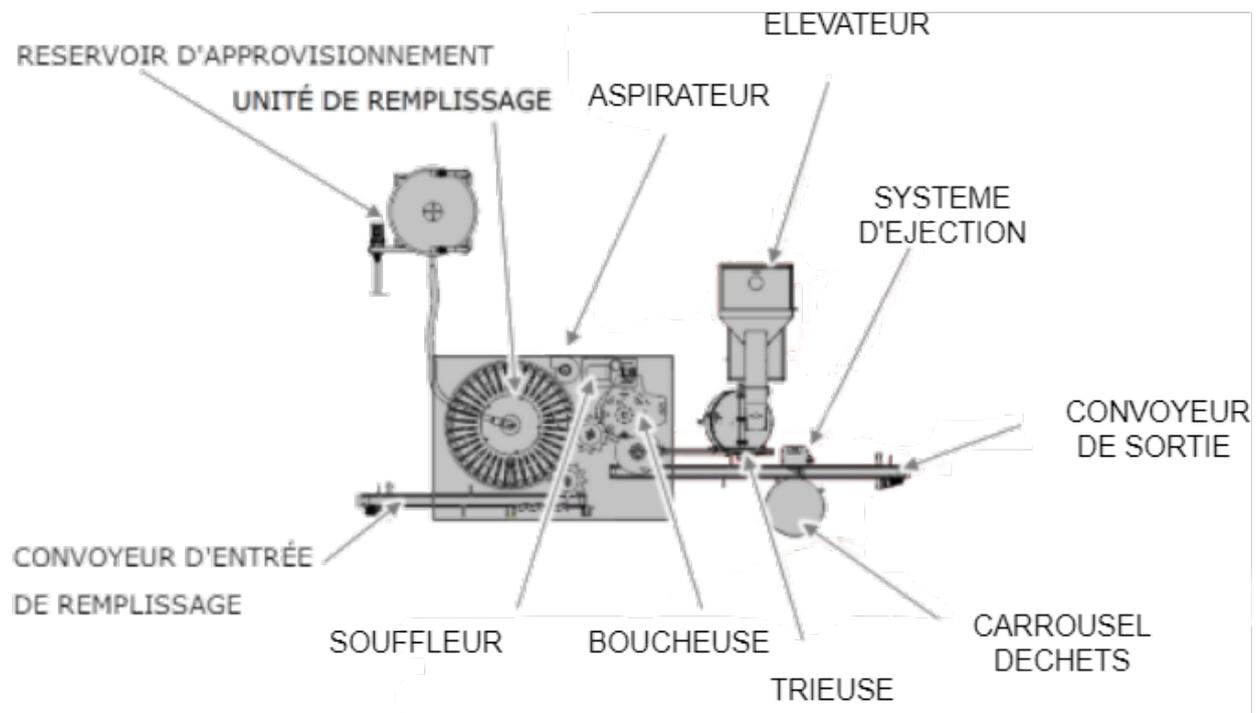


FIGURE 3 : Remplisseuse : Vue Schématique

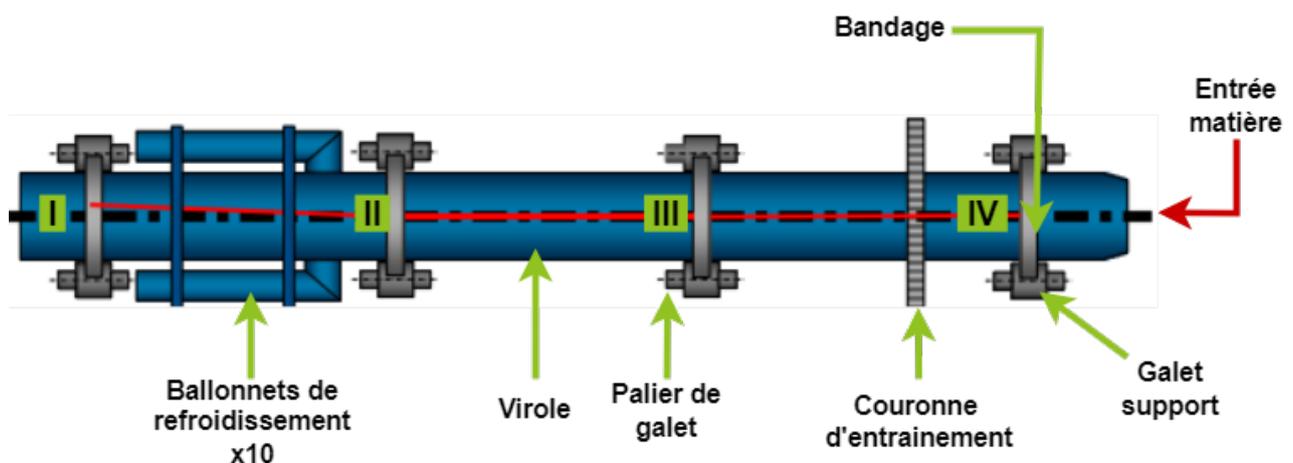


FIGURE 4 : Four rotatif et refroidisseur : Vue Schématique

### 3. Annexe A.3

## Echelles de l'analyse multicritères

### Cas Henkel-Reghaia

Niveau	Coefficients	Description
Très Faible	1	Impact négligeable, défauts mineurs rapidement corrigés.
Faible	2	Défauts mineurs, interventions légères nécessaires.
Modéré	3	Défauts perceptibles, retouches importantes nécessaires.
Élevé	4	Défauts significatifs, interventions rapides et substantielles nécessaires.
Très Élevé	5	Défauts graves et fréquents, révision majeure des processus requise.
Critique	6	Défauts critiques, produits non conformes, arrêt de production souvent nécessaire.

**TABLE 1 :** *Échelle pour le degré d'impact des défaillances des machines sur la qualité*

## Cas SCSEG-GICA

Critère	Poids	Niveau
Impact sur la production(P)	30%	(3) Très important (2) Important (1) Normal
Impact sur la sécurité(S)	30%	(3) Très important (2) Important (1) Normal
Redondance (A)	25%	(3) Pas d'équipement redondant (2) Equipement redondant avec disponibilité moyenne (1) Il y a redondance et bonne disponibilité
Valeur de l'équipement (V)	15%	(3) Haute valeur (2) Valeur Normale (1) Valeur faible

**TABLE 2 :** *Echelle et poids des critères pour l'analyse multicritères*

## 4. Annexe A.4

### Analyse multicritères

#### Code de la méthode TOPSIS

```

1  import numpy as np
2  import matplotlib.pyplot as plt
3
4  decision_matrix = np.array([
5      [27.6,5.27, 6 ],
6      [3.05, 32.37, 1],
7      [3.17, 33.92, 3],
8      [13.27, 2.24, 2],
9      [3.94, 14.9, 4],
10     [25.4, 11.31, 5]
11 ])
12 equipments = ["Équipement 1", "Équipement 2", "Équipement 3", "Équipement 4", "Équipement 5", "Équipement 6"]
13
14 # Poids
15 weights = np.array([0.35, 0.2, 0.45])
16
17 # Étape 1: Normalisation de la matrice de décision
18 norm_matrix = decision_matrix / np.sqrt((decision_matrix ** 2).sum(axis=0))
19
20 # Étape 2: Matrice de décision pondérée
21 weighted_matrix = norm_matrix * weights
22
23 # Étape 3: Détermination de la solution idéale positive et négative
24 ideal_solution = np.zeros(3)
25 negative_ideal_solution = np.zeros(3)
26
27 # Critères: min, max
28 for i in range(3):
29     if i == 1: # Critère à maximiser
30         ideal_solution[i] = weighted_matrix[:, i].max()
31         negative_ideal_solution[i] = weighted_matrix[:, i].min()
32     else: # Critère à minimiser
33         ideal_solution[i] = weighted_matrix[:, i].min()
34         negative_ideal_solution[i] = weighted_matrix[:, i].max()
35
36 # Étape 4: Calcul des distances entre chaque alternative et les solutions idéales
37 distance_to_ideal = np.sqrt(((weighted_matrix - ideal_solution) ** 2).sum(axis=1))
38 distance_to_negative_ideal = np.sqrt(((weighted_matrix - negative_ideal_solution) ** 2).sum(axis=1))
39
40 # Étape 5: Calcul des scores de similarité à la solution idéale
41 similarity_scores = distance_to_negative_ideal / (distance_to_ideal + distance_to_negative_ideal)
42
43 # Étape 6: Classement des alternatives
44 ranking = np.argsort(similarity_scores)[::-1]
45
46 # Classement
47 ranked equipments = [equipments[i] for i in ranking]
48
49 print("Scores de similarité:", similarity_scores)
50 print("Classement des équipements (du meilleur au pire):", ranked equipments)
51

```

FIGURE 5 : Code Python TOPSIS

## Logigramme de l'analyse multicritères

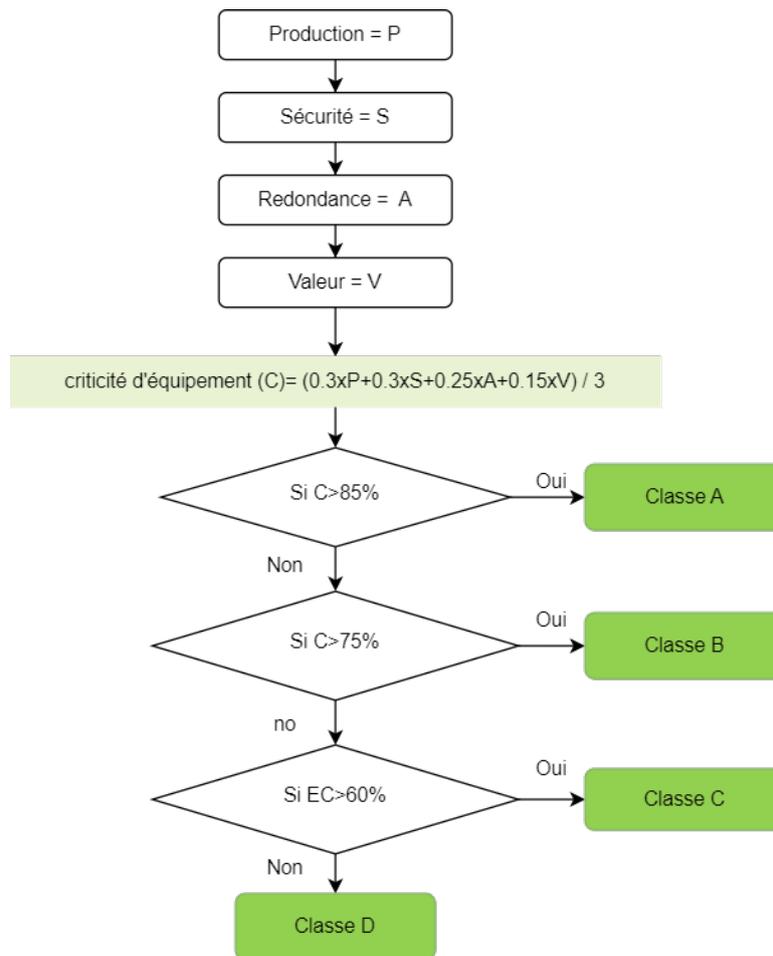


FIGURE 6 : Logigramme de l'analyse multicritères

## 5. Annexe B

### Echelles de l'AMDEC

#### Cas Henkel-Reghaia

Coefficient	Description
1	Ajustement mineur. Aucune dégradation notable du matériel
2	Arrêt inférieur à 30 min. N'affecte pas la qualité
3	Arrêt inférieur à 1 heure. Chargement du matériel défectueux
4	Arrêt inférieur à 3 heures. Intervention importante. Affecte la qualité du produit
5	Arrêt plus de 3 heures Affecter la sécurité du personnel ou de l'environnement

**TABLE 3 : Echelle de Gravité (G)**

Coefficient	Description
1	Une fois par an
2	Une fois par trimestre
3	Une fois par mois
4	Une fois par semaine
5	Plusieurs fois par semaine

**TABLE 4 : Echelle de Fréquence (F)**

<b>Coefficient</b>	<b>Description</b>
1	Visible Affichage dans l'écran de la machine
2	Délectable par les capteurs
3	Nécessite une action particulière (contrôle)
4	Nécessite un démontage ou appareillage
5	Non détectable

**TABLE 5 : Echelle de Détection (D)**

## Cas SCSEG-GICA

<b>Coefficient</b>	<b>Description</b>
1	La fonction peut être réalisée, nécessite un ajustement mineur
2	Arrêt inférieur à 8h, pas de pièces éléments endommagés, l'arrêt affecte faiblement le taux de production
3	Arrêt entre 8h et 24h, La défaillance peut être corrigée ou dépannée.
4	Arrêt entre 1j et 7j, élément endommagé
5	Arrêt supérieure à 7j, composant endommagé difficilement accessible, l'intervenant court un risque de blessure

**TABLE 6 : Echelle de Gravité (G)**

<b>Coefficient</b>	<b>Description</b>
1	Très rare, une fois/10 ans
2	Rare, une fois tous les 5 ans
3	Au plus 2 fois tous les 3 ans
4	Fréquent, au plus une fois par trimestre
5	Très fréquent, au moins 2 fois par trimestre

**TABLE 7 : Echelle de Fréquence (F)**

<b>Coefficient</b>	<b>Description</b>
1	Visible à l'œil nu et audible, audio-tactile
2	DéTECTABLE par des capteurs ou SEMscan, caméra thermique, caméra four en temps réel
3	La détection Nécessite un outillage spécifique (une analyse vibratoire, ultrasons, ressuage)
4	DéTECTABLE après l'occurrence de la défaillance.
5	Impossible à détecter.

**TABLE 8 : Echelle de Détection (D)**

## 6. Annexe C.1

### Chemins suivis dans le diagramme RCM

## Cas Henkel-Reghaia

Mode de défaillance	Chemin suivi dans le diagramme	Politique Proactive			Politique Réactive	
		AP		AC	MC	
		TBM	CBM	R	RTF	D
Arrêt du convoyeur	1_2_3_PM1_PM2	X				
Bourrage des flacons	1_2_3_PM1_PM2	X				
Mauvais positionnement	1_2_3_PM1_PM2	X				
perturbation de mesure	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Problème de dosage	1_2_S1_S2_S3_S4			X		
Egouttage	1_2_3_NPM1_NPM2_NPM3				X	
Blocage de l'élévateur	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Blocage des bouchons	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Mauvaise régulation de la pression	1_2_3_PM1_PM2	X				
Mauvais serrage	1_2_3_PM1_PM2	X				
Problème d'alimentation des bouchons	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Aspiration insuffisante	1_2_S1		X			
Débit d'air insuffisant	1_2_S1		X			

Panne de moteur	1_H1		X			
Défaillance de l'embrayage automatique	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Rupture des dents	1_2_3_PM1_PM2	X				
Défaillance de la pompe	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Dysfonctionnement de la pompe	1_2_3_NPM1_NPM2_NPM3				X	
Echec d'éjecté les flacons non conforme	1_2_3_PM1_PM2_PM3				X	
Problème de connexion	1_H1_H2_H3					X
Défaillance électrique	1_2_3_PM1_PM2	X				

**TABLE 9 :** Chemain suivi selon le plan RCM Remplisseuse Henkel-Reghaia

## Cas SCSEG-GICA

Mode de défaillance	Chemin suivi dans le diagramme	Politique Proactive			Politique Réactive	
		AP		AC	MC	
		TBM	CBM	R	RTF	D
Couple insuffisant	1-2-S1-S2-S3-Non-S4				X	
Usure et cassure des dentures	1-2-S1-S2-S3-OUI	X	X			

Fissure au niveau de la soudure des lames (bretelles)	1-2-3-NON-NPM1-NPM2-NPM3-OUI				X	
usure de l'axe de fixation des lames	1-2-3-NON-NPM1-NPM2-NPM3-OUI				X	
détachement de la cornière d'étanchéité	1-2-3-NON-NPM1-NPM2-NPM3-OUI				X	
Fissuration	1-2-S1-OUI		X			
Glissement incorrecte	1-2-S1-S2-S3-OUI	X	X			
Fissures	1-2-S1-OUI		X			
Fléchissement	1-2-3-PM1-OUI		X			
Température élevée au palier	1-2-S1-OUI		X			
Étanchéité insuffisante	1-2-S1-OUI		X			
Ovalisation	1-2-3-PM1-OUI		X			
Fissuration au niveau des viroles porteuses du bandage	1-2-S1-OUI		X			
Fissuration au niveau des viroles =25mm	1-2-S1-OUI		X			
Effet vilebrequin	1-2-S1-S2-S3-OUI	X	X			
Usure des briques	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				

Rupture des vis	1-2-3-NON-NPM1- NPM2-NPM3-OUI				X	
Supression	1-2-3-NON-NPM1- NPM2-NPM3-OUI				X	
Blocage en descente	1-2-3-NON-NPM1- NPM2-NPM3-OUI				X	
Usure de béton	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				
Usure des briques	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				
Usure des plaques de blindage	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				
Usure du cadre de sortie	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				
chute de tronçon du secteur conique	1-2-3-PM1-PM2-OUI	X				
usure prématuré de la tuyère	1-2-S1-OUI		X			
obstruction des brûleurs	1-2-S1-OUI		X			
usure des composants électriques	1-H1-H2-OUI	X				

**TABLE 10 :** Chemain suivi selon le plan RCM Four rotatif et refroidisseur SCSEG-GICA

## **7. Annexe C.2**

### **Code Qr d'accès au tableau de bord**

