

Dédicaces

A mes parents

*Aucun mot ne pourrait exprimer ma profonde gratitude, le respect et la reconnaissance que j'ai pour vous. Votre amour, soutien et compréhensibilité ont fait de moi l'ingénieur que je suis aujourd'hui. Je vous remercie énormément pour tous les sacrifices que vous avez consentis pendant mes longues années d'études.
Que Dieu tout miséricordieux vous garde et vous procure santé, bonheur et longue vie.*

A ma grande sœur Salma

*Ton amour, affection et générosité ont toujours été pour moi une source d'inspiration et d'encouragement. Tu es et tu resteras toujours mon exemple de persévérance et de ténacité.
Que Dieu, le tout puissant te préserve et te comble de joie.*

A mes chers frères Reda, Rayane et Issam

*En témoignage de mon amour et de ma reconnaissance, je vous dédie ce modeste travail en guise de remerciement de votre affection et de votre soutien inébranlable.
Que Dieu vous garde, vous bénisse et vous prête une longue vie plein de succès.*

A l'amie de toute la famille Madame Imane SATIAE

*Je vous remercie pour votre bienveillance, vos encouragements et votre soutien inconditionnel. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour et de mon affection.
Puisse le bon Dieu vous procurer santé, prospérité et vous préserver vos enfants.*

A mon collègue, confident et meilleur ami Ayoub ETTAKI

Je te dédie ce travail en souvenir de nos années d'études inoubliables depuis la FST de Mohammedia. Je te remercie pour ton soutien et tes encouragements et je te souhaite toute la réussite, le succès et le bonheur que tu mérites.

A ma famille, tous mes ami(e)s et ceux qui me sont chers Chaymae, Manal, Meryam, Sarah, Soukaina et Abdessamad ...

*Ces trois années magnifiques passées à vos côtés étaient marquantes pour moi à bien des égards. Je vous dédie ce travail en gage d'amitié.
J'espère de tout mon cœur que notre complicité restera intacte.
Je vous souhaite une vie remplie de bonheur et une brillante carrière.*

Remerciements

Au terme de ce projet de fin d'études, je souhaite adresser mes sincères remerciements à l'entreprise COSUMAR de m'avoir accueilli pour effectuer ce stage en m'offrant ainsi la possibilité d'acquérir une formation très enrichissante.

Mes vifs remerciements vont à mon encadrant industriel, Monsieur **Said ZAAM**, qui m'a orienté et accompagné tout au long de cette expérience professionnelle avec beaucoup de patience et de pédagogie.

Je tiens aussi à remercier mon encadrant académique professeur **Jamal Eddine HAZM** pour son aide, ses encouragements et les précieux conseils qu'il m'a prodigués tout au long du projet.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury professeur **Taoufiq SAFFAJ** et professeur **Abdallah OULMEKKI** qui m'ont fait le grand honneur d'avoir accepté d'évaluer la pertinence de mon travail, ainsi que tout le corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour leurs efforts considérables fournis durant mon parcours de formation.

J'adresse mes remerciements au personnel de la COSUMAR Casablanca et plus particulièrement Monsieur **Zakarya HADER** et Monsieur **Younes MOHAMMED** qui étaient toujours prêt à répondre positivement à mes demandes et à me rendre service.

Enfin, à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet, trouvent ici l'expression de mes sentiments les plus distingués.

Liste des abréviations

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité

CDG : Caisse de dépôt et de gestion

CEFT : Corps d'évaporation à flots tombants

CF : Commune filtrée

CFG : Casablanca Finance Group

CGEM : Confédération générale des entreprises du Maroc

CIMR : Caisse Interprofessionnelle Marocaine de Retraite

CMR : Caisse Marocaine des Retraites

CNIA : Compagnie Nord-africaine et Intercontinentale d'Assurance

COSUMA : Compagnie sucrière marocaine

COSUMAR : Compagnie Sucrière Marocaine de Raffinage

Cp : Capabilité de procédé

Cpk : Capabilité procédé centré

DMAIC : Définir-Mesurer-Analyser-Innover-Contrôler

FAO : Food and Agriculture Organization

FC : Fonte commune

GMAO : La gestion de maintenance assistée par ordinateur

ISO : International Organization for Standardization

LC Limite centrale

LSI : Limite de spécification inférieure

LSS : Limite de spécification supérieure

MAMDA : Mutuelle Agricole Marocaine d'Assurances

MCMA : Mutuelle Centrale Marocaine d'Assurance

MES : Matière en suspension

MSP : Maîtrise statistique des processus

ONA : Omnium nord africain

PMT : Plan de maintenance technique

Pp : Performance du procédé

Ppk : Performance du procédé centré

RCAR : Régime Collectif d'Allocation de Retraite

RSE : Responsabilité Sociale des Entreprises

SA : Société anonyme

SCR : Société Centrale de Réassurance

SNI : La Société Nationale d'Investissement

SOP : Standard operating procedure

SUCRAFOR : la sucrerie raffinerie de l'Oriental ;

SUNABEL : Sucreries de betterave du Gharb et du Loukkos

SURAC : Sucreries raffineries de canne

SUTA : Sucrerie de Tadla

TD : Taux de décoloration

Liste des tableaux

Tableau 1: Filiales de COSUMAR	5
Tableau 2: Fiche signalétique de COSUMAR	5
Tableau 3 : Produits de la société	6
Tableau 4 : Coefficients A_2, D_3, D_4	14
Tableau 5: Vision du problème en utilisant la méthode QQQQCP	21
Tableau 6: Charte du projet	21
Tableau 7: Indicateurs de la capabilité pour le brix	24
Tableau 8: Limites de spécification de la carte de contrôle des moyennes du brix	25
Tableau 9: Limites de spécification des étendues du brix	26
Tableau 10: Indicateurs de la capabilité pour le pH	28
Tableau 11: Limites de spécification des moyennes du pH	28
Tableau 12: Limites de spécification des étendues du pH	29
Tableau 13: Indicateurs de la capabilité pour le taux de décoloration	31
Tableau 14: Limites de spécification des moyennes du taux de décoloration	31
Tableau 15: Limites de spécification des étendues du taux de décoloration	32
Tableau 16: Interprétation de la capabilité	32
Tableau 17: Solutions proposées et leurs notes globales	34
Tableau 18: Etude de la corrélation	35
Tableau 19: AMDEC sur la filtration du jus carbonaté	36

Liste des figures

Figure 1: Logo du groupe ONA	3
Figure 2 : Logo du groupe COSUMAR.....	3
Figure 3: Organigramme de la société.....	6
Figure 4: Procédé de raffinage du sucre.....	7
Figure 5 : Molécule de saccharose	11
Figure 6: Exemple de carte de contrôle.....	13
Figure 7: Différence entre un procédé capable et un procédé non capable	15
Figure 8: Procédé dérégulé du côté supérieur de la moyenne	16
Figure 9: Réfractomètre	19
Figure 10: pH mètre	20
Figure 11: Spectrophotomètre	20
Figure 12: Diagramme de GANTT	22
Figure 13: Courbe de distribution du paramètre Brix	23
Figure 14: Droite d'Henry du brix.....	23
Figure 15: Calcul de la capacité vis-à-vis du paramètre brix	24
Figure 16: Carte de contrôle des moyennes du brix.....	25
Figure 17: Carte de contrôle des étendues du brix.....	26
Figure 18: Courbe de distribution du paramètre pH.....	27
Figure 19: Droite d'Henry du pH	27
Figure 20: Calcul de la capacité vis-à-vis du paramètre pH.....	27
Figure 21: Carte de contrôle des moyennes du pH	28
Figure 22: Carte de contrôle des étendues du pH	29
Figure 23: Courbe de distribution du paramètre taux de décoloration	29
Figure 24: Droite d'Henry du taux de décoloration.....	29
Figure 25: Calcul de la capacité vis-à-vis du paramètre taux de décoloration	30
Figure 26: Carte de contrôle des moyennes du taux de décoloration	31
Figure 27: Carte de contrôle des étendues du taux de décoloration	32
Figure 28: Diagramme des 5 M.....	33
Figure 29: Logigramme de pilotage.....	37
Figure 30: Résumé de la phase contrôler	37

Liste des annexes

Annexe I : Interprétation de la capabilité

Annexe II : Suivi des paramètres : Brix, pH, Taux de décoloration

Annexe III : Suivi des paramètres : le taux de décoloration, la pureté et la matière en suspension

Annexe IV : Plan de maintenance préventive pour les filtres diastar

Annexe V : Règles de pilotage des cartes de contrôle

Table des matières

Introduction générale :	1
Partie I :.....	2
Présentation du contexte général de l'entreprise	2
I- Présentation de l'entreprise ONA	3
II- Présentation de l'entreprise COSUMAR	3
III- Historique	3
IV- Filiales de COSUMAR.....	5
V- Fiche signalétique de COSUMAR	5
VI- Organigramme.....	6
VII- Produits de la société.....	6
VIII- Procédé de raffinage du sucre	7
1- Réception :	7
2- Affinage :	8
<input type="checkbox"/> Empatage :.....	8
<input type="checkbox"/> Fonte :.....	8
3- Epuration :	8
<input type="checkbox"/> Carbonatation :	8
<input type="checkbox"/> Filtration :	8
4- Décoloration :	9
5- Evaporation :.....	9
6- Cristallisation :.....	9
7- Séchage, refroidissement et stockage :	9
8- Conditionnement :	9
Partie II :	10
Revue bibliographique.....	10
I- Généralités sur le sucre	11
1- Sucre et plantes saccharifères	11
2- Composition du sucre	11

II-	Maîtrise statistique des processus	12
1-	Définition de la MSP	12
2-	Objectifs.....	12
3-	Outils fondamentaux de la MSP	12
III-	Démarche DMAIC	16
Partie III:.....		18
Partie expérimentale		18
I-	Introduction	19
II-	Objectif.....	19
III-	Matériel et méthode.....	19
1-	Matériel et outils	19
2-	Méthodes	19
	<input type="checkbox"/> Mesure du brix :	19
	<input type="checkbox"/> Mesure du pH :	19
	<input type="checkbox"/> Mesure du taux de décoloration :	20
IV-	Application de la démarche DMAIC	20
1-	Introduction	20
2-	Première phase : Définir	21
3-	Deuxième phase : Mesurer	22
	Paramètre 1 : Le Brix	22
	Paramètre 2 : Le pH	26
	Paramètre 3 : Le taux de décoloration	29
4-	Troisième phase : Analyser	32
5-	Quatrième phase : Innover.....	33
6-	Cinquième phase : Contrôler	36
Conclusion générale :		38
Annexes		39
Références :		45
Résumé		47

Introduction générale

Dans un contexte économique en évolution continue entraînant une demande de clients de plus en plus exigeants et une concurrence accrue entre les entreprises, la recherche de la performance et de l'innovation sont des composantes majeures de la stratégie de toute société.

En tant que leader dans le secteur agroalimentaire, la COSUMAR joue un rôle important dans le développement de la filière sucrière au niveau national. Ce groupe assure non seulement l'extraction, le raffinage et le conditionnement du sucre mais également sa distribution et son exportation sous différentes formes : le pain de sucre, le lingot, le morceau et le sucre granulé.

Actuellement, la demande alimentaire locale est satisfaite à près de 60% en moyenne, cependant la COSUMAR ambitionne encore à élargir sa productivité et à développer ses méthodes de fabrication afin de subvenir au besoin du marché. [1]

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de fin d'études, qui vise à détecter les sources de variabilité après la mise en œuvre de la maîtrise statistique du processus d'épuration en appliquant la démarche DMAIC.

Le rapport décrivant ce travail sera subdivisé en trois parties essentielles :

- La première partie décrira l'organisme d'accueil ainsi que son domaine d'activité et le procédé de raffinage du sucre.
- La deuxième partie comportera l'étude bibliographique dans laquelle nous allons donner un petit aperçu sur le sucre ainsi que des généralités sur la maîtrise statistique des processus.
- La troisième partie sera consacrée à l'étude expérimentale au cours de laquelle on étudiera la stabilité et la capacité du processus d'épuration afin de déterminer les causes de variabilités et de proposer des plans d'action.

Partie I :

Présentation du contexte général de l'entreprise

I- Présentation de l'entreprise ONA

Le groupe ONA ou Omnium Nord-Africain est un groupe marocain privé dont l'activité est structurée autour de plusieurs pôles : mines, agroalimentaire, distribution, télécommunications, énergies renouvelables...

Créée en 1919 par Jean Epinat, la société était à l'origine spécialisée dans les activités de transport et de tourisme. Cependant, après la seconde guerre mondiale, la banque de Paris et des Pays-Bas décide d'étendre ses activités en Afrique du nord en créant une compagnie qui deviendra en 1934 sous la dénomination ONA.

Devenu l'un des grands groupes du pays, le groupe ONA a aujourd'hui plus de 25.000 collaborateurs et réalise un chiffre d'affaires annuel près de 20 milliards de dirhams par an ce qui lui permet d'accompagner les grands projets de modernisation du Maroc et s'ouvrir à des opportunités de croissance à l'international. [2]



Figure 1: Logo du groupe ONA

II- Présentation de l'entreprise COSUMAR

La Compagnie Sucrière Marocaine de Raffinage COSUMAR est une filiale du groupe ONA créée en avril 1929, par la société SAINT-LOUIS de Marseille et dont le siège se situe à Casablanca.

Présent sur tout le territoire marocain, le groupe COSUMAR, est spécialisé dans l'extraction, le raffinage et le conditionnement du sucre sous différentes formes : morceaux, lingots, granulés et pains.

La COSUMAR assure l'approvisionnement du marché national grâce à une capacité de production de 4000 tonnes par jour. Ce succès s'appuie sur un savoir-faire reconnu, la compétence de ses ressources humaines mais également un système de management de qualité performant. [3]



Figure 2 : Logo du groupe COSUMAR

III- Historique

Cela fait plus de 90 ans maintenant, que le Maroc raffine et produit tout ou partie du sucre qu'il consomme grâce à la première raffinerie marocaine située à Casablanca : COSUMAR. Découvrons les dates clés qui jalonnent l'histoire de ce grand groupe. [4]

- **En 1929**

Création du site historique de la raffinerie de Casablanca COSUMA par la société Saint-Louis de Marseille.

- **En 1967**

Après que l'état marocain devient actionnaire à 50 % du capital de la société, la COSUMA se transforme en COSUMAR.

- **En 1985**

Cette année marque l'introduction de notre industrie sucrière à la bourse. De plus, le groupe ONA prend le contrôle de 55% du capital de la COSUMAR.

Le reste étant détenu par :

- ✓ La SNI (Société Nationale des Investissements) avec 30%
- ✓ La CIMR (Caisse Interprofessionnelle Marocaine de Retraite) avec 6.5%
- ✓ Les porteurs avec 5%.

- **En 1993**

Fusion de la raffinerie avec les sucreries de Doukkala (Sidi Bennour et Zémamra).

- **En 2003**

Obtention de la certification ISO 9001 version 2000.

- **En 2005**

Acquisition des 4 sociétés sucrières publiques : SUNABEL, SURAC SUTA, SUCRAFOR par la COSUMAR.

- **En 2006**

La COSUMAR lance un projet d'extension de la capacité de traitement de betteraves à 15 .000 tonnes par jour de la sucrerie de Sidi Bennour, avec un investissement de 850 MDH.

- **En 2007**

Un projet d'extension et de modernisation de la raffinerie de Casablanca a été lancé par le groupe COSUMAR, avec un montant d'investissement de 120 MDH.

- **En 2009**

La FAO décerne au groupe COSUMAR la médaille de modèle agrégateur.

- **En 2012**

COSUMAR obtient le Label CGEM de la Responsabilité sociale et est distingué pionnier de la RSE en Afrique par l'Institut RSE.

- **En 2013**

En 2013, la Société Nationale d'Investissement (SNI), actionnaire de la société Cosumar à hauteur de 36,7% cède 27,5% du capital au Groupe singapourien WILMAR groupe agroalimentaire asiatique.

- **En 2014**

Le holding COSUMAR cède 24,2% du capital à un consortium d'institutionnels marocains : Axa Assurances, CNIA Saada, RMA Watanya, SCR, Wafa Assurances, MAMDA, MCMA, CDG, CMR, RCAR, Wafa Gestion, CFG.

- **En 2016**

En partenariat avec Wilmar International et des entreprises locales du port, le groupe Cosumar investit dans une usine de raffinerie de sucre en Arabie Saoudite, dans la ville de Yuban.[5]

IV- Filiales de COSUMAR

La COSUMAR est présente sur tout le territoire marocain à travers ses cinq filiales : [6]

- ✓ **COSUMAR S.A** : la raffinerie de Casablanca et les sucreries de Doukkala
- ✓ **SUNABEL** : le groupe des Sucreries de betterave du Gharb et du Loukkos
- ✓ **SURAC** : les sucreries raffineries de canne
- ✓ **SUCRAFOR** : la sucrerie raffinerie de l'Oriental
- ✓ **SUTA** : la sucrerie de Tadla

Le tableau 1 présente les filiales de la COSUMAR

Tableau 1: Filiales de COSUMAR

Unité	Régions	Matière première	Sucre produit
SURAC	-Gharb	-Canne à sucre	-Brut et blanc
	-Loukkos	-Canne à sucre	-Blanc
SUTA	-TADLA (Souk sebt)	-Betterave sucrière	-Blanc
	-Tadla (OuladAyad)	-Betterave sucrière	-Brut
COSUMAR	-Casablanca	-Sucre brut	-Blanc
	-Doukkala (Sidi Bennour)	-Betterave sucrière	-Blanc
	-Doukkala (Zemamra)	-Betterave sucrière	-Blanc
SUNABEL	-Gharb	-Betterave sucrière	-Brut
	-Loukkos	-Betterave sucrière	-Blanc
SUCRAFOR	-Moulouya	-Betterave sucrière	-Blanc

V- Fiche signalétique de COSUMAR

Les indications générales concernant la COSUMAR sont présentées dans le tableau 2. [7]

Tableau 2: Fiche signalétique de COSUMAR

Nomination sociale de la filiale	COSUMAR
Forme juridique	SA : Société Anonyme
Président Directeur Générale	Mohammed FIKRAT
Siege Social	8. Rue El Mouatamid Ibnou Abbad. BP: 3098. Casablanca
Domaine d'activités	Production en agroalimentaire
Date de constitution	Avril 1929
Capital social	419 105 700 Dirhams
Chiffre d'affaires	8,211 milliards MAD (2019)
Certifications	ISO 9001, OHSAS 18001, ISO 14001, FSSC 22000.
Produit/Services	Pains de sucre, lingots et morceaux et granulés.
Filiales	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cosumar SA ✓ SUTA ✓ SURAC ✓ SUNABEL ✓ SUCRAFOR
Capacité de production	4000 tonnes par jour
Téléphone	0522 67 83 00
Fax	0522 24 10 71
E-mail	contact@cosumar.co.ma
Site internet	http://www.cosumar-ona.com/

VI- Organigramme

L'organigramme général de la société est présenté dans la figure 3 :[3]

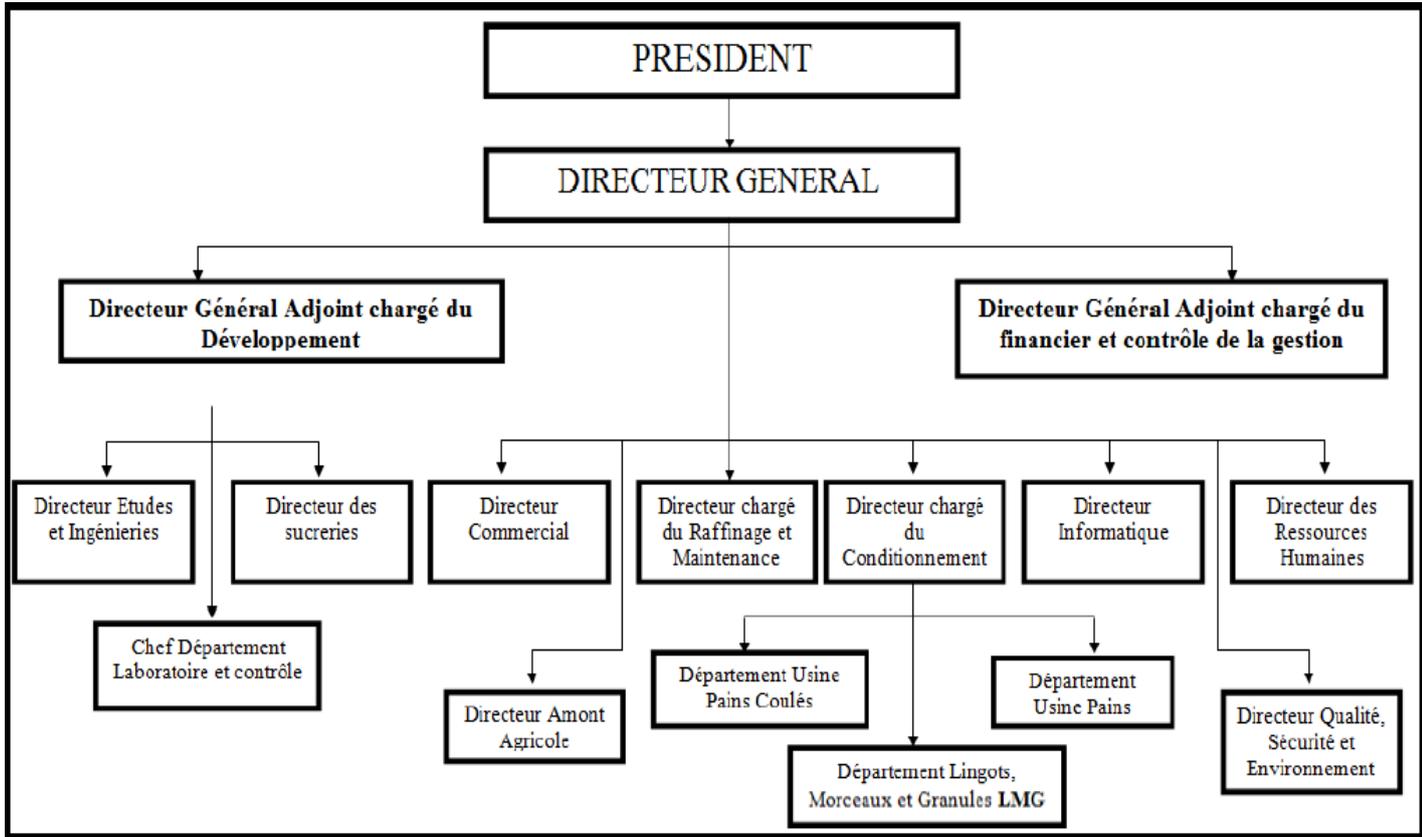


Figure 3: Organigramme de la société

VII- Produits de la société

Cosumar propose à ses clients du sucre blanc sous 4 variétés ainsi que des produits à usage agro-industriel comme indiqué dans le tableau 3.

Tableau 3 : Produits de la société

Pain de sucre	Sucre en lingot	Sucre en morceaux	Sucre granulé	Co-produit : mélasse
				
Conditionné sous forme de pain de 2Kg, ou en carton de 20 Kg et 24 Kg.	Conditionné en boîte d'1 Kg ou regroupées en fardeaux de 5 Kg (5 boîtes de 1 Kg).	Conditionné en boîte d'1 Kg ou regroupées en fardeaux de 5 Kg (5 boîtes de 1 Kg).	Conditionné en sacs de 50 Kg ou en sachet de 1 Kg et 2 Kg.	C'est une mixture résultant du raffinage du sucre servant à l'alimentation de bétail.

VIII- Procédé de raffinage du sucre

La COSUMAR SA a pour but de transformer le sucre brut en sucre raffiné après un certain nombre d'opération consistant à se débarrasser des impuretés externes et internes.

Les principales étapes intervenant lors de la fabrication du sucre au sein de la COSUMAR sont représentées dans la figure 4.

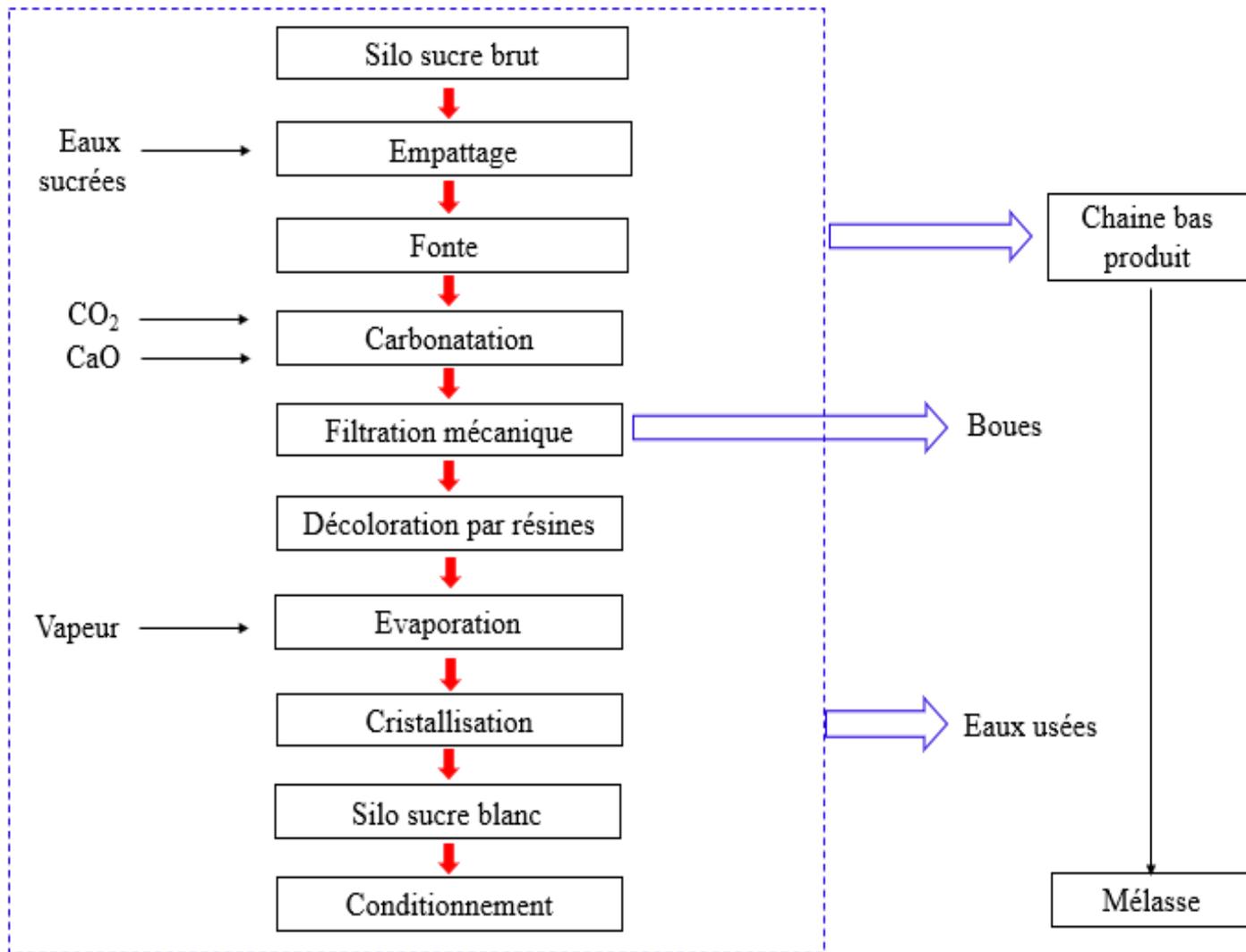


Figure 4: Procédé de raffinage du sucre

1- Réception :

Au Maroc, la majorité du sucre brut est importé du Brésil, de l'Australie ou de l'Afrique du sud. Une fois arrivé à la raffinerie de Casablanca, le camion chargé de sucre brut passe à travers un pont à bascule pour être pesé.

Afin de vérifier la qualité du sucre et les exigences du cahier de charge, plusieurs tests de contrôle sont effectués après le stockage du sucre brut dans des silos d'une capacité totale de 75 000 tonnes.

Grâce à des bandes transporteuses, le sucre brut est acheminé vers la station d'affinage pour commencer le traitement des impuretés.

2- Affinage :

Se déroulant sur 2 phases, cette première étape vise essentiellement la suppression des non sucres et l'élimination des impuretés externes après le passage du sucre brut à travers un tamis pour se débarrasser des grosses particules.

✚ **Empatage** : Comme son nom l'indique, le but ici est de former une pâte nommée « masse cuite d'empatage » avec une concentration de 90-92% à T=50°C.

Dans un empâteur muni d'un système d'agitation et d'une double enveloppe permettant la circulation de la vapeur d'eau, on mélange le sucre brut et de l'eau sucrée avec un degré brix de 72 %, T=70°C.

✚ **Fonte** : Cette opération nécessite l'utilisation de 3 fondoirs afin de dissoudre le sucre empâté dans de l'eau sucrée et de défaire le système cristallin. Le produit obtenu est nommé « fonte commune » ou « commune non carbonatée » qui se caractérise par un brix de 66 % et un pH neutre avec une température T=80°C.

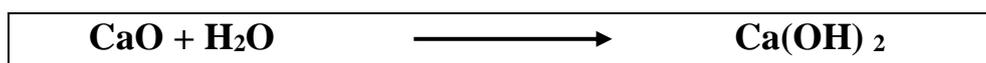
3- Epuration :

Se déroulant également en deux phases, l'objectif de cette clarification consiste à éliminer les impuretés internes en rajoutant des éléments à la fonte afin de rassembler les non sucres et les filtrer par la suite.

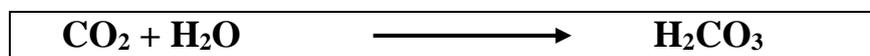
✚ **Carbonatation** : Afin de décolorer le sirop obtenu précédemment et aboutir à une fonte commune carbonatée, on additionne dans une série de 3 chaudières le lait de chaux et de l'acide carbonique, le précipité ainsi formé permet d'adsorber les impuretés restantes et d'éliminer les microorganismes.

L'ensemble des réactions mises en jeu sont les suivantes :

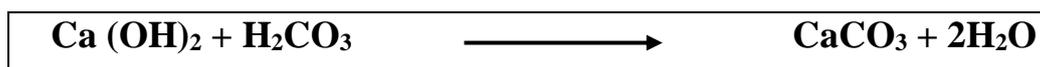
Préparation de la chaux :



Formation de l'acide carbonique :



Formation du précipité de carbonate de calcium :



✚ **Filtration** : Une fois carbonaté, le sirop contenant du carbonate de calcium doit être maintenant filtré. Ceci est donc réalisé à l'aide d'une installation de 6 ou 8 filtres de type Diastar qui permet aux toiles de filtration de faire passer que le sirop et d'accumuler les impuretés et le précipité à l'intérieur. Le filtrat résultant est appelé « commune filtrée ».

4- Décoloration :

La carbonatation et la filtration ne sont jamais suffisantes pour éliminer les matières colorantes de la commune filtrée, c'est pourquoi, on procède à une décoloration du sirop à l'aide de 3 colonnes contenant 2 sortes de résines anioniques :

Une résine noire : à 90% active et jouant le rôle d'adsorbant.

Une résine blanche : avec un pourcentage de 10%, elle joue le rôle de support et protège la crépine.

La décoloration se fait en trois étapes :

- ✓ **La production** : la commune filtrée traverse la première colonne.
- ✓ **La finition** : la commune filtrée achève sa phase de décoloration.
- ✓ **La régénération** : c'est une étape pour régénérer la résine pour une nouvelle décoloration.

5- Evaporation :

L'évaporation se fait à l'aide de chaudières de type CEFT alimentées par la vapeur parvenue du bouilleur. Ces dernières ont pour but de concentrer le sucre et de le préparer à la cristallisation.

6- Cristallisation :

La cristallisation est l'opération qui consiste, à partir d'une solution, à former un solide cristallisé. Cette étape s'effectue dans des appareils à cuire fonctionnant sous vide ce qui nous permet d'obtenir, après évaporation de l'eau, deux produits : « la masse cuite » et « la mélasse ».

7- Séchage, refroidissement et stockage :

Le sucre encore humide est séché dans des sècheurs à tambour puis refroidi par de l'air froid et sec. Le sucre est ensuite stocké dans des silos de sucre blanc puis acheminé dans l'unité de conditionnement grâce à des bandes transporteuses pour être conditionné sous forme de morceaux, lingots ou encore de pain de sucre.

8- Conditionnement :

La fabrication de lingots et de morceaux de sucre à partir de la matière première (sucre granulé) se fait grâce à plusieurs opérations successives et complémentaires : moulage, séchage, refroidissement, mise en boîte et fardelage.

Partie II :
Revue bibliographique

I- Généralités sur le sucre

1- Sucre et plantes saccharifères

Le sucre est un produit alimentaire d'origine végétale qui est composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène.[8]

La synthèse des glucides est due à la photosynthèse qui combine l'action du soleil, du dioxyde de carbone et de l'eau puisée dans le sol.[9]

Deux végétaux seulement renferment un pourcentage élevé de saccharose et sont actuellement exploités industriellement pour en retirer le sucre : ce sont les plantes saccharifères.[10]

1-1- Canne à sucre

La canne à sucre est une graminée vivace qui est cultivée annuellement dans les zones tropicales pour la production du sucre extrait des tiges.[11]

1-2- Betterave

La betterave sucrière est une plante bisannuelle originaire d'Europe centrale qui se développe en deux années :

- La première, correspond à la phase végétative au cours de laquelle on observe la germination de la graine avec constitution de la racine et accumulation de réserves en sucre. C'est aussi la phase de la récolte car c'est à ce moment que le sucre se forme en grande quantité.
- La deuxième année qui correspond à la phase de production des graines. [12]

2- Composition du sucre

Le sucre est un solide inodore au goût sucré dont les principaux constituants sont :

Saccharose : Représenté dans la figure 5, ce disaccharide de formule chimique $C_{12}H_{22}O_{11}$ est composé de deux monosaccharides non réducteurs : le « D-glucose » et le « D-fructose ». [10]

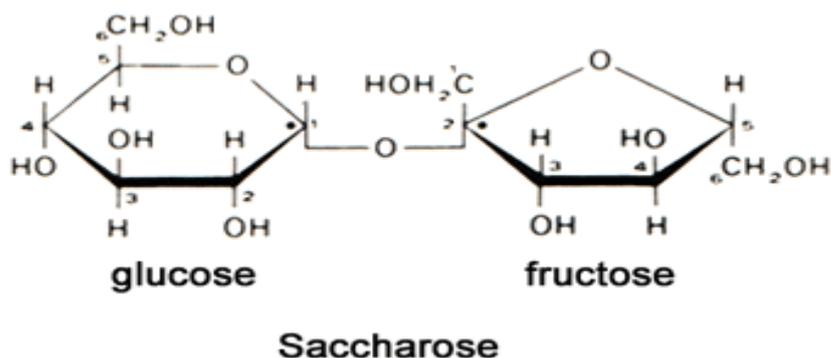


Figure 5 : Molécule de saccharose

Pur, le sucre de table est un solide cristallisé, non réducteur et soluble dans l'eau qui peut être hydrolysé à 35°C par une enzyme nommée « invertase ». [13]

Cendres : Ce sont des matières minérales incluses dans les cristaux du sucre parmi lesquelles on trouve : phosphate, calcium, magnésium, silice, potassium, carbonates, fer, sodium, sulfates...etc.[14]

Sucres réducteurs : Une fois hydrolysé, le saccharose donne des sucres non cristallisables de formule générale $C_6H_{12}O_6$. Ces derniers peuvent agir comme agents réducteurs grâce à la présence de groupes aldéhydes ou de cétones libres.[15]

Non sucres : Il s'agit d'un ensemble d'éléments qui sont autre que le sucre : des acides organiques libres, des micro-organismes, des matières colorantes....[14]

Eau : le sucre renferme un pourcentage d'eau puisque c'est un corps, qui n'est pas déshydraté.

II- Maîtrise statistique des processus

1- Définition de la MSP

La maîtrise statistique des processus (MSP) ou le contrôle statistique des processus est un élément d'assurance qualité dont bases ont été établies, dès 1924 par Walter Shewhart. Cette méthode préventive sert à anticiper sur les mesures à prendre pour améliorer n'importe quel processus de fabrication industrielle grâce à des outils statistiques. [16]

La maîtrise statistique des procédés (MSP) permet de faire la différence entre 2 sources de variabilités :

Les causes « communes ou aléatoires » : sur lesquelles on ne dispose pas de moyens pour les éliminer puisqu'elles sont dues à des variations normales aléatoires du procédé.

Les causes « spéciales ou assignables » : sur lesquelles on dispose des moyens pour les éliminer puisqu'elles sont dues à un dérèglement des paramètres opératoires. Ce deuxième type de causes, nécessite donc d'être corrigé avant que les produits obtenus soient hors tolérance. [17]

2- Objectifs

L'objectif général de MSP est d'améliorer continuellement les processus en réduisant les variations grâce à un suivi graphique temporel basé sur des fondements statistiques.

Une diminution de la variation entraînera : [18]

- Une meilleure qualité
- Diminution des coûts
- Assurance de la stabilité dans le temps
- Prévention des effets de dérèglement et anticipation des problèmes
- Accroissement de la satisfaction de la clientèle
- Amélioration de la production

3- Outils fondamentaux de la MSP

La MSP est une méthode préventive qui s'appuie sur deux outils fondamentaux : [19]

- ✓ Le suivi des processus par des cartes de contrôle
- ✓ Le calcul et l'interprétation des capacités à court terme et à long terme

3-1- Carte de contrôle

3-1-1- Définition

La carte de contrôle est une représentation graphique, qui permet de suivre l'évolution des résultats pour une méthode d'analyse donnée ou encore de visualiser le processus de fabrication dans le temps pour mettre en évidence sa stabilité.

Grâce à cet outil de surveillance, on peut donc déterminer le moment où apparaît une cause assignable entraînant une dérive du processus de fabrication.[20]

La carte de contrôle représentée dans la figure 6 se compose :

- 1: d'une ligne centrale qui correspond à la valeur cible m ou la **moyenne**.
- 2: de deux droites situées à $m \pm 3\sigma$ qui correspondent aux **limites de contrôle**.
- 3: de deux droites situées à $m \pm 2\sigma$ qui correspondent aux **limites de surveillance**.
- 4: de la courbe des résultats individuels obtenus lors des points de contrôle.

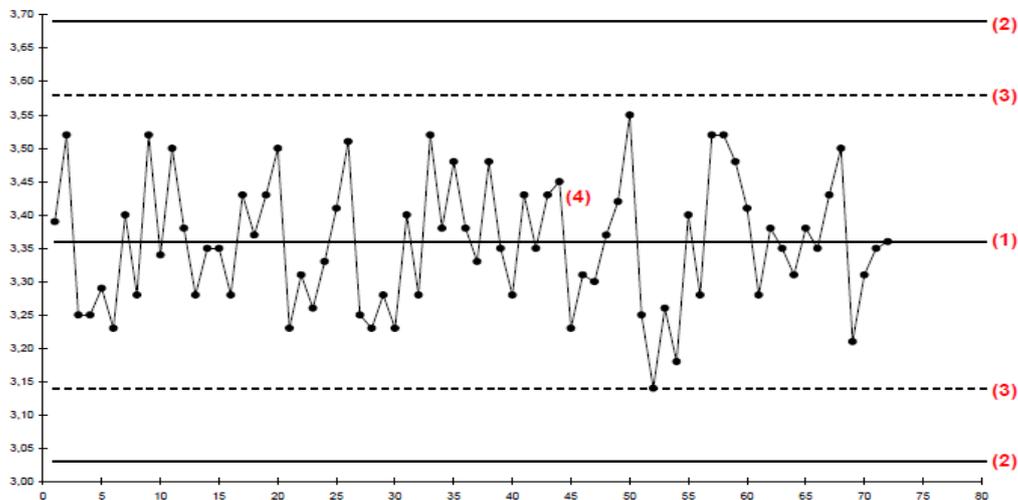


Figure 6: Exemple de carte de contrôle

3-1-2- Objectif

Les cartes de contrôle ont pour objectif de vérifier si un processus est sous contrôle statistique en comparant l'étendue des variations produites et l'intervalle de tolérance établi.[18]

Tant que les points représentant la valeur de la statistique utilisée se trouvent à l'intérieur des limites de spécification, le processus est dit stable ou maîtrisé. Par contre, lorsque des points tombent à l'extérieur des limites de spécification, ceci indique la présence de causes assignables responsables d'un problème au niveau du processus.[21]

3-1-3- Différents types de carte de contrôle

Il existe 2 types de carte de contrôle :

- 1: **Cartes de contrôle aux attributs** : elles sont utilisées lorsque le caractère suivi n'est pas mesurable et donne lieu à un jugement binaire : conforme, non-conforme.

✚ **Cartes de contrôle aux mesures** : elles sont utilisées lorsque le caractère contrôlé est une grandeur mesurable. Deux paramètres indépendants et complémentaires seront alors suivis : La valeur de tendance centrale (Moyenne \bar{X}) et la dispersion (étendue R). Les deux graphiques permettent de suivre l'évolution des caractéristiques mesurées d'un processus dans le temps. Cependant leurs limites de spécifications se calculent différemment. [22]

→ Cartes de contrôle des moyennes : [23]

$$LSI = \text{cible} - A_2 \times \bar{R}$$

$$LSS = \text{cible} + A_2 \times \bar{R}$$

→ Cartes de contrôle des étendues : [23]

$$LSI = D_3 \times \bar{R}$$

$$LSS = D_4 \times \bar{R}$$

Le tableau 4 présente les coefficients A_2 , D_3 , D_4 qui sont fonction de la taille des sous-groupes.[23]

Tableau 4 : Coefficients A_2, D_3, D_4

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A₂	1.88	1.02	0.73	0.58	0.48	0.42	0.37	0.34	0.31
D₃	-	-	-	-	-	0.07	0.14	0.18	0.22
D₄	3.27	2.57	2.28	2.11	2.00	1.92	1.86	1.82	1.78

3-2- Capabilité

La capabilité est un ensemble d'indicateurs qui permettent de vérifier si les résultats de mesure des pièces produites sont inclus dans les tolérances spécifiées.

Cet outil de la capabilité est égale au rapport entre la performance souhaitée et la performance réelle d'un processus.[24]

$$\text{Capabilité} = \frac{\text{Intervalle de tolérance}}{\text{Dispersion}} = \frac{TS - TI}{6\sigma}$$

Avec

- * **Ts** : est la borne supérieure de l'intervalle de tolérance
- * **Ti** : est la borne inférieure de l'intervalle de tolérance
- * **σ (sigma)** : est l'écart type estimé de l'échantillon

La figure 7 montre la différence entre un procédé capable et un procédé non capable. Le premier se caractérise par une population qui se trouve à l'intérieur de l'intervalle de tolérance quant au second, on peut remarquer que les pièces produites sont non conformes puisqu'elles se situent hors les limites de spécification.

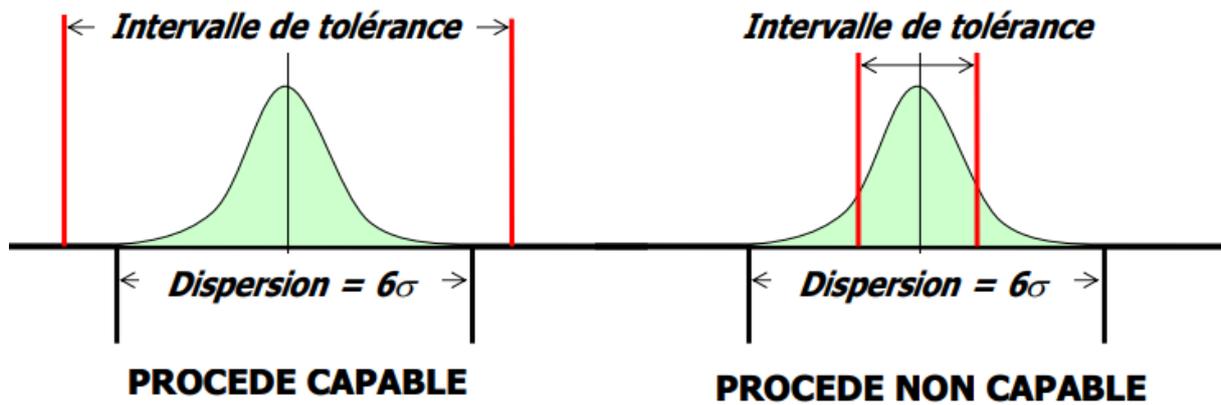


Figure 7: Différence entre un procédé capable et un procédé non capable

On distingue entre deux types de capacité dont la différence provient uniquement de la manière d'estimer la dispersion.[25]

- ✚ **Capacité à court terme Cp** : observée pendant un très court instant. C'est la capacité du moyen de production, c'est-à-dire qu'elle est liée uniquement à la machine.[26]

$$\sigma_{CT} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Avec :

* \bar{R} : est l'étendue

* d_2 : est une constante qui dépend de l'effectif n

- ✚ **La performance du processus Pp** : permet de caractériser l'aptitude du processus à produire de bonnes pièces sur une longue période de temps. Cette capacité à long terme est traduite par une dispersion globale liées aux 5M (moyen, milieu, main d'œuvre, matière et méthode).[26]

$$\sigma_{LT} = \frac{\sum(xi - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Avec :

* x_i : est la valeur de chaque échantillon

* \bar{x} : est la moyenne

* n : est l'effectif

Interprétation de la capacité :

→ La capacité à long-terme, prend en compte plus de sources de variabilité que la capacité à court-terme, ce qui veut dire que :

$$\text{Dispersion à court terme } C_p < \text{Dispersion à long terme } P_p$$

→ Le procédé est dit capable si $P_p > 1$ ou $C_p > 1$ [27]

- ✚ **Les indicateurs de capabilité centrés** : Les indicateurs de dispersion Cp et Pp ne suffisent pas toujours pour juger si le processus est capable car ils ne tiennent pas compte du dérèglement. Autrement dit, malgré un Pp > 1 ou Cp > 1, on peut produire des pièces hors intervalle de tolérance c'est pourquoi, il est donc important d'introduire des indicateurs de capabilité centrés Cpk ou Ppk qui vont permettre de mesurer le décentrage par rapport à la moyenne.[28]

La figure 8 représente un procédé décentré par rapport à la moyenne ce qui nécessite des améliorations pour avoir des indicateurs de capabilité centrés supérieurs à 1 et ainsi régler le problème observé.

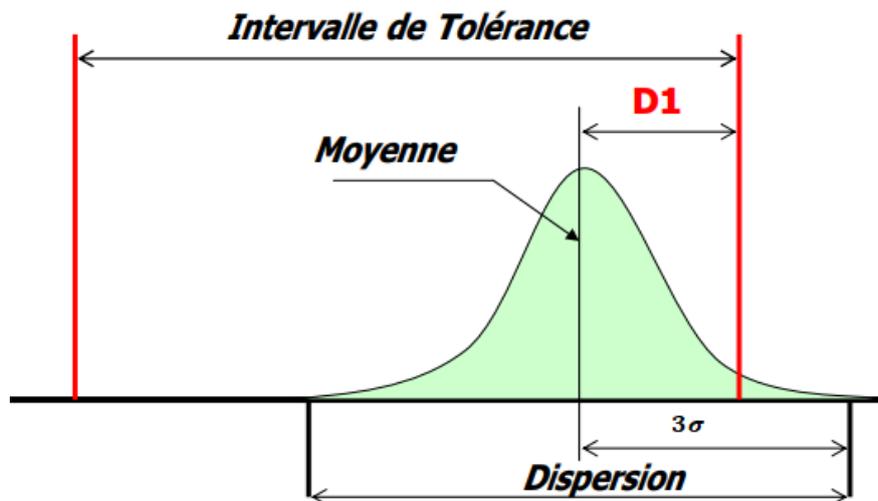


Figure 8: Procédé dérégulé du côté supérieur de la moyenne

Pour calculer ce paramètre, on utilise la relation suivante : [28]

$$Cpk \text{ ou } Ppk = \frac{\text{Distance} \left(\frac{\text{Moyenne}}{\text{la limite la plus proche}} \right)}{\frac{1}{2} \text{ Dispersion court terme du processus}} = \frac{D1}{3\sigma} = \min \left(\frac{TS - \bar{x}}{3\sigma}; \frac{\bar{x} - TI}{3\sigma} \right)$$

→ Le procédé sera capable si Cpk > 1 ou Ppk > 1 (voir annexe I)

III- Démarche DMAIC

La démarche DMAIC est une méthodologie permettant de résoudre les problèmes pour piloter les projets. Afin d'obtenir des résultats fiables, cinq étapes symbolisées par l'acronyme DMAIC sont réalisées : Définir, Mesurer, Analyser, Implémenter et Contrôler.[29]

✚ D pour Définir :

La phase Définir de la méthode DMAIC consiste à formaliser la problématique en fixant les membres et les objectifs du projet. Lors de cette phase, une clarification des enjeux et la

définition du périmètre du projet est également nécessaire grâce à plusieurs outils tels que la charte de projet et le QQQQCP.

M pour Mesurer :

Au cours de cette étape, l'équipe projet est chargée de recueillir les données sur des éléments quantifiables (paramètres ou facteurs externes) du processus afin de mesurer objectivement les performances de ce dernier et de quantifier les problèmes au démarrage du projet.

A pour Analyser :

Cette étape vise à analyser les données obtenues dans la phase précédente et de calculer les écarts entre la situation actuelle et les résultats souhaités. Lors de cette étape, plusieurs séances de brainstorming sont généralement organisées pour déterminer les causes racines responsables de la variabilité du processus.

I pour Implémenter :

Afin d'améliorer le processus et de réduire la variabilité, plusieurs solutions doivent être identifiées, évaluées, validées et mises en application par l'équipe projet.

C pour Contrôler :

Cette dernière étape vise à évaluer le processus afin de s'assurer que la solution mise en place est efficace et que le problème observé précédemment est résolu.

Partie III:

Partie expérimentale

I- Introduction

La station d'épuration qui se trouve au sein de la raffinerie COSUMAR de Casablanca a pour but d'éliminer les impuretés occluses dans le système cristallin qui, après la fonte, se trouvent libres dans le sirop. Puisque cette étape critique influence la pureté et la qualité finale du sucre, il est donc nécessaire de séparer les non sucres du saccharose grâce à deux opérations successives : la carbonatation et la filtration.

II- Objectif

Afin de mesurer la performance des étapes de la carbonatation et de la filtration, différents paramètres ont été contrôlés au niveau du laboratoire.

Ce chapitre comportera donc le résultat des analyses pendant 2 mois (mars 2021 et avril 2021) du brix, du pH et du taux de décoloration de 6 échantillons. Ce suivi s'effectuait quotidiennement pour s'assurer que notre processus est maîtrisé dans le temps.

III- Matériel et méthode

1- Matériel et outils

Au cours de ce projet, nous avons utilisé les logiciels QI macros et Minitab ce qui nous a permis non seulement de calculer la capacité mais également de tracer les cartes de contrôle et de déterminer si le processus est sous contrôle statistique.

2- Méthodes

- ✚ **Mesure du brix** : Le brix indique la fraction de saccharose dans un liquide ce qui veut dire que plus l'échantillon est sucré, plus le brix sera élevé. Afin de mesurer ce paramètre, on utilise un réfractomètre (figure 9) qui indique, la quantité de matière sèche soluble contenue dans le sirop de sucre. La valeur affichée doit être comprise entre 64 et 67 lors du processus d'épuration pour dire que notre commune filtrée est conforme aux exigences de l'entreprise. [3]



Figure 9: Réfractomètre

- ✚ **Mesure du pH** : Le pH est parmi les facteurs qui peuvent influencer le processus d'épuration c'est pourquoi, il doit être contrôlé au niveau des 3 chaudières à l'aide d'un pH mètre (figure 10). Ce paramètre nous renseigne sur la formation et la consommation de carbonate de calcium et doit être maintenu entre 8,2 et 8,7. [3]



Figure 10: pH mètre

- ✚ **Mesure du taux de décoloration :** Ce paramètre peut être mesuré à l'aide d'un spectrophotomètre (figure 11) indiquant la coloration de la fonte commune (FC) et de la coloration de la commune filtrée (CF) et en utilisant la relation suivante : [3]

$$\text{Taux de décoloration} = \frac{\text{col}(FC) - \text{col}(CF)}{\text{col}(FC)} \times 100$$



Figure 11: Spectrophotomètre

IV- Application de la démarche DMAIC

1- Introduction

Dans le but d'améliorer la performance du processus d'épuration, nous avons opté pour la démarche « DMAIC ». Cette méthodologie va nous permettre d'identifier les causes racines de la variabilité afin de les évaluer et de mettre en place les actions les plus appropriées pour les limiter.

Pour ce faire, notre projet sera divisé en plusieurs phases :

Définir, Mesurer, Analyser, Innover et Contrôler

2- Première phase : Définir

Cette première phase consiste à définir de façon précise le périmètre et les objectifs du projet d'amélioration continue en cohérence avec la demande client, ainsi que les ressources et les délais nécessaires. [30]

2-1- Formalisation de la problématique

Afin de cadrer le projet et avoir une idée sur toutes les dimensions du problème, la méthode QQQQCP (tableau 5) pourra être appliquée en répondant successivement à 6 questions : Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?

Tableau 5: Vision du problème en utilisant la méthode QQQQCP

Question	Réponse
Quoi ?	Améliorer la stabilité du processus d'épuration
Qui ?	Par une stagiaire, son encadrant, les opérateurs de la station et les chefs de poste
Où ?	Dans la station d'épuration
Quand ?	Pendant la durée du stage : du 15 mars au 30 juin
Comment ?	En appliquant la démarche DMAIC et le calcul de la MSP
Pourquoi ?	Améliorer la qualité et la stabilité du processus

2-2- Charte du projet

La charte du projet est un document résumé de la phase « Définir » qui est destiné aux décideurs et au comité de pilotage du projet. Cet outil, représenté dans le tableau 6, permet de confirmer officiellement l'existence du projet et de clarifier ses différents points par écrit.

Tableau 6: Charte du projet

Charte de projet	
Nom du projet	Contribution à la maîtrise statistique du processus d'épuration en appliquant la démarche DMAIC.
Produit concerné	La commune filtrée
Objectifs du projet	Le projet a pour objectif de surveiller, par la MSP, le processus d'épuration afin d'améliorer sa performance et réduire la variabilité.
Périmètre du projet	Le projet aura lieu principalement au sein de la station d'épuration.
Equipe du projet	Mlle Nada Basraoui, stagiaire et élève ingénieur en industries agroalimentaires, Monsieur ZAAM, les chefs de postes et les opérateurs.
Contraintes du projet	Les difficultés principales de ce projet : <ul style="list-style-type: none"> • Contraintes de documentation • Contraintes de délai : le non-respect du temps de réalisation de chaque étape de la démarche • Contraintes de coût : Rien à signaler
Résultat du projet	L'élimination de toutes les causes potentielles de la variabilité de processus.

2-3- Planning

Afin de bien mener ce stage, la planification est une tâche fondamentale qui a pour but d'organiser et de maîtriser le déroulement des étapes du projet dans le temps.

Parmi les outils indispensables de la gestion de projet, on trouve le diagramme de GANTT qui permet de déterminer si les objectifs sont réalisés ou dépassés, de suivre et de communiquer l'état d'avancement du projet et enfin d'affecter les ressources aux tâches. [31]

Dans la figure 12, on donne un aperçu sur le diagramme de GANTT réalisé à l'aide du logiciel GANTT Project.

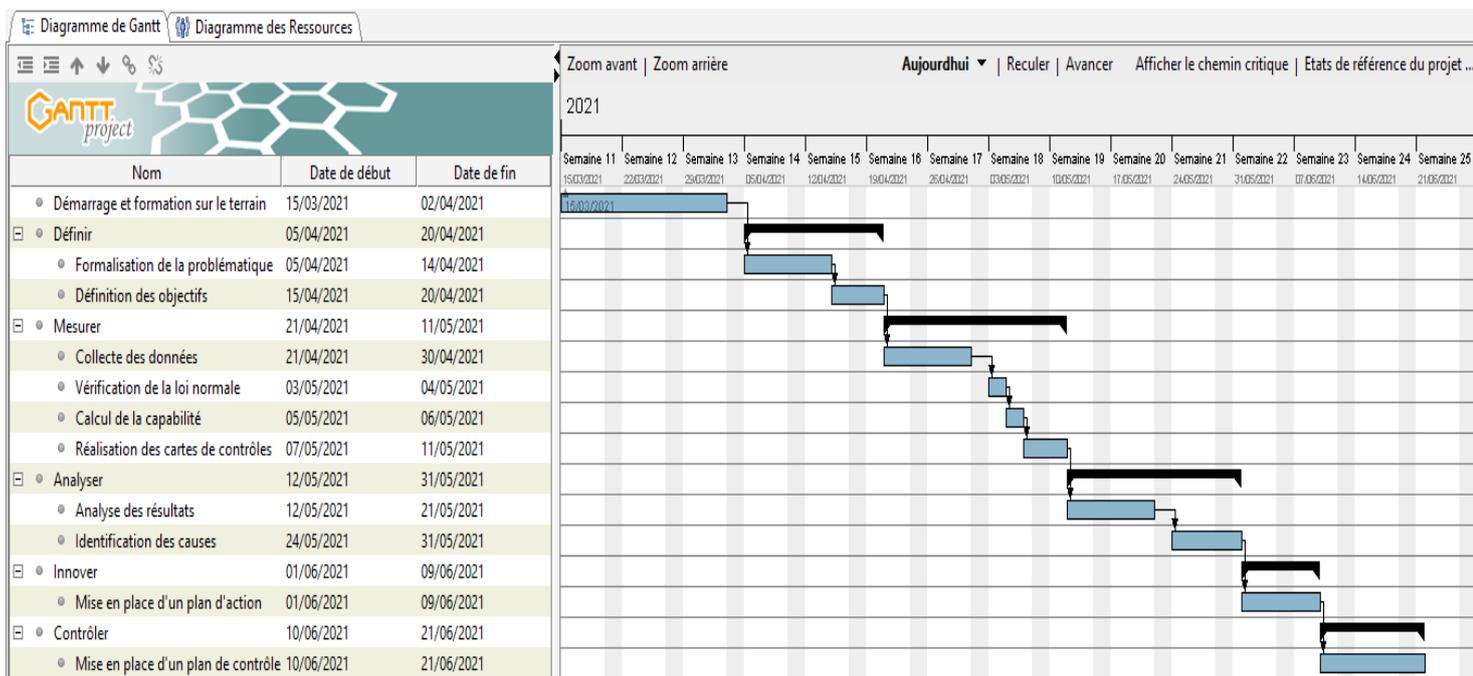


Figure 12: Diagramme de GANTT

3- Deuxième phase : Mesurer

La phase « Mesurer » consiste à collecter les données permettant d'évaluer les performances actuelles du processus et de quantifier les principaux problèmes afin d'appréhender leurs causes racines. [32]

3-1- Résultats du contrôle

Le tableau présenté dans l'annexe II regroupe les données de contrôle des paramètres (brix, pH, taux de décoloration) de la commune filtrée au niveau du processus d'épuration.

A partir de ce suivi, on pourra réaliser la phase « Mesurer » qui se décompose en trois étapes :

- ✓ Un test de normalité de l'échantillon
- ✓ Une mesure de la capabilité des paramètres choisis
- ✓ Une carte de contrôle des moyennes et une carte de contrôle des étendues

Paramètre 1 : Le Brix

a- Vérification de la loi normale

Afin de vérifier la normalité de notre échantillon, un histogramme a été tracé dans le but d'analyser sa distribution.

La figure 13 montre une représentation graphique constituée par des rectangles contigus ayant pour base chacune des classes et une aire proportionnelle à l'effectif de la classe correspondante. D'après l'histogramme et la courbe sous forme de cloche, la distribution du brix de la commune filtrée suit une loi normale.

Pour confirmer cette hypothèse, il fallait utiliser une méthode graphique appelée « la droite d'Henry ». Cette dernière repose sur la relation linéaire qui existe entre les valeurs observées représentées dans l'abscisse x et les valeurs "théoriques de la distribution normale » représentées dans l'ordonnée y. [33]

Puisque le nuage de points de la distribution observée (figure 14) montre que la linéarité est satisfaisante et que le coefficient de détermination $R^2=0,9627 \approx 1$. On peut donc conclure que la loi normale a été vérifiée.

Notons que le R^2 représente le coefficient de détermination. Cet indicateur est très utilisé pour juger la qualité de la régression linéaire. Pour le déterminer, on peut procéder par estimation de son allure graphique ou utiliser la formule mathématique : [34]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}$$

- Avec :**
- * y_i : valeur de la mesure
 - * \hat{y}_i : valeur prédite correspondant à la mesure
 - * \bar{y} : moyenne des mesures

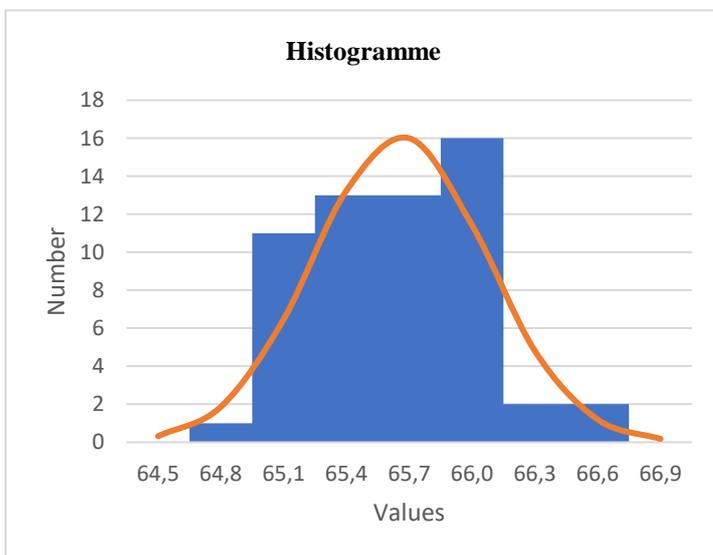


Figure 14: Courbe de distribution du paramètre Brix

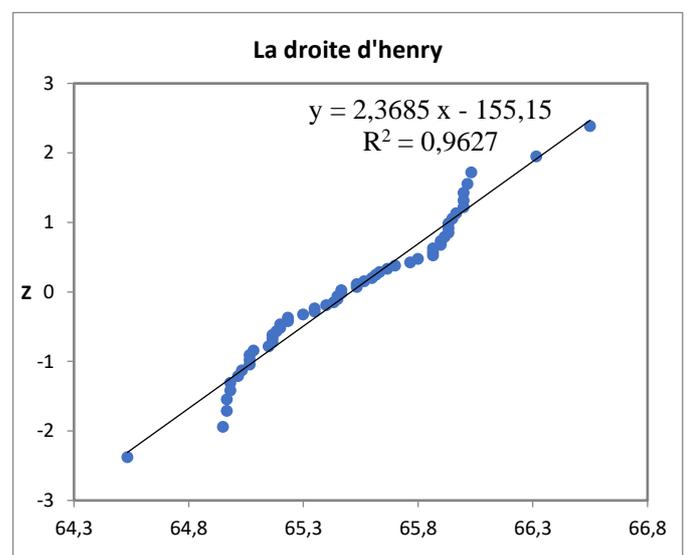


Figure 13: Droite d'Henry du brix

b- Calcul de la capabilité

Afin de calculer et d'interpréter la capabilité, il est obligatoire de déterminer quelques caractéristiques de cette dernière à savoir la limite de spécification inférieure LSI et la limite de spécification supérieure LSS.

Le graphe de la figure 15 représente la courbe de Gauss et le calcul de la capabilité du paramètre ‘brix’ de la commune filtrée.

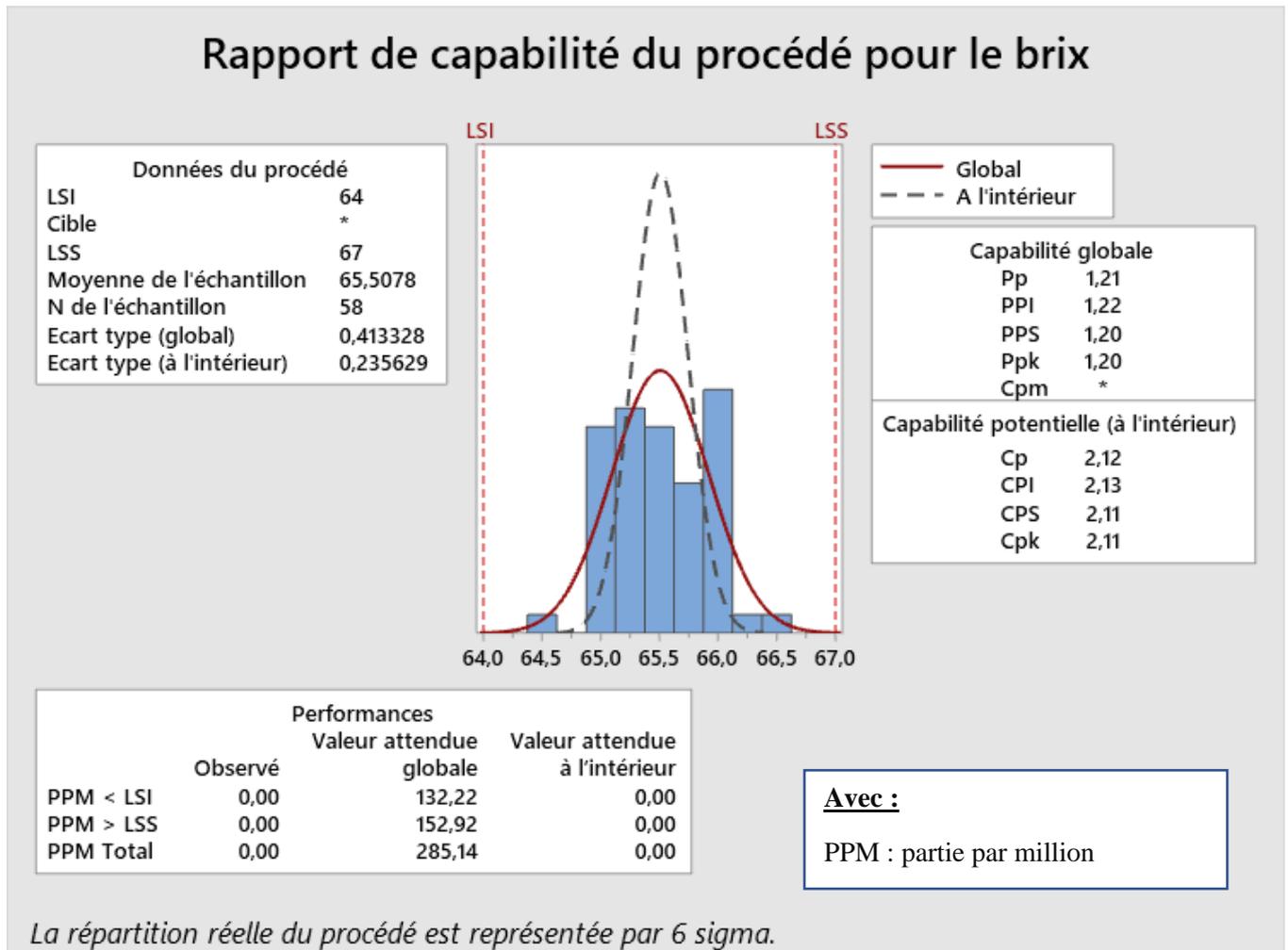


Figure 15: Calcul de la capabilité vis-à-vis du paramètre brix

Interprétation

Un processus est dit capable si ses paramètres de dispersions et de centrage à long terme et à court terme sont supérieurs à 1. Un suivi a été donc réalisé pour interpréter les résultats qui sont résumés dans le tableau 7

Tableau 7: Indicateurs de la capabilité pour le brix

Capabilité à long terme		Capabilité à court terme	
Pp	Ppk	Cp	Cpk
1,21	1,20	2,12	2,11

A partir des indicateurs de la capabilité calculés à l'aide du logiciel Minitab, on peut remarquer que ces derniers sont tous supérieurs à 1 ce qui veut dire que la dispersion et le centrage de l'ensemble des valeurs sont satisfaisants ce qui permet ainsi de garantir un processus capable et fiable dans le temps.

c- Carte de contrôle du Brix

La mise en place des cartes de contrôle en temps réel peut s'avérer utile pour surveiller le déroulement du processus d'épuration et anticiper la survenue de problèmes.

→ Carte de contrôle des moyennes

Avant de tracer les cartes de contrôle relatives au paramètre " Brix", il est nécessaire de calculer la limite de spécification inférieure LSI et la limite de spécification supérieure LSS en utilisant les relations suivantes :

$$LSI = \text{cible} - A_2 \times \bar{R}$$

$$LSS = \text{cible} + A_2 \times \bar{R}$$

Avec $A_2=0.483$ relevé à partir du tableau 4

Les résultats de ce calcul sont regroupés dans le tableau 8

Tableau 8: Limites de spécification de la carte de contrôle des moyennes du brix

Carte de contrôle des moyennes		
LSI =64,9	$\bar{X}=65,5$	LSS =66,1

La figure 16 représente la carte de contrôle des moyennes avec des limites de spécifications comprises entre 64,9 et 66,1. Après le suivi des résultats durant une période de 2 mois (mars 2021 et avril 2021), on a remarqué que tous les points se trouvent à l'intérieur des limites de contrôle à l'exception du 14^{ème}, 15^{ème} et 48^{ème} jour qui sont régulièrement dispersées de part et d'autre de la valeur cible.

Cependant cette dispersion est acceptable tant qu'elle reste inférieure ou égale à trois écarts-types ce qui montre que le processus d'épuration est sous contrôle statistique vis-à-vis du paramètre « brix ».

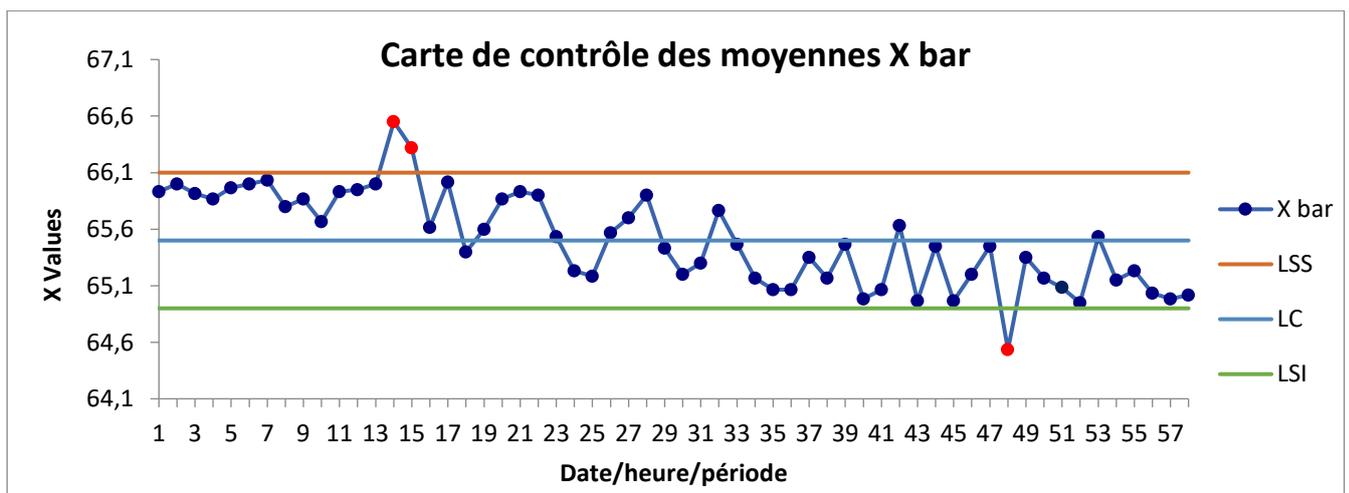


Figure 16: Carte de contrôle des moyennes du brix

→ Carte de contrôle des étendues

Dans cette carte, on trace le graphique représentant les étendues de chaque jour, ainsi que les limites de spécification regroupées dans le tableau 9. [35]

Tableau 9: Limites de spécification des étendues du brix

Carte de contrôle des étendues		
LSI=0,0	$\bar{X}=1,2$	LSS=2,4

Avec :

$$LSI = D_3 \times \bar{R}$$

$$LSS = D_4 \times \bar{R}$$

D3=0 et D4=2,004

Au niveau de la carte de l'étendue illustrée par la figure 17, la dispersion se montre appropriée car tous les points sont à l'intérieur des limites de contrôle et ne présentent aucune anomalie. Le processus est donc sous contrôle statistique.

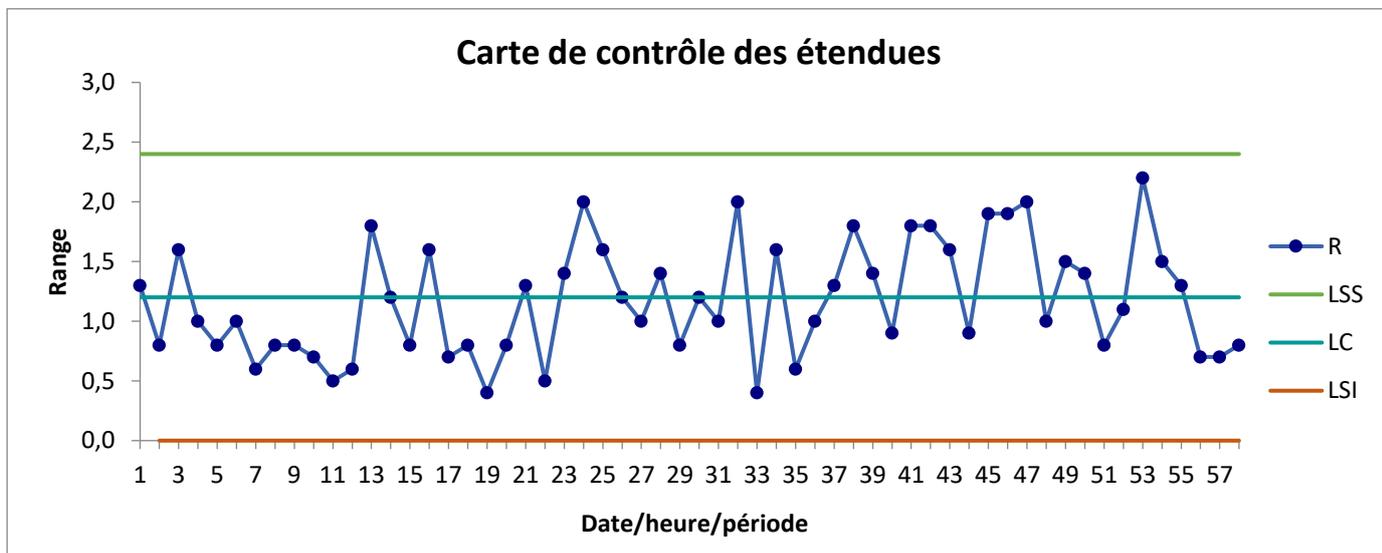


Figure 17: Carte de contrôle des étendues du brix

Paramètre 2 : Le pH

a- Vérification de la loi normale

Dans le cas du paramètre « pH », histogramme de la figure 18 nous a permis de visualiser rapidement la distribution de l'ensemble des données et la dispersion par rapport aux tolérances. On peut dire alors que la répartition des valeurs suit une loi normale puisque la représentation graphique apparaît sous forme d'une courbe gaussienne.

L'histogramme tracé dans la figure 18 ne représente qu'une première approche, il ne constitue en aucun cas un test de « normalité ». Pour cela, on a représenté dans la figure 19 un second outil nommé « droite d'Henry » qui confirme que la distribution est proche d'une loi normale car les points sont plus au moins alignés et le coefficient de détermination $R^2 = 0,9325 \approx 1$.

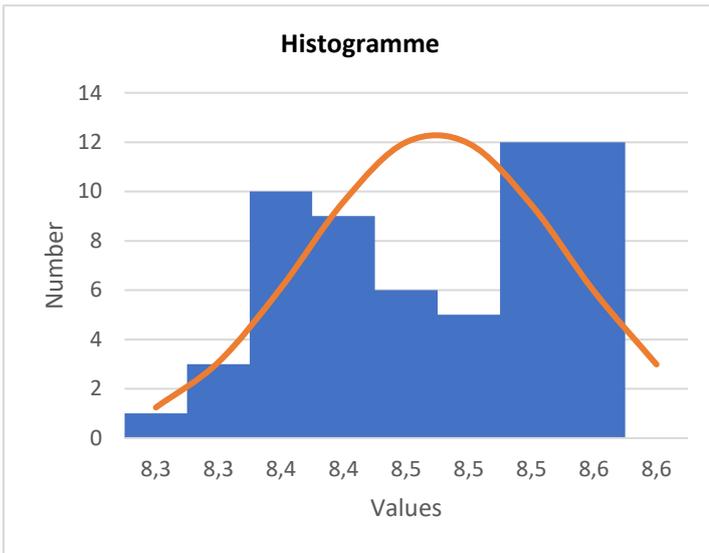


Figure 18: Courbe de distribution du paramètre pH

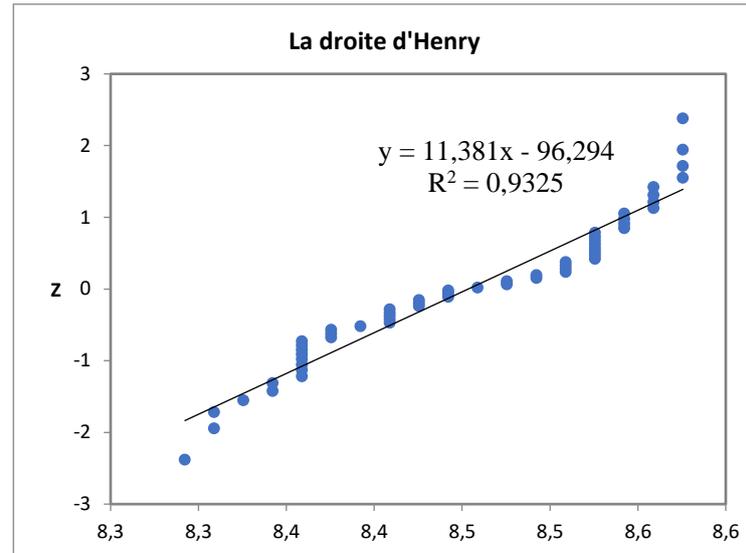


Figure 19: Droite d'Henry du pH

b- Calcul de la capacité

Le deuxième paramètre pouvant influencer sur le processus d'épuration est le pH. La représentation graphique de la figure 20 montre la courbe de Gauss et le rapport de capacité de ce facteur.

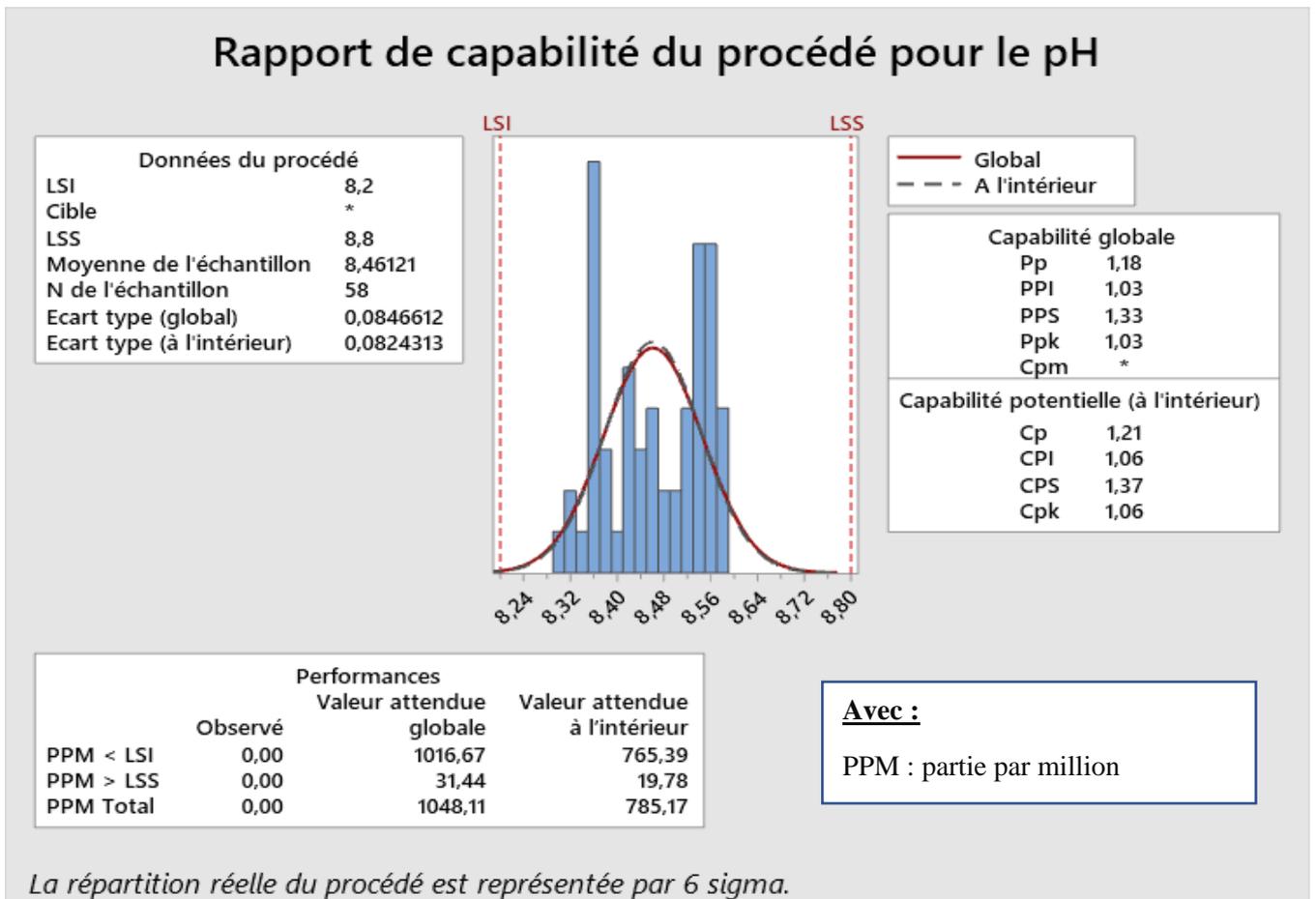


Figure 20: Calcul de la capacité vis-à-vis du paramètre pH

Interprétation

La capacité est un ensemble d'indicateurs qui permettent de vérifier si les résultats des mesures sont inclus dans les limites de tolérance.

Le tableau 10 permet de résumer ces coefficients :

Tableau 10: Indicateurs de la capacité pour le pH

Capabilité à long terme		Capabilité à court terme	
Pp	Ppk	Cp	Cpk
1,18	1,03	1,21	1,06

D'après les résultats obtenus, on remarque que les indicateurs de capacité simple et les indicateurs de capacité centré sont satisfaisants et traduisent non seulement une bonne dispersion de l'ensemble des valeurs gravimétriques mais présentent également un bon centrage que ce soit à long terme ($Pp=1,18 >1$, $Ppk=1,06 >1$) ou à court terme ($Cp=1,21 >1$, $Cpk=1,06 >1$). Le processus d'épuration est donc capable vis-à-vis du paramètre « pH » ce qui permet de produire une commune filtrée respectant les exigences de l'entreprise.

c- Cartes de contrôle

Les cartes de contrôle relatives aux moyennes et aux étendues sont parmi les outils fondamentaux de la MSP. Grâce à ces représentations graphiques, on pourra se débarrasser des causes assignables et réduire les causes aléatoires.

→ Carte de contrôle des moyennes

Afin de suivre l'évolution de la moyenne d'un procédé de production, une carte de contrôle des moyennes a été tracée et ses limites de spécification sont résumées dans le tableau 11.

Tableau 11: Limites de spécification des moyennes du pH

Carte de contrôle des moyennes		
LSI=8.3	$\bar{X}=8.5$	LSS= 8.6

La figure 21 représentant la carte de contrôle des moyennes montre que tous les points se situent à l'intérieur des limites de tolérance : $LSS=8,6$ et $LSI=8,3$. Le processus est donc sous contrôle statistique pour le paramètre « pH » et ne nécessite pas de réglage ou de corrections à envisager.

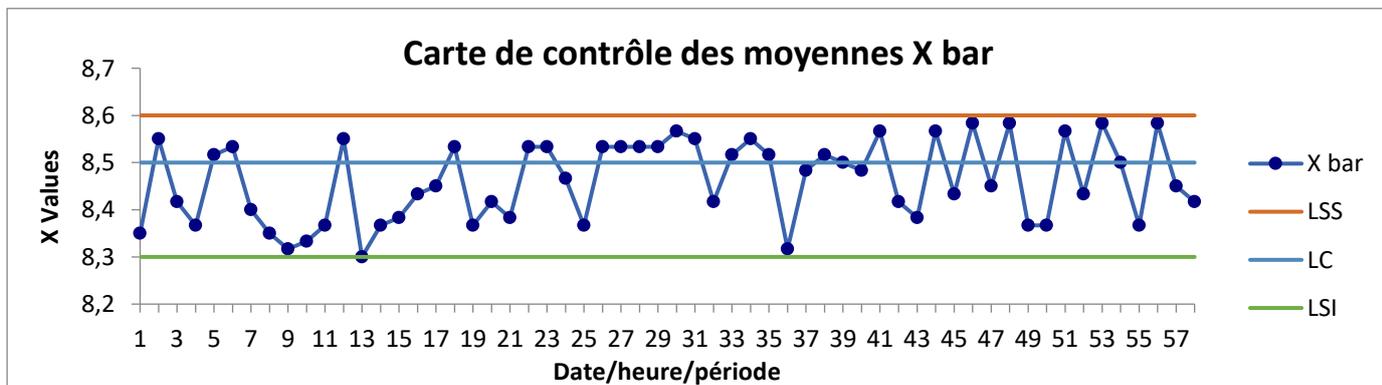


Figure 21: Carte de contrôle des moyennes du pH

→ Carte de contrôle des étendues

Cette carte de contrôle est tracée à partir d'un ensemble de points successifs représentant l'étendue des échantillons prélevés à intervalles réguliers et le résultat du calcul des limites de spécification est regroupé dans le tableau 12. [36]

Tableau 12: Limites de spécification des étendues du pH

Carte de contrôle des étendues		
LSI=0.0	$\bar{X}=0.3$	LSS=0.6

En se référant à la carte de contrôle des étendues (figure 22) dont l'intervalle de tolérance se situe entre 0.6 et 0,0 nous avons remarqué que les points se trouvent à l'intérieur des limites de contrôle ce qui veut dire que le processus est stable dans le temps.

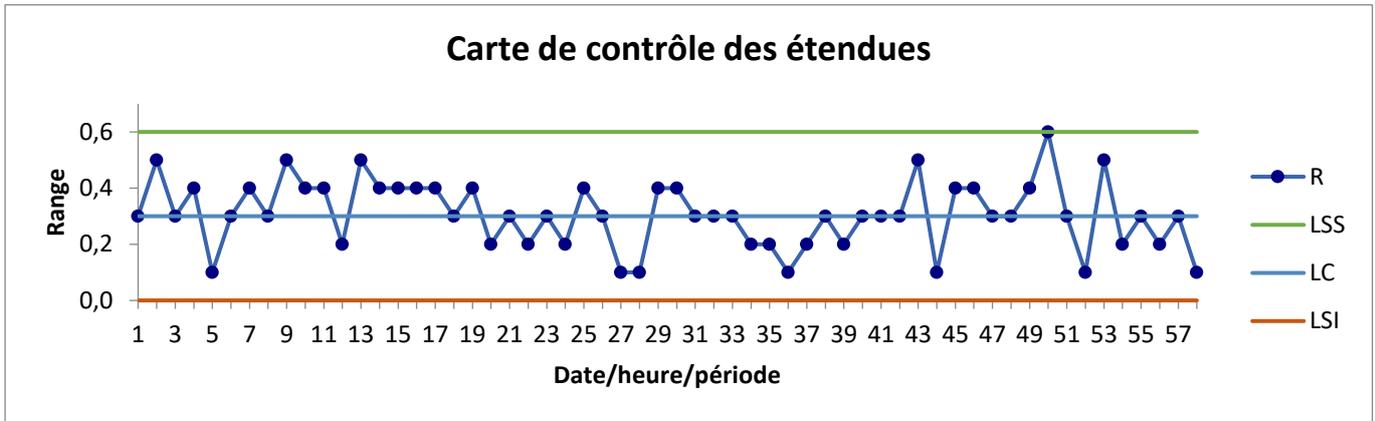


Figure 22: Carte de contrôle des étendues du pH

Paramètre 3 : Le taux de décoloration

a- Vérification de la loi normale

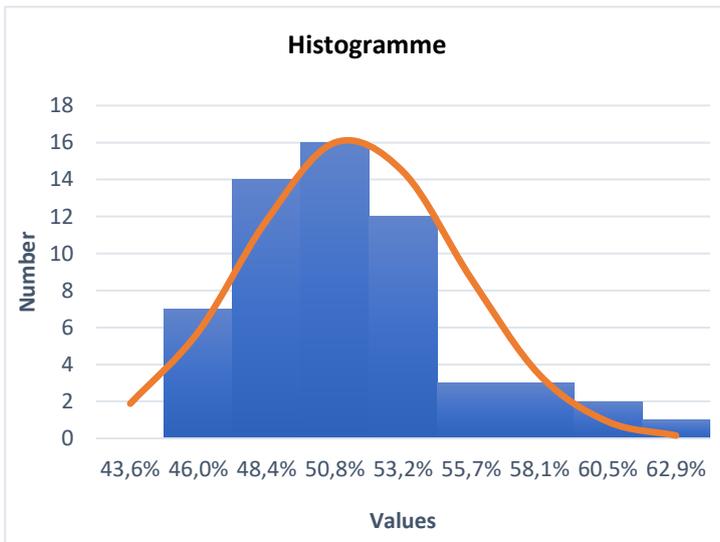


Figure 23: Courbe de distribution du paramètre taux de décoloration

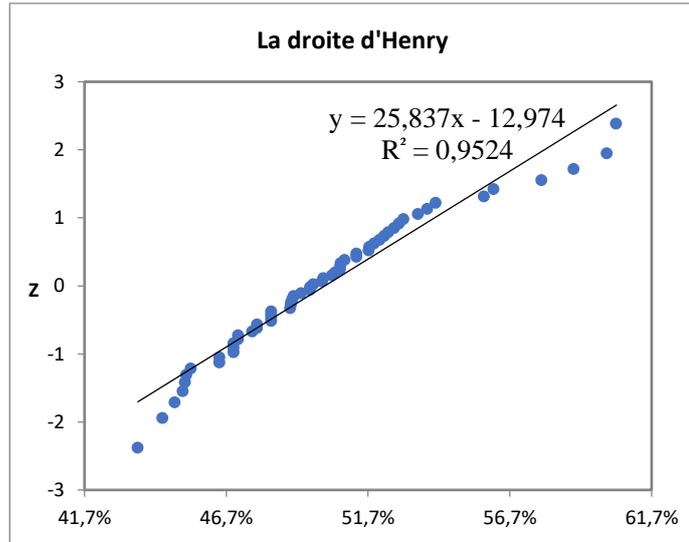


Figure 24: Droite d'Henry du taux de décoloration

Dans la figure 23 et la figure 24 sont présentées respectivement l’histogramme et la droite d’Henry relatifs au taux de décoloration. Rappelons qu’un histogramme est un outil graphique qui permet de représenter la répartition d’une variable continue avec des colonnes verticales. Dans le cas de ce troisième paramètre, ce dernier suit la loi normale car la courbe est sous forme d’une cloche.

Quant au nuage de points, on remarque qu’ils sont proches de la droite d’Henry dont les caractéristiques sont : $y=25,837x-12,974$ et $R^2=0,9524 \approx 1$.

A partir de cette analyse, on peut accepter la normalité de l’échantillon et dire que la loi normale est confirmée.

b- Calcul de la capabilité

Le taux de décoloration de la commune filtrée ne doit pas être supérieur à un pourcentage de 45% pour satisfaire les exigences de l’entreprise. [3]

Le graphe de la figure 25 apparaît sous forme de courbe de Gauss et montre le calcul de la capabilité de ce paramètre.

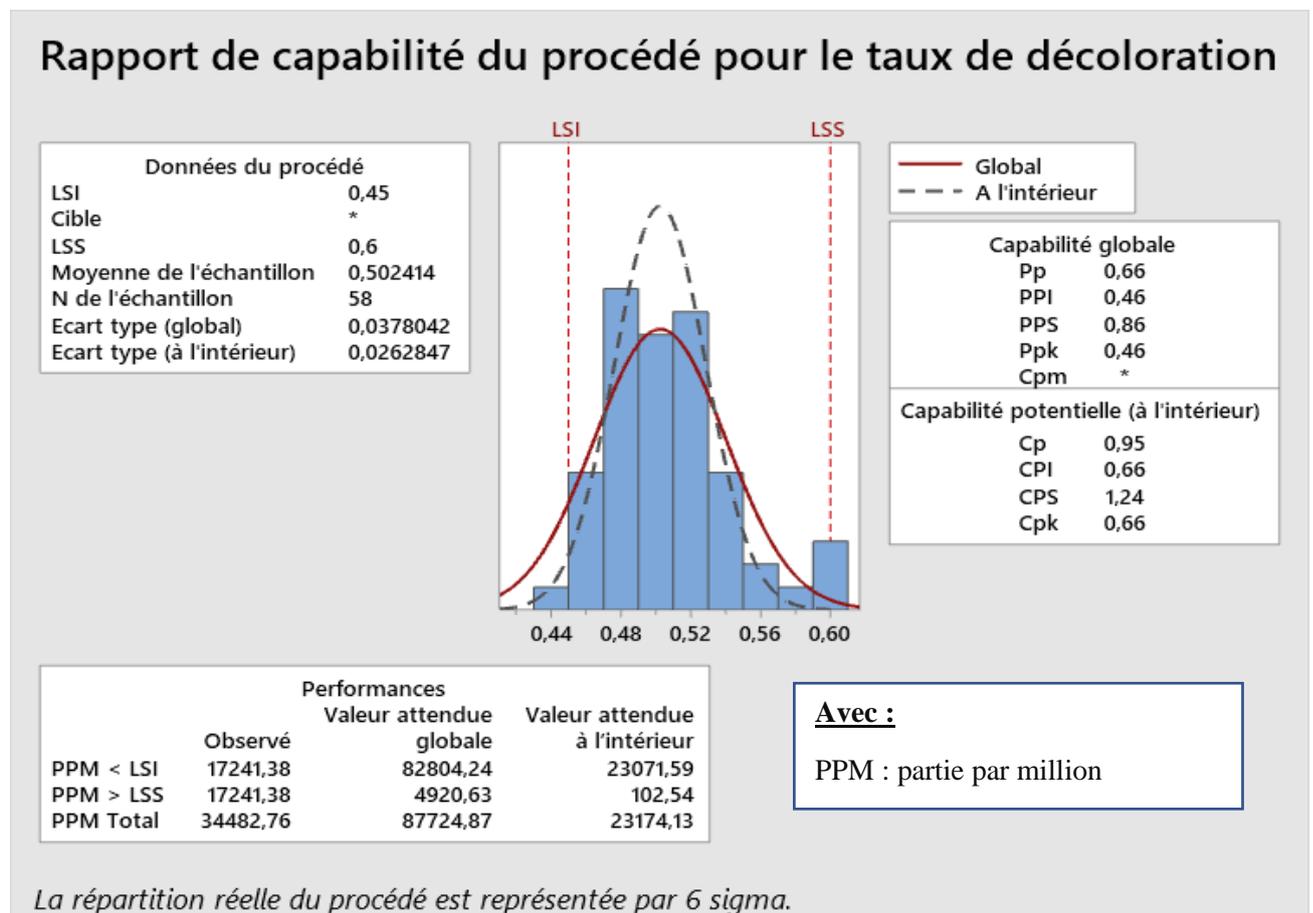


Figure 25: Calcul de la capabilité vis-à-vis du paramètre taux de décoloration

Interprétation

Le tableau 13 permet de résumer les paramètres de cette capabilité calculés à l’aide du logiciel Minitab.

Tableau 13: Indicateurs de la capacité pour le taux de décoloration

Capabilité à long terme		Capabilité à court terme	
Pp	Ppk	Cp	Cpk
0.66	0.46	0.95	0.66

Plusieurs indices d'aptitude ont été calculés (tableau 13) pour étudier la distribution qui doit se situer à un intervalle de tolérance compris entre 45% et 60%. On remarque d'après les résultats obtenus que les quatre paramètres de la capacité sont inférieurs à 1 traduisant l'existence d'une cause spéciale nécessitant un réglage par l'opérateur. Nous pouvons en conclure alors que le processus d'épuration n'est pas capable vis-à-vis de cette caractéristique. [3]

c- Carte de contrôle du taux de décoloration

Les cartes de contrôle visent à déterminer le moment où apparaît une cause particulière de variation d'une caractéristique, entraînant ainsi une altération du processus.[37]

→ Cartes de contrôle des moyennes

Grâce à cette carte, on pourra suivre l'évolution de la valeur moyenne du « taux de décoloration » après la représentation des moyennes des échantillon et le calcul des limites de spécification résumé dans le tableau 14. [38]

Tableau 14: Limites de spécification des moyennes du taux de décoloration

Carte de contrôle des moyennes		
LSI=47%	$\bar{X}=50\%$	LSS=54%

Dans la carte de contrôle des moyennes (figure 26), la présence de quelques points au-delà de l'une ou de l'autre des limites de contrôle constitue une preuve évidente de la non-maîtrise du paramètre « taux de décoloration ». Ce problème nécessite alors une analyse immédiate pour chercher les causes assignables responsables des valeurs extrêmes observées.

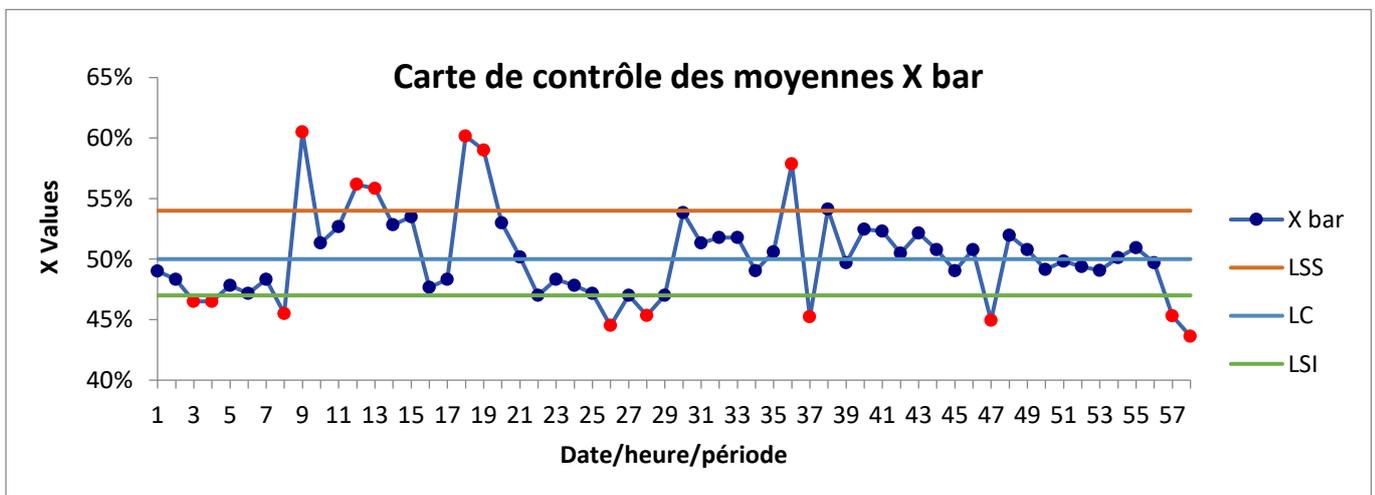


Figure 26: Carte de contrôle des moyennes du taux de décoloration

→ Carte de contrôle des étendues

Dans cette représentation graphique, les étendues d'échantillons sont tracées afin de contrôler la dispersion d'une variable. Le tableau 15 regroupe les limites de spécification du paramètre « taux de décoloration » [39]

Tableau 15: Limites de spécification des étendues du taux de décoloration

Carte de contrôle des étendues		
LSI=0.0%	$\bar{X}=8\%$	LSS=16%

Au niveau de la carte de des étendues (figure 27), il existe un ensemble de points qui se trouvent au-delà des limites de spécifications et qui sont dispersées de part et d'autre de la valeur cible. De là, nous pouvons conclure que le processus nécessite un réglage.

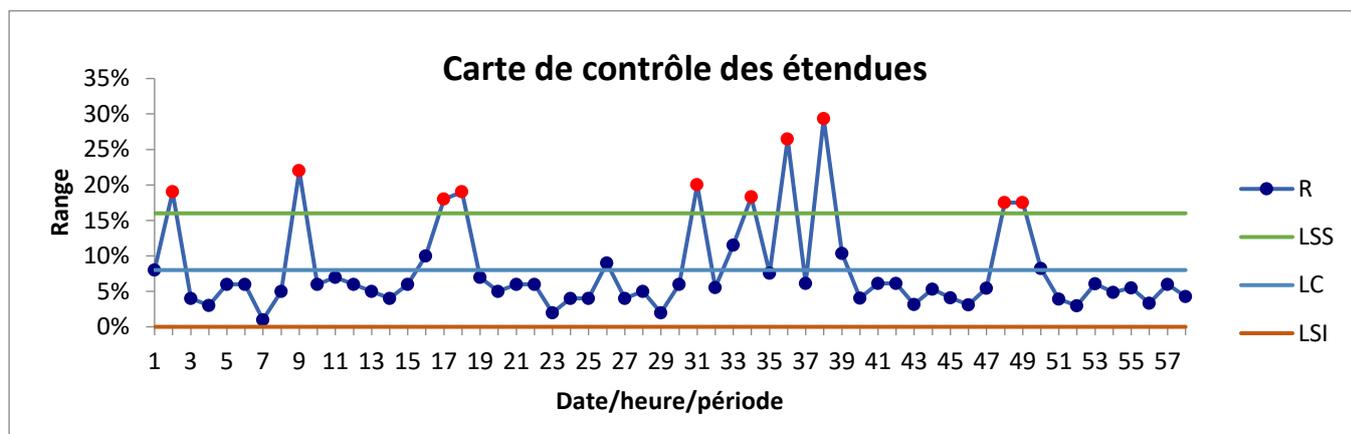


Figure 27: Carte de contrôle des étendues du taux de décoloration

4- Troisième phase : Analyser

L'objectif de cette phase consiste à analyser l'écart existant entre la situation réelle et les objectifs fixés afin d'identifier la cause principale du problème

Le tableau 16 résume les interprétations concernant les différents paramètres étudiés précédemment.

Tableau 16: Interprétation de la capacité

Paramètres	Cp	Cpk	Interprétations
Brix	1,12	2,11	Processus capable
pH	1,21	1,06	Processus capable
Taux de décoloration	0,95	0,66	Processus non capable avec une nécessité de réglage

Après l'analyse des paramètres de capacités Cp et Cpk et les cartes de contrôles, on peut dire que le processus d'épuration n'est pas capable vis-à-vis du paramètre « taux décoloration ».

Afin de faire face à ce problème, un plan d'action doit être mis en place après planification d'une séance de brainstorming. Cette dernière vise à former un groupe de travail composé de stagiaires, opérateurs et chefs de postes pour trouver les principales causes qui peuvent être à l'origine de cette diminution du taux de décoloration.

À partir d'une analyse profonde sur le terrain, un diagramme d'ISHIKIWA (figure 28) résumant les causes racines a été effectué comme suit :

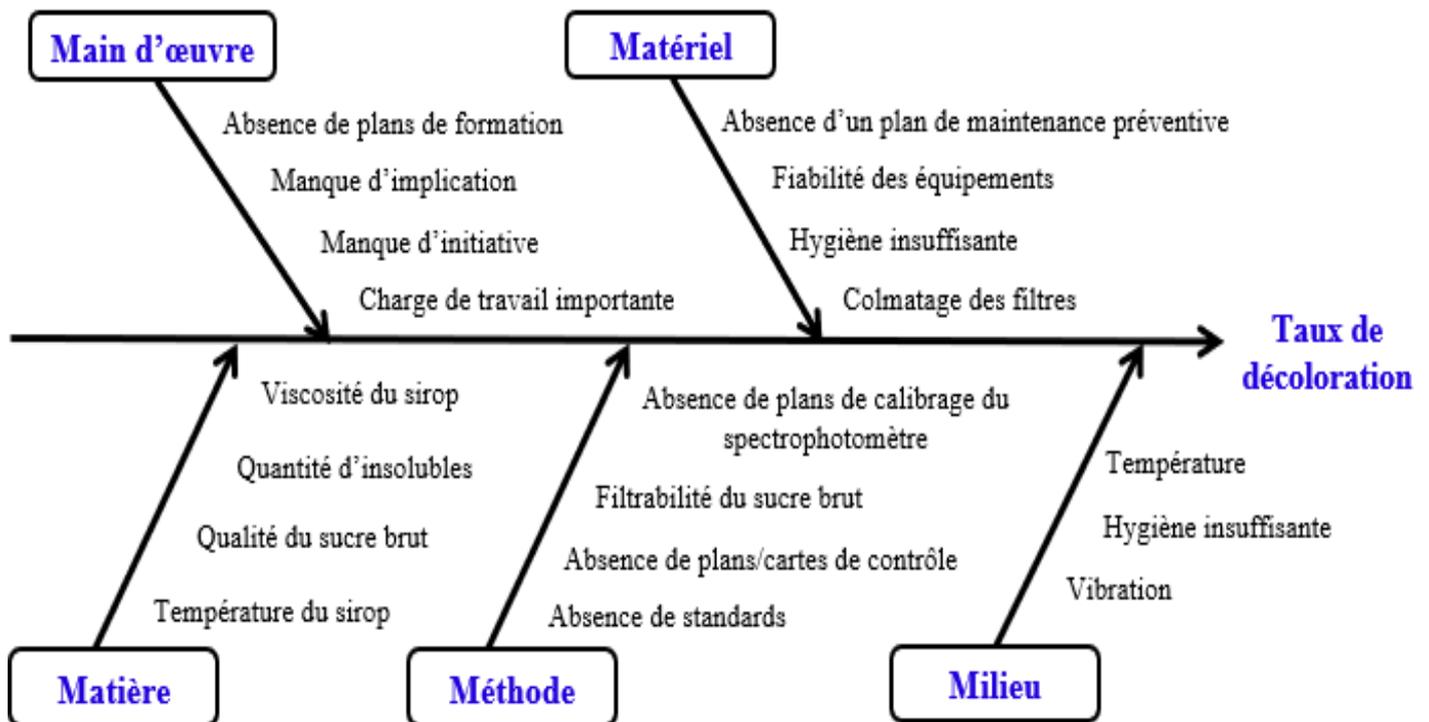


Figure 28: Diagramme des 5 M

5- Quatrième phase : Innover

Après avoir collecté les causes qui pourraient être derrière la diminution du taux de décoloration, il est alors nécessaire de passer à la phase de résolution du problème qui consiste à établir un ensemble de solutions amélioratrices basées sur les résultats de l'analyse menée précédemment.

Une seconde séance de brainstorming a été donc organisée avec l'équipe du projet afin de proposer et de noter les solutions selon un ensemble de critères (faisabilité, coût, délai de réalisation et efficacité)

Les notes attribuées pour juger le degré de satisfaction des solutions proposées sont regroupées dans le tableau 17

Avec

- ✓ Note 1 : insatisfaisant
- ✓ Note 2 : satisfaisant
- ✓ Note 3 : très satisfaisant

Tableau 17: Solutions proposées et leurs notes globales

Cause	Solution proposée	Faisabilité	Coût	Délai de réalisation	Efficacité	Note globale
Milieu	Garantir une meilleure climatisation du milieu	2	1	1	3	7
	Installer des anti-poussières	3	1	3	2	9
Méthodes	Etablir des standards grâce à des SOP	3	3	2	1	9
	Elaborer un plan de maintenance préventive	3	3	2	3	11
Main d'œuvre	Motiver les opérateurs	2	2	1	3	8
	Impliquer les opérateurs aux décisions	1	3	3	2	9
	Former les opérateurs	3	1	3	3	10
Matière	Exiger un contrôle de la matière dès son arrivée	3	2	1	3	9
	Augmenter le nombre des échantillons contrôlés	1	2	1	3	7
Machine	Changer les machines périodiquement	1	1	1	3	6
	Augmenter la fréquence des contrôles préventifs	1	2	2	3	8
	Contrôler les instruments de mesures	3	3	2	2	10

Ayant obtenu un score maximal de 11, la solution retenue est l'élaboration d'un plan de maintenance préventive.

Également appelé plan de maintenance technique PMT, ce dernier est un document synthétisant les équipements techniques de l'entreprise, les opérations de maintenance associées, la périodicité de l'entretien et la durée estimée pour la réalisation de chaque tâche. Ceci permettra donc d'améliorer non seulement la fiabilité et le rendement du matériel mais d'assurer également la qualité des produits fabriqués.

La COSUMAR, est une grande société spécialisée dans la fabrication, le raffinage et le conditionnement du sucre. Avant de mettre à jour ses plans de maintenance préventive, il faudra tout d'abord préciser le périmètre d'intervention, pour distinguer le système responsable du problème trouvé précédemment.

Sachant que la diminution du taux de décoloration a été observée au niveau de la commune filtrée, on pourrait penser que ceci est dû au manque d'efficacité des filtres utilisés lors du processus d'épuration.

Pour confirmer cette hypothèse, une étude de corrélation a été réalisée pendant le mois de mai 2021 entre 3 paramètres à savoir : le taux de décoloration, la pureté et la matière en suspension (voir annexe III)

D'après le tableau 18, on peut remarquer qu'il existe :

- Une forte corrélation positive entre la pureté et le taux de décoloration. (R= 0.85)
- Une forte corrélation négative entre le taux de décoloration et la MES. (R= -0.89)

Cette étude nous permet donc de conclure que plus la matière en suspension de la commune filtrée se trouve en grande quantité, plus la pureté et le taux de décoloration diminuent.

Tableau 18: Etude de la corrélation

	TD	Pureté	MES
TD	1		
Pureté	0,84522427	1	
MES	-0,88579829	-0,65506941	1

D'après cette analyse, on peut dire qu'il existe un problème lors de la filtration du sirop ce qui permet de laisser passer un grand pourcentage de MES et ainsi causer une diminution au niveau des deux paramètres : « pureté » et « taux de décoloration ».

L'hypothèse précédente a donc été confirmée ce qui veut dire que le plan de maintenance préventive sera donc établi au niveau des filtres de la station d'épuration en utilisant l'outil AMDEC (tableau 19).

L'analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leurs criticités est une méthode d'analyse préventive qui va identifier les causes potentielles de défaillance avant qu'ils ne surviennent en apportant des actions correctives ou préventives .[40]

Afin de classer les résultats obtenus à partir de cette analyse, on utilise une grille d'évaluation qui va permettre d'évaluer la criticité des modes de défaillance en se basant sur trois paramètres :

- **O : occurrence des défaillances** ou fréquence d'apparition de la cause
- **G : gravité des défaillances** ou sévérité de l'effet du défaut ou de la défaillance
- **D : détection** ou la probabilité de non détection de la cause.

Une fois ces paramètres déterminés, une note de criticité sera attribuée en utilisant la relation :

$$C : \text{Criticité} = \text{Gravité} \times \text{Occurrence} \times \text{Détection} \text{ [41]}$$

Cet outil de résolution de problème va nous permettre de dégager des actions préventives à prendre en compte et les associer avec les périodicités convenables lors de l'élaboration du plan de maintenance préventive .[42]

Tableau 19: AMDEC sur la filtration du jus carbonaté

Opération	Mode d'une défaillance potentielle	Effet de la défaillance	Causes possibles de la défaillance	Evaluation				Actions préventives et correctives
				G	O	D	C	
Filtration du jus carbonaté	Qualité des filtres	Eclatement	Mauvaise qualité des filtres	4	1	4	16	-Changement des filtres -Vérification de l'état des filtres chaque mois
		Diminution du taux de décoloration	Colmatage des filtres	3	2	2	12	-Nettoyage -Etude du seuil de rétention
			Nettoyage non fiable	2	3	2	12	-Entretien des filtres

Le plan de maintenance préventive des filtres que nous avons proposé pour améliorer les performances de la maintenance se trouve dans l'annexe IV

6- Cinquième phase : Contrôler

La phase innover nous a permis de dégager plusieurs solutions afin de réduire la variabilité du processus, il faut désormais tout mettre en œuvre pour garantir que ces améliorations soient maintenues.

L'objectif de cette étape est donc d'assurer le suivi et le pilotage des processus pour évaluer à nouveau sa stabilité suite aux modifications apportées.

6-1- Plan de contrôle

Afin de suivre en temps réel le processus d'épuration et de détecter ses dérives, la mise en place d'un plan de contrôle a été établi. Ce dernier permet l'élaboration automatique des cartes de contrôle et le calcul de la capacité après identification des données d'échantillonnage.

Devant une carte de contrôle, il est important que les décisions soient prises en se basant sur des règles d'interprétations (voir annexe V) pour déterminer si notre processus est stable dans le temps. Dans le cas où il existe des points qui dérivent, un ensemble d'actions correctives doivent être exécutées pour régler le problème. Dans le cas contraire, les indicateurs de capacités doivent être vérifiés pour voir si on doit continuer ou arrêter la production.[43]

Le logigramme de la figure 29 représente de façon claire la démarche à suivre pour le pilotage avec les cartes de contrôle.

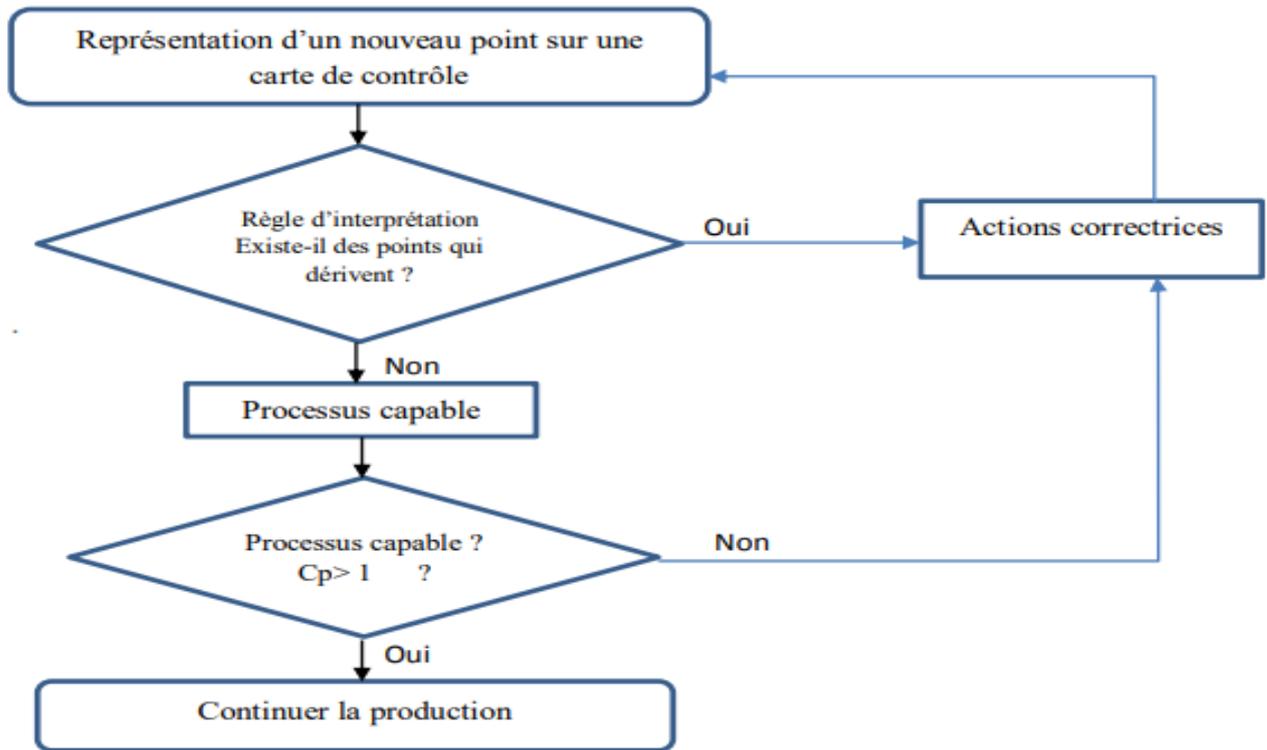


Figure 29: Logigramme de pilotage

6-2- La gestion de maintenance assistée par ordinateur : GMAO

La GMAO est un système informatique permettant de programmer et de suivre sous les trois aspects techniques, budgétaire et organisationnel, toutes les activités du service de la maintenance d'une entreprise. Ceci va non seulement répondre à ses besoins mais également contribuer efficacement à l'amélioration de sa performance industrielle. [44]

Cette méthode de gestion concernera la planification, l'exécution et l'analyse des activités de la maintenance à partir d'une base de données alimentée par le personnel.[45]

La figure 30 résume la dernière phase de la démarche DMAIC qui va nous permettre non seulement de contrôler le processus de production mais également la solution proposée précédemment.

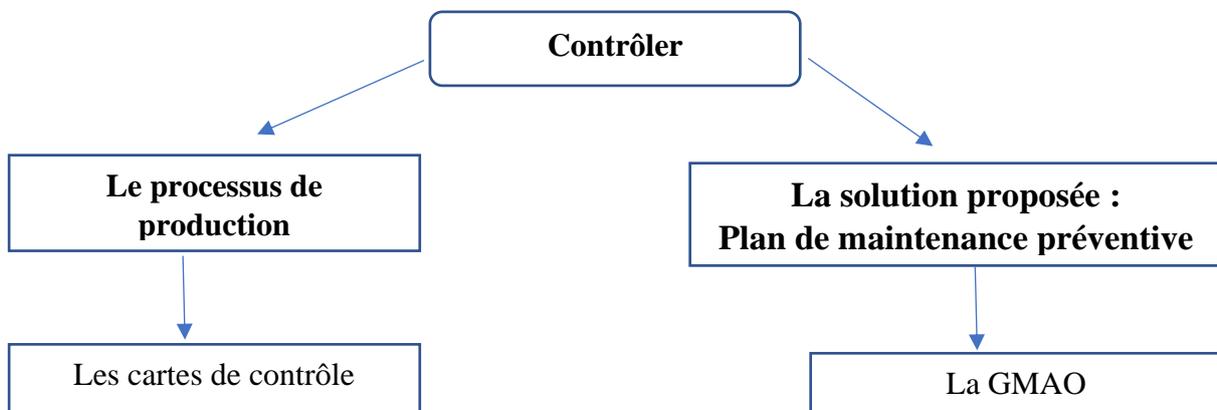


Figure 30: Résumé de la phase contrôler

Conclusion générale

La station d'épuration qui se trouve au sein de la raffinerie COSUMAR de Casablanca a pour but d'éliminer les impuretés, occluses dans le système cristallin, responsables de la coloration brune du sucre brut.

C'est dans ce contexte que la Maîtrise Statistique de Procédés (MSP) se présente comme un outil statistique efficace pour vérifier l'aptitude du processus à produire une commune filtrée respectant les spécifications de l'entreprise.

L'objectif du présent travail était de mettre en place la MSP en appliquant la démarche DMAIC. Ceci permettra non seulement de maîtriser les facteurs qui influencent le processus d'épuration mais également d'améliorer la performance globale, le suivi et le pilotage de ce dernier.

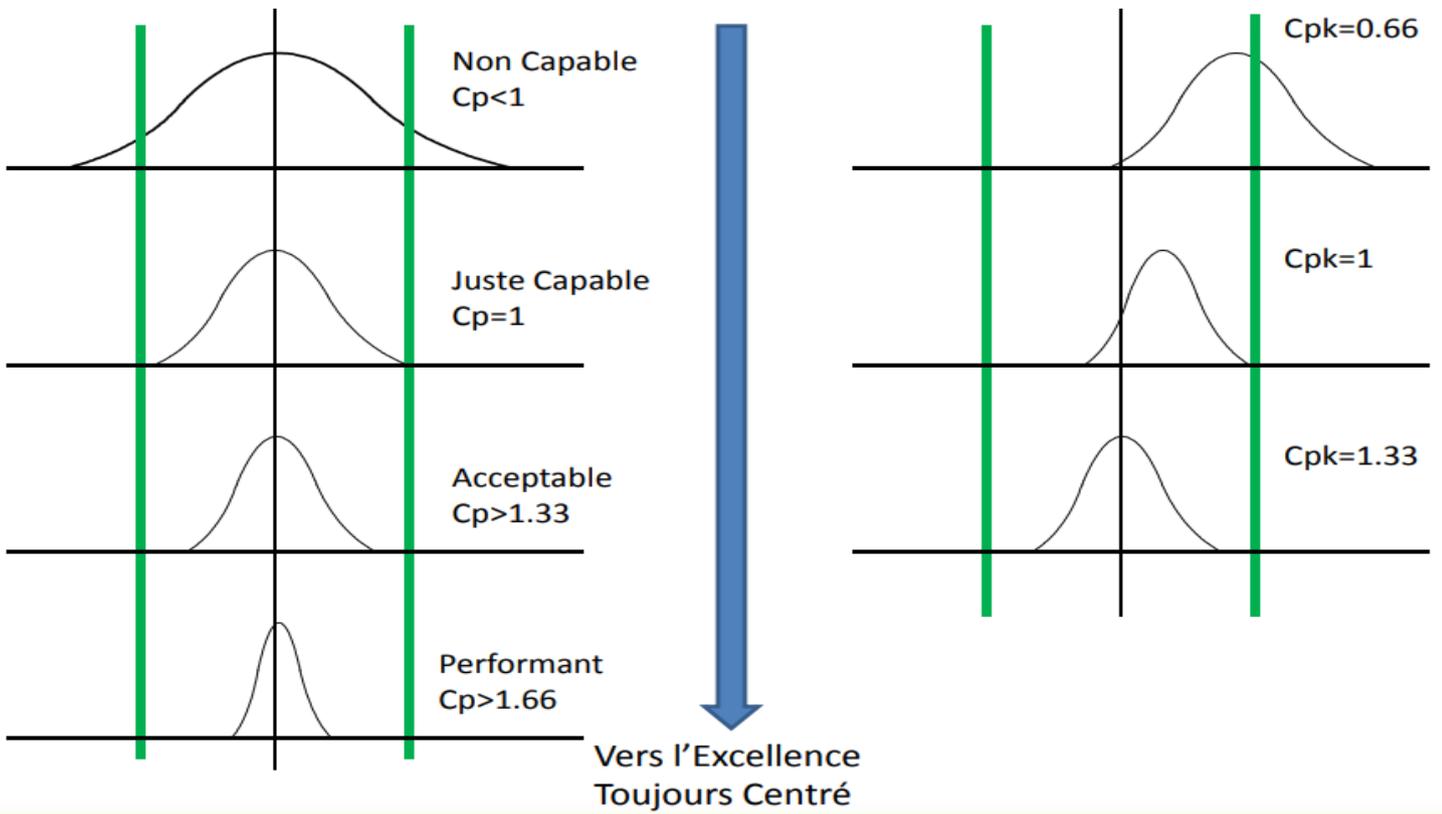
Le premier volet de ce projet portait sur le diagnostic de l'existant par le biais du calcul des indices de la capacité de ce processus et le traçage des cartes de contrôles. A partir des résultats obtenus, on a pu conclure que la commune filtrée produite au sein de la COSUMAR est instable vis-à-vis de la caractéristique « taux de décoloration » ce qui nous pousse à établir un plan d'action corrective.

Afin de remédier au problème observé au cours du diagnostic, un deuxième volet a été consacré à l'élaboration d'un plan de maintenance préventive grâce à l'utilisation de l'outil AMDEC qui permettra l'analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité pour améliorer la fiabilité des filtres diastar.

Pour finir, le présent rapport comporte également une phase de contrôle qui va assurer que les gains obtenus lors de l'amélioration sont maintenus dans le temps. Un plan de contrôle ainsi que la GMAO ont été donc mis en place pour diminuer la fréquence d'apparitions de produits hors spécification.

Annexes

Annexe I : Interprétation de la capacité



Annexe II : Suivi des paramètres : Brix, pH, Taux de décoloration

	Brix								pH								Taux de décoloration								
	1	2	3	4	5	6	R	X	1	2	3	4	5	6	R	X	1	2	3	4	5	6	R	X	
mars-2021	1	66,2	66,4	65,7	65,1	66,2	66,0	1,3	65,9	8,2	8,5	8,3	8,2	8,4	8,5	0,3	8,4	49%	48%	49%	54%	48%	46%	8%	49%
	2	66,4	66,2	66,2	65,6	65,6	66,0	0,8	66,0	8,5	8,5	8,8	8,8	8,4	8,3	0,5	8,6	48%	61%	48%	42%	46%	45%	19%	48%
	3	66,5	66,5	66,6	65,0	65,5	65,4	1,6	65,9	8,4	8,4	8,3	8,4	8,4	8,6	0,3	8,4	47%	49%	45%	47%	46%	45%	4%	47%
	4	65,8	65,4	66,0	65,4	66,2	66,4	1,0	65,9	8,6	8,2	8,2	8,3	8,5	8,4	0,4	8,4	47%	48%	45%	45%	47%	47%	3%	47%
	5	66,0	66,0	65,8	66,0	65,6	66,4	0,8	66,0	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	0,1	8,5	47%	47%	47%	52%	46%	48%	6%	48%
	6	66,5	65,9	65,9	66,2	65,5	66,0	1,0	66,0	8,7	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	0,3	8,5	48%	50%	44%	46%	48%	47%	6%	47%
	7	66,0	66,0	66,0	65,8	66,4	66,0	0,6	66,0	8,3	8,3	8,4	8,3	8,4	8,7	0,4	8,4	49%	48%	49%	48%	48%	48%	1%	48%
	8	65,6	65,4	65,8	66,2	65,8	66,0	0,8	65,8	8,2	8,4	8,3	8,4	8,3	8,5	0,3	8,4	42%	47%	46%	46%	46%	46%	5%	46%
	9	65,8	66,2	65,4	65,8	66,2	65,8	0,8	65,9	8,1	8,5	8,2	8,6	8,3	8,2	0,5	8,3	72%	67%	60%	58%	56%	50%	22%	61%
	10	65,7	65,6	66,0	65,8	65,6	65,3	0,7	65,7	8,1	8,2	8,4	8,5	8,4	8,4	0,4	8,3	52%	50%	50%	49%	52%	55%	6%	51%
	11	65,9	66,0	66,2	66,0	65,8	65,7	0,5	65,9	8,3	8,3	8,2	8,3	8,6	8,5	0,4	8,4	52%	56%	56%	53%	50%	49%	7%	53%
	12	66,3	66,1	65,8	65,8	66,0	65,7	0,6	66,0	8,7	8,5	8,5	8,5	8,6	8,5	0,2	8,6	55%	53%	58%	56%	56%	59%	6%	56%
	13	66,0	65,5	66,8	66,5	65,0	66,2	1,8	66,0	8,2	8,2	8,1	8,2	8,6	8,5	0,5	8,3	55%	59%	55%	55%	54%	57%	5%	56%
	14	66,8	66,3	66,2	66,0	67,2	66,8	1,2	66,6	8,3	8,2	8,3	8,3	8,5	8,6	0,4	8,4	55%	52%	54%	52%	51%	53%	4%	53%
	15	66,3	66,4	66,4	65,8	66,6	66,4	0,8	66,3	8,2	8,3	8,4	8,3	8,5	8,6	0,4	8,4	56%	53%	54%	54%	54%	50%	6%	54%
	16	65,7	65,4	64,6	65,6	66,2	66,2	1,6	65,6	8,4	8,6	8,6	8,5	8,3	8,2	0,4	8,4	53%	51%	47%	45%	47%	43%	10%	48%
	17	66,0	66,2	66,2	66,0	65,5	66,2	0,7	66,0	8,2	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	0,4	8,5	59%	51%	46%	48%	45%	41%	18%	48%
	18	65,2	65,6	65,2	65,0	65,8	65,6	0,8	65,4	8,7	8,5	8,6	8,5	8,4	8,5	0,3	8,5	52%	50%	69%	63%	64%	63%	19%	60%
	19	65,4	65,4	65,8	65,6	65,8	65,6	0,4	65,6	8,1	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	0,4	8,4	62%	61%	59%	58%	59%	55%	7%	59%
	20	66,0	66,0	65,6	65,4	66,0	66,2	0,8	65,9	8,3	8,5	8,4	8,4	8,4	8,5	0,2	8,4	54%	56%	52%	52%	53%	51%	5%	53%
	21	65,8	65,2	65,8	66,0	66,5	66,3	1,3	65,9	8,2	8,2	8,5	8,5	8,5	8,4	0,3	8,4	51%	53%	48%	47%	51%	51%	6%	50%
	22	65,8	66,1	65,6	65,9	66,0	66,0	0,5	65,9	8,6	8,6	8,6	8,5	8,4	8,5	0,2	8,5	50%	48%	48%	44%	45%	47%	6%	47%
	23	65,4	66,2	65,0	64,8	65,8	66,0	1,4	65,5	8,5	8,6	8,7	8,6	8,4	8,4	0,3	8,5	49%	49%	49%	47%	49%	47%	2%	48%
	24	66,0	65,4	64,8	64,0	65,2	66,0	2,0	65,2	8,6	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	0,2	8,5	48%	50%	49%	46%	47%	47%	4%	48%
	25	65,8	64,5	64,5	65,0	65,2	66,1	1,6	65,2	8,6	8,3	8,2	8,3	8,4	8,4	0,4	8,4	48%	46%	45%	46%	49%	49%	4%	47%
	26	65,4	65,6	65,8	65,0	65,4	66,2	1,2	65,6	8,7	8,5	8,7	8,5	8,4	8,4	0,3	8,5	42%	51%	43%	42%	45%	44%	9%	45%
	27	65,6	66,2	65,2	65,6	65,4	66,2	1,0	65,7	8,5	8,6	8,5	8,6	8,5	8,5	0,1	8,5	47%	50%	47%	46%	46%	46%	4%	47%
	28	66,6	66,0	65,2	65,6	65,8	66,2	1,4	65,9	8,5	8,6	8,5	8,6	8,5	8,5	0,1	8,5	43%	48%	46%	46%	45%	44%	5%	45%
	29	65,4	65,0	65,6	65,4	65,4	65,8	0,8	65,4	8,3	8,4	8,7	8,5	8,6	8,7	0,4	8,5	48%	46%	48%	47%	47%	46%	2%	47%
	30	65,8	65,8	64,6	64,6	65,4	65,0	1,2	65,2	8,3	8,6	8,6	8,7	8,6	8,6	0,4	8,6	50%	54%	53%	55%	56%	55%	6%	54%

	31	65,2	64,8	65,0	65,4	65,6	65,8	1,0	65,3	8,7	8,5	8,6	8,6	8,4	8,5	0,3	8,6	54%	43%	47%	63%	49%	52%	20%	51%
Avril 2021	1	65,2	64,8	65,4	66,2	66,8	66,2	2,0	65,8	8,4	8,3	8,3	8,4	8,6	8,5	0,3	8,4	51%	53%	55%	53%	51%	49%	6%	52%
	2	65,6	65,6	65,4	65,6	65,2	65,4	0,4	65,5	8,4	8,4	8,5	8,5	8,7	8,6	0,3	8,5	58%	48%	47%	52%	51%	55%	12%	52%
	3	65,6	64,2	65,4	65,8	64,6	65,4	1,6	65,2	8,4	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	0,2	8,6	38%	51%	48%	46%	57%	55%	18%	49%
	4	65,0	64,8	64,8	65,4	65,4	65,0	0,6	65,1	8,6	8,6	8,6	8,5	8,4	8,4	0,2	8,5	53%	49%	49%	46%	53%	53%	8%	51%
	5	64,4	65,0	65,2	65,2	65,4	65,2	1,0	65,1	8,4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	0,1	8,3	48%	48%	49%	74%	53%	75%	26%	58%
	6	65,2	65,0	64,9	66,2	65,8	65,0	1,3	65,4	8,4	8,4	8,5	8,6	8,5	8,5	0,2	8,5	47%	43%	49%	43%	46%	43%	6%	45%
	7	64,8	64,4	65,4	66,2	65,0	65,2	1,8	65,2	8,4	8,4	8,5	8,5	8,7	8,6	0,3	8,5	49%	54%	50%	45%	52%	74%	29%	54%
	8	65,4	66,4	65,0	65,4	65,2	65,4	1,4	65,5	8,6	8,6	8,5	8,4	8,5	8,4	0,2	8,5	54%	51%	48%	44%	51%	50%	10%	50%
	9	65,0	65,2	65,0	65,4	64,8	64,5	0,9	65,0	8,6	8,4	8,3	8,4	8,6	8,6	0,3	8,5	52%	52%	51%	53%	55%	52%	4%	52%
	10	65,8	65,6	64,0	64,4	65,2	65,4	1,8	65,1	8,7	8,5	8,6	8,4	8,6	8,6	0,3	8,6	55%	56%	51%	50%	53%	50%	6%	52%
	11	65,4	65,4	66,4	66,6	65,2	64,8	1,8	65,6	8,5	8,3	8,3	8,3	8,5	8,6	0,3	8,4	53%	51%	49%	47%	51%	52%	6%	50%
	12	65,2	65,6	64,0	64,8	65,0	65,2	1,6	65,0	8,2	8,3	8,2	8,3	8,7	8,6	0,5	8,4	52%	54%	53%	50%	52%	51%	3%	52%
	13	65,2	66,0	65,4	65,8	65,2	65,1	0,9	65,5	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	0,1	8,6	52%	52%	53%	52%	49%	47%	5%	51%
	14	64,0	65,4	64,6	64,0	65,9	65,9	1,9	65,0	8,5	8,4	8,2	8,3	8,6	8,6	0,4	8,4	48%	47%	50%	49%	49%	51%	4%	49%
	15	65,5	64,5	65,6	65,7	65,9	64,0	1,9	65,2	8,6	8,8	8,6	8,6	8,5	8,4	0,4	8,6	51%	53%	50%	50%	50%	52%	3%	51%
	16	65,5	65,8	64,0	65,5	65,9	66,0	2,0	65,5	8,4	8,3	8,5	8,6	8,5	8,4	0,3	8,5	46%	44%	47%	46%	44%	42%	5%	45%
	17	64,4	65,0	64,0	64,4	64,4	65,0	1,0	64,5	8,7	8,7	8,6	8,6	8,5	8,4	0,3	8,6	50%	42%	60%	52%	55%	53%	18%	52%
	18	65,7	65,0	66,0	65,5	64,5	65,4	1,5	65,4	8,6	8,2	8,3	8,4	8,3	8,4	0,4	8,4	53%	42%	60%	51%	52%	47%	18%	51%
	19	64,8	65,0	64,8	65,2	65,0	66,2	1,4	65,2	8,2	8,0	8,5	8,6	8,5	8,4	0,6	8,4	55%	50%	48%	47%	48%	48%	8%	49%
	20	65,2	65,4	64,7	64,6	65,2	65,4	0,8	65,1	8,7	8,4	8,6	8,6	8,7	8,4	0,3	8,6	51%	50%	48%	48%	51%	50%	4%	50%
	21	65,2	65,0	64,5	64,8	64,6	65,6	1,1	65,0	8,4	8,4	8,5	8,4	8,5	8,4	0,1	8,4	50%	51%	50%	48%	48%	50%	3%	49%
	22	66,6	66,2	64,6	64,4	65,4	66,0	2,2	65,5	8,4	8,6	8,6	8,5	8,9	8,5	0,5	8,6	52%	48%	48%	46%	50%	50%	6%	49%
	23	65,0	64,6	64,6	64,8	65,8	66,1	1,5	65,2	8,6	8,6	8,5	8,5	8,4	8,4	0,2	8,5	53%	50%	49%	48%	50%	53%	5%	50%
	24	65,0	64,4	65,6	65,7	65,5	65,2	1,3	65,2	8,3	8,3	8,2	8,4	8,5	8,5	0,3	8,4	54%	52%	52%	48%	50%	50%	5%	51%
	25	65,2	65,3	65,1	65,3	64,7	64,6	0,7	65,0	8,7	8,5	8,6	8,6	8,6	8,5	0,2	8,6	50%	51%	51%	48%	50%	49%	3%	50%
	26	64,9	64,6	64,9	65,3	65,2	65,0	0,7	65,0	8,6	8,6	8,5	8,4	8,3	8,3	0,3	8,5	49%	46%	45%	43%	45%	43%	6%	45%
	27	65,5	65,2	64,8	65,0	64,9	64,7	0,8	65,0	8,4	8,4	8,5	8,4	8,4	8,4	0,1	8,4	44%	46%	42%	44%	42%	43%	4%	44%
								1,2	65,5							0,3	8,5							8%	50%

Avec :

\bar{X} : moyenne des échantillons analysés des poids de chaque lot $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_1 + \mathbf{X}_2 + \mathbf{X}_3 + \mathbf{X}_4 + \mathbf{X}_5 + \mathbf{X}_6) / 6$

\mathbf{R} : étendue des mesures sur chaque lot $\mathbf{R} = \mathbf{X}_{\max} - \mathbf{X}_{\min}$

Annexe III : Suivi des paramètres : le taux de décoloration, la pureté et la matière en suspension

	Fonte commune	Commune filtrée	Taux de décoloration	Pureté	MES
1	879	452	49%	99,42%	176
2	834	419	50%	99,43%	102
3	982	432	56%	99,46%	54
4	994	468	53%	99,45%	83
5	843	451	47%	99,43%	229
6	845	453	46%	99,42%	306
7	835	440	47%	99,44%	193
8	839	432	49%	99,44%	170
9	860	466	46%	99,41%	208
10	848	374	56%	99,47%	76
11	948	493	48%	99,43%	158
12	846	402	52%	99,45%	146
13	951	483	49%	99,41%	131
14	922	473	49%	99,43%	165
15	976	458	53%	99,44%	99
16	823	382	54%	99,46%	89
17	903	376	58%	99,47%	24
18	826	359	57%	99,46%	50
19	998	500	50%	99,41%	106
20	948	493	48%	99,43%	161

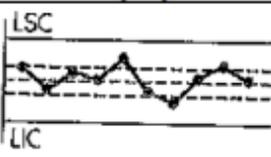
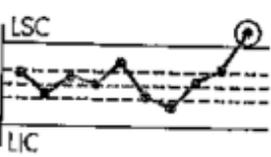
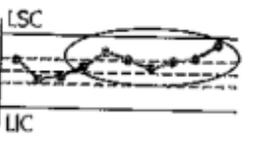
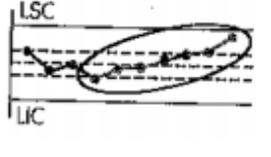
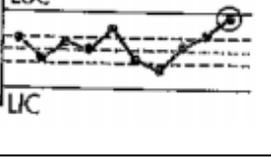
✓ **Mes** : matière en suspension

Annexe IV : Plan de maintenance préventive pour les filtres diastar

		Plan de maintenance préventive pour les filtres diastar					N° Fiche : Maintenance						
Poste de travail	N° équipement	Recueil des opérations	Marche	Arrêt	Intervenant	Durée en H	Périodicité						
							J	S	M	T	Str	A	
1R00	100015	Changement des filtres		X	Des techniciens en maintenance	4h						X	
1R01	100015	Vérification de l'état des filtres	X			1h		X					
1R02	100015	Entretien	X			2h			X				
1R03	100015	Nettoyage partiel	X			1h		X					
1R04	100015	Nettoyage total		X		4h							X
1R05	100015	Etude du seuil de rétention	X			2h			X				

- ✓ **J : Travaux à réaliser chaque jour**
- ✓ **S : Travaux à réaliser chaque semaine**
- ✓ **M : Travaux à réaliser chaque mois**
- ✓ **T : Travaux à réaliser chaque trimestre**
- ✓ **Str : Travaux à réaliser chaque semestre**
- ✓ **A : Travaux à réaliser chaque année**

Annexe V : Les règles de pilotage des cartes de contrôle

Graphique	Description	Décision carte des étendues
	<p>Processus sous contrôle</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les courbes R oscillent de chaque côté de la moyenne. • 2/3 des points sont dans le tiers central de la carte. 	<p>PRODUCTION</p>
	<p>Point hors limites</p> <p>Le dernier point tracé a franchi une limite de contrôle.</p>	<p><u>Cas limite supérieure</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. ○ Il y a une erreur de mesure. <p><u>Cas limite inférieure</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme s'améliore. ○ Le système de mesure est bloqué.
	<p>Tendance supérieure ou inférieure</p> <p>7 points consécutifs sont supérieurs ou inférieurs à la moyenne.</p>	<p><u>Cas tendance supérieure</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. <p><u>Cas tendance inférieure</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.
	<p>Tendance croissante ou décroissante</p> <p>7 points consécutifs sont en augmentation ou en diminution régulière.</p>	<p><u>Cas série croissante</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir. <p><u>Cas série décroissante</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ La capabilité court terme s'améliore. Il faut trouver l'origine de cette amélioration pour la maintenir.
	<p>1 point proche des limites</p> <p>Le dernier point tracé se situe dans le 1/6 au bord de la carte de contrôle</p>	<p><u>Cas limite supérieure</u></p> <p>Surveiller la capabilité. Si plusieurs points de la carte sont également proches de la limite supérieure, la capabilité se détériore. Il faut trouver l'origine de cette détérioration et intervenir.</p>

Références :

- [1] « agriculture_en_chiffres_2016_.pdf ».
- [2] « Groupe ONA », *Wikipédia*. déc. 18, 2020. Consulté le: juin 13, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Groupe_ONA&oldid=177760562
- [3] « Document interne COSUMAR.docx ».
- [4] « Cosumar | L’histoire d’un grand groupe marocain », *Cosumar*. <https://www.cosumar.co.ma/le-groupe/historique/> (consulté le juin 28, 2021).
- [5] « Cosumar | Raffinage et extraction de betterave et canne à sucre au Maroc », *Cosumar*. <https://www.cosumar.co.ma/> (consulté le juin 11, 2021).
- [6] « Cosumar | Nos implantation », *Cosumar*. <https://www.cosumar.co.ma/le-groupe/implantation/> (consulté le juin 29, 2021).
- [7] « Fiche d’identité - Cosumar ». <https://sites.google.com/site/youssef0664349652/home/services> (consulté le juin 28, 2021).
- [8] « Sucre - Vikidia, l’encyclopédie des 8-13 ans ». <https://fr.wikidia.org/wiki/Sucre> (consulté le juin 26, 2021).
- [9] « Comment et pourquoi les plantes font-elles du sucre? | Redpath Sugar ». <https://français.redpathsugar.com/de-quelle-maniere-fabriquer-t-on-le-sucre> (consulté le juin 26, 2021).
- [10] « Suivi de la qualité microbiologique et physico-chimique du sucre blanc en morceau produit par Cevital (Bejaia).pdf ».
- [11] J. Barrau, « Canna mellis : croquis historique et biogéographique de la canne à sucre, *Saccharum officinarum* L. graminées-andropogonées », *J. Agric. Tradit. Bot. Appliquée*, vol. 35, n° 1, p. 159-173, 1988, doi: 10.3406/jatba.1988.6684.
- [12] A. P. Dubrunfaut, *Art de fabriquer le Sucre de Betteraves*. Bachelier, successeur de Mme Ve Courcier, Libraire pour les Sciences, 1825.
- [13] « Saccharose », *Wikipédia*. janv. 25, 2021. Consulté le: juin 26, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Saccharose&oldid=179184832>
- [14] A. Arzate, « Saint-Norbert d’Arthabaska, 25 Novembre 2005 », p. 45.
- [15] « Différence entre sucre réducteur et non réducteur / Science », *La différence entre des objets et des termes similaires*. <https://fr.sawakinome.com/articles/science/difference-between-reducing-and-nonreducing-sugar.html> (consulté le juin 26, 2021).
- [16] « ETUDE DE LA CAPABILITE DANS LA PRODUCTION INDUSTRIELLE ». https://www.utc.fr/master-qualite/public/publications/qualite_et_management/MQ_M2/2006-2007/projets/capabilite/capabilite.html (consulté le juin 11, 2021).
- [17] M. Pillet, *Appliquer la Maîtrise Statistique des processus*. édition d’organisation - Eyrolles, 2005, p. 530. Consulté le: mai 24, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00469999>
- [18] Sahbani Mansour, « Contrôle statistique de la qualité dans l’industrie : la maîtrise statistique de processus (La carte de contrôle moyenne de Shewart) », p. 7.
- [19] C. Rousseau, « Maîtrise Statistique des Procédés (MSP) », p. 95.
- [20] « Carte de contrôle | Guides ». <https://guidesaideconception.uqar.ca/guide-des-meilleures-pratiques/a-z/carte-de-contrôle/> (consulté le juin 11, 2021).
- [21] M. M. M. Maurice, « Pour l’Obtention du Doctorat en Pharmacie », *Médecine Interne*, p. 199.
- [22] N. Dérobert, « MSP/SPC - Carte de contrôle aux mesures », *commentprogresser.com*. <https://commentprogresser.com/qualite-assurance-msp-carte-de-contrôle-mesure.html> (consulté le juin 11, 2021).
- [23] « Les contrôles statistiques ». <http://www.demarcheiso17025.com/fiche003.html> (consulté le juin 28, 2021).

- [24] « Qu'est-ce que la « Capabilité » - Collège Français de Métrologie ». <https://www.cfmetrologie.com/fr/faq-mesure/12-concepts-et-terminologie/1043-quest-ce-que-la-capabilite> (consulté le juin 11, 2021).
- [25] M. Pillet, « Le point sur les études de capabilité ou d'aptitude ? », p. 9.
- [26] T. Martini, « Détermination d'une méthode de calcul de capabilités avec des lois non gaussiennes », p. 39.
- [27] Promaintech Novaxa Analyse de capabilité, « Formation Green Belt Lean Six Sigma. - ppt ». <https://slideplayer.fr/slide/9738464/> (consulté le juin 28, 2021).
- [28] « Chap. 1 Capabilité machines et processus », p. 12.
- [29] « UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER FACULTE DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE - PDF Free Download ». <https://docplayer.fr/69776266-Universite-toulouse-iii-paul-sabatier-faculte-des-sciences-pharmaceutiques-these-pour-le-diplome-d-etat-de-docteur-en-pharmacie.html> (consulté le juill. 06, 2021).
- [30] « AOUADI Hatem Vol 4 N 2 », vol. 4, p. 19.
- [31] « Qu'est-ce qu'un diagramme de Gantt ? », *Gantt.com*. <https://www.gantt.com> (consulté le juin 26, 2021).
- [32] A. Edouard, « Mise en place d'un projet d'amélioration continue sur une ligne de conditionnement secondaire de vaccins, à l'aide de l'outil Lean Six Sigma », p. 144.
- [33] « Droite de Henry ». <http://www.jybaudot.fr/Stats/droitehenry.html> (consulté le juin 28, 2021).
- [34] « coefficient de détermination | Lexique de mathématique », janv. 07, 2016. <https://lexique.netmath.ca/coefficient-de-determination/> (consulté le juill. 09, 2021).
- [35] « Les cartes de contrôles ». <http://www.qualiteonline.com/dossier-38-les-cartes-de-contrroles.html> (consulté le juin 11, 2021).
- [36] «  Carte de contrôle : définition et explications », *Techno-Science.net*. <https://www.techno-science.net/definition/10802.html> (consulté le juin 28, 2021).
- [37] M. Pillet, *Appliquer la maîtrise statistique des processus (MSP/SPC)*. Paris: Eyrolles, 2008.
- [38] « Carte X-Barre et R ». <https://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/glossaire/c/cartex.html> (consulté le juin 28, 2021).
- [39] « Cartes de Contrôle Qualité : Un Outil Essentiel de la MSP et du Lean Six Sigma ». <https://www.statsoft.fr/concepts-statistiques/cartes-de-contrôle-qualite/cartes-de-contrôle-qualite.php> (consulté le juin 28, 2021).
- [40] « Les grandes étapes de la méthodologie AMDEC ». <http://www.qualiteonline.com/question-45-quelles-sont-les-4-grandes-etapes-de-la-methodologie-amdec.html> (consulté le juin 15, 2021).
- [41] S. rawdha, « AMDEC - Analyse des Modes de Défaillance leurs Effets et leur Criticité », *Certification QSE*, déc. 05, 2017. <https://www.certification-qse.com/methode-amdec/> (consulté le juin 26, 2021).
- [42] G. Casanova, « • de définir les avantages et inconvénients de chaque type de contrôle », p. 34.
- [43] L. Estrade, « Maîtrise statistique des procédés (MSP): application à la fabrication semi-automatisée en lots de préparations injectables stériles à l'Hôpital », p. 120.
- [44] « HOUSSOU_Bruno.pdf ». Consulté le: juin 10, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1438/1/HOUSSOU_Bruno.pdf
- [45] « Ms.GM.Kahel.pdf ». Consulté le: juin 10, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/12171/1/Ms.GM.Kahel.pdf>

Filière Ingénieurs IAA

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat

Nom et prénom : BASRAOUI Nada

Année Universitaire : 2020/2021

**Titre : Contribution à la maîtrise statistique du processus
d'épuration en utilisant la démarche DMAIC**

Résumé

L'entreprise COSUMAR Casablanca désire assurer une amélioration continue de ses performances et garantir une optimisation de la productivité en offrant à ses clients un produit de bonne qualité qui satisfait leurs exigences.

L'objectif de ce projet de fin d'études est la maîtrise statistique du processus d'épuration « MSP » à travers l'application de la démarche DMAIC et l'utilisation des indicateurs de la capacité ainsi que des cartes de contrôle.

Ces outils statistiques visent non seulement à suivre la variabilité du processus en vue de détecter toute anomalie mais également à trouver les causes racines pour pouvoir les piloter.

Au terme de ce travail, nous considérons que nos objectifs fixés au début de ce projet ont été bien réalisés et justifiés dans la partie expérimentale. Cette dernière indique que le processus d'épuration est non capable vis-à-vis du paramètre taux de décoloration.

Dans ce sens, un plan de maintenance préventive permettant d'améliorer la fiabilité des filtres de diastar a été élaboré en se basant sur l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité AMDEC.

Afin de contrôler l'efficacité de notre solution proposée, un plan de contrôle ainsi que la GMAO ont également été mis en place pour surveiller de manière continue la performance du processus et diminuer la fréquence d'apparitions de produits hors spécification.

Mots clés : MSP, DMAIC, indicateurs de capacité, carte de contrôle, processus non capable, plan de maintenance préventive, AMDEC, plan de contrôle, GMAO

