

Année Universitaire : 2017-2018



Master Sciences et Techniques en Génie Industriel

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Optimisation de la conduite des fours sécheurs

Lieu : OCP Khouribga (Usine de séchage de Béni-Idir)

Référence : 06/18-MGI

Présenté par:

TAFZA Hajar

Soutenu Le 11 Juin 2018 devant le jury composé de:

- **Mr. EL OUZZANI Nabih (encadrant)**
- **Mr. MAZZAL Hamid (encadrant Société)**
- **Mr. TAHRI Driss (examinateur)**
- **Mr. HAOUACHE Said (examinateur)**

Stage effectué à : OCP Khouribga (Usine de séchage de Béni-Idir)



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: TAFZA Hajar

Année Universitaire : 2017/2018

Titre: Optimisation de la conduite des fours sécheurs.

Résumé

Afin de maîtriser le processus de séchage, l'usine de Béni-Idir s'est engagée dans une démarche d'amélioration, visant à contrôler les paramètres les plus critiques de l'unité, en l'occurrence, les paramètres de marche des fours sécheurs.

Le présent travail est conçu dans le cadre d'un projet de fin d'études (PFE), qui consiste à établir les cartes de contrôle des paramètres de marche d'une part, et de mener une analyse critique des boucles de régulation visant l'élimination des sources racines qui engendrent des perturbations au niveau du procédé de séchage et surtout une variabilité de la consommation spécifique du fuel d'autre part.

Les cartes obtenues ont montré la présence de points hors contrôle, indiquant que le processus est non maîtrisé et non stable. Une analyse des causes de variabilité a permis de bien cibler les causes racines des problèmes de l'usine.

Au terme de ce travail, nous avons pu mettre en place des actions d'amélioration qui visent l'optimisation de la consommation spécifique du fuel, en effet nous avons proposé l'installation d'un échangeur thermique pour préchauffer l'air de secouage des filtres à manches avant son injection, qui perturbe les boucles de régulation, nous avons aussi conçu une nouvelle boucle qui régule le débit d'air de combustion par le débit du fuel.

Le résultat de cette étude a été jugé utile sur le plan technique et économique et nous avons pu réaliser un essai au niveau du four numéro 1 en utilisant un échangeur qui était utilisé pour le préchauffage du fuel.

Mots clés : séchage, paramètres de marche, cartes de contrôle, régulation, consommation spécifique

Abstract

To control the drying process, Béni-Idir company was engaged in performance approach to control the most critical parameters of the unit, in this case, the operating parameters of the drying ovens.

The present work is conceived as part of a graduation project which consists in establishing the control charts of the aforementioned parameters on the one hand, and to conduct a critical analysis of regulatory loops aimed at eliminating root sources that cause disturbances in the drying process and above all a variability in the specific fuel consumption.

The cards obtained showed the presence of out-of-control points indicating that the process is unchecked and not stable.

An analysis of the causes of variability made it possible to target the root causes of the plant's problems.

At the end of this work, we were able to set up improvement actions aimed at optimizing the specific fuel consumption. Indeed we proposed the installation of a heat exchanger to preheat the shaking air of the bag filters before its injection, which disrupts the control loops, we have also designed a new loop that regulates the combustion air flow by the fuel flow.

The result of this study was found to be technically and economically useful and we were able to perform a test on oven number 1 using a heat exchanger that was used to preheat the fuel.

Key words : drying, the operating parameters, the control charts, regulation, the specific fuel consumption.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ✚ A mes chers parents en reconnaissances de leur dévouement déployé pour mon bonheur, de leur patience et soutien infini.*

- ✚ A ma sœur et aussi tous les membres de ma famille qui n'ont jamais cessé de m'encourager et me soutenir dans les pires moments.*

- ✚ A mon encadrant Pr EL OUAZZANI Nabih pour son soutien.*

- ✚ A ceux qui m'ont donné l'exemple pour continuer mon parcours avec vivacité et ambition « MES PROFESSEURS ».*

- ✚ A ceux qui n'ont jamais été avares ni de leur temps ni de leurs connaissances pour satisfaire à mes interrogations.*

Remerciement

Au terme de ce rapport de stage, je tiens à remercier non seulement comme devoir mais par grand respect et gratitude profonde :

- ✚ Toute l'équipe pédagogique de « FSTF » et les intervenants professionnels responsables de la formation « Génie Industriel » et spécialement mon encadrant Pr EL OUAZZANI Nabih pour ses orientations, ses précieux conseils et ses encouragements.*

- ✚ Mr MAZZAL Hamid chef d'usine de séchage, pour son accueil et les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer, son caractère humain et la bienveillance avec laquelle il a constamment dirigé ce travail.*

- ✚ Tous les membres du personnel du département séchage qui ont ménagé leurs temps et leurs connaissances pour m'aider à élaborer ce travail, et à tout le personnel de l'usine Béni-Idir pour toutes leurs gentilleses, leurs sympathies et leurs services inconditionnels, leurs compréhension et leurs soutiens qui m'ont énormément facilité la mission au sein de cette section.*

En fin, je tiens à remercier tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce rapport de stage.

Liste des abréviations

Abréviations	Description
DMAIC	Définir, Mesurer, Analyser, Innover, Contrôler.
VRB	Ventilateur d'air primaire
Cs	Consommation spécifique
Df	Débit du fuel
Dph	Débit du phosphate sec
LSI	Limite de spécification inférieure
LSS	Limite de spécification supérieure
Cp	Capabilité du procédé
Cpk	Indicateur du centrage
P.I.D	Proportionnel, Intégral, Dérivé
I/EM	Individu et étendue mobile
LIC	Limite inférieure de contrôle
LSC	Limite supérieure de contrôle
LC	Limite de contrôle
Q	Le flux de chaleur
\dot{m}_v	Le débit massique de vapeur
\dot{m}_a	Le débit massique de l'air comprimé
c_{p_v}	La capacité calorifique de vapeur
c_{p_a}	La capacité calorifique de l'air comprimé
L_c	La chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau
U_s	Le coefficient de transfert global
A	La surface d'échange globale

F	Le facteur de correction
ΔT_{LM}	La différence de température logarithmique moyenne
N_T	Le nombre des tubes
S_p	La section occupée par les tubes
S_T	La section d'un tube
Q_v	Le débit volumique de vapeur
v_v	La vitesse de vapeur
A_1	La surface d'échange à travers un passe
N_P	Le nombre de passes
r	Le rayon d'un tube
ΔP_t	Les pertes de charge dans les tubes
n_t	Le nombre des tubes
G_t	La vitesse massique
ρ	La masse volumique de la vapeur
d_t	Le diamètre des tubes
f_t	Le coefficient de fiction
Re	Le nombre de Reynolds
ΔP_c	Les pertes de charge à l'extérieur
ρ	La masse volumique de l'air comprimé
N_c	Nombre total des tubes
G_c	La vitesse massique
D_c	Le diamètre de la calandre
f_c	Le coefficient de fiction

Table des matières

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

Chapitre 1 : Présentation du groupe O.C.P, unité Béni-Idir

I.	Introduction	2
II.	Présentation du groupe OCP	2
	2.1. Généralité.....	2
	2.2. Organigramme du groupe OCP	2
III.	Présentation de l'unité de Béni-Idir.....	3
	3.1. Unité de stockage du phosphate humide	3
	3.2. Unité de stockage du fuel	3
	3.3. Unité de chaufferie	3
	3.4. Unité de stockage et chargement du phosphate sec.....	3
	3.5. Unité de séchage	4
IV.	Description du four sécheur.....	4
	4.1. Constitution du four sécheur.....	4
	4.1.1. Le réchauffeur	5
	4.1.2. Le foyer	5
	4.1.3. La buse	6
	4.1.4. La virole	7
	4.1.5. La chambre à poussière.....	7
	4.1.6. Les ventilateurs de tirage	7
	4.1.7. La cheminée	7
	4.2. Le fonctionnement du four sécheur	8
V.	Conclusion.....	8

Chapitre 2 : Définir

I.	Introduction	9
----	--------------------	---

II.	Sélection du problème	9
2.1.	Les dépenses au niveau de l'unité de séchage Béni-Idir	9
2.2.	La consommation énergétique de Béni-Idir	9
2.3.	La consommation du fuel par stade de production	10
III.	Clarification du problème	11
IV.	Identification du problème et planification du projet	12
V.	La charte de projet	13
VI.	Conclusion	14

Chapitre 3 : Evaluation de la situation actuelle du processus

I.	Introduction	16
II.	La variation de la consommation spécifique du fuel	16
2.1.	Test de variabilité de la consommation spécifique	16
2.2.	Normalisation des données	17
2.3.	Mesure de capabilité	19
2.4.	Les cartes de contrôle statistiques	20
2.5.	Conclusion	21
III.	Description des boucles de régulation existantes	21
3.1.	Boucle de température de la chambre avec le débit du fuel	22
3.2.	Boucle de température de la buse avec le débit du produit	22
3.3.	Boucle de régulation de la dépression	23
3.4.	Boucle de préchauffage du fuel	24
3.5.	Boucle de régulation de débit du fuel	24
3.6.	Conclusion	25
IV.	La variabilité des paramètres de marche	25
4.1.	Test de normalité	25
4.2.	Normalisation des données	29
4.3.	Etablissement des cartes de contrôle	32

V.	Conclusion.....	36
----	-----------------	----

Chapitre 4 : Analyse des sources des problèmes

I.	Introduction	37
II.	Diagramme Ishikawa	37
III.	Analyse des pannes des fours	38
	3.1. Statistique des pannes des fours	38
	3.2. Analyse des pannes.....	39
IV.	Analyse des résultats	42
	4.1. Chaîne de température de la chambre avec le débit du fuel	43
	4.2. Chaîne de température de la buse avec le débit du produit	43
	4.3. Chaîne de régulation du débit du fuel.....	43
	4.4. Chaîne de régulation de dépression	44
V.	Conclusion.....	44

Chapitre 5: Mise en place des actions d'amélioration

I.	Introduction	46
II.	Installation d'un échangeur thermique au niveau des filtres	46
	2.1. Choix technologique de l'échangeur	46
	2.2. Dimensionnement thermique	47
III.	Conception de la nouvelle boucle de régulation.....	54
	3.1. Les composants de la chaîne proposée	54
	3.2. Schéma fonctionnel de la boucle	54
	3.3. Description de la chaîne.....	55
IV.	Solutions correctives et préventive proposés	55
V.	Etude économique	57
	5.1. Le gain d'installation de l'échangeur de chaleur.....	58
	Conclusion générale	60

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme du groupe OCP	2
Figure 2 : Schéma du procédé de l'unité de Béni-Idir	4
Figure 3 : Schéma synoptique du four sécheur	5
Figure 4 : Le gicleur du brûleur	6
Figure 5 : Coût par structure des dépenses.....	9
Figure 6 : Répartition des dépenses énergétiques sur les différents postes de consommation	10
Figure 7 : Consommation du fuel par stade de production	10
Figure 8 : Planning du projet.....	13
Figure 9 : Le diagramme de probabilité pour la consommation spécifique.....	17
Figure 10 : Transformation de Johnson pour la consommation spécifique	18
Figure 11 : Mesure de capabilité actuelle.....	19
Figure 12 : Carte d'observation de la moyenne pour la consommation spécifique	20
Figure 13 : Carte d'observation de l'étendue pour la consommation spécifique.....	21
Figure 14 : Chaîne de la température de la chambre par le débit du fuel.....	22
Figure 15 : Chaîne de la température de la buse par le débit du produit.....	23
Figure 16 : Chaîne de la dépression	23
Figure 17 : Chaîne de préchauffage du fuel	24
Figure 18 : Chaîne de régulation du débit du fuel.....	25
Figure 19 : Le diagramme de probabilité pour le débit du fuel.....	26
Figure 20 : Le diagramme de probabilité pour le débit du produit	26
Figure 21 : Le diagramme de probabilité pour la température de la chambre	27
Figure 22 : Le diagramme de probabilité pour la dépression.....	27

Figure 23 : Le diagramme de probabilité pour la température de la buse.....	28
Figure 24 : Le diagramme de probabilité pour la température de sortie des filtres	28
Figure 25 : Transformation de Johnson pour le débit du produit.....	29
Figure 26 : Transformation de Johnson pour la température de la chambre.....	30
Figure 27 : Transformation de Johnson pour la dépression	30
Figure 28 : Transformation de Johnson pour la température de la buse	31
Figure 29 : Transformation de Johnson pour la température de sortie des filtres	31
Figure 30 : Carte de contrôle I/EM pour le débit du fuel	32
Figure 31 : Carte de contrôle I/EM pour le débit du produit.....	33
Figure 32 : Carte de contrôle I/EM pour la température de la chambre.....	33
Figure 33: Carte de contrôle I/EM pour la dépression	34
Figure 34: Carte de contrôle I/EM pour la température de la buse	34
Figure 35: Carte de contrôle I/EM pour la température de sortie des filtres.....	35
Figure 36: Diagramme Ishikawa de variation des paramètres de marche.....	37
Figure 37 : Courbe montrant les éléments qui demandent le plus de temps d'intervention ...	39
Figure 38 : Perturbation de la chaine de régulation du débit de fuel par température des filtres	45
Figure 39 : Echangeur à tubes et calandres	46
Figure 40 : La chaine de régulation du débit d'air par le débit du fuel	53

Liste des tableaux

Tableau 1: Consommation spécifique et prévision pour l'année 2016 et 2017	11
Tableau 2 : Identification du problème-QQOQCP	12
Tableau 3 : La charte du projet.....	14
Tableau 4 : Les limites de contrôle de la carte I.....	35
Tableau 5: Les limites de contrôle de la carte EM	35
Tableau 6: Statistique de la durée des arrêts et classement des éléments	38
Tableau 7: Les données disponibles pour le dimensionnement de l'échangeur.....	52
Tableau 8: Les résultats du dimensionnement de l'échangeur.....	52
Tableau 9: Les solutions proposées pour les autres problèmes.....	56

Introduction générale

Le phosphate marocain présente un taux d'humidité compris entre 11% et 18% alors que les clients exigent une teneur en eau qui ne dépasse pas souvent 2,5%. Il est donc nécessaire de procéder au séchage du phosphate avant d'être commercialisé, cette opération a pour objectif de rapporter le taux d'humidité du produit à une valeur fixée par l'exploitant quelles que soient les perturbations qui affectent le procédé de séchage.

Dans ce cadre, le travail qui nous a été confié consiste à mener une optimisation de la conduite des fours sécheurs utilisés à l'unité de Béni-Idir (OCP Khouribga), qui constitue notre lieu de stage, afin d'assurer un pilotage efficace de l'atelier de séchage.

Notre projet sera structuré selon la démarche DMAIC, le plan d'étude s'organise comme suit :

- Le premier chapitre sera destiné à la présentation de l'organisme d'accueil.
- Le deuxième chapitre représentera une introduction à la démarche DMAIC et dans ce chapitre nous allons rédiger le cahier de charge de ce projet.
- Le troisième chapitre sera dédié à la phase « Mesurer ». Dans cette partie, nous allons établir les cartes de contrôle des paramètres les plus critiques pour le fonctionnement des fours sécheurs, pour mieux évaluer la situation actuelle du processus, et identifier la problématique afin de pouvoir comparer les résultats obtenus au terme du projet.
- Le quatrième chapitre sera réservé à la phase « Analyser » de la démarche DMAIC et qui consiste à analyser en détails les résultats obtenus au cours de la deuxième phase, ce qui permet d'identifier les sources du problème.
- Le cinquième chapitre sera consacré à la recherche des solutions concrètes d'amélioration des performances du procédé de séchage et à l'étude économique de l'impact des solutions proposées.

A la fin de ce rapport, nous allons donner une synthèse des résultats obtenus et des perspectives pour la suite du travail.

I. Introduction

Le séchage est une opération industrielle qui consiste à diminuer le taux d'humidité du phosphate, cette opération est effectuée à travers une grande machine industrielle, c'est le four sécheur. Dans ce chapitre nous allons faire une présentation du groupe OCP, ainsi qu'une description générale de l'unité de séchage Béni-Idir et le four sécheur.

II. Présentation du groupe OCP

2.1. Généralité

Le Groupe OCP est une société anonyme fondée en 1920 et domiciliée au Maroc. OCP S.A est le leader mondial des exportations de phosphates et produits dérivés, avec des activités couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur, allant de l'extraction de la roche de phosphate à la transformation chimique en acide phosphorique et différents engrais. Les produits OCP représentent une composante majeure de la sécurité alimentaire mondiale tant ils sont importants pour la productivité agricole et contribuent activement à la régénération qualitative des sols.

2.2. Organigramme du groupe OCP

Les activités du groupe OCP sont structurées au sein de trois pôles d'activité : mines, chimie, finance et support logistique, à côté d'autres directions :

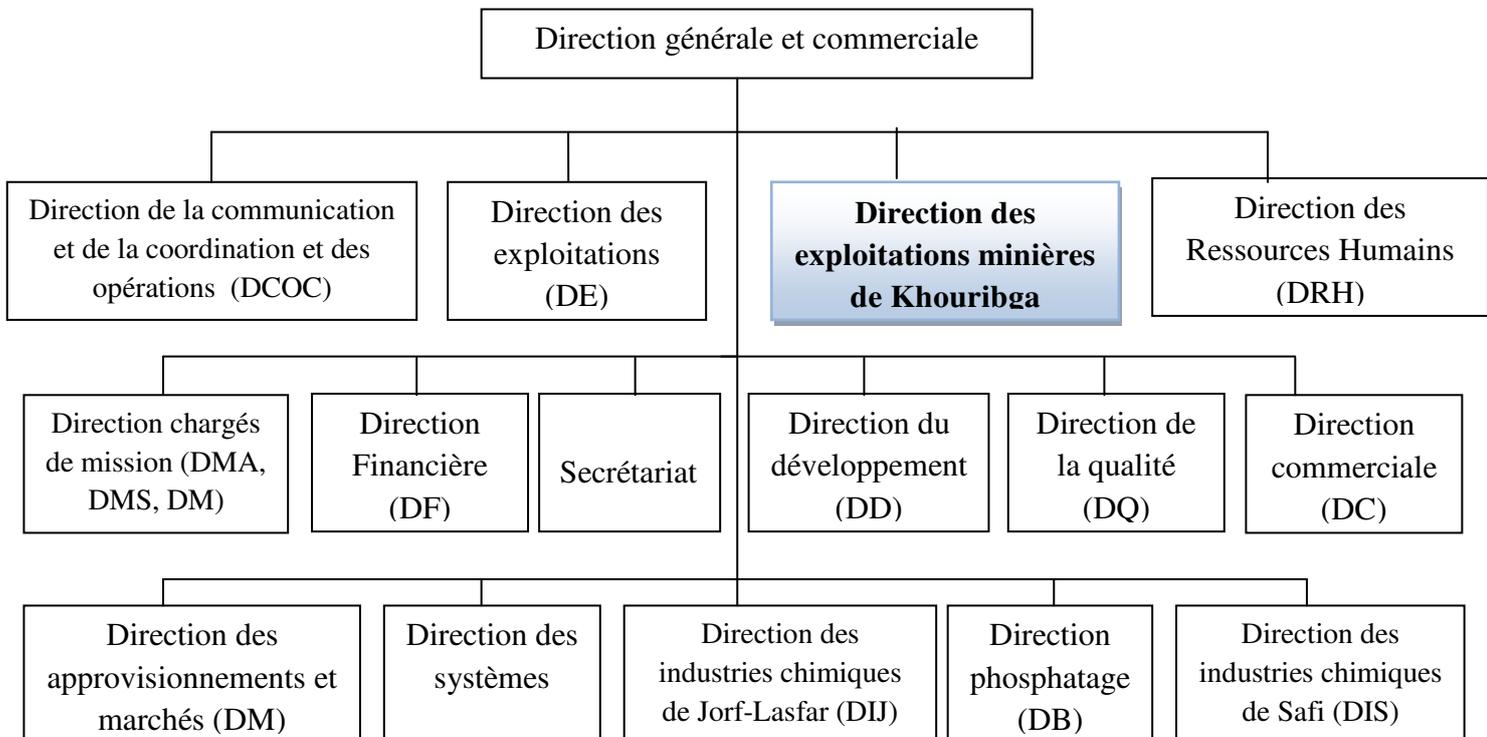


Figure 1 : Organigramme du groupe OCP.

III. Présentation de l'unité de Béni-Idir

L'usine de Béni-Idir se situe à 17 Km à l'Est de Khouribga, il a démarré en 1965 avec quatre fours sécheurs, et dans le cadre d'une extension de l'usine, quatre fours sécheurs ont été mis en service en 1970, cette usine est destinée au séchage du phosphate fourni par les unités d'extraction (Sidi Daoui, Parc El Wafi, Zone Centrale, etc.) sa capacité de production annuelle est d'environ 10.7 Millions de tonnes, elle est constituée des unités suivantes :

3.1. Unité de stockage du phosphate humide

Cette unité est d'une capacité de 270 000 tonnes, assure la fonction de la réception du phosphate humide provenant de la laverie, du criblage et du parc El Wafi. Elle est équipée de :

- Quatre machines de stockage (stockeuses).
- Deux machines de déstockage (roues pelles).

3.2. Unité de stockage du fuel

Cette unité est destinée à la réception et le stockage du fuel dans des réservoirs qui alimentent les chaudières et les fours sécheurs.

Ils ont une capacité de $2500m^3$ chacun, ils sont alimentés à partir des camions citernes par l'intermédiaire des pompes de dépotage, les deux réservoirs sont équipés de serpentins pour garder le fuel à une température de $60^{\circ}C$ dans le but d'éviter les difficultés de transport à travers les conduites.

3.3. Unité de chaufferie

Cet atelier est équipé de deux lignes de traitement des eaux et de deux chaudières pour la production de la vapeur nécessaire au préchauffage du fuel au niveau de stockage et des fours de séchage.

C'est là où il y'a la production de la vapeur chaude à partir de l'eau déminéralisé. La vapeur permet de réchauffer le fuel de $40^{\circ}C$ à $120^{\circ}C$, la température à laquelle il sera injecté dans le four.

3.4. Unité de stockage et chargement du phosphate sec

Le phosphate criblé alimente le circuit sec où il sera classé en différentes qualités, cette unité comporte trois stocks ayant une capacité globale de 500 000 tonnes.

Deux stations de chargement permettent de remplir les wagons à destination du port de Casablanca (exportation), et du port de Jorf Lasfar. Une moyenne de 10 trains part de l'usine chaque jour, chaque locomotive véhicule 60 wagons d'une capacité de 64 tonnes.

3.5. Unité de séchage

Elle comprend huit fours sécheurs d'une capacité de 300 tonnes par heure chacun. Son rôle est de diminuer, par échange thermique, l'humidité contenue dans le phosphate brut ou lavé.

Nous pouvons représenter le circuit du procédé par la figure 2 :

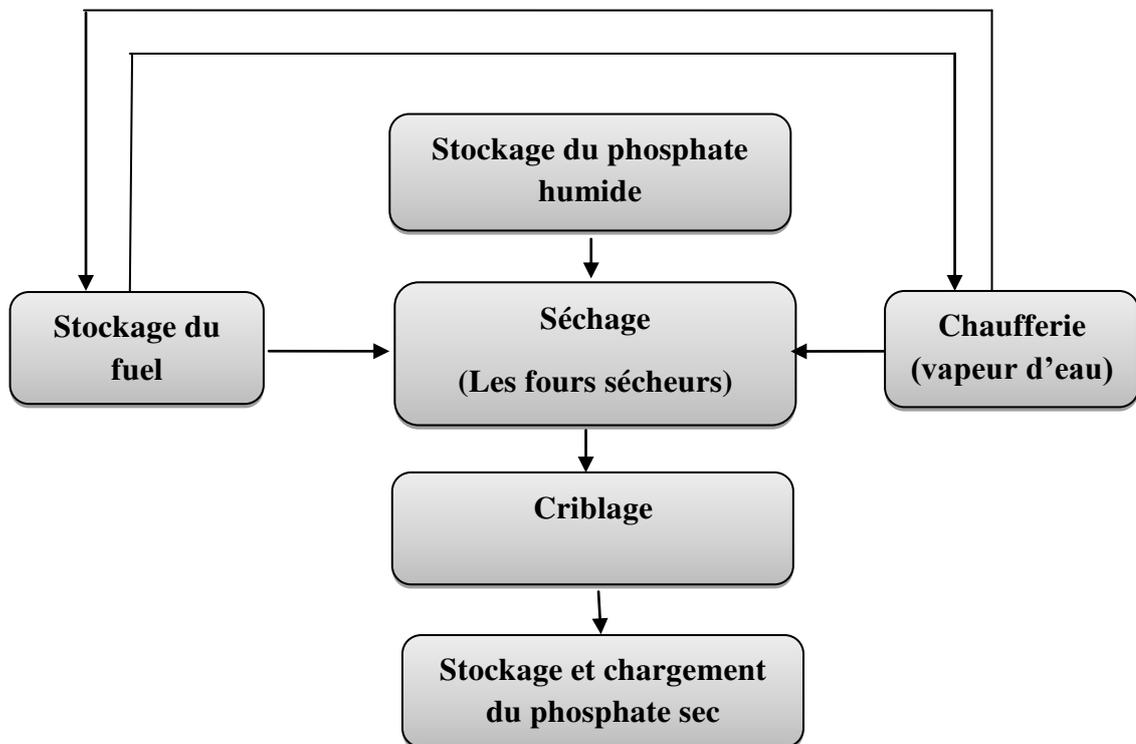


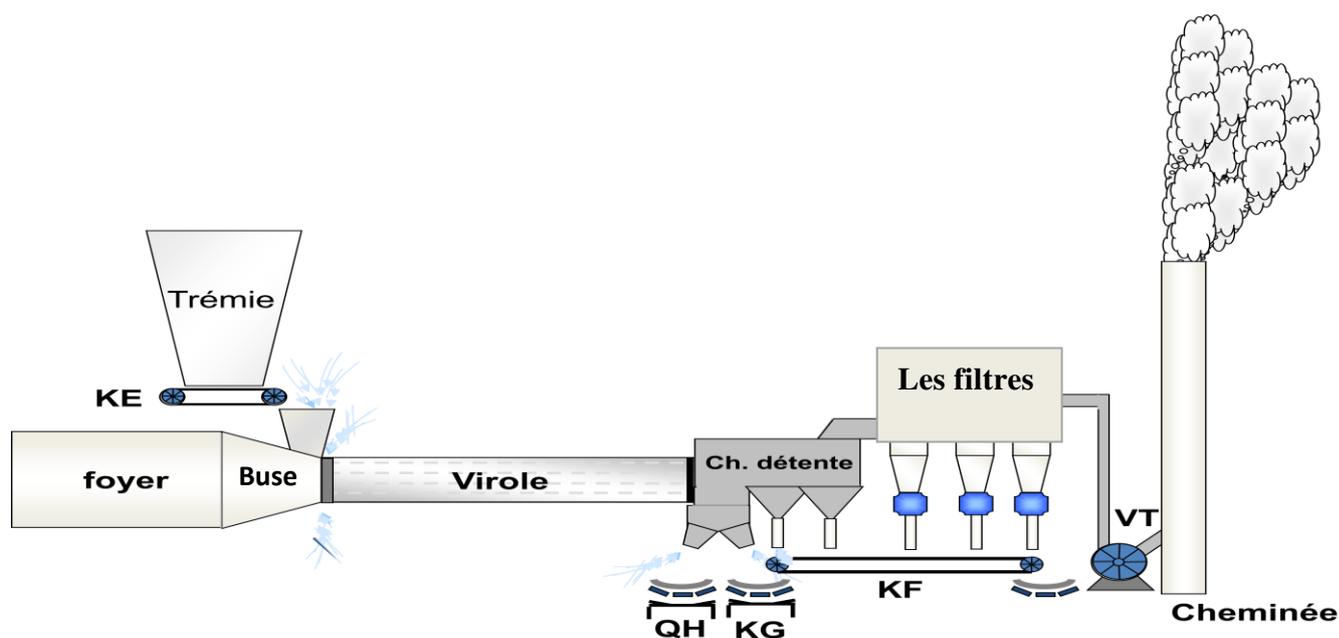
Figure 2 : Schéma du procédé de l'unité de Béni-Idir

IV. Description du four sécheur

4.1. Constitution du four sécheur

Le four sécheur comprend essentiellement les parties suivantes :

- Le réchauffeur.
- Le foyer ou la chambre de combustion.
- La buse.
- Le tube sécheur ou la virole.
- La chambre à poussière.
- Les ventilateurs de tirage.
- La cheminée.



19

Figure 3: Schéma synoptique du four sécheur.

4.1.1. Le réchauffeur

Avant l'injection dans la chambre de combustion, le fuel doit être préchauffé jusqu'à sa température d'inflammation qui est à l'ordre de 120 °C, à l'aide d'un échangeur thermique qui utilise la vapeur d'eau produite par la chaudière.

4.1.2. Le foyer

C'est une enveloppe cylindrique en tôle d'acier avec extrémité conique, elle est munie de quatre roues permettant son déplacement sur deux rails, elle est revêtue intérieurement de trois couches de briques réfractaires isolantes afin de limiter la diffusion de chaleur vers l'extérieur et protéger les tôles d'acier contre la fonte. Ce cylindre est de 14.4 m de longueur, 3 m de diamètre interne et un volume de $74m^3$. C'est dans cette enceinte où se fait la combustion, source de la masse gazeuse chaude utilisée pour le séchage du produit.

En amont du foyer on trouve :

- Une conduite pour l'injection du fuel.
- Une conduite d'air comprimé injecté avec le fuel dans un brûleur pour l'atomisation ou la pulvérisation du fuel afin de faciliter le mélange de ce dernier avec l'air primaire et ainsi favoriser sa combustion.

- 24 carneaux pour l'admission de l'air secondaire nécessaire pour le refroidissement des briques et l'augmentation du débit de la masse gazeuse chaude qui véhicule la chaleur dans le tube sécheur, son admission est faite par le moyen de la dépression créée par les ventilateurs de tirage.
- Des yeux de sécurité pour contrôler la flamme.
- Un détecteur de flamme (cellule photoélectrique) : sert à indiquer la présence de la flamme dans le foyer.
- Le brûleur qui est un élément très important, il permet de pulvériser le fuel à l'aide d'air comprimé afin d'assurer une bonne combustion en augmentant la surface de contact du comburant et de l'air primaire.

Pour assurer cette fonction de pulvérisation, il faut garder le bon fonctionnement de la partie la plus sensible dans le brûleur qui s'appelle le gicleur, dans notre cas le gicleur est composé de quatre parties rassemblées dans le terme MEPA :

- **M** : Multibuse
- **E** : Émulseur
- **P** : Pastille
- **A** : Atomiseur

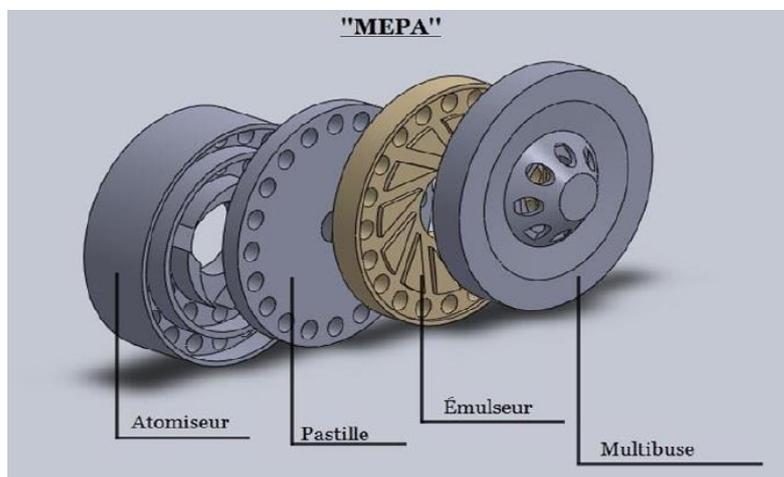


Figure 4: Le gicleur du brûleur.

4.1.3. La buse

C'est un élément intermédiaire entre le foyer et la virole, il joue un rôle très important dans l'adaptation de la chaleur entre ces deux parties, en plus il représente le lieu principal qui reçoit le phosphate de la trémie.

4.1.4. La virole

La virole est un tube cylindrique, de 25m de longueur, de 2,5m de diamètre. Elle est animée d'un mouvement de rotation constante (8tr/mn autour de son axe) par un moteur électrique entraînant une couronne solidaire de la virole. L'intérieur de la virole est équipé de 366 augets et 66 palettes. Les palettes servent à avancer le produit le long du tube. Les augets font tomber le phosphate sous forme de pluie afin de faciliter l'attaque par la masse gazeuse chaude, pour faciliter l'échange thermique.

4.1.5. La chambre à poussière

La chambre à poussière est le premier élément attaqué par le produit sec, elle contient deux parties :

- **La chambre de détente :** C'est une enceinte située juste à la sortie de la virole. La section de la chambre est plus grande que le diamètre du tube sécheur (virole).

La vitesse des gaz poussiéreux baisse brusquement, les grosses perdent d'altitude et finissent par tomber dans les trémies installées pour les récupérer. Les autres particules plus fines continuent leur mouvement vers les filtres à manches.

- **Les filtres à manches :** La récupération des particules fines se passe au niveau du filtre à manches, le ventilateur de tirage crée une dépression à l'intérieur des manches, ce qui amène ces particules à se déposer sur les manches, un système séquentiel de secouage fait secouer ces filtres.

4.1.6. Les ventilateurs de tirage

Deux ventilateurs (entraînés par deux moteurs électriques, pilotés par des variateurs de vitesse) permettent de régler la vitesse du séchage en agissant sur la vitesse de déplacement de la masse gazeuse.

4.1.7. La cheminée

Elle sert à évacuer la vapeur d'eau due au séchage et le phosphate sous forme de poussière non récupérable.

Le produit ainsi traité est récupéré à la sortie du four. Un convoyeur achemine le phosphate séché vers les stocks du phosphate sec. Un autre convoyeur sert à transporter les déchets du phosphate vers le stock du rejet.

4.2. Le fonctionnement du four sécheur

Après avoir été transporté des sources vers l'usine de Béni-Idir par des convoyeurs à bandes, le phosphate est stocké, à l'aide des stockeuses, dans le parc humide. Puis il sera transporté par des roues pelles qui se chargent de le mettre sur des convoyeurs reliés entre eux par des trémies de stockage, le phosphate atteint la goulotte et tombe dans la virole (tube sécheur) où il est attaqué par la masse gazeuse chaude produite dans le foyer du four sécheur à base de la combustion du fuel. Ce dernier mélangé avec l'air de pulvérisation, est injecté à une température voisine de 120°C et sous une pression de 30 bars avant d'être en contact dans le foyer avec l'air primaire issu du ventilateur d'air primaire (VRB).

La virole tourne et le produit avance à l'aide des palettes fixées sur sa surface intérieure, et pulvérisé grâce aux augets, il arrive à la chambre de détente où se fait la sélection grâce à la dépression créée par les ventilateurs de tirage.

Les grosses particules sont récupérées dans la chambre tandis que les fines dans les filtres à manches, pour ne laisser passer dans la cheminée que les gaz de combustion et la vapeur d'eau.

V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement le groupe OCP ainsi que l'unité de Béni-Idir, et nous avons décrit les fours sécheurs, leurs composants et leur fonctionnement.

Pour traiter ce sujet d'une manière structurée, nous allons utiliser la démarche DMAIC (Définir; Mesurer; Analyser; Innover; Contrôler), et le chapitre suivant sera la première phase de la démarche pour bien identifier le problème.

I. Introduction

Nous séchons le phosphate dans le but d'augmenter sa teneur par élimination de l'eau en vue de minimiser le coût de transport et faciliter son exploitation, le coût de séchage par le fuel est très élevé et constitue une charge importante sur le prix de revient. Il est donc nécessaire de mener une étude détaillée pour présenter l'ampleur du problème d'optimisation, de plus une définition claire des objectifs afin de mieux structurer la démarche de résolution.

II. Sélection du problème

2.1. Les dépenses au niveau de l'unité de séchage Béni-Idir

En se basant sur une base de données donnant les différentes informations relatives au coût de revient de Béni-Idir pendant l'année de 2017, nous avons pu tracer le secteur suivant qui présente la répartition du coût de revient en pourcentage par structure de dépenses.

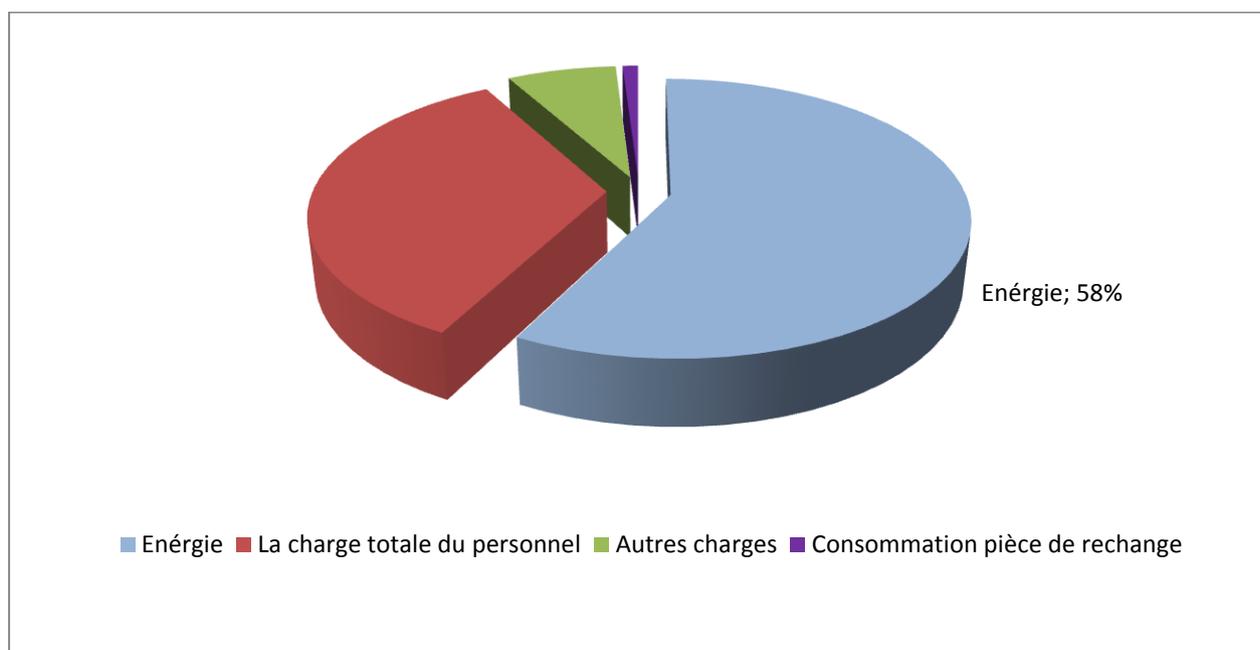


Figure 5 : Coût par structure des dépenses.

Nous pouvons remarquer que l'énergie présente 58% des dépenses de séchage, constituant une charge importante sur le coût de revient.

2.2. La consommation énergétique de Béni-Idir

Nous remarquons que l'énergie présente un pourcentage très élevé du coût, il convient donc de faire une répartition des dépenses énergétiques sur les différents postes de consommation de l'énergie. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le secteur de la figure 6 :

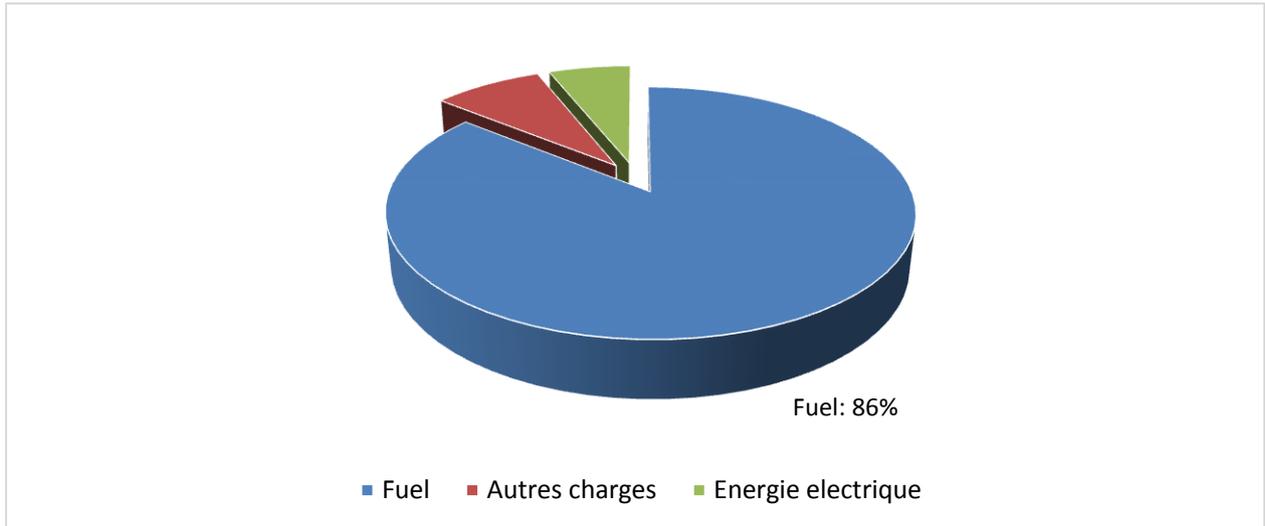


Figure 6: Répartition des dépenses énergétiques sur les différents postes de consommation.

Alors nous pouvons conclure que le fuel pèse lourdement sur le budget de l'unité de Béni-Idir, il atteint un pourcentage de 86% des dépenses énergétique.

2.3. La consommation du fuel par stade de production

Il est très clair maintenant que le fuel intervient le plus dans le prix de revient de la tonne séchée du phosphate, mais sachant que dans l'unité de Béni-Idir, le fuel est utilisé pour la production de la vapeur au niveau de la chaudière, ainsi que dans les fours sécheurs il faut savoir à quel stade de production le fuel est consommé **le plus**.

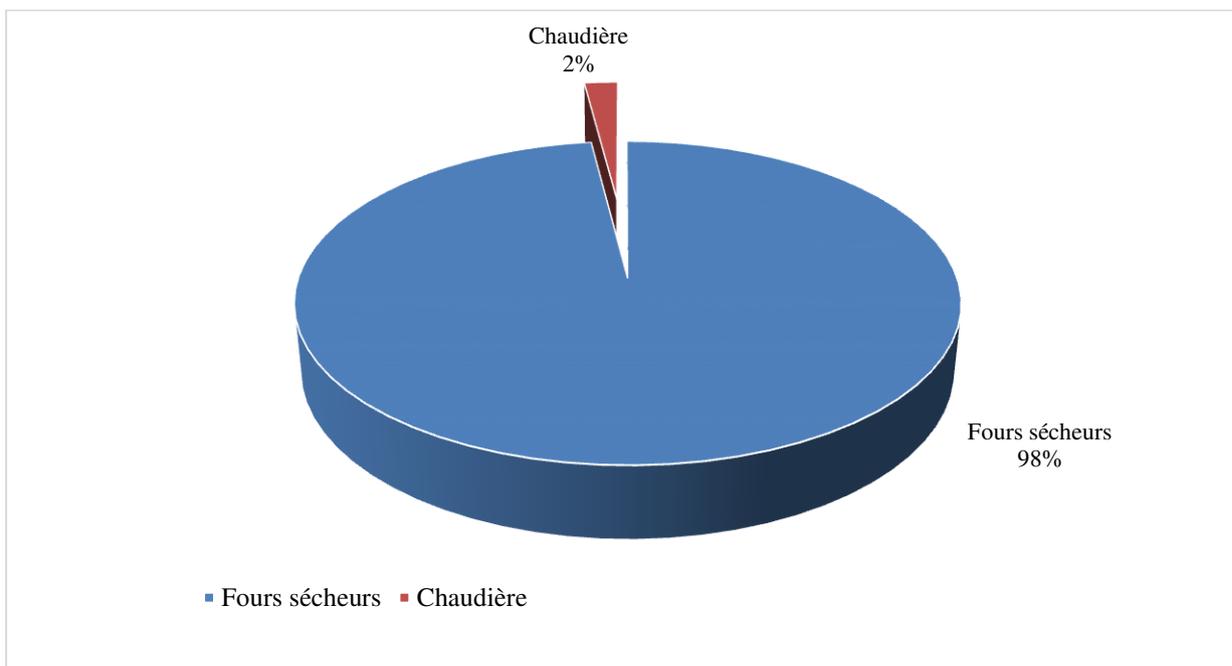


Figure 7: Consommation du fuel par stade de production.

D'après ce qui est illustré dans les graphes précédents nous pouvons conclure que les fours sécheurs sont les grands consommateurs du fuel avec un pourcentage de 98% du prix de revient de la tonne traitée à l'unité de séchage Béni-Idir.

III. Clarification du problème

La consommation spécifique C_s est la masse de fuel nécessaire pour sécher une tonne de phosphate, elle s'exprime par :

$$C_s = \frac{D_f}{D_{ph}} [Kg/T] \quad (1)$$

Où :

- D_f : Débit du fuel .
- D_{ph} : Débit du phosphate sec.

Pour avoir une idée sur le comportement de la consommation spécifique il est nécessaire de bien définir le problème, c'est pour cette raison que la première phase de la démarche DMAIC a été faite. Elle permet de faire ressortir la problématique du projet et de le cerner en délimitant son périmètre et en fixant ses objectifs.

Le tableau 1 présente la moyenne de cette consommation ainsi que sa prévision pour les années 2016 et 2017 :

Fours	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Moyenne	Prévision
2016	13,88	10,52	10,83	10,38	11,35	12,05	12,77	11,32	11,15	11,4
2017	11,73	11,46	12,5	10,18	12,55	12,8	11,27	11,71	11,75	11,3

Tableau 1 : Consommation spécifique et prévision pour l'année 2016 et 2017.

Nous remarquons que l'objectif a été atteint pour l'année 2016 (la moyenne de la consommation spécifique est inférieure à celle de la prévision). Pour 2017 la valeur atteinte (11.75) a dépassé la prévision qui était de 11.3, d'où la nécessité d'intervenir pour atteindre l'objectif de 2018 qui est fixé à **11.4**.

L'enjeu du projet est donc l'optimisation de la conduite des fours sécheurs afin de :

- Maîtriser les différents paramètres de marche des fours.
- Avoir une consommation spécifique optimale.
- Assurer un pilotage efficace de l'atelier de séchage.

IV. Identification du problème et planification du projet

➤ Identification du problème

La clarification et le développement du problème nécessite l'utilisation des outils de la qualité, tel que le QOOQCP (Quoi, Qui, Où, Quand, Comment et Pourquoi).

QOOQCP	Réponses
Quoi ? <i>De quoi s'agit-il ?</i>	Non maîtrise de la consommation du fuel.
Qui ? <i>Qui est concerné par ce problème ?</i>	Unité de séchage.
Où ? <i>Où apparaît le problème ?</i>	Fours sécheurs.
Quand ? <i>Quand apparaît le problème ?</i>	Le problème existe toujours.
Comment ? <i>Comment mesurer le problème et ses solutions ?</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution de la consommation spécifique par rapport aux objectifs mensuels et annuels • L'utilisation de l'approche DMAIC ; • Les cartes de contrôle ; • Recherche des actions d'amélioration.
Pourquoi ? <i>Pourquoi résoudre ce problème ?</i> <i>Quels enjeux quantifiés ?</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire le coût séchage ; • Amélioration continue ; • Améliorer la productivité ; • Contrôler des paramètres qui influencent sur la consommation du fuel.

Tableau 2 : Identification du problème-QOOQCP.

➤ Planning du projet

Avant de commencer le travail, il fallait situer les différentes tâches du projet selon la durée du stage, pour cela nous avons réalisé le planning suivant en utilisant le diagramme Gantt.

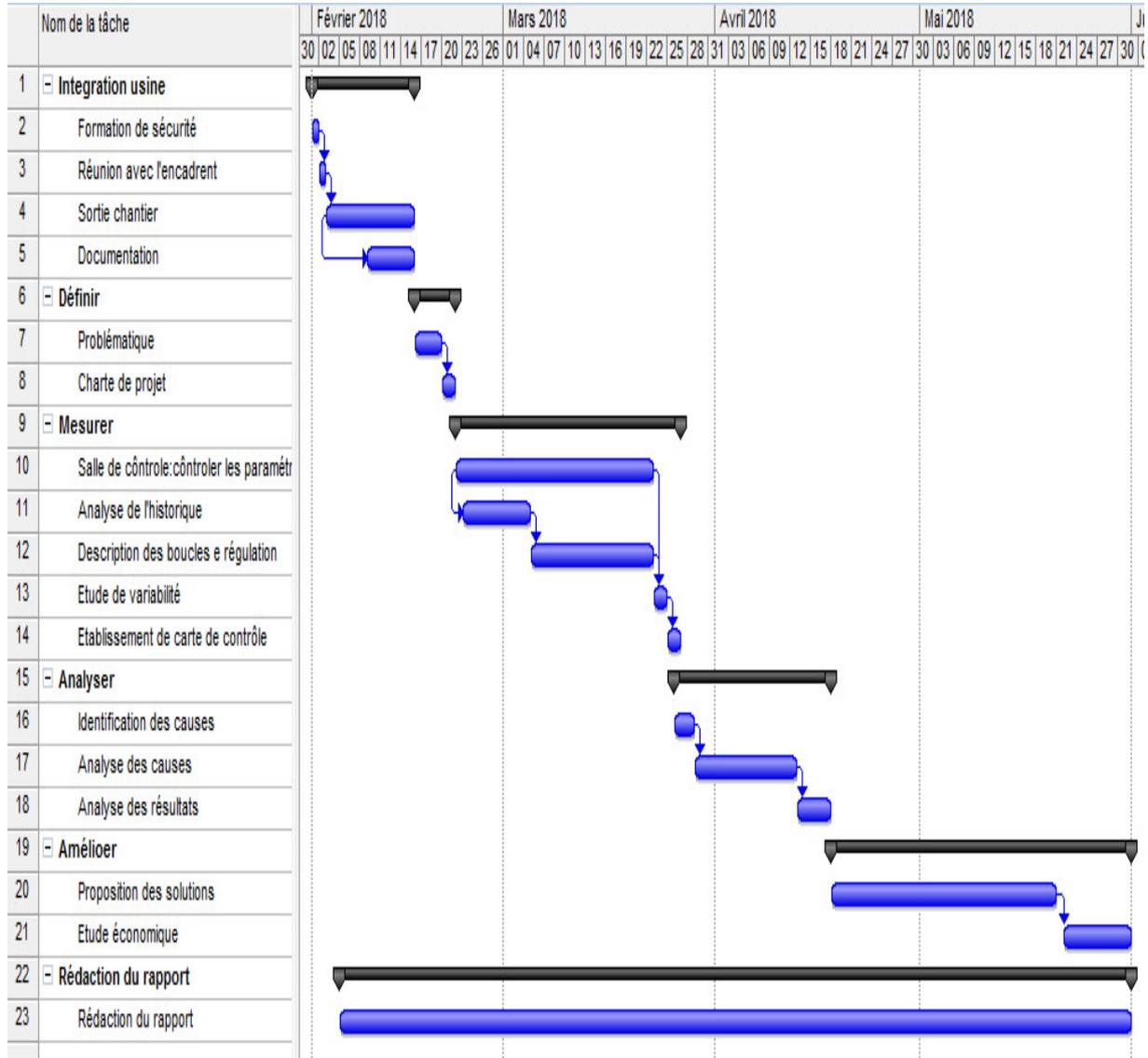


Figure 8: Planning du projet.

V. La charte de projet

La Charte de Projet dans le management de projet est une des tâches les plus importantes pour formellement autoriser un projet. Le but de la Charte de Projet, quand on organise des projets et des programmes, est de détailler la vision complète du projet, ses objectifs, son périmètre, etc.

Charte du projet			
Nom du projet : Optimisation de la conduite des fours sécheurs		Equipe de projet	Début et fin de projet
Leader de projet	MAZZAL Hamid	TAFZA Hajar	01/02/2018 à 31/05/2018
Présentation synthétique du projet		Objectifs	
L'optimisation de la consommation de fuel par la bonne maîtrise des paramètres de marche des fours sécheurs afin d'assurer un pilotage efficace de l'atelier de séchage.		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Savoir les paramètres clés pour la saturation d'un four sécheur. ▪ Déterminer leurs valeurs limites. ▪ Donner des actions pour réduire les variations hors limite 	
Périmètre technique		Hors Périmètre technique	
Les fours sécheurs		Chaudière, Stock amont, stock aval, et dépotage de fuel.	
Critères de succès de projet		Les contraintes du projet	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Respecter le délai consacré pour chaque tâche. ▪ Ne pas absenter souvent ▪ Travailler en équipe 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Acquérir des nouvelles connaissances techniques. ▪ Bien cerner l'ensemble des procédés constituant le processus de séchage du phosphate. ▪ Attendre la collecte d'une base de données suffisante pour traiter les données. 	

Tableau 3 : La charte du projet.

VI. Conclusion

L'usine de séchage s'intéresse à une stratégie qui vise à contrôler les paramètres les plus critiques du fonctionnement des fours pour atteindre l'objectif de la consommation spécifique de l'année 2018, ces paramètres sont :

- Le débit du produit ;
- Le débit du fuel ;
- La température de la buse ;
- La température de la chambre ;
- La température de sortie des filtres ;
- La dépression.

L'objectif est maintenir la stabilité du processus dans le temps, et atteindre les gains suivants :

Les gains attendus non mesurables :

- Suppression de la variabilité ;
- Suppression des causes spéciales ;
- Diminution des causes communes ;
- Amélioration des performances de séchage;
- Suivi des paramètres critiques.

Les gains attendus mesurables :

- Diminution de la consommation spécifique;
- Meilleure qualité et fiabilité du produit fini.

Dans le chapitre suivant, nous allons évaluer la situation actuelle du processus par l'étude de la variabilité de la consommation spécifique de fuel et les différents paramètres de marche pour savoir est ce que le processus est sous contrôle en utilisant les cartes de contrôles.

I. Introduction

Cette étape est très importante dans la logique DMAIC car elle se focalise sur la mesure des paramètres qui reflètent la problématique du projet, son objectif est de collecter les données nécessaires pour construire une base de comparaison entre l'état de la consommation actuelle et l'état de la consommation finale, dans cette étape nous allons établir les cartes de contrôle des différents paramètres étudiés en se basant sur des données représentatives.

Alors une collecte des données s'avère nécessaire afin de mieux refléter l'état actuel du procédé de séchage. Les données aux quelles nous avons besoin sont :

- La consommation spécifique du fuel pour l'année 2017 ;
- Les différents paramètres de marche des fours du mois Mars 2018 ;

Les extraits des fichiers Excel contenant les informations present des rapports journaliers de suivi de la production, sont disponible dans l'**Annexe**.

II. La variation de la consommation spécifique du fuel

2.1. Test de variabilité de la consommation spécifique

Nous avons testé la normalité des données à l'aide de la droite de Henry qui permet d'apprécier l'adéquation d'une distribution à la loi normale, en utilisant le logiciel MINITAB qui est un outil privilégié pour la Gestion de la Qualité des produits.

Ce test est basé sur la comparaison de la forme de l'échantillon (nuage de point) à la distribution normale. À l'issue de cette comparaison, un nombre appelé « P-value » est calculé. La décision est prise en comparant la valeur « P-value » du test avec le risque de première espèce α [1]. Généralement, si la valeur de P d'un jeu de données est au-dessous d'une valeur de α prédéterminée (généralement 0,05), les scientifiques rejettent l'« hypothèse nulle » de leurs expériences, autrement dit, ils élimineront l'hypothèse selon laquelle les variables testées au cours de leurs expériences n'ont aucun effet significatif sur les résultats [2].

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 9:

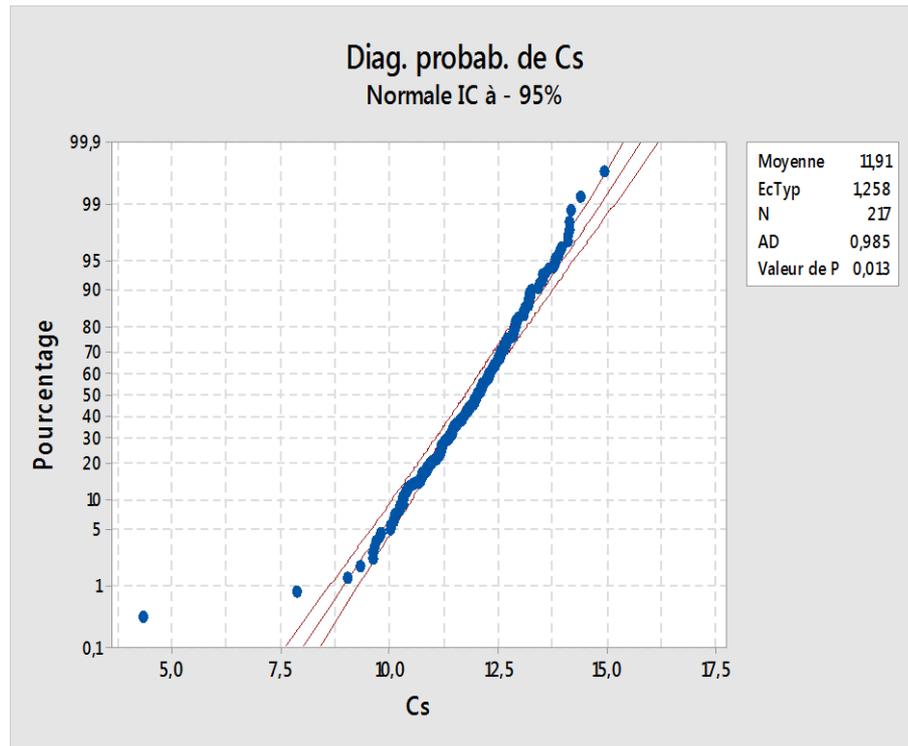


Figure 9 : Le diagramme de probabilité pour la consommation spécifique.

Où :

- **N** : Le nombre total de valeurs observées.
- **AD** : L'écart entre la ligne ajustée centrée et le nuage des points.
- **P** : La probabilité qui mesure le degré de certitude avec lequel il est possible de dire que les données ne suivent pas la loi normale.

D'après la figure 9 nous remarquons que les points de données s'écartent de la ligne droite ainsi que la valeur de P est inférieure à la valeur de alpha (0.05), ce qui montre que les données ne suivent pas une loi normale, d'où la nécessité d'appliquer la transformation de Johnson pour obtenir des données ajustées à cette loi.

2.2. Normalisation des données

Pour transformer les données nous avons utilisés la transformation de Johnson, cette dernière permet de trouver la meilleure transformation normalisante à l'aide des formules compliquées.

Deux transformations sont utilisées [3] :

- La transformation bornée (définie sur l'intervalle] $e ; e + c$ [) :

$$a + b \cdot \ln\left(\frac{x - e}{c + e - x}\right)$$

- La transformation non bornée :

$$a + b \cdot \sinh^{-1} \left(\frac{x - e}{c} \right) \quad \forall x$$

Avec : a, b, c et e sont des paramètres à estimer.

Minitab affiche les paramètres de la fonction de transformation de Johnson produisant le meilleur ajustement. Il utilise cette fonction pour transformer les données initiales et peut aussi les stocker dans la feuille de travail [5].

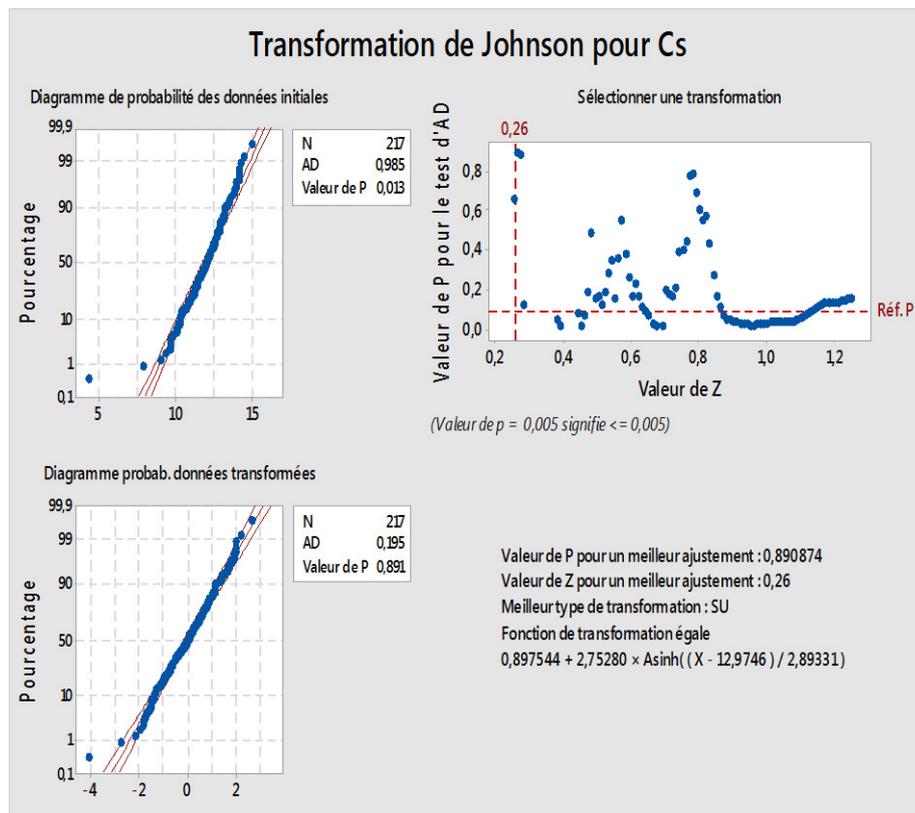


Figure 10: Transformation de Johnson pour la consommation spécifique.

D’après la figure 10 nous remarquons que la transformation utilisée est la transformation non bornée avec la fonction :

$$0,897544 + 2,75280 * \sinh^{-1} \left(\frac{X - 12,9746}{2,893331} \right)$$

Les nuages des points après la transformation de Johnson sont plus alignés avec la courbe de la loi normale et la valeur de p est supérieure à 0,05.

Donc, les résultats de cette transformation seront utilisés pour mesurer la capabilité.

2.3. Mesure de capabilité

Après avoir vérifié la normalité des données et les ajusté en utilisant la transformation de Johnson, nous allons calculer la capabilité actuelle du processus.

Les limites de spécification de l'entreprise sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LSI} = 10.5 \\ \text{LSS} = 12.5 \end{array} \right.$$

Nous devons transformer les limites de spécification en utilisant la fonction de la transformation de Johnson :

$$f(X) = 0,898 + 2,753 \times \text{Asinh}((X - 12,975) / 2,893)$$

Alors nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{LSI} = -1.23676575 \\ \text{LSS} = 0.447993179 \end{array} \right.$$

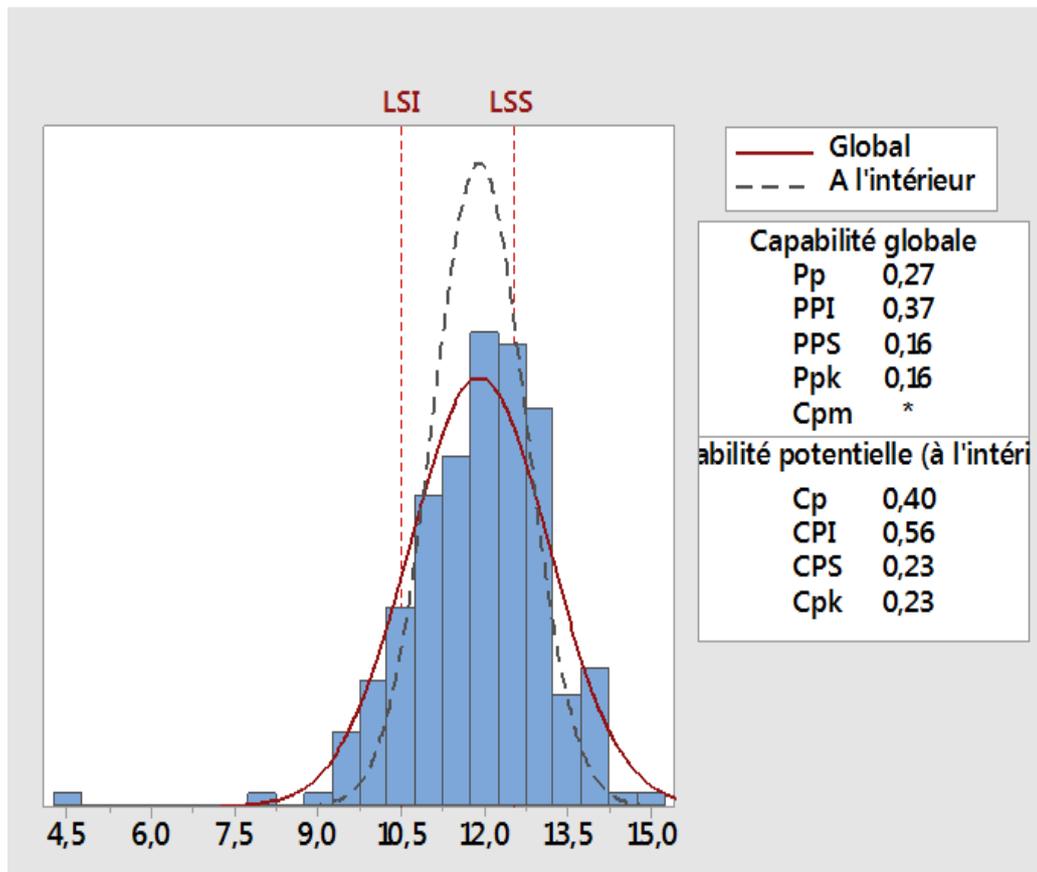


Figure 11: Mesure de capabilité actuelle.

Les indices de capabilité court terme trouvés sont :

- La capabilité du procédé : $C_p = 0,4 < 0,67$
- L'indicateur du centrage : $C_{pk} = 0,23 < 0,67$

Les valeurs obtenues sont inférieures à 0.67, donc le procédé est non capable et les données sont dispersées et décentrées autour de la moyenne, nous pouvons conclure aussi qu'il y a des fluctuations qu'il faut éliminer. Une surveillance des paramètres de marche, qui ont une influence directe sur cette consommation, par carte de contrôle s'impose.

2.4. Les cartes de contrôle statistiques

Cette phase d'observation consiste à remplir une carte de contrôle sur laquelle aucune limite n'aura été portée (carte d'observation).

Pour donner une meilleure idée du comportement du processus, nous avons choisi de présenter les données observées sur les graphiques de la moyenne et l'étendue.

Le graphique 12 représentant la moyenne :

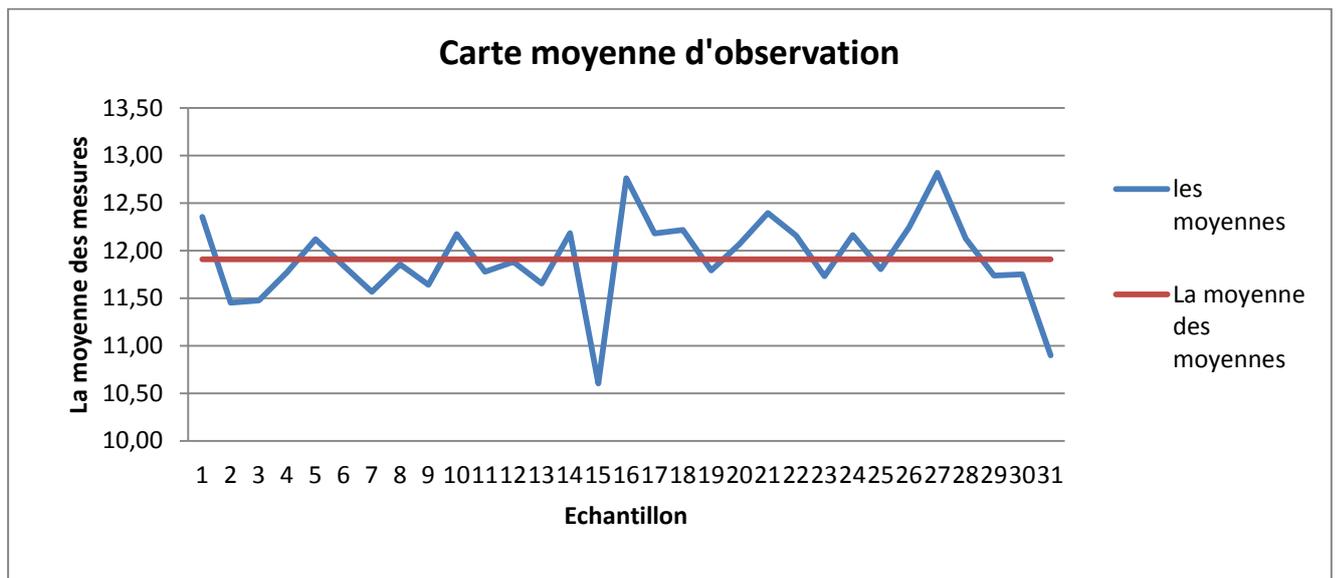


Figure 12: *Carte d'observation de la moyenne pour la consommation spécifique.*

Le graphique 13 représentant l'étendue :

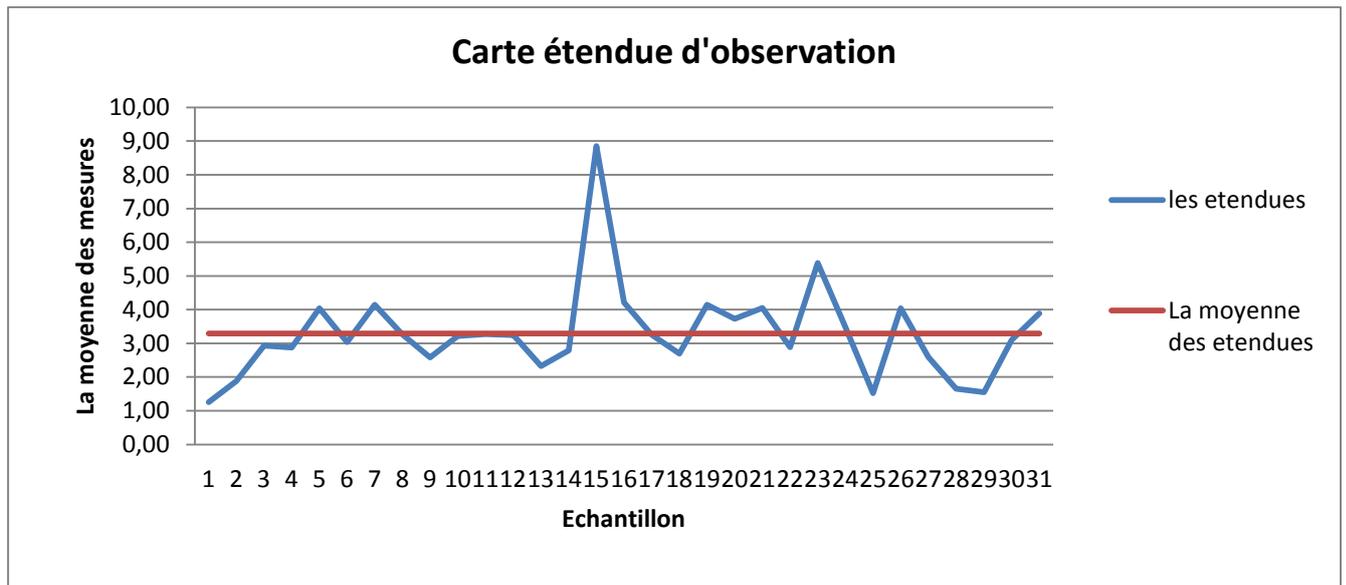


Figure 13 : Carte d'observation de l'étendue pour la consommation spécifique.

2.5. Conclusion

Nous déduisons que le processus est hors contrôle car il est non capable et la consommation spécifique est non stable (une grande variation autour de la moyenne dans les cartes d'observation), donc pour maîtriser cette variabilité nous devons établir les relations d'interdépendances entre les différents paramètres qui influencent cette consommation pour cela nous allons faire une description des boucles de régulation existantes dans le paragraphe suivant.

III. Description des boucles de régulation existantes

Les fours sécheurs de Béni-Idir sont équipés par des chaînes de régulation analogiques de type P.I.D, leur conduite est actuellement assurée par cinq boucles de régulation principales, à savoir:

- Boucle de régulation de la température de la buse par le débit du produit.
- Boucle de régulation de la température de la chambre par le débit du fuel.
- Boucle de régulation de la dépression.
- Boucle de régulation du préchauffage du fuel.
- Boucle de régulation du débit du fuel.

3.1. Boucle de température de la chambre avec le débit du fuel

La température au niveau de la chambre à poussière peut être régulée à une valeur désirée par action sur une grandeur physique qui est le débit du fuel.

Le capteur utilisé pour mesurer la température de la chambre est un thermomètre à résistance de platine PT100 qui est basé sur la variation de la résistance laquelle est directement liée à la variation de température, la valeur de référence du PT100 à 0°C ($R_0=100 \Omega$).

Le transmetteur scalaire convertie ce signal en un courant (4mA à 20mA) pour le transmettre vers un régulateur PID. Ce régulateur permet de corriger dans un délai convenable l'écart qui existe entre la consigne et son retour mesure afin d'envoyer un signal de commande sous forme d'un courant, qui permet de varier l'ouverture de la vanne pneumatique pour fixer le débit de fuel désirée.

La figure 14 représente la chaine de régulation de la température de la chambre par le débit du fuel :

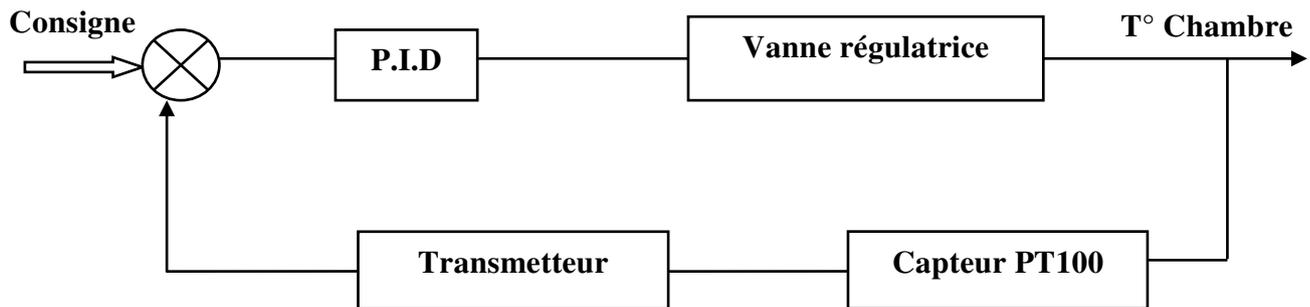


Figure 14 : Chaine de la température de la chambre par le débit du fuel.

3.2. Boucle de température de la buse avec le débit du produit

La température dans la buse est régulée en agissant sur le débit du produit au moyen d'un variateur de vitesse qui règle la vitesse du convoyeur.

La mesure de la température de la buse se fait grâce à un thermocouple de type K qui se compose de deux fils de métaux différents soudés à l'endroit où la température doit être mesurée. Alors ce capteur crée une différence de potentiel entre les fils, lequel augmente en même temps que la température. Cette tension est convertie en un courant dont la valeur est comprise entre 4mA et 20mA à l'aide d'un transmetteur scalaire, par la suite le régulateur PID fournit une correction à partir du signal d'erreur soit la différence entre ce que l'on veut et ce que l'on

mesure et délivre un signal de commande sous forme d'un courant (4mA-20mA) qui permet de varier la vitesse en utilisant le variateur de vitesse.

Le schéma fonctionnel de la boucle est représenté par la figure 15:

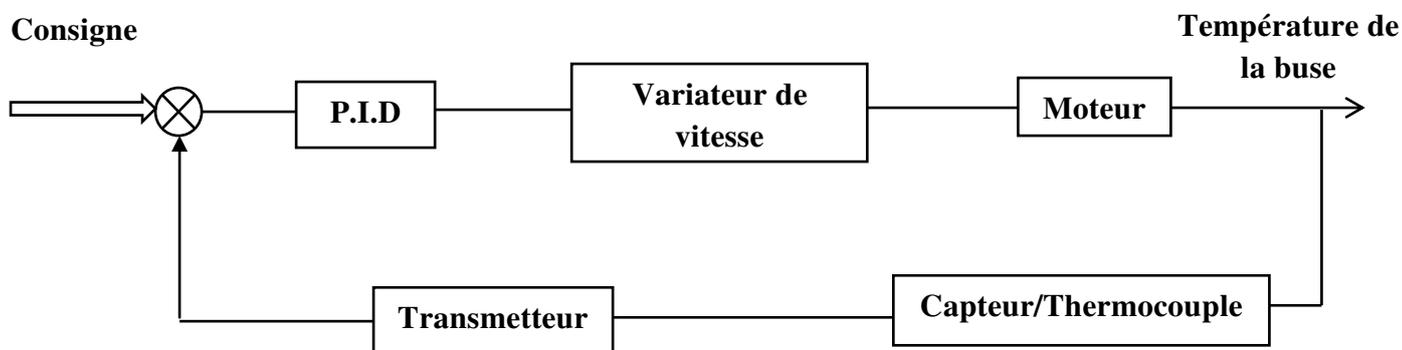


Figure 15: Chaîne de la température de la buse par le débit du produit.

3.3. Boucle de régulation de la dépression

Les deux ventilateurs de tirage ont pour rôle la création d'une dépression au niveau de la virole, la buse et la chambre de détente, pour faciliter l'écoulement des gaz chauds. Le choix de la dépression est pris de sorte à éviter l'étranglement du tube sécheur et permettre le meilleur temps de séjour du produit dans le tube (20 min). On prélève la dépression au niveau de la buse par le biais d'un capteur de dépression équipé d'un tube, ce capteur transmet un courant vers le régulateur qui effectue la comparaison entre la mesure prélevée et la consigne et délivre un courant qui sera converti par un convertisseur, par conséquent un servomoteur va agir par l'intermédiaire d'un vérin qui commande les vannes.

La figure 16 représente la chaîne de régulation de la dépression :

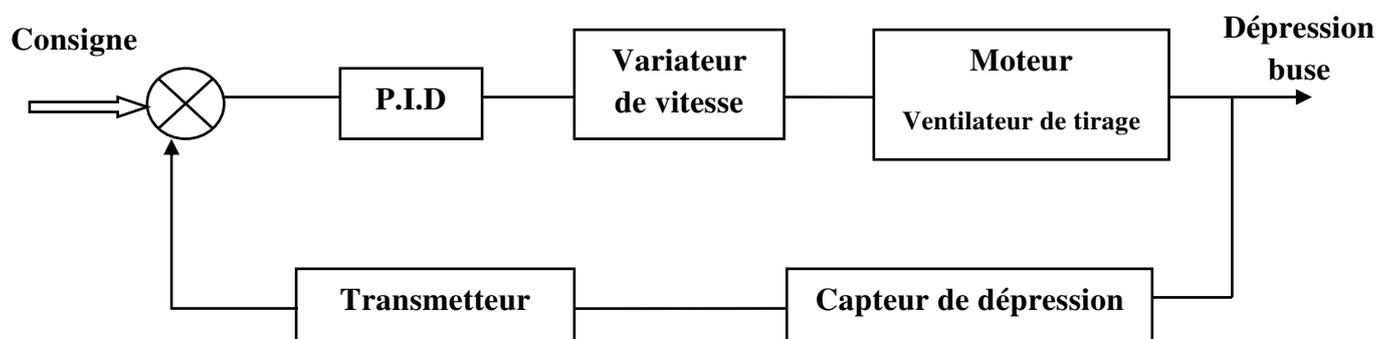


Figure 16: Chaîne de la dépression.

3.4. Boucle de préchauffage du fuel

La régulation de la température du fuel se fait par action sur la vanne qui détermine le débit de vapeur à l'entrée du réchauffeur du fuel. Cette chaîne se trouve juste avant le foyer, elle vise à garder la température du fuel constante à 120 °C.

Un capteur-transmetteur de la température du fuel transmet la mesure à un régulateur P.I.D qui commande l'ouverture de la vanne régulatrice pneumatique de débit de la vapeur d'eau servant au préchauffage du fuel par un échange thermique.

La figure 17 présente la chaîne de régulation de préchauffage du fuel :

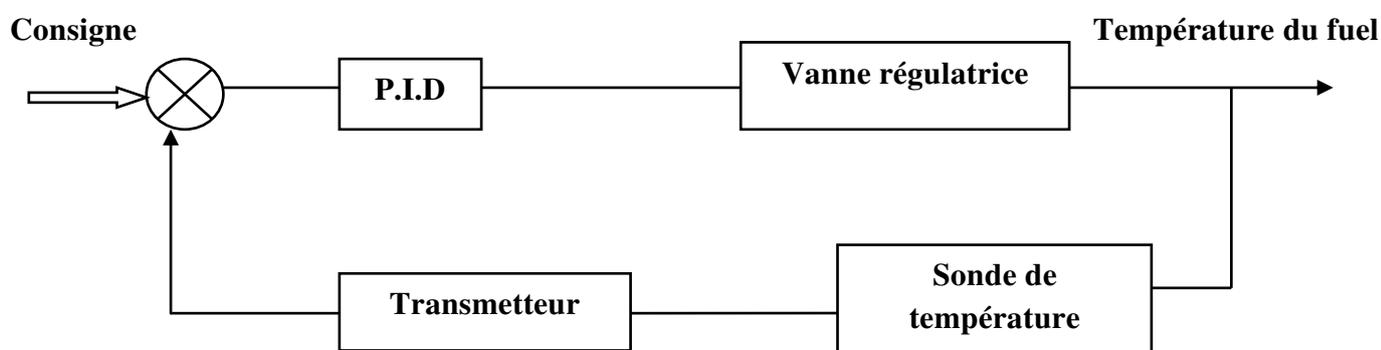


Figure 17: Chaîne de préchauffage du fuel.

3.5. Boucle de régulation de débit du fuel

Le débit du fuel est mesuré par un compteur volumétrique qui délivre un signal fréquentiel en fonction du débit entrant au four, ce signal sera converti en courant de 4-20 mA, ce dernier sera l'entrée de l'API, la sortie va agir sur une vanne régulatrice.

Le schéma de cette boucle est représenté par la figure 18 :

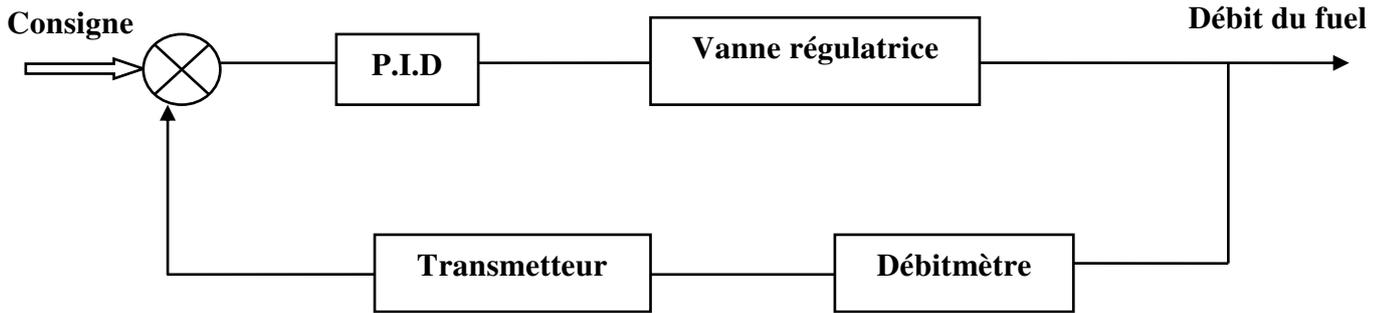


Figure 18: Chaîne de régulation du débit du fuel.

3.6. Conclusion

Ces boucles de régulation ne sont pas indépendantes mais elles réagissent les unes sur les autres par l'intermédiaire des interactions internes du système de commande général. En effet, la régulation des différents paramètres du four assure une bonne qualité du phosphate séché.

IV. La variabilité des paramètres de marche

4.1. Test de normalité

En ce qui concerne les cartes de contrôle, les données doivent être normales. Un écart modéré par rapport à la normalité n'influe pas de façon significative sur les résultats de la carte de contrôle. Toutefois, un écart important par rapport à la normalité peut augmenter le nombre de faux signaux hors contrôle [4], ce qui rend indispensable la vérification de la normalité des distributions avant l'établissement des cartes de contrôle, de même pour le calcul de la capacité du procédé.

En statistiques, les tests de normalité permettent de vérifier si des données réelles suivent ou non la loi normale. Ce sont ces tests qui permettent la mesure de capacité [6]. De ce fait, une étude de la normalité de nos données semble logique et nécessaire.

À l'aide du logiciel Minitab, nous avons testé la normalité des données à l'aide de la droite de Henry, les graphes obtenus pour les paramètres étudiés sont présentés sur les figures suivantes :

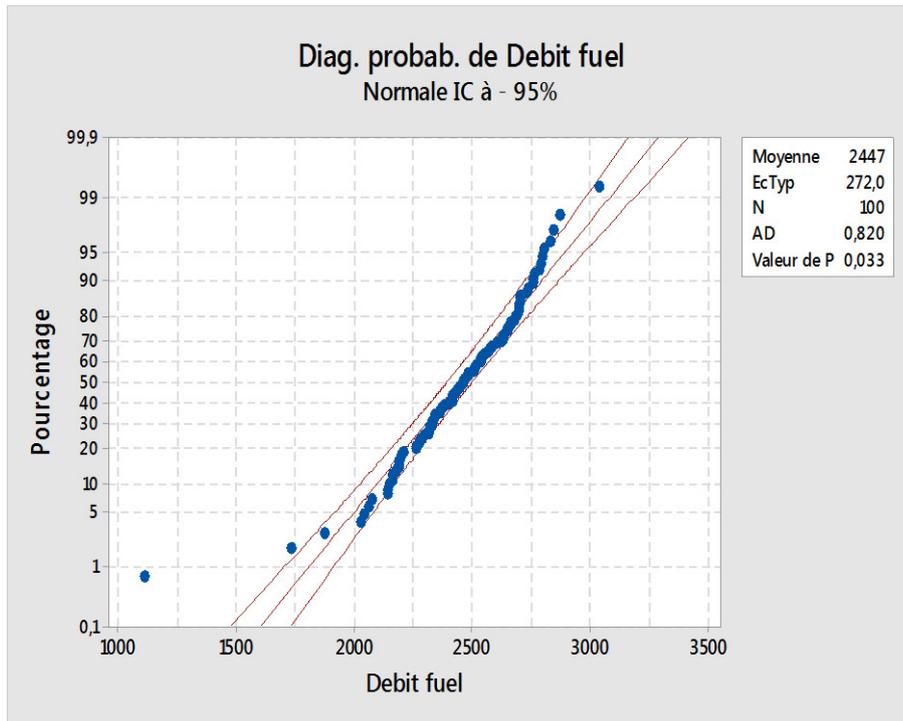


Figure 19 : Le diagramme de probabilité pour le débit du fuel.

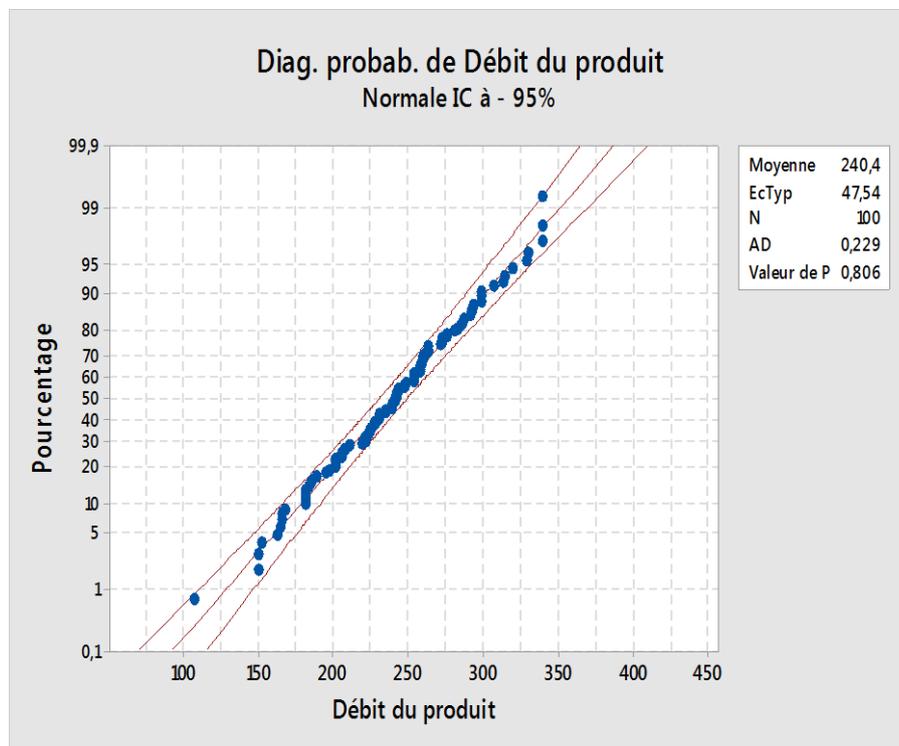


Figure 20: Le diagramme de probabilité pour le débit du produit.

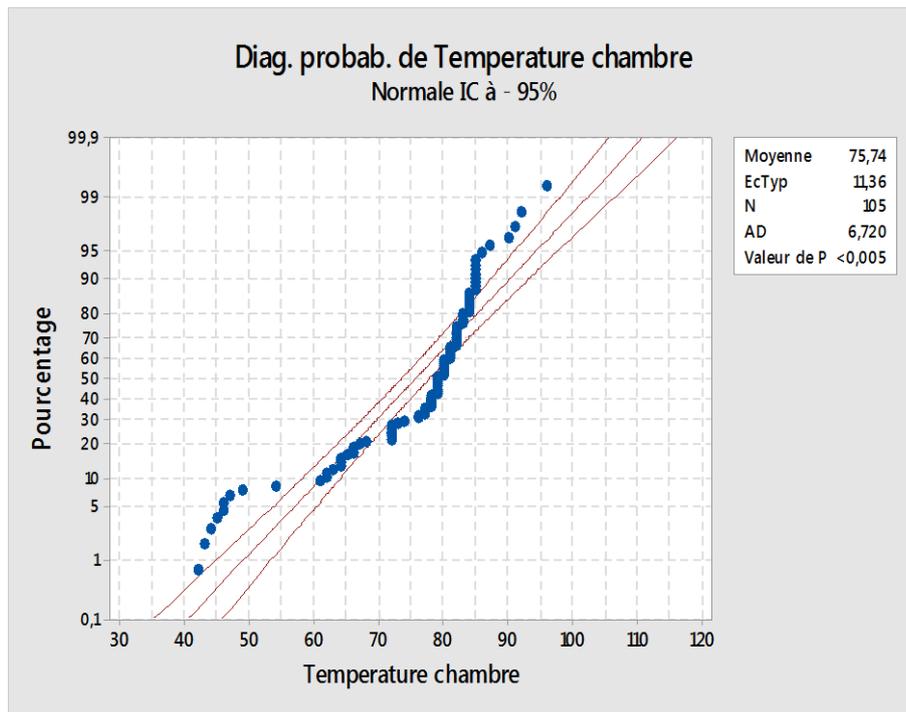


Figure 21: Le diagramme de probabilité pour la température de la chambre.

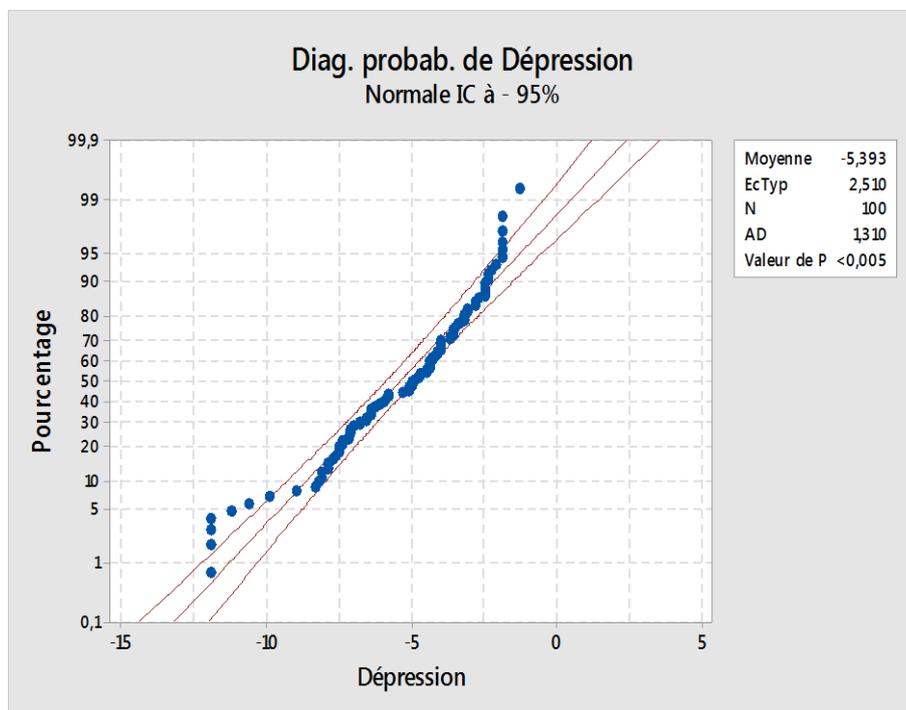


Figure 22 : Le diagramme de probabilité pour la dépression.

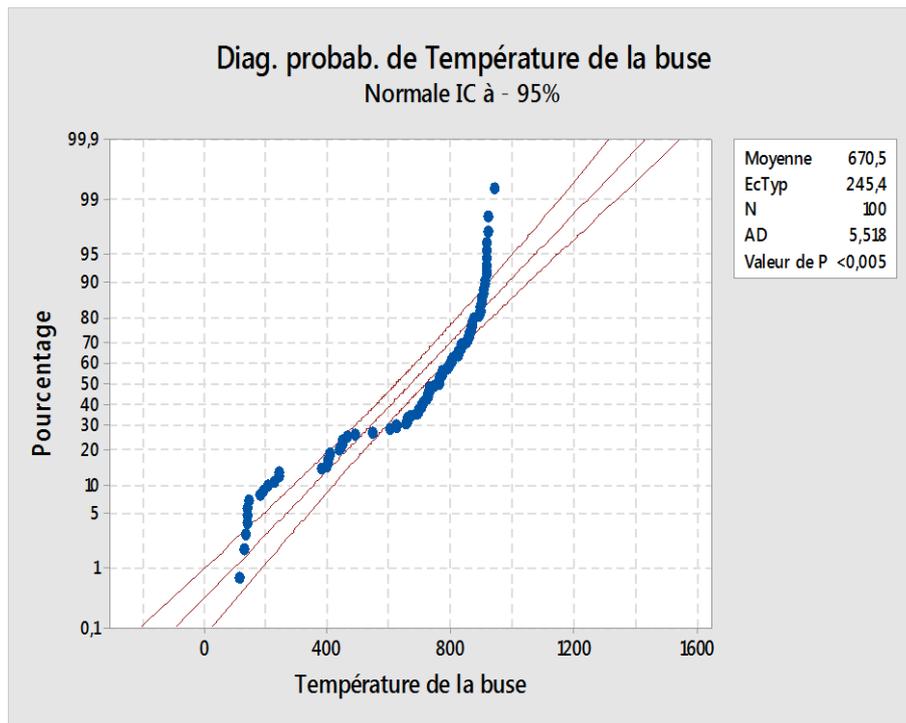


Figure 23: Le diagramme de probabilité pour la température de la buse.

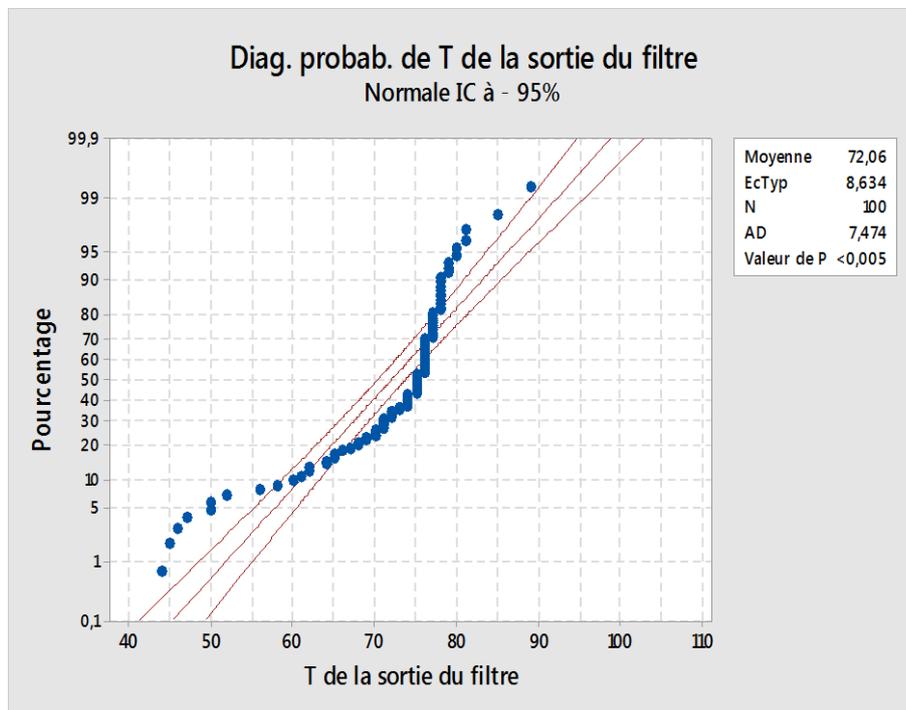


Figure 24: Le diagramme de probabilité pour la température de sortie des filtres.

Nous remarquons que les points des données ne suivent pas la ligne centrale ajustée, nous déduisons que la distribution de ces paramètres ne correspond pas à une loi normale à l'exception du débit du produit qui suit une loi normale.

4.2. Normalisation des données

Les données des paramètres étudiés ne suivent pas la loi normale et vu que l'établissement des cartes de contrôle nécessite une distribution normale des données, il est nécessaire de normaliser les données en procédant à la transformation de Johnson. La sortie du logiciel nous donne les graphes illustrés sur les figures suivantes :

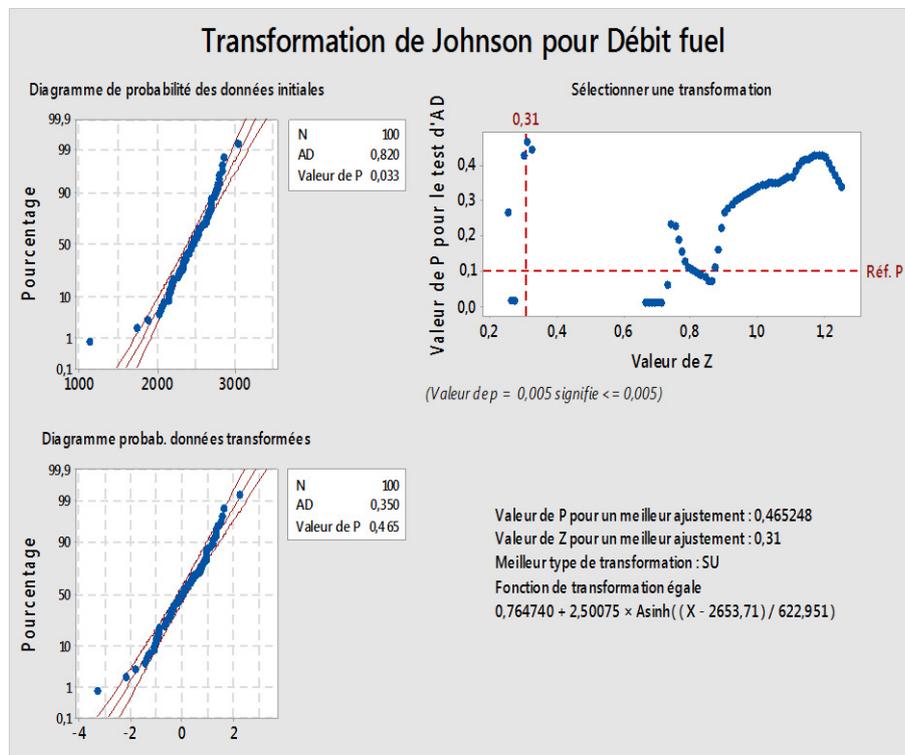


Figure 25: Transformation de Johnson pour le débit du fuel.

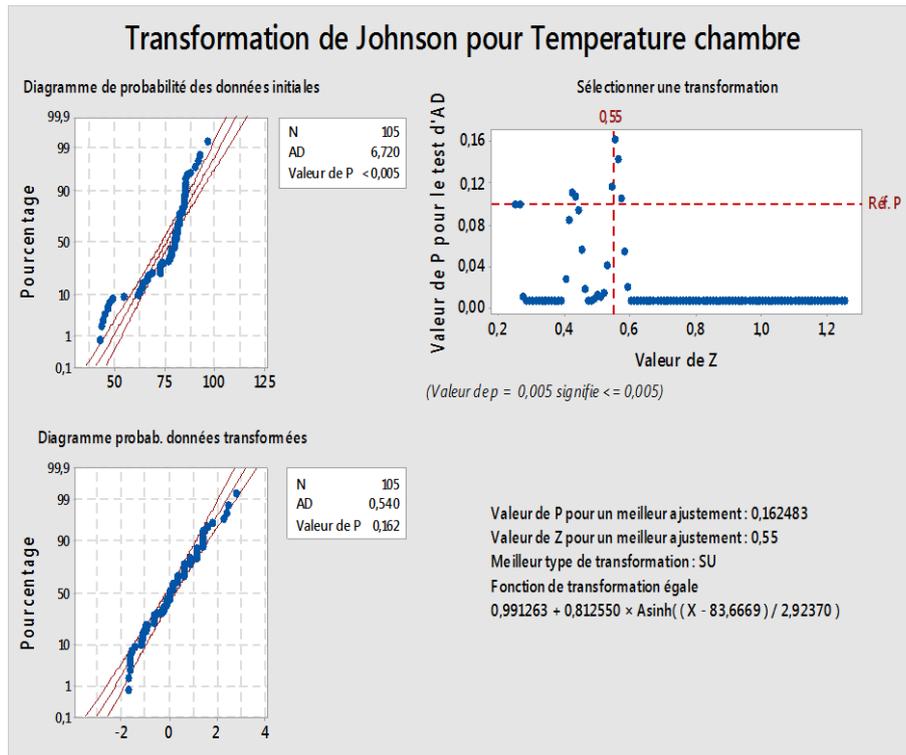


Figure 26: Transformation de Johnson pour la température de la chambre.

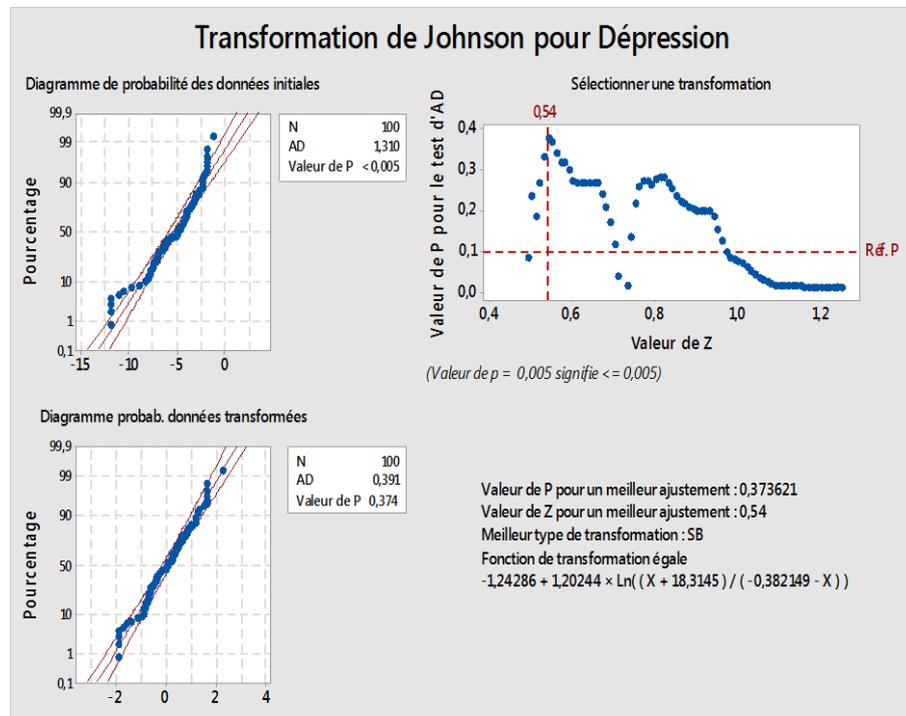


Figure 27: Transformation de Johnson pour la dépression.

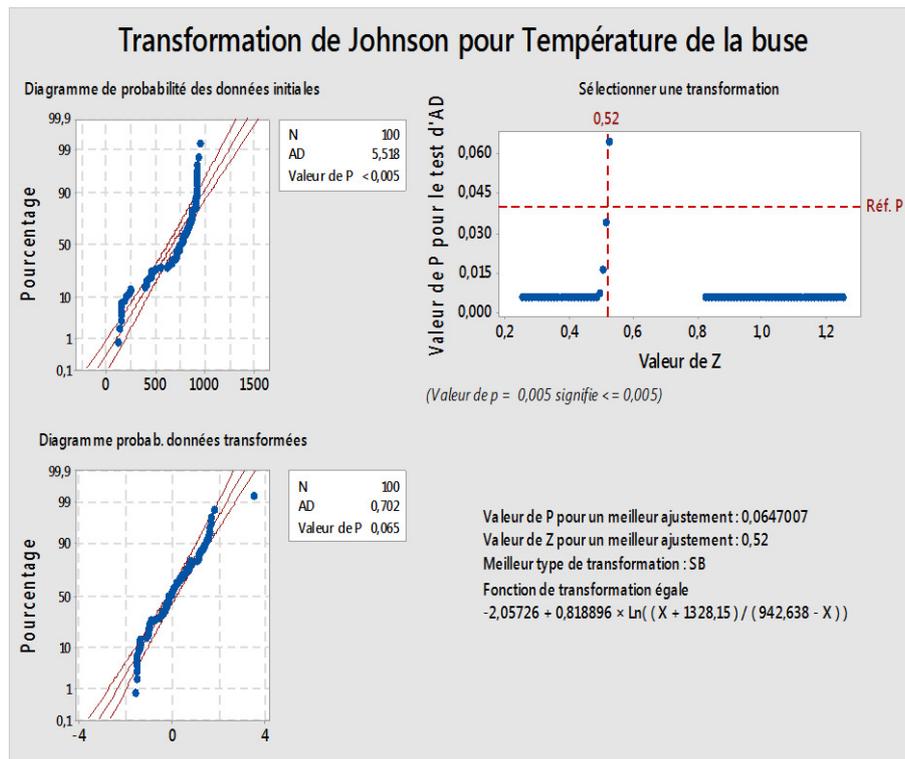


Figure 28: Transformation de Johnson pour la température de la buse.

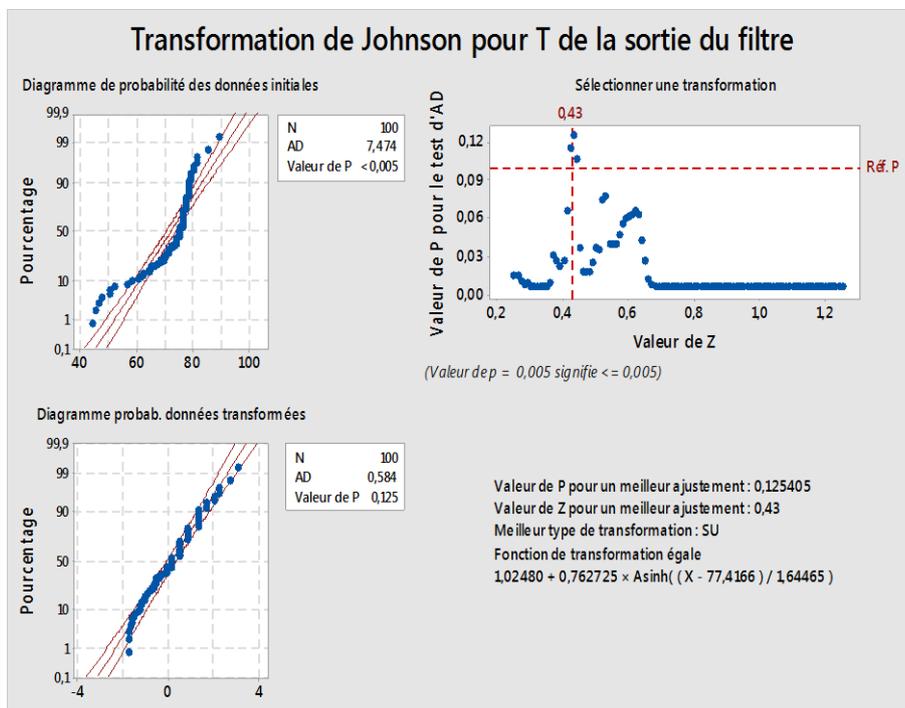


Figure 29: Transformation de Johnson pour la température de sortie des filtres.

4.3. Etablissement des cartes de contrôle

Selon la nature de la caractéristique suivie, les cartes de contrôle peuvent être classées en deux grandes branches : Les cartes de contrôle aux mesures et les cartes de contrôle aux attributs. Lorsque la caractéristique suivie est une variable mesurable (par exemple : Température, diamètre, longueur, pression, débit, etc.) la maîtrise et le pilotage du processus sont effectués à l'aide des cartes de contrôle aux mesures. Le contrôle par attribut s'utilise lorsque la caractéristique contrôlée est qualitative, c'est-à-dire les données sont classées de sorte «conformes», ou «non conformes» [1].

Par ailleurs, le choix du type de carte de contrôle aux mesures se fait en se basant sur la taille de l'échantillon prélevé. Dans notre étude, nous utilisons une carte d'individu et d'étendue mobile (I-EM), vu que la taille d'échantillon est égale à 1. Ce type de carte permet de suivre un processus à l'aide de relevé unitaire, et il associe à la fois la carte des individus (moyenne) et celle des étendues mobiles, ce qui facilite le suivi de l'évolution du paramètre étudié et sa variabilité d'une mesure à l'autre.

Les figures suivantes illustrent les cartes de contrôle des différents paramètres de marche :

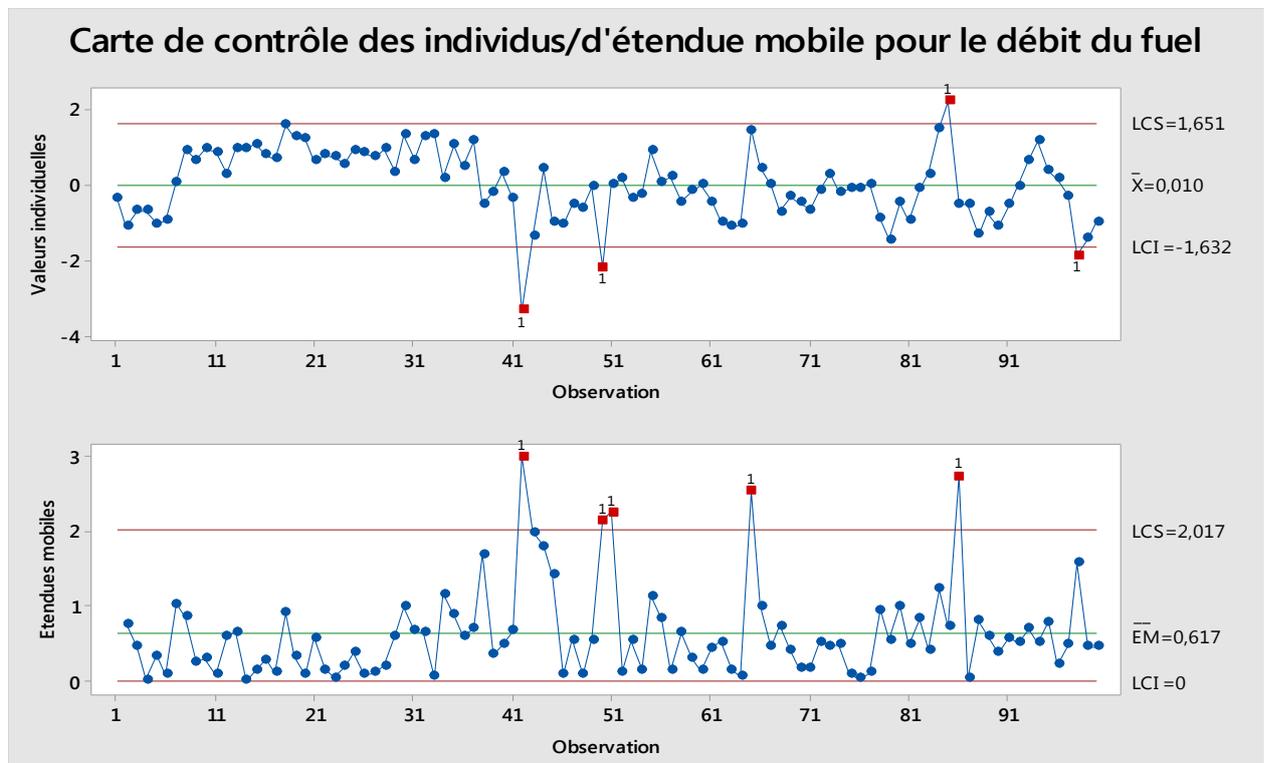


Figure 30 : Carte de contrôle I/EM pour le débit du fuel.

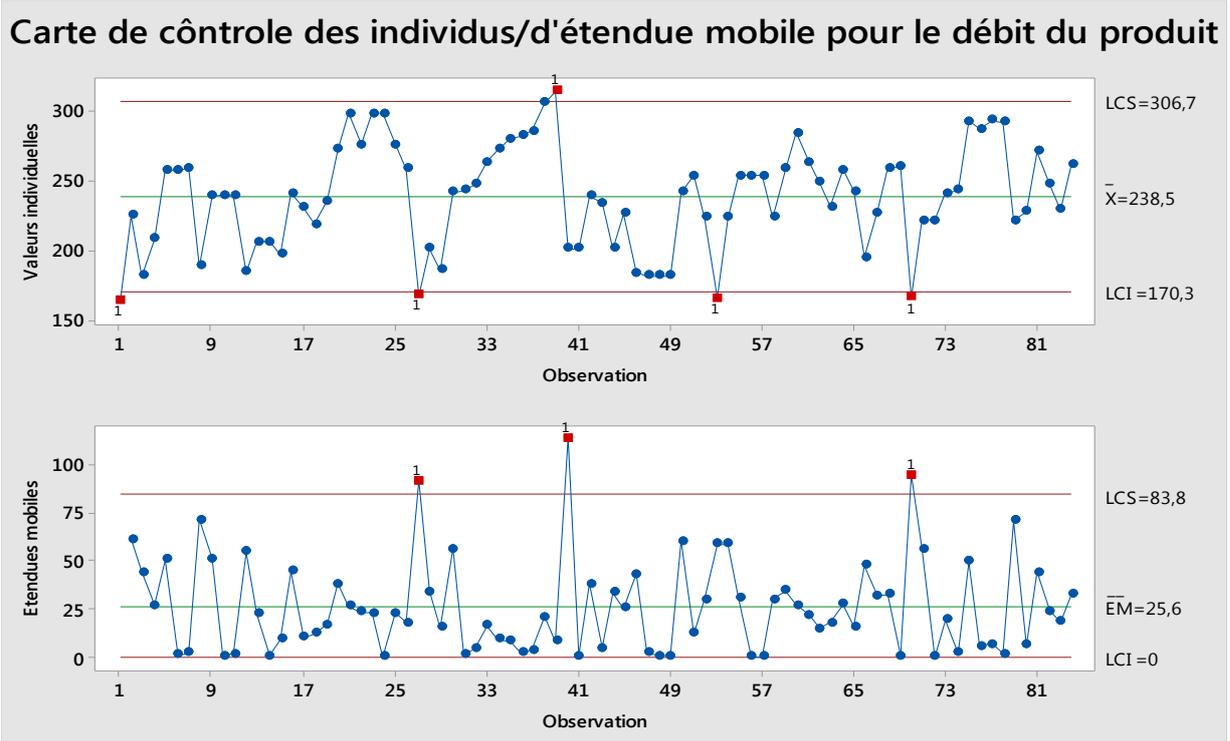


Figure 31: Carte de contrôle I/EM pour le débit du produit.

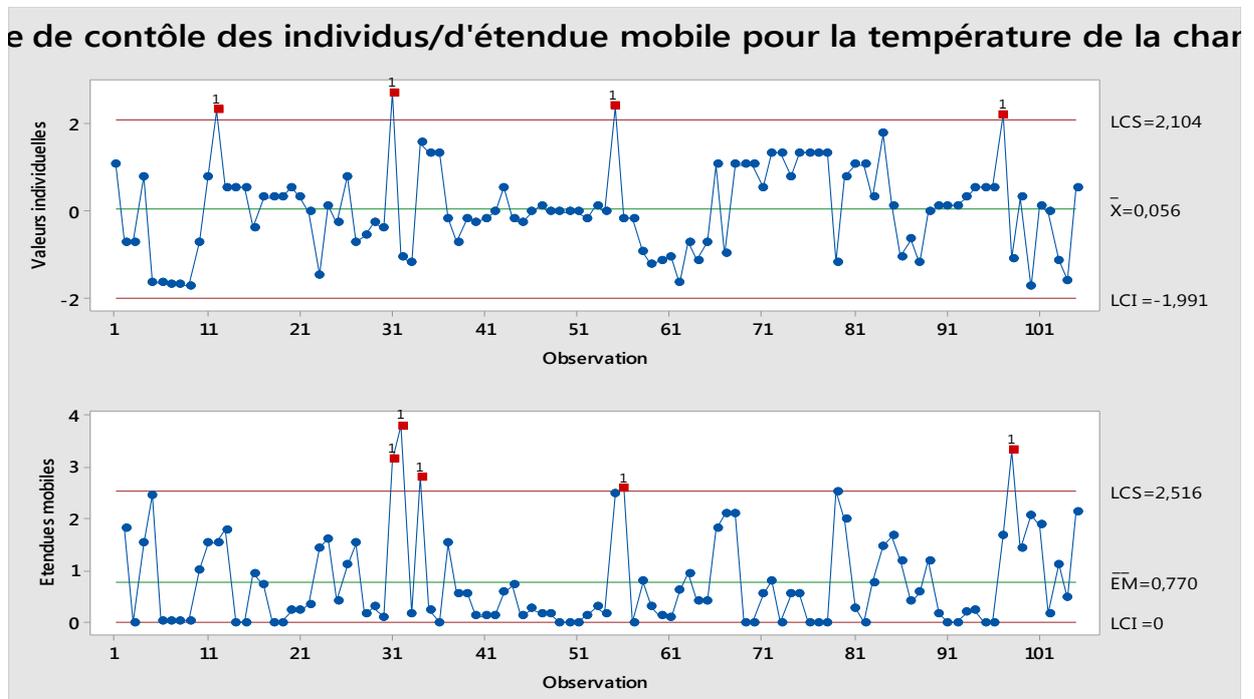


Figure 32: Carte de contrôle I/EM pour la température de la chambre.

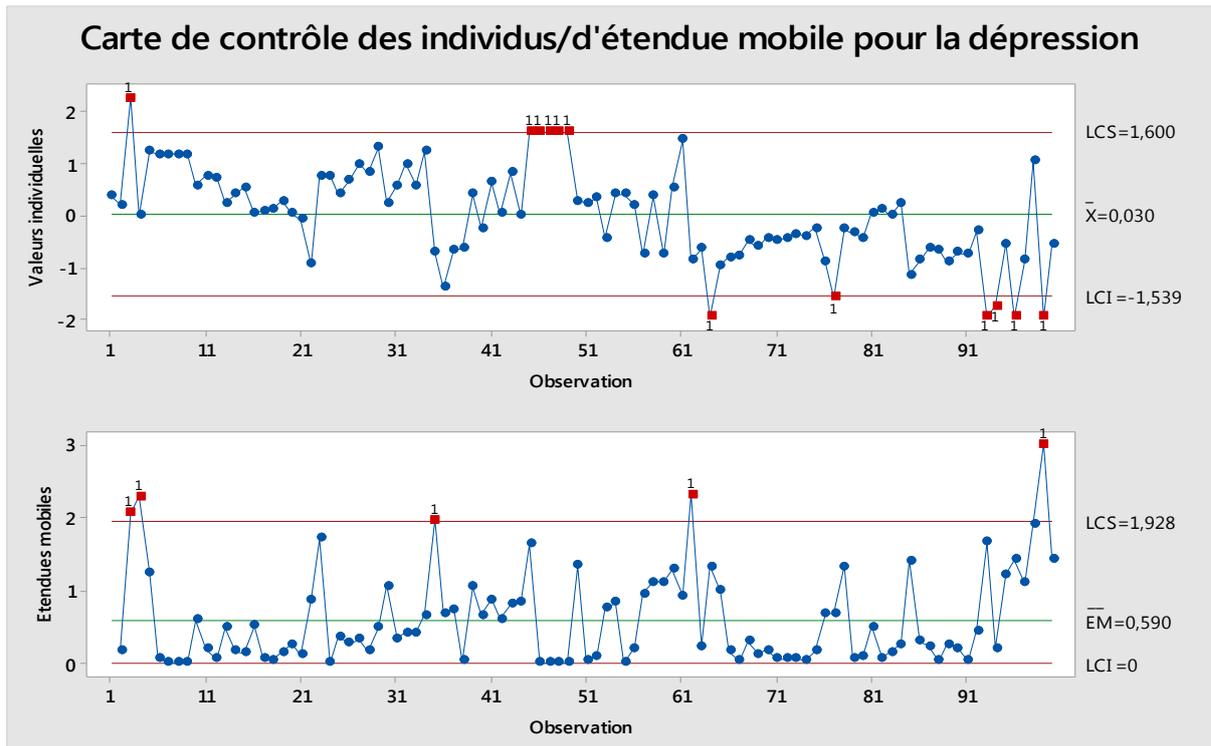


Figure 33 : Carte de contrôle I/EM pour la dépression.

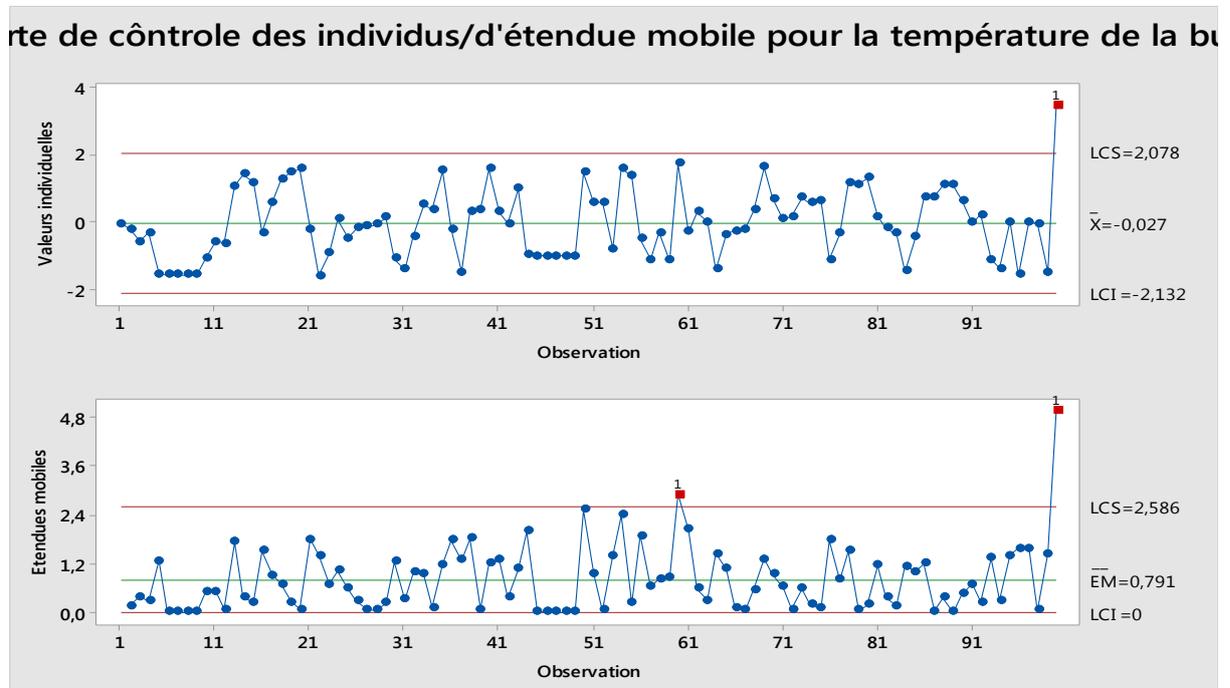


Figure 34 : Carte de contrôle I/EM pour la température de la buse.

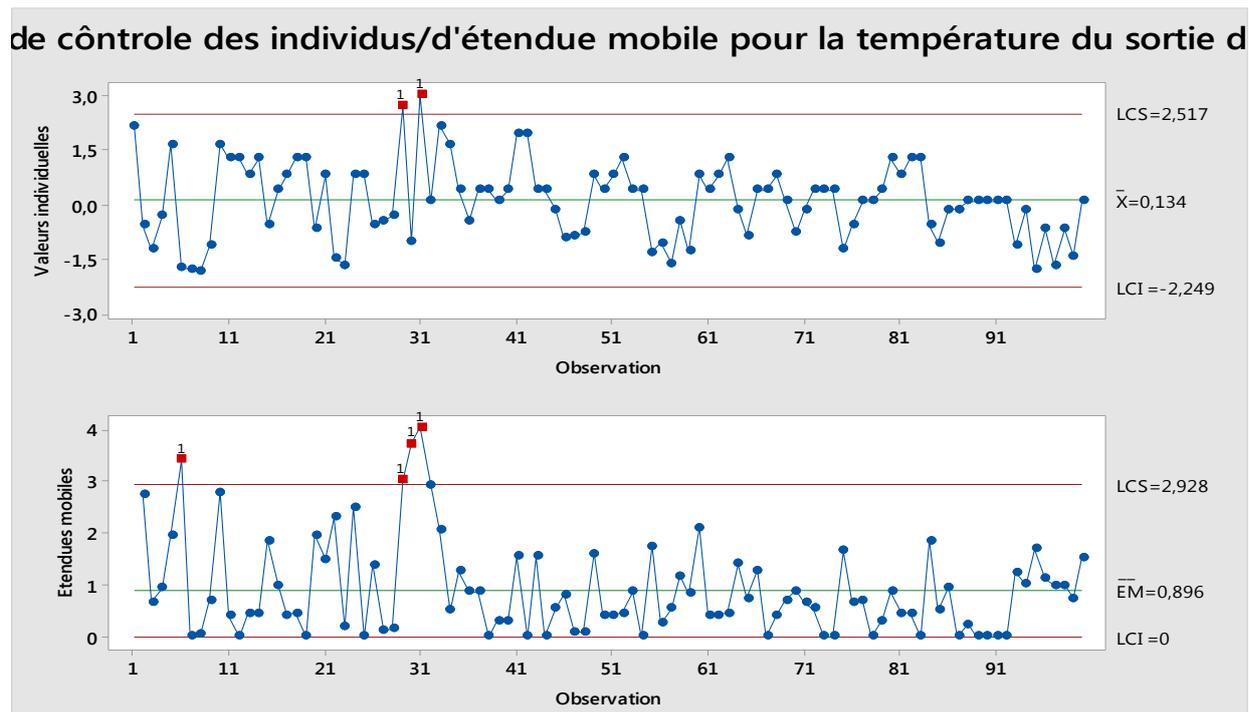


Figure 35 : Carte de contrôle I/EM pour la température de sortie des filtres.

Les limites de contrôle sont regroupées dans les tableaux 4 et 5 :

Paramètre	LIC	LC	LSC
le débit du fuel	-1,632	0,01	1,651
le débit du produit	170,3	238,5	306,7
la température de la chambre	-1,991	0,056	2,104
la dépression	-1,539	0,03	1,6
la température de la buse	-2,132	0,027	2,078
la température de sortie des filtres	-2,249	0,134	2,517

Tableau 4 : Les limites de contrôle de la carte I.

Paramètre	LIC	LC	LSC
le débit du fuel	0	0,617	2,017
le débit du produit	0	25,6	83,8
la température de la chambre	0	0,77	2,516
la dépression	0	0,590	1,928
la température de la buse	0	0,791	2,586
la température de sortie des filtres	0	0,896	2,928

Tableau 5 : Les limites de contrôle de la carte EM.

Avec :

- LIC : Limite inférieure de contrôle ;
- LSC : Limite supérieure de contrôle ;
- LC : Limite de contrôle.

Les limites présentées dans les tableaux **4** et **5** définissent les bornes à l'intérieur desquelles devraient se trouver la grande majorité des moyennes des échantillons. Nous remarquons clairement, que la cible des paramètres étudiés est rarement atteinte et qu'au niveau de la dépression, nous avons un ensemble des points consécutifs qui sont hors contrôle.

V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu établir les cartes de contrôle après avoir effectué une série de tests qui ont montré que la distribution des résultats ne suit pas une loi normale. Pour remédier à cette problématique, nous avons utilisé la transformation de Johnson.

Les cartes de contrôle déjà établies nous indiquent que le procédé de séchage n'est pas sous contrôle et que nous devons peut être, faire une surveillance continue. Cette variabilité est due à des causes assignables qui seront traitées dans la troisième phase de la démarche DMAIC.

I. Introduction

Après les étapes « Définir » et « Mesurer », nous avons complètement identifié les paramètres critiques qui influencent la consommation spécifique. Dans l'étape « Analyser », nous allons découvrir davantage le comportement du procédé, pour pouvoir identifier les causes qui empêchent la stabilité du processus.

II. Diagramme Ishikawa

Suite à une observation active des processus de production, nous avons recensé les éléments potentiels qui semblent responsables de la variabilité des paramètres de saturation des fours. Ces éléments ont été classés selon cinq catégories que nous illustrons dans le diagramme d'Ishikawa présenté dans la figure 36 :

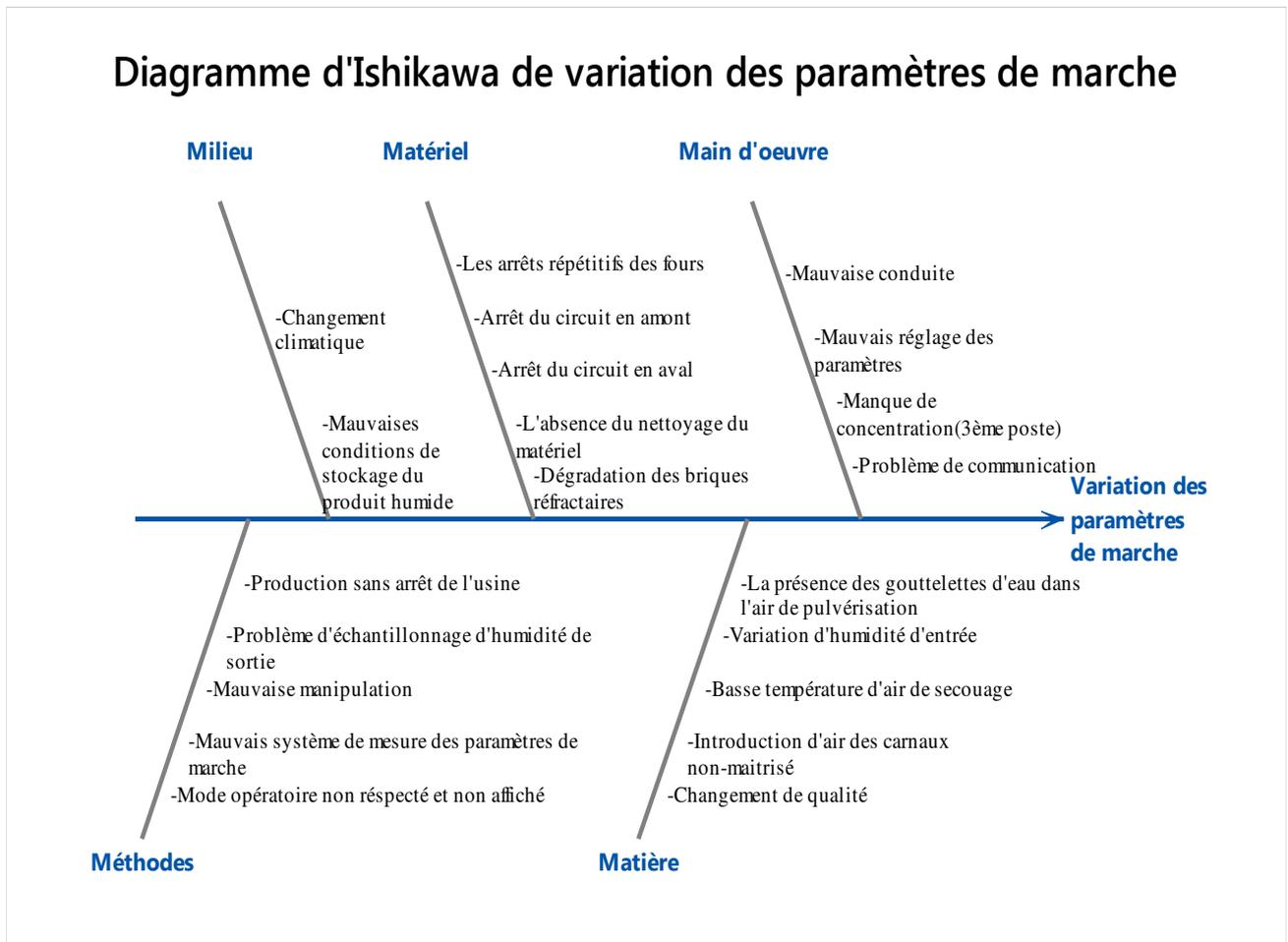


Figure 36. Diagramme Ishikawa de la variation des paramètres de marche.

D'après le diagramme Ishikawa réalisé et l'accompagnement des opérateurs de la salle de contrôle nous avons trouvé que les principales causes de variation de la consommation spécifique sont :

- Les arrêts répétitifs des fours.
- Le mauvais réglage des paramètres de marche et la mauvaise conduite.
- Le changement fréquent de qualité.

D'où la nécessité d'effectuer une analyse des arrêts pour déterminer leurs causes.

III. Analyse des pannes des fours

3.1. Statistique des pannes des fours

Dans l'objectif de dégager les éléments les plus perturbants dans le four sécheur, nous avons recensé les pannes sur les fours durant la période du : 01/12/2017 au 31/12/2017 (Tableau 6).

Nous avons fait une étude statistique basée sur la loi de Pareto, qui va nous permettre de classer les anomalies en fonction de temps d'arrêt (indicateur d'indisponibilité partial).

Arrêt	Rang	Temps d'arrêt	% du temps d'arrêt	% cumulé
Filtre	1	160,6	33,11	33,11
KE	2	108,9	22,53	55,64
Virole	3	53,24	10,97	66,61
Ventilateur de tirage	4	51,43	10,60	77,21
Chambre de détente	5	29,21	6,02	83,23
KC	6	13,85	2,85	86,08
KD	7	12,47	2,57	88,65
Trémie	8	10,85	2,23	90,88
RP	9	9,5	1,95	92,83
Ventilateur d'air primaire	10	8,16	1,68	94,51
Démarrage	11	6,32	1,3	95,81
QG	12	5,43	1,11	96,92
QH	13	4,01	0,82	97,74
Foyer	14	3,41	0,7	98,44
KG	15	3	0,61	99,05
Pomperie	16	2,5	0,51	99,56
Travaux de régulation	17	1,58	0,32	99,88
Brûleur	18	0,57	0,12	100

Tableau 6: Statistique de la durée des arrêts et classement des éléments.

La courbe Pareto obtenue est montrée dans la figure 37 :

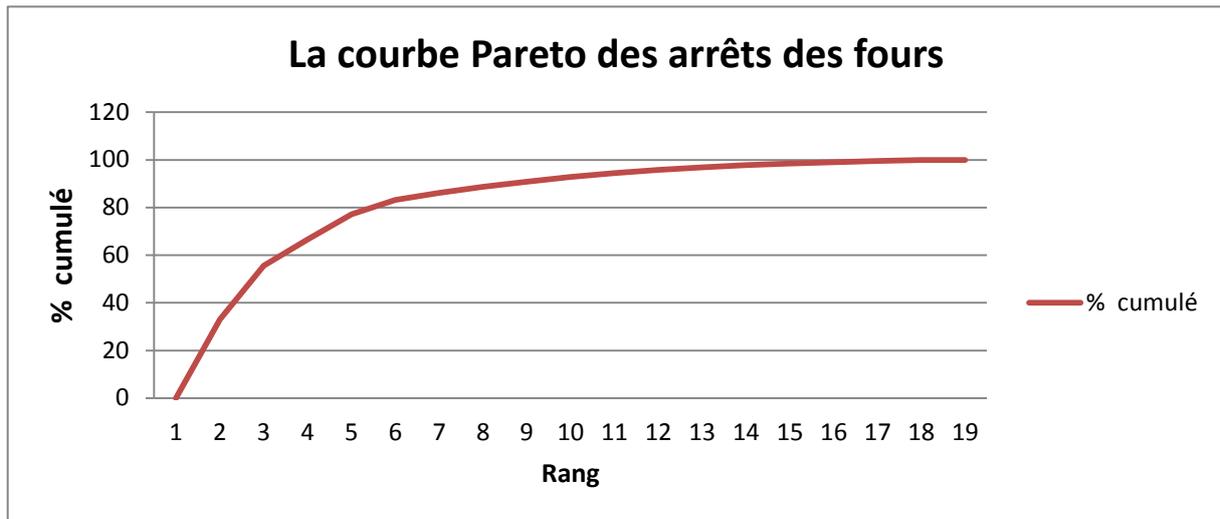


Figure 37: *Courbe montrant les éléments qui demandent le plus de temps d'intervention.*

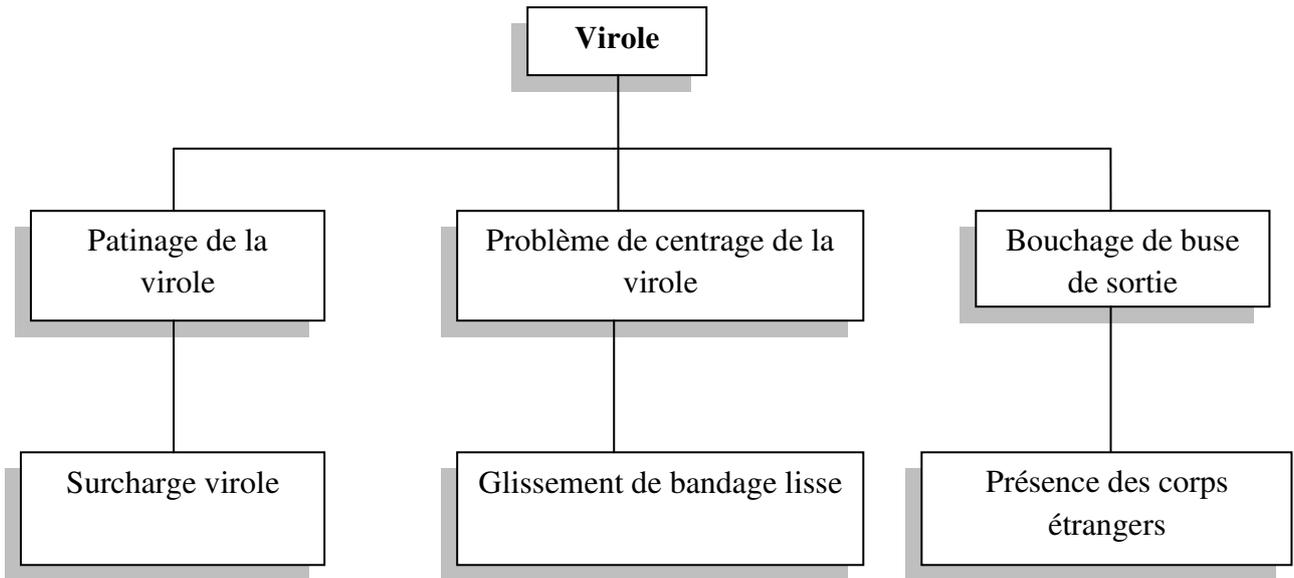
D'après le graphique précédent, nous constatons que la zone la plus intéressante dans le cadre du critère choisi (où 83,23% de la valeur s'y trouve concentrés) est constituée des éléments suivants : Les filtres, les convoyeurs KE, les viroles, les ventilateurs de tirage, et les chambres de détente.

Par conséquent, en intervenant sur 27,7% des éléments on maîtrise la partie essentielle du problème.

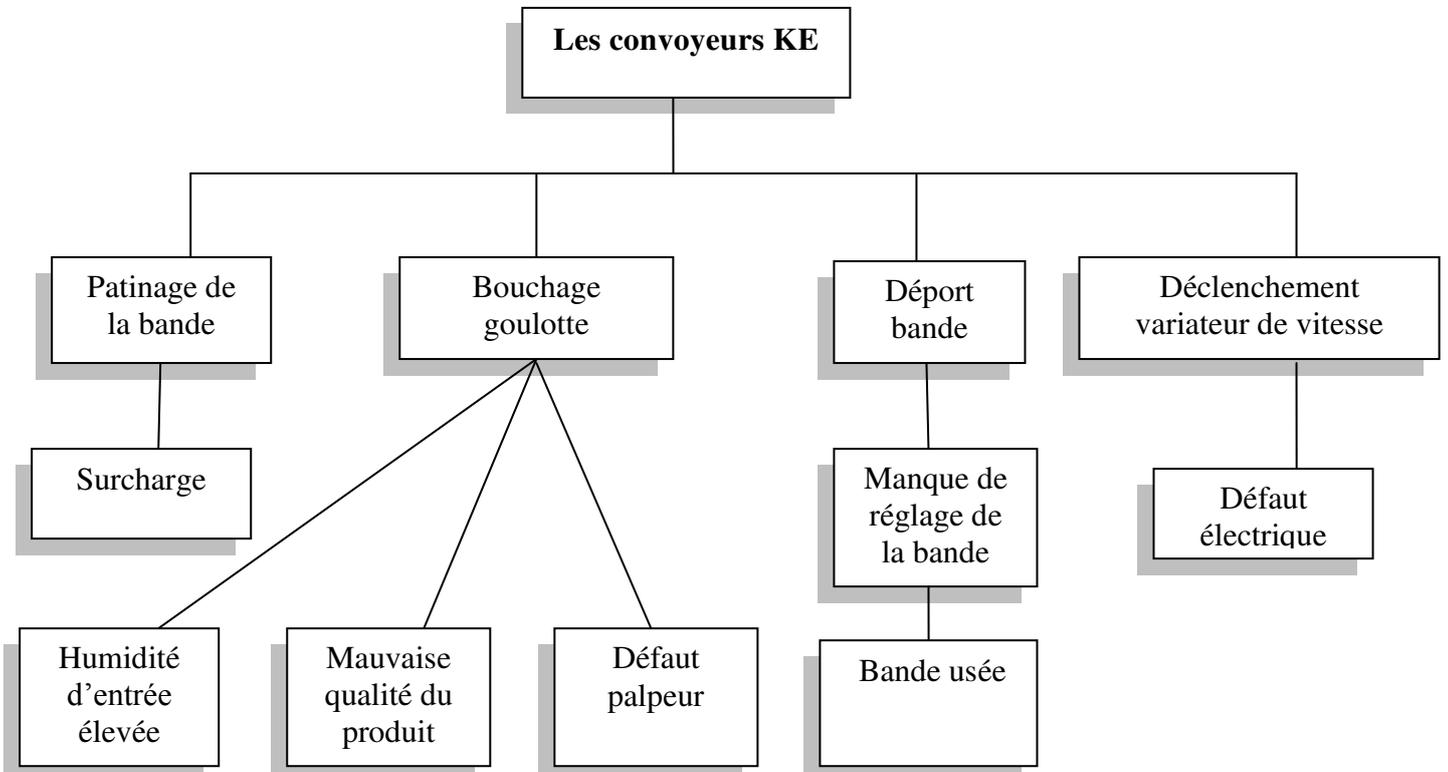
3.2. Analyse des pannes

L'étude précédente nous a permis de dégager les problèmes qui perturbent le système. Les causes majeures obtenues seront analysées par la méthode Why-Why dans le paragraphe suivant. Cette méthode nécessite la collaboration entre les différents intervenants sur le système car les causes émanent de différentes origines. Nous avons consulté les services : mécanique, électrique et régulation pour pouvoir appliquer cette méthode.

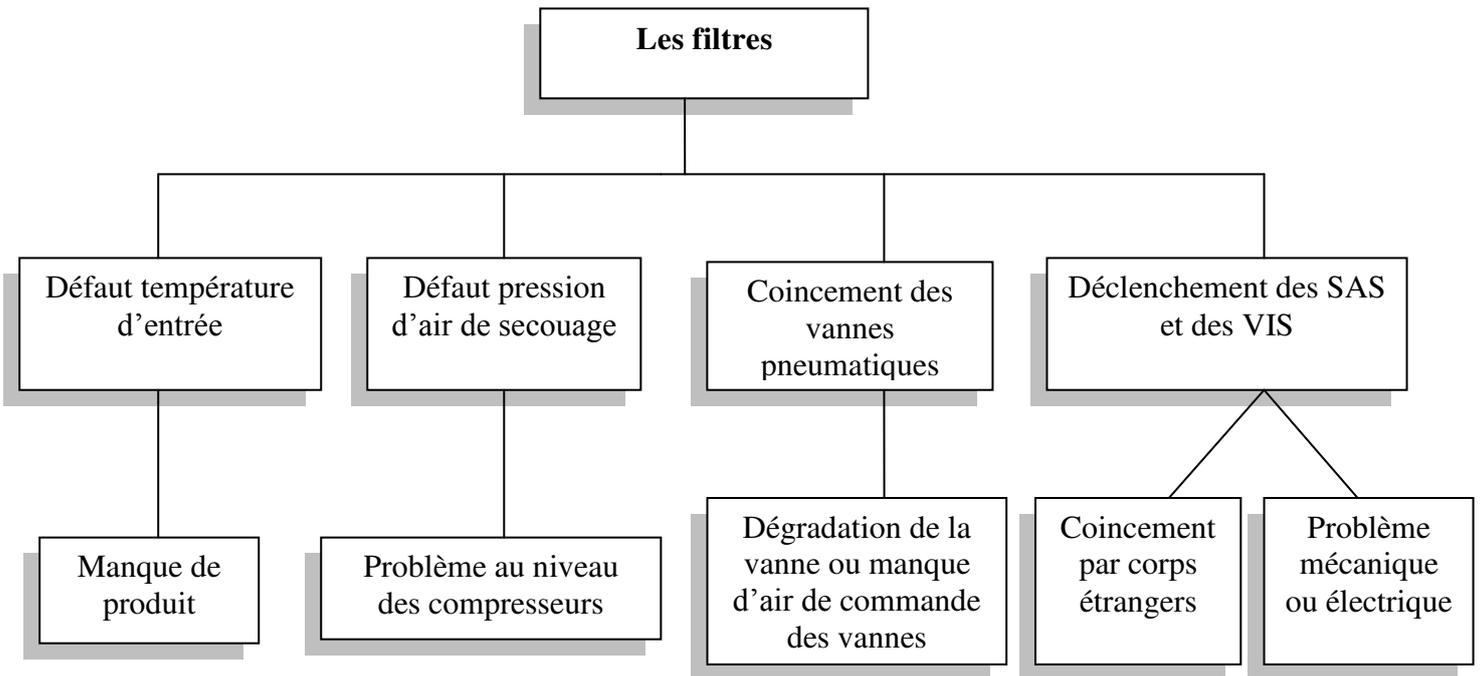
❖ **Why-Why pour la virole :**



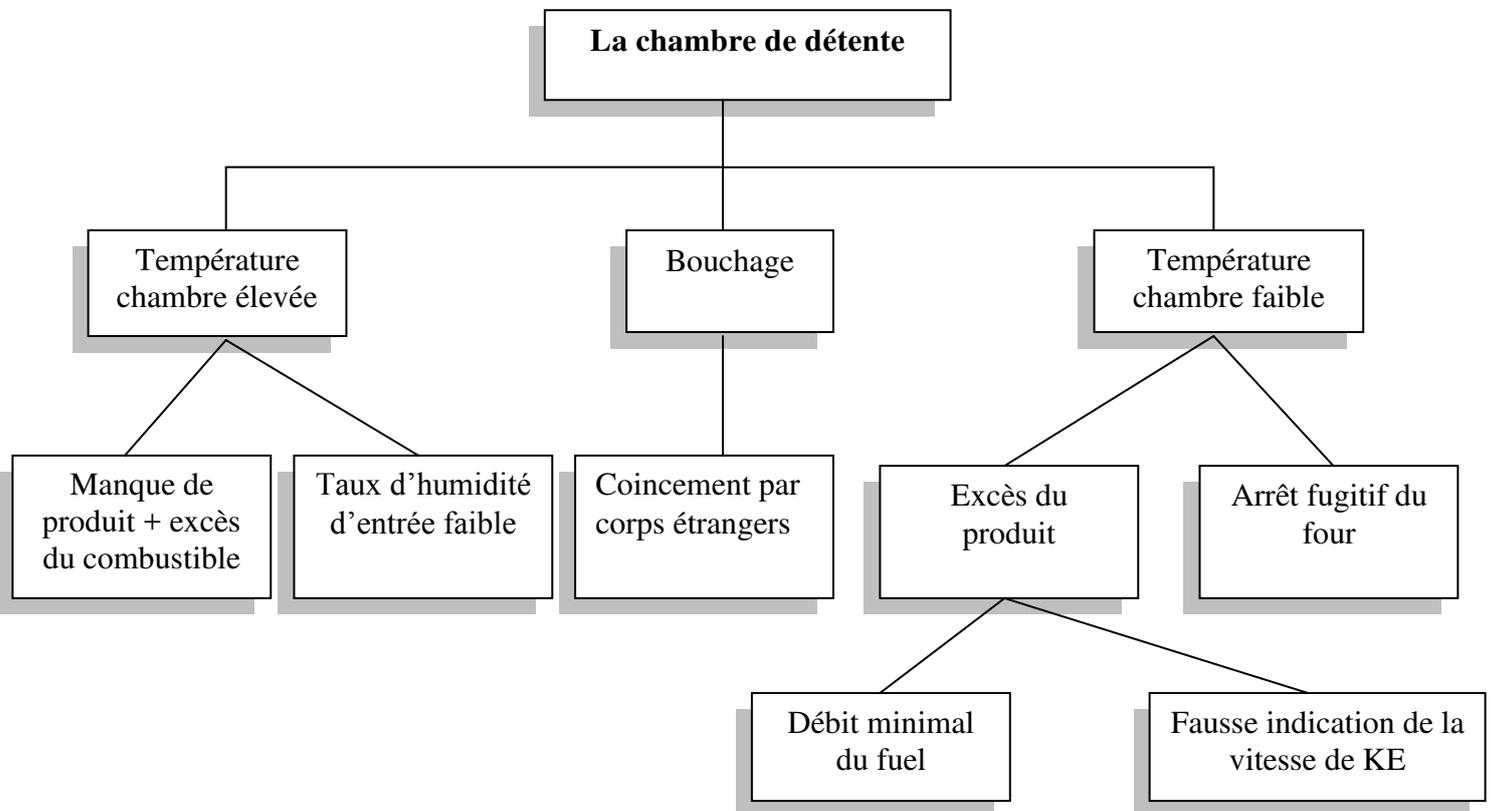
❖ **Why-Why pour les convoyeurs KE :**

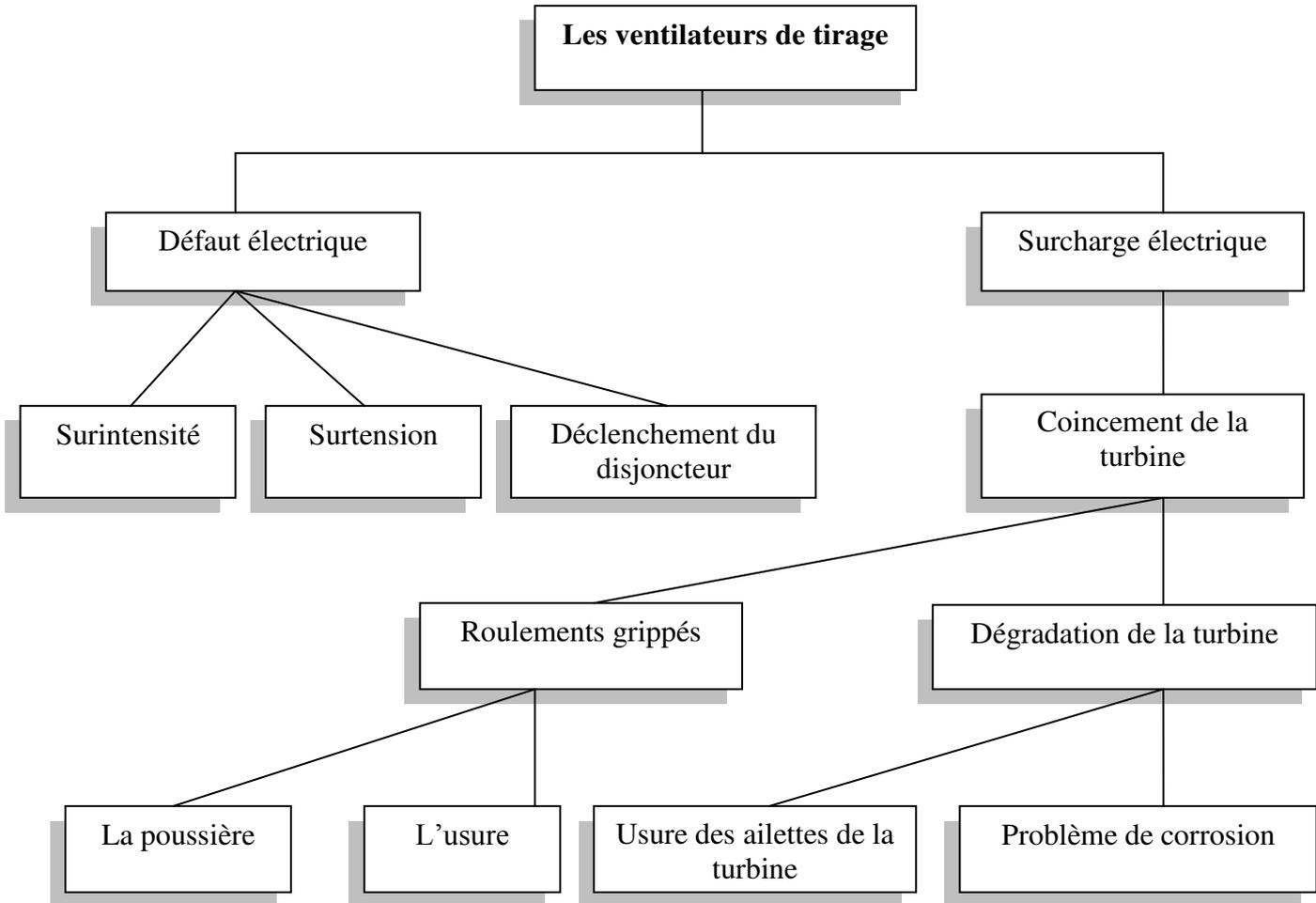


❖ **Why-Why pour les filtres :**



❖ **Why-Why pour la chambre de détente :**



❖ **Why-Why pour les ventilateurs de tirage :****IV. Analyse des résultats**

D'après l'analyse Pareto et les résultats trouvés par la méthode Why-Why nous remarquons que les causes principales des arrêts sont :

- L'environnement du travail :

Dans les grandes usines notamment celles du séchage de phosphate, plusieurs contraintes se posent, parmi lesquelles, on cite :

- La production sans arrêt de l'usine (conformément à la loi de : la production d'abord, la maintenance après).
- La présence de la poussière dans l'usine.
- Les changements de qualité.
- La mauvaise régulation des paramètres de marche, d'où la nécessité d'établir une analyse par boucle :

4.1. Chaîne de température de la chambre avec le débit du fuel

D'après notre étude des boucles de régulation au niveau du four sécheur, nous avons remarqué l'absence d'une boucle qui régule le débit d'air de combustion, c'est-à-dire lorsque l'opérateur change le débit du fuel, le ventilateur d'air primaire ne suit pas ce changement, en effet :

- Si la température de la chambre diminue le débit du fuel sera augmenter par contre le débit d'air reste constant et donc nous aurons une combustion incomplète et par conséquent, la libération du monoxyde de carbone qui est un gaz polluant pour l'environnement.
- Si la température de la chambre augmente le débit du fuel sera diminuer, donc nous aurons un excès d'air qui est inutile à l'opération de combustion, et qui sera réchauffer au cours de son passage dans le four ce qui constitue une perte supplémentaire d'énergie.

4.2. Chaîne de température de la buse avec le débit du produit

Le phosphate s'introduit dans le four par la goulotte d'alimentation, au-dessus de la buse du foyer, vers la rangée des palettes d'entrée de la virole suivant une pente de 30 %. La masse gazeuse chaude provenant du foyer traverse le jet de phosphate tombant de la goulotte d'alimentation, ce jet forme un écran devant le courant gazeux et agit directement sur la température des gaz, donc la température des gaz au niveau de la buse est proportionnelle au débit d'alimentation en phosphate humide, et l'ajustement du débit du produit doit se faire en fonction de la température de la buse, ce qui confirme la présence de la boucle qui régule le débit du produit en fonction de la température de la buse.

La mesure de la température de la buse est assurée par un thermocouple introduit dans la buse du foyer, la non-conformité de cette mesure se répercute sur le réglage du débit d'alimentation et par conséquent sur la consommation du fuel. Et donc pour une bonne mesure de la température et un bon réglage du débit, il faut effectuer des contrôles périodiques de la mesure du thermocouple et vérifier sa pénétration.

4.3. Chaîne de régulation du débit du fuel

Le débit du fuel doit être bien ajusté et bien exploiter afin d'éviter toute consommation supplémentaire soit par un sur séchage soit par une mauvaise combustion, or cette boucle assure le pilotage du fuel sans tenir compte d'autres paramètres. Donc elle ne peut pas garantir une bonne marche du four sécheur.

En effet, le débit du fuel doit être ajusté en fonction du débit du produit, de sa qualité, du débit d'air primaire, et de la température de la chambre :

- Si nous avons une mauvaise qualité du produit ou un grand débit du produit et le débit du fuel reste constant, nous aurons manque d'énergie alors un mauvais séchage.
- Si la qualité du produit est bonne ou son débit est réduit, nous aurons une grande quantité d'énergie qui est inutile, cette énergie sera aspirée par les ventilateurs de tirage tout au long du four jusqu'elle arrive aux filtres. Ces derniers ne supportent pas une température élevée et donc ils vont être endommagés.
- Si le débit d'air primaire a diminué alors la combustion sera incomplète et s'il a augmenté nous aurons une combustion avec un excès d'air inutile.

4.4. Chaîne de régulation de la dépression

Le ventilateur de tirage permet de créer une dépression tout au long du four pour assurer l'avancement de la masse gazeuse, l'eau vaporisée ainsi que la poussière de phosphate. Il permet aussi l'admission de l'air secondaire à l'intérieur de la chambre (protection des briques), le réglage de cette dépression est assuré par des ventailles installées à l'aspiration des ventilateurs de tirage, qui ont été commandées par des servomoteurs électriques pilotés à partir de la salle de contrôle.

La dépression doit être bien régulée pour éviter leur chute ou leur augmentation, en effet :

Si on a la chute de dépression on aura plusieurs problèmes tels que :

- L'augmentation de la température de la buse et du foyer.
- Surcharge de la virole et Colmatage du produit.
- Mauvais séchage.

Si on a l'augmentation de la dépression on aura :

- Chute de température de la buse
- Surconsommation du fuel
- Augmentation de la température de la chambre

V. Conclusion

On peut conclure donc que les différents problèmes qui causent une grande consommation du fuel viennent de l'une des provenances suivantes :

- **L'environnement du travail**

Les contraintes de travail ainsi que l'usure mènent à la dégradation du matériel, ce qui nous pousse à chercher une correction ou une amélioration des conditions qui entourent le matériel.

- **La non maîtrise du débit d'air**

On a remarqué aussi l'absence d'une chaîne de régulation de l'air par rapport au débit du fuel. Le ventilateur d'air primaire ne suit pas la variation du débit de fuel.

- **Perturbation de la boucle du débit de fuel et la température de la chambre**

Le débit du fuel est réglé selon la température de la chambre de détente qui est proche à la température du sortie des filtres .Alors cette dernière agit implicitement sur le débit du fuel. Le problème c'est que cette boucle fonctionne sans faisant compte de l'air de secouage qui alimente les filtres avec une température de 22°C et qui provoque souvent une chute de température au niveau des filtres, dans ce cas l'opérateur doit augmenter à chaque fois le débit du fuel manuellement pour éviter la condensation de la vapeur d'eau.

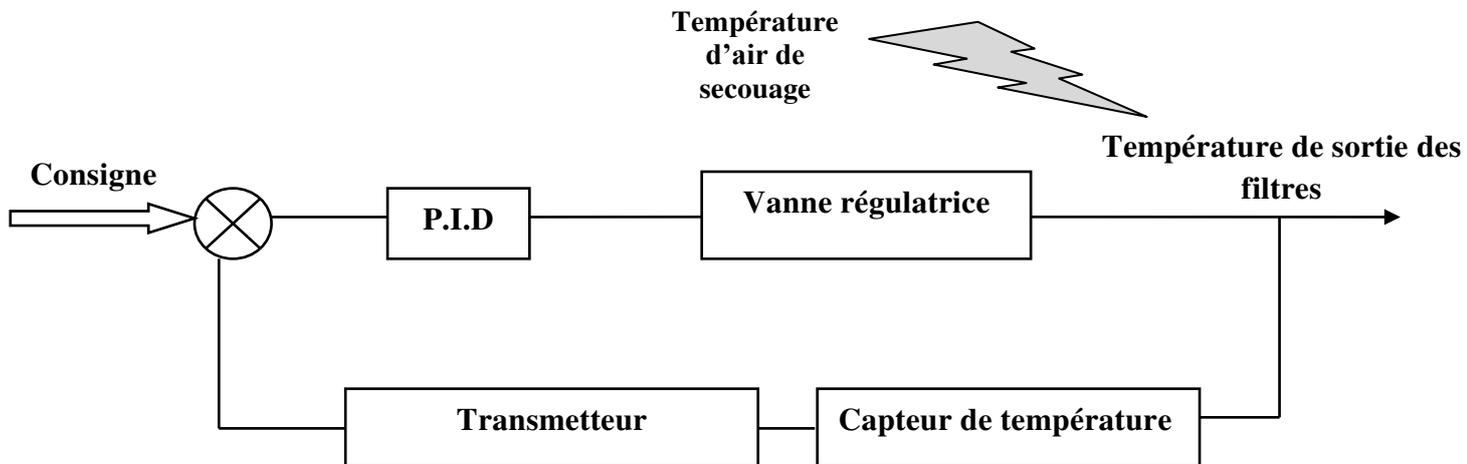


Figure 38 : Perturbation de la chaîne de régulation du débit de fuel par température des filtres

I. Introduction

À ce stade, la source du problème a été clairement identifiée et la période d'analyse passive fait donc place à une période plus active. La présente étape qui fait l'objet de ce chapitre, consiste à trouver des solutions pour régler le problème identifié par les trois premières étapes de la démarche DMAIC.

II. Installation d'un échangeur thermique au niveau des filtres

2.1. Choix technologique de l'échangeur

Notre étude consiste à concevoir un échangeur thermique au niveau des filtres à manches pour préchauffé l'air comprimé, utilisé pour le secouage, par la vapeur d'eau provenant de la chaufferie.

Nous avons choisis un échangeur tube et calandres car il est utilisable dans toutes les applications industrielles. Il est capable de résister à des températures et des pressions extrêmes, et à de nombreuses puissances, il accepte par ailleurs des écarts de température potentiellement importants. Et l'une des forces la plus importante de ce type de technologie qu'il peut être utilisé en condensation, alors c'est notre cas puisque nous voulons chauffer l'air comprimé en utilisant la vapeur d'eau qui va se condenser pour exploiter sa chaleur latente ainsi la récupérer dans la chaudière.

Ce type d'échangeur peut être représenté dans la figure 39 :

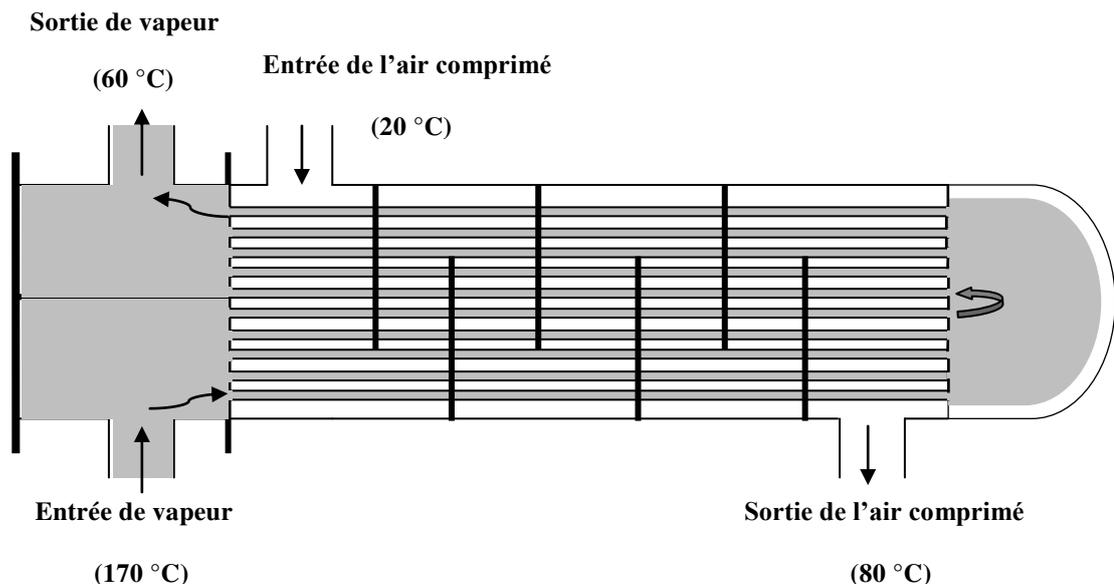


Figure 39 : Echangeur à tubes et calandres.

2.2. Dimensionnement thermique

❖ Hypothèse

Un échangeur sans pertes (idéal), c'est-à-dire un échangeur dans lequel la chaleur cédée par le fluide chaud est intégralement transmise au fluide froid, dans ces conditions on écrit :

$$Q = \dot{m}_v \cdot c_{p_v} \cdot \Delta T_1 + \dot{m}_v \cdot L_c + \dot{m}_v \cdot c_{p_v} \cdot \Delta T_2 = \dot{m}_a \cdot c_{p_a} \cdot \Delta T_a \quad (2)$$

- \dot{m}_v : Le débit massique de vapeur.
- c_{p_v} : La capacité calorifique de vapeur.
- ΔT_a : La différence de température de l'air comprimé.
- \dot{m}_a : Le débit massique de l'air comprimé.
- c_{p_a} : La capacité calorifique de l'air comprimé.
- ΔT_1 : La différence de température de l'eau.
- ΔT_2 : La différence de température de la vapeur d'eau.
- L_c : La chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau.

❖ Calcul de la masse volumique de l'air comprimé :

Si on assimile l'air comprimé à un gaz parfait, la loi des gaz parfait nous permet d'écrire :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3)$$

On remplace n par : $\frac{m}{M}$

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (4)$$

L'équation devient :

$$P = \frac{R}{M} \cdot \rho \cdot T \quad (5)$$

Et par conséquent :

$$\rho \cdot \frac{T}{P} = \frac{M}{R} = cte \quad (6)$$

Alors :

$$p \cdot \frac{T}{P} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{P_0} \quad (7)$$

❖ Calcul de la surface d'échange

Le flux de chaleur échangé peut être exprimé par la formule :

$$Q = U_s \cdot A \cdot F \cdot \Delta TLM \quad (8)$$

Avec :

- U_s : Le coefficient de transfert global.
- A : La surface d'échange globale.
- F : Le facteur de correction.
- ΔTLM : La différence de température logarithmique moyenne.

$$\Delta TLM = \frac{\Delta T_{x=L} - \Delta T_{x=0}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{x=L}}{\Delta T_{x=0}}\right)} \quad (9)$$

- Dans notre cas, c'est-à-dire pour un échangeur tubulaire simple contre-courant, cette différence s'exprime par

$$\Delta TLM = \frac{(T_{e_v} - T_{s_a}) - (T_{s_v} - T_{e_a})}{\ln\left(\frac{T_{e_v} - T_{s_a}}{T_{s_v} - T_{e_a}}\right)} \quad (10)$$

- Le coefficient d'échange global U_s sera estimé.
- Le facteur de correction F est estimé en fonction de deux paramètres P et R :

$$P = \frac{T_{s_v} - T_{e_v}}{T_{e_a} - T_{e_v}} \quad (11)$$

Et :

$$R = \frac{T_{e_a} - T_{s_a}}{T_{s_v} - T_{e_v}} \quad (12)$$

Dans notre cas le facteur de correction est égal à 1 ($F=1$) car pour un changement d'état, P ou R devient zéro.

Donc on aura :

$$A = \frac{Q}{U_s \cdot F \cdot \Delta TLM} \quad (13)$$

❖ Calcul du nombre de tubes par passe

Le nombre de tubes par passe est exprimé par la relation suivante :

$$N_T = \frac{S_p}{S_T} \quad (14)$$

Avec :

- S_p : La section occupée par les tubes.
- S_T : La section d'un tube.

Et nous avons :

$$Q_v = S_p \cdot v_v \quad (15)$$

Avec :

- Q_v : Le débit volumique de vapeur.
- S_p : La section occupée par les tubes.
- v_v : La vitesse de vapeur.

Et :

$$Q_v = \frac{\dot{m}_v}{\rho_v} = \frac{Q}{(c_{pv} \cdot \Delta T_1 + L_c + c_{pv} \cdot \Delta T_2) \rho_v} \quad (16)$$

Donc :

$$S_p = \frac{Q_v}{v_v} \quad (17)$$

La section d'un tube est :

$$S_T = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (18)$$

❖ Calcul du nombre de passes dans l'échangeur

On calcule le nombre de passes par la relation :

$$N_P = \frac{A}{A_1} \quad (19)$$

Avec :

- **A** : La surface d'échange globale.
- **A₁** : La surface d'échange à travers un passe.

Et :

$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot N_T \quad (20)$$

Avec :

- **r** : Le rayon d'un tube.
- **L** : La longueur de l'échangeur.
- **N_T** : Le nombre total des tubes.

❖ Calcul des pertes de charge

Les pertes de charge proposées par Kern sont :

- Les pertes de charge dans les tubes

$$\Delta P_t = \frac{n_t \cdot G_t^2}{\rho} \left(\frac{f_t}{d_t} + 2 \right) \quad (21)$$

Avec :

n_t : Le nombre des tubes.

G_t : La vitesse massique.

ρ : La masse volumique de la vapeur.

d_t : Le diamètre des tubes.

f_t : Le coefficient de fiction.

Pour un écoulement laminaire nous avons :

$$f_t = \frac{32}{Re} \quad (22)$$

Et pour un écoulement turbulent :

$$f_t = 0,0028 + .0,25 \cdot Re^{-0,32} \quad (23)$$

Sachant que :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (24)$$

Avec :

d : Le diamètre des tubes.

ρ : La masse volumique de la vapeur.

v : La vitesse de la vapeur.

μ : La viscosité dynamique de vapeur.

– Les pertes de charge à l'extérieur

$$\Delta P_c = \frac{G_c^2 \cdot f_c \cdot (N_c + 1) \cdot D_c}{\rho \cdot D_e} \quad (25)$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air comprimé.

N_c : Nombre total des tubes.

G_c : La vitesse massique.

D_c : Le diamètre de la calandre.

f_c : Le coefficient de fiction.

D_e : Le diamètre équivalent.

❖ Arrangement des tubes

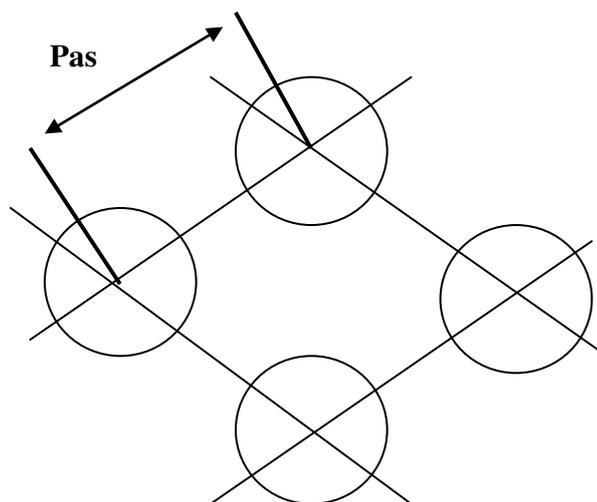
Les tubes peuvent être arrangés selon un pas carré ou un pas triangulaire :

La disposition en pas carré, contrairement au pas triangulaire, laisse un espace libre rectiligne permettant le passage d'un jet ou d'une brosse pour le nettoyage de l'échangeur entre les tubes.

La disposition en pas triangulaire est plus dense et conduit donc à des échangeurs plus compacts.

De plus elle offre au fluide moins de cheminement hors de la surface des tubes que le pas carré, et est donc plus efficace pour le transfert thermique. Il sera préféré pour les services où un nettoyage mécanique n'est pas requis.

Dans notre cas le fluide circulant dans la calandre et l'air comprimé (un gaz qui n'est pas polluant), donc nous choisissons une disposition en pas triangulaire car elle est plus économique.



Le pas triangulaire

✚ Données disponibles :

<i>Données</i>	<i>Fluide chaud</i>	<i>Fluide froid</i>
La température d'entrée	170°C	20°C
La température de sortie	60°C	80°C
La chaleur spécifique	2,4951 kJ/kg.K	0,74 kJ/kg.K
La masse volumique	4,162 kg/m ³	6,552 kg/m ³
La viscosité dynamique	0,000015kg/m.s	1,85. 10 ⁻⁵
Pertes de charge admissibles	0,5 bar	0,5 bar
La chaleur latente de condensation	2046,53 kJ/kg	
Diamètre des tubes	13 mm	
Le débit volumique de l'air comprimé	0,016 m ³ /s	
Le coefficient d'échange global	30 W/ m ² .°C	
La vitesse de la vapeur dans les tubes	1,06 m/s	

Tableau 7: Les données disponibles pour le dimensionnement de l'échangeur.

✚ Les résultats

<i>Résultat</i>	<i>Valeur</i>
Le flux de chaleur échangé	4848,48 W
La différence de température logarithmique moyenne.	61,65
La surface d'échange globale	2,62 m ²
Le débit massique de vapeur	0,017 kg/s
La section d'un passe	3,828. 10 ⁻³ m ²
La section d'un tube	1,32. 10 ⁻⁴ m ²
Le nombre des tubes dans un passe	29 tubes
Le nombre de passe	2 passes
Le nombre de Reynolds	3823,49
Le coefficient de friction coté tubes	0,02
Le coefficient de friction coté calandre	0,015
Les pertes de charge à l'intérieur	9,59. 10 ⁻³ bar
Les pertes de charge à l'extérieur	0,65. 10 ⁻⁵ bar

Tableau 8: Les résultats du dimensionnement de l'échangeur.

III. Conception de la nouvelle boucle de régulation

Notre amélioration consiste à concevoir une boucle qui régule le débit de l'air de combustion, c'est-à-dire lorsque l'opérateur change le débit du fuel, le ventilateur VRB va suivre ce changement pour avoir une bonne combustion.

Nous allons installer un débitmètre qui va mesurer le débit du fuel et le comparer avec la consigne afin d'agir sur le moteur du ventilateur d'air primaire VRB et donc changer le débit d'air primaire utilisé pour la combustion.

3.1. Les composants de la chaine proposée

La chaine proposée est constitué des éléments suivants :

- Un régulateur PID.
- Un variateur de vitesse.
- Un moteur.
- Un débitmètre.
- Un convertisseur de tension-courant.

3.2. Schéma fonctionnel da la boucle

Le schéma fonctionnel da la boucle de régulation du débit d'air primaire est représenté par la figure 40 :

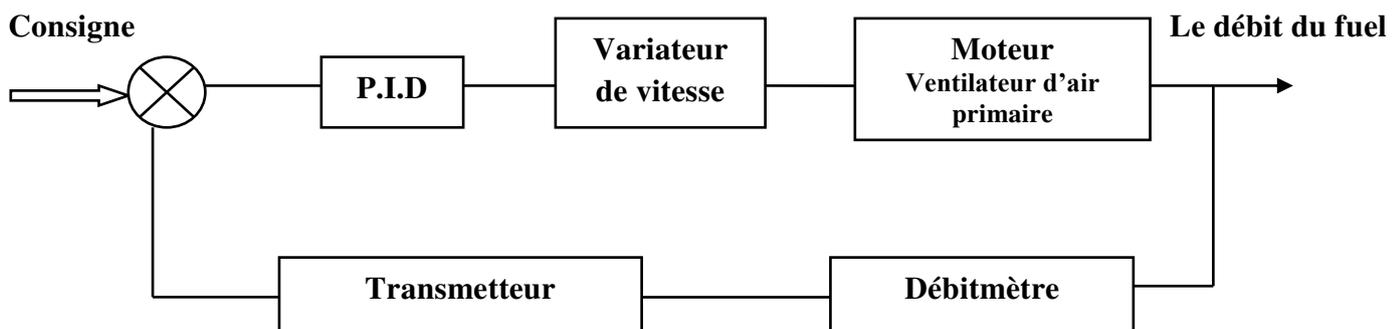


Figure 40 : *La chaine de régulation du débit d'air par le débit du fuel.*

3.3. Description de la chaine

En cas de perturbation ou de changement de consigne le système va réagir comme suit:

- **Un capteur** de débit (débitmètre) va mesurer le débit du fuel.
- **Un convertisseur** de tension-courant, son rôle c'est de convertir la tension du débitmètre en courant électrique standard (4mA, 20mA).
- **L'opérateur** fixe un débit du fuel, la valeur de ce débit représente l'image de la consigne.
- **Le régulateur** compare le signal de mesure avec le signal de la consigne, et selon l'écart entre ces deux signaux il développe un signal correcteur à la sortie (4mA, 20mA).
- **Un variateur de vitesse** reçoit le signal du régulateur afin de fixer une nouvelle valeur de fréquence du réseau d'alimentation, ce variateur va agir sur le moteur du ventilateur d'air primaire.

Cette chaine permet de conserver le processus de la combustion telle que :

$$\text{Débit d'air} = \text{Débit du fuel} * \text{Rapport (air/fuel)}$$

Sachant que la combustion d'un kg de fuel demande 14 kg d'air.

Donc : Le rapport air/fuel = 14.

IV. Solutions correctives et préventive proposés

A partir des causes racines trouvées dans la phase « Analyser », nous avons déterminé les solutions qu'il faut apporter sur les mécanismes et qui sont en état de dysfonctionnement ou mal conçu.

Les solutions trouvées sont regroupés dans le tableau 9 :

Causes	Solutions	
	Corrective	Préventive
Changement climatique		Maitriser la consommation de fuel à l'aide des cartes de contrôle saisonnières
Introduction d'air des carnaux non-maitrisé	Régler l'ouverture et la fermeture des carnaux	
Mauvais réglage des paramètres de marche	Synchroniser les données de la salle de contrôle avec les mesures affichées sur les tableaux de bord des fours	
Les arrêts répétitifs des fours		Assurer une maintenance systématique
Arrêt circuit en aval	Maintenance corrective dans le cas d'une panne	Maintenance systématique des convoyeurs de sortie ainsi pour les cribles
Arrêt circuit en amont		Maintenance systématique de la roue-pelle qui assure l'alimentation des trémies
Surcharge virole	Augmenter la dépression pour avoir un tirage plus élevé	
Dégradation des briques réfractaires	Changer les briques usées ou cassées	Créer une alarme de sécurité lorsque la température buse augmente
L'excès d'Air parasite	Maintenir les fuites	
Vapeur : un problème au niveau de la chaudière, température très basse, pression insuffisante ou une fuite	Réglage des paramètres des chaudières	Contrôler les paramètres des chaudières
Non maitrise des processus soit pour les conducteurs ou pour les opérateurs de la salle de contrôle.		Former les conducteurs et distribuer les modes opératoires

Mauvaise conduite (marche au-delà du point de fonctionnement)		Préciser les valeurs de l'entrée et la sortie pour obtenir le point de fonctionnement optimal
Dégradation du matériel dû aux arrêts répétitifs de la production	Respecter le processus de la maintenance pour éviter ses dégâts	Planifier les entretiens des fours systématiquement
Mauvaises conditions de stockage de produit humide		Respecter la gestion du first in first out
Modes opératoires non respectés et non affichés		Expliquer les modes opératoires aux opérateurs et optimiser les zones d'affichage
la présence des gouttelettes de H2O dans l'air de pulvérisation dû à une fuite ou une pression insuffisante	Maintenir le compresseur dans le cas d'une fuite	Contrôler la pression du compresseur

Tableau 9: Les solutions proposées pour les autres problèmes.

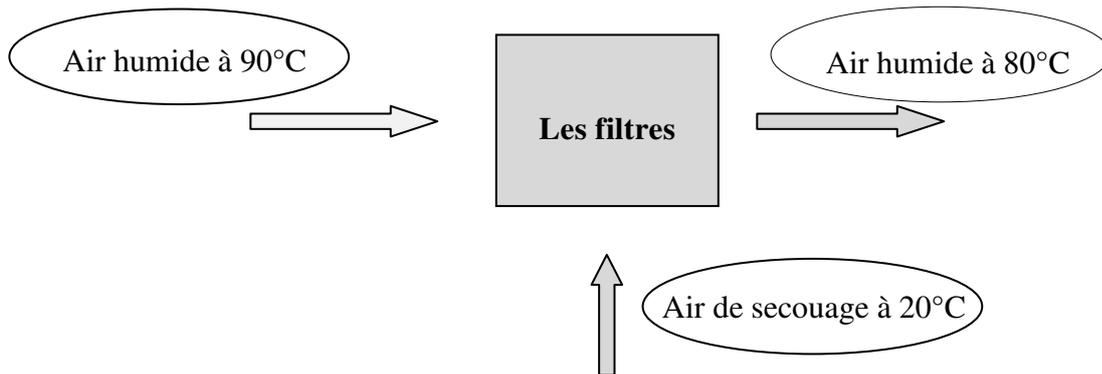
V. Etude économique

Quelle que soit la nature d'un projet, sa motivation et son degré d'élaboration, la préoccupation majeure d'un industriel à son égard consiste à déterminer sa rentabilité.

Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes intéressés à l'analyse de la rentabilité économique du préchauffage de l'air de secouage proposé lors de la phase « Améliorer ». L'objectif est de quantifier le gain qui peut être réalisé.

5.1. Le gain de l'installation de l'échangeur de chaleur

Au niveau des filtres à manches l'air humide entre à une température de 90°C et sort à 80°C, cette dernière est exigée par le constructeur. L'injection de l'air de secouage à une température de 20°C diminue la température des filtres et donc l'opérateur agit manuellement sur le débit du fuel pour atteindre une température de 80°C. Ce qui permet d'augmenter la consommation spécifique.



Le flux de chaleur perdu est :

$$Q = \dot{m}_{air} \cdot c_{p\ air} \cdot \Delta T_{air} \quad (26)$$

$$Q = \frac{245000}{3600} * 0,98 * 1009,8 * (90 - 80)$$

$$Q = 673480,5 \text{ W}$$

Nous pouvons écrire aussi :

$$Q = PCI \cdot D_{fuel} \quad (27)$$

Avec :

PCI : Le pouvoir calorifique inférieur du fuel.

D_{fuel} : Le débit du fuel consommé.

Donc le débit du fuel perdu est:

$$D_{fuel} = \frac{673480,5}{10,99 * 10^3}$$

$$D_{fuel} = \mathbf{61,28 Kg/h}$$

Sachant que le prix d'une tonne du fuel coûte 4500 DH et que le débit du fuel qui sera gagné est 1470.72 Kg/jours, nous allons économiser 6 618. 24 DH/ jours pour un seul four.

Le gain journalier pour toute l'usine est estimé à : **52 945.92 DH/jours.**

Conclusion générale

Notre projet de fin d'études a été réalisé au sein de l'usine de séchage de Béni-Idir à Khouribga, avait pour objectif principal l'optimisation de la conduite des fours sécheurs.

Pour bien mener ce projet, nous avons adopté la démarche DMAIC. C'est un outil qui a confirmé ses preuves dans le domaine de l'industrie. L'application de telle méthode a eu lieu selon cinq phases à savoir : définir, mesurer, analyser, innover et contrôler.

Nous avons commencé par étudier le procédé de séchage, le fonctionnement des fours sécheurs. Dans la première phase de la démarche DMAIC nous avons bien défini le problème de notre projet, ses objectifs et ses contraintes. Nous avons aussi pu déterminer les paramètres clés pour le fonctionnement des fours sécheurs.

En outre, des cartes de contrôle ont été établies dans la deuxième phase de la démarche DMAIC pour les paramètres précités, en tenant compte des données de l'état actuel et des performances de l'unité de Béni-Idir. L'utilisation de telles cartes montraient que le processus de séchage est instable ainsi qu'il est marqué par une variabilité continue.

Nous avons aussi analysé les différentes causes de cette variabilité et effectué une étude critique des boucles de régulation afin de proposer des actions d'amélioration.

Dans le but d'optimiser la consommation spécifique nous avons proposé comme solution l'installation d'un échangeur thermique au niveau des filtres à manches pour préchauffer l'air comprimé, utilisé pour le secouage, et qui perturbe le fonctionnement des boucles de régulation. Nous recommandons ainsi d'ajouter une nouvelle boucle qui régule le débit d'air primaire, utilisé pour la combustion, en fonction de débit du fuel.

Les solutions proposées ne sont pas mises en place c'est pour cela nous n'avons pas pu atteindre la phase contrôler de la démarche qui consiste à mettre sous surveillance ces solutions afin de valider le bon fonctionnement du processus amélioré.

En perspectives, nous proposons pour les futurs projets d'intégrer notre solution qui consiste à automatiser la partie de l'alimentation du four par l'air primaire. Nous recommandons ainsi de préchauffer l'air de combustion par la vapeur d'eau.

Bibliographie et Webographie

[1] http://ipco-co.com/ESMB_Journal/BEMM%202014-papers/43.pdf / Six Sigma et Maîtrise Statistique des Processus : de la théorie à la pratique.

[2] <http://fr.wikihow.com/calculer-la-valeur-P> / Comment calculer la valeur P.

[3] <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00520267/document> / Détermination d'une méthode de calcul de capacités avec des lois non gaussiennes.

[4] <http://support.minitab.com/fr-fr/minitab/17/topic-library/quality-tools/controlcharts/data/normality-assumptions-for-control-charts/> / Hypothèses de normalité pour les cartes de contrôle.

[5] <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/how-to/johnson-transformation/interpret-the-results/key-results/> Interprétation des résultats principaux pour la fonction Transformation de Johnson

[6] MARTINI, T. « *Détermination d'une méthode de calcul de capacités avec des lois non gaussiennes* ». Cours 1^{ère} année de master statistique : Université de strasbourg, 2010.

[7] Docteur FATEH MBAREK-LOUDINA. « *Echangeurs de chaleur* ». Cours et exercices corrigés. Editions Al-Djazair.

[8] Professeur IKRAM TAJRI, cours « *La maîtrise statistique des procédés (MSP)* » et « *Six sigma Une méthode de maîtrise de la variabilité* ».

[9] Documentation OCP.

Annexes

Annexe A

Tableau 1 : Les caractéristiques thermodynamiques de la vapeur d'eau.

Pression absolue	Températ. évaporation	Volume massique vapeur	Masse volumique vapeur	Enthalpie spécifique de l'eau (Chaleur sensible)		Enthalpie spécifique de la vapeur (chaleur totale)		Chaleur latente de vaporisation		Chaleur spécifique vapeur	Viscosité dynamique vapeur
				kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg	kJ/kg	Kcal/kg		
0.02	17.51	67.006	0.015	73.45	17.54	2533.64	605.15	2460.19	587.61	1.8644	0.000010
0.03	24.10	45.667	0.022	101.00	24.12	2545.64	608.02	2444.65	583.89	1.8694	0.000010
0.04	28.98	34.802	0.029	121.41	29.00	2554.51	610.13	2433.10	581.14	1.8736	0.000010
0.05	32.90	28.194	0.035	137.77	32.91	2561.59	611.83	2423.82	578.92	1.8774	0.000010
0.06	36.18	23.741	0.042	151.50	36.19	2567.51	613.24	2416.01	577.05	1.8808	0.000010
0.07	39.02	20.531	0.049	163.38	39.02	2572.62	614.46	2409.24	575.44	1.8840	0.000010
0.08	41.53	18.105	0.055	173.87	41.53	2577.11	615.53	2403.25	574.01	1.8871	0.000010
0.09	43.79	16.204	0.062	183.28	43.78	2581.14	616.49	2397.85	572.72	1.8899	0.000010
0.1	45.83	14.675	0.068	191.84	45.82	2584.78	617.36	2392.94	571.54	1.8927	0.000010
0.2	60.09	7.650	0.131	251.46	60.06	2609.86	623.35	2358.40	563.30	1.9156	0.000011
0.3	69.13	5.229	0.191	289.31	69.10	2625.43	627.07	2336.13	557.97	1.9343	0.000011
0.4	75.89	3.993	0.250	317.65	75.87	2636.88	629.81	2319.23	553.94	1.9506	0.000011
0.5	81.35	3.240	0.309	340.57	81.34	2645.99	631.98	2305.42	550.64	1.9654	0.000012
0.6	85.95	2.732	0.366	359.93	85.97	2653.57	633.79	2293.64	547.83	1.9790	0.000012
0.7	89.96	2.365	0.423	376.77	89.99	2660.07	635.35	2283.30	545.36	1.9919	0.000012
0.8	93.51	2.087	0.479	391.73	93.56	2665.77	636.71	2274.05	543.15	2.0040	0.000012
0.9	96.71	1.869	0.535	405.21	96.78	2670.85	637.92	2265.65	541.14	2.0156	0.000012
1	99.63	1.694	0.590	417.51	99.72	2675.43	639.02	2257.92	539.30	2.0267	0.000012
1.1	102.32	1.549	0.645	428.84	102.43	2679.61	640.01	2250.76	537.59	2.0373	0.000012
1.2	104.81	1.428	0.700	439.36	104.94	2683.44	640.93	2244.08	535.99	2.0476	0.000012
1.3	107.13	1.325	0.755	449.19	107.29	2686.98	641.77	2237.79	534.49	2.0576	0.000013
1.4	109.32	1.236	0.809	458.42	109.49	2690.28	642.56	2231.86	533.07	2.0673	0.000013
1.5	111.37	1.159	0.863	467.13	111.57	2693.36	643.30	2226.23	531.73	2.0768	0.000013
1.5	111.37	1.159	0.863	467.13	111.57	2693.36	643.30	2226.23	531.73	2.0768	0.000013
1.6	113.32	1.091	0.916	475.38	113.54	2696.25	643.99	2220.87	530.45	2.0860	0.000013
1.7	115.17	1.031	0.970	483.22	115.42	2698.97	644.64	2215.75	529.22	2.0950	0.000013
1.8	116.93	0.977	1.023	490.70	117.20	2701.54	645.25	2210.84	528.05	2.1037	0.000013
1.9	118.62	0.929	1.076	497.85	118.91	2703.98	645.83	2206.13	526.92	2.1124	0.000013
2	120.23	0.885	1.129	504.71	120.55	2706.29	646.39	2201.59	525.84	2.1208	0.000013
2.2	123.27	0.810	1.235	517.63	123.63	2710.60	647.42	2192.98	523.78	2.1372	0.000013
2.4	126.09	0.746	1.340	529.64	126.50	2714.55	648.36	2184.91	521.86	2.1531	0.000013
2.6	128.73	0.693	1.444	540.88	129.19	2718.17	649.22	2177.30	520.04	2.1685	0.000013
2.8	131.20	0.646	1.548	551.45	131.71	2721.54	650.03	2170.08	518.32	2.1835	0.000013
3	133.54	0.606	1.651	561.44	134.10	2724.66	650.77	2163.22	516.68	2.1981	0.000013
3.5	138.87	0.524	1.908	584.28	139.55	2731.63	652.44	2147.35	512.89	2.2331	0.000014
4	143.63	0.462	2.163	604.68	144.43	2737.63	653.87	2132.95	509.45	2.2664	0.000014

4.5	147.92	0.414	2.417	623.17	148.84	2742.88	655.13	2119.71	506.29	2.2983	0.000014
5	151.85	0.375	2.669	640.12	152.89	2747.54	656.24	2107.42	503.35	2.3289	0.000014
5.5	155.47	0.342	2.920	655.81	156.64	2751.70	657.23	2095.90	500.60	2.3585	0.000014
6	158.84	0.315	3.170	670.43	160.13	2755.46	658.13	2085.03	498.00	2.3873	0.000014
6.5	161.99	0.292	3.419	684.14	163.40	2758.87	658.94	2074.73	495.54	2.4152	0.000014
7	164.96	0.273	3.667	697.07	166.49	2761.98	659.69	2064.92	493.20	2.4424	0.000015
7.5	167.76	0.255	3.915	709.30	169.41	2764.84	660.37	2055.53	490.96	2.4690	0.000015
8	170.42	0.240	4.162	720.94	172.19	2767.46	661.00	2046.53	488.80	2.4951	0.000015
8.5	172.94	0.227	4.409	732.03	174.84	2769.89	661.58	2037.86	486.73	2.5206	0.000015
9	175.36	0.215	4.655	742.64	177.38	2772.13	662.11	2029.49	484.74	2.5456	0.000015
9.5	177.67	0.204	4.901	752.82	179.81	2774.22	662.61	2021.40	482.80	2.5702	0.000015
10	179.88	0.194	5.147	762.60	182.14	2776.16	663.07	2013.56	480.93	2.5944	0.000015
11	184.06	0.177	5.638	781.11	186.57	2779.66	663.91	1998.55	477.35	2.6418	0.000015
12	187.96	0.163	6.127	798.42	190.70	2782.73	664.64	1984.31	473.94	2.6878	0.000015
13	191.60	0.151	6.617	814.68	194.58	2785.42	665.29	1970.73	470.70	2.7327	0.000015
14	195.04	0.141	7.106	830.05	198.26	2787.79	665.85	1957.73	467.60	2.7767	0.000016
15	198.28	0.132	7.596	844.64	201.74	2789.88	666.35	1945.24	464.61	2.8197	0.000016
16	201.37	0.124	8.085	858.54	205.06	2791.73	666.79	1933.19	461.74	2.8620	0.000016
17	204.30	0.117	8.575	871.82	208.23	2793.37	667.18	1921.55	458.95	2.9036	0.000016
18	207.11	0.110	9.065	884.55	211.27	2794.81	667.53	1910.27	456.26	2.9445	0.000016
19	209.79	0.105	9.556	896.78	214.19	2796.09	667.83	1899.31	453.64	2.9849	0.000016
20	212.37	0.100	10.047	908.56	217.01	2797.21	668.10	1888.65	451.10	3.0248	0.000016
21	214.85	0.095	10.539	919.93	219.72	2798.18	668.33	1878.25	448.61	3.0643	0.000016
22	217.24	0.091	11.032	930.92	222.35	2799.03	668.54	1868.11	446.19	3.1034	0.000016
23	219.55	0.087	11.525	941.57	224.89	2799.77	668.71	1858.20	443.82	3.1421	0.000016
24	221.78	0.083	12.020	951.90	227.36	2800.39	668.86	1848.49	441.50	3.1805	0.000017
25	223.94	0.080	12.515	961.93	229.75	2800.91	668.99	1838.98	439.23	3.2187	0.000017
26	226.03	0.077	13.012	971.69	232.08	2801.35	669.09	1829.66	437.01	3.2567	0.000017
27	228.06	0.074	13.509	981.19	234.35	2801.69	669.17	1820.50	434.82	3.2944	0.000017
28	230.04	0.071	14.008	990.46	236.57	2801.96	669.24	1811.50	432.67	3.3320	0.000017
29	231.96	0.069	14.508	999.50	238.73	2802.15	669.28	1802.65	430.56	3.3695	0.000017
30	233.84	0.067	15.009	1008.33	240.84	2802.27	669.31	1793.94	428.48	3.4069	0.000017

Tableau 2 : Les caracteristiques thermodynamiques de la vapeur d'eau.

Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr
-10 °C	1,340	1,340	1,340	1,340	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341	1,341
-9 °C	1,335	1,335	1,335	1,335	1,335	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336
-8 °C	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,330	1,331	1,331	1,331	1,331	1,331
-7 °C	1,324	1,325	1,325	1,325	1,325	1,325	1,326	1,326	1,326	1,326	1,326
-6 °C	1,319	1,320	1,320	1,320	1,320	1,320	1,321	1,321	1,321	1,321	1,321
-5 °C	1,314	1,314	1,315	1,315	1,315	1,315	1,316	1,316	1,316	1,316	1,316
-4 °C	1,309	1,309	1,310	1,310	1,310	1,310	1,311	1,311	1,311	1,311	1,311
-3 °C	1,304	1,304	1,305	1,305	1,305	1,305	1,306	1,306	1,306	1,306	1,307
-2 °C	1,299	1,299	1,300	1,300	1,300	1,301	1,301	1,301	1,301	1,302	1,302
-1 °C	1,294	1,295	1,295	1,295	1,295	1,296	1,296	1,296	1,296	1,297	1,297
0 °C	1,289	1,290	1,290	1,290	1,290	1,291	1,291	1,291	1,292	1,292	1,292
1 °C	1,284	1,285	1,285	1,285	1,286	1,286	1,286	1,287	1,287	1,287	1,288
2 °C	1,279	1,280	1,280	1,281	1,281	1,281	1,282	1,282	1,282	1,283	1,283
3 °C	1,275	1,275	1,275	1,276	1,276	1,276	1,277	1,277	1,277	1,278	1,278
4 °C	1,270	1,270	1,271	1,271	1,271	1,272	1,272	1,272	1,273	1,273	1,274
5 °C	1,265	1,265	1,266	1,266	1,267	1,267	1,267	1,268	1,268	1,269	1,269
6 °C	1,260	1,261	1,261	1,261	1,262	1,262	1,263	1,263	1,264	1,264	1,264
7 °C	1,255	1,256	1,256	1,257	1,257	1,258	1,258	1,259	1,259	1,260	1,260
8 °C	1,250	1,251	1,251	1,252	1,252	1,253	1,253	1,254	1,254	1,255	1,255
9 °C	1,246	1,246	1,247	1,247	1,248	1,248	1,249	1,249	1,250	1,251	1,251
10 °C	1,241	1,241	1,242	1,243	1,243	1,244	1,244	1,245	1,245	1,246	1,247
11 °C	1,236	1,237	1,237	1,238	1,239	1,239	1,240	1,240	1,241	1,242	1,242
12 °C	1,231	1,232	1,233	1,233	1,234	1,235	1,235	1,236	1,237	1,237	1,238
13 °C	1,227	1,227	1,228	1,229	1,229	1,230	1,231	1,231	1,232	1,233	1,234
14 °C	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225	1,226	1,226	1,227	1,228	1,229	1,229
15 °C	1,217	1,218	1,219	1,220	1,220	1,221	1,222	1,223	1,223	1,224	1,225
16 °C	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216	1,217	1,217	1,218	1,219	1,220	1,221
17 °C	1,208	1,209	1,210	1,210	1,211	1,212	1,213	1,214	1,215	1,216	1,217
18 °C	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207	1,208	1,209	1,210	1,211	1,211	1,212
19 °C	1,198	1,199	1,200	1,201	1,202	1,203	1,204	1,205	1,206	1,207	1,208
20 °C	1,194	1,195	1,196	1,197	1,198	1,199	1,200	1,201	1,202	1,203	1,204
21 °C	1,189	1,190	1,191	1,192	1,193	1,194	1,196	1,197	1,198	1,199	1,200
22 °C	1,184	1,185	1,187	1,188	1,189	1,190	1,191	1,192	1,194	1,195	1,196
23 °C	1,179	1,181	1,182	1,183	1,184	1,186	1,187	1,188	1,189	1,191	1,192
24 °C	1,175	1,176	1,177	1,179	1,180	1,181	1,183	1,184	1,185	1,187	1,188

25 °C	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178	1,180	1,181	1,183	1,184
26 °C	1,165	1,167	1,168	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176	1,177	1,178	1,180
27 °C	1,160	1,162	1,164	1,165	1,167	1,168	1,170	1,171	1,173	1,174	1,176
28 °C	1,156	1,157	1,159	1,161	1,162	1,164	1,165	1,167	1,169	1,170	1,172
29 °C	1,151	1,153	1,154	1,156	1,158	1,160	1,161	1,163	1,165	1,166	1,168
30 °C	1,146	1,148	1,150	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159	1,161	1,163	1,164
31 °C	1,141	1,143	1,145	1,147	1,149	1,151	1,153	1,155	1,157	1,159	1,161
32 °C	1,136	1,138	1,140	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151	1,153	1,155	1,157
33 °C	1,131	1,133	1,136	1,138	1,140	1,142	1,144	1,146	1,149	1,151	1,153
34 °C	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,140	1,142	1,145	1,147	1,149
35 °C	1,121	1,124	1,126	1,129	1,131	1,133	1,136	1,138	1,141	1,143	1,145
36 °C	1,116	1,119	1,122	1,124	1,127	1,129	1,132	1,134	1,137	1,139	1,142
37 °C	1,111	1,114	1,117	1,119	1,122	1,125	1,127	1,130	1,133	1,135	1,138
38 °C	1,106	1,109	1,112	1,115	1,118	1,120	1,123	1,126	1,129	1,132	1,134
39 °C	1,101	1,104	1,107	1,110	1,113	1,116	1,119	1,122	1,125	1,128	1,131
40 °C	1,096	1,099	1,102	1,105	1,109	1,112	1,115	1,118	1,121	1,124	1,127
41 °C	1,091	1,094	1,098	1,101	1,104	1,107	1,111	1,114	1,117	1,120	1,124
42 °C	1,086	1,089	1,093	1,096	1,099	1,103	1,106	1,110	1,113	1,117	1,120
43 °C	1,081	1,084	1,088	1,091	1,095	1,099	1,102	1,106	1,109	1,113	1,116
44 °C	1,075	1,079	1,083	1,087	1,090	1,094	1,098	1,102	1,105	1,109	1,113
45 °C	1,070	1,074	1,078	1,082	1,086	1,090	1,094	1,098	1,102	1,106	1,109
46 °C	1,064	1,069	1,073	1,077	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,102	1,106
47 °C	1,059	1,063	1,068	1,072	1,076	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,103
48 °C	1,053	1,058	1,063	1,067	1,072	1,076	1,081	1,085	1,090	1,095	1,099
49 °C	1,048	1,053	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,081	1,086	1,091	1,096
50 °C	1,042	1,047	1,052	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,082	1,087	1,092
51 °C	1,036	1,042	1,047	1,052	1,057	1,063	1,068	1,073	1,078	1,084	1,089
52 °C	1,030	1,036	1,041	1,047	1,053	1,058	1,064	1,069	1,075	1,080	1,086
53 °C	1,025	1,030	1,036	1,042	1,048	1,053	1,059	1,065	1,071	1,076	1,082
54 °C	1,019	1,025	1,031	1,037	1,043	1,049	1,055	1,061	1,067	1,073	1,079
55 °C	1,012	1,019	1,025	1,031	1,038	1,044	1,050	1,057	1,063	1,069	1,076
56 °C	1,006	1,013	1,020	1,026	1,033	1,039	1,046	1,053	1,059	1,066	1,072
57 °C	1,000	1,007	1,014	1,021	1,028	1,035	1,042	1,048	1,055	1,062	1,069
58 °C	0,994	1,001	1,008	1,015	1,023	1,030	1,037	1,044	1,051	1,059	1,066
59 °C	0,987	0,995	1,002	1,010	1,017	1,025	1,033	1,040	1,048	1,055	1,063
60 °C	0,981	0,989	0,997	1,004	1,012	1,020	1,028	1,036	1,044	1,052	1,060

61 °C	0,974	0,982	0,991	0,999	1,007	1,015	1,023	1,032	1,040	1,048	1,056
62 °C	0,967	0,976	0,985	0,993	1,002	1,010	1,019	1,027	1,036	1,045	1,053
63 °C	0,960	0,969	0,978	0,987	0,996	1,005	1,014	1,023	1,032	1,041	1,050
64 °C	0,953	0,963	0,972	0,982	0,991	1,000	1,010	1,019	1,028	1,038	1,047
65 °C	0,946	0,956	0,966	0,976	0,985	0,995	1,005	1,015	1,024	1,034	1,044
66 °C	0,939	0,949	0,959	0,970	0,980	0,990	1,000	1,010	1,020	1,031	1,041
67 °C	0,932	0,942	0,953	0,964	0,974	0,985	0,995	1,006	1,017	1,027	1,038
68 °C	0,924	0,935	0,946	0,957	0,968	0,979	0,991	1,002	1,013	1,024	1,035
69 °C	0,917	0,928	0,940	0,951	0,963	0,974	0,986	0,997	1,009	1,020	1,032
70 °C	0,909	0,921	0,933	0,945	0,957	0,969	0,981	0,993	1,005	1,017	1,029
71 °C	0,901	0,913	0,926	0,938	0,951	0,963	0,976	0,988	1,001	1,013	1,026
72 °C	0,893	0,906	0,919	0,932	0,945	0,958	0,971	0,984	0,997	1,010	1,023
73 °C	0,885	0,898	0,912	0,925	0,939	0,952	0,966	0,979	0,993	1,006	1,020
74 °C	0,876	0,890	0,904	0,918	0,932	0,947	0,961	0,975	0,989	1,003	1,017
75 °C	0,868	0,882	0,897	0,912	0,926	0,941	0,955	0,970	0,985	0,999	1,014
76 °C	0,859	0,874	0,889	0,905	0,920	0,935	0,950	0,965	0,981	0,996	1,011
77 °C	0,850	0,866	0,882	0,898	0,913	0,929	0,945	0,961	0,976	0,992	1,008
78 °C	0,841	0,857	0,874	0,890	0,907	0,923	0,940	0,956	0,972	0,989	1,005
79 °C	0,832	0,849	0,866	0,883	0,900	0,917	0,934	0,951	0,968	0,985	1,002
80 °C	0,822	0,840	0,858	0,875	0,893	0,911	0,929	0,946	0,964	0,982	1,000
81 °C	0,813	0,831	0,849	0,868	0,886	0,905	0,923	0,941	0,960	0,978	0,997
82 °C	0,803	0,822	0,841	0,860	0,879	0,898	0,917	0,937	0,956	0,975	0,994
83 °C	0,793	0,813	0,832	0,852	0,872	0,892	0,912	0,932	0,951	0,971	0,991
84 °C	0,783	0,803	0,824	0,844	0,865	0,885	0,906	0,927	0,947	0,968	0,988
85 °C	0,772	0,793	0,815	0,836	0,857	0,879	0,900	0,922	0,943	0,964	0,986
86 °C	0,761	0,784	0,806	0,828	0,850	0,872	0,894	0,916	0,939	0,961	0,983
87 °C	0,750	0,773	0,796	0,819	0,842	0,865	0,888	0,911	0,934	0,957	0,980
88 °C	0,739	0,763	0,787	0,811	0,835	0,858	0,882	0,906	0,930	0,954	0,977
89 °C	0,728	0,753	0,777	0,802	0,827	0,851	0,876	0,901	0,925	0,950	0,975
90 °C	0,716	0,742	0,767	0,793	0,819	0,844	0,870	0,895	0,921	0,946	0,972
91 °C	0,704	0,731	0,757	0,784	0,810	0,837	0,863	0,890	0,916	0,943	0,969
92 °C	0,692	0,720	0,747	0,775	0,802	0,829	0,857	0,884	0,912	0,939	0,967
93 °C	0,680	0,708	0,737	0,765	0,794	0,822	0,850	0,879	0,907	0,936	0,964
94 °C	0,667	0,697	0,726	0,756	0,785	0,814	0,844	0,873	0,903	0,932	0,961
95 °C	0,654	0,685	0,715	0,746	0,776	0,807	0,837	0,867	0,898	0,928	0,959
96 °C	0,641	0,673	0,704	0,736	0,767	0,799	0,830	0,862	0,893	0,925	0,956

Tableau 3 : Les propriétés de l'air à différents température.

T	ρ	μ	ν	C_p	λ	a	Pr
K	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	-
250	1,413	$1,60\times 10^{-5}$	$0,949\times 10^{-5}$	1 005	0,0223	$1,32\times 10^{-5}$	0,722
300	1,177	$1,85\times 10^{-5}$	$1,57\times 10^{-5}$	1 006	0,0262	$2,22\times 10^{-5}$	0,708
350	0,998	$2,08\times 10^{-5}$	$2,08\times 10^{-5}$	1 009	0,0300	$2,98\times 10^{-5}$	0,697
400	0,883	$2,29\times 10^{-5}$	$2,59\times 10^{-5}$	1 014	0,0337	$3,76\times 10^{-5}$	0,689
450	0,783	$2,48\times 10^{-5}$	$2,89\times 10^{-5}$	1 021	0,0371	$4,22\times 10^{-5}$	0,683
500	0,705	$2,67\times 10^{-5}$	$3,69\times 10^{-5}$	1 030	0,0404	$5,57\times 10^{-5}$	0,680
550	0,642	$2,85\times 10^{-5}$	$4,43\times 10^{-5}$	1 039	0,0436	$6,53\times 10^{-5}$	0,680
600	0,588	$3,02\times 10^{-5}$	$5,13\times 10^{-5}$	1 055	0,0466	$7,51\times 10^{-5}$	0,680
650	0,543	$3,18\times 10^{-5}$	$5,85\times 10^{-5}$	1 063	0,0495	$8,58\times 10^{-5}$	0,682
700	0,503	$3,33\times 10^{-5}$	$6,63\times 10^{-5}$	1 075	0,0523	$9,67\times 10^{-5}$	0,684
750	0,471	$3,48\times 10^{-5}$	$7,39\times 10^{-5}$	1 086	0,0551	$10,8\times 10^{-5}$	0,686
800	0,441	$3,63\times 10^{-5}$	$8,23\times 10^{-5}$	1 098	0,0578	$12,0\times 10^{-5}$	0,689
850	0,415	$3,77\times 10^{-5}$	$9,07\times 10^{-5}$	1 110	0,0603	$13,1\times 10^{-5}$	0,692
900	0,392	$3,90\times 10^{-5}$	$9,93\times 10^{-5}$	1 121	0,0628	$14,3\times 10^{-5}$	0,696
950	0,372	$4,02\times 10^{-5}$	$10,8\times 10^{-5}$	1 132	0,0653	$15,5\times 10^{-5}$	0,699
1 000	0,352	$4,15\times 10^{-5}$	$11,8\times 10^{-5}$	1 142	0,0675	$16,8\times 10^{-5}$	0,702
1 100	0,320	$4,40\times 10^{-5}$	$13,7\times 10^{-5}$	1 161	0,0723	$19,5\times 10^{-5}$	0,706
1 200	0,295	$4,63\times 10^{-5}$	$15,7\times 10^{-5}$	1 179	0,0763	$22,0\times 10^{-5}$	0,714
1 300	0,271	$4,85\times 10^{-5}$	$17,9\times 10^{-5}$	1 197	0,0803	$24,8\times 10^{-5}$	0,722

Tableau 4 : La chaleur massique et spécifique des différents gazs.

	Densité	Chaleur spécifique kJ/kg°K	Chaleur massique par rapport à l'eau
Acide nitreux		0,69	0,17
Acide nitrique		0,69	0,17
Air sec 0-200 °C		0,72	0,17
Air sec 10°C		0,71	0,17
Air sec 0-800°C		0,78	0,19
Air sec 20 - 440°C		0,74	0,18
Ammoniac		1,76	0,42
Argon		0,3	0,07
Azote		0,71	0,17
Benzène		0,98	0,23
Bromine		0,19	0,05
Chlore		3,43	0,82
Chloroforme		0,54	0,13
Dioxyde de carbone		0,62	0,15
Dioxyde de soufre		0,49	0,12
Ether		1,95	0,47
Ethylène		1,66	0,40
Hydrogène		10	2,39
Méthane		1,86	0,44
Méthylène		1,53	0,37
Monoxyde de carbone		0,71	0,17
Oxygène		0,65	0,16
Vapeur d'eau 10 bar - 180 à 315 °C		1,76	0,42
Vapeur d'eau 0,68 bar - 50 à 315 °C		1,46	0,35
Vapeur d'eau 1 bar - 100 à 315 °C		1,5	0,36

Tableau 5: La masse volumique de l'air sec en fonction de la température.

**Masse volumique de l'air sec
en fonction de la température à $p_0 = 1\,013,25$ hPa**

ϑ en °C	ρ en kg/m ³	ϑ en °C	ρ en kg/m ³
-10	1,341	+40	1,127
-5	1,316	+45	1,110
0	1,292	+50	1,092
+5	1,269	+55	1,076
+10	1,247	+60	1,060
+15	1,225	+65	1,044
+20	1,204	+70	1,029
+25	1,184	+75	1,014
+30	1,164	+80	1,000
+35	1,146	+85	0,986

Tableau 6: Le coefficient d'échange global dans un échangeur en fonction de la nature des deux fluides.

Fluide chaud	Fluide froid	U_s (W/ m ² °C)
Gaz	Gaz	10 – 50
Gaz	Liquide visqueux	20 – 50
Gaz	Liquide peu visqueux	20 – 80
Liquide visqueux	Gaz	20 – 50
Liquide peu visqueux	Gaz	20 – 80
Liquide visqueux	Liquide visqueux	100 - 200
Liquide visqueux	Liquide peu visqueux	100 - 300
Liquide peu visqueux	Liquide peu visqueux	700 - 1800
Vapeur se condensant	Liquide visqueux	200 - 400
Vapeur se condensant	Liquide peu visqueux	1000 – 2000
Vapeur se condensant	Liquide en ébullition	700 - 1500

Tableau 7: Le pouvoir calorifique des principaux combustibles.

Carburant	unité	PCS		PCI	
		kW.h	MJ	kW.h	MJ
Butane	kg	13,72	49	12,61	45
Propane	kg	13,83	50	12,79	46
Butane	m ³	33,48	121	30,75	111
Propane	m ³	25,95	93	23,95	86
Bois	kg	5,46	20	5,11	18
Anthracite	kg	9,95	36	9,53	34
Fioul domestique	L	10,74	39	10,06	36
Fioul lourd n°2	kg	11,69	42	10,99	40
Gaz de Lacq (méthane)	m ³	11,45	41	10,35	37
Gaz de groningen (méthane)	m ³	9,76	35	8,79	32

Équivalence kW.h - joule 1 kW.h = 3600 000 J

Annexe B

La transformation de Johnson

1. Généralité

La fonction Transformation de Johnson est utilisée pour transformer les données afin qu'elles suivent une loi normale en utilisant le système de loi de Johnson. Cette analyse permet d'effectuer les tâches suivantes :

- Déterminer si les données transformées et initiales suivent une loi normale.
- Stocker les valeurs transformées dans la feuille de travail.

Par exemple, un analyste qualité souhaite réaliser une analyse statistique supposant que les données suivent une loi normale. Les données du procédé peuvent ne pas être distribuées normalement, donc l'analyste utilise la transformation de Johnson pour vérifier la normalité des données initiales, transformer les données et vérifier que la transformation est effectuée. L'analyste stocke également les valeurs transformées dans la feuille de travail afin de les analyser ultérieurement.

La fonction Transformation de Johnson est interprétée selon la procédure suivante :

❖ **Etape1 : Visualiser l'ajustement de la loi de distribution normale**

Les droites de Henry permettent d'évaluer dans quelle mesure les données initiales et transformées suivent la loi normale.

Si la transformation de Johnson est efficace et que la loi normale représente un bon ajustement pour les données transformées, les points du diagramme des données transformées doivent suivre de près la ligne de distribution normale ajustée. Si des points s'écartent de la ligne droite, l'ajustement est inacceptable et la transformation de Johnson n'est pas efficace.

❖ **Etape 2 : Evaluer l'ajustement de la loi de distribution normale**

Utilisez la valeur de p pour déterminer si vous pouvez considérer que les données initiales et transformées suivent la loi normale.

Comparez la valeur de p au seuil alpha. Pour évaluer l'ajustement de la loi de distribution, on utilise souvent un alpha de 0,10.

- Une valeur de p inférieure à alpha indique que la loi de distribution normale ne constitue pas un bon ajustement.

- Une valeur de p supérieure ou égale à alpha indique que vous n'êtes pas en mesure d'affirmer que l'ajustement est mauvais. Vous pouvez considérer que les données suivent la loi normale.

❖ **Etape 3 : Examiner la fonction de transformation**

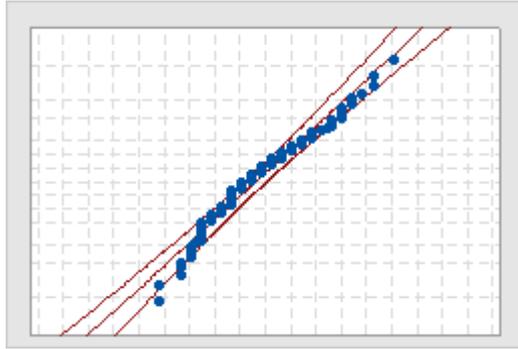
Minitab affiche les paramètres de la fonction de transformation de Johnson produisant le meilleur ajustement.

La transformation de Johnson sélectionne de façon optimale l'une des trois séries de lois pour transformer les données afin qu'elles suivent une loi normale :

Série de Johnson	Fonction de transformation
S_B	$\gamma + \eta \ln [(x - \varepsilon) / (\lambda + \varepsilon - x)]$
S_L	$\gamma + \eta \ln (x - \varepsilon)$
S_U	$\gamma + \eta \operatorname{Sinh}^{-1} [(x - \varepsilon) / \lambda]$, où $\operatorname{Sinh}^{-1}(x) = \ln [x + \text{racine carrée } (1 + x^2)]$
Terme	Description
S_B, S_U	Distribution de la série de transformations de Johnson bornée.
S_L	Distribution de la série de transformations de Johnson non bornée.

2. Graphique de Henry

Un diagramme de probabilité affiche chaque point de données en fonction du pourcentage de valeurs dans l'échantillon qui sont inférieures ou égales.



Le diagramme comprend les éléments suivants :

- **Ligne centrale**

Percentile attendu de la loi, en fonction des estimations des paramètres par le maximum de vraisemblance.

- **Bornes de confiance**

Une ligne courbe placée à gauche indique les bornes inférieures des intervalles de confiance pour les percentiles. Une ligne courbe placée à droite indique les bornes supérieures des intervalles de confiance pour les percentiles.

- **Interprétation**

Les droites de Henry permettent d'évaluer dans quelle mesure les données initiales et transformées suivent la loi normale.

Si la transformation de Johnson est efficace et que la loi normale représente un bon ajustement pour les données transformées, les points du diagramme des données transformées doivent suivre de près la ligne de distribution normale ajustée. Si des points s'écartent de la ligne droite, l'ajustement est inacceptable et la transformation de Johnson n'est pas efficace.

Annexe C

La consommation spécifique pour l'année 2017

	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	12,23	12,840992	13,1062951	12,0920502	12,0094787	12,3491736	11,8511833
2	10,38	12,0329897	11,3885602	10,8523687	11,7028004	12,2577266	11,5495632
3	11,77	12,245269	11,705314	9,31432803	11,9362654	11,6363636	11,7275598
4	11,61	12,2071882	13,1088083	10,2307692	10,9348915	11,6602317	12,6823638
5	10,39	13,7892483	14,141286	10,1053898	11,4517647	12,1037924	12,8674121
6	11,43	13,7886252	13,5888836	10,9542268	10,7566938	11,1829945	11,1672225
7	12,20	11,184466	14,1630901	10,1290206	11,4563107	10,0165107	11,8013393
8	10,83	11,457976	11,7549669	10,8552124	14,091273	11,1043319	12,9071856
9	10,32	11,9619048	12,2881356	10,4615385	12,9063098	11,2794521	12,2612172
10	12,30	12,0610535	13,4665508	10,2489837	12,605588	11,6508764	12,8728708
11	12,30	12,8794239	11,3618677	9,60884899	12,7595726	10,8908238	12,6561199
12	12,28	12,5010931	11,1105901	12,0946538	12,6166148	9,66693745	12,9142474
13	12,12	12,4608591	11,3997243	10,6772263	12,5571429	10,2315422	12,1364282
14	12,73	13,4050388	11,1585366	10,611014	12,5297674	11,965085	12,8998815
15	11,98	13,1685725	11,2097458	10,2930841	10,3056355	4,31528662	12,9493613
16	13,09	13,9228598	14,937564	12,9166667	11,3622047	10,7277563	12,3695466
17	12,36	13,9471459	11,590888	13,0367305	10,6957425	10,936133	12,6913876
18	11,96	13,2150461	12,8120584	13,2042967	10,5178147	11,3606341	12,451696
19	12,88	13,1902072	12,8429101	9,04817861	10,3351499	12,5197265	11,735168
20	12,12	13,5185185	13,4281581	10,4015776	9,79217604	12,0058565	13,2093882
21	13,07	12,7659574	11,9356105	10,0286533	12,394636	12,4939856	14,0783558
22	11,88	13,5	10,9708315	11,0888031	11,995104	11,8117121	13,8589819
23	13,23	13,1742574	7,84748513	10,6910039	12,1350887	12,6506024	12,399752
24	13,78	13,1769384	10,2997022	11,2283286	12,3006834	11,5081756	12,8453039
25	11,83	11,5821364	12,0545535	11,157563	12,6782884	11,9080605	11,4297659
26	14,12	13,2518797	11,2605364	12,5739645	12,0289303	10,074141	12,4080882
27	14,38	12,4788335	12,6536773	13,6515556	11,7876659	11,9529311	12,8357571
28	13,09	12,1370968	11,4354588	11,5241747	12,4255319	12,4312896	11,8367347
29	12,08	11,1974567	11,4579981	11,1876543	12,5273038	11,0763734	12,6288416
30	10,74	13,1938858	12,2348754	10,0940171	12,5719807	10,8378871	12,582552
31	11,18	11,33	9,67	9,62695548	11,2171838	9,74339903	13,5135135

Le débit du fuel

	F1	F2	F3	F4	F5
1	2362,5	2624,6	2366,4	2341,5	2197,4
2	2139,7	2662	1109,2	2188,6	2431,4
3	2276,7	2651,3	2057,7	2142	2536
4	2273,7	2603,5	2570	2157,6	2844
5	2172	2695,1	2183,7	2827,6	3039,7
6	2195,1	2674,8	2158,2	2578,5	2326,8
7	2481,1	2648,8	2319,4	2464,3	2317,5
8	2693,5	2699,4	2296,8	2261,9	2072,1
9	2630,1	2549,6	2445,1	2375,9	2260,5
10	2701,3	2794,1	1730,7	2330,1	2144,8
11	2682,2	2628,1	2472	2279	2315,6
12	2537,4	2787,8	2502,6	2417,9	2453,5
13	2701	2802	2362,1	2538,6	2630
14	2700	2510,9	2401	2413,2	2756
15	2734,4	2731,7	2687,8	2433,1	2560,3
16	2664,7	2582,9	2481,3	2441,8	2506,2
17	2639,4	2755,6	2514,3	2468,7	2381,3
18	2867,3	2320,5	2344	2206,5	1871,8
19	2784,9	2415,7	2423,6	2025,7	2040,8
20	2766,1	2540,4	2458,9	2337,3	2189,2

Le débit du produit

	F1	F2	F3	F4	F5
1	162,9	184,5	107,5	184,1	195,2
2	164,3	206,5	205,2	182	227,1
3	151,8	206,1	186,1	181,5	259,4
4	225,3	197	241,8	181,9	260,1
5	181,4	241	243,5	241,9	166,1
6	208,2	231	247,3	253,8	291,9
7	313,3	218,7	263,3	224	221,8
8	329,4	235,3	272,5	165,6	221,8
9	340	150	280,7	223,9	241,1
10	339,3	150,3	282,6	253,9	243,2
11	320,1	263,6	286,2	253,9	292,7
12	340	272,8	306,6	253,9	287,3
13	330,2	298,9	314,4	224	293,6
14	258,3	275,9	210,6	258,4	292,3
15	257,5	298,3	201,3	284,8	221,8
16	259,7	298,5	201,6	263,4	227,7
17	188,8	276,1	239,1	248,6	271,2
18	239,4	258,6	234,5	231,2	247,6
19	240,1	167,6	201,5	258,1	229,3
20	238,8	201,1	226,7	242,6	261,5

La température de la chambre

	F1	F2	F3	F4	F5
1	84	79	82	64	80
2	72	54	78	72	66
3	72	80	77	84	73
4	83	77	79	67	62
5	47	83	80	84	79
6	46	72	79	84	80
7	45	74	79	84	80
8	44	77	79	82	80
9	43	76	79	85	81
10	72	96	78	85	82
11	83	66	80	83	82
12	91	62	79	85	82
13	82	86	92	85	90
14	82	85	78	85	65
15	82	85	78	85	81
16	76	78	68	63	42
17	81	72	61	83	80
18	81	78	64	84	79
19	81	77	66	84	64
20	82	78	46	81	49
21	81	79	72	87	82

La température de la buse

	F1	F2	F3	F4	F5
1	761	725	820	708	801
2	727	113	761	820	732
3	620	489	890	773	695
4	702	790	461	226	204
5	144	658	449	689	660
6	140	731	447	717	869
7	138	747	445	729	871
8	135	758	442	828	895
9	130	798	439	918	895
10	408	404	913	868	862
11	623	240	853	788	766
12	602	669	857	801	809
13	894	847	546	870	399
14	911	833	917	854	243
15	900	915	909	863	772
16	700	727	651	396	138
17	856	180	400	696	773
18	904	824	704	899	763
19	914	832	381	897	190
20	916	916	921	906	940

La dépression

	F1	F2	F3	F4	F5
1	-4,1	-5,3	-3,5	-2,1	-4,9
2	-4,5	-8,2	-5	-7,9	-4,7
3	-1,3	-3,2	-3,1	-7,1	-5,1
4	-5,1	-3,2	-5,1	-11,9	-4,4
5	-2,4	-4	-1,9	-8,3	-9
6	-2,5	-3,4	-1,9	-7,7	-7,9
7	-2,5	-2,8	-1,9	-7,6	-7,1
8	-2,5	-3,1	-1,9	-6,6	-7,2
9	-2,5	-2,3	-1,9	-7	-8,1
10	-3,6	-4,4	-4,3	-6,4	-7,4
11	-3,2	-3,6	-4,4	-6,6	-7,5
12	-3,3	-2,8	-4,2	-6,4	-6
13	-4,4	-3,6	-6,4	-6,2	-11,9
14	-4	-2,4	-4	-6,3	-11,2
15	-3,7	-7,4	-4	-5,8	-6,8
16	-5	-9,9	-4,5	-8,1	-11,9
17	-4,8	-7,2	-7,5	-10,6	-7,9
18	-4,7	-7,1	-4,1	-5,9	-2,7
19	-4,3	-4	-7,5	-6,1	-11,9
20	-5	-5,8	-3,7	-6,4	-6,8

La température de sortie des filtres

	F1	F2	F3	F4	F5
1	81	77	80	76	77
2	71	56	80	77	78
3	62	50	76	78	78
4	73	77	76	74	71
5	79	77	74	68	65
6	47	71	67	76	74
7	46	72	68	76	74
8	44	73	69	77	75
9	64	85	77	75	75
10	79	66	76	69	75
11	78	89	77	74	75
12	78	75	78	76	75
13	77	81	76	76	64
14	78	79	76	76	74
15	71	76	60	62	45
16	76	72	65	71	70
17	77	76	52	75	50
18	78	76	72	75	70
19	78	75	61	76	58
20	70	76	77	78	75