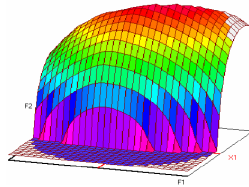


Année Universitaire : 2010-2011



Master Sciences et Techniques CAC Agiq

**Chimiométrie et Analyse Chimique : Application à la gestion industrielle
de la qualité**

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Titre

***OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DES TURBINES DISCONTINUES
PAR LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES***

Présenté par :

KHANSAE KARRIBOU

Encadré par :

- | | |
|------------------|--------------------|
| - Mr. S.OUTIFA | COSUMAR Casablanca |
| - Mr. A.LHASSANI | FST Fès |

Soutenu Le 21 Juin 2011 devant le jury composé de :

- M^r. A. LHASSANI

- M^r. T. SAFFAJ

- M^r. E. M. EL HADRAMI

- M^r. A. BOULAHNA

Stage effectué à : COSUMAR – raffinerie de Casablanca

DEDICACES

A

MA FAMILLE

Puissent –elles trouver le témoignage de ma gratitude

Mon affection sincère et de la reconnaissance pour les sacrifices

Qu'ils n'ont cessé de consentir pour moi et aux prières

Qu'elles formulent pour ma réussite.

A

TOUS MES AMIS

Nous avons vécu ensemble des moments marqués de souvenir.

Vous trouvez ici respect avec mes souhaits

de bonheur et de réussite dans la vie.

REMERCIEMENTS

Au terme de la rédaction de ce mémoire, je tiens à remercier Mr. D.IHRAI, le Directeur technique de la COSUMAR et Mr. ELHADRAMI responsable du Master chimométrie à la FST Fès de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce stage de projet de fin d'études au sein de cet honorable établissement. Mes remerciements vont également à tout le corps administratif et professoral de l'FSTF.

Je tiens à exprimer ma gratitude et présenter mes chaleureux remerciements à mon parrain Mr. S.OUTIFA ingénieur au service sirop pour son aide et ses précieux conseils.

Je remercie vivement Mr. A.LHASSANI professeur à la FSTF d'avoir accepté de m'encadrer et de m'orienter durant l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à tout le personnel de la COSUMAR pour leur accueil et leur amabilité.

Tous mes remerciements à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTES DES ANNEXES

INTRODUCTION..... 1

CONTEXTE DU PROJET 1

PREMIER PARTIE : BIBLIOGRAPHIE..... 1

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA COSUMAR.....	1
I- Historique.....	1
II- Fiche technique.....	2
III- Organigramme de la COSUMAR.....	3
IV- Données générales.....	3
CHAPITRE II : LES ETAPES DE RAFFINAGE DU SUCRE BRUT.....	5
I- LE SUCRE BRUT.....	5
I.1-Le saccharose.....	5
I.2- Les cendres.....	5
I.3- Les sucres réducteurs.....	6
I.4- Le non sucre.....	6
I.5- L'eau.....	6
II- LE RAFFINAGE DE SUCRE BRUT.....	6
II.1- Réception et stockage du sucre brut.....	7
II.2- Affinage.....	7
II.3- Epuration.....	7
II.4- Décoloration.....	8
II.5- Evaporation.....	9
II.6- Cristallisation.....	9
II.6.1-Cuisson.....	10
II.6.2- Malaxage.....	12
II.6.3- Essorage.....	13
II.7- Séchage et refroidissement.....	13
II.8- Stockage dans les silos.....	13
II.9-Bas produits.....	14
CHPITRE III : LA CRISTALLISATION.....	15
I- INTRODUCTION.....	15
II- GENERALITES.....	15
II.1-Solubilité du saccharose.....	15

II.2- Saturation et sursaturation	16
III- MECANISME DE LA CRISTALLISATION	17
VI- FACTEURS INFLUENTS SUR LA CRISTALLISATION	18
CHAPITRE IV : LA FILTRATION CENTRIFUGEUSE	19
I- INTRODUCTION	19
II- FORCE CENTRIFUGE	19
III- PRESSION CENTRIFUGE DE FILTRATION.....	20
VI- LES ETAPES D'UN CYCLE D'ESSORAGE CENTRIFUGE.....	21
V- DIFFICULTES DE SEPARATION LIEES AUX PRODUIT A TRAITER	23
CHAPITRE V : LES PLANS D'EXPERIENCES	24
I- LES ORIGINES.....	24
II- BUT DES PLANS D'EXPERIENCES	24
III- NOTION D'ESPACE EXPERIMENTAL.....	25
IV- LE MODELE DE L'EXPERIMENTATEUR	25
V- DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	26
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	28
I- ANALYSE DE SUCRE BLANC	28
I.1- Détermination de la coloration de sucre blanc.....	28
I.2- Détermination de l'humidité.....	29
II- ANALYSE DES EGOUTS	30
II.1- DETERMINATION DE LA MATIERE SECHE OU BRIX.....	30
II.2- DETERMINATION DE TAUX DE CENDRES	31
II.3- DETERMINATION DES SUCRES REDUCTEURS.....	31
III- PLANS UTILISE POUR L'EXPERIMENTATION	33
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	34
CHAPITRE I : DESCRIPTION DE L'ATELIER DE CRISTALLISATION	34
I- APPARIELLAGE	34
II- FONCTIONNEMENT DES TURBINES DISCONTINUES	35

III- FACTEURS INFLUANÇANT LE FONCTIONNEMENT DES TURBINES.....	38
CHAPITRE II : ETUDES DES TURBINES DISCONTINUES	39
I- CRIBLAGE DES FACTEURS	39
I.1- Caractéristiques du plan de criblage	39
I.2- Résultats du plan de criblage et discussion.....	41
CONCLUSION	46
II- MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES TURBINES.....	47
II.1- Caractéristiques du plan de modélisation	47
II.2- Résultats du plan de modélisation	49
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES &WEBOGRAPHIQUES.....	52
ANNEXES	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de la station de décoloration	9
Figure 2 : Courbe de solubilité du saccharose	16
Figure 3 : Essorage industriel	19
Figure 4 : Essorage centrifuge	20
Figure 5 : Les différentes étapes du cycle d'essorage	22
Figure 6 : Déroulement de cycle typique d'une centrifugeuse discontinue	36
Figure 7 : Sous ensemble d'une turbine discontinue	37
Figure 8 : Etude graphique des effets de la réponse coloration	34
Figure 9 : Effets Pareto individuels pour la coloration	42
Figure 10 : Effets Pareto cumulés pour la coloration	42
Figure 11 : Etude graphique des effets de la réponse humidité	43
Figure 12 : Effets Pareto individuels pour l'humidité	43

Figure 13 : Effets Pareto cumulés pour l’humidité.....	44
Figure 14 : Etude graphique des effets de la réponse pureté ER.....	44
Figure 15 : Effets Pareto individuels pour la pureté ER.....	45
Figure 16 : Effets Pareto cumulés pour la pureté ER.....	45
Figure 17 : Etude graphique des effets de la réponse pureté EP.....	45
Figure 18 : Effets Pareto individuels pour la pureté EP.....	46
Figure 19 : Effets Pareto cumulés pour la pureté EP.....	46

LISTE DES TABELAUX

Tableau 1 : Proportion des éléments composants les cendres du sucre brut.....	5
Tableau 2 : Sous ensemble des turbines discontinues.	37
Tableau 3 : Facteurs et domaine d’étude	40
Tableau 4 : Plans d’expérimentation	41
Tableau 5 : Facteurs et domaine d’étude	47
Tableau 6 : Plans d’expérimentation	49

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : FILIALES DU GROUPE COSUMAR	54
ANNEXE 2 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES TURBINES DISCONTINUES....	55
ANNEXE 3 : APROCEDE DE RAFFINAGE DE LA COSUMAR.....	56
ANNEXE 4 : ATELIER DE CRISTALLISATION DE LA COSUMAR	57
ANNEXE 5 : RESULTATS DU PALN DE CRIBALGE.....	58

INTRODUCTION

Avec l'avènement des produits sucriers d'importation, l'industrie sucrière marocaine verra une concurrence accrue. Pour améliorer la compétitivité, répondre aux besoins du marché et accompagner les tendances des consommateurs, la COSUMAR suit une stratégie de modernisation et de développement au niveau de l'amont et de l'aval. En effet, des efforts

considérables sont déployés par des projets de modernisation et d'extension qui rentrent dans le cadre du programme INDIMAGE 2012.

L'objectif ultime de ce programme est l'amélioration de la qualité, qui commence dès le premier maillon de la chaîne de production. Il ne faut pas nier que les acquis technologiques encouragent et participent fortement au rehaussement de la qualité. Pour cela, la COSUMAR a choisi d'investir dans du matériels technologiques. Dans ce cadre, une nouvelle unité de cristallisation, qui inclut des turbines centrifugeuses, a démarré son activité en août 2009 au sein de la raffinerie de Casablanca.

Plusieurs projets d'études visant à maîtriser et à optimiser le fonctionnement de cette nouvelle extension ont accompagnés ce démarrage. C'est dans cette optique que s'inscrit ce projet de fin d'études.

Dans le présent travail, on commencera par définir le contexte du projet où il s'agira de présenter la problématique, les objectifs, les contraintes et la démarche suivie. On enchaînera avec une revue bibliographique qui exposera des généralités sur la raffinerie COSUMAR de Casablanca, les étapes du raffinage du sucre brut, les aspects de la cristallisation et de la filtration centrifugeuse ainsi que la méthodologie des plans d'expériences. Ensuite, le matériel et les méthodes utilisés feront l'objet de la seconde partie.

Enfin, on détaillera les résultats obtenus dans la troisième partie, puis on conclura cette étude par une série de recommandations.

CONTEXTE DU PROJET

PROBLEMATIQUE

La centrifugation ou le turbinage de la masse cristallisée est l'étape qui consiste à non seulement de séparer les cristaux mais aussi de les laver afin d'obtenir un sucre blanc.

La coloration et l'humidité sont des caractéristiques importantes du sucre turbiné. L'humidité ne constitue pas seulement un critère de qualité, mais aussi un paramètre technologique essentiel. En effet, l'humidité est importante dans la mesure où c'est un facteur décisif pour le stockage en silos et la coloration de sucre est une exigence des clients.

Bref, devant l'exigence de ses clients, maîtriser le fonctionnement des turbines devient indispensable dans la raffinerie.

OBJECTIFS

C'est dans le cadre d'optimiser le fonctionnement des turbines discontinues que le service Raffinage-Silos de stockage de COSUMAR m'a confié ce projet. A travers ce travail, on vise :

- d'une part, à améliorer le fonctionnement des turbines avec un minimum de coût et un maximum de précision ;
- et d'autre part, à atteindre une coloration de 25 IU ; une humidité de 0,1 ; ainsi qu'une pureté d'égout pauvre de 96 et d'égout riche de 98.

CONTRAINTES

La réalisation de ce projet dépend de plusieurs parties. En fait, le turbinage est la dernière étape avant le stockage. Il dépend fortement des conditions en amont, on cite tout particulièrement l'alimentation en masse cuite qui est fonctions des autres opérations.

DEMARCHE

Le bon fonctionnement des turbines revient à maîtriser les caractéristiques de la masse cuite c.à.d. la cristallisation et de définir les paramètres de marche optimaux des turbines.

Ce projet traite les turbines du premier jet (5 turbines) vu qu'il produit environ 65% de la totalité du sucre de l'unité.

La réalisation de ce travail commence par dresser une liste des paramètres influençant le turbinage à partir de la revue bibliographique et la visite de l'atelier de turbinage. Les paramètres pouvant être modifiés seront retenus afin d'en sélectionner ceux à forte influence sur le turbinage, via un plan de criblage. Ces facteurs serviront à la modélisation

mathématique du fonctionnement des turbines qui verra son application dans la recherche d'un point optimal, satisfaisant les objectifs fixés.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE LA COSUMAR

Groupe COSUMAR (Compagnie Sucrière Marocaine et de Raffinage) est une Entreprise Leader sur le marché national du sucre, elle est cotée en bourse des valeurs de Casablanca à partir de 1988 [1]. Ses métiers de raffineur du sucre brut importé et de conditionneur du sucre sous toutes ses formes, morceaux, lingots, granulés et pains, lui confère une place de choix tant dans le paysage économique que social marocains.

I- Historique

La COSUMAR a été fondée en Avril 1929 sous le sigle « COSUMA» par la société SAINT-LOUIS de Marseille, pour une capacité de production quotidienne de 100 tonnes de sucre à partir de 1932.

Au 1er janvier 1967, des accords entre l'Etat Marocain et COSUMA ont donné naissance à COSUMAR. La participation de l'état était de 50% du capital et la production de 900 tonnes par jour.

En 1985, L'ONA « Omnium Nord Africain» a participé avec 55% du capital de la COSUMAR. Le reste étant détenu par :

- La société Nationale d'Investissement SNI (11%).
- La Caisse Interprofessionnelle Marocaine de Retraite CIMR (10%)
- Le Fonds Marocain de Placement (7%).
- Les petits porteurs (4%).
- AL WATANYA (1%).

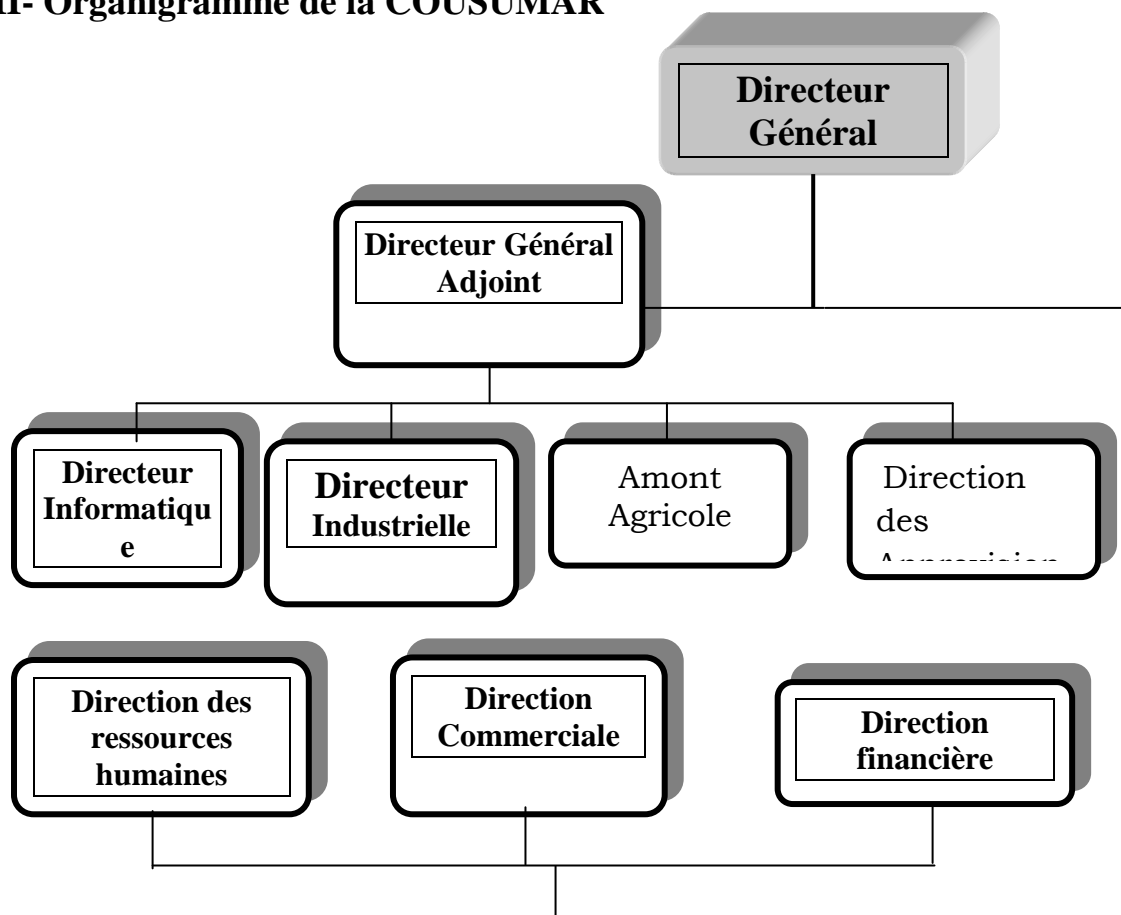
En 1993, COSUMAR absorbe par voie de fusion les sucreries de Zemamra et de Sidi Bennour.

En 2005, COSUMAR devient l'Opérateur national de l'industrie sucrière par l'acquisition des participations détenues par l'Etat dans le capital des quatre sociétés sucrières nationales : SURAC, SUTA, SUCRAFOR et SUNABEL.

II- Fiche technique

Raison sociale	Cosumar (compagnie sucrière marocaine et de raffinage)
Forme juridique	S.A
Secteur d'activité	Production de sucre
Siège social	8 Rue El Mouatamid Ibnou Abbed BP 3098.20 300 Casablanca Maroc.
Téléphone	(022) 67 83 00
Fax	(022) 24 10 71
E-mail	contact@cosumar.co.ma
Site web	www.cosumar.com
Registre de commerce	Casa 30007
Identification fiscale	01 64 03 53
Chiffre d'affaire	5 Milliards de Dirhams
Capital	419 105 700 Dirhams
TVA	616 051
CNSS	192 800 3
Implantation	5 sociétés
Capacité de production	2400 tonnes de sucre raffiné par jour
Effectifs	2000 personnes

III- Organigramme de la COUSUMAR



IV- Données générales

IV.1- La matière première

La matière première de la raffinerie de Casablanca est constituée du Sucre brut provenant de la canne à sucre Importé du BRESIL, des CARAIBES, de l'AUSTRALIE et de l'AFRIQUE DU SUD etc....

IV.2- Production annuelle

En 2007, La raffinerie de Casablanca a produit 708 102 ,208 t de sucre raffiné, ce qui conduit la COSUMAR à la satisfaction d'environ 50% des besoins du marché national.

IV.3- Production journalière

La production journalière a progressé régulièrement pour atteindre actuellement 2400 T/J de sucre raffiné.

IV.4- La raffinerie

Les installations industrielles de la Raffinerie s'étendent sur une superficie de 19 Hectares.

L'usine se divise en trois grandes parties :

- La centrale thermique
- Usine des pains turbinés (UPT).
- Usine des pains coulés (UPC).
- Usine de conditionnement Morceaux, lingots et granulés.

IV.5- L'énergie

La COSUMAR est autonome du point de vue énergie, car elle produit la quasi-totalité de ses besoins en énergie grâce à une centrale thermique, produisant une moyenne de 2400 tonnes de vapeur par jour à l'aide des chaudières à haute pression. Cette vapeur est utilisée pour faire tourner les turbos - alternateurs dans le but de la production de l'énergie électrique avant d'alimenter le procédé de raffinage.

IV.6- Produits finis

La capacité de production de la COSUMAR est de 700000 tonnes par année du sucre blanc sous quatre formes réparties comme suit : 57% sous forme de pain de sucre de 2Kg en carton de 24 Kg, 30% sous forme de granulés en sacs de 50 Kg ou en sachet de 2 Kg et 13% sous forme de lingots et de morceaux en boîte de 1Kg, ou en fardeaux de 5Kg.

En plus des produits principaux, la COSUMAR produit également la mélasse (40 tonnes par jour) qui est utilisée pour la production d'alcool et des levures ou encore comme aliment du bétail.

CHAPITRE II

LES ETAPES DE RAFFINAGE DU SUCRE BRUT

I- LE SUCRE BRUT

Le sucre brut provient de la cristallisation du saccharose dans une eau mère impure : Sirop de canne ou de betterave. Les cristaux de saccharose de haute pureté sont entourés de film d'eau mère, de basse pureté, adhérant à ces cristaux et contenant la plupart des impuretés, cependant, certaines impuretés se trouvent incluse dans le cristal lui-même.

I.1- Le saccharose

Sa formule chimique est $C_{12}H_{22}O_{11}$, sa densité est de 1.6, et sa masse moléculaire 342, sa solubilité est grande dans l'éther, il est formé de la liaison glucose-fructose [3]. Le saccharose n'est pas fermentescible, sauf s'il est transformé en glucose, cette opération peut se faire lentement en présence de certains microorganismes ou très rapidement à chaud dans un milieu acide.

I.2- Les cendres

Les cendres sont les matières minérales incluses dans les cristaux de sucre, elles se composent principalement de :

Elément	Pourcentage %
Calcium	10
Carbonates	11
Chlorures	22
Sulfates	21

Tableau 1 : Proportion des éléments composants les cendres du sucre brut [2].

I.3- Les sucres réducteurs

Connu sous le nom « glucose », il désigne l'ensemble des sucres réducteurs ou encore les sucres non cristallisables. En effet le glucose ne peut pas se cristalliser comme le saccharose, de formule générale $C_6 H_{12} O_6$ et poids moléculaire 180 [2].

I.4-Le non sucre

C'est un élément que l'on peut mesurer dans l'ensemble, mais on peut le décomposer par diverses opérations chimiques.

Le non sucre organique comprend:

- Des acides organiques libres.
- Des produits de décomposition du saccharose provenant de la fabrication du sucre brut.
- Des gommes, des résines et de la cellulose.
- Des bactéries (moisissures, gazogènes...) et des matières colorantes [2].

I.5- L'eau

Tout corps, qui n'est pas déshydraté renferme de l'eau.

La détection de ces éléments chimiques demande un travail très précis par le laboratoire industriel. En effet, ces éléments peuvent être considérés comme paramètres de qualité, qui détermine la valeur commerciale du sucre.

II- LE RAFFINAGE DU SUCRE BRUT

Le raffinage est le procédé qui permet d'obtenir à partir d'un sucre brut (mélange de saccharose et de non sucre) un sucre raffiné de haute pureté.

Dans le procédé de raffinage, il existe un certain nombre d'opérations qui permettent:

- De retirer les impuretés extérieures au cristal, c'est **l'affinage**.

- De retirer les impuretés organiques de sucre brut après fonte des cristaux affinés, c'est la **carbonatation**.
- De retirer les colorants de la fonte par un adsorbant, c'est la **décoloration**.
- De recristalliser le saccharose pour obtenir un cristal pur, c'est la **crystallisation**.

II.1- Réception et stockage du sucre brut

L'approvisionnement est assuré par un seul fournisseur étranger le **BRESIL**. Le sucre brut une fois à l'usine COSUMAR, il est transporté vers des grands hangars appelés « Silos de stockage », ce sont trois silos dont deux de capacité de 30 000 tonnes et un de 12 000 tonnes où il est pesé à l'entrée par pont bascule pour les camions et passe par deux servobalances de 200 T/h.

II.2- Affinage

On procède à l'affinage du sucre brut pour réduire le recyclage des non sucres dans les jets des hauts produits. Le sucre de haute polarisation est directement refondu sans affinage.

L'affinage permet d'enlever un maximum de coloration, au moins 50 %, contenue dans le film d'égout entourant le cristal et ce en refondant une quantité de cristal de sucre aussi faible que possible, inférieure à 15 % c'est la freinte. L'affinage comprend deux opérations :

II.2.1- Empattage

L'empattage permet de ramollir la gangue (les impuretés extérieures) de sirop entourant le sucre, à l'aide d'une solution des eaux sucrées récupérées d'autres étapes du raffinage dans un mélangeur équipé, et dans un mélangeur équipé de pales horizontale.

II.2.2- La refonte du sucre affiné

C'est la dissolution du sucre affiné afin de fondre le système cristallin pour attaquer les impuretés internes du cristal. Cette opération s'effectue dans des bacs munis d'agitateurs pour mélanger le sucre et les eaux sucrées, le sirop ainsi obtenu à un Brix de 64%.

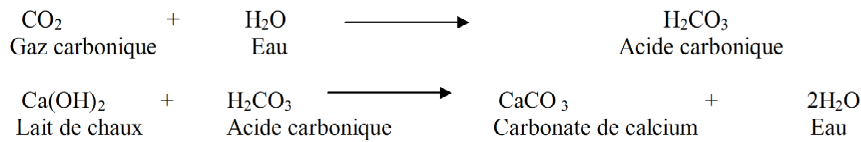
II.3- Epuration

II.3.1- Carbonatation

À la sortie du bac de stockage, la fonte est mélangée avec le lait de chaux à raison de 5g/l [4], on barbote à travers le liquide chaulé du gaz carbonique provenant de la combustion du fuel.

C'est le procédé de précipitation des carbonates de calcium dans la fonte, ce précipité doué de propriétés d'absorption entraînera la plupart des matières organiques et certaines impuretés, il

est obtenu par réaction entre l'acide carbonique « H_2CO_3 » et le lait de chaux « $\text{Ca}(\text{OH})_2$ » selon les réactions :



La carbonatation se fait dans une série de 3 chaudières d'une capacité totale de 1047 hl, le sirop entre du bas de la chaudière à une $T=70^\circ$ et un débit de 150 m³/h et sort du haut de la 3ème chaudières à une température de 90°C et un PH de 8,5 à 8,7. Les 3 chaudières sont alimentées en continu par un gaz qui doit contenir au moins 13% de CO₂ (avec des proportions différentes) il est maximum dans la première chaudière car c'est là où s'effectue 75% de la carbonatation.

Le taux de décoloration est de l'ordre de 55 à 60%, et la coloration de la commune carbonatée est de 600 à 650 ICUMSA.

II.3.2- Filtration

Après la carbonatation vient l'étape de séparation du sirop du précipité. La commune carbonatée est envoyée vers un bac munit d'un agitateur, qui empêche la précipitation de boue, puis pompée vers un échangeur de chaleur qui augmente sa température à 85°C, afin de diminuer sa viscosité et de faciliter sa filtration. A sa sortie de l'échangeur, elle rejoint l'un des huit filtres *DIASTARD GAUDFRIN* [4].

A l'intérieur de chacun de ces filtres il y a 80 plateaux habillés d'une toile filtrante synthétique. Le sirop filtré est acheminé vers le collecteur extérieur, et versé dans un bac de stockage. Ce sirop est appelé commune filtrée,

II.4- Décoloration

Le sirop issu de la filtration mécanique peut contenir des matières colloïdales, des matières colorantes, des cendres et des sels dissous. Pour éliminer ces impuretés, le sirop passe à la décoloration dans des colonnes à résines

A la sortie des colonnes, la raffinade (sirop décoloré) a une coloration de 120 à 150 ICUMSA, une pureté de l'ordre 99,5% et un Brix de 64%.

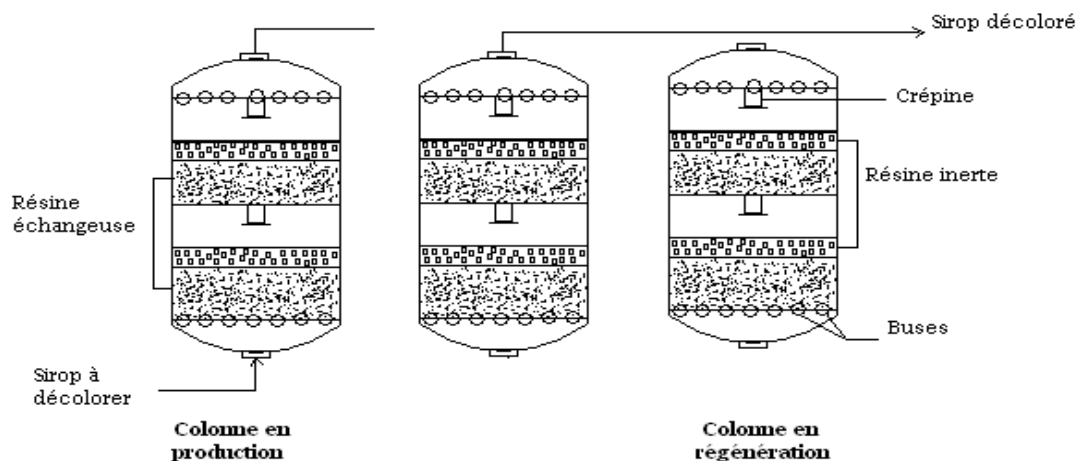


Figure 1: Schéma de la station de décoloration.

II.5- Evaporation

A ce niveau, la raffinade est prête à être cristallisée, mais puisque la cristallisation consomme beaucoup d'énergie une Évaporation précède dans le but d'augmenter le brix à 75, cette évaporation s'effectue dans des corps d'évaporation à flot tombant (CEFT) à température de 120.

II.6- Cristallisation

La cristallisation, désignée par « cuisson » en sucrerie, permet d'extraire une partie de sucre dissous dans le sirop sous forme cristallisée, avec une pureté supérieure.

Le type de cristallisation rencontré en sucrerie est une cristallisation en solution. Elle doit aboutir à une séparation et une purification de la solution de départ. Dans ce cas, elle est réalisée sur des solutions pures ou plus ou moins impures, généralement dans l'eau. Par évaporation, la solution est amenée à l'état de sursaturation, afin de faciliter l'opération de cristallisation. Le résultat est un produit solide cristallisé dont la pureté est très voisine de 100%.

Le but en sucrerie est de créer de gros cristaux de tailles variant de 500 μm et 800 μm . Or, pour contrôler la taille, il faut maîtriser le nombre de cristaux formés. Ainsi la formation des cristaux en sucrerie, est toujours réalisée par ensemencement par des cristaux fins dans le sirop sursaturé jusqu'à l'état métastable ou intermédiaire.

La cristallisation est effectuée en plusieurs jets. Généralement, ils sont au nombre de 3. le premier jet vise à extraire le maximum de cristaux et le dernier donne la dernière partie de sucre consommable.

Dans chaque jet, on retrouve les mêmes étapes :

- la cuisson ;
- le malaxage ;
- le turbinage.

A la fin de chaque jet, on obtient :

- du sucre cristallisé ;
- un égout riche est recyclé au niveau de la même cuite ;
- un égout pauvre qui est recyclé au niveau de la cuite suivante.

II.6.1-Cuisson

La cuisson est une concentration poussée permettant d'éliminer une grande partie de l'eau et d'extraire le sucre par cristallisation. Elle comporte les étapes suivantes :

a- Formation de pied de cuite

La première étape au démarrage d'une cristallisation est la mise sous vide (0,19 – 0,21 bar) de l'appareil. Une fois le vide établi, le « pied de cuite » ou « volume de grainage » est préparé en recouvrant suffisamment l'échangeur de chaleur par la liqueur standard ce qui correspond à 26 % du volume de l'appareil.

b- Concentration

La liqueur est concentrée jusqu'à ce qu'elle atteigne la zone métastable, parfois intermédiaire, ce qui correspond à une sursaturation variable selon le jet considéré.

c- Grainage

Une semence, d'une taille de 5 à 10 μm , est introduite dans le cristalliseur quand la liqueur mère sursaturée atteint une sursaturation de 1,25 à 1,3 selon le jet considéré, ce qui correspond à un brix de 78 à 80.

d- Démarrage du grossissement

L'ensemencement doit être suivi d'une période de stabilisation, qui dure de 5 à 15 minutes selon les jets. C'est une phase de maintien de la sursaturation autour de la valeur du point d'ensemencement.

e- Montée

Lors de la montée, la cuite est toujours alimentée avec la liqueur standard jusqu'à un niveau de 60% du niveau du cristalliseur tout en évaporant l'eau contenue dans la solution. Ceci à pour but de maintenir la sursaturation pour faire grossir les cristaux jusqu'à taille voulue. La montée dure environ 30 à 40 minutes.

f- Serrage

Quand le niveau maximum est atteint, l'alimentation du sirop est arrêtée, et l'évaporation de la masse cuite est poursuivie pour maintenir la consistance de celle-ci. L'indicateur de serrage maximum est en général la puissance consommée par l'agitateur.

g- Coulée

La cuisson se termine par la coulée et le lavage de l'appareil. Une fois l'appareil remis à la pression atmosphérique par un casse-vide et l'agitateur arrêté, la vanne de vidange est ouverte et la masse cuite s'écoule dans un malaxeur. De l'eau chaude ou de la vapeur est ensuite pulvérisée pour nettoyer et éviter que des cristaux demeurent et ne grossissent ultérieurement en donnant des cristaux en dehors de la plage admissible [5].

h- Appareillage

Deux types d'appareil à cuire existent en industrie : les appareils continus et les appareils discontinus.

Appareil à cuire discontinu

Plusieurs types d'appareils existent :

- les appareils à serpentin, qui ne sont plus utilisés ;
- les appareils à faisceau, d'où :
 - les appareils à faisceau fixe plat : c'est l'appareil classique ;

- les appareils à plaques inclinées ;
- les appareils horizontaux à plaques [6].

De nos jours, l'industrie sucrière passe en plus en plus à la cristallisation continue. Les cristallisoirs discontinus verront donc leur utilité dans la formation de pied de cuite.

Appareil à cuire continu

Le rôle de l'appareil à cuire continu consiste à remplir dans l'espace ce que les appareils discontinus accomplissent dans le temps [6]. Toutes celles qui sont exploitées aujourd'hui sont alimentées par un magma provenant soit d'une cuite de pied (l'appareil discontinu), soit d'un empâtage de sucre et non d'un grainage direct.

II.6.2-Malaxage

Le malaxage est une opération qui consiste à agiter pendant un certain temps la masse cuite sortie des appareils à cuire, avant de la passer aux turbines, et a pour but de compléter la formation des cristaux et de pousser l'épuisement de la liqueur mère.

La masse cuite d'un appareil à cuire se trouve à une très forte sursaturation. Si on la laisse reposer, le sucre, encore contenu dans la liqueur mère, continuera à se déposer sur les cristaux.

Toutefois, cette masse cuite est très serrée et la liqueur mère est très visqueuse. Au bout de très peu de temps, la cristallisation s'arrêterait si on laissait la masse cuite au repos, parce que la couche de la liqueur mère entourant les cristaux serait vite épuisée et que la viscosité de la masse cuite empêcherait les molécules de sucre plus éloignées de circuler et de passer à proximité des cristaux [6]. Si l'on veut profiter des possibilités de cristallisation importantes que possède la masse cuite après la cuite, il faut donc agiter cette masse, afin de modifier constamment les positions relatives de toutes les particules de liqueur mère et des cristaux.

Appareillage

On distingue :

- des malaxeurs sans refroidisseur tels que : malaxeur ordinaire, malaxeur à double hélice ;

- des malaxeurs avec refroidisseur tels que : malaxeur ragot, malaxeur WERKSPOOR, malaxeur refroidisseur vertical [6].

II.6.3-Essorage

Une fois la liqueur mère pratiquement épuisée, il ne reste plus qu'à la séparer des cristaux pour obtenir le sucre sous forme commerciale. Appelée également le turbinage, cette étape se réalise dans des turbines-centrifugeuses-essoreuses, appelées indifféremment turbines, centrifugeuses, ouessoreuses.

Appareillage

Deux types d'essoreuses existent en industrie : continues et discontinues. L'utilisation d'essoreuses discontinues en premières jets permet de préserver la granulométrie du sucre et éviter la formation de poussières. Lesessoreuses continues, quant à elles, sont privilégiées en derniers jets car elles sont nettement plus économiques (énergétiquement) en fonctionnement.

II.7- Séchage et refroidissement

Le sucre que déchargent les centrifugeuses contient entre 0,1 et 1 % d'eau et est à une température de 60 °C.

Cette eau se trouve essentiellement à la surface du cristal sous forme de solution de saccharose saturé de pureté élevée. Au-delà d'une certaine limite, elle présente de gros inconvénients pour la conservation du sucre tel que le durcissement durant le stockage et l'expédition.

Le sucre est donc envoyé vers le sécheur pour réduire son humidité à 0,05% et sa température à 35 °C. Généralement, le séchage et le refroidissement se font dans un même appareil, sauf, pour les sécheurs tambours rotatifs.

Cependant, après séchage, le sucre n'atteint pas son état d'équilibre, il passe par une période de maturation durant laquelle il perd d'avantage de son humidité et de sa température (transport et conditionnement).

II.8- Stockage dans les silos

Le stockage du sucre s'effectue dans des silos verticaux et horizontaux. Il est réalisé dans des conditions où l'humidité et la température de l'air sont contrôlées. Ces conditions permettent au sucre d'atteindre l'équilibre souhaité (environ 0,03% d'humidité) : en effet, pour s'assurer que le sucre peut être emballé, il est gardé pendant 24-72 heures dans les silos sous l'écoulement d'air conditionné.

II.9- Bas produits

Le but du travail des bas produits est d'obtenir en dernière cristallisation dernier jet un égout à partir du quel il n'est plus économique ni possible d'extraire du saccharose.

Avec un égout de départ d'une pureté de 85, le travail des bas produits permet d'obtenir un égout final épuisé, appelé mélasse, contenant une proportion de sucre qui est loin d'être négligeable, et cela en 2 ou 3 jets.

CHAPITRE III

LA CRISTALLISATION

I- INTRODUCTION

La cristallisation, au sens large, est le changement d'état qui donne lieu dans un solide, un liquide ou une vapeur, à la formation d'une phase solide cristallisée, c'est à dire à organisation géométrique régulière [7].

Dans la pratique industrielle, elle est considérée comme la formation de cristaux d'un ou plusieurs solutés à partir de leur solution dans un liquide, le solvant [10]. Les cristaux sont ensuite retirés de la solution restante, appelée eau-mère ou liqueur-mère, par des opérations de séparation solide-liquide, telles que la filtration et la centrifugation. Dans ce cas la cristallisation peut être envisagée approximativement comme l'inverse de la dissolution.

II- GENERALITES

II.1- Solubilité de saccharose

Le saccharose est très soluble dans l'eau. La solubilité se définit comme étant la quantité de saccharose qui peut être dissoute pour une unité de volume de solvant donnée (ici eau) [12].

La solubilité dépend de la température et de la pureté de la solution. Pour tenir compte de cette variation de solubilité on définit un coefficient de saturation « K_{sat} » qui est le rapport des solubilités en milieu impur et en milieu pur :

$$K_{sat} = \left[\frac{\left(\frac{m_s}{mE} \right)_{impure}}{\left(\frac{m_s}{mE} \right)_{pure}} \right]_T$$

Avec :

m_s : masse de saccharose

mE : masse d'eau

II.2- Saturation, sursaturation

Une solution de sucre est dite *saturée* à une température donnée lorsque, mise en présence de cristaux de sucre, ces derniers ne se dissolvent pas, ni ne grossissent [15]. En dessous de cette concentration en sucre, la solution est dite *sous-saturée*, les cristaux peuvent se dissoudre.

On peut dépasser la limite de solubilité soit en refroidissant la solution, soit en enlevant de l'eau par évaporation [15]. Le sirop dense peut être amené à l'état de *sursaturation* selon 3 voies différentes (Figure 2). Dans cet état de sursaturation, on a du sucre potentiellement cristallisable.

On définit le coefficient de sursaturation « σ » par :

$$\sigma = \left[\frac{\left(\frac{m_s}{ME} \right)_{\text{sursaturée}}}{\left(\frac{m_s}{ME} \right)_{\text{saturée}}} \right]_{T,P}$$

La zone de sursaturation se compose de 3 domaines (Figure 2).

- Une zone métastable : la cristallisation a lieu uniquement en présence de cristaux de semence.
- Une zone intermédiaire (nucléation hétérogène et croissance).
- Une zone labile : la nucléation a lieu spontanément (nucléation primaire).

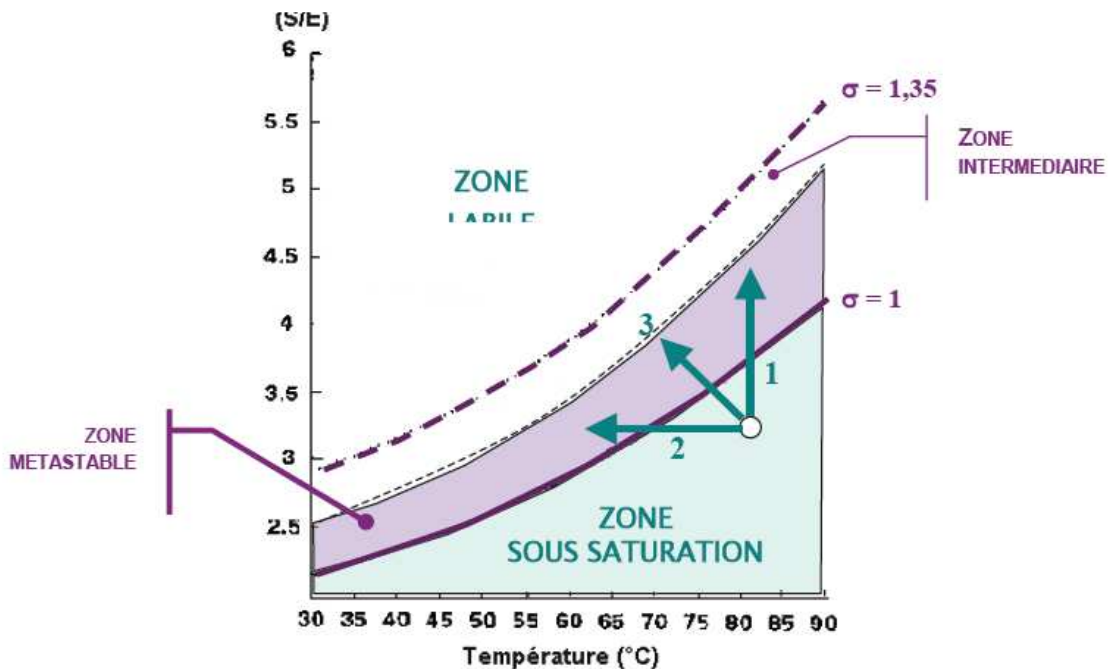


Figure 2 : Courbe de solubilité du saccharose. Sursaturation atteinte par évaporation isotherme (1) ; par refroidissement (2) ou par évaporation adiabatique (3).

III- Mécanisme de la cristallisation

Une opération de cristallisation comprend trois stades:

- La **sursaturation** de la solution (on quitte la zone homogène en traversant la courbe de solubilité).
- La formation de germes ou sites cristallins (microcristaux) → **Germination ou Nucléation**
- le grossissement des germes en cristaux → **Croissance** [25].

Tant la vitesse de germination que celle de croissance des germes augmentent avec le taux de sursaturation (rapport de la teneur en solide de la solution sursaturée à la teneur de la solution saturée à la température donnée) [7]. Mais la vitesse de croissance augmente d'une manière linéaire, tandis que la vitesse de germination augmente d'une façon exponentielle.

C'est au voisinage de la courbe de sursaturation que la vitesse de germination se met à augmenter très rapidement. Il en résulte que, en l'absence de cristaux préexistants, la germination devient prédominante dès que l'on arrive dans la zone hétérogène. C'est ainsi que l'on observe quelquefois « la prise en masse » de la solution, surtout dans le cas d'hydrates.

Si la solution est **ensemencée**, c'est à dire si l'on injecte des cristaux de solide pur lorsqu'elle se trouve dans la zone métastable, les germes dus à la semence grossissent sans formation importante de nouveaux germes. Il se produit donc à peu près uniquement le phénomène de croissance des cristaux de l'ensemencement. Ce procédé permet de préparer des cristaux ayant des dimensions voulues [10].

IV- Facteurs influents sur la cristallisation

IV.1- Vitesse d'évolution des conditions opératoires

Par vitesse d'évolution des conditions opératoires, il faut entendre en général la vitesse de refroidissement. Mais ce peut être aussi la vitesse d'évaporation, d'addition du deuxième solvant ou bien du réactif provoquant la précipitation. Si cette vitesse est faible, on reste dans la zone métastable. Les germes ont le temps de croître; les cristaux sont plus gros et bien formés. Si cette vitesse est grande, on risque de passer dans la zone hétérogène. On obtiendra alors une importante nucléation donc des cristaux plus petits et une granulométrie très étalée [10].

IV.2- Ensemencement

En discontinu, il est indispensable d'ensemencer si l'on veut obtenir des cristaux dont la taille se rapproche de la valeur souhaitée. En effet, si après avoir ensemencé, on refroidit

suffisamment lentement pour ne pas sortir de la zone métastable, les cristaux se formeront par grossissement de la semence. En continu, le problème ne se pose qu'au démarrage de l'opération. Pendant la marche normale l'ensemencement est automatiquement réalisé par les cristaux déjà formés [10].

IV.3- Agitation

L'agitation en cristallisation est primordiale. Elle consiste à maintenir les cristaux en suspension, opérer le transfert thermique et assurer l'homogénéité de la suspension.

Cependant, il faut noter que l'agitation aura des effets néfastes: broyage des cristaux, formation de germes supplémentaires. L'agitation nécessite de faire un compromis entre ces effets contradictoires. Il convient de choisir avec soin le type d'agitateur, l'intensité d'agitation ainsi que la géométrie du cristalliseur [10].

IV.4- Impuretés de la solution

Les impuretés agissent diversement sur la nucléation. Au contraire, elles agissent négativement sur la croissance, et peuvent modifier la présentation du cristal en s'adsorbant sélectivement sur une face. Elles peuvent aussi servir de germes, et provoquer la formation de cristaux contenant des inclusions d'impuretés [10].

CHAPITRE IV

LA FILTRATION CENTRIFUGEUSE

I- INTRODUCTION

La filtration centrifuge consiste à placer la suspension dans un champ d'accélération centrifuge. Le gradient de pression qui apparaît dans le liquide permet à celui-ci de traverser le media filtrant et le gâteau formé.

La suspension est introduite dans un bol cylindrique à parois perforées, équipé d'une toile filtrante ou d'un sac amovible de filtration qui retient les particules solides et autorise le passage du liquide. Le bol est entraîné à très grande vitesse de rotation (variable suivant le diamètre du bol) qui provoque, sous l'effet de la force centrifuge, la séparation des phases liquide et solide (Figure 3).

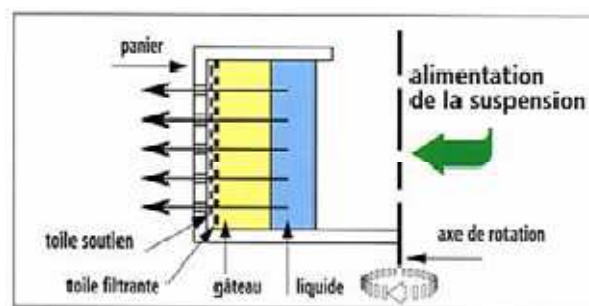


Figure 3 : Essoreuse industrielle.

II- FORCE CENTRIFUGE

une particule de masse m (kg) animée d'un mouvement circulaire de rayon r (m) à une vitesse angulaire ω (rad/s) est soumise à une force centrifuge $F_c = m \omega^2 r$ (1), en newtons, appliquée suivant le rayon, et à son poids $P = mg$, en newtons, si g est l'accélération de la pesanteur ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) [14].

L'augmentation du champ dû à la pesanteur est définie par le rapport sans dimension :

$$K = \frac{F_c}{P} = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (2)$$

Appelé indifféremment accélération centrifuge, effet centrifuge ou effet g [14].

II- PRESSION CENTRIFUGE DE FILTRATION

On considère (figure 5) une couronne cylindrique de liquide d'épaisseur dr située à la distance r de l'axe de rotation du panier, de masse élémentaire [14] :

$$dM = \rho_\ell (2\pi r h dr) \quad (3)$$

Avec ρ_ℓ (kg/m³) masse volumique du liquide.

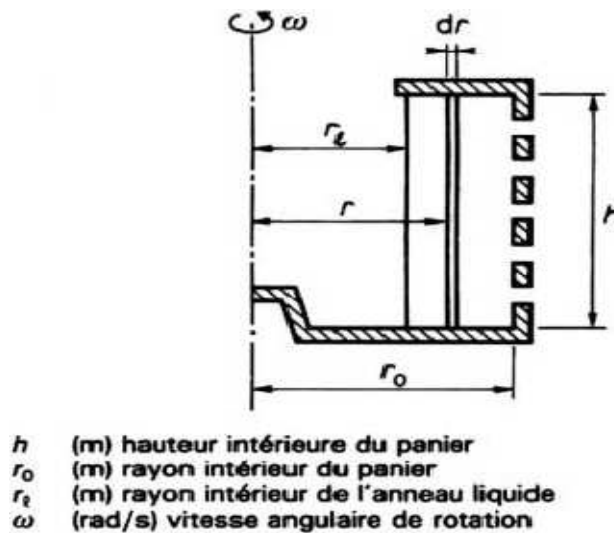


Figure 4 : Essorage centrifuge

Cet élément de liquide est soumis à l'action de la force centrifuge :

$$dF_c = (\omega^2 r) dM = \rho_\ell \omega^2 r (2\pi r h) dr \quad (4)$$

La pression centrifuge de filtration élémentaire résultante du liquide s'écrit :

$$dp_c = \frac{dF_c}{2\pi r h} = \rho_\ell \omega^2 r dr \quad (5)$$

Par intégration sur l'épaisseur de la couche liquide, on obtient l'expression de la pression centrifuge de filtration :

$$\Delta p_c = \int_{r_l}^{r_0} dp_c = \frac{1}{2} \rho_\ell \omega^2 (r_0^2 - r_l^2) \quad (6)$$

III- LES ETAPES D'UN CYCLE D'ESSORAGE CENTRIFUGE (FILTRATION CENTRIFUGEUSE)

Le produit à traiter est tout d'abord introduite dans le panier en rotation (Figure 6 (1)). Le liquide passe à travers le média filtrant et les particules solides sont elles en partie retenues par le média filtrant. L'accumulation de ces particules solides sur le média filtrant constitue le gâteau qui participe ensuite à la filtration. Au cours de la formation du gâteau, il peut se produire un phénomène de sédimentation, les particules solides se dirigeant plus vite vers le média filtrant que le liquide (Figure 6 (2)). Lorsque les particules solides ont sédimenté, elles laissent derrière elles un anneau liquide clair qui passe au travers du gâteau formé, c'est l'étape de perméation (Figure 6 (3)). Il est possible d'effectuer un pré-essorage, de laver ensuite le gâteau avec un liquide clair pour éliminer les impuretés, et enfin d'effectuer l'essorage. L'essorage débute lorsque la phase gazeuse pénètre dans le gâteau en remplaçant le liquide (Figure 6 (4 ; 5 et 6)). Le débit de liquide diminue au cours de l'opération d'essorage jusqu'à s'annuler. Le gâteau ainsi déshydraté présente un gradient de saturation dans son épaisseur (Figure 6 (5 et 6)). L'extraction du gâteau peut être effectuée manuellement ou automatiquement pour être généralement transporté vers un séchoir [15].

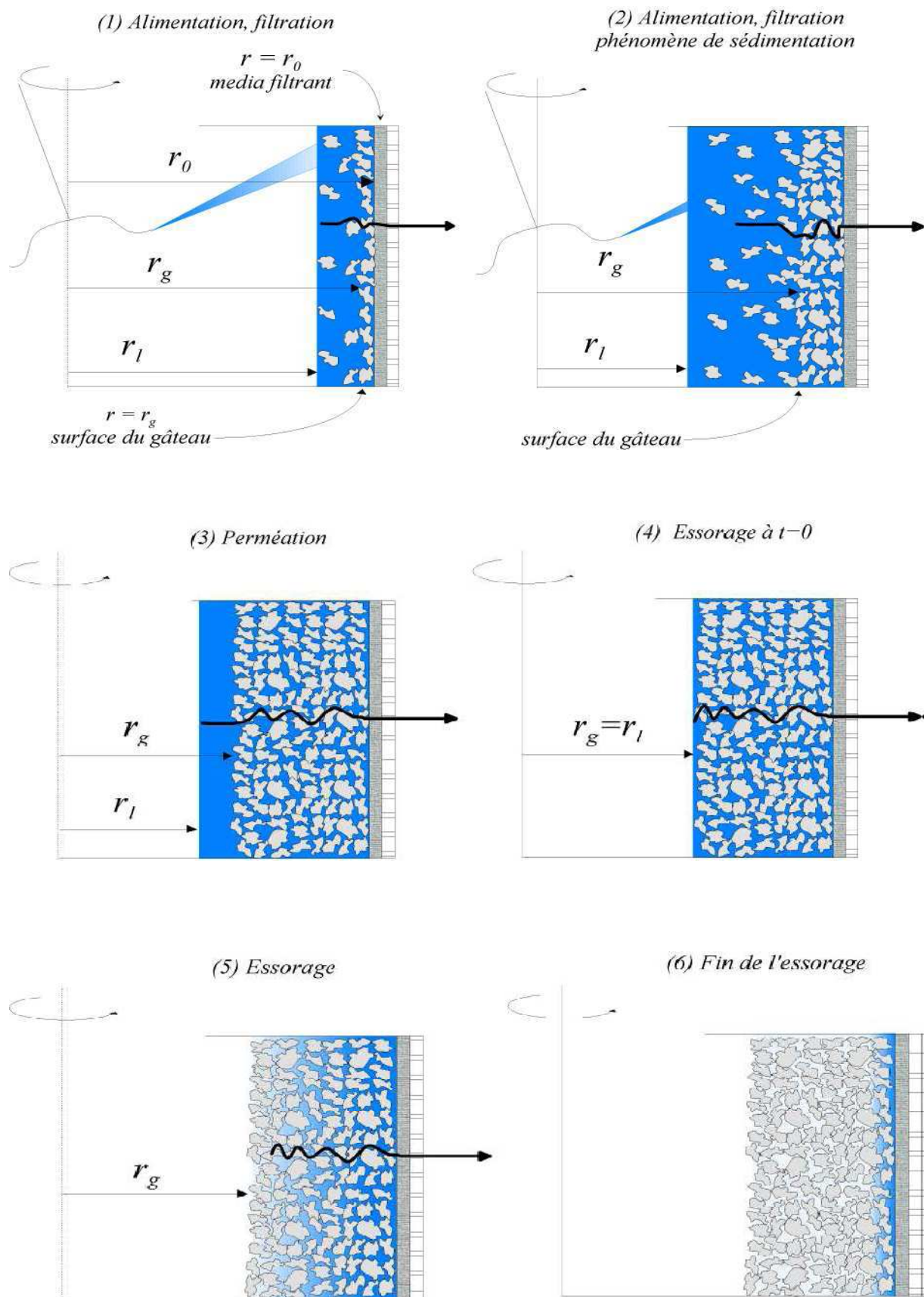


Figure 5 : Les différentes étapes du cycle d'uneessoreuse

IV- DIFFICULTES DE SEPARATION LIEES AUX PRODUIT A TRAITER

Les suspensions à traiter peuvent présenter des problèmes lors de la séparation de la phase dispersée (particules solides) et de la phase continue (liquide). En effet, la qualité et la vitesse de la séparation dépendent de plusieurs paramètres classés en trois catégories permettant de décrire un système liquide-solide :

- Les propriétés des phases en présence

Elles peuvent être mesurées indépendamment des composants du système. Elles comprennent les propriétés physiques du liquide et du solide, la taille des particules solides, la distribution de taille de particule, la forme des particules et les propriétés de surface dans leur environnement [15]. La manière dont les particules interagissent avec leur environnement devient d'autant plus important que les particules sont de petites dimensions, (notamment $<10\mu\text{m}$), à partir du moment où les forces d'attraction ou de répulsion entre les particules deviennent significatives devant les forces induites par la gravité ou l'hydrodynamique. Ces paramètres peuvent indiquer si les particules, par exemple, sédimentent lentement ou rapidement, si elles peuvent être retenues sur certains média filtrants...

- L'état du système

Cela inclut la concentration de la suspension, la dispersion des particules, la porosité du gâteau de filtration. Prenons pour exemple le cas de la sédimentation. Ce phénomène est fonction de la concentration de la suspension et de l'homogénéisation de la suspension.

Plus la suspension est concentrée plus l'écoulement autour des particules sédimentant gêne la chute des particules avoisinantes. Pour ce qui est de l'état du gâteau, généralement, plus il est poreux et perméable, plus la vitesse de filtration est grande [15].

- Les propriétés macroscopiques

Elles sont mesurées pour étudier l'application d'une méthode de séparation particulière.

De telles mesures peuvent être la perméabilité du gâteau ou sa résistance spécifique, la vitesse terminale de chute des particules ou la vitesse de sédimentation des particules dans la suspension [15].

Les propriétés macroscopiques du système liquide-solide sont intimement liées aux propriétés de chacune des phases. Parmi les plus importantes, la taille des particules solides, la distribution de taille de particule, la forme des particules et la nature du fluide environnant ont une influence toute particulière sur la séparation liquide-solide.

CHAPITRE V

LES PLANS D'EXPERIENCES

I- INTRODUCTION

La méthode des plans d'expériences n'est pas une technique nouvelle .Elle date en fait du début du siècle avec les travaux de Fischer (1925) [8]. Les premiers utilisateurs de ces méthodes furent les agronomes qui ont vite compris l'intérêt des plans d'expériences et notamment la réduction du nombre d'essais lorsqu'on étudie de nombreux paramètres. En effet les essais en agronomies sont consommateurs de paramètres et très longs, l'étude du rendement d'un blé nécessite la prise en compte du type de terrain, des différents traitements, de l'ensoleillement, etc. il était donc indispensable de réduire le nombre d'essais sans perdre en précision .Mais cette technique n'est restée relativement confidentielle et n'a pas réussi à pénétrer de façon significative les industries occidentales avant les années soixante-dix. Une des raisons de ce manque d'intérêt des industries pour la méthode était probablement l'aspect trop théorique de l'approche proposée [9]. Il a fallu attendre les travaux de TAGUCHI avec le pragmatisme qui caractérise les japonais pour parvenir à simplifier et clarifier l'utilisation des plans d'expériences.

Aujourd'hui, les plans d'expériences représentent un outil indispensable à tout industriel, de plus petit au plus grand soucieux d'améliorer la qualité de ses produits.

II- BUT DES PLANS D'EXPERIENCES

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables a de nombreuses disciplines et a toutes les industries a partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y, et des variables, xi. Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_{12} + a_{22}X_{22} + a_{33}X_{32}$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche

rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur [9].

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimentale et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

III- NOTION D'ESPACE EXPERIMENTAL

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme « variable » on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté. La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas « -1 » ; La borne supérieure est le niveau haut « +1 » [9].

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le *domaine* du facteur.

IV- LE MODELE DE L'EXPERIMENTATEUR

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit. Le premier complément est le "*manque d'ajustement*". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (*lack of fit* en anglais) [8].

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée e . Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

Système d'équations

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il

Il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$Y=A*X+e$$

- **Y** : est le vecteur des réponses.
- **X** : est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.
- **a** : est le vecteur des coefficients.
- **e** : est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a n équations et $p + n$ inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients.

Il existe plusieurs plans à utiliser selon l'objectif de l'étude à savoir :

- Plans factoriels complets à deux niveaux.
- Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- Autres plans à deux niveaux.
- Plans à plusieurs niveaux.
- Plans pour surfaces de réponse.
- Plans de mélanges.
- Plans booléens.
- Plans optimaux.
- Plans pour simulations numériques.

V- DEMARCHE METHODOLOGIQUE

La mise en œuvre d'un plan d'expérience pour étudier la surface de réponse d'un système expérimental et trouver un optimum peut se résumer selon la procédure suivante:

- 1- Définir le problème à étudier.
- 2- Sélectionner la réponse et les facteurs contrôlables.
- 3- Définir le domaine expérimental, en fixant les niveaux des facteurs sélectionnés.
- 4- Choisir un modèle.
- 5- Choisir un plan d'expérience tenant compte des conditions propres au problème à traiter.
- 6- Réaliser les essais.
- 7- Traiter les données par un logiciel adéquat.
- 8- Interpréter la validité du modèle postulé et la significativité des coefficients.

9- Sélectionner les coefficients significatifs si le modèle est validé.

10- Prédire les niveaux des facteurs à l'optimum.

11- Faire un essai complémentaire en appliquant les valeurs optimales des facteurs pour valider les conclusions.

On se propose d'améliorer le fonctionnement des turbines discontinues, décrit par trois indices :

- **La coloration de sucre turbiné ;**
- **L'humidité de sucre turbiné ;**
- **La pureté des égouts.**

Pour cela, on fera appel aux plans d'expériences, qu'on appliquera à des turbines discontinues R2 premier jet. Les résultats de ce plan seront quantifiés par une détermination de la coloration et l'humidité de sucre turbiné et la pureté des égouts des turbines.

Le premier paragraphe citera les méthodes d'analyse utilisées. Le deuxième, traitera les plans d'expériences utilisées pour cette étude.

I- ANALYSE DE SUCRE BLANC

I.1- Détermination de la coloration de sucre blanc

Principe

Le sucre blanc est dissout dans l'eau distillé pour donné une solution à 50% de sucre. La solution est filtrée sur une membrane filtrante pour retire la turbidité. L'absorbance de la solution filtrée est mesurée à une longueur d'onde de 420 nm qui entre dans le calcul de coloration de la solution.

Mesure de la coloration

Mettre en marche le colorimètre en accord avec les instructions du fournisseur et sélectionner la longueur d'onde de 420 nm. Rincer la cellule de mesure avec de la solution de sucre et la remplir.

Déterminer l'absorbance de la solution en utilisant l'eau distillée filtrée et désaérée comme référence standard pour le zéro.

Déterminer le brix de la solution à l'aide de refractomètre.

Lire la concentration qui corresponde à ce brix à partir du tableau qui donne la concentration en fonction du brix de la solution.

Expression des résultats

Coloration = $1000.A / b.c$ (IU)

A : absorbance.

b : longueur de la cuvette (5mm).

c : concentration de la solution sucrée.

IU : ICUMSA, unité de la coloration.

I.2- Détermination de l'humidité

Principe

Le principe de la méthode est le séchage par le four en utilisant la technique pression atmosphérique (105°C), suivi par un refroidissement dans des conditions standard. C'est surtout l'humidité libre qui est mesurée par cette méthode.

Procédure

Séchage : réaliser la détermination en deux fois avec un four préchauffé à 105 °C. Placer les capsules vides avec leur couvercles ouvert dans l'étuve pendant maximum 30 minutes. Utiliser le chiffon à épousseter pour les manipuler, retirer les capsules de l'étuve, replacer les couvercles et placer les dans le dessiccateur. Placer le thermomètre de contact en haut d'une des capsules.

Quand la température d'une des capsules est tombée à la température ambiante + 2 °C, peser les aussi rapidement possible à une précision de +/- 1 mg. Aussi rapidement que possible, placer 20 à 30 g de l'échantillon dans chaque capsule, replacer les couvercles et peser la capsule et son contenu avec une précision de +/- 1 mg.

L'épaisseur de sucre dans la capsule ne doit pas excéder 1 cm.

Retourner les capsules dans l'étuve avec les couvercles ouverts. Sécher l'échantillon pendant 3 heures exactement.

Peser et détermination de l'humidité : replacer les couvercles, retirer les capsules du four et replacer les dans le dessiccateur avec le thermomètre de contact sur l'une d'elles. Refroidir les

capsules jusqu'à ce que la température ambiante +2 °C. Peser les capsules à une précision de +/- 1 mg.

Expression des résultats

M1 : masse de la capsule en g.

M2 : masse de la capsule + sucre avant séchage.

M3 : masse de la capsule + sucre après séchage.

$$\text{Humidité \%} = (M2-M3) / (M2-M1) * 100$$

Deux résultats acceptables si aucun n'excède pas +/- 10% par rapport à la valeur de leur moyenne.

II- ANALYSE DES EGOUTS

II.1- Détermination de la matière sèche ou brix

Objectif : Détermination du taux de la matière sèche dans 100 g d'eau sucrée.

Matériels : Réfractomètre

Principe

Cette méthode se base sur l'indice de réfraction, car pour une longueur d'onde déterminée cet indice est fonction de la teneur en matière sèche de la solution soumise à la mesure.

Mode opératoire

- Régler le 0 de l'appareil avec l'eau distillée.
- Mettre une petite quantité de l'analyte dans la chambre d'échantillon.
- Lire la valeur donnée par le réfractomètre qui donne directement le brix.

II.2- Détermination de taux de cendres

Matériels : Conductimètre.

Principe

Puisqu'il a été démontré qu'il existe une relation fixe entre la teneur en cendre et la conductivité des jus sucrés, il suffit de mesurer la conductivité spécifique de l'échantillon dans des conditions déterminées de température et de concentration.

Mode opératoire

- Peser 5g du sucre granulé.
- Compléter avec l'eau distillée jusqu'à 100 ml.
- Rincer deux fois la cellule de mesure du conductimètre avec la solution a examinée.
- Mesurer la conductivité exprimée par Micro Siemens par centimètre.

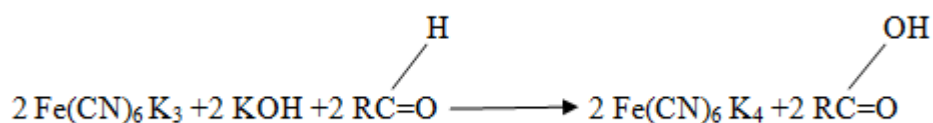
Expression du résultat

% de cendre = la valeur lue x le facteur de conversion

II.3- Détermination des sucres réducteurs

Principe

La réduction du ferricyanure en milieu alcalinisé par KOH :



La solution du ferricyanure est titrée à l'aide d'une solution de glucose et donne l'équivalence : 1 ml correspond à 5,3 mg de glucose.

Préparation de la solution de Jonesco

Peser 46g de ferrocyanure de potassium et 46g d'hydroxyde de potassium. Dissoudre dans une fiole de 1 litre et compléter avec l'eau distillée.

Filtrer sur double papier filtre. Conserver la solution au frais.

Dosage des réducteurs dans les égouts

Mode opératoire

- Diluer l'égout 50g/50g.
- Déterminer le brix réfractométrique.
- Dans un erlenmyer, verser 10 ml de la solution de Jonesco et compléter à 100ml avec de l'eau distillée.
- Titration par la solution de Jonesco

Remplir une burette de 25 cm³ de l'égout dilué.

Porter l'erlen contenant la solution de Jonesco à l'ébullition, et titrer avec l'égout dilué tout en chauffant. Dès que la solution devient incolore ajouter quelques gouttes d'acide picrique.

La solution prend la couleur jaune.

Continuer le titrage jusqu'à ce que la couleur devienne rouge brique.

Arrêter le titrage et noter le volume versé V.

- Expression des résultats

Taux de réducteurs %MS : $53 \cdot X / V \cdot D \cdot \text{Brix}$

X : volume de la prise d'essai de la solution de Jonesco (ml).

D : densité de l'égout.

II.4- Détermination de la pureté des égouts

Pureté : c'est le pourcentage massique du saccharose dans la matière sèche.

Pureté = $100 - (2,5 \cdot C + G)$

C : taux de cendres.

G : taux de réducteurs (glucose).

III- PLANS UTILISES POUR L'EXPERIMENTATION

III.1- Plan de criblage

Le plan de criblage adopté est un plan de Plackett et Burman. Ce choix est justifié par la rapidité et l'efficacité de la sélection des facteurs influents.

Le nombre de répétitions dans ce plan est un. La variabilité du procédé ainsi que la grande influence sur le produit fini ne permettait pas de faire d'autres séries d'essais.

III.2- Plan de modélisation

Le plan de modélisation suivi pour les turbines R2 est un plan de Box Behnken. En effet, le plan de Box Behnken s'apprête bien pour cette étude puisqu'il décrit bien la variation des réponses dans le domaine d'étude mais aussi, parce qu'il donne des valeurs de facteurs applicables et donne la possibilité d'introduire d'autres facteurs.

Il est vrai que le plan de Doehlert aurait pu être utilisé vu la possibilité d'introduire d'autres et d'élargir le domaine d'étude. Toutefois, les valeurs des facteurs obtenues avec les niveaux de ce plan ne peuvent être appliquées.

Le nombre de répétition est un. Ceci est dû à la variabilité du procédé et les perturbations que la station de cristallisation a connus durant cette étude.

III.3- Méthode d'optimisation

La fonction de désirabilité, méthode d'optimisation multicritère, est la mieux adaptée pour trouver un compromis entre plusieurs réponses. Elle est décrite par la désirabilité individuelle et globale qui prend en compte à la fois les exigences sur toutes les réponses. Le meilleur compromis est obtenu pour la plus forte valeur de la désirabilité globale.

III.4- Logiciel utilisé

Pour la réalisation de ces expérimentations, on a utilisé le logiciel Nemrod-W.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DE L'ATELIER DE CRISTALLISATION

I- APPAREILLAGE

L'étude suivante est réalisée au sein de l'atelier de cristallisation de la raffinerie de Casablanca.

L'atelier de cristallisation, comme illustré en annexe (4), est composé de 3 jets de cristallisation pour la production de sucre blanc.

Le premier jet comprend :

- Un bac d'alimentation en liqueur standard (sirop 1 et égout riche R2) ;
- Un cristalliseur discontinu pour la formation du pied de cuite R2 ;
- Un malaxeur de pied de cuite R2 ;
- Un bac d'alimentation en raffinade concentrée ;
- Un malaxeur de la cuite continu ;
- Une batterie de 5 turbines discontinues.

Le 2^{ème} jet comprend :

- Un bac d'alimentation en égout riche R3 et en égout pauvre R2 ;
- Deux cristalliseurs discontinus R13 et R23 ;
- Un malaxeur commun aux deux cristalliseurs ;
- Une batterie de 3 turbines discontinues.

Le 3^{ème} jet comprend :

- Un bac d'alimentation en égout riche R4, en égout pauvre R4 et en égout pauvre R3 ;
- Une cuite discontinue R4 ;
- Un malaxeur ;
- Une turbine discontinue.

II- FONCTIONNEMENT DES TURBINES DISCONTINUES

Les centrifugeuses discontinues travaillent de façon entièrement automatique et par cycles.

Un cycle se compose de:

- Chargement
- Accélération
- Clairçage
- Essorage
- Freinage
- Déchargement
- Lavage des tamis.

II.1- Clairçage

Du point de vue de la centrifugation, il faut distinguer 3 fractions dans l'égout :

- l'excès d'égout, qui est la proportion en sus de celle juste nécessaire pour remplir les vides entre les cristaux. Cet excès produit la fluidité de la masse et s'évacue très facilement.
- la proportion juste nécessaire pour remplir les vides entre les cristaux. Elle doit s'évacuer en circulant entre les grains venus au contact les uns des autres. Elle s'évacue plus difficilement que la première.
- le film d'égout entourant les cristaux. C'est le plus difficile à extraire, en raison de son adhérence.

a) Clairçage à eau

En raison de ce film, il n'est guère possible de produire un sucre commerciale convenable sans procéder au clairçage. Celui-ci consiste à pulvériser de l'eau sur la couche de sucre, lorsque les deux premières fractions de l'égout ont été expulsées. L'eau lave le film et l'entraîne. Elle dissout en même temps fatalement un peu de sucre, et la période de clairçage fournit donc un égout de plus haute pureté, appelé l' « égout riche », qu'on sépare parfois du reste de l'égout, ou « égout pauvre », lorsque la quantité en vaut la peine.

b) Clairçage à vapeur

En projetant de la vapeur sur le mur de sucre dans le centrifuge au moment d'essorage, on dissout beaucoup moins de sucre et on maintient ou on élève la température de la masse turbinée, donc sa fluidité. Le clairçage à la vapeur suit le clairçage à l'eau.

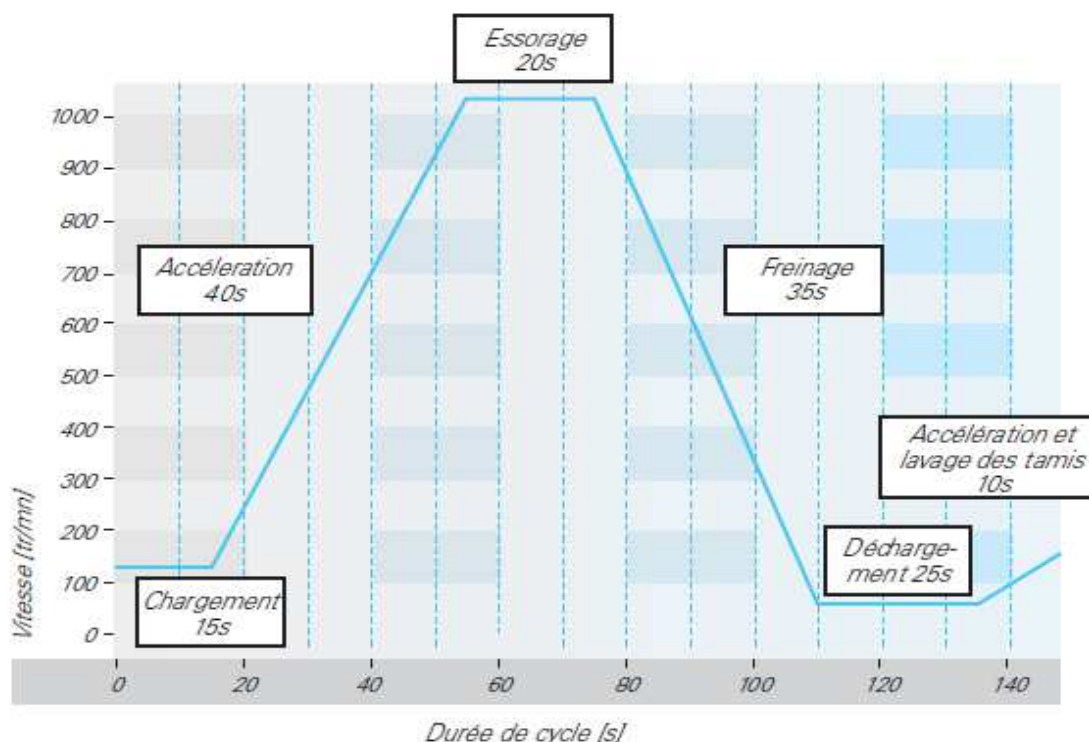


Figure 6 : déroulement de cycle typique d'une centrifugeuse discontinue

Au début d'un cycle, la centrifugeuse fonctionne à la vitesse de chargement (ajustable entre 120 et 250 min^{-1}).

Quand la vanne de chargement s'ouvre (jusqu'à la consigne fixée, p. ex. de 70 %), la masse cuite entre dans le tube d'entrée.

A travers le clapet de sécurité, le flux de masse cuite est guidé vers le plateau de distribution et reparti d'ici régulièrement dans le panier.

Une fois l'épaisseur de masse cuite souhaitée atteinte, le palpeur de niveau émet le signal pour la fermeture de la vanne de chargement. Une fois la vanne de chargement fermée, le lavage du tube d'entrée et l'accélération à la vitesse d'essorage commencent. Le clapet de sécurité se ferme de façon temporisée.

Pendant la phase d'accélération, les opérations de clairçage à l'eau est réalisée. Après avoir appliqué le clairçage à l'eau, le dispositif de séparation des égouts passe en position égout riche". Pendant les phases d'accélération et d'essorage, la plus grande quantité possible de

liquide (d'abord égout pauvre et puis égout riche) est amenée vers les canaux d'évacuation des égouts de la cuve.

Après la phase de freinage, environ à une vitesse entre 80 et 40 min⁻¹, le processus de déchargement commence. Pendant quelques révolutions du panier, le déchargeur écarte la couche de produit de la paroi de panier en dirigeant les cristaux vers l'ouverture se trouvant dans le fond du panier.

Avant le processus de déchargement, cette ouverture a été libérée par l'obturateur de fond.

Le produit tombe de la sortie de la cuve dans les unités de transport postposées.

Une fois le processus de déchargement achevé, le lavage des tamis est effectué pendant que la centrifugeuse accélère de nouveau à la vitesse de chargement.

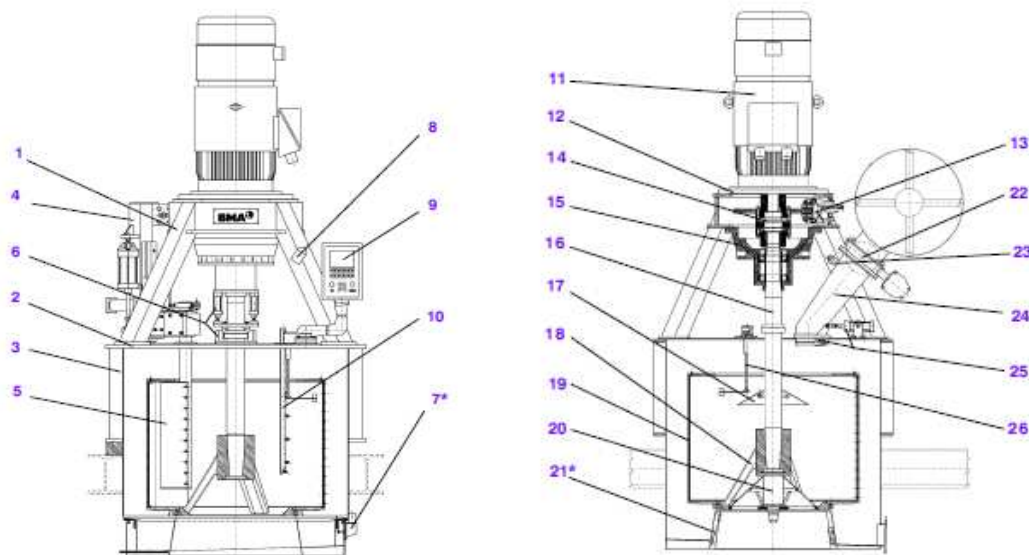


Figure 7 : sous ensemble d'une turbine discontinue.

Rep.	Désignation	Rep.	Désignation
1	Support	2	Couvercle
3	Cuve	4	Partie supérieure du déchargeur
5	Charrue de déchargement (tournant à droite / à gauche)	6	Dispositif de centrage
7	Disp. interne de séparation des égouts*	8	Projecteur
9	Appareil de commande	10	Rampe de clairçage à l'eau
11	Moteur	12	Bague intermédiaire
13	Frein	14	Accouplement
15	Tête d'entraînement	16	Arbre
17	Plateau de distribution	18	Moyeu
19	Panier (avec tamis)	20	Obturateur de fond
21	Dispositif de nettoyage*	22	Vanne de chargement
23	Rinçage de la trémie de chargement	24	Trémie de chargement
25	Clapet de sécurité	26	Palpeur de niveau

Tableau 2 : sous ensemble des turbines discontinues.

II.2- Facteurs influençant le fonctionnement des turbines discontinues

A partir de la revue bibliographique et l'entretien avec les conducteurs des machines, on a ressorti les facteurs suivant, comme paramètres influençant le fonctionnement des turbines :

- Durée d'essorage ;
- Début clairçage à l'eau ;
- Durée clairçage à l'eau ;
- Début clairçage à la vapeur ;
- Durée clairçage à la vapeur ;
- Retard séparation des égouts ;
- Epaisseur de la couche ;
- Angle de pulvérisation de l'eau de clairçage ;
- Granulométrie des cristaux ;
- Viscosité de la masse cuite ;
- Qualité des tamis ;
- Vitesse de la centrifugation ;
- Pression de la vapeur de clairçage ;
- Pression de l'eau de clairçage.

Facteurs contrôlables

- Durée d'essorage ;
- Début clairçage à l'eau ;
- Durée clairçage à l'eau ;
- Début clairçage à la vapeur ;
- Durée clairçage à la vapeur ;
- Retard séparation des égouts ;
- Epaisseur de la couche ;
- Angle de pulvérisation de l'eau de clairçage ;

Dans ce qui suit, seuls les facteurs contrôlables, pouvant être modifiés durant les expériences, et en rapport avec les turbines, seront retenus pour la réalisation des plans de criblage.

CHAPITRE II

ÉTUDE DES TURBINES DISCONTINUES

L'étude des turbines R2 (premier jet) comprend 3 étapes ; une étape de criblage des facteurs sélectionnés à partir des listes préalablement dressées, une modélisation mathématique des réponses par un plan de Box Behnken et la recherche d'un point dans le domaine expérimentale satisfaisant les exigences fixées pour l'humidité, la coloration et la pureté des égouts.

I- CRIBLAGE DES FACTEURS

I.1- Caractéristiques du plan de criblage

Paramètres retenus pour l'expérimentation

Pour réaliser le plan de criblage pour les turbines du premier jet R2, on retient comme facteurs :

- Durée d'essorage ;
- Début clairçage à eau ;
- Durée clairçage à eau ;
- Début clairçage à vapeur
- Durée clairçage à vapeur ;
- Retard séparation des égouts ;
- Niveau de palpeur (épaisseur de la couche) ;
- Angle de pulvérisation.

Domaine expérimentale

Le domaine expérimental du plan de criblage est illustré dans le tableau ci-dessous :

Facteurs	unités	Niveau -	Niveau +
Durée essorage	second	30	40
Début clairçage à eau	second	26	30
Durée clairçage à eau	second	14	18
Début clairçage à vapeur	second	5	10
Durée clairçage à vapeur	second	0	5
Retard séparation des égouts	second	35	45
Niveau palpeur		4	5
Angle de pulvérisation		1	2

Tableau 3 : Facteurs et domaine d'étude

Plan d'expérience

La matrice d'expérience obtenue pour un plan de criblage de 8 facteurs est une matrice d'Hadamard de 12 essais. Elle est représentée ci-dessous :

N°Exp	durée d'essorage	début clairçage à eau	durée clairçage à eau	début clairçage à vapeur	durée clairçage à vapeur	retard séparation des égouts	niveau palpeur	angle de pulvérisation
	sec	sec	sec	sec	sec	sec		
1	40	30	14	10	5	45	4	1
2	30	30	18	5	5	45	5	1
3	40	26	18	10	0	45	5	2
4	30	30	14	10	5	35	5	2
5	30	26	18	5	5	45	4	2
6	30	26	14	10	0	45	5	1
7	40	26	14	5	5	35	5	2
8	40	30	14	5	0	45	4	2
9	40	30	18	5	0	35	5	1
10	30	30	18	10	0	35	4	2
11	40	26	18	10	5	35	4	1
12	30	26	14	5	0	35	4	1

Tableau 4 : Plans d'expérimentation

I.2-Résultats du plan de criblage et discussion

Les résultats obtenus pour le plan de criblage des turbines R2 sont représenté en annexe (5).

L'analyse est développée dans ce qui suit :

a) Coloration

Etudes graphique des effets de la réponse coloration

L'études graphique des effets représente l'effet de chaque facteur sur la réponse étudiée, dans ce cas la coloration. Elle permet de dégager les facteurs influents sur la coloration ainsi que son sens de variation.

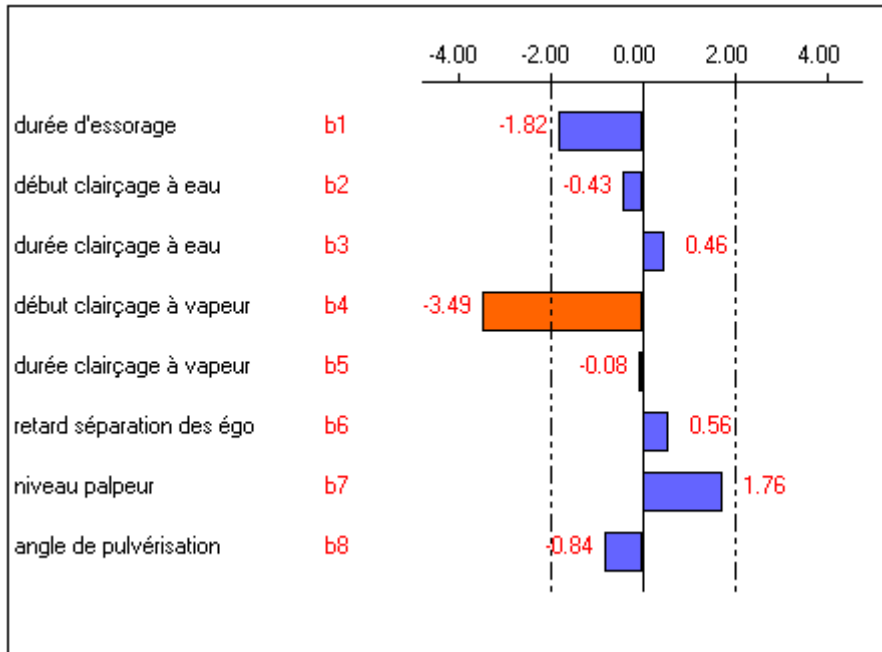


Figure 9 : Etude graphique des effets pour la coloration

L'étude graphique montre que le début de clairçage à vapeur est le facteur qui influe le plus la coloration ($b_4 = -3,49$), suivi du durée d'essorage ($b_1 = -1,82$) et niveau palpeur ($b_7 = 1,76$). Ainsi, afin d'avoir une coloration moins élevée, il faudrait augmenter le début de clairçage à vapeur, ou bien la durée d'essorage. Sinon, il suffirait de réduire le niveau de palpeur (épaisseur de la couche).

Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse coloration

Le diagramme de Pareto appuie les résultats donnés par le diagramme des effets en classant les facteurs selon leur contribution dans la variation de la réponse et permet de dégager les facteurs les plus influents.

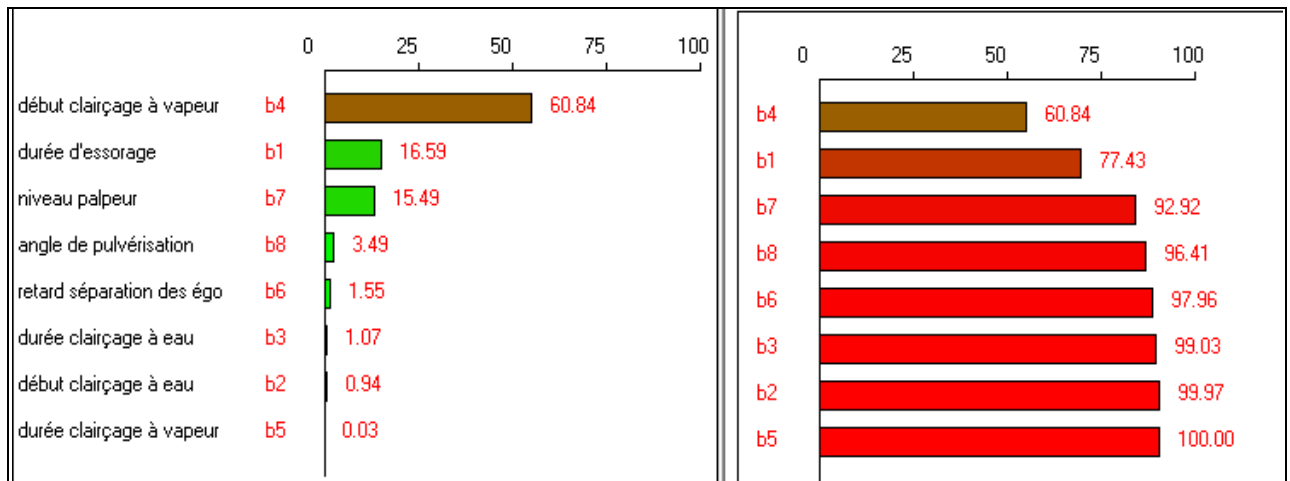


Figure 10 : Effets Pareto individuels

Figure 11 : Effets Pareto cumulés

La loi de Pareto dit que 80% des effets sont dus à 20% des causes. Ainsi, le début de clairçage à vapeur, durée d'essorage et le niveau de palpeur sont les facteurs qui influencent à plus de 80% la coloration.

En se basant sur la loi de Pareto, le début de clairçage à vapeur, la durée d'essorage et le niveau de palpeur s'avèrent être les facteurs qui influent le plus la coloration.

b) Humidité

Etudes graphique des effets de la réponse humidité

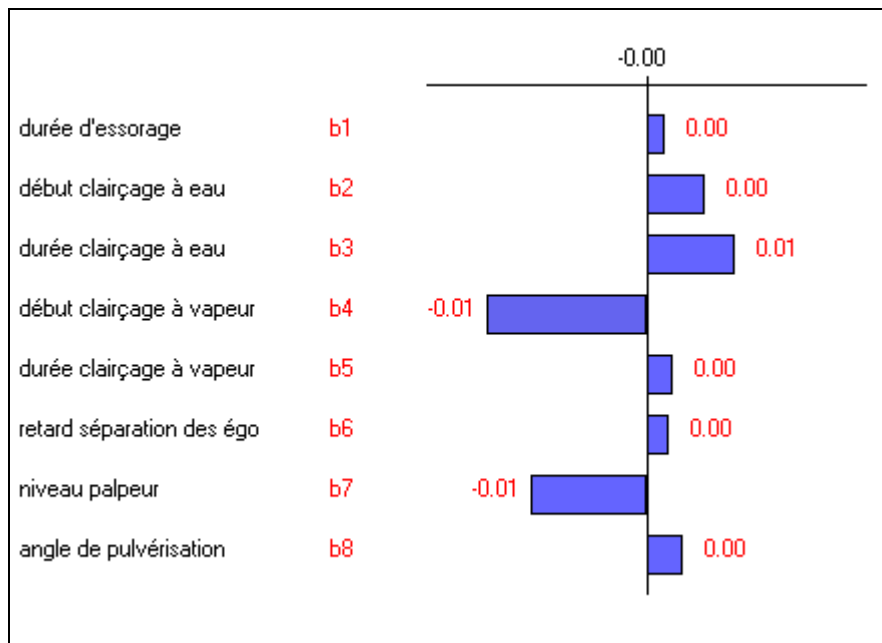


Figure 12: Etude graphique des effets de la réponse humidité

Le début de clairçage à vapeur apparaît comme le facteur qui influe le plus l'humidité, suivi de niveau palpeur et durée de clairçage à eau.

En effet, pour diminuer l'humidité, il faudrait augmenter le début de clairçage à vapeur et le niveau de palpeur ou bien réduire la durée de clairçage à eau.

Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse humidité

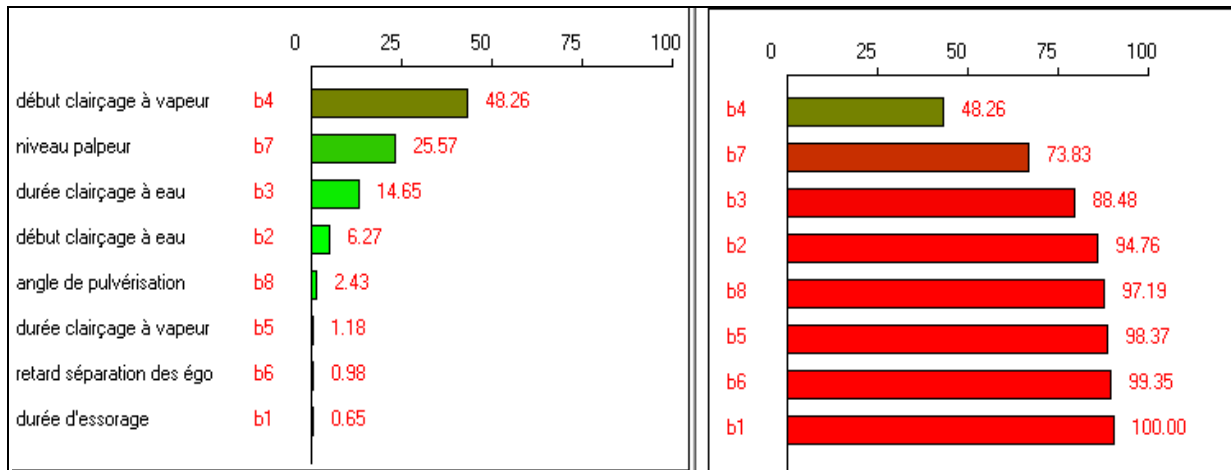


Figure13 : Effet Pareto individuels pour l'humidité

Figure14 : Effets Pareto cumulés pour l'humidité

La loi de Pareto appliquée pour l'humidité permet de déduire que trois facteurs régissent cette réponse ; le début de clairçage à vapeur, le niveau de palpeur et la durée de clairçage à eau.

c) Pureté d'égout riche

Etude graphique des effets de la réponse pureté ER

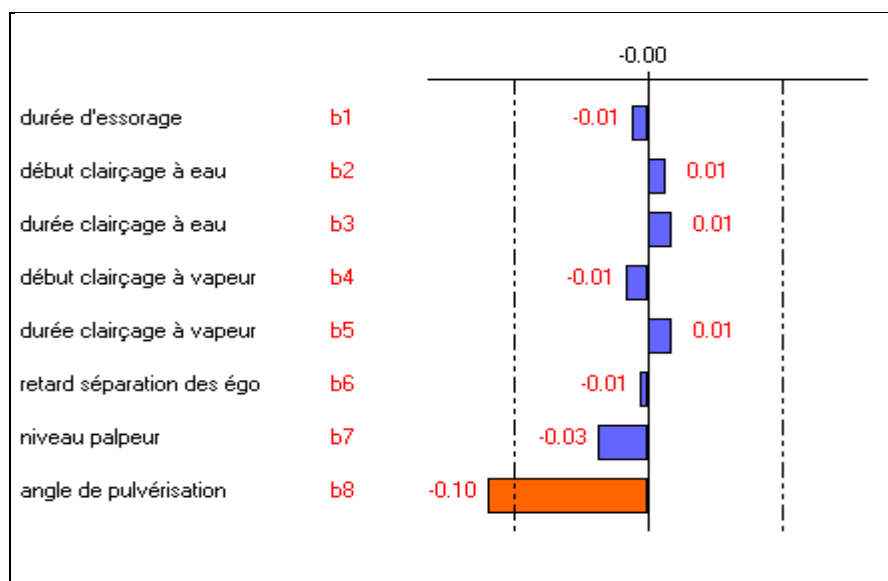


Figure 15 : Etude graphique des effets de la réponse pureté ER

L'angle de pulvérisation s'avère être le facteur qui influe le plus sur la pureté ER. En effet, pour augmenter la pureté ER il faudrait diminuer l'angle de pulvérisation et le niveau de palpeur.

Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse pureté ER

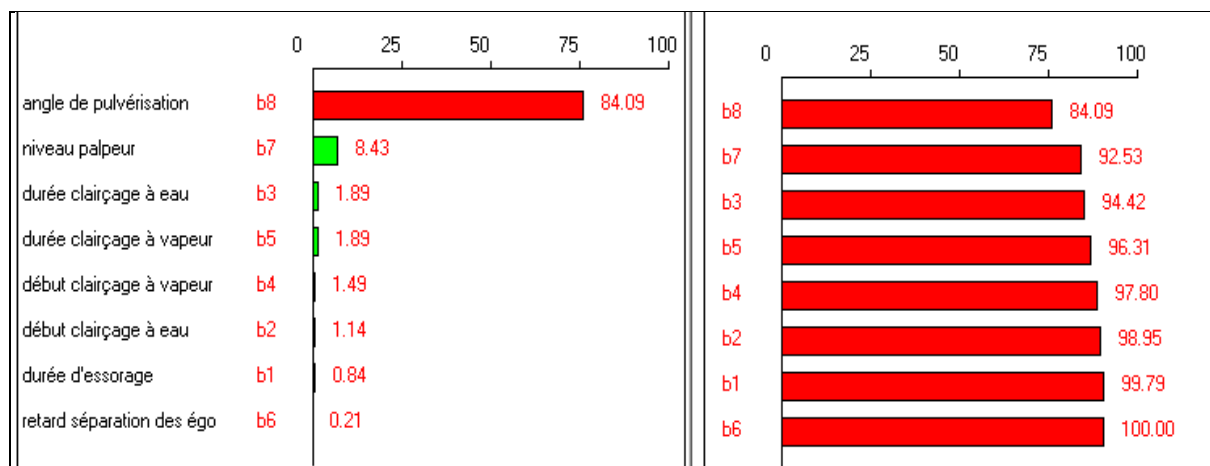


Figure16 : Effets Pareto individuels pour pureté ER

Figure17 : Effets Pareto cumulés pour pureté ER

La loi de Pareto permet de déduire qu'un seul facteur qui influe le plus la pureté ER : l'angle de pulvérisation.

d) Pureté d'égout pauvre

Etude graphique des effets de la réponse pureté EP

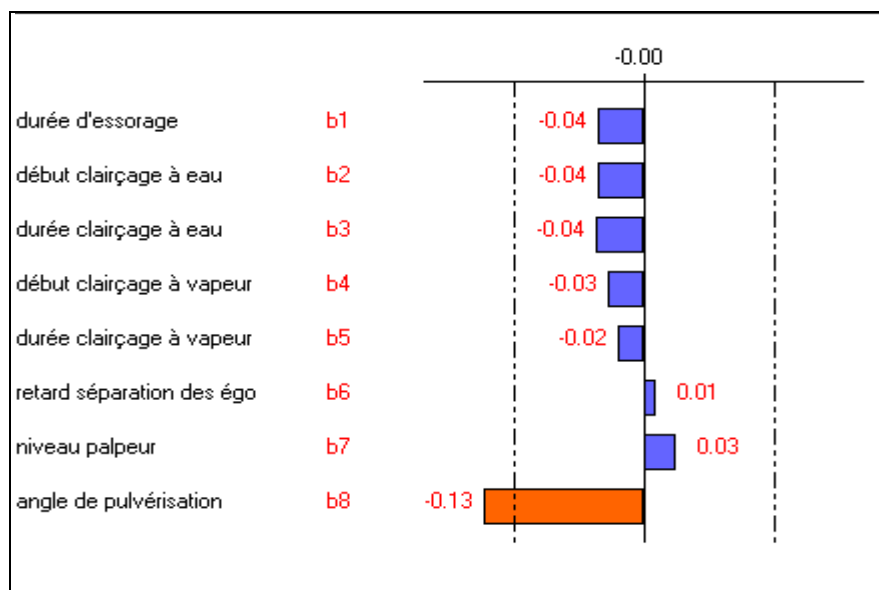


Figure 18 : Etude graphique des effets de la réponse pureté EP

L'angle de pulvérisation apparaît comme le facteur qui participe à la pureté EP. En effet, pour augmenter la pureté EP il faudrait diminuer l'angle de pulvérisation.

Effets Pareto individuels et cumulés de la réponse pureté EP

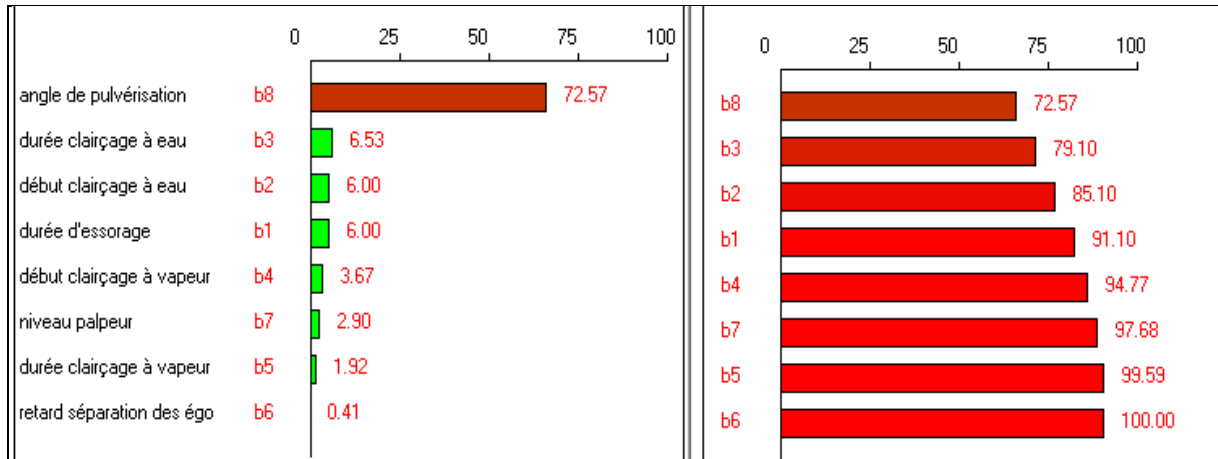


Figure19 : Effets Pareto individuels pour la pureté EP Figure20 : Effets Pareto cumulés pour

La pureté EP

On déduit d'après la loi de Pareto que l'angle de pulvérisation est le facteur qui influe le plus la pureté EP.

Conclusion

D'après l'étude réalisée ci-avant, augmenter la pureté des égouts et diminuer l'humidité et la coloration du sucre de premier jet issu des turbines R2, revient à :

- Augmenter le débit de clairçage à vapeur, la durée d'essorage ;
- Diminuer l'angle de pulvérisation, la durée de clairçage à eau et le niveau de palpeur.

On déduit également, à partir du plan de criblage, que les paramètres suivant ont une grande influence sur le fonctionnement des turbines R2 :

- Durée d'essorage ;
- Début clairçage à vapeur ;
- Durée clairçage à eau ;

- Angle de pulvérisation ;
- Niveau de palpeur.

II- MODELISATION

II.1- Caractéristiques du plan de modélisation

Comme cité précédemment, le début de clairçage à vapeur, l'angle de pulvérisation, le niveau de palpeur, la durée d'essorage et la durée de clairçage à eau sont les paramètres retenus pour l'optimisation des turbines discontinues R2.

En réalisant les essais, le retard séparation des égouts à été fixé à une valeur de 40s, le début de clairçage à eau à une valeur de 30s et la durée de clairçage à vapeur à une valeur de 3s.

Domaine expérimentale

Le domaine expérimental défini par les paramètres retenus a été élargie en adoptant de nouveaux niveaux. Ceci dans le but d'avoir un modèle couvrant un plus large domaine. Les niveaux haut et bas de chaque facteur sont définis comme l'indique le tableau :

Facteurs	Unités	Niveau-	Niveau +
Début de clairçage vapeur	second	4	10
Durée d'essorage	second	30	40
Durée clairçage eau	second	14	20
Angle de pulvérisation		1	2
Niveau palpeur		3	6

Tableau 5 : Facteurs et domaine d'étude

Plan d'expérimentation

Le plan de Box Behnken pour 5 facteurs, 6 points au centre du domaine d'étude est illustré ci-après.

N°Exp	durée essorage	durée clairçage eau	début clairçage vapeur	niveau palpeur	angle pulvérisation
	sec	sec	sec		
1	30.00	14.00	7.00	4.50	1.50
2	40.00	14.00	7.00	4.50	1.50
3	30.00	20.00	7.00	4.50	1.50
4	40.00	20.00	7.00	4.50	1.50
5	30.00	17.00	4.00	4.50	1.50
6	40.00	17.00	4.00	4.50	1.50
7	30.00	17.00	10.00	4.50	1.50
8	40.00	17.00	10.00	4.50	1.50
9	30.00	17.00	7.00	3.00	1.50
10	40.00	17.00	7.00	3.00	1.50
11	30.00	17.00	7.00	6.00	1.50
12	40.00	17.00	7.00	6.00	1.50
13	30.00	17.00	7.00	4.50	1.00
14	40.00	17.00	7.00	4.50	1.00
15	30.00	17.00	7.00	4.50	2.00
16	40.00	17.00	7.00	4.50	2.00
17	35.00	14.00	4.00	4.50	1.50
18	35.00	20.00	4.00	4.50	1.50
19	35.00	14.00	10.00	4.50	1.50
20	35.00	20.00	10.00	4.50	1.50
21	35.00	14.00	7.00	3.00	1.50
22	35.00	20.00	7.00	3.00	1.50
23	35.00	14.00	7.00	6.00	1.50
24	35.00	20.00	7.00	6.00	1.50
25	35.00	14.00	7.00	4.50	1.00
26	35.00	20.00	7.00	4.50	1.00
27	35.00	14.00	7.00	4.50	2.00

28	35.00	20.00	7.00	4.50	2.00
29	35.00	17.00	4.00	3.00	1.50
30	35.00	17.00	10.00	3.00	1.50
31	35.00	17.00	4.00	6.00	1.50
32	35.00	17.00	10.00	6.00	1.50
33	35.00	17.00	4.00	4.50	1.00
34	35.00	17.00	10.00	4.50	1.00
35	35.00	17.00	4.00	4.50	2.00
36	35.00	17.00	10.00	4.50	2.00
37	35.00	17.00	7.00	3.00	1.00
38	35.00	17.00	7.00	6.00	1.00
39	35.00	17.00	7.00	3.00	2.00
40	35.00	17.00	7.00	6.00	2.00
41	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50
42	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50
43	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50
44	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50
45	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50
46	35.00	17.00	7.00	4.50	1.50

Tableau 6 : Plan d'expérimentation

II.2-Résultats du plan de modélisation

En arrivant à l'étape de réalisation des essais, des problèmes majeurs dans l'atelier de cristallisation, qui ont duré plus d'un mois, nous ont empêchés de les effectuer.

Il été prévu dans cette partie de trouver une surface de réponse qui illustrera la variation des réponses en fonction des facteurs identifiés influents par l'étude de criblage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objet de ce travail a été d'améliorer le fonctionnement des turbines discontinues dans l'atelier de cristallisation, pour avoir une coloration moins de 25 IU, une humidité moins de 0,1 et une pureté des égouts allant de 97 à 99.

Le criblage des facteurs influençant le fonctionnement des turbines, a démontré que la durée d'essorage, le débit de clairçage à vapeur, la durée de clairçage à eau, le niveau de palpeur et l'angle de pulvérisation sont des facteurs à grande influence sur la qualité du sucre blanc et des égouts.

En se basant sur cette étude, on suggère les recommandations suivantes :

Pour diminuer la coloration de sucre blanc :

- Augmenter la durée d'essorage ;
- Augmenter le débit de clairçage à vapeur ;
- Réduire l'épaisseur de la couche de la masse cuite a turbinée.

Pour avoir une humidité moins élevée de sucre :

- Augmenter le débit de clairçage à vapeur ;
- Diminuer la durée de clairçage à eau.

Et pour augmenter ou diminuer la pureté des égouts il faudrait agir sur l'angle de pulvérisation.

Les études en perspectives consistent à :

- Trouver le point optimum entre les facteurs de grande influence, déjà déterminés en criblage, en utilisant le plan de Box Behnken (surfaces de réponse) comme méthode d'optimisation efficace pour le fonctionnement des turbines discontinues.
- Etablir une étude pour bien maîtriser la cristallisation qui a une grande influence sur le fonctionnement des turbines.
- Compléter ce travail par une étude des turbines discontinues du 2ème et 3ème jet.

D'autre part et afin d'optimiser le fonctionnement des turbines discontinues, on recommande à la raffinerie de prendre en considération les éléments suivants :

- La formation des conducteurs des turbines ;
- L'étude de l'influence du malaxage sur le turbinage ;
- La mise au point d'une méthode pour mesurer et fixer la pression de clairçage ;
- L'augmentation de la durée de lavage des tamis des turbines après chaque cycle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES & WEBOGRAPHIQUES

- [1] CEDUS (centre d'études et de documentation du sucre). Sucre et autres débouchés. Mémo statistique Février 2010 (en ligne). Disponible sur : <http://pageflip.3c-e.com/sucre/grandpublic/e-motionbook.php>
- [2] Guide du raffinage de la COSUMAR. 128p.
- [3] ASADI M. Beet sugar handbook. New York: John WILLEY & Sons Inc, 2006, 866p.
- [4] CERIS. Programme d'initiation sucrière. Tome I.
- [5] DECLoux M, MANGIN D., PUEL F. Procédés de transformation en sucrerie (Partie 2). F6151, Traité Agroalimentaire, Les Techniques de l'ingénieur. 2003.
- [6] HUGOT E. La sucrerie de cannes. 3^{ième} édition. Paris : Technique & Documentation-Lavoisier, 1987, 1018p.
- [7] PUEL F, VEESLER S, MANGIN D. Cristallisation : Aspects théorique. J2710, Traité Opérations unitaires, les techniques de l'ingénieur, 2005.
- [8] DEHHAOUI M. Analyse multivariée de surface de réponse en relation avec les plans expérimentaux. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomique. Louvain : Université Catholique de Louvain, 1996, 160p.
- [9] GOUPY J, CREIGHTON L, Introduction aux plans d'expériences. 3^{ième} édition, Paris : DUNOD, 2006, 324p.
- [10] KHATABI M.J. Contribution à la connaissance de l'effet des éléments alcalins sur la cristallisation du saccharose. Mémoire de 3^{ième} cycle agronomie : institut agronomique et vétérinaire Hassan II, 1980, 123p.
- [12] CEDUS (centre d'études et de documentation du sucre). L'extraction du sucre.
- [14] KLEIN J. P, BOISTELLE R, DUGUA J. Cristallisation : aspect théorique J 1500, traité Génie des procédés, les techniques de l'ingénieur, 1989.
- [15] Michel ROBATEL, Philippe BOREL. Centrifugation ; aspect théorique, traité génie des procédés, les techniques de l'ingénieur, 2005.

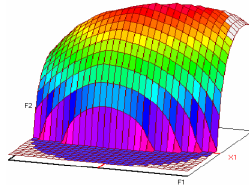
ANNEXES

**ANNEXE 2 : SPECIFICATIONS TECHNIQUES DES TURBINES
DISCONTINUES**

Fabricant	BMA	
Type	B 1750	
Diamètre	1540	mm
Hauteur du panier	1170	mm
Epaisseur de couche maximale	230	mm
Volume de charge maximale	1107	L
Poids de charge maximale	1750	Kg
Coefficient d'essorage	1004	
Nombre de cycles/h	25	
Vitesse de chargement	120-250	tr/min
Vitesse de déchargement	80-40	tr/min

ANNEXE 5 : RESULTATS DU PALN DE CRIBALGE

N°Exp	Durée	début	durée	début	durée	retard	niveau	angle de	coloration	humidité	pureté ER	pureté EP
	d'essorage	clairçage à eau	clairçage à eau	clairçage à vapeur	clairçage à vapeur	séparation des égouts	palpeur	pulvérisation				
	sec	sec	sec	sec	sec	u sec			IU	%	%	%
1	40	30	14	10	5	45	1	1	12.72	0.01	98.38	98.07
2	30	30	18	5	5	45	2	1	26.56	0.07	98.47	98.13
3	40	26	18	10	0	45	2	2	17.05	0.02	98.08	97.79
4	30	30	14	10	5	35	2	2	18.92	0.02	98.11	97.81
5	30	26	18	5	5	45	1	2	24.75	0.05	98.21	97.94
6	30	26	14	10	0	45	2	1	20.43	0.01	98.35	98.38
7	40	26	14	5	5	35	2	2	19.54	0.03	98.22	98.03
8	40	30	14	5	0	45	1	2	18.24	0.09	98.23	97.86
9	40	30	18	5	0	35	2	1	24.47	0.03	98.33	98.13
10	30	30	18	10	0	35	1	2	12.90	0.04	98.30	97.88
11	40	26	18	10	5	35	1	1	13.46	0.07	98.45	98.00
12	30	26	14	5	0	35	1	1	23.78	0.04	98.37	98.20



Master ST CAC Agiq

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

Nom et prénom: Khansae KARRIBOU

Année Universitaire : 2010/2011

Titre: Optimisation du fonctionnement des turbines discontinues par la méthode des plans d'expériences

Résumé

Ce projet de fin d'étude, réalisé au sein de la raffinerie sucrière COSUMAR-Casablanca, rentre dans le cadre de l'amélioration de la qualité de sucre blanc. Dans ce but, on a visé l'optimisation du fonctionnement des turbines discontinues.

Cette étude s'est penchée sur la détermination des facteurs influant le fonctionnement des turbines discontinues à l'aide du plan de Plackett et Burman.

Au terme de ce travail, on a déterminé les facteurs contrôlant le fonctionnement des turbines, à citer la durée d'essorage, le début de clairçage à vapeur, la durée clairçage à eau, l'épaisseur de la couche et l'angle de pulvérisation.

Mots clés : sucre, raffinerie, turbines discontinues, turbinage, essorage.

