

## Licence Sciences et Techniques (LST)

# GENIE CHIMIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

# SUIVI D'UNE UNITE DE PRODUCTION DE SUCRE ET SES DERIVEES

Présenté par :

◆ ADOUM MOHAMMED KHALIL

Encadré par :

◆ Pr. HAUDI AMAL

Soutenu Le 7 Juillet 2021 devant le jury composé de :

- Pr HAUDI AMAL

- Pr LHASSANI ABDELHADI

- Pr KHALIL FOUAD

**Année Universitaire 2020 / 2021**

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES – SAISS

☒ B.P. 2202 – Route d'Imouzzer – FES

☎ Ligne Directe : 212 (0)5 35 61 16 86 – Standard : 212 (0)5 35 60 82 14

## Dédicace

### À mes chers parents,

*Pour vos encouragements, votre amour, vos prières et vos efforts inestimables.*

### À toute ma famille

*Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et de votre bonté exceptionnelle. Que Dieu vous garde et vous procure santé et bonheur.*

### À mes amies

*Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

## Remerciement:

*Au terme de ce travail, j'adresse mes sentiments de reconnaissance et gratitude à mon encadrant Professeur **HAUDI AMAL** de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, qui a encadré et dirigé de près le présent travail, Je tiens à Lui exprimer ma très grande reconnaissance et le témoignage de mon profond attachement pour l'attention qu'elle a porté à ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont aussi à Pr. A.LHASSANI ET Pr. F.KHALIL qui ont accepté de sacrifier une partie de leur temps pour juger ce travail, A Pr. A.HARRACH qui était toujours a nos coté pendant toute l'année Je remercie aussi tous les professeurs de la FST et que tous ceux qui ont fait part à ce travail, trouvent ici ,l'expression de mes remerciements et ma profonde gratitude*

## SOMMAIRE:

<b>Chapitre 1 :Etude bibliographique du procédé de fabrication de sucre.....</b>	<b>.....</b>
1. Introduction.....	1
2. Historique de sucre.....	2
I-Le sucre(saccharose).....	<b>3</b>
1. Généralités sur le sucre.....	3
2. Fonctionnalités de sucre.....	4
3. Substitut de sucre.....	5
II-La betterave sucrière.....	6
1. Historique.....	6
2. Généralités sur la betterave sucrière.....	7
2.1. Définition.....	7
2.2. Composition Chimique.....	8
III-La production de sucre de betterave.....	9
1. Historique de l'industrie sucrière au Maroc.....	9
2. Procédure de fabrication de sucre de betterave.....	9
2.1. Stockage de betterave.....	9
2.2. Diffusion de jus de betterave.....	11
2.3. Purification de jus de betterave.....	14
2.4. L'évaporation.....	16
2.5. La cristallisation.....	16
2.6. Le séchage.....	17
<b>Chapitre 2 : La diffusion de jus de betterave et son bilan de matière.....</b>	<b>19</b>
1. Définition de Bilan de matière.....	20
2. But d'établissement de bilan de matière.....	20
3. Bilan de matière de diffusion.....	21
4. Bilan de sucre.....	23
Conclusion.....	26

## TABLE DE FIGURE:

Figure 1: betterave sucrière.....	8
Figure 2: Schéma de diffusion simplifié.....	13
Figure 3: Schéma général de procédé de fabrication de sucre.....	19
Figure 4:schéma général de procédé de diffusion.....	21

## LISTE DE TABLEAU:

Tableau 1 : Composition de betterave.....	8
Tableau 2: Teneur de composant de betterave.....	8
Tableau 3:pertes de sucre des betteraves en tas stockées à diverses températures moyennes de l'air extérieur.....	10

## LISTE DES ABBREVIATIONS:

$C_{12}H_{22}O_{11}$  : Formule chimique du saccharose

(OH): Groupe hydroxyle

HFCS: (high-fructose corn syrup) Edulcorant naturel

°F: Degré fahrenheit

KCl: Chlorure de potassium

NaCl : Chlorure de sodium

DS : (Dry substance) La matière sèche

$K_D$  : Coefficient de diffusion

pH : Potentiel hydrogène

%P : La pureté de jus de betterave

OPU : Opération unitaire

RT : (Rotating tube) tube rotatoire

# **CHAPITRE 1 : PROCEDE D'EXTRACTION DE SUCRE DE BETTERAVES SUCRIERE**

## 1. INTRODUCTION

Les hommes ont toujours aimé la saveur sucrée de certaines sèves de végétaux et des fruits, tout comme celle de sécrétions animales, tels le lait et le miel. La substance de saveur douce et agréable que nous connaissons sous le nom de « sucre » est le saccharose obtenu à partir des réserves de glucides contenues dans les végétaux soumis au cycle photosynthétique, c'est-à-dire renfermant de la chlorophylle. De nombreux arbres, la plupart des fruits, les fleurs, les racines, feuilles et tiges des plantes stockent des glucides. Si certaines de ces sources sont exploitées (sirop de maïs aux États-Unis, sucre d'érable au Canada, sucre de coco en Thaïlande, etc.), les deux principales sont, à l'heure actuelle, la canne à sucre et la betterave sucrière.[1] La betterave et la canne à sucre ont une teneur en sucre presque similaire (la betterave contient généralement 18 % et la canne à sucre environ 15 %), mais sont différents en ce qui concerne la quantité de non sucres (le jus de betterave contient environ 2,5 % et le jus de canne environ 5 %) et de fibres (la betterave contient environ 5 % et la canne environ 10 %). Les différences de composition requièrent des méthodes différentes pour produire du sucre à partir de la betterave ou de la canne. Les différences de culture, de composition et de traitement sont suffisantes pour justifier l'existence de deux industries distinctes : celle de la betterave et celle de la canne. [2]. L'industrie de la betterave sucrière joue un rôle important dans l'économie des pays producteurs de cette dernière, qui emploient un grand nombre de personnes pour la culture de la betterave, la production de sucre et le soutien des secteurs liés au sucre, tels que la vente, les services et la recherche. Par exemple, environ 77 000 emplois aux États-Unis dépendent de l'industrie betterave-sucre. Environ 40 % de la production mondiale de sucre provient de la betterave car les climats de la plupart des pays sont convenables à la culture de betteraves (en moyenne régions froides), dont on peut citer une cinquantaine de pays à travers le monde, par exemple, en Amérique du Nord (États-Unis et Canada), Amérique du Sud (Chili), Asie, Afrique du Nord (Maroc et Égypte), et la plupart de l'Europe. [2]

## 2. HISTORIQUE

Les sucres dans les civilisations les plus anciennes étaient largement utilisés pour sucrer les aliments et les boissons afin de les rendre plus appétissants. Le miel d'abeille ou les sirops de fruits concentrés étaient utilisés, mais ils altéraient la saveur des aliments auxquels ils étaient ajoutés. L'utilisation du sucre cristallisé dans les aliments s'est généralisée après la découverte des Amériques. Il était en fait utilisé bien plus tôt comme substance médicinale, ou était présumé comme telle. Pour ce qui est de l'origine du terme "sucre", qui est similaire dans toutes les langues modernes sauf le chinois, Von Lippmann pense qu'il dérive du sanskrit "Sakkara" ou "SukkiM", qui désignent tous deux une qualité mercantile supérieure. La première plante dont on a extrait le jus sucré pour l'alimentation était le bambou (*Bambusa spp.*) et non la canne à sucre. Théophraste (300 av. J.-C.) a fait allusion au "miel de bambou" ainsi qu'au "sel indien" que l'on peut obtenir à partir du bambou. La canne à sucre a commencé près de l'embouchure du Gange vers 300 avant J.-C., et s'est répandue en Chine, à Java, puis au Tibet et sur l'île de Ceylan. À la même époque, le sel indien est apparu en Grèce après les expéditions militaires d'Alexandre le Grand en Orient. Sénèque a écrit sur un miel obtenu à partir de la canne, tandis que Pline l'Ancien a dit :

"Le sucre est produit en Arabie, mais celui de l'Inde est plus apprécié".

Vers le huitième siècle, il y avait une importante production de canne à sucre entre les fleuves Tigre et Euphrate. Le sucre, qui nécessitait un processus de purification long et complexe, était encore limité à une utilisation en médecine. La canne est introduite par les Arabes en Égypte et en Éthiopie, et plus tard, vers le XIIIe siècle, en Sicile, à Chypre, en Crète et en Andalousie. Le sucre, facile à conserver et particulièrement cher, commence à être commercialisé dans la République de Venise aux côtés de la soie et des épices. Le processus de raffinage du jus épais, partiellement cristallisé dans les zones où la canne à sucre était cultivée, fut développé à Venise. Le processus de

raffinage était considéré comme un secret militaire, surtout après la découverte d'une méthode innovante vers 1420. Le monopole du sucre a commencé à vaciller lorsque la canne à sucre s'est répandue dans les îles Canaries et à Madère, et surtout après la découverte de l'Amérique. Les Portugais commencent à cultiver la canne à sucre dans le Nouveau Monde, d'abord à Haïti en 1515, puis au Brésil et à Saint-Domingue. Dès le début, les rendements sont plus élevés qu'en Asie et en Afrique. Le transport transatlantique s'intensifie, entraînant une chute brutale des prix du sucre dans l'Ancien Monde et une augmentation spectaculaire de la demande et de la consommation.

Le centre du commerce mondial s'est déplacé de Venise à Lisbonne, où le sucre brut arrivait des Amériques, tout comme le produit raffiné d'Anvers.

La suprématie portugaise n'a pas duré longtemps, car le commerce s'est déplacé vers Londres à la fin du 16<sup>ème</sup> siècle. Dans le même temps, les anglais ont commencé la culture de la canne à sucre en Louisiane et à Cuba. La consommation en Europe a été stimulée par la diffusion de boissons telles que le thé, le café et le chocolat. A la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, le marché était fermement sous l'emprise de la puissance navale et commerciale britannique. [3]

## I-LE SUCRE (SACCHAROSE)

### 1. GÉNÉRALITÉS SUR LE SUCRE

Le mot sucre vient de l'indien sarkara. Le nom chimique du sucre est sucrose en anglais et saccharose dans certaines langues européennes. L'ose suffixe dans sucrose, glucose, raffinose, etc., identifie les sucres.

Le sucre (saccharose,  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) est l'une des familles de sucres (saccharides). Tous les sucres appartiennent à un groupe plus large, appelé glucides (sucres, amidons et fibres alimentaires). Le terme "substituts de sucre" désigne tous les sucres naturels et synthétiques (artificiels) autres que le saccharose. Tous les sucres au goût sucré et les substituts de sucre sont connus sous le nom d'édulcorants. Le saccharose (sucre), le

glucose (dextrose) et le fructose (lévulose) sont des exemples de sucres au goût sucré. La quantité de groupes hydroxyle (OH) dans les molécules de sucres contribue à leur pouvoir sucrant. Cependant, tous les sucres n'ont pas un goût sucré. En général, les sucres dont les molécules contiennent au moins deux groupes hydroxyle (OH) ont un goût sucré. Environ 50 composés ont un goût sucré. [2]

Le sucre (sucre de table ou sucre cristallisé), dans sa forme commerciale, est blanc et cristallin (granulé) avec un goût agréablement sucré. Il est utilisé dans la cuisine comme ingrédient, dans les produits alimentaires enrichis en sucre (par exemple, les boissons gazeuses et les confiseries) et dans la production de produits non alimentaires (par exemple, les détergents et l'éthanol). Le sucre est considéré comme :

- L'un des produits alimentaires les plus purs au monde (99,95 % de saccharose, l'eau étant le principal reste).
- L'un des aliments les plus naturels utilisés par l'homme depuis des siècles sans risque avéré pour la santé.
- L'un des composés organiques les plus purifiés au monde.
- L'un des produits alimentaires les moins chers. [2]

## **2. FONCTIONNALITÉS DE SUCRE**

- Améliore le goût des produits alimentaires.
- Améliore l'éclat des bonbons.
- Améliore la durée de conservation des produits alimentaires.
- Améliore la propriété de gonflement des produits alimentaires.
- Améliore la propriété conservatrice des produits alimentaires.
- Améliore la texture (sensation en bouche) des produits alimentaires.

- Améliore la libération de pectine de fruits dans les produits de confiture.
- Améliore la vitesse de chauffe des produits alimentaires au micro-ondes. [2]

### **3. SUBSTITUT DE SUCRE**

(Édulcorants sans sucre ou substituts de sucre) sont des édulcorants alternatifs dont le goût ressemble moins à celui du sucre. Au cours du siècle dernier, et plus particulièrement depuis les années 1980, plusieurs substituts artificiels et naturels ont été proposés aux consommateurs pour concurrencer le sucre. Certains édulcorants sont plus sucrés et moins caloriques (fournissent moins de calories) que le sucre, de sorte que de plus petites quantités sont nécessaires pour sucrer les aliments.

Les substituts du sucre ont été développés pour quatre raisons principales :

- La diminution des calories.
- Consommation par les diabétiques.
- Des coûts de production plus faibles.
- Un pouvoir sucrant plus élevé.

Les substituts du sucre peuvent être divisés en deux groupes :

- Les substituts de sucre artificiels : Acésulfame-K, aspartame,

Sel d'aspartame-acésulfame (Twin-sweet), saccharine ( $C_7H_5NO_3S$ , SweetNLow), sucralose (Splenda), néotame et l'alitame sont des exemples d'édulcorants artificiels.

- Les substituts naturels du sucre : Le sirop de maïs à haute teneur en fructose (HFCS), le glucose et le fructose sont les principaux substituts naturels du sucre.

Le HFCS est un édulcorant naturel produit par l'hydrolyse (réaction d'un composé avec l'eau) de l'amidon (un polysaccharide contenant de nombreuses unités de glucose). L'amidon est hydrolysé en glucose puis une partie du

glucose est convertie en fructose par voie enzymatique. Le maïs est la source d'amidon la plus économique et la plus abondante pour la production de HFCS dans de nombreux pays. [2]

## II-LA BETTERAVE SUCRIÈRE

### **1. HISTORIQUE:**

L'histoire de la betterave à sucre a commencé en 1747, quand le chimiste allemand Marggraf découvrit que la substance sucrée des betteraves était du saccharose, dont on pensait jusqu'alors qu'il n'existait que dans la canne à sucre. A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, son élève Achard commença l'étude de la culture de la betterave à sucre et de la fabrication du sucre de betterave. En 1801, il construisit une usine en Silésie et se mit à sélectionner des types de betteraves propres à la production de sucre. La betterave blanche de Silésie fut le fruit de ses travaux. Plus tard, d'autres chercheurs s'efforcèrent d'améliorer le matériel de betteraves. Louis de Vilmorin entreprit un travail de sélection fondé sur la betterave de Silésie, et, en 1837, il introduit le test de la descendance comme méthode de sélection. Par suite de ses travaux, et après l'introduction de la mesure densimétrique en 1850 et du polarimètre en 1862, la teneur en sucre augmenta. Elle passa de 7 à 9 pourcent en 1830 à 11 à 13 pour cent dans la variété dite « Beta imperialis », considérée comme la première véritable betterave à sucre, créée par le sélectionneur allemand Knauer en 1854. Tandis que certains chercheurs pensent que « Beta imperialis » provient de croisements spontanés entre la « betterave de Silésie » d'Achard et des formes de betterave sauvage Beta maritima, d'autres pensent que la betterave à sucre est le résultat d'une sélection répétée dans les populations de « betterave de Silésie », considérée elle-même comme issue de croisements naturels entre divers types de betteraves cultivées pour leurs feuilles ou leurs racines. [5]

## **2. GÉNÉRALITÉS SUR LA BETTERAVE SUCRIÈRE:**

### **2.1. DÉFINITION :**

**Nom Commun** : *Beta vulgaris*  
**Famille** : *Chenopodiaceae*  
**Genre** : *Beta*

La betterave sucrière est une plante bisannuelle, c'est à dire que son cycle dure 2 ans:

- La 1ère année a lieu la phase végétative durant laquelle la plante se développe et constitue son stock de sucre dans sa racine.

-La 2ème année a lieu la phase reproductive où la plante se reproduit : elle puise dans ses réserves pour produire une hampe florale qui évolue en fruits et graines. [8]

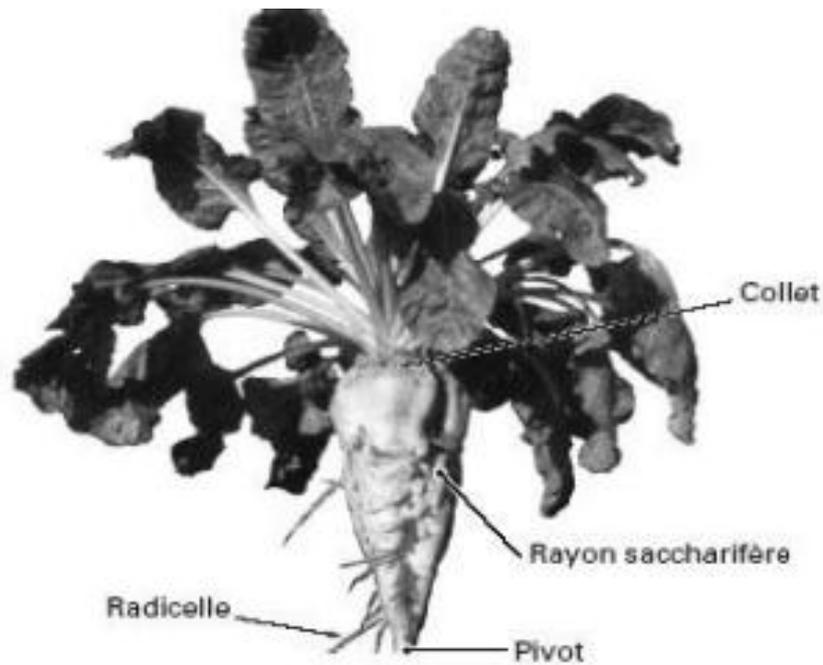


Figure 1: betterave sucrière

## 2.2. COMPOSITIONS CHIMIQUES DE LA BETTERAVE:

➤ Pour 100g de betterave, elle est constituée de :

Composant	Masse en g
Eau	75g
Matière sèche	25g
Saccharose	18g
Non saccharose	7g
Marc	4g
Reste	3g
Matière azotée	1.4g
Matière non-azotée	1.6g

**Tableau 1 : Composition de betterave**

➤ **Composition moyenne de la betterave sucrière:**

<b>Composant</b>	<b>Teneur (%)</b>
Eau	75.9
Non-sucre	2.6
Sucre	16.0
Pulpe	5.5
Total	100.0

**Table  
au 2:  
Teneu  
r de  
comp  
osant  
de  
better  
ave**

**III-**

## **LA PRODUCTION DE SUCRE DE BETTERAVE**

### **1. HISTORIQUE DE L'INDUSTRIE SUCRIÈRE AU MAROC:**

Dès 1957, le service de la Recherche Agronomique devait se prononcer sur les possibilités de culture de la betterave à sucre au Maroc et formuler ses conclusions sur deux plans. D'abord sur le plan scientifique, car il était nécessaire de s'entourer des garanties que peuvent seules fournir la recherche et l'expérimentation ; ensuite, sur le plan pratique, car il fallait s'assurer que les recommandations des chercheurs seraient applicables dans le milieu agricole marocain.

Les années 57 et 58 furent consacrées à de premiers essais, à la constitution d'une documentation, à la mise au point des méthodes de travail, ainsi qu'à l'acquisition des moyens nouveaux à mettre en œuvre. En 1959 fut créée une société d'études, la Somasuc, dont le gouvernement marocain fait partie intégrante et qui était destinée à

mettre au point, dans la région du Gharb, un projet pour la création d'une première sucrerie marocaine. [6]

## **2. PROCÉDURE DE FABRICATION DE SUCRE DE BETTERAVE:**

### **2.1. STOCKAGE DE BETTERAVE :**

Dans la plupart des régions productrices de betteraves, les périodes de récolte sont courtes et le stockage des betteraves sucrières est nécessaire. Dans une région des montagnes Rocheuses, par exemple, la concentration de sucre dans la betterave en croissance continue d'augmenter jusqu'à ce qu'une gelée meurtrière arrête la croissance. Après cette période, il est essentiel de récolter rapidement les betteraves avant qu'elles ne soient gelées dans le sol, aussi les pluies d'automne peuvent sérieusement entraver la récolte, et donc lorsqu'une grande récolte de betteraves est disponible, le stockage en tas est nécessaire. Dans toutes les usines, un petit stock de betteraves est nécessaire pour faciliter l'acheminement vers les usines de transformation, qui doit, pour être efficace, fonctionner à plein régime à tout moment. Les betteraves sont empilées dans des bacs à cet effet. Le stockage à grande échelle, consiste simplement de tas sur le sol, sans murs de soutènement ni toit. [4]

#### **-Facteurs affectant les pertes de teneur en sucre:**

##### **1-Atmosphère environnante:**

Comme les betteraves peuvent générer de la chaleur dans un tas, une ventilation naturelle est essentielle. Toutes les précautions doivent être prises pour éviter que les déchets ne pénètrent dans le tas de betteraves. Les déchets empêchent le libre passage de l'air dans le tas. De plus, les déchets se décomposent et génèrent une chaleur supplémentaire. Un tas de betteraves propres se ventile car l'air chaud au centre s'élève et l'air plus froid est évacué de l'extérieur. La température de l'air ambiant est peut-être le facteur le plus important pour déterminer la rétention du sucre dans un tas, à condition qu'il contienne des betteraves propres et bien étêtées. Le tableau ci-dessous montre des données typiques sur les pertes de sucre des betteraves en tas stockées à diverses températures moyennes de l'air extérieur. [2]

<b>JOURS ÉCOULÉS EN TEST</b>	<b>TEMPÉRATURE D'AIR MOYENNE EN °F</b>	<b>GRAMME DE SUCRE PERDUES PAR TONNE DE BETTERAVES PAR JOUR</b>
1-42	35	49,89516
1-42	45	72,57478
1-42	55	99,79032
1-42	65	172,3651
1-35	75	294,835
35-38	75	635,029
1-17	85	331,1224
18-24	85	866,3614
1- 3	95	340,1943
4- 7	95	607,8138
7-10	95	734,8196
11-14	95	1451,5

**Tableau 3: pertes de sucre des betteraves en tas stockées à diverses températures moyennes de l'air extérieur**

### Déchets:

Si les feuilles sont laissées sur les betteraves par un étêtage incorrect, la circulation naturelle de l'air dans le tas est réduite, et une nouvelle croissance peut démarrer au détriment du sucre stocké dans la betterave. Les fanes lâches, la boue et les mauvaises herbes réduisent également la circulation de l'air. Même si les nouvelles pousses ne démarrent pas, les feuilles sur les sommets vont pourrir et chauffer. [2]

## 2.2 DIFFUSION DE JUS:

Le processus de diffusion est défini comme le mouvement des composants diffusants (saccharose et substances non saccharifères) d'un côté plus concentré (à l'intérieur des cellules de la betterave) vers un côté moins concentré (à l'extérieur des cellules de la betterave) à travers le protoplasme cellulaire, qui agit comme une membrane semi-perméable. La différence de concentration entre les deux côtés de la membrane est la force motrice (cause) de la diffusion.

Au début de la diffusion, la vitesse à laquelle les molécules d'eau se déplacent à travers la paroi cellulaire du côté de l'eau vers le côté du jus est élevée car il y a beaucoup plus de molécules d'eau du côté de l'eau que du côté du jus. Le résultat du mouvement des molécules d'eau est une augmentation du volume du côté du jus (le jus à l'intérieur de la cellule est maintenant dilué), ce qui entraîne une augmentation de la pression, appelée pression osmotique. Dans le même temps, la chaleur dans le diffuseur dénature (déforme) le protoplasme, le rendant ainsi perméable, de sorte que les composants du jus se diffusent à travers la membrane en raison de l'augmentation de la pression. La tendance des molécules à se déplacer diminue à mesure que la différence de concentration entre les deux côtés de la paroi cellulaire diminue.

Finalement, on atteint un moment pendant lequel presque aucun mouvement de molécules ne se produit. À ce moment-là, le système atteint l'équilibre.

En raison de la diffusion, la quasi-totalité du sucre (environ 98 %) et des non sucres sont éliminés des betteraves coupées en tranches (cossettes) et s'accumulent dans l'eau qui a été ajoutée au diffuseur. La diffusion s'améliore sous l'influence des conditions physiques (par exemple, la température) et chimiques (par exemple, le pH).

Le produit du processus de diffusion est le jus de diffusion et la pulpe est son sous-produit. La pulpe (betteraves émincées) évacuée du diffuseur est ensuite pressée, séchée et stockée.

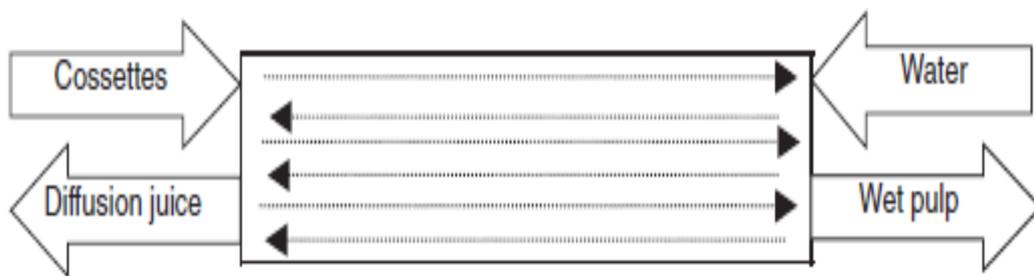
Le jus de diffusion, obtenu à partir de betteraves de qualité moyenne et d'opérations de diffusion correctes, contient généralement environ 15% de matière sèche et 0,5 à 1,5% de substances insolubles. Sa pureté (teneur en saccharose en % de la substance sèche) est de 85 à 88%. Le jus de diffusion a une faible pureté (teneur élevée en substances non sucrées) parce que, dans le processus de diffusion (contrairement au processus d'extraction), les composants ne sont pas choisis de manière sélective (aussi bien les substances sucrées que les substances non sucrées sont sujettes à la délocalisation). Si seul le saccharose pouvait être relocalisé, la pureté du jus de diffusion serait beaucoup plus élevée, ce qui aurait un effet important sur la technologie du sucre. En fait, certaines substances autres que le saccharose, comme le KCl et le NaCl, sont plus

facilement relocalisées que le saccharose en raison de leur masse moléculaire plus faible et de leur coefficient de diffusion plus élevé. [2]

-Procédé de diffusion:

Dans un diffuseur à contre-courant continu, un équipement rotatif déplace les cossettes en continu à partir d'une extrémité, tandis que l'eau circule dans la direction opposée. Les cossettes perdent progressivement leur saccharose (environ 98%) et se transforment en pulpe (cossette désucriée). L'eau gagne progressivement du saccharose et se transforme en jus de diffusion, qui contient généralement environ 15% de DS (substance sèche) avec une pureté (% de saccharose dans la substance sèche) de 85 à 88%. Le reste du saccharose (environ 2%) reste dans la pulpe.

Pendant la diffusion, le jus est pompé en continu par la tête (côté cossette) du diffuseur, et la pulpe humide est évacuée par le côté opposé, appelé extrémité arrière (côté pulpe). La pulpe est envoyée dans des presses à pulpe pour être pressée. L'eau de pressage de la pulpe provenant des presses à pulpe est chauffée et renvoyée au diffuseur comme partie de l'alimentation en eau du diffuseur.



**Figure 2: Schéma de diffusion simplifié**

-Loi de diffusion:

La diffusion du saccharose suit la loi générale de la diffusion, Dans le processus de diffusion, les molécules de saccharose et de non saccharose sont les composants qui diffusent, C'est pourquoi le produit du processus de diffusion (jus de diffusion) n'est pas une solution pure de saccharose (le jus de diffusion est pur à 85 à 88%). [2]

**La loi générale de diffusion** (selon silin 1985):

On a : La loi de conservation de matière :  $C_1 + C_4 = C_2 + C_3$

Et  $C_4 = 0$

Donc  $C_3 = C_1 - C_2$

On a d'après la loi de Fick de diffusion :

$$C_1 - C_2 = K_D \frac{A}{d} \times t$$

$$\text{Et } K_D = \frac{KT}{\eta}$$

Ce qui donne :

$$C_1 - C_2 = \frac{KT}{\eta} \times \frac{A}{d} \times t$$

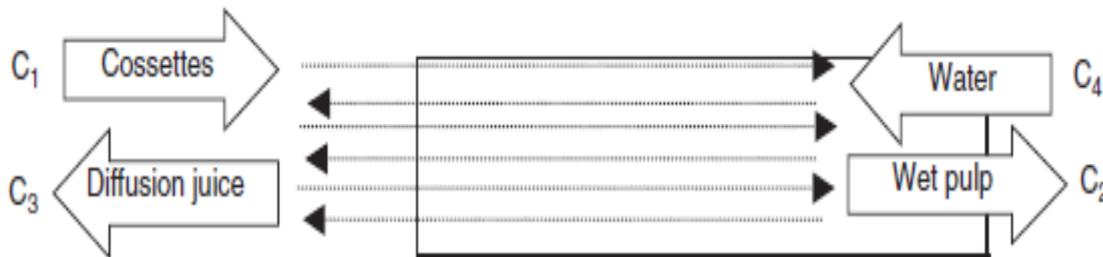
Avec:

- K : Constante, dépendant de la masse moléculaire de la substance dissoute (Plus la molécule est grande, plus K est petit et plus le taux de diffusion est faible.)

Avec  $K = 6.5 \cdot 10^{-5}$

- T : Température absolue ( $^{\circ}\text{C} + 273$ )
- $\eta$  : Viscosité du jus de diffusion
- A : Surface des cossettes
- d : épaisseur des cossettes
- t : Temps (temps de post-dénaturation)

- $C_1-C_2$  : la différence de concentration entre le saccharose dans les cossettes entrant dans le diffuseur (C1) et sortant avec la pulpe (C2) [10]



## 2.3 Purification du jus:

Le jus de diffusion contient des substances non sucrées en solution réelle et en solution colloïdale, ainsi que du sucre. Les colloïdes rendent très difficile de concentrer le jus de diffusion ou d'en cristalliser le sucre.

Il est donc habituel, à ce stade, de purifier le jus par chaulage. Dans certains cas, la pré défécation est pratiquée en ajoutant lentement de petites quantités de lait de chaux, avec un contrôle approprié du temps et de la température, Cela coagule irréversiblement une grande partie de la matière colloïdale, que la pré défécation soit utilisée ou non l'étape suivante consiste à chauler le jus, puis à le gazer avec du dioxyde de carbone pour précipiter la chaux sous forme de carbonate de calcium mélangé avec le carbonate de calcium précipité, la boue de matière coagulée et colloïdale est filtrable. Dans la carbonatation par lots, la chaux est d'abord déposée, puis éliminée par gazage. Dans la carbonatation continue, le chaulage et la carbonatation sont généralement simultanés. La chaux utilisée se présente soit sous la forme d'une solution et d'une suspension aqueuse de chaux connue sous le nom de lait de chaux soit sous forme d'une bouillie d'eau douce et de saccharates de calcium appelée lait de saccharate.

Le processus de carbonatation est divisé en 2 étapes. Dans le système Dorr, la première carbonatation a lieu dans deux réservoirs, le primaire et le secondaire. Le jus

de diffusion et le lait de chaux ou lait de saccharose sont introduits dans le réservoir primaire, d'où le mélange déborde dans la cuve secondaire, où il est traité au gaz carbonique.

Le contenu de la cuve secondaire est pompé en continu dans le fond de la cuve primaire depuis le fond de la cuve secondaire. Le pH du jus ou alcalinité du jus est maintenu au point désiré par un contrôle manuel ou automatique du gaz carbonique ou de la chaux. Le jus de première carbonatation déborde vers l'étape suivante du processus, l'épaississant, où s'effectue la séparation primaire des solides précipités du jus. Le liquide clair de l'épaississant est pompé à travers des réchauffeurs pour la deuxième carbonatation, qui est généralement effectuée aussi près du point d'ébullition que le permet l'appareil. La deuxième carbonatation a pour but d'éliminer les dernières traces de chaux dissoute. [5]

- **Calcul de la pureté du jus:**

$$P = \frac{S}{DS} \times 100$$

S: Quantité de saccharose

DS: Quantité de matière sèche

## 2.4 L'ÉVAPORATION:

Le jus mince est parfois filtré pour éliminer toute matière insoluble résultant de l'addition de dioxyde de soufre ou de l'ébullition, dont la quantité est généralement très faible. Le jus est ensuite pompé à travers des réchauffeurs et envoyé dans les évaporateurs. Les évaporateurs à effets multiples sont invariablement utilisés, avec quatre ou cinq effets. L'évaporateur à effets multiples est essentiellement un ensemble d'évaporateurs simples dans lesquels la vapeur utilisée pour fournir la chaleur au premier effet est tirée des chaudières ou de l'échappement du moteur principal, mais pour les effets suivants la vapeur utilisée est celle formée dans l'effet précédent par l'évaporation de l'eau du jus mince. Un tel système permet d'utiliser plusieurs fois la même énergie thermique, et nécessite de diminuer les pressions et les températures

dans les effets successifs. Dans les évaporateurs, le pourcentage de solides dans le jus passe de 10-15% à 50-65%. Le jus concentré qui sort des évaporateurs est appelé jus épais.[2]

## 2.5. CRISTALLISATION:

La cristallisation est une opération de clivage et de purification qui vise à extraire, avec le plus de rendement possible, le sucre dissous dans le sirop sous forme de cristaux. Les substances autres que les sucres sont concentrées dans une solution de mélasse concentrée. La cristallisation a lieu dans des appareils de cuisson appelés cuites fonctionnant sous vide pour éviter la recristallisation du sucre, où le sirop circule dans les tubes et la vapeur circule dans les espaces entre les tubes.

Le processus de cristallisation dans l'usine se fait généralement en trois passes appelées jets. En général, nous nous limitons à un rendement en cristaux de 55% de masse cuite dans le premier jet et effectuons une cristallisation fractionnée dans les trois jets. Cette opération commence d'abord par alimenter le jet par la liqueur standard. La liqueur va d'abord subir une cuisson qui va induire la formation de cristaux. Pour activer la cristallisation, de très petites particules de sucre sont introduites, c'est l'ensemencement. Il est à noter qu'immédiatement après la présence de cristaux en suspension dans le sirop, cette masse est cuite et le sirop est nommé eau mère. La surface des cristaux est ensuite lavée par pulvérisation d'eau, c'est le clairçage. Cette étape provoque une légère re-dégradation des sucres granulés et le sirop obtenu du processus de lavage est nettement plus pur que son précédent, d'où son nom "*égout riche*" qui sera ajouté au sirop qui alimentera le jet en question. Dès le premier jet, on obtient du sucre qui sera séché et refroidi puis transporté vers des stockages dans des silos géants et un égout pauvre qui subira une deuxième cuisson puis une troisième. La ligne du deuxième jet s'ajoute à la ligne du premier jet et peut être commercialisée directement. À cet égard le troisième jet, qui est un épuisement où l'on obtient un sucre roux recyclé et un jus mère, appelés mélasses, dans lesquels se concentrent les impuretés qui alimentent l'atelier de cristallisation. [2]

## 2.6. SÉCHAGE:

Le séchage est le processus qui consiste à éliminer un liquide (généralement de l'eau) d'une substance solide humide par l'utilisation de la chaleur (généralement de l'air chaud). La différence de concentration entre le milieu de chauffage et la substance solide à sécher est la force motrice du séchage, qui évapore l'eau contenue dans la substance. Dans cette étape le sucre cristallisé blanc est évacué du fond de la turbine et séché puis refroidi. Il est ensuite tamisé, classé et pesé, puis dirigé vers l'atelier d'ensilage ou vers de vastes silos (plusieurs milliers de tonnes) où il est conservé en vrac. [10]

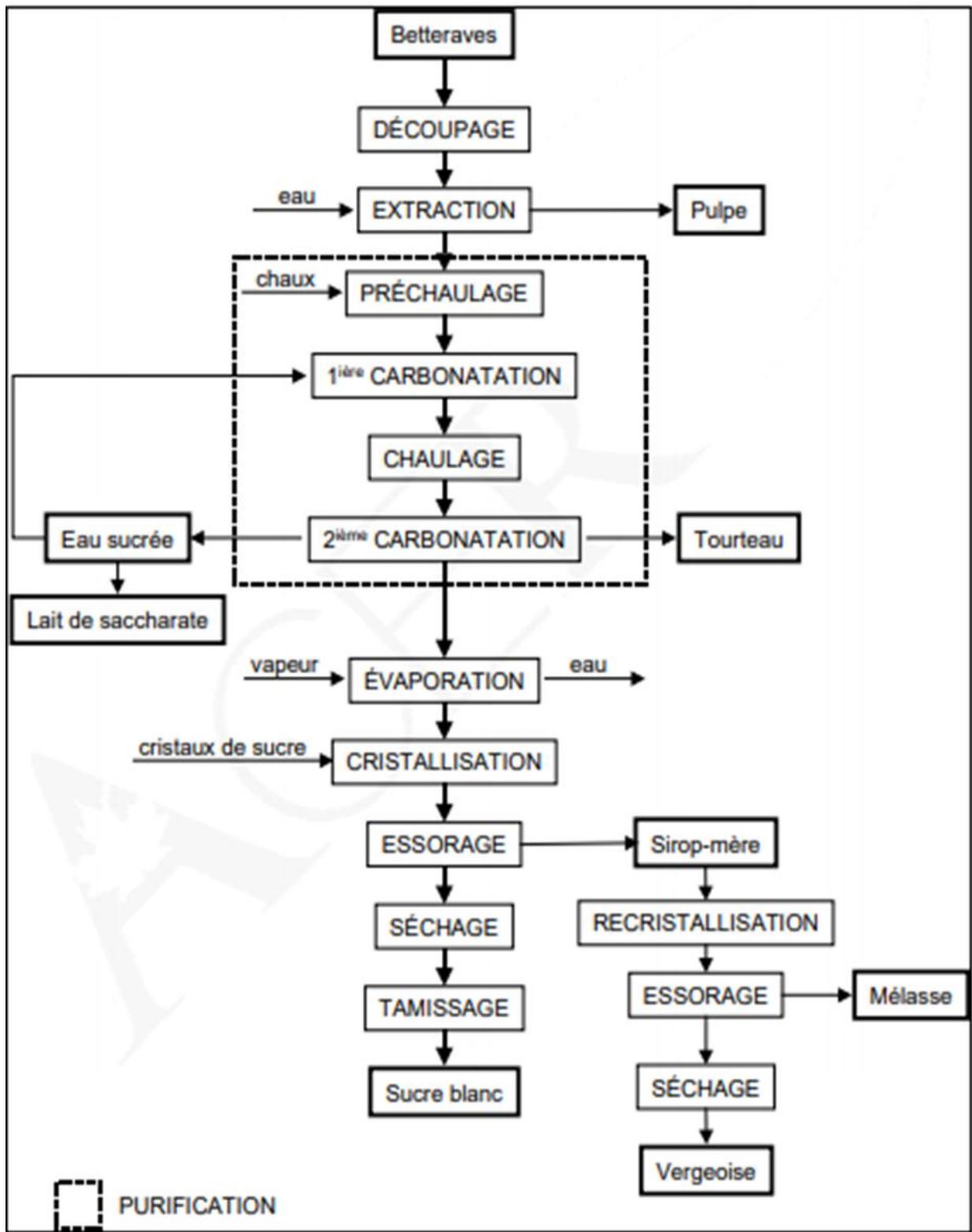


Figure 3: Schéma général de procédé de fabrication de sucre [7]

## **CHAPITRE 2 : LA DIFFUSION ET SON BILAN DE MATIERE**

## 1.DÉFINITION D'UN BILAN DE MATIÈRE :

Pour un procédé et pour une quantité de produit à fabriquer, le bilan de matière est la connaissance des débits à l'entrée et à la sortie de chaque OPU.

- Bilan sur chaque OPU ou bilan total sur tout le procédé.
- Bilan partiel sur un constituant ou bilan global sur tous les constituants. [9]

## 2.BUT D'ÉTABLISSEMENT DE BILAN DE MATIÈRE :

Dans cette partie on va établir un bilan de matière de la diffusion pour connaître toutes les diverses quantités de produits qui composent l'entrée et la sortie du diffuseur. [9]

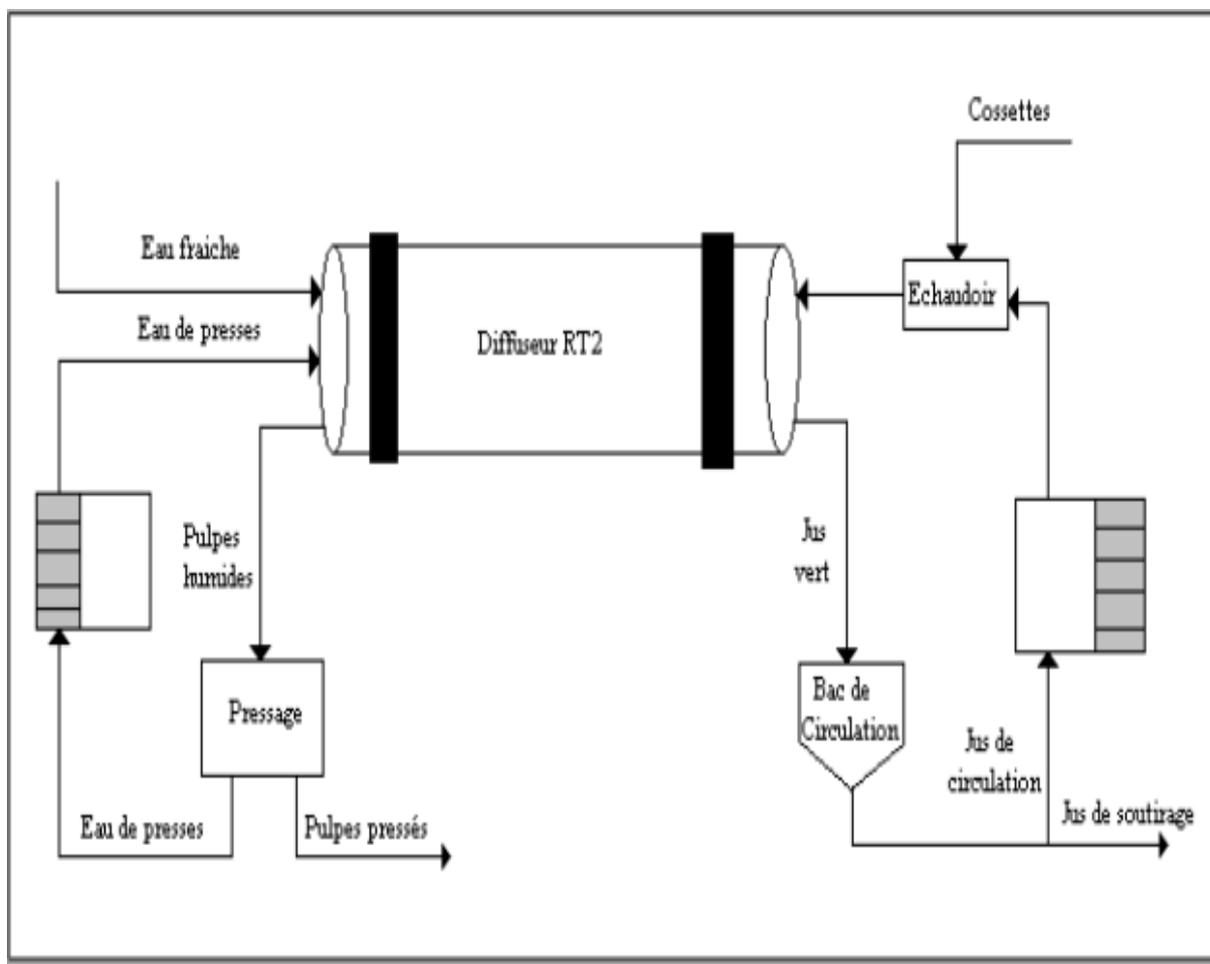


Figure 4:schéma général de procédé de diffusion

### **3.BILAN DE MATIÈRE DE DIFFUSION :**

L'équation de base impliquée dans l'établissement d'un bilan matière est celle qui représente la conservation. Elle s'énonce ainsi :

$$\text{ENTREE} = \text{SORTIE}$$

Donc dans notre cas on peut l'écrire comme suit :

$$Q_{\text{cosse}} + Q_{\text{eau}} = Q_{\text{jus}} + Q_{\text{pulp}}$$

#### **1-Cacul de $Q_{\text{ph}}$ (Quantité de pulpe humide) :**

Le principe de conservation de Marc nous donne l'équation suivante :

$$Q_{\text{coss}} \times M_{\text{coss}} / 100 = Q_{\text{ph}} \times M_{\text{ph}} / 100$$

**D'où:**

$$Q_{\text{ph}} = (Q_{\text{coss}} \times M_{\text{coss}}) / M_{\text{ph}}$$

**Avec:**

$Q_{\text{coss}}$  : Tonnage cossettes.

$M_{\text{coss}}$  : Marc de la betterave.

$M_{\text{ph}}$  : Marc de la pulpe humide

**Détermination de marc:** Le marc est la matière sèche insoluble dans l'eau à 50 °C et dans l'éthanol. Cette détermination permet de calculer les quantités de pulpes pressées obtenues pour 100 kg de betterave. Le protocole d'analyse est le suivant. Une masse M comprise entre 10 et 20 g de râpure de betterave est prélevée. Après broyage dans de l'eau distillée, on filtre sur un verre fritté avec 100 ml d'eau à 50 °C quatre fois en remettant en suspension à chaque fois.

Ensuite l'échantillon est rincé avec 100 ml d'éthanol (à 50 %). On laisse égoutter sous vide puis on sèche à l'étuve à 105 °C jusqu'à obtenir une masse constante M'. Enfin le marc est calculé selon l'équation :

$$\text{Marc (\%)} = (M'/M) \times 100$$

## **2-Calcul de $Q_{pp}$ (Quantité de pulpe pressée) :**

Le principe de conservation de Marc nous donne l'équation suivante :

$$Q_{\text{coss}} \times M_{\text{coss}} = Q_{\text{pp}} \times M_{\text{pp}}$$

$$Q_{\text{pp}} = (Q_{\text{coss}} \times M_{\text{coss}}) / M_{\text{pp}}$$

**Avec:**

$M_{\text{pp}}$ : Marc de pulpe pressée

## **3-Calcul de $Q_{ep}$ (Quantité d'eau de presse) :**

La quantité d'eau de presse est la différence de quantité entre la pulpe humide et la pulpe pressée :

$$Q_{ep} = Q_{ph} - Q_{pp}$$

## **4-Calcul de $Q_{js}$ (Quantité de jus soutiré) :**

Le principe de conservation de sucre nous donne :

$$Q_{\text{coss}} \times TS_{\text{coss}} = Q_{\text{js}} \times TS_{\text{js}} + Q_{\text{ph}} \times TS_{\text{ph}}$$

$$Q_{js} = (Q_{coss} \times TS_{coss} - Q_{ph} \times TS_{ph}) / TS_{js}$$

**Avec :**

$TS_{coss}$  : Teneur en sucre de cossettes

$TS_{js}$  : Teneur en sucre de jus soutiré

$Q_{js}$  : Quantité de jus soutiré

$TS_{ph}$  : Teneur en sucre de pulpe humide

### **5-Calcul de $Q_{ef}$ (Quantité d'eau fraiche) :**

**Quantité entrée de diffuseur = Quantité sortie de diffuseur**

$$Q_{coss} + Q_{eau} = Q_{js} + Q_{pulp}$$

$$Q_{eau} = Q_{js} + Q_{pulp} - Q_{coss}$$

### **4.BILAN SUCRE :**

Si le bilan sucre n'est pas réalisé, il faut connaître les quantités mises en jeu ainsi que les pourcentages en sucre correspondant. L'équation de base pour établir ce bilan est celle utilisée pour le bilan matière :

**ENTREE = SORTIE**

Donc :

**Sucre dans cossettes fraîches = Sucre dans le jus soutiré + Sucre dans les PP**

$$S_{cossf} = S_{js} + S_p$$

Pour donner une signification aux résultats obtenus on va considérer un tonnage de 100 Kg de cossettes avec les données ci-dessous :

**Données :**

- Masse des cossettes fraîches  $M_{\text{cosf}} = 100 \text{ kg}$
- Sucre des cossettes fraîches  $S_{\text{cosf}} = 17 \%$  (17 pour 100 kg des cossettes fraîches)
- Sucre dans le jus soutiré  $S_{\text{js}} = 14,55 \%$  (14,55 pour 100 L de jus soutiré)
- Densité de jus soutiré  $D_{\text{js}} = 1,06$ .
- Sucre dans les pulpes pressées  $S_{\text{pp}} = 0,44 \%$ .
- La quantité des pulpes épuisées  $M_{\text{cosep}} : 29,4 \text{ kg}$

Pour pouvoir calculer la quantité de sucre final, on doit calculer tout d'abord la quantité en masse ou en volume de jus soutiré pour qu'on puisse déterminer le  $S_{\text{tjs}}$  connaissant le pourcentage

$S_{\text{tjs}}$  : Sucre total dans le jus soutiré

Dans l'équation de conservation :

$$\text{Entrée} = \text{Sortie}$$

$$S_{\text{cosf}} = S_{\text{tjs}} + S_{\text{tpp}}$$

$S_{\text{tpp}}$  : (Sucre total dans les pulpes presses)

Alors on :

$$S_{\text{tjs}} = S_{\text{cosf}} - S_{\text{tpp}}$$

Et on a :  $S_{\text{tpp}} = M_{\text{cosep}} * 0,44 / 100 = 0,13 \text{ Kg}$

Donc  $S_{\text{tpp}} = 0,13 \text{ Kg}$

D'où :  $S_{\text{tjs}} = S_{\text{cosf}} - S_{\text{tpp}} = 17 - 0,13 = 16,87 \text{ Kg}$

$$S_{\text{tjs}} = 16,87 \text{ Kg}$$

On a : 16,87 correspondent à x litres de jus.

14,55 correspondent à 100 litres de jus.

D'où :  $X = 16,87 * 100 / 14,55 = 116$  litres de jus

x c'est ce qu'on appelle le soutirage :  $x = 116$  L

Et comme on a la densité du jus soutiré, on va calculer le soutirage poids :

$$d = 1.06$$

Alors:  $x = 116 * 1.06 = 123$  Kg.

On a:  $M_{\text{coss}} \times S_{\text{coss}} = M_{\text{tjs}} \times S_{\text{tjs}} + M_{\text{cosp}} \times S_{\text{pp}}$

Donc : **La quantité total de sucre  $Q_{\text{ts}}$  :**

$$\begin{aligned} Q_{\text{ts}} &= M_{\text{tjs}} \times S_{\text{tjs}} + M_{\text{cosp}} \times S_{\text{pp}} \\ &= 123 \times 16.87\% + 29.4 \times 0.44\% \\ &= 20.87 \text{ kg} \end{aligned}$$

## **CONCLUSION :**

De la réception au produit fini, plusieurs points importants sont donc nécessaires de savoir-faire et de compétence pour obtention d'un produit de qualité. L'industrie du sucre au Maroc particulièrement et au monde généralement ne cessent de se développer et de s'améliorer, les efforts fournis par les chercheurs et les chimistes donnent un résultat au niveau de la qualité de sucre et même de la quantité produite.

Une étude bibliographique a été réalisée sur l'industrie sucrière, dans laquelle on a donné une étude complète de méthode de séparation pour le sucre de la betterave sucrière plus précisément l'étape de diffusion de jus de betteraves qui est la plus critique dans tout le procédé.

## RÉFÉRENCES :

### Bibliographie :

- [1] Perrier-Robert, A. (1999). *Le grand livre du sucre (French Edition)*. Solar
- [2] Asadi, M. (2006). *Beet-Sugar Handbook* (1<sup>re</sup> éd.). Wiley-Interscience.
- [3] Biancardi, E., Biaggi, M. D., & Campbell, L. G. (2005). *Genetics and Breeding of Sugar Beet*. CRC Press.
- [4] *Sugar Beet (World Agriculture Series) (2006–01-09)*. (2021). Wiley-Blackwell.
- [5] Brançon, D., & Viel, C. (1999). Le sucre de betterave et l'essor de son industrie : Des premiers travaux jusqu'à la fin de la guerre de 1914–1918. *Revue d'histoire de la pharmacie*, 87(322)

### Webographie:

- [6] [www.inra.org.ma/fr/revue-al-awamia-s](http://www.inra.org.ma/fr/revue-al-awamia-s) (centre national de la recherche agronomique)
- [7] [gestion.centreacer.qc.ac](http://gestion.centreacer.qc.ac), Centre de recherche de développement et de transfert technologique en acériculture
- [8] <https://www.cmgp.com/cultures/grandes-cultures/betterave-sucriere>
- [9] [univ.ency-education.com](http://univ.ency-education.com)
- [10] [www.genie-alimentaire.com](http://www.genie-alimentaire.com)

