



Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Mine et Géologie

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines
Option : Valorisation des ressources minérales

Présenté par

M. MOKRANI OUSAMA

M^{elle}. BAHRI IMENE

Thème

**Formulation et élaboration d'un lait de chaux dans les industries
sucrière, cas du complexe agro-alimentaire, Cevital.**

Soutenu le 20/06/2023 devant le jury composé de :

Président:	M ^r . MOUSSACEB .K	PR	U.A.M.B
Promoteur:	M ^r . AKDIM .A	M.A.A	U.A.M.B
Examinatrice :	M ^{me} . TAHRI.T	M.C.B	U.A.M.B

Promotion : 2022/2023

Remerciements

Tout D'abord On Remercie ALLAH Le Tout Puissant Qui Nous A Eclairé Le Chemin Et Nous A Donné Le Courage, La Volonté, La Santé Et La Patience Pour Réaliser Et Mener A Terme Ce Modeste Travail.

*Nous Tenons A Exprimer Nos Vifs Remerciements A Notre Promoteur **Mr AKDIM Abdelghani**, De Nous Avoir Aidé Et Orienté, Pour Ses Conseils Et Ses Encouragements Permanents, Et D'avoir Accepté D'être Notre Promoteur.*

*Nous Adressons Nos Sincères Remerciements Aux Membres Du Jury, Et Nous Remercions Vivement : **Mr MOUSSACEB karim** De Nous Avoir Fait L'honneur De Présider Le Jury De Ce Mémoire.*

*Nous Remercions Également Notre Examinatrice : **Mme TAHRI Tourkia** Pour Nous Avoir Fait L'honneur D'accepter D'examiner Ce Modeste Travail.*

Enfin, Nous Tenons A Remercier Sincèrement Toutes Les Personnes Ayant Contribué De Près Ou De Loin A La Réalisation De Ce Travail.

OUSAMA & IMENE

Dédicaces

Avant Tout, Je Dois Rendre Grâce A Dieu De M'avoir Donné Le Courage De Terminer Ce Travail

Je Dédie Ce Modeste Travail

À Celle Qui M'a Donné La Vie, Le Symbole De Tendresse, Qui S'est Sacrifiée Pour Mon Bonheur Et Ma Réussite, Ma Mère

À L'école De Mon Enfance, Qui A Été Mon Ombre Durant Toutes Les Années De Mes Etudes, Et Qui A Veillé Tout Au Long De Ma Vie A M'encourager, A Me Donner De L'aide Et A Me Protéger, Mon Père Aucune Dédicace, Ne Saurait Exprimer A Sa Juste Valeur Le Profond Amour Que Je Vous Porte, Je Vous Dois Ce Que Je Suis Aujourd'hui Et Ce Que Je Serai Demain Et Je Ferai Toujours De Mon Mieux Pour Rester Votre Fierté Et Ne Jamais Vous Décevoir, Puisse Dieu, Vous Procure Santé, Bonheur Et Longue Vie

À Mes Chers Frères Et Sœurs

À Tous Mes Amis

Ousama☺

Dédicaces

*Et Merci Encore, A Ceux Qui M'ont Tout Donné Sans Rien Je Remercie
Le Bon Dieu Pour Le Courage Qu'il M'a Offert Durent Mes Etudes
Je Dédie Ce Modest Travail :*

*A Mes Très Chers Parents, Honorables, Aimables Qui Ont Œuvrées Pour
Ma Réussite, De Par Leur Amour, Leurs Soutiens, Tous Les Sacrifices
Consentis Et Leur Précieux Conseils, Pour Toute Leur Assistance Et Leur
Présence Dans Ma Vie, Reçoivent A Travers Ce Travail Aussi Modeste
Soit-Il, L'expression De Mes Sentiments Et De Mon Eternelle Gratitude.*

*Mes Frères, Qui N'ont Cessé D'être Pour Moi Des Exemples De
Persévérance, De Courage Et De Générosité Tout Au Long De Toutes Mes
Années D'étude.*

*En Fin, Je Tiens A Remercier Infiniment Mes Amis : Que Sans Vous, Il Est
Clair Que Ce Mémoire N'aurait Pas Eté Pareil. Merci Pour Le Soutien
Moral Et Physique Qu'ils M'ont Offert, Pour Avoir Partagé En Même
Temps Les Mêmes Galères. Petite Mention Pour Vous Deux, L'absence De
Nos Débats Autour Des Analyses Labo Et De L'eau Distillé « Qui Ne
Servent A Rien Mais Qui Sont Cool », Va Créer Un Vide...*

*A Mon Binôme Et Sa Famille.
En Retour....*

Imene

Liste Des Figures	I
Liste Des Tableaux.....	II
Liste Des Abréviations	III
Glossaire	IV
Introduction générale	1
Partie Théorique	
CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique	
Introduction	3
I.1. Carbonates de calcium.....	3
I.1.1 définition	3
I.1.2 origine Et géologie des carbonates de calcium	4
I.2 Propriétés physiques et chimiques des carbonates de calcium	5
I.2.1 propriétés Physiques.....	5
I.2.2 propriétés Chimiques	7
I.3 Principales utilisation des calcaires	8
I.3.1 utilisation du calcaire dans le domaine industriel	9
I.3.2 utilisation du calcaire dans le domaine alimentaire	11
I.3.2.1 épuration du Jus De Canne.....	11
I.3.2.2 réglages du pH.....	11
I.3.2.3 traitements des sous-produits et des effluents	12
I.4 Avantages De L'utilisation Du Calcaire	12
I.5 Exploitation des calcaires : richesse mondiale et locale	13
I.5.1 exploitation du calcaire dans le monde	13
I.5.2 exploitation du calcaire En Algérie	14
I.6 Exploitation du calcaire et développement durable	15

I.7 Application de la chaux dans l'agro-alimentaire	17
I.7.1 définitions de d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$	17
I.7.2 propriétés physico-chimiques du lait de chaux	18
I.7.3 Caractéristiques du lait de chaux	19
I.8 Processus d'extinction de la chaux vive	19
I.9 Technologie de raffinage du sucre roux	20
I.9.1 étapes du processus de raffinage du sucre roux	21
I.9.2 principes de la carbonatation dans l'industrie sucrière	24
Conclusion	25

Partie Pratique

CHAPITRE II : Matériels et méthodes : calcination, formulation et tests

Introduction	26
II.1 Elaborations du calcaire calciné.....	26
II.1.1 évaluation de la calcination sous variation granulométrique	26
II.1.2 évaluation de la calcination sous variation thermique	29
II.2. Préparation et formulation d'un lait de chaux.....	31
II.2.1 impact de la granulométrie de la chaux vive sur la calcination	31
II.2.2 impact de la distribution granulométrique sur la réactivité de la chaux éteinte .	34
II.2.3 impacts de la quantité d'eau ajoutée sur la réactivité du lait de chaux.....	36
II.2.4 mesures de la densité du pH du lait de chaux	38
II.3 Chaulage du sirop de sucre et test de qualité	39
II.3.1 mesures de pH du jus chaulé	39
II.3.2 mesures de l'alcalinité du jus chaulé	39
Conclusion	41

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction	43
III.1 Analyses chimiques et colorimétrique.....	43
III.1.1 résultats de l'analyse par fluorescence X (FX)	43
III.1.2 résultats de l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)	44
III.1.3 regrée de blancheur du tout-venant	44
III.1.4 commentaire et interprétations des résultats chimiques et colorimétrique	44
III.2. Discussions des résultats de la calcination du calcaire.....	45
III. 2. 1 impact de la granulométrie sur la qualité de calcination	45
III. 2. 2 impact de la température sur la qualité de calcination	46
III.3. Discussions des résultats de préparation et formulation d'un lait de chaux	49
III. 3.1 impact de la Granulométrie de la chaux vive sur la réactivité du lait de chaux	49
III.3.2 finesse de la chaux éteinte	50
III.3.3 quantité d'eau d'hydratation et son impact sur la réactivité	51
III.4. Résultat de pH et de la densité du lait de chaux	53
III.5 Résultat de pH et d'alcalinité du jus chaulé	55
Conclusion	57
Conclusion générale	59
Références Bibliographiques	V
Annexes	VI
Résumé	VII

Partie Théorique

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

Figure 1 : Roche du calcaire naturelle.	4
Figure 2 : Roche du calcaire sédimentaire.	5
Figure 3 : Agrégats du calcaire.	9
Figure 4 : Chaux vive.	11
Figure 5 : Lait de chaux.	18
Figure 6 : Vitesse d'extinction de la chaux vive en fonction de la température de cuisson....	20
Figure 7 : Procédé de raffinage de sucre roux.....	23

Partie Pratique

CHAPITRE II : Matériels et méthodes : calcination, formulation et tests

Figure 8 : la classe de 0 mm à 40 mm avant et après calcination.	28
Figure 9 : la classe de 40 mm à 70 mm avant et après calcination.	29
Figure 10 : La classe supérieure à 70 mm avant et après calcination.	29
Figure 11 : A : Refus de la chaux vive, B : Un tamis d'ouverture 2mm, C : Echantillon de chaux vive de granulométrie >2mm.	34
Figure 12 : tamiseuse vibrante (laboratoire d'usine CEVITAL).	36
Figure 13 : Densimètre.	39
Figure 14 : pH-mètre.	39
Figure 15 : Mesure de l'alcalinité du jus chaulé.	41

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure 16 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm à 70 mm calcinés à 800°C. 47

Figure 17 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm à 70 mm calcine à 1000 °C. 48

Figure 18 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm a 70 mm calcinés à 1200°C. 48

Figure 19 : l'évolution de la réactivité en fonction de la granulométrie de la chaux éteinte. . 51

Figure 20 : L'évolution de la réactivité en fonction de la quantité d'eau ajoutée. 52

Figure 21 : Chaux vive hydratée avec un excès d'eau, Cevital. 53

Figure 22 : Evolution du pH et de la densité du lait de chaux. 54

Figure 23 : Evolution du pH et de l'alcalinité en g de CAO/L du jus chaulé. 56

Partie Théorique

CHAPITRE I : Synthèse Bibliographique

Tableau 1 : Quelques-uns des pays les plus importants en termes de réserves et de production de calcaire (en millions de tonnes/année) 14

Tableau 2 : Estimation de la production de calcaire par wilaya en Algérie (en millions de tonnes/année) 15

Partie pratique

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau 03 : Résultats des analyses chimiques du tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04). Par FX 43

Tableau 04 : Résultats des analyses chimiques du tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04). Par l'absorption atomique. 44

Tableau 05 : Résultats du degré de blancheur de tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04). 44

Tableau 06 : Résultats de l'essai de perte à feu à 1000°C pour les différentes tranches granulométriques de calcaire. 45

Tableau 07 : Résultats de l'essai de perte à feu à différentes températures de calcination. ... 46

Tableau 08 : Résultat du tamissage et identification des classes granulométriques..... 49

Tableau 09 : résultat de l'influence de la finesse sur la réactivité de la chaux éteinte. 50

Tableau 10 : *Le résultat des pH et des densité mesurés sur une période de 05 jours* 53

Tableau 11: Résultat de la moyenne du pH et de la densité du lait de chaux comparés aux normes suivis par le l'unité Cevital..... 54

Tableau 12 : Le résultat de pH et de l'alcalinité mesurés sur une période de 05 jours. 55

Tableau 13 : Résultat de la moyenne du pH et de l'alcalinité du jus chaulé. 55

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

HP : Hauts Produits.

mE : Masse de l'eau.

mS : Masse de sucre.

NS : Non Sucres.

Q' : Quantité d'Eau.

Q : Quantité de Sucre.

S: Sucre.

SF: Sirop Filtré.

°C : Degré Celsius.

Nm : Nanomètre.

pH: Potentiel Hydrogène.

MS : Matière Sèche.

COV : composés organiques volatils.

Glossaire

- **Adsorption** : Rétention à la surface d'un solide des molécules d'un gaz ou d'une substance
- **Boue** : Résidu provenant de la filtration du sirop de sucre épuré.
- **Canne** : Nom de diverses espèces de roseaux (plante aquatique à tige creuse).
- **Chaux** : Substance caustique solide, obtenue par calcination du calcaire et d'autres formes.
- **Degré Baumé** : est une unité de mesure indirecte de concentration, via la densité.
- **Écumes** : Résidu résultant du traitement de la boue au niveau du filtre presse.
- **ICUMSA**: «*International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis* ».
- **Mêlasse** : résidus de fabrication après le turbinage de la masse cuite.
- **Réaction endothermique** : C'est une réaction qui absorbe de la chaleur (l'opposé du processus exothermique).
- **Lait de chaux** : Addition d'une chaux de bonne qualité à une eau légèrement sucrée.
- **Petit jus** : Eau sucrée récupérée lors de la filtration des boues.
- **Roux** : qui est d'un rouge tirant sur le jaune.
- **Vesou** : Appellation du jus de canne.

Introduction

Depuis des siècles, l'homme a exploré différentes méthodes et substances pour améliorer les processus de purification et de réglage du pH dans diverses industries. Parmi ces substances, le lait de chaux qui a été utilisé avec succès dans l'industrie sucrière pour ses propriétés uniques et ses avantages significatifs.

Le lait de chaux joue un rôle crucial dans les industries sucrières en tant qu'agent d'épuration et de réglage du pH lors du processus de raffinage du sucre. Il est donc essentiel de formuler et d'élaborer un lait de chaux efficace afin de garantir des résultats optimaux dans la production de sucre. Cette étude se focalise sur la formulation et l'élaboration d'un lait de chaux à partir du calcaire, en s'appuyant sur une synthèse bibliographique approfondie ainsi que sur des expérimentations pratiques.

La première partie de cette étude présente une synthèse bibliographique sur le carbonate de calcium, en mettant en évidence les propriétés physiques et chimiques du calcaire ainsi que ses différentes utilisations, avec une attention particulière portée à son utilisation dans l'industrie sucrière. Elle propose également une analyse des avantages de l'utilisation du calcaire dans ces industries, tout en explorant des solutions innovantes visant à atténuer les impacts environnementaux liés à sa production.

Dans un deuxième temps nous nous penchons sur l'extraction, la préparation du calcaire et les applications du lait de chaux. Nous mettons en évidence les méthodes d'extraction, le processus de préparation et de calcination du calcaire, ainsi que les différentes formes de chaux obtenues. Cette partie examine également les propriétés physico-chimiques et les caractéristiques d'un lait de chaux, en mettant en évidence le processus d'épuration calco-carbonique utilisé dans le raffinage du sucre.

La partie pratique de cette étude présente le matériel et les méthodes utilisés, en se concentrant sur l'unité de production de chaux d'El Khroub et le complexe agro-alimentaire de Béjaïa. Les résultats issus des expérimentations pratiques sont ensuite discutés, en mettant en évidence les paramètres tels que le diamètre des pierres calcaires, la température de calcination, la quantité d'eau d'hydratation, la granulométrie de la chaux vive, ainsi que la finesse de la chaux éteinte. De plus, les résultats concernant l'évolution du pH, de l'alcalinité et de la densité du lait de chaux tout au long du processus de raffinage du sucre sont également présentes et discutés.

Cette étude vise à formuler et à élaborer un lait de chaux efficace pour les industries sucrières. Les connaissances théoriques acquises grâce à la synthèse bibliographique ainsi que les résultats pratiques obtenus permettent une meilleure compréhension des paramètres influençant la qualité du lait de chaux. Ces informations peuvent être utilisées pour améliorer les processus de production du sucre et réduire l'impact environnemental de l'industrie sucrière.

Les résultats et les recommandations formulés dans cette étude seront d'une grande valeur pour les industries sucrières, en leur permettant d'optimiser leurs procédés de production, d'augmenter les rendements et d'assurer une qualité supérieure du produit final. De plus, en adoptant des pratiques respectueuses de l'environnement, les industries sucrières contribueront à la durabilité et à la préservation des écosystèmes naturels.

Enfin, cette étude apporte une contribution significative à la recherche scientifique et technique dans le domaine de l'industrie sucrière, en fournissant des informations précises et pertinentes pour les chercheurs, les professionnels de l'industrie et les parties prenantes intéressées par la production de sucre et ses implications environnementales.

Partie théorique

CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

INTRODUCTION

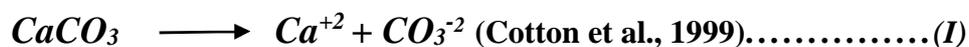
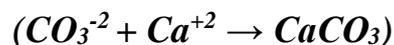
Le calcaire est utilisé depuis des siècles dans de nombreux domaines, allant de la construction à l'industrie chimique. Sa composition chimique riche de carbonate de calcium (CaCO_3) en calcium (Ca^{2+}) et en carbonate (CO_3^{2-}), ce qui en fait une roche d'intérêt géologique et paléontologique (**Dickson, 1966**).

La pierre à chaux est une roche sédimentaire qui occupe une place prépondérante dans notre environnement. Il se forme principalement à partir de restes d'organismes marins tels que les coquillages et les coraux, qui s'accumulent au fond des océans pendant des milliers d'années (**Folk, 1999**).

I.1 CARBONATES DE CALCIUM

I.1.1 Définition

Le calcaire est une roche sédimentaire composée principalement de carbonates de calcium (CaCO_3) avec des quantités variables de magnésium, de silice, d'argiles et d'autres matériaux (figure 1), (**Folk, 1980**). Il se forme à partir de sédiments marins riches en carbonate de calcium, tels que les coquilles et les squelettes d'organismes marins (**Lee Jr and Wallerstein, 2015**). Le calcaire est souvent associé à des fossiles et des coquilles, ce qui en fait une roche d'intérêt géologique et paléontologique (figure 1) (**Ge et al., 2020**), les carbonates de calcium sont des minéraux caractérisés par cation Ca^{+2} et anion CO_3^{-2} dont la formule générale est donnée comme suit :



Ces carbonates sont nombreux mais seuls certaines d'entre eux sont importantes. Les carbonates de calcium utilisés pour leur teneur en calcaire atteignant en général une pureté de 95% en CaCO_3 , pour le reste elles sont retenus pour être utilisés sous forme de charge dans diverses formulations (**Riding, 2012**).



Figure 1 : Roche du calcaire naturelle.

I.1.2 ORIGINE ET GEOLOGIE DES CARBONATES DE CALCIUM

Les carbonates de calcium est un composé minéral qui se trouve naturellement dans de nombreuses roches, sols et organismes marins (**Folk, 1980**).

Ils sont formés d'ions de carbonate (CO_3^{2-}) et d'ions de calcium Ca^{2+} qui se combinent en présence de conditions géologiques favorables (température, pression, pH et humidité) (**Lee Jr and Wallerstein, 2015**).

Les processus de formation de carbonate de calcium commencent par la dissolution d'oxydes de carbone CO_2 dans l'eau. Lorsque le CO_2 se dissout dans l'eau, il réagit avec les ions hydrogène H^+ présents pour former des ions bicarbonates HCO_3^- . Cette réaction se traduit par la formule suivante :



Ensuite, le calcium se combine avec les ions bicarbonates pour former les cristaux de carbonate de calcium CaCO_3 qui se précipitent dans l'eau. Cette précipitation peut se produire à partir de l'eau douce, des eaux souterraines ou même de l'eau de mer (**Zeller and Wray, 1956**).

Le processus de formation de carbonates de calcium est également influencé par les facteurs géologiques tels que la température, l'acidité, et la présence d'autres minéraux. Les conditions géologiques favorables à la formation de calcaire incluent des températures plus élevées, des niveaux de pH alcalins et la présence d'autres minéraux tels que les silicates, le sulfate et le magnésium.

Les carbonates de calcium sont également des ingrédients importants dans la formation de nombreuses roches sédimentaires telles que la craie, le calcaire et la dolomie. Au fil du temps, ces roches sédimentaires (figure2) peuvent subir différents changements géologiques tel que la pression et la température, conduisant à leur transformation en roches métamorphiques (Holness et al., 2018).



Figure 2 : Roche du calcaire sédimentaire.

I.2 PROPRIETES PHYSIQUES ET CHIMIQUE DES CARBONATES DE CALCIUM

I.2.1 Propriétés Physiques

Le calcaire est une substance très utilisée dans les domaines de l'industrie, le bâtiment, les travaux publics et l'agriculture et ce en raison de ses diverses propriétés notamment physiques, dont on cite :

- *Couleur*

Le calcaire est généralement de couleur blanche à crème, mais il peut également être gris, jaune ou brun en fonction des impuretés présentes (Wang and Tokunaga, 2015).

- *Réflexion de la lumière*

En raison de sa couleur claire et de sa texture souvent polie, le calcaire a une bonne capacité de réflexion de la lumière. Cela lui confère une apparence lumineuse et brillante (aspect vitreux) lorsqu'il est utilisé comme revêtement ou élément décoratif (**Wang and Tokunaga, 2015**).

- *Texture*

Le calcaire a une texture granulaire à compacte. Il peut être finement cristallin ou présenter de plus gros cristaux visibles à l'œil nu (**Cnudde and Boone, 2013a**).

- *Clivage*

Le calcaire présente un clivage bien développé, ce qui signifie qu'il se divise facilement en couches ou en plaques régulières lorsqu'il est cassé. Ce clivage peut être utilisé pour extraire des dalles de calcaire pour des applications de construction et de revêtement (**Wang and Tokunaga, 2015**).

- *Poids spécifique*

Le calcaire a une densité moyenne de 2,7 à 2,8 g/cm³, ce qui signifie qu'il est relativement léger par rapport à d'autres types de roches (**Wang and Tokunaga, 2015**).

- *dureté :*

Le calcaire a une dureté de 3 sur l'échelle de Mohs, ce qui traduit qu'il est relativement tendre. Cela signifie qu'il est facilement rayable par des objets plus durs (**Cnudde and Boone, 2013a**).

- *Résistance à l'usure*

Le calcaire est un matériau relativement tendre, ce qui signifie qu'il peut s'user ou se détériorer plus rapidement que des roches plus dures. Cependant, certains types de calcaire peuvent être très durables et résistants à l'usure, en fonction de leur composition et de leur texture (**Wang and Tokunaga, 2015**).

- ***Résistance à la compression***

Le calcaire a une résistance à la compression modérée à élevée, ce qui signifie qu'il peut supporter des charges importantes avant de se déformer ou de se casser. Cette propriété en fait un matériau approprié pour la construction de structures solides, telles que les murs et les colonnes (**Cnudde and Boone, 2013a**).

- ***Porosité***

Le calcaire peut avoir une porosité variable, allant de très faible à très élevée. La porosité du calcaire dépend de facteurs tels que la présence de fractures, la taille et la forme des cristaux, ainsi que la présence d'espaces vides entre les grains (**Cnudde and Boone, 2013b**).

- ***Perméabilité***

La perméabilité du calcaire varie en fonction de sa porosité. Les calcaires poreux peuvent permettre à l'eau de circuler à travers leurs espaces poreux, tandis que les calcaires moins poreux ont une perméabilité plus faible (**Cnudde and Boone, 2013a**).

- ***Absorption d'eau***

En raison de sa porosité, le calcaire a généralement une capacité d'absorption d'eau relativement élevée. Cela signifie qu'il peut absorber et retenir une certaine quantité d'eau à sa surface ou à l'intérieur de ses pores (**Wang and Tokunaga, 2015**).

I.2.2 Propriétés Chimiques

Les propriétés chimiques du calcaire sont principalement influencées par sa composition principale, qui est le carbonate de calcium (CaCO_3). Voici quelques propriétés chimiques importantes du calcaire :

- ***Réaction acide***

Le calcaire réagit avec les acides forts pour former du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau. Cette réaction chimique est connue sous le nom de réaction d'acidité. Par conséquent, le calcaire peut être utilisé pour neutraliser les acides forts et réguler le pH dans différents contextes, tels que l'agriculture et l'industrie (**Alkattan et al., 1998**).



- *Sensibilité à l'érosion chimique*

Le calcaire est sensible à l'érosion chimique causée par des eaux légèrement acides. Lorsque le calcaire est exposé à de l'eau contenant du dioxyde de carbone dissous, le carbonate de calcium se dissout progressivement, formant des caractéristiques géologiques telles que des cavernes et des grottes calcaires (phénomène karstiques) (Ford and Williams, 2007).

- *Formation de dépôts calcaires*

Le calcaire peut précipiter hors de l'eau lorsqu'elle est saturée en carbonate de calcium. Cela se produit souvent dans les sources d'eau dure ou lorsqu'une eau calcaire s'évapore, laissant des dépôts calcaires, tels que les stalactites et les stalagmites, dans les grottes (Jones, 2017).

- *Réaction avec le dioxyde de carbone*

Le calcaire réagit avec le dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air pour former du carbonate de calcium, qui est la principale composante des dépôts de calcaire que l'on trouve dans les bâtiments et les monuments. Ce processus est connu sous le nom de carbonatation et peut entraîner une dégradation du calcaire au fil du temps (Lu et al., 2006).



I.3 LES PRINCIPALES UTILISATION DES CALCAIRES

L'utilisation du calcaire dans le domaine industriel et alimentaire est répandue et bénéfique à plusieurs égards. Dans l'industrie, le calcaire est utilisé comme matière première dans la fabrication de ciments (Thongsanitgarn et al., 2014), de chaux et de produits chimiques. Sa composition chimique stable et sa capacité à réagir avec d'autres substances en font un élément essentiel dans de nombreux processus de production. De plus, le calcaire est utilisé comme additif dans les plastiques, les peintures et les revêtements pour améliorer leurs propriétés et leur durabilité (figure 3).

Dans le domaine alimentaire, le calcaire est employé pour la production de divers produits. Il est utilisé dans la fabrication de suppléments alimentaires riches en calcium,

essentiels pour la santé des os et des dents. Le calcaire alimentaire est également ajouté aux céréales pour améliorer leur texture et leur stabilité, ainsi qu'aux eaux minérales pour augmenter leur teneur en minéraux. De plus, le calcaire est utilisé dans le processus de purification de l'eau potable, où il aide à éliminer les impuretés et à ajuster le pH (**Baud, 1933**).



Figure 3 : Agrégats du calcaire.

I.3.1 L'utilisation du calcaire dans le domaine industriel

L'utilisation du calcaire dans le domaine industriel est essentielle pour de nombreuses applications. Grâce à ses propriétés chimiques et physiques uniques, le calcaire est utilisé dans la production du ciment, du verre, des produits chimiques et comme agent de neutralisation des acides, contribuant ainsi au développement de divers secteurs industriels. Voici quelques utilisations importantes du calcaire :

- ***Fabrication des ciments***

Les calcaires jouent un rôle essentiel dans la fabrication des ciments, car ils fournissent une source principale de calcium, l'un des composants clés du ciment. Lorsqu'ils sont chauffés à haute température (1500 °C), les calcaires se transforment en chaux vive, qui réagit avec d'autres matériaux pour former le ciment, offrant ainsi une base solide pour la construction (**Wang et al., 2021**).

- ***Sidérurgie***

Les calcaires jouent un rôle crucial dans l'industrie sidérurgique en tant que fondant dans les hauts-fourneaux. Leur utilisation permet de réduire la température de fusion du minerai de fer, favorisant ainsi la formation de la fonte liquide essentielle à la production d'acier (**Prusti et al., 2021**).

- *Fabrication des verres*

Les calcaires jouent un rôle essentiel dans la fabrication des verres en tant que matière première. Ils sont utilisés pour apporter la stabilité et la solidité aux compositions du verre, en contribuant à la fusion des matériaux et à la formation d'une structure vitreuse cohérente. De plus, les calcaires permettent de contrôler les propriétés physiques du verre, tels que la transparence, la résistance et la durabilité, ce qui en fait un élément clé de ce processus de fabrication (**Freestone et al., 2003**).

- *Charge pour papier, peinture, plastiques et caoutchoucs*

Les calcaires sont largement utilisés dans l'industrie de la fabrication du papier, de la peinture, des plastiques et des caoutchoucs. Grâce à leur composition riche en carbonate de calcium, les calcaires renforcent et améliorent les propriétés physiques de ces matériaux, leur conférant une résistance, une durabilité et une qualité supérieures (**Jimoh et al., 2018**).

- *Matériau de construction et viabilité*

Les calcaires sont largement utilisés dans l'industrie des matériaux de construction en raison de leur grande disponibilité et de leurs propriétés favorables. Leur utilisation contribue à la durabilité des structures grâce à leur résistance, leur durabilité et leur capacité à réguler l'humidité, faisant d'eux un choix viable pour une variété d'applications de construction (**Galetakis and Raka, 2004**).

- *Fabrication de la chaux*

Les calcaires jouent un rôle essentiel dans la fabrication de la chaux. En effet, les calcaires sont chauffés pour produire de la chaux vive (figure 4), qui est ensuite éteinte pour obtenir de la chaux hydratée. Cette substance est largement utilisée dans la construction, l'agriculture et l'industrie, grâce à ses propriétés de liaison, de neutralisation et de régulation du pH (**Pearson, 1990**).

I. 3.2 L'utilisation du calcaire dans le domaine alimentaire

Le calcaire est utilisé dans l'agro-alimentaire, son entrée dans ce secteur ne date pas d'hier, son application dans les industries sucrières (figure4) a pour objectifs plusieurs

applications clés, tant dans la production de sucre que dans le traitement des sous-produits et des effluents. Voici les principales utilisations du calcaire dans ce contexte :



Figure 4 : Chaux vive.

I.3.2.1 L'épuration du jus de canne à sucre

Lors de la production du sucre à partir de sa canne, le jus qui est extrait de la plante et nécessite un processus de purification. Le calcaire est souvent utilisé dans cette étape pour aider à éliminer les impuretés du jus. L'ajout de calcaire (sous forme du lait de chaux $C(OH)_2$) au jus de canne permet de neutraliser l'acidité, ce qui facilite la précipitation des impuretés telles que les protéines, les cires et les pigments. Cette étape de clarification est essentielle pour obtenir un jus de canne pur avant la cristallisation ultérieure (De Carvalho et al., 2008).

I.3.2.2 Régulation du pH

Le calcaire est également utilisé pour régler le pH dans différentes étapes du processus de production de sucre. Le pH joue un rôle crucial dans la transformation du saccharose en cristaux de sucre. En maintenant un pH optimal, généralement légèrement alcalin, le calcaire aide à favoriser la formation et la croissance des cristaux de sucre pendant la cristallisation. Cela contribue à améliorer le rendement et la qualité du sucre produit (Mudoga et al., 2008).

I.3.2.3 Traitements des sous-produits et des effluents

Les industries sucrières génèrent également une quantité importante de sous-produits et d'effluents qui nécessitent un traitement approprié. Le calcaire est souvent utilisé dans le traitement de ces sous-produits pour différentes applications :

- Le « vin de vesou », un liquide résiduel obtenu lors de l'extraction du jus de canne, peut être traité avec du calcaire pour éliminer les impuretés, neutraliser l'acidité et faciliter la décantation des matières solides (valorisation des sous-produits par utilisation du calcaire) (**Van der Poel, 1998**);
- Les boues de clarification, qui sont des résidus solides issus de la clarification du jus de canne, peuvent être traitées avec du calcaire pour favoriser la déshydratation et la séparation des liquides, facilitant ainsi leur élimination ou leur utilisation ultérieure (**Rein and Attard, 2007**);
- Les effluents liquides issus des différentes étapes de production, tels que les eaux de lavage, peuvent être traités avec du calcaire pour ajuster le pH et éliminer certaines impuretés avant leur rejet ou leur réutilisation (restauration des eaux de rejets industriel) (**Güven et al., 2009**).

I.4 Avantages de l'utilisation du calcaire

L'utilisation du calcaire offre de nombreux avantages. Dans un premier temps, le calcaire est une ressource naturelle abondante, ce qui en fait une option économique pour de nombreuses industries (**Kesler and Simon, 2015**). De plus, sa grande disponibilité et sa facilité d'extraction en font un matériau largement utilisé que ça soit dans le domaine industriel ou alimentaire.

Le calcaire présente également des propriétés durables, résistant à l'usure et à la dégradation, ce qui en fait un choix idéal pour les revêtements de sol, les façades et les éléments structuraux (**Carvalho et al., 2018**). De plus, le calcaire est également utilisé dans la production du ciment (**Helmuth, 1987**), contribuant ainsi à l'industrie du béton. Enfin, le calcaire est également utilisé dans l'agriculture, où il est utilisé comme amendement (correcteur tampon des sols) pour ajuster le pH du sol et améliorer sa fertilité (**Yamasaki et al., 2013**).

I.5 L'exploitation des calcaires : richesse mondiale et locale

Le calcaire, une roche sédimentaire largement répandue à travers le globe, joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs de l'économie mondiale. Son exploitation connaît une croissance continue et suscite un intérêt particulier en raison de ses multiples applications.

I.5.1 L'exploitation du calcaire dans le monde

À l'échelle mondiale, les gisements de calcaire sont présents sur tous les continents, offrant une ressource abondante et diversifiée (Lee Jr and Wallerstein, 2015). De vastes formations calcaires se trouvent en Europe, notamment en France, en Italie et en Espagne, où elles sont exploitées depuis des siècles (Rokhmad, 2020). De même, l'Amérique du Nord dispose de riches gisements de calcaire, principalement aux États-Unis et au Canada, qui alimentent l'industrie de la construction, l'industrie chimique et d'autres secteurs (Schmoker et al., 1985).

L'Asie, quant à elle, compte également d'importants gisements de calcaire, en particulier en Chine, en Inde et au Japon (Masum et al., 2016). Ces pays ont intensifié leur exploitation pour soutenir leur rapide développement industriel et leurs besoins croissants en matériaux de construction. En Afrique, des gisements de calcaire sont découverts dans des pays tels que le Maroc, L'Algérie, l'Égypte et l'Afrique du Sud, où ils jouent un rôle clé dans la construction d'infrastructures et la production de ciment (Rahman et al., 2022).

Plusieurs pays sont riches en exploitation du calcaire à travers le monde. Le tableau 1 montre une sélection des pays les plus significatifs en ce qui concerne les réserves et la production de calcaire.

Tableau 1 : Quelques-uns des pays les plus importants en termes de production de calcaire (en millions de tonnes/année) (United states Geological Survey (USGS)).

pays	production	pays	Production
Chine	2400	Allemagne	70
Inde	350	Mexique	70
Japon	100	Iran	75
Brésil	80	Egypte	60

I.5.2 L'exploitation du calcaire En Algérie

L'exploitation du calcaire en Algérie revêt une importance significative dans le secteur minier du pays. Le calcaire est une ressource naturelle abondante, largement répandue à travers le territoire algérien, offrant ainsi des opportunités d'extraction et de développement économique (**BURKINA, 2021**). L'Algérie possède d'importantes carrières de calcaire, tableau 2 présenté situées principalement dans les régions du nord du pays, notamment dans les wilayas de Constantine, Annaba et Tlemcen.

Ces carrières sont exploitées pour leurs diverses applications, allant de la construction à l'industrie chimique. Le calcaire est utilisé dans la production de ciment, de la chaux, des agrégats pour la construction, de pierres de taille, ainsi que dans l'industrie sidérurgique et minière (**Chenini, 2010**).

L'exploitation du calcaire en Algérie est un secteur en croissance, favorisé par la demande croissante de matériaux de construction et de développement infrastructurel dans le pays. Les autorités Algériennes soutiennent activement cette activité, en mettant en place des politiques favorables à l'investissement et en encourageant le développement durable des carrières de calcaire (**Turgeon, n.d.**). Cependant, il est essentiel de garantir une exploitation responsable du calcaire, en tenant compte des enjeux environnementaux et de la préservation des ressources naturelles à long terme. Le tableau 1 montre une sélection de wilaya les plus significatifs en ce qui concerne les réserves et la production de calcaire.

Tableau 2 : Estimation de la production de calcaire par wilaya en Algérie (en millions de tonnes/année) (**Azzeddine, 2015**).

Wilaya	Production (en millions de tonnes / année)
Constantine	9
Annaba	4
Tlemcen	2
Batna	1.8
Skikda	1.5

I.6 EXPLOITATION DU CALCAIRE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

La production et l'extraction de calcaire présentent des défis environnementaux et sociaux significatifs. C'est pourquoi des normes environnementales et réglementations ont été mises en place pour protéger l'environnement et la santé publique, tout en garantissant également le développement durable de l'industrie.

- **Réglementation sur les émissions de gaz à effet de serre**

Les réglementations environnementales visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'extraction de calcaire. Ces émissions peuvent résulter de processus tels que la calcination du calcaire pour produire de la chaux, qui libère du dioxyde de carbone (CO₂). Les réglementations peuvent imposer des limites d'émissions, encourager l'adoption de technologies plus propres et promouvoir la compensation des émissions par des mesures telles que la reforestation.

- **Protection de la qualité de l'air**

Outre les émissions de poussières mentionnées précédemment, l'industrie du calcaire peut également contribuer à la pollution de l'air par d'autres substances nocives. Les réglementations environnementales établissent des normes de qualité de l'air et imposent des contrôles sur les émissions de polluants tels que les oxydes d'azote (NO_x), les composés organiques volatils (COV) et les particules fines.

- **Conservation des ressources naturelles**

Les réglementations environnementales visent à encourager une utilisation durable des ressources naturelles associées à l'industrie du calcaire, notamment en limitant la surexploitation des gisements de calcaire. Cela peut inclure des exigences de gestion responsable des ressources, la mise en place de plans de gestion des carrières et des incitations à l'utilisation de matériaux alternatifs ou recyclés.

- **Protection de la santé et sécurité des travailleurs**

Les réglementations environnementales concernent également la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs de l'industrie du calcaire. Cela peut inclure des normes sur

l'utilisation d'équipements de protection individuelle, la formation sur les risques liés à l'extraction et à la production de calcaire, ainsi que des procédures de sécurité pour prévenir les accidents et les maladies professionnelles.

- **Certification et labels environnementaux**

Certains programmes de certification et de labellisation environnementale peuvent être mis en place pour promouvoir les meilleures pratiques environnementales dans l'industrie du calcaire. Ces initiatives peuvent inclure des critères spécifiques en matière de gestion des émissions, de consommation d'eau, de réhabilitation des sites, de réduction des déchets, etc. Les entreprises peuvent choisir de s'engager dans ces programmes volontaires pour démontrer leur engagement envers le développement durable.

I.7 APPLICATION DE LA CHAUX DANS L'AGRO-ALIMENTAIRE

Le domaine de l'agro-alimentaire marque des seuils très élevés en matière du besoin et de la dépendance des consommateurs vis-à-vis de certains produits alimentaires de bases dit de première nécessité particulièrement le sucre.

Ce dernier est très demandé dans l'industrie alimentaire en tant qu'ingrédient essentiel et indispensable, d'où l'importance de la préparer, le raffiner et le blanchir pour pouvoir s'en servir pleinement.

Dans cette optique, les sucres roux (non décoloré), doivent passer par une phase de blanchissement lors du processus de raffinage, pratique visant à augmenter la valeur du degré BRIX en augmentant la valeur de l'unité ICUMSA (mesure de la blancheur du sucre) et ce en plongeant notre sucre dans une matrice dite lait de chaux, dont l'objectif est d'éliminer les impuretés naturellement générées par la canne à sucre (matière première).

Ce pendant le lait de chaux est une matrice devront servir de piège à impuretés obtenue par mélange de chaux et d'eau sucrée.

I.7.1 Définitions de d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Le lait de chaux, également connu sous le nom d'hydroxyde de calcium ou éteinte de chaux, est une suspension colloïdale de particules d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) suspendues dans l'eau. Il est obtenu en éteignant la chaux vive (oxyde de calcium, CaO) avec

de l'eau (figure5), ce qui provoque une réaction exothermique (dégagement de la chaleur). C'est une solution recommandée pour ces caractéristiques antiseptique, fongicides et alcalines, d'où son utilisation dans le domaine du traitement des eaux et le blanchissement des sucres roux.



Figure 5 : Lait de chaux.

I.7.2 Propriétés physico-chimiques du lait de chaux

- ***pH élevé***

Le lait de chaux a un pH élevé, généralement supérieur ou égale à 12,5 ce qui le rend alcalin.

- ***Solubilité***

L'hydroxyde de calcium est faiblement soluble dans l'eau. Par conséquent, le lait de chaux est une suspension colloïdale où de petites particules d'hydroxyde de calcium sont dispersées dans l'eau.

- ***Réactivité***

Le lait de chaux est hautement réactif et peut réagir avec des acides pour former des sels de calcium.

- *Capacité d'absorption de dioxyde de carbone*

Le lait de chaux a la propriété de réagir avec le dioxyde de carbone atmosphérique pour former du carbonate de calcium, ce qui lui permet d'être utilisé comme matériau de construction pour la restauration des bâtiments anciens.

I.7.3 Caractéristiques du lait de chaux

- *Aspect*

Le lait de chaux a une apparence laiteuse et peut être légèrement opaque en raison de la présence de particules suspendues.

- *Densité*

Sa densité varie en fonction de la concentration d'hydroxyde de calcium dans la suspension.

- *Stabilité*

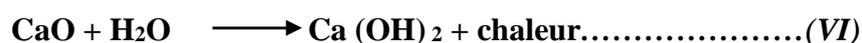
Le lait de chaux peut être instable et avoir tendance à se séparer en deux phases, avec une partie de la chaux se déposant au fond du récipient et une partie de l'eau restant au-dessus.

- *Utilisation*

Le lait de chaux est largement utilisé dans l'industrie sucrière et de la construction comme mortier, enduit, badigeon ou comme agent de traitement des sols et des eaux.

I.8 Processus d'extinction de la chaux vive

Le processus d'extinction de la chaux vive pour produire du lait de chaux implique l'ajout d'eau à la chaux vive. Lorsque l'eau est ajoutée, une réaction exothermique se produit, libérant de la chaleur. La formule chimique de cette réaction est :



La réaction convertit l'oxyde de calcium (chaux vive) en hydroxyde de calcium (lait de chaux). Le lait de chaux résultant est une suspension colloïdale dans laquelle les particules d'hydroxyde de calcium sont dispersées dans l'eau.

Il est important de noter que le processus d'extinction doit être effectué avec précaution, car la réaction exothermique peut provoquer des éclaboussures d'eau chaude. De plus, la chaux vive est corrosive (figure 6), il est donc recommandé de porter des équipements de protection appropriés lors de la manipulation de ces substances.

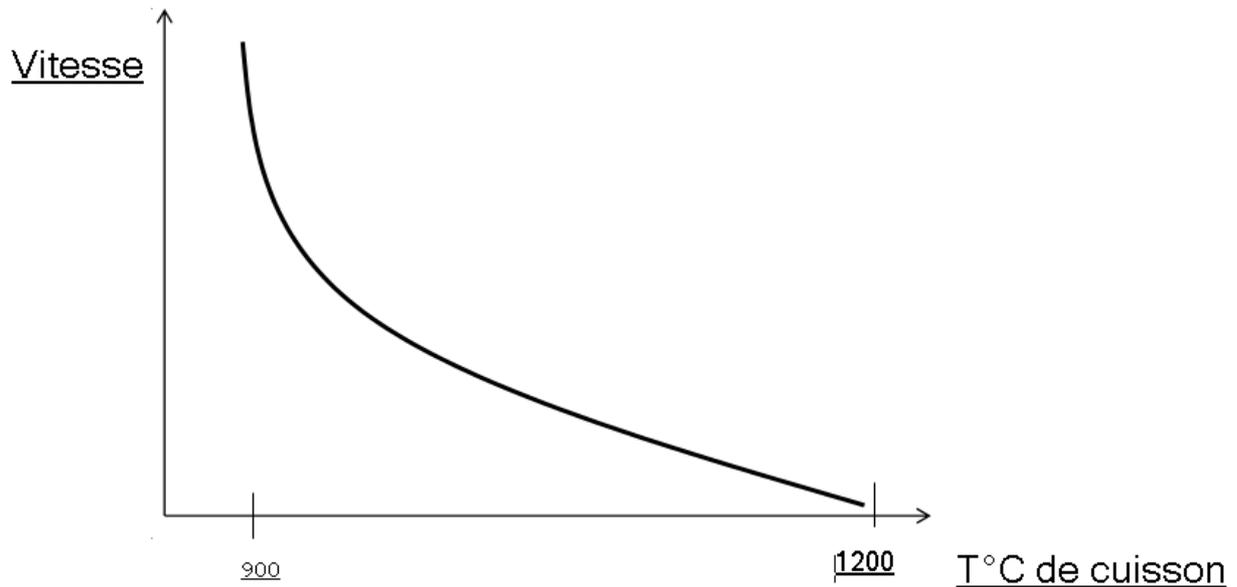


Figure 6 : Vitesse d'extinction de la chaux vive en fonction de la température de cuisson.

I.9 Technologie de raffinage du sucre roux

Le raffinage du sucre roux est un processus complexe qui allie expertise scientifique et technique pour transformer et optimiser la matière première qu'est le sucre brut. Ce procédé méticuleux se déroule en plusieurs étapes soigneusement emboîtées, avec pour objectif une purification maximale et l'amélioration de la qualité du produit final.

Grâce à ces procédés rigoureux de raffinage, le sucre raffiné obtenu est d'une très haute qualité et d'une pureté exceptionnelle. Il arbore également des caractéristiques esthétiques telles qu'une couleur blanche et uniforme ainsi qu'une texture fine et régulière (Cartier, 1997). Ces qualités répondent aux exigences élevées des consommateurs et des industries alimentaires, garantissant un produit irréprochable pour une utilisation variée dans les domaines de la cuisine, de la pâtisserie et des boissons sucrées.

La technologie de raffinage du sucre roux dans l'industrie sucrière est un processus de pointe qui vise à produire un sucre de haute qualité. Ce procédé utilise des techniques avancées

pour éliminer les impuretés présentes dans le sucre brut, tout en préservant ses caractéristiques naturelles (Cartier, 1997).

I.9.1 Étapes du processus de raffinage du sucre roux

- **Section 1 « Affinage – refonte »**

Elle englobe un processus de transformation complexe visant à purifier et à affiner le sucre brut obtenu lors de l'extraction initiale. Cette étape cruciale permet d'éliminer les impuretés et de parfaire la qualité du sucre avant qu'il ne soit prêt pour une utilisation commerciale. L'affinage et la refonte du sucre jouent un rôle clé dans la garantie d'un produit final raffiné, répondant aux normes de qualité les plus élevées (Claus, 1937).

- **Section 2 « Carbonatation »**

La carbonatation est une étape clé dans la purification du jus de canne à sucre ou de la mélasse, permettant d'éliminer les impuretés et d'améliorer la qualité du sucre final. Ce procédé consiste à ajouter de la chaux vive au jus de canne, ce qui entraîne la formation de précipités de carbonate de calcium. Ces précipités adsorbent les impuretés telles que les protéines, les pigments et les acides organiques. En éliminant ces impuretés, la carbonatation contribue à la clarification du jus et à la réduction de sa couleur. Les résultats obtenus grâce à ce processus sont essentiels pour obtenir un sucre de qualité supérieure, répondant aux normes de l'industrie alimentaire (Punidades, 1990).



- **Section 3 « Filtration »**

Cette étape cruciale permet de séparer les impuretés présentes dans le jus de canne, afin d'obtenir un produit final de haute qualité.

Différentes techniques de filtration sont utilisées, telles que la filtration à pression, la filtration sur charbon actif et la filtration par centrifugation. Ces méthodes garantissent une élimination efficace des particules indésirables et des matières en suspension. Grâce à la filtration, l'industrie sucrière peut maintenir des normes strictes en termes de pureté et de qualité du sucre produit (Burzawa *et al.* 1995).

- **Section 4 « Décoloration »**

Cette étape permet d'obtenir un produit final de qualité supérieure, à la fois pur et esthétiquement attrayant. Grâce à l'utilisation de techniques de décoloration avancées, telles que la filtration à charbon actif ou l'utilisation de résines échangeuses d'ions, les producteurs de sucre parviennent à éliminer efficacement les colorants naturels et les matières organiques présentes dans le sucre brut (**Punidades, 1990**).

Ce processus rigoureux garantit que le sucre commercialisé répond aux normes les plus strictes de l'industrie alimentaire et satisfait ainsi les attentes des consommateurs en termes de qualité et de pureté.

- **Section 5 « Concentration »**

Elle consiste à éliminer l'eau présente dans la solution de sucre afin d'augmenter sa concentration.

Ce processus est réalisé à l'aide d'équipements spécifiques tels que les évaporateurs, qui permettent d'évaporer l'eau tout en maintenant les autres composants du sucre intacts. Une fois que la concentration souhaitée est atteinte, le sucre est prêt à être transformé en différents produits finis, tels que les cristaux de sucre ou le sucre en poudre. Une attention rigoureuse est portée à cette étape afin d'assurer la pureté et la qualité du sucre final (**Mathlouthi et al. 2004**).

- **Section 6 « Cristallisation »**

Cette étape vise à purifier le sucre brut en le faisant passer par un processus de cristallisation contrôlé. Les impuretés sont éliminées grâce à une combinaison de techniques de refroidissement et de filtrage, permettant d'obtenir des cristaux de sucre purs et de haute qualité. La section 6 garantit ainsi que le sucre final répond aux normes les plus strictes en termes de pureté et de saveur, offrant ainsi un produit fini irréprochable (**Romain et al., 2007**).

- **Section 7 « Séchage et maturation »**

Ce stade permet d'éliminer l'excès d'humidité du sucre, garantissant ainsi une meilleure qualité et une plus longue durée de conservation (**Claus, 1937**).

Le séchage est effectué en utilisant des équipements spécialisés qui contrôlent minutieusement la température et le temps de traitement (**Arzat, 2005**).

Une fois le séchage terminé, le sucre passe à la phase de maturation, où il est stocké dans des conditions spécifiques pour développer ses arômes et sa texture caractéristiques. Cette étape est essentielle pour obtenir un produit final uniforme et de haute qualité.

• Section 8 « Stockage et conditionnement »

La section 8 "Stockage et conditionnement" dans le raffinage du sucre est essentielle pour assurer la qualité et la durée de conservation du produit final (figure7). Les installations de stockage sont conçues pour maintenir les conditions optimales de température et d'humidité, tandis que le conditionnement se fait dans des emballages hermétiques, préservant ainsi la fraîcheur et les propriétés du sucre (Burzawa, 1994).

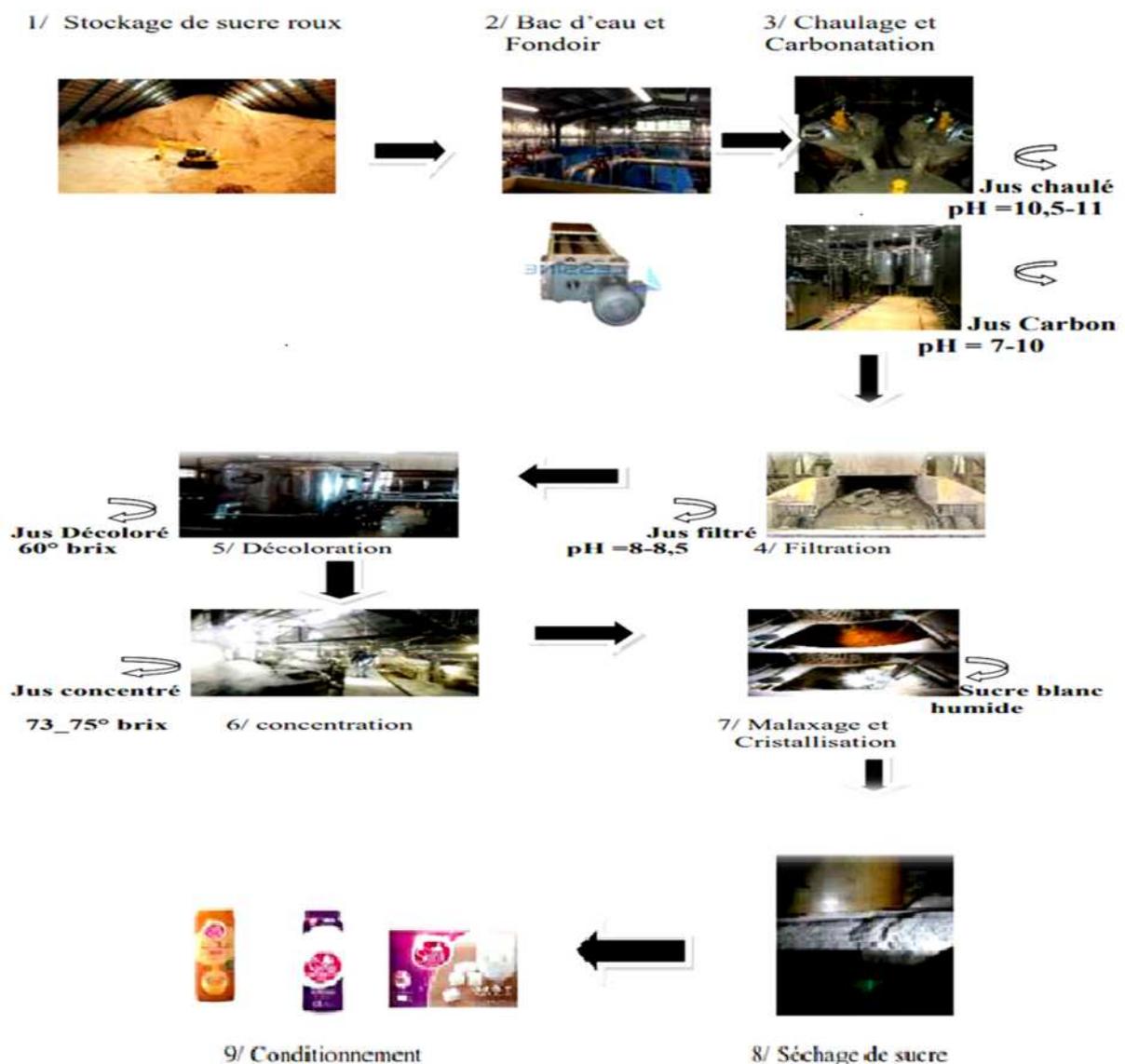


Figure 7 : Procédé de raffinage de sucre roux (CEVITAL, 2021).

I.9.2 Principes de la carbonatation dans l'industrie sucrière

La carbonatation est un processus qui entraîne plusieurs effets. D'une part, elle provoque la précipitation de la chaux sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3), qui agit comme un support d'adsorption des impuretés. D'autre part, elle permet de neutraliser le milieu. Cette réaction chimique joue un rôle important dans le traitement des eaux et des liquides (**Belhamri (2005)**).

Lors du processus de gazage, le pH du milieu diminue en raison de la présence de dioxyde de carbone, qui est acide. Cette diminution du pH est un indicateur de l'avancement de la réaction de carbonatation.

Le mélange entre le jus chaulé et le CO_2 se réalise dans des dispositifs appelés « chaudières de carbonatation ». L'objectif est de faire circuler le dioxyde de carbone dans le sirop afin d'optimiser l'efficacité de la réaction.

En résumé, la carbonatation se déroule en trois étapes distinctes :

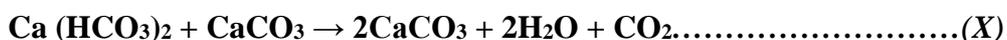
- **Première carbonatation**

La première carbonatation consiste à ajouter de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) au sirop de sucre, puis de l'acide carbonique (H_2CO_3) est injecté pour produire du carbonate de calcium (CaCO_3) insoluble. En combinant l'hydroxyde de calcium et l'acide carbonique, de la chaux réactive est produite. Lorsque cette solution est ajoutée au sirop de sucre brut, elle réagit pour produire du carbonate de calcium insoluble et de l'eau (**Arzate, 2005**).



- **Deuxième carbonatation**

Dans la deuxième carbonatation, une solution de sucre concentré est mélangée avec la suspension de CaCO_3 , et de l'acide carbonique est ajouté pour précipiter plus de carbonate de calcium (**Bounie, 2004**). Les réactions chimiques qui ont lieu pendant cette étape sont :



- **Troisième carbonatation**

La troisième carbonatation est similaire à la deuxième, mais avec une concentration encore plus élevée en sucre. Cette étape suit le même principe que la deuxième carbonatation, et la concentration de sucre plus élevée renforce les effets de purification et d'obtention d'un sirop plus clair (MCG, 2010).

CONCLUSION

Le calcaire, en tant que ressource naturelle précieuse, doit être géré avec précaution et responsabilité, en tenant compte des éventuelles conséquences environnementales liées à son extraction et à son utilisation intensive.

Étant donné que la production de calcaire est répandue à travers plusieurs pays, tels que la Chine, la France et l'Algérie, il est crucial de l'exploiter de manière minutieuse afin de préserver notre planète. En adoptant des pratiques durables et en favorisant une exploitation responsable du calcaire, nous pouvons contribuer à préserver l'équilibre écologique de notre planète pour les générations futures.

Il est impératif d'établir des politiques et des réglementations appropriées pour garantir une exploitation respectueuse de l'environnement tout en maximisant les avantages économiques offerts par cette ressource naturelle essentielle.

Partie pratique

CHAPITRE II

Matériels et méthodes

INTRODUCTION

Dans le souci de bien mener notre étude expérimentale nous nous sommes penchés sur les étapes importantes de la valorisation du calcaire dans le procédé de raffinage du sucre, plus précisément la partie de décoloration appelée communément la carbonatation en termes de processus agro-alimentaire.

Au cours de notre travail nous avons effectué les travaux suivants :

- Suivis et élaboration d'un calcaire calciné ;
- Préparation et formulation d'un lait de chaux ;
- Chaulage du sirop de sucre et test de qualité.

Nous essayerons à travers ce chapitre d'exposer la méthodologie de travail (tests, équipements et protocoles) entreprise durant notre étude.

Remarque :

Nous tenons à préciser que notre travail s'articule principalement sur la calcination du calcaire de la carrière d'Oum Settas au niveau de l'unité de calcination d'El Khroub, l'élaboration de la chaux vive puis la formulation d'un lait de chaux et de le tester sur un sirop de sucre au niveau du complexe Cevital, de ce fait nous n'avons pas abordé l'aspect de caractérisation du minerais de base (analyse physico-chimiques), néanmoins, nous présenterons les résultats de la caractérisation du minerais (en chapitre : résultats et discussion) à titre indicatif, ces analyses s'effectues cycliquement et continuellement à la demande de la direction de qualité de la raffinerie de sucre du complexe Cevital.

II.1 Elaborations du calcaire calciné

La qualité du calcaire calciné dépend principalement de la granulométrie du matériau d'une part et de la température de calcination d'autre part. Dans le cadre de notre travail nous avons suivi l'influence de ces deux paramètres sur le rendement de la calcination.

II.1.1 Evaluation de la calcination sous variation granulométrique (Boynton, R. S.1980)

Dans un premier temps nous nous sommes posé la question suivante : est-ce que le diamètre des roches pourra avoir un impact sur la calcination ?

Pour répondre à la question nous avons lancé le processus de calcination en choisissant trois classe granulométrique différentes ; pour ensuite les calciner et interpréter les résultats obtenus :

Habituellement le complexe Cevital a recours à la classe granulométrique dite de référence dont les diamètres sont compris entre la fraction [40 mm à 70 mm]. Dans le cadre de notre travail nous avons fixé deux autres classes granulométriques pour servir de repères de comparaison à savoir une classe plus fine que celle de référence étant entre les diamètres 0 mm et 40 mm. L'autre classe est nettement plus grossière à savoir supérieur à 70 mm.

Il en résulte trois classes granulométriques à tester dans un four de calcination à une température de 1000°C pendant 2 heures à savoir :

- Classe 01 : de 0 mm à 40 mm, (figure 9)
- Classe 02 : de 40 mm à 70 mm (fraction utilisée par le groupe Cevital), (figure 10)
- Classe 03 : supérieur à 70 mm, (figure 11)

a) Principe de la démarche

Le principe de la manipulation repose sur la détermination de la perte du poids du matériau en le chauffant à une température de (975 ± 25) °C. Les conditions à l'intérieur du four se caractérisé par le départ de la vapeur d'eau, du CO₂ qui seront évacuées à l'extérieur de ce dernier. Les températures élevées conduiront les matériaux (calcaire) ; à perdre du poids. Le gradient massique sera ainsi indicateur de perte au feu et par conséquent permettra de déterminer la fraction présentant une meilleure repense au chauffage.

b) Matériels expérimentaux

Pour réaliser notre étude comparative de la repense au chauffage des trois fractions granulométriques nous avons eu recours aux équipements suivants :

- Four à moufle ;
- Creuset de nickel ;
- Verre de montre ;
- Dessiccateur ;
- Balance analytique ;

- Spatule cuillère ;
- Pince à creuset ;
- Echantillon à fraction différentes.

c) Mode opératoire

Pour mener à bien notre test nous avons suivi le mode opératoire suivant :

- Prendre un échantillon du matériau ; le peser et noté son poids « m1 », le mettre dans creuse préalablement calciné.
- Placer le creuset dans le four électrique réglé à (975±25) °C.
- Une fois que le four atteint une température de 975 °C, laisser l'échantillon au four pendant 2 heures.
- Refroidir l'échantillon dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'il atteigne la température ambiante, puis la repeser à nouveau et noter « m2 ».

Une fois les pesées sont effectuées ; nous calculerons les différences des masses des trois échantillons selon l'équation :

$$\text{Perte au feu (\%)} = \frac{(m1 - m2)}{m1} \times 100$$

Où :

- m1 : masse de la prise d'essai en grammes avant la mise dans le four.
- m2 : masse de la prise d'essai en grammes refroidi et sorti du four.



Figure 9 : la classe de 0 mm à 40 mm avant et après calcination.



Figure 10 : la classe de 40 mm à 70 mm avant et après calcination.



Figure 11 : La classe supérieure à 70 mm avant et après calcination.

II.1.2 Evaluation de la calcination sous variation thermique (Boynton, R. S. 1980)

La calcination du calcaire est un processus chimique crucial qui nécessite une température élevée pour transformer le carbonate de calcium (CaCO_3) en chaux vive (CaO). Cependant, il est essentiel de trouver la température optimale pour éviter la sur-calcination ou une conversion inefficace. Afin de déterminer la meilleure température, des essais de perte au feu ont été réalisés à 800°C , 1000°C et 1200°C pendant 2 heures.

Pour effectuer cette analyse nous avons eu recours à trois échantillons appartenant à la classe granulométrique variant de 40 mm à 70 mm (fraction granulométrique retenue par le complexe Cevital).

Les échantillons en question devraient séjourner dans le four à différentes températures chacun.

a) Principe de la démarche

L'objectif de cette démarche expérimentale est d'évaluer l'effet de différentes températures de calcination sur le calcaire. Trois températures ont été choisies : 800°C, 1000°C et 1200°C. Les échantillons de calcaire, entre la fraction 40 mm et celle de 70 mm, ont été soumis à ces températures pendant 2 heures dans un four de calcination. L'analyse des échantillons avant et après la calcination permettra de déterminer la meilleure température de calcination pour obtenir une transformation optimale du calcaire en chaux vive.

b) Matériels expérimentaux

- Échantillons de calcaire de classe granulométrique variant de 40 mm de 70 mm ;
- Four de calcination capable d'atteindre les températures requises (800°C, 1000°C, 1200°C) et de maintenir cette température pendant 2 heures ;
- Instruments de mesure de la température (thermomètre, pyromètre, etc.) ;
- Équipement de manipulation des échantillons (pinces, spatules, etc.) ;
- Matériel de protection individuelle (gants, lunettes de sécurité, etc.).

c) Mode opératoire

Pour réussir la manipulation nous étions dans l'obligation de suivre les étapes suites :

• Préparation des échantillons

Trois échantillons de calcaire de taille granulométrique allant de 40 mm à 70 mm sont sélectionnés pour l'expérience. Les échantillons doivent être similaires en termes de composition et de taille.

• Mise en place des échantillons dans le four

Les échantillons sont placés dans le four de calcination préchauffé à la température souhaitée (800°C, 1000°C, ou 1200°C). Ils sont disposés de manière à assurer une exposition uniforme à la chaleur et cela à tour de rôle.

- **Calcination**

Les échantillons sont maintenus à la température spécifiée pendant 2 heures. Pendant ce temps, la température du four est régulièrement surveillée pour s'assurer qu'elle reste constante.

- **Refroidissement et récupération des échantillons**

Après la calcination, les échantillons sont retirés du four et laissés refroidir à une température ambiante. Les échantillons calcinés sont ensuite collectés pour analyse.

- **Analyse des échantillons**

Les échantillons avant et après la calcination à différentes températures sont comparés pour évaluer les changements physiques, tels que la perte de poids, la formation de chaux vive, etc. Les résultats obtenus sont présentés dans chapitre résultats et discussion.

II.2. Préparation et formulation d'un lait de chaux

Un lait de chaux dit de bonne qualité doit impérativement présenter des indices de performance. Certains paramètres devront être contrôlés dont la granulométrie de la chaux vive, le degré de finesse des particules de la chaux vive, la quantité d'eau d'hydratation à ajouter, la densité et le pH. Pour rappeler le lait de chaux est une suspension colloïdale de chaux vives et d'une fraction d'eau (légèrement sucrée pour cas du complexe de Cevital).

II.2.1 Impact de la granulométrie de la chaux vive sur la calcination

La granulométrie est un élément clé dans l'étude des propriétés de la chaux vive, cette granulométrie est sensiblement influencée par le procédé de calcination. La granulométrie doit être contrôlée ce qui se traduit par une bonne ou une mauvaise réactivité avec l'eau.

La connaissance de la distribution des tailles des particules de la chaux vive est essentielle pour garantir sa qualité dans le domaine agro-alimentaire. Grâce à des techniques telles que le tamisage et la granulo-laser, il est possible de mesurer et d'évaluer la granulométrie de la chaux vive pour une utilisation optimale. Une meilleure granulométrie assure une meilleure réactivité.

a) Principe de la démarche

Le principe de la manipulation repose sur la détermination de la granulométrie qui consiste à déterminer la distribution des tailles des particules d'un matériau. Pour la chaux vive, qui est un produit de la décomposition thermique du calcaire (CaCO_3) à haute température, la granulométrie est un paramètre important dans le raffinage de sucre. La mesure de la granulométrie de la chaux vive, permet de contrôler sa qualité et d'optimiser les mélanges et les réactions dans le raffinage de sucre.

Nous visons à tester la réactivité à l'eau de trois classes granulométriques de la chaux vive et de les comparer entre elles.

b) Matériels expérimentaux

Pour la mesure de la granulométrie de la chaux vive, les matériels expérimentaux suivants sont nécessaires :

- Tamis : Une série de tamis de différentes ouvertures de maille, conformes aux normes ISO 565 : 1990, pour permettre la séparation des particules en fonction de leur taille.
- Agitateur mécanique : Un dispositif pour agiter et secouer les tamis, de manière à faciliter la séparation des particules.
- Balance analytique : Une balance de précision pour peser les fractions de particules recueillies sur chaque tamis.
- Chronomètre : Pour mesurer le temps écoulé durant l'essai.
- Thermomètre
- Récipients : Des récipients appropriés pour recueillir les fractions de particules séparées.
- Vase en verre

c) Mode opératoire

Pour réaliser l'expérience nous avons suivi les étapes suivantes (figure 12):

- Préparation des échantillons : Prélevez un échantillon représentatif de la chaux vive à l'analyser, en respectant les procédures de sécurité liées à la manipulation le poids pris est de 1000 grammes.
- Sélection des tamis : Choisissez une série de tamis avec des ouvertures de maille appropriées pour la plage de tailles de particules attendues. Montez les tamis pour former une colonne, en les plaçant avec les ouvertures de maille les plus larges en haut et les ouvertures les plus étroites en bas.
- Pesée des échantillons : Pesez la quantité de chaux vive à analyser et la placez sur le tamis le plus élevé dans la colonne.
- Agitation des échantillons : Placez la colonne de tamis sur l'agitateur mécanique et réglez l'appareil pour secouer et agiter les tamis pendant un temps prédéterminé. Le temps d'agitation doit être suffisant pour permettre la séparation complète des particules, généralement entre 10 et 20 minutes.
- Pesée des fractions : Une fois l'agitation terminée, démontez la colonne de tamis et pesez les fractions de particules retenues sur chaque tamis, en prenant soin de noter les poids et les ouvertures de maille correspondantes.
- Déterminé des résultats : Calculez la distribution granulométrique en pourcentage en rapportant le poids de chaque fraction de particules au poids total de l'échantillon analysé.
- Ajouté un volume d'eau noté V est calculer le temps de réactivité T qui est égalé au temps nécessaire pour passer de la température
- La réactivité est cependant évaluée par rapport au temps écoulé pour passer de la température de 20°C à 60 °C après un ajout d'un même volume d'eau aux différentes classes granulométriques :

- Soit : 150 grammes de chaux vive, pour chacune des classes granulométriques ; recevant un volume d'eau 600 ml du H₂O.

Selon les bonnes pratiques de fabrication (BPF) adoptée par consensus par la direction de qualité du groupe Cevital, on retient que :

- De 0 à 15 min : chaux très réactive ;
- De 5 à 15 min : chaux moyennement réactive ;
- Supérieure à 15 min : chaux peu réactive.



Figure 12 : A : Refus de la chaux vive, B : Un tamis d'ouverture 2mm, C : Echantillon de chaux vive de granulométrie >2mm.

II.2.2 Impact de la distribution granulométrique sur la réactivité de la chaux éteinte (ASTM International. 2016)

La finesse de la chaux éteinte est un paramètre essentiel, en particulier dans le domaine alimentaire, afin d'assurer une qualité optimale dans diverses applications, telles que le raffinage du sucre. Le contrôle de cette finesse est crucial pour assurer l'efficacité des procédés de séparation et de transformation utilisés.

a) Principe de la démarche

L'approche consiste à étudier méthodiquement la finesse de la chaux éteinte appelée « fleur de chaux » en mesurant la distribution granulométrique des particules à l'aide d'un ensemble de tamis de différentes tailles de maille. Les résultats permettront d'optimiser les procédés de raffinage du sucre en ajustant la qualité de la chaux éteinte utilisée.

L'objectif de cette analyse est de déterminer le pouvoir de réactivité à l'acide chlorhydrique de la chaux éteinte en fonction de la finesse des particules.

b) Matériels expérimentaux

La série de tamis utilisée pour cette étude est composée de tamis avec les tailles de maille suivantes : 0, 80, 100, 200, 300, 400, et 500 micromètres (μm). Cette gamme de tailles de maille permet un test de réactivité de la chaux éteinte (après hydrateur) et de classer les particules selon leur finesse.

c) Mode opératoire

Le processus commence par la préparation d'un échantillon représentatif de chaux éteinte qui sera analysé. Ensuite, la série de tamis est empilée dans l'ordre décroissant des tailles de maille, avec le tamis de 0 μm en bas. L'échantillon est placé sur le tamis le plus élevé de la pile, et les tamis sont vibrés (figure 13) pour une durée déterminée.

Une fois la vibration terminée, les particules de chaux éteinte retenues sur chaque tamis sont pesées individuellement afin de déterminer la proportion de particules selon leur taille. Les données de distribution granulométrique sont ensuite analysées pour déterminer la finesse de la chaux éteinte et établir un profil représentatif de la qualité du matériau.

La réactivité des différentes classes granulométrique sera calculée et donnée selon le protocole suivant :

- Avec 20 ml de prise d'échantillon et de l'acide chlorhydrique (HCl) à 0,714 N : $V_1 \times 10$ donne directement la chaux active par litre de lait de chaux (en g $\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- Avec la soude (NaOH) 0,714 N : $(30 - V_2) \times 10$ donne la chaux totale par litre du lait (en g $\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Exemple :

Soit $V_1 = 18,50$ ml.

$V_2 = 10,45$ ml.

Chaux active :

$18,50 \times 10 = 185,0$ g/l de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Chaux totale :

$$(30 - 10,45) \times 10 = 195,5 \text{ g/l de Ca(OH)}_2.$$

Réactivité de la chaux (%)

$$\frac{\text{Chaux active}}{\text{Chaux totale}} \times 100 = \frac{185,0}{195,5} \times 100 = 94,6 \text{ \% ;}$$

Si la réactivité est :

- Supérieur ou égale à 94 % la réactivité est très bonne ;
- De 90 à 94 % la réactivité est bonne ;
- Inférieure 90 % la réactivité est mauvaise.



Figure 13 : tamiseuse vibrante (laboratoire d'usine CEVITAL).

II.2.3 Impacts de la quantité d'eau ajoutée sur la réactivité du lait de chaux (Anagnostopoulou, S. 2005)

Dans cette étude, nous avons cherché à optimiser la quantité d'eau ajoutée lors du processus d'hydratation de la chaux vive, avec un focus sur le raffinage du sucre dans le domaine alimentaire. En utilisant des échantillons de chaux vive et plusieurs quantités d'eau testées, nous avons suivi la réactivité des échantillons pour comprendre son impact sur la qualité de la chaux éteinte.

L'analyse des résultats obtenus permettra d'améliorer les paramètres d'hydratation et d'obtenir une chaux éteinte de qualité supérieure en optimisant le rapport eau/chaux vive.

a) Principe de la démarche

L'objectif de cette étude est d'optimiser la quantité d'eau ajoutée lors du processus d'hydratation de la chaux vive dans le domaine alimentaire, plus précisément dans le raffinage du sucre. Le rapport théorique eau/chaux vive est de 550 L/t, mais il est important de noter que ce rapport peut varier en pratique en raison de facteurs tels que la température et la pression de l'hydrateur, ainsi que la granulométrie et la qualité de la chaux vive. Ainsi, des tests de réactivité ont été réalisés sur différents échantillons de chaux vive afin d'optimiser ces paramètres et obtenir une chaux éteinte de qualité supérieure.

b) Matériels expérimentaux

Pour réaliser cette étude, plusieurs échantillons de chaux vive ont été sélectionnés. Ces échantillons présentent une pureté de 88,20 % en CaO et une granulométrie inférieure à 2 mm. Par ailleurs, différentes quantités d'eau ont été utilisées pour les tests d'hydratation, telles que 5 ml, 10 ml et 37 ml (volume pris de manière aléatoire).

c) Mode opératoire

L'expérience consiste à hydrater les échantillons de chaux vive en utilisant les différentes quantités d'eau mentionnées précédemment. Pour ce faire, les étapes suivantes ont été suivies :

- Préparation des échantillons de chaux vive : les échantillons de chaux vive ont été pesés, de façon à avoir une quantité de 50 g pour chaque test, en veillant à ce qu'ils présentent une granulométrie inférieure à 2 mm et une pureté de 88,20 % en CaO.
- Préparation des solutions d'eau pour l'hydratation : les quantités d'eau de 5 ml, 10 ml et 37 ml ont été mesurées à l'aide d'une pipette graduée ou d'un autre instrument de mesure de volume approprié.
- Hydratation des échantillons de chaux vive : chaque échantillon de chaux vive a été mélangé avec les différentes quantités d'eau préparées à l'étape précédente. Cela a été réalisé en ajoutant l'eau petit à petit et en mélangeant constamment pour assurer une hydratation uniforme.
- Suivi de la réactivité des échantillons : la réactivité des différents échantillons de chaux

vive hydratée a été évaluée à l'aide de tests de réactivité appropriés, tels que la mesure de la chaleur dégagée lors du processus d'hydratation et l'observation de la consistance de la pâte obtenue après hydratation (selon le protocole précédent).

- Analyse des résultats : les données obtenues lors de l'expérience ont été analysées afin de déterminer l'impact de la quantité d'eau ajoutée sur la réactivité des échantillons de chaux vive et, par conséquent, sur la qualité de la chaux éteinte.

Ces résultats permettront d'optimiser les paramètres d'hydratation pour le domaine alimentaire, en particulier dans le raffinage du sucre.

II.2.4 Mesures de la densité du pH du lait de chaux (Deb et al. 2007)

- **Objectif**

L'objectif de cette expérience est de mesurer précisément la densité et le pH du lait de chaux en utilisant respectivement un densimètre et un pH-mètre.

Les mesures vont s'effectuer sur une durée de cinq (05) jours, cela nous permettra d'évaluer la possibilité d'une quelconque variation de ces deux paramètres.

- **Principe**

Le densimètre est un instrument de mesure spécialement conçu pour déterminer la densité d'un liquide. En immergeant le densimètre dans le lait de chaux, la densité du liquide sera instantanément affichée sur l'échelle graduée du densimètre (figure 14).

De même pour le pH-mètre (figure 15), la mesure s'effectue à l'aide d'une sonde affichant le résultat au contact direct avec la matrice en question.

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

- **Mode opératoire**

S'assurer de bien préparer un densimètre propre et sec pour l'expérience.

Avec précaution, nous versons le lait de chaux dans un récipient propre et transparent.

Nous plongeons délicatement le densimètre dans le récipient, en le laissant flotter librement

dans le liquide.

Faut patienter jusqu'à ce que le densimètre atteigne une position stable et que la lecture soit claire sur l'échelle graduée.

Prendre note de la valeur de densité affichée par le densimètre et l'enregistrez avec précision.

Pour le pH, nous mettant la sonde de l'appareil directement à l'intérieur du lait de chaux puis en lit la valeur affichée sur l'écran du pH-mètre.



Figure 14 : Densimètre.



Figure 15 : pH-mètre.

II.3 Chaulage du sirop de sucre et test de qualité

II.3.1 Mesures de pH du jus chaulé (Martin et al. 2015)

Le protocole de la mesure de pH pour le jus chaulé reste le même que celui de la mesure du pH du lait de chaux.

II.3.2 Mesures de l'alcalinité du jus chaulé (Inglezakis et Zorpas. 2012)

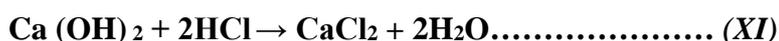
La mesure de l'alcalinité du jus chaulé, sert de témoin de l'efficacité du lait de chaux élaboré, par conséquent remplir correctement son rôle lors de son utilisation dans le processus de filtration.

- **Objet**

La détermination de l'alcalinité des jus de sucrerie vise à contrôler la quantité de chaux libre ajoutée lors des différentes étapes de l'épuration. Dans certains cas, cette alcalinité peut également être liée à d'autres substances alcalines telles que le NaOH ou le KOH, par exemple.

- **Principe**

La quantité de chaux, exprimée en g/l de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, doit être contrôlée pendant le processus de chaulage lors de la première et de la deuxième carbonatation. Les ions calcium réagissent avec de l'acide (HCl), formant ainsi des chlorures de calcium selon la réaction suivante :



Remarque :

En général, l'acide fort utilisé est l'acide chlorhydrique. Cependant, il est possible d'utiliser de l'acide sulfurique, qui présente l'avantage d'être plus stable.

- **Mode opératoire**

Pour mieux réussir le test, il faut suivre les étapes suivantes de manière rigoureuse :

- Prélevez une quantité de 20 ml de jus chaulé,
- Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine à 20 ml de sirop chaulé au carbonate mis

Dans un bécher après une homogénéisation adéquate et un refroidissement.

- Placez l'échantillon dans la cuve de titrage.
- Titrer avec les solutions acides (HCl) (0,1) jusqu'à atteindre un pH de 8,0 (changement de couleur du rose à l'incolore).



Figure 16 : Mesure de l'alcalinité du jus chaulé.

CONCLUSION

Ce chapitre a exploré les différentes étapes de l'élaboration du calcaire calciné et de la formulation du lait de chaux, en se concentrant sur l'évaluation de divers paramètres tels que la granulométrie, la distribution granulométrique et la quantité d'eau ajoutée. Les expériences ont été réalisées avec précision et en utilisant des équipements adaptés pour obtenir des résultats précis.

Les principales conclusions indiquent que la granulométrie du calcaire et de la chaux vive, ainsi que la distribution granulométrique, influencent la calcination et la réactivité des produits. De plus, la quantité d'eau ajoutée joue un rôle dans la formation du lait de chaux et sa réactivité.

Les mesures de densité, de pH et d'alcalinité ont été utilisées pour évaluer la qualité des produits finaux. En somme, ce chapitre fournit des informations essentielles pour optimiser la production et garantir la qualité des produits à base de chaux.

Chapitre III
Résultats et discussions

INTRODUCTION

Au cours de ce chapitre nous présenterons les résultats obtenus suite aux différentes expérimentations réalisées, et nous essayerons de les accompagner des explications et des interprétations cohérentes pour chacune des analyses effectuées.

Cependant et comme déjà signalé dans le chapitre II, nous exposerons d'abord les résultats de l'analyse de caractérisation du minerais de base (calcaire du gisement de Oum Settas), ces derniers sont réalisés par l'office de recherche géologique et minière de Boumerdes (ORGM), de manière cyclique.

III.1 Analyses chimiques et colorimétrique

III.1.1 Résultats de l'analyse par fluorescence X (FX)

Les échantillons ayant servi pour l'analyse sont prélevés directement du tout-venant, préparés mécaniquement puis quartés pour être enfin analysés. Les résultats de l'analyse par FX sont regroupés dans le tableau ci-dessous avec :

- ES 01 : échantillon prélevé à partir du stock 01 ;
- ES 02 : échantillon prélevé à partir du stock 02 ;
- ES 03 : échantillon prélevé à partir du stock 03 ;
- ES 04 : échantillon prélevé à partir du stock 04.

Tableau 03 : Résultats des analyses chimiques du tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04). Par FX

Echt	Teneurs des éléments en %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CaCO ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	PAF
ES01	0.50	0.35	0.02	55.20	1.80	40.00	0.60	0.08	0.03	0.25	0.01
ES02	0.70	0.45	0.03	53.40	2.10	41.50	0.80	0.12	0.02	0.28	0.02
ES03	0.60	0.30	0.01	54.80	1.90	40.80	0.70	0.10	0.04	0.22	0.01
ES04	0.55	0.40	0.02	54.50	1.70	41.00	0.65	0.09	0.05	0.20	0.01

III.1.2 Résultats de l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)

Les analyses chimiques effectuées par absorption atomique ont été réalisées au niveau du laboratoire central de l'ORGM sur les échantillons analogues de ceux de la FX, les résultats dans le tableau 05.

Tableau 04 : Résultats des analyses chimiques du tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04). Par l'absorption atomique.

Echantillon	Teneurs des éléments en %			
	Fe	S	Pb	Zn
ES01	0.058	<0.05	<0.05	<0.05
ES02	0.016	<0.05	<0.05	0.0063
ES03	0.024	<0.05	<0.005	<0.005
ES04	0.029	<0.05	<0.005	0.0054

III.1.3 Degré de blancheur du tout-venant

De même pour cette analyse, elle a été effectuée sur les quatre (04) échantillons de Tout-venant stocké voir, ES01, ES02, ES03 et ES04, les résultats dans le tableau 05 :

Tableau 05 : Résultats du degré de blancheur de tout-venant de carbonate de calcium (ES01, ES02, ES03, ES04).

Echantillon	Degré de blancheur en %
ES 01	63
ES 02	70
ES 03	69
ES 04	69

III.1.4 Commentaire et interprétations des résultats chimiques et colorimétrique

L'analyse chimique du tout-venant des échantillons de (ES01, ES02, ES03, ES04). Montre que ces échantillons sont riches en CaCO_3 d'où l'intérêt porté pour ce minéral.

L'analyse des métaux lourds confirme que ces échantillons ne contiennent pas d'éléments nuisibles, uniquement une légère augmentation des oxydes de fer, cela permet

alors leur utilisation dans le domaine des industries agro-alimentaires.

Pour ce qui est du degré de blancheur de la substance il en résulte que l'échantillon ES 02, présente la valeur la plus élevée ; est cela pour être expliqué par le lieu d'extraction et la nature géologique, présentant plus au moins des impuretés à concentration différente d'un endroit à un autre dans un même gisement.

III.2. DISCUSSIONS DES RESULTATS DE LA CALCINATION DU CALCAIRE

III. 2. 1 Impact de la granulométrie sur la qualité de calcination

a) Présentation des résultats

Pour déterminer la perte au feu, nous utilisons l'équation suivante :

$$\text{Perte au feu (\%)} = \frac{(m1 - m2)}{m1} \times 100$$

Les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 06.

Tableau 06 : Résultats de l'essai de perte à feu à 1000°C pour les différentes tranches granulométriques de calcaire.

Tranches granulométriques	Poids initial m1 : g	Poids après calcination m2 : g	Perte au feu (%)
De 0 mm et 40 mm	41, 80	23,95	42,70%
	40, 25	22,85	43, 22%
	40, 95	23, 70	42,12%
De 40 mm à 70 mm	455, 75	256, 90	43, 58%
	411, 99	239, 40	41,89%
	398, 15	227, 30	42, 91%
Supérieure à 70 mm	724, 60	421, 85	41, 72%
	1457, 20	911, 50	37, 39%
	891, 35	528, 70	40, 68%

b) Commentaire et interprétation

D'après les résultats nous constatons une légère variation dans les pertes aux feux, ceci

dit que le choix doit se faire pour un meilleur rendement. Après vérification il nous a été permis de constater ce qui suit :

- La calcination des particules comprises entre les diamètres de 0 mm et 40 mm nous offre un rendement satisfaisant ; par contre sur le plan technique nous avons observé le phénomène dit d'obturation, situation due à la taille fine des particules, n'absorbant pas suffisamment la chaleur d'où une fluctuation de cette dernière, causant ainsi une perturbation de la pression et une surcalcination, conduisant à la perte des particules et à l'augmentation du risque d'explosion du four.
- La calcination des particules comprises entre les diamètres de 40 mm à 70 mm offre une calcination sans aucuns problèmes techniques.
- La calcination des particules dépassant la granulométrie de 70 mm, quant à elle ; offre une calcination accompagnée d'un problème au niveau du matériau, ce dernier renferme en lui un noyau restant non calciné, suite à la difficulté de pénétration de la chaleur jusqu'à son cœur, donc cela induit un problème de formation complète de la chaux vive.
- Au terme de ce test nous déduisant que la granulométrie influence sensiblement la calcination.

III. 2. 2 Impact de la température sur la qualité de calcination

a) Présentation des résultats

Les pierres de diamètre compris entre 40 mm et 70 mm ont été soumises à un processus de calcination à diverses températures pendant une durée de deux heures. Après cette étape, les pierres ont été pesées afin de déterminer leur masse (m_2). Les données obtenues ont été récapitulées dans le tableau 07 ;

Tableau 07 : Résultats de l'essai de perte à feu à différentes températures de calcination.

Température °C	Poids initial m_1 : g	Poids après calcination m_2 : g	Perte au feu (%)

800°C	404,67	386,20	4.56%
	362,69	337,5	6.94%
	440,14	423,08	3.87%
1000°C	454,55	254,8	43.93%
	419,49	234,67	44%
	572,11	326,38	42.29%
1200°C	473,89	266,74	43.71%
	389,12	219,17	43.67%
	343,52	192,47	43.97%

a) Commentaires et interprétation

- Chauffer la matière à une température de 800°C (figure 17), nous permet de constater une perte au feu non significatif, ce qui se traduit par une décarbonatation incomplète, la perte au feu est cependant, avoisine en moyenne les 5%. Ainsi il est clair qu'à ce seuil de température on ne peut pas parler du déclenchement de la calcination. Il est à signaler que le peu de perte correspond uniquement à la calcination de la couche superficielle du matériau.



Figure 17 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm à 70 mm calcinés à 800°C.

- A 1000°C (figure 18); nous observant une parfaite calcination du calcaire, les valeurs de perte au feu sont cohérentes et le matériau présente une certaine homogénéisation de son aspect, donc c'est une température optimale pour un meilleur rendement et une meilleure libération du CO₂.



Figure 18 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm à 70 mm calcine à 1000 °C.

- Une cassure effectuée sur le matériau chauffé à 1200°C (figure 19), met en évidence une sur-calcination due principalement à une surcuisant, ce phénomène engendre dans la plupart des temps une dégradation de l'état de four (problème technique) d'où le souci de colmatage.



Figure 19 : Echantillons de calcaire de classe granulométrique de 40 mm a 70 mm calcinés à 1200°C.

- En termes de ce test il en résulte que la température à retenir pour une meilleure calcination est celle de 1000°C.

III.3. DISCUSSIONS DES RESULTATS DE PREPARATION ET FORMULATION D'UN LAIT DE CHAUX

III. 3.1 Impact de la Granulométrie de la chaux vive sur la réactivité du lait de chaux

a) Présentation des résultats

Après avoir broyé et tamisé la chaux vive nous avons calculé les poids et les pourcentages des passants. Pour notre étude granulométrique nous avons pris 1000 grammes comme poids initial. Le tableau 08 ci-dessous résume les résultats obtenus.

Tableau 08 : Résultat du tamissage et identification des classes granulométriques.

Les classes granulométriques	C 01 : Supérieure à 02 mm	C 02 : De 0 mm à 2 mm	Refus
Poids des particules	287,67	274,77	113,91
Pourcentage des particules (%)	28,76%	27,47%	11,39%

Après avoir obtenue les classes granulométriques nous avons procédé à l'hydratation de 150 grammes de chaque classe granulométrique de la chaux vive avec un volume fixe du H₂O qui est de 600 ml. Pour évaluer la réactivité de ces dernières nous avons obtenu les temps notés t1, t2 et t3 respectivement pour le passage de la température de 20°C à 60 °C pour les classes granulométriques C 01, C 02 et C 03. Les résultats sont les suivants :

- Pour la classe granulométrique C 01 le temps t1 = 23 minutes
- Pour la classe granulométrique C 02 le temps t2 = 12 minutes
- Pour la classe granulométrique C 03 le temps t3 = 04 minutes

b) Commentaire et interprétation

1) La réactivité de la classe C 01, supérieure 0_500 µm s'est avérée insatisfaisante en raison de la présence fréquente de gros morceaux de calcaire non calciné, qui ne participent

pas à la réaction et réduisent ainsi la réactivité, entraînant une détérioration de la qualité du produit final.

2) La classe C 02, inférieure à <2 mm présente une réactivité conforme aux normes. L'unité CEVITAL a opté pour cette granulométrie car elle offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elle assure le bon fonctionnement de l'hydrateur. De plus, elle garantit une excellente qualité répondant aux exigences des clients.

3) La classe inférieure à < 500 µm offre la meilleure réactivité, ce qui se traduit par une qualité supérieure du produit. Cependant, cette granulométrie est difficile à manipuler à grande échelle industrielle car elle entraîne le colmatage de l'hydrateur, posant ainsi des problèmes de gestion.

III.3.2 La finesse de la chaux éteinte

a) Présentation des résultats

Suite à la procédure de tamisage, une évaluation de la réactivité a été réalisée pour chaque classe granulométrique, allant de 500µm à 80µm. Les résultats de ces tests ont été synthétisés dans le tableau 09 :

Tableau 09 : résultat de l'influence de la finesse sur la réactivité de la chaux éteinte.

Classe µm	De 400 µm à 500 µm	De 300 µm à 400 µm	De 200 µm à 300 µm	De 100 µm à 200 µm	De 80 µm à 100 µm	De 0 à 80 µm
Réactivité %	95.8	95.9	96.62	97.33	97.97	98.61

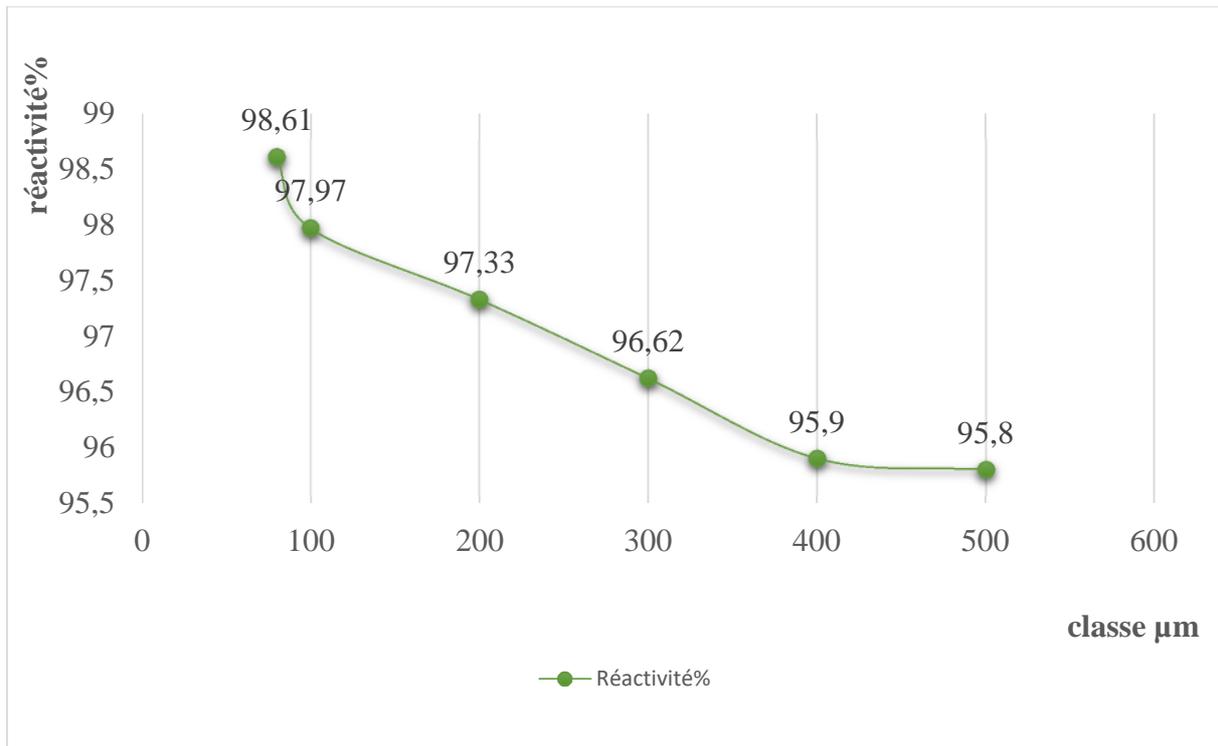


Figure 20 : l'évolution de la réactivité en fonction de la granulométrie de la chaux éteinte.

b) Commentaire et interprétation

Lorsque la finesse augmente, on observe une augmentation progressive de la réactivité, ce phénomène peut être expliqué par l'absence de calcaire non calciné dans les tranches fines, ce qui confère une meilleure qualité. Chez CEVITAL, la tranche de moins de 80 μm (<80 μm est considérée comme un produit de luxe dans les catégories de produits finis. Elle est appelée la "fleur de chaux" en raison de sa réactivité qui dépasse les 98%.

III.3.3 Quantité d'eau d'hydratation et son impact sur la réactivité

a) Présentation des résultats

Une fois que les échantillons ont été hydratés, nous procédons à un test de réactivité pour chacun d'entre eux, et les résultats obtenus sont données par le graphique ci-dessous. Ce test permet d'évaluer la réaction des échantillons suite à l'hydratation, offrant ainsi une mesure précise de leur comportement. Grâce à ces résultats, nous sommes en mesure d'analyser et de comparer les performances des différents échantillons, en identifiant d'éventuelles variations ou particularités.

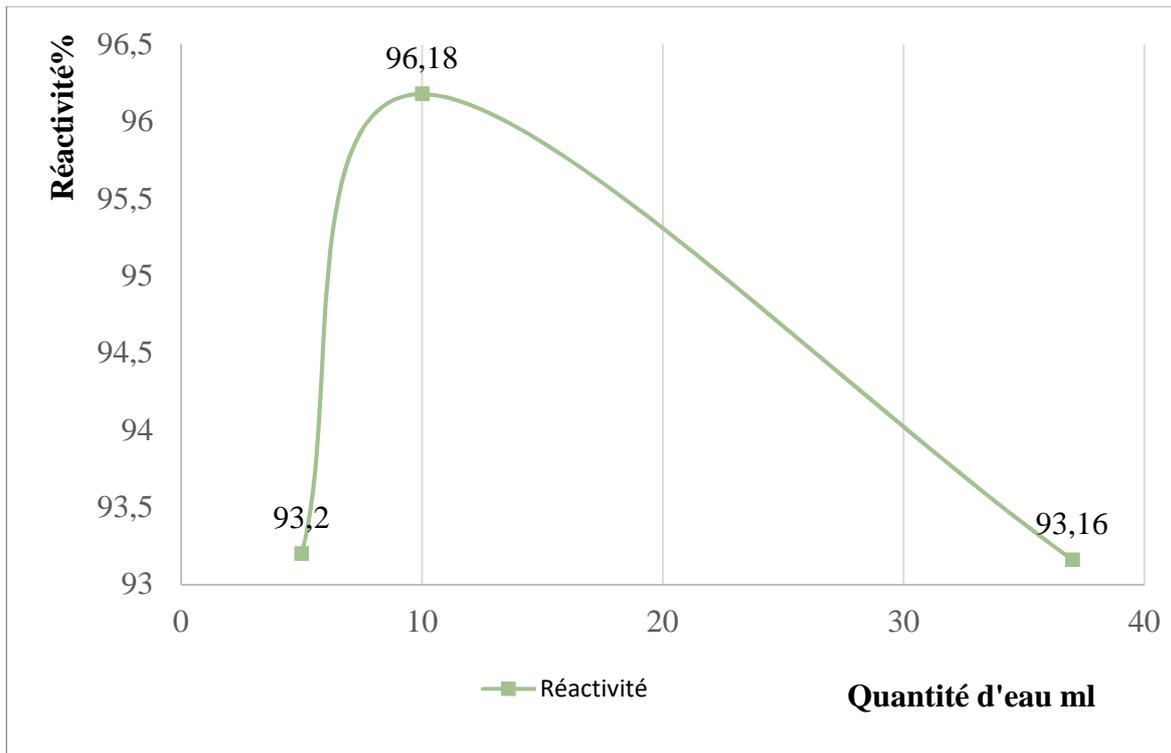


Figure 21 : L'évolution de la réactivité en fonction de la quantité d'eau ajoutée.

a) Commentaire et interprétation

1) En utilisant une quantité d'eau de seulement 5 ml pour 50 g de chaux vive, il y a une insuffisance d'eau pour hydrater la totalité de la chaux vive, ce qui entraîne la présence d'une quantité résiduelle de chaux vive non transformée en chaux éteinte. Cela a un impact sur la réactivité, qui mesure la quantité de chaux éteinte (Ca(OH)_2) active, ce qui se traduit par une mauvaise qualité du produit final.

2) En utilisant une quantité d'eau de 10 ml pour 50 g de chaux vive, nous obtenons la meilleure réactivité car toute la chaux vive est éteinte sans excès d'eau. Cette quantité expérimentale diffère de la quantité théorique indiquée dans la méthodologie de l'essai en raison de plusieurs facteurs :

- La température élevée et la pression dans l'hydrateur qui transforment l'excès d'eau en vapeur.
- La granulométrie et la qualité de la chaux vive.

2) Lorsque la quantité d'eau utilisée dépasse 10 ml pour 50 g de chaux vive, la réactivité

diminue progressivement en raison de la formation d'une pâte due à l'excès d'eau. Cette pâte ne se dissout pas lors du test de réactivité, comme le montre l'image 6.16. Dans des conditions réelles, un excès d'eau dans l'hydrateur entraîne un colmatage et l'arrêt complet du processus, c'est pourquoi la quantité d'eau est constamment surveillée dans la salle de contrôle.



Figure 22 : Chaux vive hydratée avec un excès d'eau, Cevital.

III.4. Résultat de pH et de la densité du lait de chaux

a) Présentation des résultats

Tableau 10 : Le résultat des pH et des densités mesurées sur une période de 05 jours sont donnés ci-dessous :

Echantillons	Lait de chaux	
	pH	Densité
Norme Min-Max	12,11-12,68	1,08-1,09
Jour		
1	12,48	1,088
2	12,48	1,088
3	12,12	1,093
4	12,16	1,096
5	11,98	1,084

Tableau II: Résultat de la moyenne du pH et de la densité du lait de chaux comparés aux normes suivis par le l'unité Cevital

Critères	pH	Densité
Norme (Max)	12,68	1,09
Norme (Min)	12,11	1,08
Moyenne	12,24	1,08

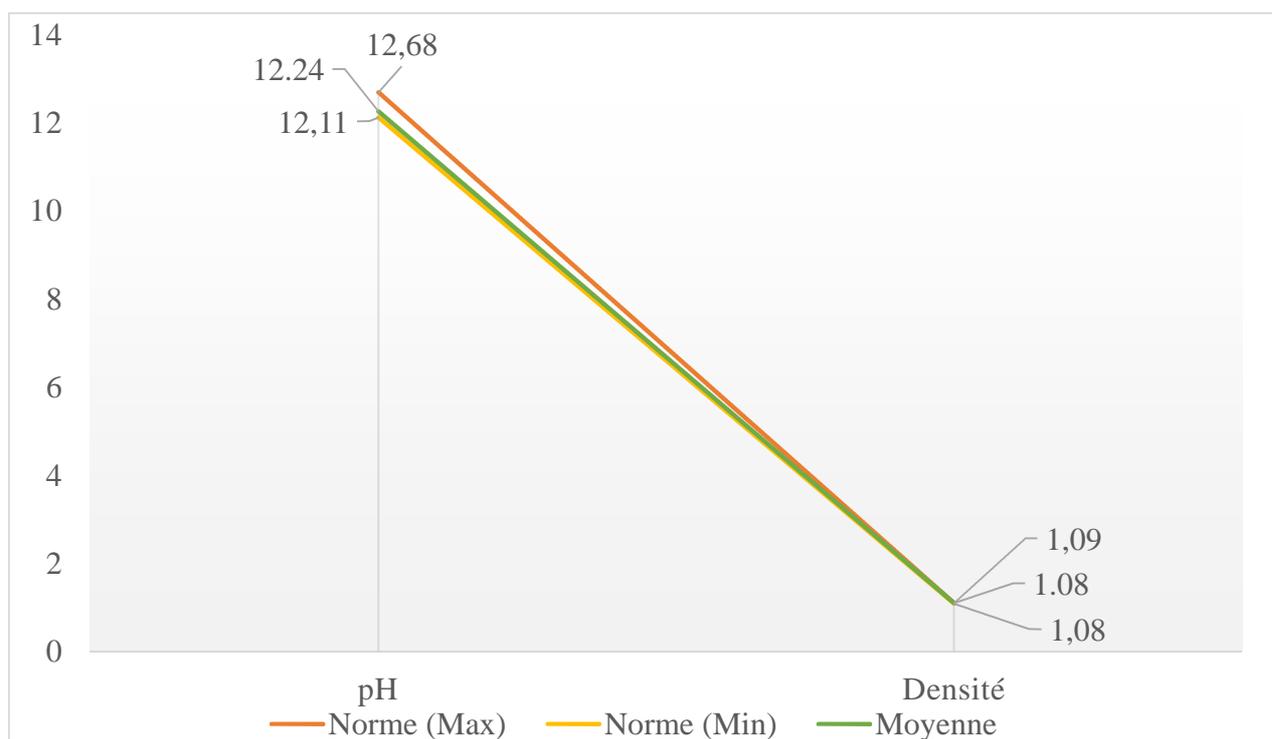


Figure 23 : Evolution du pH et de la densité du lait de chaux.

a) Commentaire et interprétation

Selon les résultats obtenus, les valeurs de pH et de densité du lait de CaO, du premier au cinquième jour de prélèvement, sont conformes à la norme. L'augmentation du pH, qui est de 12,24, peut s'expliquer par l'ajout de CaO, une substance basique, ce qui réduit la charge des protons et rend les milieux alcalins.

III.5 Résultat de pH et d'alcalinité du jus chaulé

a) Présentation des résultats

Tableau 12 : Le résultat de pH et de l'alcalinité mesurés sur une période de 05 jours sont donnés ci-dessous :

Echantillons	Jus chaulé	
	pH	Alcalinité g CaO/l
Norme Min-Max	10,71-10,99	4,5-5,5
Jour		
1	10,97	4,79
2	10,98	4,82
3	10,91	4,94
4	11,07	4,94
5	10,91	4,82

Tableau 13 : Résultat de la moyenne du pH et de l'alcalinité du jus chaulé.

Critères	pH	Alcalinité gcao/l
Norme (Max)	12	5,5
Norme (Min)	10,5	4,5
Moyenne	10,9	4,8

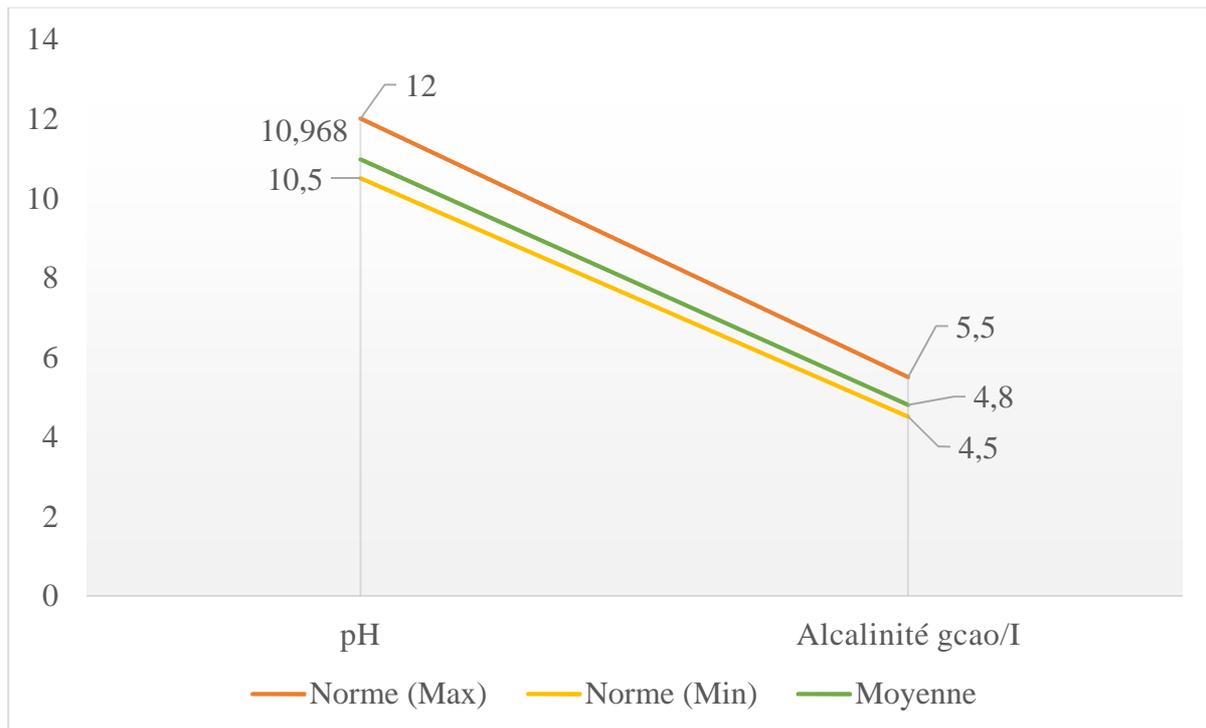


Figure 24 : Evolution du pH et de l'alcalinité en g de CAO/L du jus chaulé.

a) Commentaire et interprétation

Les résultats obtenus révèlent que les valeurs de pH et d'alcalinité du jus chaulé, prélevés du premier au cinquième jour, respectent les normes établies. Le pH, qui mesure l'acidité ou la basicité d'une substance, se situe dans une plage légèrement basique, variant de 10,968 à 12. Cela indique une tendance vers la basicité du jus chaulé.

En ce qui concerne l'alcalinité, qui mesure la concentration en ions hydroxydes dans la solution, les résultats démontrent des valeurs comprises entre 4,8 et 5,5 gCaO/L.

$$\text{Alcalinité (g/l)} = 1,4 V_{\text{HCl}} \times N_{\text{HCl}}$$

Lorsqu'on compare ces valeurs aux normes fixées, on constate que le jus chaulé répond aux critères établis. La limite maximale recommandée pour le pH est de 12, tandis que la limite minimale est de 10,5. Quant à l'alcalinité, la limite maximale est de 5,5 g CaO/L, et la limite minimale est de 4,5 g CaO/L.

En prenant en compte la moyenne des mesures, soit un pH de 10,968 et une alcalinité de 4,8 gCaO/L, on peut affirmer avec assurance que le jus chaulé se trouve dans une plage acceptable.

CONCLUSION

Les résultats des analyses chimiques et colorimétriques des échantillons, ainsi que les discussions sur les résultats de la calcination du calcaire et de la préparation du lait de chaux. Les analyses ont permis de caractériser la composition chimique et la qualité des échantillons.

Les discussions ont mis en évidence l'impact de la granulométrie et de la température sur la qualité de la calcination du calcaire, ainsi que l'influence de la granulométrie de la chaux vive, de la finesse de la chaux éteinte et de la quantité d'eau ajoutée sur la réactivité du lait de chaux. Les résultats du pH, de la densité, du degré de blancheur, du pH et de l'alcalinité ont également été présentés et discutés.

En résumé, ces analyses et discussions fournissent des informations pour optimiser les processus de production et garantir la qualité des produits finaux.

Conclusion Générale

En conclusion, cette étude a permis d'explorer en détail les paramètres clés affectant la qualité des carbonates de calcium et de la chaux, ainsi que leur utilisation dans différents secteurs industriels. Les résultats obtenus ont fourni des informations pour optimiser les processus de production et maximiser les performances des produits finis.

L'analyse de la calcination a révélé que la granulométrie et la température de calcination jouent un rôle essentiel dans la qualité des carbonates de calcium obtenus. Des particules plus fines et une température de calcination optimale ont conduit à des produits calcinés de haute qualité. Ces résultats soulignent l'importance de contrôler avec précision ces paramètres lors du processus de calcination afin de garantir la production de carbonates de calcium performant.

Par ailleurs, la granulométrie de la chaux vive a été identifiée comme un facteur clé influençant la réactivité du lait de chaux. Une granulométrie appropriée favorise une hydratation plus efficace, ce qui améliore la réactivité du lait de chaux dans diverses applications telles que l'épuration du jus de canne et les réglages du pH. De plus, la quantité d'eau ajoutée lors de l'hydratation a également un impact significatif sur la réactivité du lait de chaux. Il est essentiel de doser avec précision la quantité d'eau pour obtenir des résultats optimaux.

Les mesures de pH et de densité du lait de chaux se sont révélées être des paramètres fiables pour évaluer sa qualité. Des valeurs appropriées de pH et de densité sont essentielles pour assurer la stabilité et l'efficacité du lait de chaux dans ses diverses applications. Ces paramètres doivent être surveillés rigoureusement lors de la préparation et de l'utilisation du lait de chaux afin d'obtenir des performances optimales.

En ce qui concerne le chaulage du sirop de sucre, les mesures de pH et d'alcalinité du jus chaulé ont fourni des informations précieuses sur l'efficacité de ce processus. Des valeurs adéquates de pH et d'alcalinité indiquent une réaction de chaulage réussie, contribuant ainsi à la purification et à la stabilisation du jus chaulé.

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence l'importance de contrôler et d'optimiser ces paramètres lors de la production et de l'utilisation des carbonates de calcium et de la chaux. Une meilleure compréhension de ces paramètres permettra d'améliorer la qualité des produits finis, d'optimiser les processus de production et de promouvoir des pratiques durables et respectueuses de l'environnement.

Il est recommandé que les acteurs de l'industrie et de la recherche scientifique, continuent à approfondir ces paramètres et à explorer de nouvelles applications potentielles. En développant des techniques de contrôle plus précises et en mettant l'accent sur des pratiques respectueuses de l'environnement, il sera possible de maximiser les avantages des carbonates de calcium et de la chaux dans divers domaines industriels. Cette approche contribuera à l'évolution vers une industrie plus efficace, plus durable et plus respectueuse de l'environnement.

*Références
bibliographiques*

CHAPITRE I

- Alkattan, M., Oelkers, E.H., Dandurand, J.-L., Schott, J., 1998. An experimental study of calcite and limestone dissolution rates as a function of pH from -1 to 3 and temperature from 25 to 80 C. *Chem. Geol.* 151, 199–214.
- Azzeddine, M., 2015. L'acceptabilité sociale des projets miniers en Algérie : Cas de Ain Defla et Bejaia. *Eur. Sci. J.* 11.
- Baud, P., 1933. LA GRANDE INDUSTRIE CHIMIQUE FRANÇAISE SA DISTRIBUTION ET SON ÉTAT ACTUEL. Presented at the *Annales de Géographie*, JSTOR, pp. 127–141.
- Beierle, T.C., Cayford, J., 2002. Democracy in practice: public participation in environmental decisions. *Resources for the Future*.
- BURKINA, M.A., 2021. ACTUALISATION DU CADRE DE GESTION ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE (CGES).
- Carvalho, C., Silva, Z., Simão, J., 2018. Evaluation of Portuguese limestones' susceptibility to salt mist through laboratory testing. *Environ. Earth Sci.* 77, 1–15.
- Cnudde, V., Boone, M.N., 2013a. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Sci. Rev.* 123, 1–17.
- Cnudde, V., Boone, M.N., 2013b. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. *Earth-Sci. Rev.* 123, 1–17.
- Cotton, F.A., Wilkinson, G., Murillo, C.A., Bochmann, M., 1999. *Advanced inorganic chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- De Carvalho, L.M.J., De Castro, I.M., Da Silva, C.A.B., 2008. A study of retention of sugars in the process of clarification of pineapple juice (*Ananas comosus*, L. Merrill) by micro-and ultra-filtration. *J. Food Eng.* 87, 447–454.

Référence bibliographique

- Dickson, J., 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *J. Sediment. Res.* 36, 491–505.
- Folk, R.L., 1999. Nannobacteria and the precipitation of carbonate in unusual environments. *Sediment. Geol.* 126, 47–55.
- Folk, R.L., 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill publishing company.
- Ford, D., Williams, P.D., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons.
- Freestone, I.C., Leslie, K., Thirlwall, M., Gorin-Rosen, Y., 2003. Strontium isotopes in the investigation of early glass production: Byzantine and early Islamic glass from the Near East. *Archaeometry* 45, 19–32.
- Galetakis, M., Raka, S., 2004. Utilization of limestone dust for artificial stone production: an experimental approach. *Miner. Eng.* 17, 355–357.
- Ge, Y., Lokier, S.W., Hoffmann, R., Pederson, C.L., Neuser, R.D., Immenhauser, A., 2020. Composite micrite envelopes in the lagoon of Abu Dhabi and their application for the recognition of ancient firm-to hardgrounds. *Mar. Geol.* 423, 106141.
- Güven, G., Perendeci, A., Tanyolac, A., 2009. Electrochemical treatment of simulated beet sugar factory wastewater. *Chem. Eng. J.* 151, 149–159.
- Haerani, E., Maemunah, E., Hamid, N., Muslim, G.O., Muslim, D., Matsumoto, M., 2019. Geohazard Mitigation Based on Local Wisdom for Limestone Mining Site in Padalarang Area of West Java. Presented at the *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, p. 012028.
- Holness, M., Clemens, J., Vernon, R., 2018. How deceptive are microstructures in granitic rocks? Answers from integrated physical theory, phase equilibrium, and direct observations. *Contrib. Mineral. Petrol.* 173, 1–18.
- Jimoh, O.A., Ariffin, K.S., Hussin, H.B., Temitope, A.E., 2018. Synthesis of precipitated calcium carbonate: a review. *Carbonates Evaporites* 33, 331–346.

Référence bibliographique

- Jones, B., 2017. Review of calcium carbonate polymorph precipitation in spring systems. *Sediment. Geol.* 353, 64–75.
- Kesler, S.E., Simon, A.F., 2015. *Mineral resources, economics and the environment.* Cambridge University Press.
- Lee Jr, R.E., Wallerstein, I., 2015. *Overcoming the Two Cultures: Science vs. the Humanities in the Modern World-System.* Routledge.
- Li, F., 2009. Documenting accountability: environmental impact assessment in a Peruvian mining project. *PoLAR Polit. Leg. Anthropol. Rev.* 32, 218–236.
- Lu, H., Reddy, E.P., Smirniotis, P.G., 2006. Calcium oxide based sorbents for capture of carbon dioxide at high temperatures. *Ind. Eng. Chem. Res.* 45, 3944–3949.
- Masum, M., Uddin, N., Haque, N., Sabuj, N., Hasan, M.S., Sheik, R., 2016. Limestone deposits and its economic importance at Panchbibi area of Joypurhat District, Bangladesh. *Int J Econ Energy Env.* 1, 34–39.
- Mudoga, H., Yucel, H., Kincal, N., 2008. Decolorization of sugar syrups using commercial and sugar beet pulp based activated carbons. *Bioresour. Technol.* 99, 3528–3533.
- Pearson, M., 1990. The lime industry in Australia—an overview. *Aust. J. Hist. Archaeol.* 28–35.
- Prusti, P., Barik, K., Dash, N., Biswal, S., Meikap, B., 2021. Effect of limestone and dolomite flux on the quality of pellets using high LOI iron ore. *Powder Technol.* 379, 154–164.
- Rahman, M.J.J., Pownceby, M., Rana, M.S., 2022. Distribution and characterization of heavy minerals in Meghna River sand deposits, Bangladesh. *Ore Geol. Rev.* 143, 104773.
- Rein, P., Attard, R., 2007. *Cane sugar engineering.*
- Riding, R., 2012. *Calcareous algae and stromatolites.* Springer Science & Business

Media.

- Rokhmad, A., 2020. Configuration and the role of community leaders in the conflict of natural resources of limestone mining for the cement industry in Rembang Indonesia. *Int. J. Energy Econ. Policy*.
- Schmoker, J.W., Krystinik, K.B., Halley, R.B., 1985. Selected characteristics of limestone and dolomite reservoirs in the United States. *AAPG Bull.* 69, 733–741.
- Simandl, L., Simandl, G.J., Paradis, S., 2021. Economic Geology Models 5. Specialty, critical, battery, magnet and photovoltaic materials: Market facts, projections and implications for exploration and development. *Geosci. Can.* 48, 73–92.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., Chaipanich, A., Poon, C.S., 2014. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. *Constr. Build. Mater.* 66, 410–417.
- Toigo, C.V., 2022. Towards eco-friendly batteries: concepts for lithium and sodium ion batteries.
- Topcu, I.B., Bilir, T., Uygunoğlu, T., 2009. Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 1947–1953.
- Turgeon, F., n.d. RAPPORT D ACTIVITE.
- Van der Poel, P., 1998. Sugar technology. Beet and cane sugar manufacture/PW van der Poel, H. Schiweck, T. Schwartz. Berl. Verl. Dr Albert Vartens KG.
- Wang, H., Hou, P., Li, Q., Adu-Amankwah, S., Chen, H., Xie, N., Zhao, P., Huang, Y., Wang, S., Cheng, X., 2021. Synergistic effects of supplementary cementitious materials in limestone and calcined clay-replaced slag cement. *Constr. Build. Mater.* 282, 122648.
- Wang, S., Tokunaga, T.K., 2015. Capillary pressure–saturation relations for supercritical CO₂ and brine in limestone/dolomite sands: Implications for geologic carbon sequestration in carbonate reservoirs. *Environ. Sci. Technol.* 49, 7208–7217.
- Yamasaki, S., Takeda, A., Nunohara, K., Tsuchiya, N., 2013. Red soils derived from

limestone contain higher amounts of trace elements than those derived from various other parent materials. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59, 692–699.

- Zeller, E.J., Wray, J.L., 1956. Factors influencing precipitation of calcium carbonate. *AAPG Bull.* 40, 140–152.
- Arzat, A. 2005. Extraction et raffinage du sucre de canne. *Revue de l'ACER (centre de recherche, de développement et e transfert technologique en agriculture)*
- Berkati, S; Fella-Temzi, S. E; & Berkati, K. 2018. Suivi des paramètres physico-chimiques au cours du procédé de raffinage de sucre à l'unité CEVITAL.
- Burzawa, E, Heitz, F. 1995. La cristallisation du sucre: des bases théoriques à la production industrielle. *Industries alimentaires et agricoles*, 112(7), 522-532.
- Claus IV, E. Congrès International Technique et Chimique des Industries Agricoles, Bruxelles, 1935; E. Claus. *Centr.Zuckerind*, 45, 531.
- Mathlouthi, M et ROGÉ, B. 2004. Caking of white sugar and how to prevent it. In *Proc S AfrSugTechnolAss* (p. 78).
- Punidadas, P. 1990. Microfiltration tangentielle sur membrane minérale de produits sucrés (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires).

CHAPITRE II

- Martin et al. 2015. examinent la mesure de l'oxydabilité et du pH du jus chaulé dans les procédés de la chaux.
- Deb et al. 2007. présentent des informations sur la mesure du pH et de la densité du lait de chaux et sur les applications liées à la stabilisation des sols contaminés par des métaux lourds.
- L'American Public Health Association (APHA) .2017. fournit des méthodes standard pour l'examen et l'analyse de l'eau et des eaux usées, qui couvrent notamment les méthodes de mesure de l'alcalinité, du pH et de la densité.

Référence bibliographique

- Deb et al. 2007. présentent des informations sur la mesure du pH et de la densité du lait de chaux et sur les applications liées à la stabilisation des sols contaminés par des métaux lourds.
- STM C110-16, Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
Cette norme présente les méthodes de test pour l'analyse des échantillons de chaux vive, de chaux éteinte et de calcaire, y compris la granulométrie et la réactivité.
- Boynton, R. S. 1980. Chemistry and technology of lime and limestone. John Wiley & Sons. Ce livre fournit des informations sur la chimie et la technologie de la chaux et du calcaire, y compris la calcination du calcaire et les propriétés de la chaux vive et éteinte.
- Moropoulou, A., Bakolas, A., & Anagnostopoulou, S. 2005. Composite materials in ancient structures. *Cement and concrete research*, 35(8), 1535-1539. Cet article explore les matériaux composites utilisés dans les structures anciennes, notamment l'étude de la réactivité de la chaux vive et éteinte.

Annexes

Les normes :

| Recommandation pour la prescription

Conformément aux indications précédentes, il est recommandé de libellé les prescriptions relatives à la chaux de la façon suivante :

| Pour la chaux vive

- La chaux vive est de type **EN 459-1 CL 90-Q (R4, P2)**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

| Pour la chaux hydratée

- La chaux hydratée est de type **NF EN 459-1 CL 90-S**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

Dans le cas des enrobés bitumineux, deux modes d'introduction sont possibles :

- La chaux hydratée est directement incorporée dans la centrale d'enrobage via un silo dédié, auquel cas elle relève bien de la norme NF EN 459-1,
- La chaux hydratée est mélangée à un filler calcaire dans une installation industrielle spécifique. Elle est alors introduite sous forme de filler additivé (également appelé filler mixte ou filler actif) dans la centrale d'enrobage. Le filler additivé relève de la norme NF EN 13043, et sa teneur en chaux hydratée fixe alors sa dénomination (Ka_{10} , Ka_{20} , Ka_{25} ou $Ka_{Déclaré}$).

| Pour le lait de chaux

- Le lait de chaux est de type **NF EN 459-1 CL 90-S ML**, conformément à la norme NF EN 459-1, et est marquée CE.
- Une copie de la Déclaration des Performances est remise par le producteur à la commande, soit sous format papier, soit par voie électronique.

I.1 PRESENTATION DE L'UNITE DE FABRICATION DE LA CHAUX ET CO₂

I.1.1 localisation de l'unité four à chaux D'EL KHROUB

L'unité, four à chaux est située dans la zone industrielle EL TAREF Ben BADIS Constantine. Elle est localisée entre 36°13'46,08" et 36°16'05,02" de latitude Nord, et 6°43'47.94" et 6°46'7.29" de longitude Est, avec une altitude moyenne de 655m.

Elle est située à :

- 20 km au sud-est de Constantine ;
- 6 km de la commune D'EL KHROUB ;
- 1 km à l'est de la bifurcation des routes nationales N°03 Constantine-Batna- Tébessa et N°20 Constantine-Guelma ;
- Au Sud-ouest de Djebel Oum Settat.



Figure I.1 : Géo-positionnement de l'unité four à chaux d'El Khroub.



Figure I.2 : silos de stockage de la chaux d'usine D'El Khroub.

I.1.2 Organigramme du l'unité four à chaux D'El Khroub

Le groupe Cevital englobe 26 filiales aux activités diversifiées : agro-alimentaire, grande distribution, automobile, industrie, services et immobilier.

L'unité de four à chaux CEVITAL fait partie de la filiale agroalimentaire SPA depuis le 24 juillet 2002, le capital social de la SPA a été porté à 6 milliards de dinars (6.000.000.000 DA), L'organigramme de l'unité est représenté dans la figure suivante :

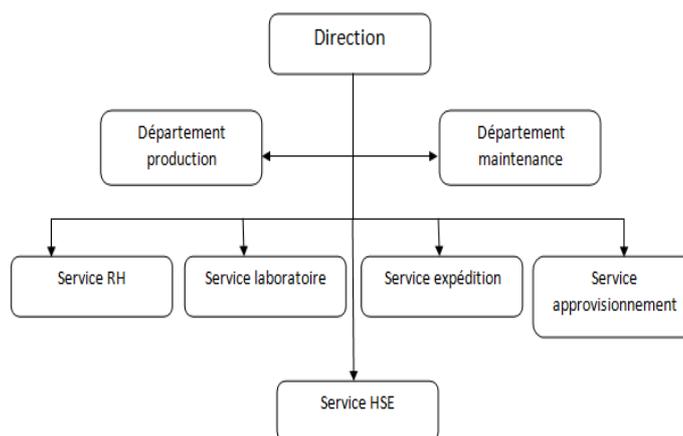


Figure I. 3 : organigramme de l'unité four à chaux d'El Khroub.

I.1.3 Présentation du l'unité four à chaux D'El Khroub

L'unité four à chaux D'EL KHROUB propose des produits de qualité optimale certifiés par l'organisme de certification européen ; dont le code de certification est le : **EINECS 215-137-3** et ce pour une utilisation avec plus de réussite et de sérénité dans différents domaines d'utilisation à savoir L'industrie sucrière, sidérurgie, agriculture, stabilisation des sols, traitement des eaux...

La chaux D'El Khroub est disponible sous 3 formats : chaux vive, chaux éteinte (trois classes) et fleur de chaux. L'usine produit la chaux à base de la calcite (CaCO_3) :



La matière première provient de l'entreprise nationale des granulats entreprise nationale des granulats unité El Khroub.

II.1 PRESENTATION DU COMPLEXE DE PRODUCTION DU SUCRE

II.1.1 Complexe agro-alimentaire CEVITAL

Le complexe Cevital est un groupe familial de plusieurs sociétés, créé par des fonds privés en 1998, le complexe est parmi les entreprises algériennes qui ont vu le jour dès l'entrée du pays dans l'économie du marché. Disposant de technologies de pointe, le complexe de production se situe à proximité du port de Bejaia et s'étend sur une superficie de 75 Hectares grâce à sa situation géographique exceptionnelle et à ses importantes capacités d'accostage, d'entreposage et de transit, le port de Bejaia est devenu un pôle économique de première importance.

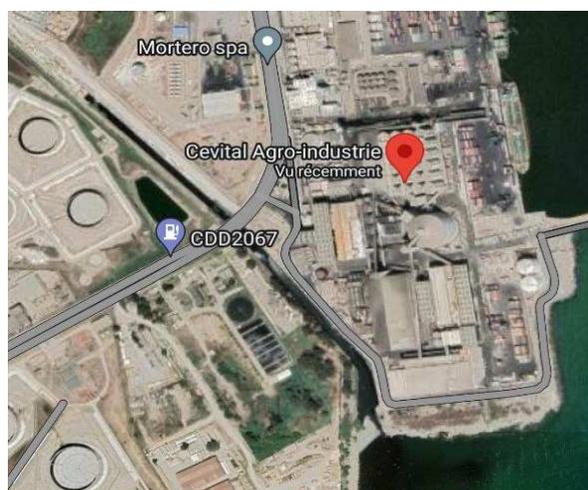


Figure II.1 : Géo-positionnement du complexe agro-alimentaire Cevital (Bejaia).

Le groupe CEVITAL contribue largement au développement de l'industrie agroalimentaire nationale et vise à s'imposer dans le marché national et international en offrant une large gamme de produits de qualité.

L'ensemble des activités de CEVITAL sont réparties en 5 secteurs d'activités :

- L'Industrie Métallurgique ;
- L'Information et la Communication ;
- La Distribution Automobile ;
- Le Transport Terrestre et Maritime ;

- L'Industrie Agro-alimentaire.

L'unité four à chaux d'El Khroub est une filière du secteur Agroalimentaire créée essentiellement pour suffire les besoins de la raffinerie de sucre (la chaux joue un rôle essentiel dans le raffinage de sucre), d'où l'importance de présenter l'unité chaux (chapitre précédent).

II.1.2 Historique du groupe CEVITAL

Le groupe Cevital est passé par plusieurs étapes d'évolution, pour devenir l'actuel complexe avec toutes ses filières, pour ce, il a marqué plusieurs dates importantes dans son cycle de développement :

- 1998 : Création de CEVITAL SPA : Industrie Agroalimentaire ;
- 2000 : Création de NOLIS : transport maritime ;
- 2005 : Acquisition de Lalla Khedîdja ;
- Création de CEVICO : Fabrication de bâtiment préfabriqué en béton ;
- 2007 : Création du groupe Cevital ;
- 2010 : Création de SODI Automotive ;
- 2011 : Création de PCA-crétion de sierra CEVITAL ;
- 2012 : Installation de l'unité, four à chaux D'EL KHROUB Constantine ;
- **2013** : Début de production de la chaux.

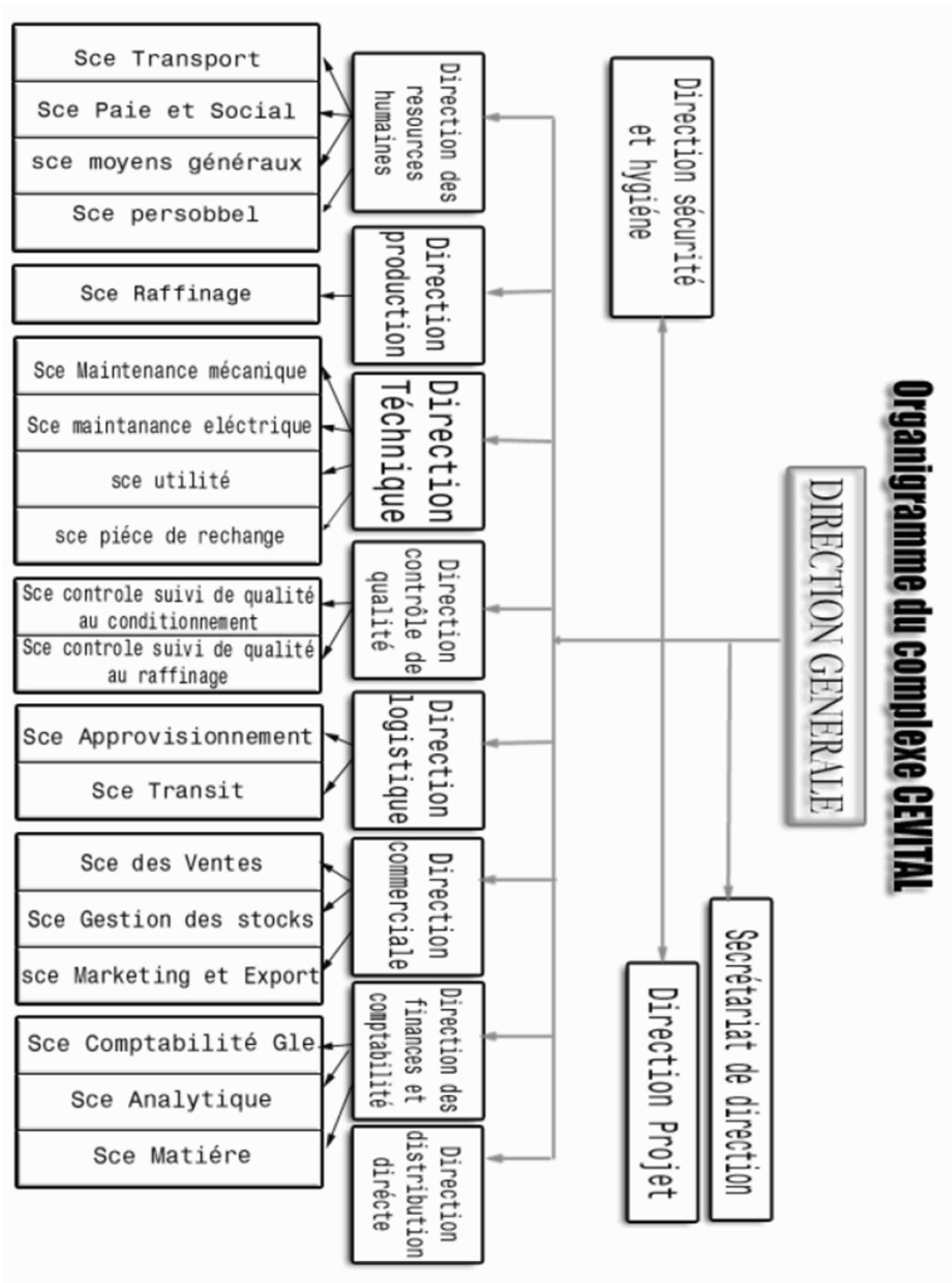


Figure 2 : organigramme du complexe Cevital bejaia

This comprehensive dissertation delves into the study of calcium carbonates, highlighting the physical and chemical properties of limestone and lime, as well as their diverse applications in various fields. The literature review provides a precise definition of calcium carbonates and explores their geological origin. Furthermore, it thoroughly examines the physical and chemical properties of these compounds, with a focus on their reactivity and industrial and agro-food applications. The global exploitation of limestone is analyzed, with specific attention given to its exploitation in Algeria. Additionally, the use of lime in the agro-food sector, particularly in the refining process of brown sugar, is extensively investigated.

The practical part of the dissertation focuses on the implementation of limestone calcination and quicklime slaking techniques, as well as the preparation and formulation of lime milk. Experiments are conducted to evaluate the impact of various parameters such as particle size, temperature, and added water quantity on the quality and reactivity of calcined limestone and lime milk. The obtained results are carefully analyzed to gain a better understanding of the influence of these parameters on product reactivity and quality.

In conclusion, this dissertation provides an in-depth understanding of calcium carbonates and their applications. The acquired knowledge is crucial for enhancing industrial and agro-food processes utilizing these materials while promoting more sustainable and environmentally friendly exploitation practices. Future research prospects may include optimizing calcination and slaking techniques, as well as exploring new technologies aimed at reducing the environmental impact of limestone extraction.

Keywords: calcium carbonates, limestone, lime, physical properties, chemical properties, applications, exploitation, calcination, slaking, lime milk, brown sugar refining, sustainable development.

Résumé

Dans le cadre de notre travail nous nous sommes intéressés à la valorisation de la chaux vive dans le domaine de l'agroalimentaire, plus particulièrement le raffinage des sucres. Au cours de notre expérimentation nous avons effectué des essais aux niveaux de l'entreprise agroalimentaire CEVITAL. Les résultats finaux ont révélé l'important rôle de la granulométrie, la finesse des particules, la quantité d'eau ajoutée ; le pF et la densité sur la qualité du produit final. Nous avons suivi la qualité du produit durant l'étape de calcination du calcaire, l'élaboration de la chaux vive, la formulation du lait de chaux et finalement le chaulage du jus.

Mots clés : calcaire, chaux, calcination, lait de chaux, chaulage.

Abstract

As part of our work, we have focused on the valorization of quicklime in the agri-food industry, specifically in sugar refining. During our experimentation, we conducted trials at the agri-food company CEVITAL. The final results revealed the significant role of particle size, particle fineness, the amount of added water, pF, and density on the quality of the final product. We monitored the product quality during the limestone calcination stage, the production of quicklime, the formulation of lime milk, and finally the liming of the juice.

Keywords : limestone, lime, calcination, lime milk, liming.