



UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :  
2020-2021

N° D'ORDRE : 0422/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :  
CI 04 16 008731

LABORATOIRE :  
SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

## MASTER

Physique chimie

Option: Physique-Chimie appliquée à l'environnement

THÈME:

**CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE  
LA CENDRE DE BAGASSE DE CANNE A SUCRE  
ISSUE DE L'UNITE AGRICOLE INTEGREE  
SUCRIVOIRE DE ZUENOULA**

Présenté par :

**ZAMBLE Irié Christian**

JURY

Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

Encadreur : Mme TOGNONVI Tohoué Monique Epse SOCADJO, Maître-Assistant, Université Peleforo Gon Couibaly

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant, Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement

le : 07/10/2021



**UNIVERSITE  
JEAN LOROUGNON GUEDE**

**UFR ENVIRONNEMENT**

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et  
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :  
2020-2021

N° D'ORDRE : 0422/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :  
CI 04 16 008731

# MASTER

Physique Chimie

Option: Physique-Chimie appliquée à l'environnement

THÈME:

**CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE LA  
CENDRE DE BAGASSE DE CANNE A SUCRE  
ISSUE DE L'UNITE AGRICOLE INTEGREE  
SUCRIVOIRE DE ZUENOULA**

LABORATOIRE :  
SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT

Présenté par :

**ZAMBLE Irié Christian**

JURY

Président : M. KOUADIO Zilé Alex, Maître de Conférences, Université Jean Lorougnon Guédé

Directeur : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences, Université Jean LOROUGNON Guédé

Encadreur : Mme TOGNONVI Tohoué Monique Epse SOCADJO, Maître-Assistant, Université Peleforo Gon Coulibaly

Examineur : M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant, Université Jean Lorougnon Guédé

Soutenu publiquement

le: 07/10/2021

## Dédicace

Je dédie cet ouvrage accompagné d'un profond amour à :

Mon très cher père ZAMBLE Bi Irié Charles qui n'a cessé de me soutenir dans toutes mes entreprises.

Ma très chère mère YOUAN Lou ZOUNAN Clémentine qui n'a cessé de multiplier des prières à mon intention.

Mes très chers oncles ZAMBLE Bi Zamblé Eugène & ZAMBLE Bi Tizié Fernand ainsi qu'à toutes ces personnes qui ont toujours cru en moi.

## Remerciements

Ce mémoire représente bien plus que des travaux. Ce mémoire est la finalité de cinq longues et dures années d'études. C'est pourquoi je tiens tout d'abord à rendre gloire à Dieu sans qui je ne serais arrivé là.

Je voudrais exprimer ma gratitude au Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE, Professeur Titulaire, Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé.

Je voudrais exprimer ma gratitude au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, Directeur de l'UFR Environnement.

Je voudrais exprimer ma gratitude au Docteur KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences pour avoir accepté la direction scientifique de ce mémoire.

Ce travail a été réalisé grâce à l'encadrement, la rigueur, la patience, la bonté, la promptitude, la disponibilité, la gentillesse et surtout l'amour du travail bien fait de Docteur TOGNONVI Tohoue Monique Epse SOCADJO, Maître-Assistante, mon encadrante à qui mes remerciements les plus distingués et sincères sont adressés.

Dans cette même lignée, je remercie très chaleureusement Docteur KOUASSI Séka Simplicie, Maître de Conférence de m'avoir co-encadré pour l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier du plus profond de mon cœur M. EBLIN Sampah Georges, Maître-Assistant pour avoir examiné avec un œil très pointu ce présent travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit des équipes des laboratoires dans lesquelles j'ai effectué mes expériences de même qu'à tous les enseignants du département de Physique-Chimie Mathématiques et Informatique (PCMI), plus particulièrement à ceux du département de chimie.

Je ne saurai finir ces remerciements sans mentionner mes très chers parents, mes frères et sœurs, mes amis, toute la promotion 2016-2017 ainsi que toutes les personnes qui ont participé d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

## TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS</b> .....	v
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	vi
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	vii
<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS</b> .....	3
<b>1.1 Généralités sur l'industrie sucrière</b> .....	3
<b>1.1.1 Définition</b> .....	3
<b>1.1.2 Production agricole de la canne à sucre</b> .....	6
<b>1.1.3 Sous-produits de la canne à sucre</b> .....	9
<b>1.1.3.1 Sucre</b> .....	9
<b>1.1.3.2 Mélasse</b> .....	10
<b>1.1.3.3 Bagasse</b> .....	10
<b>1.2 Cendres de bagasse de canne à sucre</b> .....	11
<b>1.2.1 Processus d'obtention des CBCS</b> .....	11
<b>1.2.2 Valorisation des CBCS</b> .....	13
<b>1.2.2.1 CBCS dans la construction</b> .....	13
<b>1.2.2.2 CBCS dans l'agriculture</b> .....	14
<b>PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....	15
<b>2.1 Matériel</b> .....	15
<b>2.1.1 Matière minérale</b> .....	15
<b>2.1.2 Matériel d'analyse</b> .....	16
<b>2.1.2.1 Réactifs chimiques et solvants</b> .....	16
<b>2.1.2.2 Appareillage</b> .....	16
<b>2.2 Méthodes</b> .....	17
<b>2.2.1 Méthodes de caractérisation physique</b> .....	17
<b>2.2.1.1 Analyse granulométrique</b> .....	17
<b>2.2.1.2 Mesure de la porosité</b> .....	22
<b>2.2.1.3 Détermination de la densité</b> .....	23

2.2.2 Méthodes de caractérisation chimique.....	24
2.2.2.1 Mesure de la valeur du pH à l'aide du pH-mètre .....	24
2.2.2.2 Détermination de la perte au feu .....	26
2.2.2.3 Détermination du taux d'humidité.....	27
2.2.3 Méthodes de caractérisation minéralogique.....	28
2.2.3.1 Observation microscopique .....	28
2.2.3.2 Diffraction des rayons X (DRX) .....	29
<b>PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>30</b>
3.1 Résultats .....	30
3.1.1 Caractéristique physique .....	30
3.1.1.1 Granulométrie.....	30
3.1.1.2 Densité et porosité .....	31
3.1.2 Caractéristique chimique et minéralogique .....	31
3.1.2.1 Teneur en eau et en matière organique.....	31
3.1.2.2 Composition minéralogique .....	31
3.1.2.3 Composition chimique .....	33
3.1.2.4 Caractère acido-basique .....	34
3.2 Discussion.....	35
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>39</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>40</b>

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

<b>ASTM C618</b>	: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete
<b>CBCS</b>	: Cendre de bagasse de canne à sucre
<b>CVCT</b>	: Cendres volantes des centrales thermiques
<b>DRX</b>	: Diffraction des rayons X
<b>FAO-ONU</b>	: Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
<b>UAI</b>	: Unité Agricole Intégrée
<b>UFR</b>	: Unité de Formation et de Recherche

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b>	: Caractéristique de la canne à sucre et de la betterave sucrière (Arzate, 2005) .....	5
<b>Tableau II</b>	: Composition chimique des principaux produits de la canne (Archimède et al., 2011).....	8
<b>Tableau III</b>	: Composition du vesou (Arzate, 2005).....	9
<b>Tableau IV</b>	: Composition chimique de cendre de bagasse de canne à sucre (Salim et al., 2014).....	12
<b>Tableau V</b>	: Propriété des particules .....	30
<b>Tableau VI</b>	: Densité et porosité de la cendre de bagasse.....	31
<b>Tableau VII</b>	: Teneur en eau et perte au feu de la CBCS .....	31
<b>Tableau VIII</b>	: Composition minéralogique de la fraction fine .....	32
<b>Tableau IX</b>	: Composition chimique de la cendre de bagasse .....	33



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Production de canne à sucre (tonnes) en Côte d'Ivoire (FAO-ONU, 2021).....	4
<b>Figure 2</b> : Processus de fabrication du sucre (Bernard et al., 1991).....	6
<b>Figure 3</b> : Tiges de canne à sucre en maturation .....	7
<b>Figure 4</b> : Evolution de la composition chimique de la canne avec l'âge (Archimède et al., 2011).....	8
<b>Figure 5</b> : Bagasse de canne à sucre .....	11
<b>Figure 6</b> : Diffractogramme X d'une cendre de bagasse de canne à sucre (Jagadesh et al., 2015) .....	13
<b>Figure 7</b> : Cendre de bagasse de canne à sucre .....	15
<b>Figure 8</b> : Carte de l'Unité Agricole Intégrée (UAI) de Zuenoula .....	16
<b>Figure 9</b> : Colonne de tamis .....	19
<b>Figure 10</b> : Densimètre .....	22
<b>Figure 11</b> : Eprouvette contenant l'échantillon lors de la mesure .....	23
<b>Figure 12</b> : Bol de 200 cm <sup>3</sup> contenant l'échantillon .....	24
<b>Figure 13</b> : pH-mètre .....	25
<b>Figure 14</b> : Four classique (A) et cendre de bagasse à la sortie du four (B) .....	27
<b>Figure 15</b> : Etuve utilisé pour déterminer le taux d'humidité .....	28
<b>Figure 16</b> : Microscope optique.....	29
<b>Figure 17</b> : Diffractomètre.....	30
<b>Figure 18</b> : Courbe granulométrique de la cendre de bagasse.....	30
<b>Figure 19</b> : Diffractogramme X de la cendre de bagasse .....	32
<b>Figure 20</b> : CBCS au microscope .....	33
<b>Figure 21</b> : Evolution du pH en fonction du temps de la suspension contenant la cendre de bagasse .....	34

# **INTRODUCTION**

## Introduction

Dans tout processus mené par des industries commerciales, les principes de conservation et d'utilisation des ressources naturelles doivent être pris en compte. Par conséquent, il est nécessaire d'envisager une nouvelle approche des matériaux et des processus de production qui repose sur la réduction de l'extraction des ressources naturelles et des déchets générés. L'industrie du ciment est une industrie clé pour le développement durable de n'importe quel pays, elle peut être considérée comme l'épine dorsale du développement (El-Haggar, 2007). Avec l'augmentation des activités industrielles à travers le monde, il est impératif de rechercher des matériaux pouvant remplacer certains des composants actuels du ciment commercial et pouvant réduire les coûts de production et l'emprunte carbone élevé du béton sans affecter sa qualité (Chusilp *et al.*, 2009).

Une alternative importante trouvée dans la recherche sur ce sujet est l'utilisation des déchets agricoles en remplacement partiel du ciment dans la production du béton. En effet, l'incorporation de cendres issues de la combustion des balles de riz est une pratique fréquente en raison de l'activité pouzzolanique des cendres qui réagissent avec la chaux formé lors de l'hydratation du ciment (Das *et al.*, 2018). D'autres déchets agricoles sont testés pour la production de béton tels que la moelle de coco, la sciure de bois, les granulés de liège (Ramaswany *et al.*, 1983). L'un des déchets les plus prometteurs est celui issu de l'industrie sucrière plus particulièrement la cendre obtenue à partir de la combustion de la bagasse de canne à sucre car celui-ci a des propriétés chimiques qui lui permet de réagir efficacement en milieu cimentaire (Faria *et al.*, 2012).

SUCRIVOIRE de Zuenoula est l'une des principales industries sucrières de la Côte d'Ivoire. Bien que cette industrie produise peu de déchet physique, la réutilisation de la bagasse comme combustible dans les chaudières pour la production du sucre génère une quantité non négligeable de cendres. Ces cendres n'étant pas valorisées, occupent de l'espace qui pourrait servir à d'autres fins. Aussi, l'inhalation des micros particules de ces cendres dans l'air par la population peut affecter sa santé (Kouamé *et al.*, 2014). Son utilisation comme ajout cimentaire selon la littérature a donné des résultats prometteurs. Plusieurs auteurs (Martirena *et al.*, 1998 ; Chusilp *et al.*, 2009 ; Fairbairn *et al.*, 2010 ; Faria *et al.*, 2012) ont étudié ce type de cendre dans la préparation de mélanges de ciments Portland et de liants chaux-pouzzolane. Ces auteurs ont indiqué la pertinence des cendres de bagasse de canne à sucre comme matériau ayant une capacité de réagir avec la chaux en présence d'eau pour former du silicate de calcium hydrate qui s'apparente au CsH formé.

Cependant, sa composition pouvant varier d'un pays à l'autre, les propriétés du matériau final pourraient aussi variées.

## Introduction

Dans le but de valoriser les déchets agro-industriels des industries sucrières de la Côte d'Ivoire, une étude portant sur la cendre de bagasse a été initiée. Elle vise à évaluer la possible valorisation des cendres de bagasse de canne à sucre issues des chaudières de SUCRIVOIRE de Zuénoula dans les matériaux de construction.

Comme objectifs spécifiques, il s'agit de :

- réaliser des tests de caractérisation physique ;
- réaliser des tests de caractérisation minéralogique ;
- réaliser des tests de caractérisation chimique.

Ce mémoire s'articule autour de trois parties. La première est consacrée à la revue bibliographique qui traite des généralités sur l'industrie sucrière en général et sur la cendre de bagasse de canne à sucre en particulier. La deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour la caractérisation de la cendre de bagasse de canne à sucre. La troisième partie présente les résultats acquis au cours de ce travail suivis de leur discussion.

Le mémoire se termine par une conclusion suivie de perspectives.

# **PARTIE 1 : GÉNÉRALITÉS**

### 1.1 Généralités sur l'industrie sucrière

#### 1.1.1 Définition

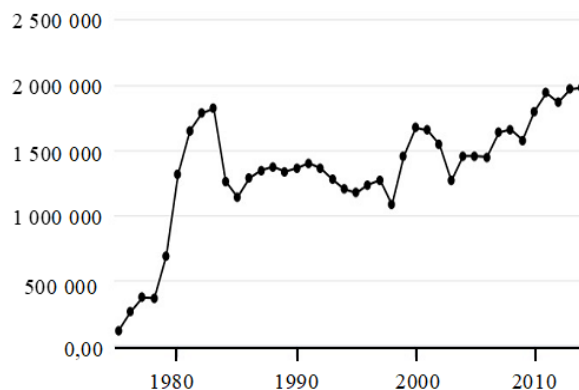
L'industrie sucrière est l'industrie qui produit du sucre à partir de plantes telles que la canne à sucre ou la betterave.

- La canne à sucre

La canne à sucre est une plante cultivée appartenant au genre *Saccharum* (famille des Poaceae ou graminées, sous-famille des Panicoideae), cultivée principalement pour la production du sucre (sucre de canne complet ou non) extrait des tiges (ou chaumes). Historiquement quatre espèces de cannes ont été domestiquées, principalement *Saccharum officinarum*, mais les cultivars modernes forment un ensemble d'hybrides complexes issus principalement de croisements entre *Saccharum officinarum* et *Saccharum spontaneum*, avec des contributions de *Saccharum robustum*, *Saccharum sinense*, *Saccharum barberi*, et de plusieurs genres apparentés tels que *Miscanthus*, *Narenga* et *Erianthus* (Paterson *et al.*, 2012).

La canne à sucre était jusqu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle la seule source importante de sucre et représente encore, au XXI<sup>e</sup> siècle, 70 à 80 % de la production de sucre. Avec un volume annuel de production supérieur à 1,9 milliard de tonnes (matière fraîche), soit environ 570 millions de tonnes (matière sèche), c'est une des principales plantes cultivées au niveau mondial (FAO-ONU, 2021).

Selon la FAO (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), la Côte d'Ivoire, enregistre une moyenne annuelle de production de canne à sucre de 1 346 045,15 pour l'ensemble de la période 1975-2014 (Figure 1) (FAO-ONU, 2021). Le changement enregistré entre la première et la dernière année est de 1628 %. C'est en 2014 qu'on enregistre la valeur la plus élevée (1 980 250 tonnes) et c'est en 1975 qu'on enregistre la valeur la plus basse (114 613 tonnes). Sur la base des données disponibles, on peut estimer qu'en 2025 la valeur devrait osciller autour de 2 796 929 (FAO-ONU, 2021).



**Figure 1** : Production de canne à sucre (tonnes) en Côte d'Ivoire (FAO-ONU, 2021)

- La betterave sucrière

La betterave sucrière « *Beta vulgaris* » est une espèce bisannuelle. En Europe métropolitaine, on produit presque uniquement du sucre à partir des betteraves. Elle se caractérise par d'assez bons rendements (entre 50 et 90 t/ha) variant selon la quantité du semis, du sol, des soins et du climat. La récolte s'effectue à partir de septembre avec des durées de campagne de deux à trois mois en moyenne par an.

Le sucre quant à lui est un produit alimentaire d'origine végétale, composé pour l'essentiel de saccharose et diverses substances naturelles appartenant à la classe des glucides responsables d'une des quatre saveurs gustatives fondamentales (le sucré). Le saccharose utilisé pour la fabrication du sucre est extrait de la betterave sucrière ou de la canne à sucre. Ces plantes possèdent la particularité d'avoir comme glucide de réserve le saccharose résultant de la synthèse chlorophyllienne. Celles-ci accumulent le sucre, au niveau de la racine pour la betterave ou de la tige pour la canne.

L'industrie sucrière se développe d'abord avec la canne à sucre dans les colonies européennes des Caraïbes et des Mascareignes, puis est relayée par l'industrie betteravière.

L'industrie du sucre de canne est considérée comme un secteur mûr reposant sur les principes de base développés au XIX<sup>ème</sup> siècle (Arzate, 2005). L'industrie sucrière est l'une des plus importantes dans l'agriculture apportant une contribution importante à l'économie nationale de nombreux pays en développement notamment la Côte d'Ivoire. Cette industrie ne produisait que du sucre mais aujourd'hui, les industries sucrières sont impliquées dans la production de sucre,

## Généralités

d'électricité et d'éthanol. Ainsi, l'industrie sucrière est maintenant appelé industrie de la canne (Ramjeawon, 2008). Les cinq premières nations, à savoir l'Inde, le Brésil, la Thaïlande, l'Australie et la Chine, représentaient près de 40 % de la production totale de sucre dans le monde. Le sucre est produit dans environ 115 pays du monde. Parmi eux, 67 pays produisent du sucre à partir de la canne à sucre, 39 à partir de la betterave sucrière et 9 pays à partir de la canne à sucre et de la betterave sucrière. Autrement dit, le sucre est produit à 70 % à partir de la canne à sucre et à 30 % à partir de la betterave sucrière et du manioc, etc. (Contreras *et al.*, 2009).

La composition de la canne à sucre et de la betterave sucrière est donnée dans le tableau I.

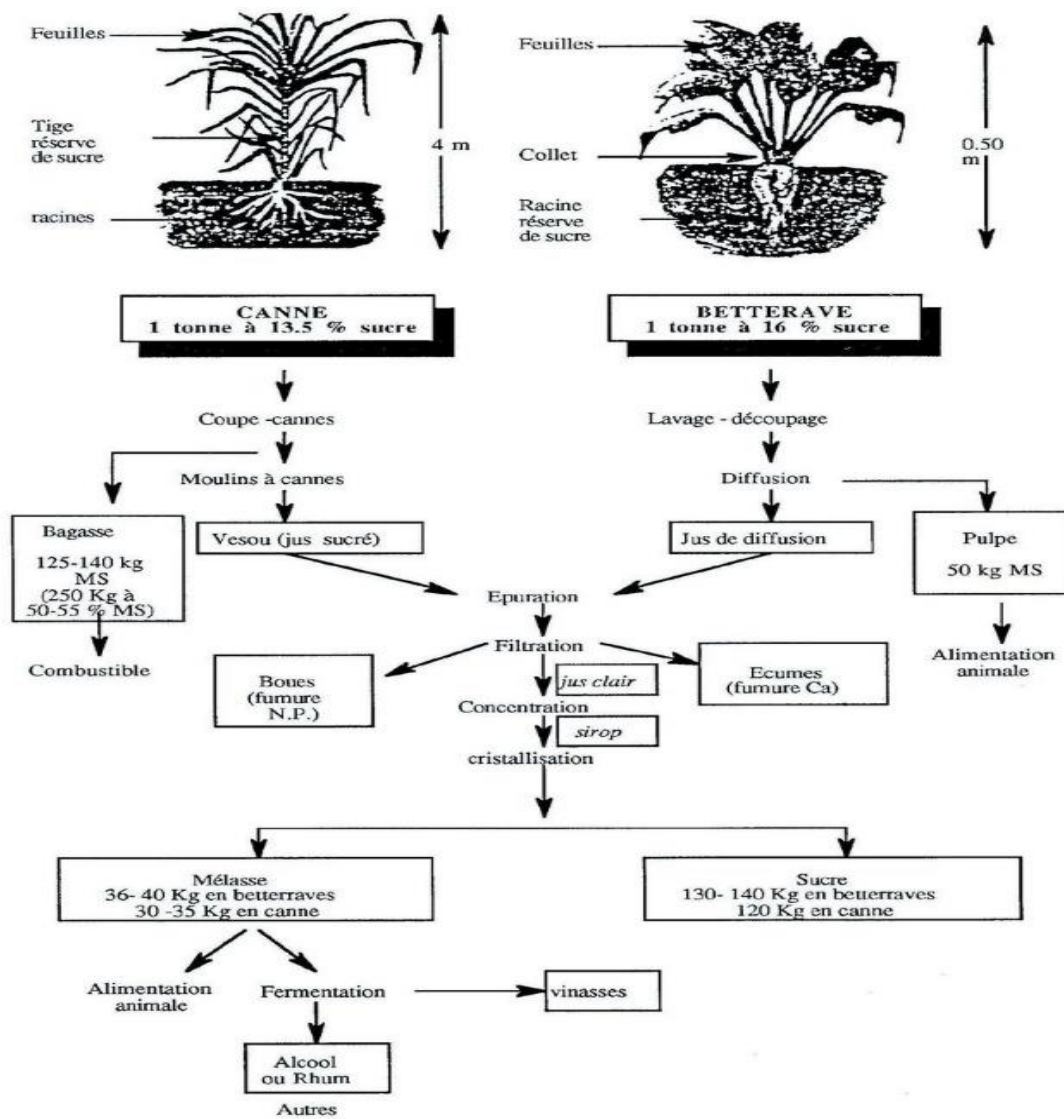
**Tableau I :** Caractéristique de la canne à sucre et de la betterave sucrière (Arzate, 2005)

Canne à sucre	Betterave sucrière
71% d'eau	76% d'eau
14% de saccharose	15 à 18% de saccharose
13 à 14% de fibre ligneuse	4 à 5% de pulpe
2 à 3% d'impureté	2 à 3% de non sucre

Le processus de fabrication du sucre à partir de la betterave sucrière et de la canne à sucre dans les industries sucrières est illustré dans la figure 2.



## Généralités



**Figure 2 :** Processus de fabrication du sucre (Bernard *et al.*, 1991)

Cette industrie éprouve des changements, y compris des développements technologiques. L'économie d'énergie a toujours été un point clé dans l'avancement de la technologie. De plus, l'effet des opérations de la sucrerie sur l'environnement ont certainement influencé l'utilisation de nouvelles et diverses technologies. Toutefois, ce travail s'est focalisé sur la canne à sucre et ses sous-produits.

### 1.1.2 Production agricole de la canne à sucre

Connus depuis la préhistoire, la canne à sucre et le miel furent longtemps les seules sources de sucre de l'humanité. Le roseau sucré a d'abord été utilisé à l'état sauvage avant d'être cultivé.

## Généralités

Des indices qui permettent de remonter son origine botanique au « *Saccharum robustum* » de la Nouvelle Guinée datent de plus de 12.000 années (Arzate, 2005).

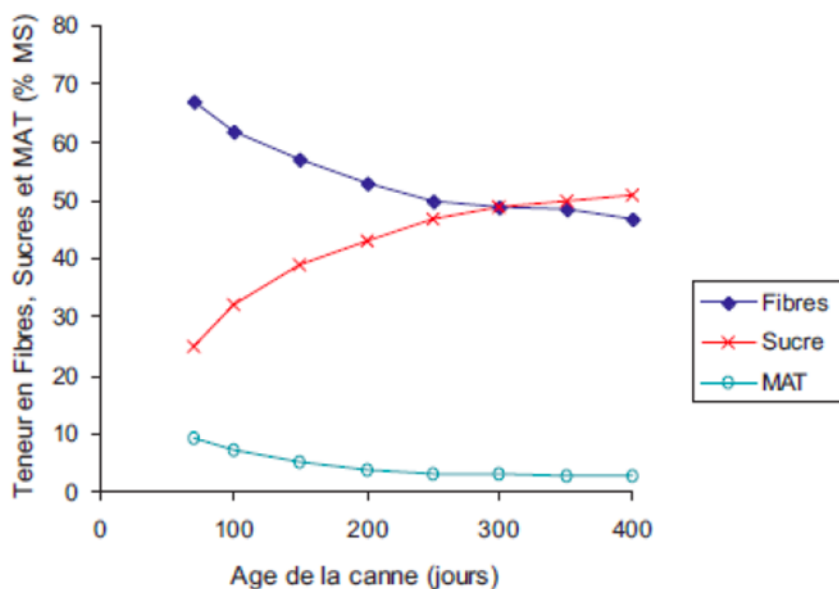
Les principaux constituants de la canne à sucre sont le sucre et les fibres. La composition moyenne de la canne à sucre est présentée dans le tableau I.

La culture de la canne à sucre s'étend dans les régions situées de part et d'autre de l'Équateur, entre les latitudes 35° Nord et 30° Sud (régions tropicales et subtropicales). Ainsi, on la trouve en Floride, au Texas, en Louisiane, aux Antilles, à Hawaï, en Amérique Centrale et en Amérique du Sud jusqu'au Nord de l'Argentine, en Indonésie, en Thaïlande, aux Philippines, en Chine, en Inde, dans les îles de l'Océan Indien, au Sud de l'Espagne, en Australie et, plus récemment, en Afrique. Sa croissance végétative est favorisée par des températures élevées, entre 26 °C et 34 °C. Par contre elle ne croît plus à des températures inférieures à 20 °C et elle ne tolère pas le gel (Arzate, 2005).

La plante se reproduit par bouturage, à partir d'un morceau de tige comportant au moins un nœud. La plantation se fait au début de la saison des pluies. Selon les pays, elle est manuelle ou mécanisée. La canne à sucre demande un sol aéré, assez riche en phosphore et bien irrigué (Arzate, 2005). La chaleur, la luminosité et l'ensoleillement sont également les facteurs clés pour une bonne récolte. La canne entière peut être utilisée à différents âges mais il faut privilégier la canne mure (10-12 mois) (Archimède *et al.*, 2011). Les figures 3 et 4 montrent respectivement des tiges de canne à sucre en maturation et l'évolution de la composition chimique de la canne avec l'âge.



**Figure 3** : Tiges de canne à sucre en maturation



**Figure 4** : Evolution de la composition chimique de la canne avec l'âge (Archimède *et al.*, 2011)

La culture de la canne à sucre permet de produire une gamme très variée d'aliments : canne entière, têtes de canne (amarres), jus de canne, sucre, mélasse, pailles de canne, bagasse. La canne entière, les amarres, les pailles et le jus de canne sont disponibles sur l'exploitation agricole. Le sucre, la mélasse et la bagasse sont des produits de l'agro-industrie. La composition chimique des principaux produits de la canne est indiquée dans le tableau II.

**Tableau II** : Composition chimique des principaux produits de la canne (Archimède *et al.*, 2011)

	Canne entière	Tiges	Amarres	Jus	Bagasse	Mélasse
Matière sèche (MS)	30-33	30-32	27-32	18-20	50-70	72-76
Matière organique/MS	92-94	94-95	90-93			
Minéraux/MS	6-8	5-6	7-10	1,5-2,5		14-16
Matière azotée totale/MS	2,5-3	1,5-2	4-7	1,2-1,6	2-4	4-5
Fibre détergente neutre/MS	58-65	47-48	62-68		86-88	
Fibre détergente acide/MS	31-33	28-38	38-42		54-56	
Détergent acide lignine/MS			4-6		9-11	
Détergent neutre soluble/MS			32-37	73-75		73-75

### 1.1.3 Sous-produits de la canne à sucre

La production de la canne à sucre suit un procédé bien établi en plusieurs étapes qui sont : l'extraction, l'épuration, l'évaporation, la cristallisation, le malaxage, le turbinage, le séchage et l'emballage-entreposage. Comme toute technologie de transformation de matières premières agricoles, la production de la canne à sucre génère des sous-produits qui peuvent être utilisés à d'autres fins utiles. Les différents coproduits sont entre autre la bagasse et la mélasse.

#### 1.1.3.1 Sucre

La canne brute subit une série de broyage dans des moulins donnant ainsi un liquide sucré appelé le « vesou ». Ce liquide est récupéré et analysé en laboratoire afin de déterminer sa teneur en sucre. Le tableau III montre la composition moyenne du vesou :

**Tableau III** : Composition du vesou (Arzate, 2005)

Composant	Teneur (%)
Eau	82,5
Saccharose	14
Sucres réducteurs	1,6
Composés organiques	1,8
Composés inorganiques	0,1
Total	100

Le vesou qui contient un grand nombre d'impuretés subit une épuration par tamisage, puis par chauffage et enfin par ajout de chaux (chaulage) pour une alcalinisation (pH supérieur à 8). Il est ensuite porté à ébullition (105 °C) pour favoriser l'insolubilisation du floculat. La décantation du vesou permet alors de récupérer du jus clair exempt d'impuretés. Les impuretés ou boues récupérées au fond du décanteur sont mélangées avec la fine bagasse (adjuvant de filtration) et sont filtrées sur des filtres rotatifs sous vide. Le jus obtenu est renvoyé en épuration, tandis que la boue (ou écumes) devient un sous-produit (Archimède *et al.*, 2011).

Le chauffage du jus clair à différentes températures dans des évaporateurs à pression réduite permet d'éliminer l'eau sous forme de vapeur et d'obtenir le sirop. Ce dernier est chauffé à 55 °C et à pression réduite et se transforme en une masse pâteuse (masse-cuite) qui renferme des cristaux de sucre et un liquide visqueux appelé « liqueur-mère ». La masse-cuite est malaxée et turbinée dans

une centrifugeuse afin de séparer les cristaux de sucre et le sirop épuisé. On obtient le sucre de premier jet. Le sirop épuisé est malaxé et turbiné à nouveau pour obtenir le sucre de deuxième jet (Archimède *et al.*, 2011). Le sirop est encore malaxé et turbiné une deuxième fois pour l'obtention du sucre de troisième jet et de la mélasse. Les cristaux de sucre sont séchés dans des granulateurs à tambour. On obtient ainsi le sucre brut qui peut être consommé tel quel ou être raffiné dans des raffineries.

### **1.1.3.2 Mélasse**

La mélasse est le sucre non cristallisé obtenu après la cuisson du jus de canne lors de la fabrication du sucre dans les usines. La mélasse se présente sous forme d'un résidu sirupeux, pâteux visqueux, de coloration brun noirâtre, incristallisable, obtenu après le turbinage de la masse cuite du troisième jet (Archimède *et al.*, 2011). De manière générale nous pouvons définir la mélasse comme étant la quantité de saccharose retenu par le non sucre. La mélasse contient environ 25 % d'eau (Archimède *et al.*, 2011) C'est un aliment hautement énergétique contenant du saccharose non cristallisé (30 % de la matière sèche), des sucres réducteurs (25 % de la matière sèche) et d'autres substances glucidiques. La mélasse est particulièrement pauvre en azote : 25 g de N par kilo de mélasse brut (INRA, 1988). La teneur en fibres de la mélasse est très négligeable. Une bonne partie de la mélasse produite par les sucreries est utilisée pour la production du rhum industriel. Une autre fraction est utilisée dans l'alimentation des animaux et une petite partie se retrouve sur les tablettes des supermarchés pour la consommation humaine. La mélasse peut aussi être utilisée pour la culture des levures ainsi que, pour la production de divers produits, tels que l'acide acétique (vinaigre), l'acide citrique, le glycérol, l'acide aconitique, le glutamate, la dextrane, l'acide itaconique, la lysine et l'éthanol (Arzate, 2005).

### **1.1.3.3 Bagasse**

La bagasse est le résidu fibreux obtenu après extraction du jus de la tige de canne. Le rendement en bagasse est d'environ 300 kg de matière sèche par tonne de cannes broyée (Archimède *et al.*, 2011). La figure 5 montre la bagasse de canne à sucre.



**Figure 5** : Bagasse de canne à sucre

Elle est la fraction la plus « pauvre » des sous-produits de la canne. Formée de fibres végétales broyées, la bagasse peut représenter jusqu'à 30 % de la matière issue de la canne. Elle renferme en moyenne 45 % d'eau, 48,5 % de fibres et 2,5 % de matière dissoute (Arzate, 2005). La bagasse est généralement utilisée comme source de combustible pour la sucrerie. Elle sert également de fourrage pour les animaux et d'engrais. Plusieurs nouvelles applications ont été développées pour la bagasse : la fabrication de papier, carton et panneaux agglomérés ; la fabrication du furfural et l'utilisation comme source d'énergie pour des centrales charbon-bagasse (Arzate, 2005).

Les coproduits de l'industrie sucrière sont très intéressants. Par ailleurs, la diversification des techniques d'obtention des coproduits amène à des déchets parfois complexes à éliminer. Certains sont considérés comme néfastes pour l'environnement. On peut citer les boues d'épuration et les cendres de bagasse de canne à sucre. Les boues d'épuration contiennent une quantité importante de substances organiques, dont des cires et des graisses. Elles sont utilisées dans certains pays comme fertilisant de sols cultivables (Arzate, 2005).

La suite de ce mémoire s'adresse tout particulièrement aux cendres de bagasse qui sont des déchets issus de chaudières. Les chaudières sont des centrales thermiques qui ont pour rôle de produire de l'énergie, de la vapeur pour la sucrerie et de l'électricité. Après alimentation de ces chaudières par de la bagasse, du bois, etc., il ressort un déchet appelé cendre.

## **1.2 Cendres de bagasse de canne à sucre**

### **1.2.1 Processus d'obtention des CBCS**

Dans le cadre du processus de production industrielle du sucre, les tiges de canne à sucre sont broyées pour extraire le jus, le résidu fibreux restant, appelé bagasse, est l'un des produits les plus précieux de l'industrie sucrière car son pouvoir calorifique net est d'environ 8000 kJ/kg (Batra *et*

*al.*, 2008). Ces fibres de bagasse sont donc utilisées comme combustible pour alimenter la centrale thermique réduisant ainsi la quantité d'autres sources non renouvelables notamment le bois.

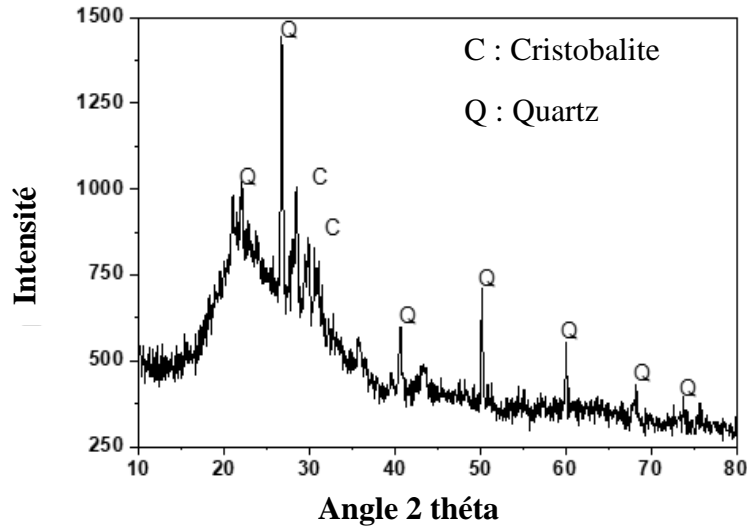
Pour obtenir les CBCS, la bagasse est brûlée dans des chaudières fonctionnant en général à des températures autour de 700 °C et 900 °C pour produire de la vapeur et de l'énergie utile pour les processus et les besoins de l'usine (Souza *et al.*, 2011). L'efficacité des chaudières utilisées dans les usines est généralement de 60 à 70 % parce que la bagasse est très fibreuse, elle présente une faible densité, une humidité élevée et nécessite un combustible comme le charbon pour sa combustion (Rasul & Rudolph, 2000). Ainsi, il contient de grandes quantités de carbone non brûlé (Martirena *et al.*, 1998 ; Chusilp *et al.*, 2009).

Les CBCS sont constitués essentiellement de matière minérale (la matière grise) riche en silice et de matière noirâtre. Le tableau IV indique la composition chimique typique de cendres de bagasse de canne à sucre (Salim *et al.*, 2014).

**Tableau IV** : Composition chimique de cendre de bagasse de canne à sucre (Salim *et al.*, 2014)

Minéraux	Pourcentage (%)
$SiO_2$	73
$Al_2O_3$	6,7
$Fe_2O_3$	6,3
CaO	2,8
MgO	3,2
$P_2O_5$	4,0
$Na_2O$	1,1
$K_2O$	2,4
Perte au feu	0,9

La matière minérale semble être essentiellement de la silice sous forme amorphe et/ou cristallisée. La forme cristalline serait du quartz et/ou cristobalite (Jagadesh *et al.*, 2015). Ces cendres sont peu solubles dans l'eau. Cependant, elles pourraient être réactives en milieu alcalin tel que le milieu cimentaire en raison de la phase amorphe. La figure 6 montre le diffractogramme X d'une cendre de bagasse de canne à sucre.



**Figure 6** : Diffractogramme X d'une cendre de bagasse de canne à sucre (Jagadesh *et al.*, 2015)

## 1.2.2 Valorisation des CBCS

### 1.2.2.1 CBCS dans la construction

Les cendres de bagasse sont riches en silice. De récentes études ont montré que les CBCS ont une grande réactivité à l'égard de la chaux et du ciment. Elles peuvent donc être efficacement valorisées dans le béton en remplacement partiel du ciment Portland (Martirena *et al.*, 1998 ; Paya *et al.*, 2002 ; Ganesan *et al.*, 2007 ; Chusilp *et al.*, 2009 ; Fairbairn *et al.*, 2010 ; Cordeiro *et al.*, 2008, 2009, 2012 ; Jimenez *et al.*, 2013). Les CBCS peuvent potentiellement remplacer le ciment jusqu'à concurrence de 20 % (Ganesan *et al.*, 2007 ; Cordeiro *et al.*, 2009). L'utilisation de ce matériau comme additif pour produire des briques d'argile et des tuiles de toit a également été signalée (Souza *et al.*, 2011 ; Faria *et al.*, 2012). Il convient de noter que les propriétés chimiques, minéralogiques et pozzolaniques des CBCS dépendent du processus industriel à partir duquel ils ont été obtenus (Cordeiro, 2009 ; Frias *et al.*, 2011). Les CBCS de qualité inférieure, en particulier les cendres avec des niveaux élevés de charbon non brûlé, sont suggérées pour être utilisées comme matériau inerte, en particulier comme remplacement d'agrégats fins dans le béton (Sales *et al.*, 2010).

De plus, les résultats obtenus par (Payà *et al.*, 2002 ; Walter & Heber, 2021) ont confirmés l'utilisation potentielle des cendres de bagasse de canne à sucre en remplacement partielle du ciment Portland dans la production de mortier. La CBCS présente les propriétés physiques et



chimiques d'un matériau pouzzolanique mis en évidence par des tests physico-chimiques et par le test de la thermogravimétrie.

### **1.2.2.2 CBCS dans l'agriculture**

Outre le domaine de la construction, les CBCS sont utilisées dans d'autres domaines tels que l'agriculture. En effet, la cendre de bagasse de canne à sucre possède un pH alcalin variant entre 7,5 à 11,5 (Aneeza, 2010) et peut de ce fait, être utilisée comme amendement pour corriger l'acidité dans les sols. Les études au laboratoire ont également démontré que la cendre de bagasse était capable de fortement immobiliser par adsorption, les herbicides atrazine et hexazinone avec des valeurs de  $K_m$  (coefficients d'absorption) de 0,13 pour atrazine et 0,32 pour hexazinone, rendant minime le risque de transfert de ces herbicides vers la nappe souterraine (Aneeza, 2010). Les cendres de bagasse peuvent être utiles en tant qu'amendement calcique ou comme engrais phosphorique (Aneeza, 2010). Outre ces avantages, les cendres conduisent à un ameublissement du sol et à une amélioration de sa rétention d'eau (Aneeza, 2010).

Après méthanisation, les boues résiduelles peuvent être mélangé avec les cendres issues de la combustion pour être épandues et servir d'amendement organique. Pas mal d'études ont été réalisées en Europe (Perez *et al.*, 2001), aux Etats-Unis (Overcash *et al.*, 2005), en Australie (Cameron *et al.*, 1997) en Afrique du Sud (Korentajer, 1991) et même à l'île Maurice (Toory *et al.*, 2003) sur la disposition des boues d'épuration et des eaux usées municipales dans les champs agricoles. Toutes ces études ont mis en exergue la forte valeur agronomique des boues d'épuration.

# **PARTIE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

### 2.1 Matériel

Cette partie décrit la matière minérale, le matériel d'analyse ainsi que les méthodes utilisées pour la caractérisation de la cendre de bagasse de canne à sucre.

#### 2.1.1 Matière minérale

- **Présentation de l'échantillon**

L'échantillon utilisé dans cette étude est de la cendre de bagasse de canne à sucre (CBCS) collectée à l'Unité Agricole Intégrée (UAI) SUCRIVOIRE de Zuenoula (Figure 7). C'est un déchet issu de la combustion de la bagasse de canne à sucre utilisée comme combustible pour alimenter la chaudière de l'unité.



**Figure 7** : Cendre de bagasse de canne à sucre

- **Présentation de la zone d'étude**

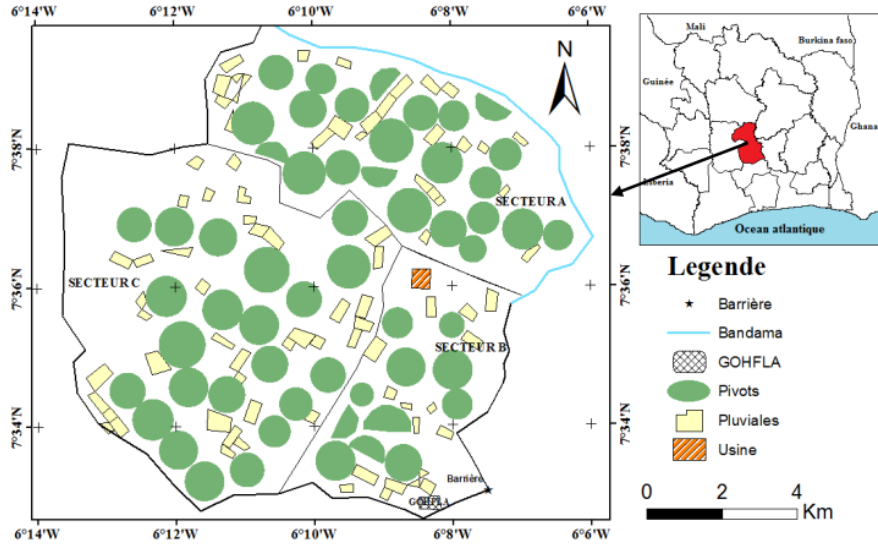
L'UAI est située dans la localité de Zuenoula dans le Centre-ouest de la Côte d'Ivoire à 400 km d'Abidjan. Cette unité agro-industrielle est située à 25 km au Nord de Zuenoula (Figure 8). Ses coordonnées géographiques sont : de (7°30', 7°40') de latitude Nord, (6°50', 6°15') de longitude Ouest, avec une altitude de 209 m (Péné & Assa, 2003). La campagne de production de sucre s'étend sur une période de sept mois (de septembre à mars) par année.

L'unité agricole intégrée de Zuenoula comprend deux chaudières à bagasse de type DENAEYER, chacune de capacité de 65 T/h de vapeur avec des caractéristiques suivante :

- Pression sortie surchauffeur: 29 bars effectifs
- Température vapeur surchauffeur: 380 °C.

## Matériel et méthodes

Issue de ces chaudières, la cendre de bagasse a été prélevée sur le tas à l'intérieur d'une des chaudières en grande quantité soit 7 Kg à la fin de la campagne sucrière de 2020. Ces cendres sont issues de la combustion à 1100 °C de la bagasse.



### 2.1.2 Matériel d'analyse

#### 2.1.2.1 Réactifs chimiques et solvants

Ils se composent de :

- défloculant dosée à 5% d'hexamétaphosphate de sodium qui nous a permis de détacher les particules ;
- eau distillée et eau de robinet qui nous a permis de faire les mélanges.

#### 2.1.2.2 Appareillage

Ils se composent de :

- balance qui nous a permis de peser un échantillon ;
- colonne de tamis qui nous a permis de déterminer les différentes tailles des particules ;
- densimètre de type torpille pour la détermination de la densité ;
- microscope optique pour l'observation des détails de l'échantillon ;
- éprouvette pour la détermination de volume des pores de l'échantillon après décantation ;

## Matériel et méthodes

- agitateur manuel pour mélanger un échantillon ;
- agitateur mécanique (un mixeur d'une puissance de 400 W) pour accentuer le détachement des particules de notre échantillon ;
- thermomètre pour déterminer la température ;
- chronomètre à la seconde pour déterminer le temps ;
- pH-mètre pour la détermination du pH ;
- bol de 200 cm<sup>3</sup> ;
- creuset en porcelaine ;
- dessiccateur pour le refroidissement d'un échantillon ;
- four classique pour calciner un échantillon ;
- étuve pour sécher un échantillon.

## 2.2 Méthodes

### 2.2.1 Méthodes de caractérisation physique

Les tests réalisés lors de la caractérisation physique sont détaillés dans la suite du mémoire.

#### 2.2.1.1 Analyse granulométrique

##### a- Granulométrie par tamisage : fraction grossière

###### ● Définition et but de l'essai

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

###### ● Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé à l'intérieur du tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par vibration manuelle ou mécanique de la colonne de tamis.

###### ● Conduite de l'essai

## Matériel et méthodes

Le matériau sec, de masse 200 g est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,125 mm et 0,063 mm). En partie inférieure, on dispose d'un tamis de 63  $\mu\text{m}$  surmontant un fond étanche afin de récupérer la fraction fine. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'éviter toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera tamisat le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis. Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la main jusqu'à ce que les refus ne varient plus de 1 % entre deux séquences de vibrations. Le refus du tamis ayant la plus grande taille est pesé. Soit  $R_1$  la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé. Soit  $R_2$  la masse du deuxième refus. La somme  $R_1 + R_2$  représente le refus cumulé sur le deuxième tamis. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés  $R_n$  aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisat présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

Les résultats des refus sont exprimés en pourcentage de la masse sèche. Les pourcentages des refus cumulés, ou ceux des tamisats cumulés, sont représentés sous la forme d'une courbe granulométrique en portant les ouvertures des tamis en abscisse, sur une échelle logarithmique de base 2, et les pourcentages en ordonnée, sur une échelle arithmétique. La figure 9 présente une colonne de tamis.



**Figure 9** : Colonne de tamis

### **b- Granulométrie par sédimentométrie : fraction fine**

Le protocole est la référence Standard Test Method for particle-Size Analysis of Soils (ASTMD 422).

#### **• Définition et but de l'essai**

L'analyse granulométrique par sédimentométrie s'adresse à des échantillons ne contenant que des éléments de diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire ce qui est désigné sous l'appellation de particules fines. Elle complète l'analyse granulométrique par tamisage qui est limitée aux grains de diamètres supérieur à 63  $\mu\text{m}$ . Elle permet de tracer la courbe granulométrique des éléments fins jusqu'à un diamètre d'environ 2  $\mu\text{m}$ . Le but de l'essai est de relier la densité lue, d'une part, au diamètre des grains encore en suspension, et d'autre part, au pourcentage pondéral de ceux-ci par rapport au poids total de l'échantillon en suspension. Ceci permet de tracer une courbe granulométrique des éléments fins sous forme des tamisats cumulés, en fonction des diamètres de particules.

Le pourcentage de fines  $f$  (%) passant à travers le tamis 63  $\mu\text{m}$  est calculé à partir de la relation

(1) :

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100 \quad (1)$$

## Matériel et méthodes

Avec M1, la masse séchée de la prise d'essai ; M2, la masse séchée du refus à 63  $\mu\text{m}$  et P, la masse du tamisat restant dans le fond.

Le caractère plus ou moins fin du sable est quantifié par le calcul du module de finesse FM. Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés pour les tamis d'ouvertures: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm et 0,125 mm.

### • Principe de l'essai

Lors de la décantation de grains solides en suspension dans l'eau, les grains les plus gros chutent plus rapidement que les plus petits. La vitesse de chute des grains est directement liée à leur diamètre D (loi de Stokes). Cette vitesse de chute peut s'exprimer simplement par le quotient de la distance parcourue par la particule dans sa chute par le temps de parcours.

Lors de la décantation d'un mélange de grains de différents diamètres en suspension dans l'eau, à un temps donné et à une profondeur donnée, les plus gros grains se retrouvent à une profondeur plus grande que ceux de diamètre inférieur. Il en résulte que la densité du mélange eau-grains à cette profondeur est variable avec le temps, diminuant au fur et à mesure que les grains de plus en plus fins se déposent.

### • Préparation de l'échantillon

La sédimentométrie s'effectue sur un échantillon de 40 g de particules sèches prélevées dans le tamisat à 125  $\mu\text{m}$  lors de la granulométrie par voie sèche de l'échantillon étudié. Le matériau est mis dans un bol avec 125 mL d'une solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium (préparé et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois). Ce traitement a pour but d'éviter la floculation des grains pendant la sédimentation.

Après imbibition dans la solution défloculante pendant environ 15 heures, la prise d'essai est soumise pendant 2 min à l'action de l'agitateur mécanique (mixeur). La suspension dispersée, ainsi que les eaux de rinçage et de son récipient, sont alors immédiatement versées dans une éprouvette d'essai dont le volume est complété à 1000 mL avec de l'eau distillée. Une éprouvette de même volume, contenant 970 mL d'eau distillée et 30 mL d'hexamétaphosphate de sodium servant de témoin a été également préparée.

### • Conduite de l'essai



## Matériel et méthodes

Les mesures se font avec un densimètre parfaitement propre et un thermomètre. Avant de plonger le densimètre dans la solution, nous avons agité vigoureusement la suspension avec l'agitateur manuel afin d'obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette. Au moment où l'agitateur est enlevé de l'éprouvette, on déclenche le chronomètre et on plonge délicatement le densimètre dans la suspension. Les lectures sont effectuées au sommet du ménisque aux temps  $t = 30 \text{ s}, 1, 2, 5, 8, 15, 30, 60, 1440 \text{ min}$ .

Pour les trois premières mesures, le densimètre reste dans la suspension. Pour les mesures suivantes, le densimètre est retiré après chaque mesure, nettoyé et plongé dans l'éprouvette témoin et plongé délicatement dans la suspension 30 s avant chaque mesure.

À chaque mesure, on relève la densité lue, la température et le nombre de graduations correspondant.

### • Calcul du diamètre des particules et des tamisats cumulés

Le calcul du diamètre s'effectue en utilisant la loi de Stokes qui donne la vitesse de chute des particules sphériques dans un liquide. Celles-ci sont soumises à la force de pesanteur verticale et descendante et à la poussée d'Archimède, verticale et ascendante. La chute de ces particules se fait à vitesse constante et s'exprime par la relation (2) suivante :

$$D^2 = 18\eta \frac{V_1}{(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (2)$$

Avec  $V_1$  : vitesse limite de chutes des grains. Celle-ci s'exprime par la racine carrée du quotient de la hauteur de chute  $H_r$ , exprimée en mètres, par le temps de chute  $t$ , exprimé en secondes.

$\eta$ : Viscosité dynamique de la solution. Celle-ci est en fonction de la température

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau :  $10 \text{ kN/m}^3$

$\gamma_s$  : Poids volumique des grains solides (valeur moyenne :  $26,5 \text{ kN/m}^3$ )

$D$  : diamètre de la particule en mètres.

Quant aux tamisats cumulés, on exprime le pourcentage des grains de diamètre inférieur à  $D$  qui sont encore en suspension à l'instant  $t$ .

Toutes ces formules ont été insérées sur un modèle de feuille de calcul excel. Les résultats sont indiqués dans la partie 3. Un densimètre est illustré à la figure 10.



**Figure 10** : Densimètre

### 2.2.1.2 Mesure de la porosité

Le protocole est la référence ISO 11508.

#### • Définition et but de l'essai

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquides ou gaz). C'est une grandeur physique comprise entre 0 et 1 (ou, en pourcentage, entre 0 et 100 %), qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat.

La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux selon la relation (3) :

$$\varphi = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (3)$$

Où  $\varphi$  est la porosité,  $V_{total}$ : le volume total du matériau,  $V_{pores}$ : le volume des pores

#### • Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la porosité à l'aide de la connaissance des volumes tels que le volume total et le volume des pores.

#### • Conduite de l'essai

Les différentes étapes nécessaires pour la mesure de la porosité sont les suivantes :

## Matériel et méthodes

- homogénéiser l'échantillon avec une spatule afin d'obtenir un échantillon représentatif ;
- remplir le bol de  $200 \text{ cm}^3$  par l'échantillon et renverser dans une éprouvette ;
- ajouter un volume de  $500 \text{ cm}^3$  d'eau ;
- laissé décanter le solide et mesurer à l'aide des graduations de l'éprouvette le volume des pores.

N.B : on détermine le volume des pores après décantation à partir du volume d'eau déplacé.

La figure 11 montre l'éprouvette contenant l'échantillon pendant la mesure.



**Figure 11** : Eprouvette contenant l'échantillon lors de la mesure

### 2.2.1.3 Détermination de la densité

Le protocole est la référence ISO 1183.

#### • Définition et but de l'essai

La densité d'un matériau est par définition le rapport entre la masse volumique du matériau et celle de l'eau. La masse volumique d'un matériau est le rapport entre la masse et le volume du matériau. Par convention, la masse volumique de l'eau est  $1 \text{ g/cm}^3$ .

La densité est une valeur numérique qui se déduit à partir du calcul de la masse volumique selon la relation (4) et (5).

## Matériel et méthodes

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (4)$$

$$d = \frac{\rho}{\rho_{eau}} \quad (5)$$

Avec m, la masse ; v, le volume ;  $\rho$ , la masse volumique du matériau et d, la densité par rapport à l'eau.

### • Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la densité à l'aide de la connaissance du volume et de la masse de l'échantillon.

### • Conduite de l'essai

La densité est mesurée en suivant les étapes décrite ci-dessous.

- bien remplir le bol de 200 cm<sup>3</sup> de l'échantillon
- peser l'échantillon contenu dans le bol bien rempli

La figure 12 nous présente le bol de 200 cm<sup>3</sup> contenant l'échantillon.



**Figure 12** : Bol de 200 cm<sup>3</sup> contenant l'échantillon

## 2.2.2 Méthodes de caractérisation chimique

Les tests réalisés lors de la caractérisation chimique sont détaillés dans la suite du mémoire.

### 2.2.2.1 Mesure de la valeur du pH à l'aide du pH-mètre

#### • Définition et but de l'essai

Un pH-mètre est un appareil, souvent électrique, permettant la mesure du pH d'une solution.

### • Principe de l'essai

Le pH-mètre est généralement constitué d'un boîtier électronique permettant l'affichage de la valeur numérique du pH, d'une sonde de pH constituée d'une électrode de référence et d'une sonde de thermomètre permettant la mesure de la température. Son fonctionnement est basé sur le rapport qui existe entre la concentration en ions  $H_3O^+$  et la différence de potentiel électrochimique qui s'établit dans le pH-mètre une fois plongé dans la solution étudiée.

### • Conduite de l'essai

Le pH-mètre est étalonné avant chaque campagne de mesure avec deux solutions tampons de pH = 7,01 et de pH = 4,01. Les différentes étapes suivies pour la détermination du pH sont :

- homogénéiser l'échantillon avec une spatule afin d'obtenir un échantillon représentatif ;
- mettre en contact un volume de 50 mL avec un volume de 250 mL d'eau de robinet (rapport 1:5) dans un erlenmeyer ;
- agiter à l'aide d'un agitateur manuel pendant 2 minutes à la température de la pièce ;
- laisser décanter le solide et mesurer le pH sur la portion liquide uniquement ;
- rincer abondamment l'électrode entre chaque échantillon.

Le pH-mètre utilisé est un pH-mètre de paillasse de marque HANNA instruments HI 2211 pH/ORP Meter (Figure 13).



**Figure 13** : pH-mètre

### 2.2.2.2 Détermination de la perte au feu

Le protocole est la référence EN 15935 : 2021.

#### • Définition et but de l'essai

La perte au feu est une variation de masse résultant du chauffage d'un échantillon dans des conditions spécifiées. La perte au feu s'exprime en pourcentage en masse de la matière sèche. La mesure de la perte au feu donne une indication sur le taux de matière organique et la teneur en carbone organique du matériau.

#### • Principe de l'essai

Une prise d'essais est chauffée dans un four jusqu'à 900 °C pendant 2h. La différence de masse avant et après le processus de chauffage est utilisée pour calculer la perte au feu. La détermination est effectuée sur un échantillon non séché ou encore en se référant à la matière sèche. La teneur en matière organique est calculée à partir de la relation (6).

$$\%M.O = \frac{\text{poids sol sec}(g) - \text{poids sol incinéré}(g)}{\text{poids sol sec}(g)} * 100 \quad (6)$$

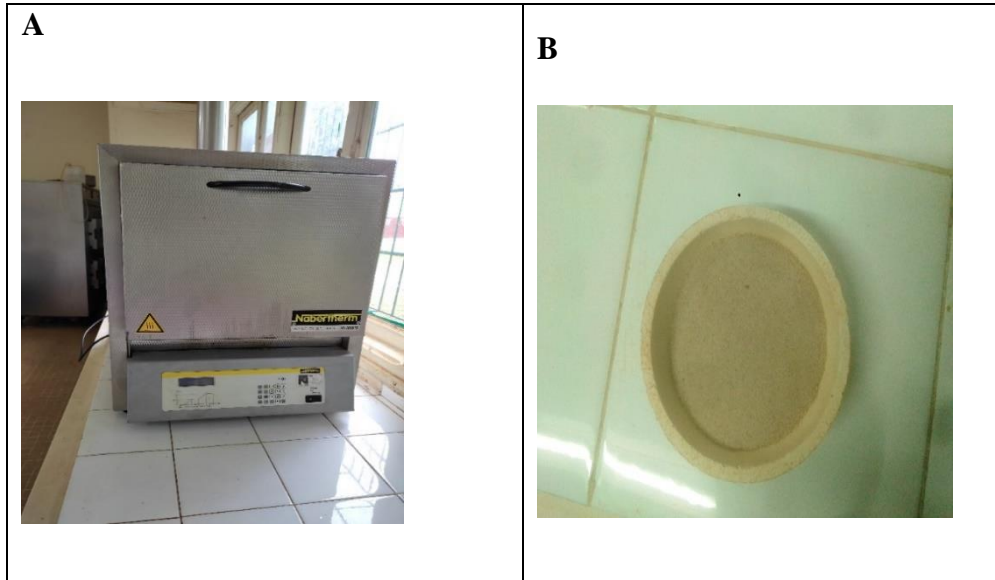
#### • Conduite de l'essai

Une masse de 50 g de l'échantillon a été introduite dans le creuset. L'ensemble est ensuite placé dans le four classique à une vitesse de 10 °C/min avec un palier de 2 h à 900°C. À la fin du cycle, le creuset très chaud est retiré du four et laissé refroidir à température ambiante sur une tôle propre pendant quelques minutes. Le creuset encore chaud est transféré dans le dessiccateur, et laissé refroidir jusqu'à la température ambiante. Enfin, le creuset contenant le résidu calciné est pesé au milligramme près.

La calcination peut être considérée comme complète à l'obtention d'une masse constante.

La perte au feu ainsi déterminée est prise en compte dans la détermination de la composition chimique de l'échantillon.

La figure 14 présente un four classique et la CBCS à la sortie du four.



**Figure 14** : Four classique (A) et cendre de bagasse à la sortie du four (B)

### 2.2.2.3 Détermination du taux d'humidité

Le protocole est la référence NF X15-110.

- **Définition et but de l'essai**

Le séchage à l'étuve est une méthode classique de séchage qui a pour but de déterminer la teneur en eau contenu dans un échantillon.

- **Principe de l'essai**

Une prise d'essais est chauffée dans une jusqu'à 105 °C pendant 2 h. La différence de masse avant et après le processus de séchage est utilisée pour calculer la teneur en eau ( $\tau$ ) selon la relation (7).

$$\tau(\%) = \frac{m.h - m.s}{m.h} * 100 \quad (7)$$

Avec m.h, la masse humide et m.s, la masse sèche.

- **Conduite de l'essai**

Une masse de 100 g de l'échantillon a été introduite dans un bécher. L'ensemble est ensuite placé dans une étuve pendant 2 h à 105°C. À la fin du temps imparti, le bécher est retiré de l'étuve et transféré dans un dessiccateur. Enfin, le bécher contenant l'échantillon est pesé au milligramme près.

La figure 15 indique l'étuve utilisée pour la détermination du taux d'humidité.



**Figure 15** : Etuve utilisé pour déterminer le taux d'humidité

### 2.2.3 Méthodes de caractérisation minéralogique

Les tests réalisés lors de la caractérisation minéralogique sont détaillés dans la suite du mémoire.

#### 2.2.3.1 Observation microscopique

##### • Définition et but de l'essai

L'observation microscopique est une technique qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions et de séparer les détails de cette image afin qu'elle soit observable par l'œil humain à partir d'un microscope optique.

##### • Principe de l'essai

Le principe est basé sur des propriétés principales qui sont:

- le grossissement c'est-à-dire son aptitude à fournir une image agrandie,
- le pouvoir de résolution ou de séparation.

##### • conduite de l'essai

Une masse de 100 g de CBCS a été lavé et introduite dans un four classique par le biais d'un creuset pendant 2 h à 300 °C afin d'éliminer l'humidité. À la fin du temps imparti, le creuset est retiré du



four et transféré dans un dessiccateur. Enfin, la CBCS séchée est placée sur la plaque d'observation et observé avec un grossissement 35.

La figure 16 indique le microscope optique utilisé.



**Figure 16** : Microscope optique

### 2.2.3.2 Diffraction des rayons X (DRX)

#### • Définition et but de l'essai

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique de caractérisation des matériaux cristallisés, qu'ils soient massifs, sous forme de poudre ou de dépôts. En laboratoire, cette technique est principalement appliquée aux matériaux inorganiques : minéraux, métaux, alliages, céramiques... C'est une technique couramment utilisée pour la caractérisation des matériaux tels que les ciments non hydratés et hydratés, les bétons, les roches, les argiles, les céramiques et certains produits organiques. Cette technique permet de distinguer des produits ayant la même composition chimique mais dont les arrangements atomiques diffèrent.

#### • Principe de l'essai

Les faisceaux de rayons X produits par le tube sont envoyés sur l'échantillon dans lequel ils sont déviés par les atomes. Ces faisceaux diffractés interfèrent entre eux, conduisant à la production à la production d'un signal intense dans certaines zones précises de l'espace. C'est ce signal qui est collecté par le détecteur, et tracé sous forme d'une courbe (diffractogramme) qui présente des pics à des angles bien spécifiques de diffraction. La position de ces pics est une véritable signature de l'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal (distance entre atomes, entre plans intra

## Matériel et méthodes

cristallins). La relation empirique qui relie les angles auxquels sont observés les pics et les distances entre plans atomiques est la loi de Bragg (Bragg, 1973).

### • Méthode de traitement

Deux grammes de roche ont été prélevés et broyés dans un mortier en agate. La poudre de roche obtenue est ensuite tamisée à l'aide d'un tamis de 63  $\mu\text{m}$ . Le passant est compacté dans le creux du porte-échantillon à l'aide d'une plaque de verre, puis analysé au DRX pendant 1h30 mn, dans un intervalle angulaire  $2\theta$  (2 - 90).

L'appareil de mesure utilisé est le Diffractomètre D8 ADVANCE de Bruker (Figure 17). Le logiciel d'identification et de quantification des minéraux est le EVA 2.0.



**Figure 17** : Diffractomètre

Après avoir détaillé les différents tests de caractérisation utilisés pour chaque objectif spécifique, les résultats obtenus sont présentés dans la suite du mémoire.

# **PARTIE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

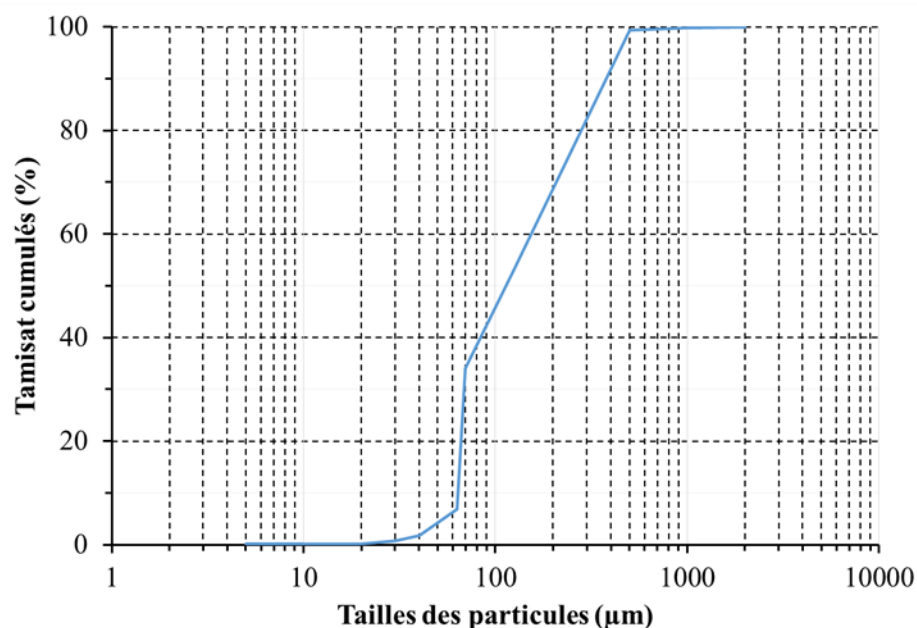
Cette troisième partie est consacrée à la description et à la discussion des résultats de la caractérisation de la cendre de bagasse de canne à sucre.

### 3.1 Résultats

#### 3.1.1 Caractéristique physique

##### 3.1.1.1 Granulométrie

La répartition des tailles des particules a été déterminée en combinant l'analyse granulométrique par tamisage pour la fraction grossière et par sédimentation pour la fraction fine. La résultante des différentes courbes granulométriques est présentée à la figure 18.



**Figure 18** : Courbe granulométrique de la cendre de bagasse

On observe deux familles de tailles de particules. Les particules fines de tailles comprises de 5 à 70 µm et les particules grossières de 70 à 500 µm. La taille moyenne des particules est de 120 µm. Le pourcentage de fines est de 59,65 % avec un module de finesse de 0,476 (Tableau V).

**Tableau V** : Propriété des particules

Diamètre moyen (µm)	Pourcentages de fines (%)	Module de finesse
120	59,65	0,476

### 3.1.1.2 Densité et porosité

La porosité ainsi que la densité des cendres de bagasse ont été déterminées et les résultats sont regroupés dans le tableau VI. La porosité de 61 % montre que la cendre de bagasse absorbe beaucoup d'eau. Sa densité de 1,065 plus faible que celle de la silice cristalline fine suggère que la cendre de bagasse est différente du sable. Aussi, sa porosité est deux fois plus élevée que celle du sable fin qui est d'environ 33 %.

**Tableau VI :** Densité et porosité de la cendre de bagasse

Densité	Porosité (%)
1,065	61

### 3.1.2 Caractéristique chimique et minéralogique

#### 3.1.2.1 Teneur en eau et en matière organique

La teneur en eau ainsi que la teneur en matière volatile ou perte au feu ont été déterminées et les résultats sont regroupés dans le tableau VII.

La teneur en eau de seulement 0,38 % indique que la cendre de bagasse étudié contient un faible taux d'humidité. Ce faible taux d'humidité est dû aux conditions de prélèvement et de stockage de la cendre de bagasse.

La perte au feu estimée à 2,76 % suggère la présence d'une faible quantité de matière organique. Ce faible taux de matière organique est dû au fait que la bagasse a servi de combustible pour les chaudières à 900 °C.

**Tableau VII :** Teneur en eau et perte au feu de la CBCS

	Teneur en eau	Perte au feu
% massique	0,38	2,76

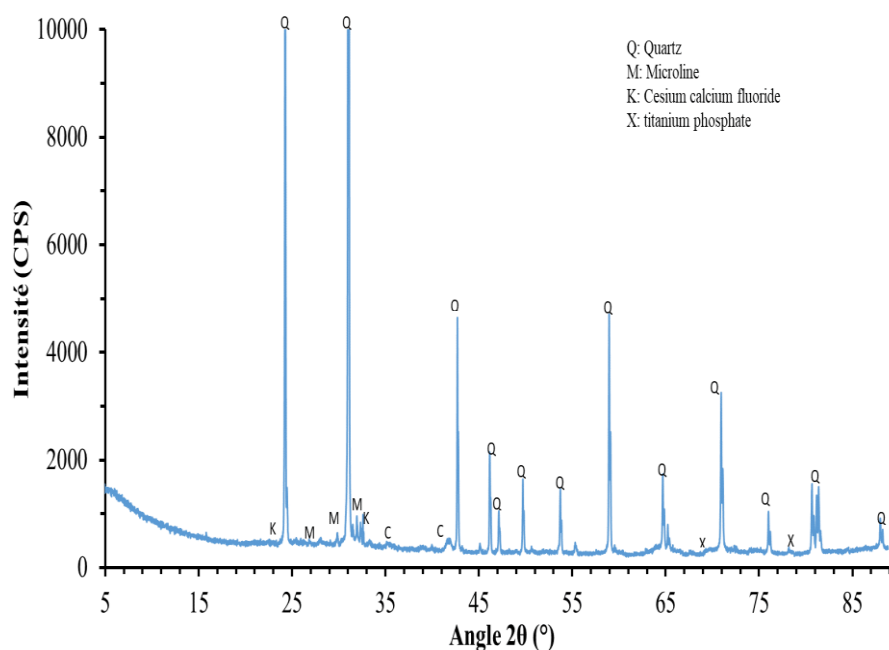
#### 3.1.2.2 Composition minéralogique

La composition minéralogique a été déterminée à partir de la diffraction des rayons X. Le diffractogramme X de la cendre est indiqué à la figure 19. Les résultats montrent la présence majoritaire de pics caractéristiques de la silice sous forme de quartz. On note également la présence de pics de très faible intensité de composés mineurs ou en traces tels que le microline

## Résultats et discussion

( $K_{0.94}Na_{0.06}Al_{1.01}Si_{2.99}O_8$ ), l'oxyde de cadmium, de titane et de tungsten ( $Cd_2TiWO_7$ ), le phosphate de titane ( $Ti_3PO_{0.58}$ ) et le fluorure de césium et de calcium ( $CsCaF_{1.3}H_{1.7}$ ).

Les proportions massiques des différentes phases identifiées sont reportées dans le tableau VIII. La proportion en quartz de 90 % confirme la présence majoritaire des pics de quartz observés. La teneur en microline, qui est un aluminosilicate alcalin est de 5,8 %. Les autres éléments sont sous forme de trace avec des teneurs variant de 0,6 à 1,80 %.

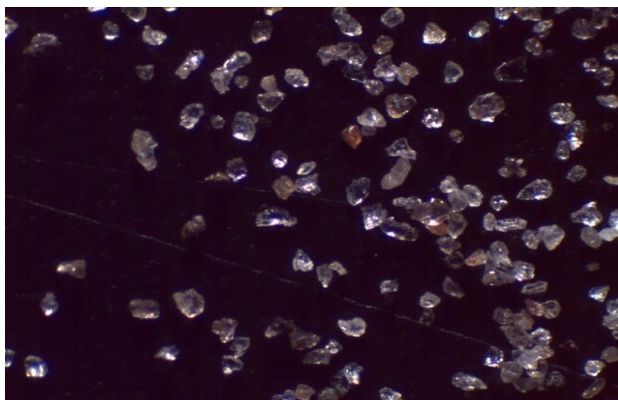


**Figure 19** : Diffractogramme X de la cendre de bagasse

**Tableau VIII** : Composition minéralogique de la fraction fine

Minéral	Quartz	Microline	Oxyde de cadmium de titane et de tungsten	Phosphate de titane	Fluorure de césium et de calcium
Formule chimique	$SiO_2$	$K_{0.94}Na_{0.06}Al_{1.01}Si_{2.99}O_8$	$Cd_2TiWO_7$	$Ti_3PO_{0.58}$	$CsCaF_{1.3}H_{1.7}$
Proportion (% massique)	90	5,8	1,60	0,80	1,80

L'observation au microscope (Figure 20) avec un grossissement 35 de la cendre de bagasse lavé et séché à l'étuve montre la présence de cristaux de quartz confirmant ainsi les résultats de la DRX.



**Figure 20** : CBCS au microscope

### 3.1.2.3 Composition chimique

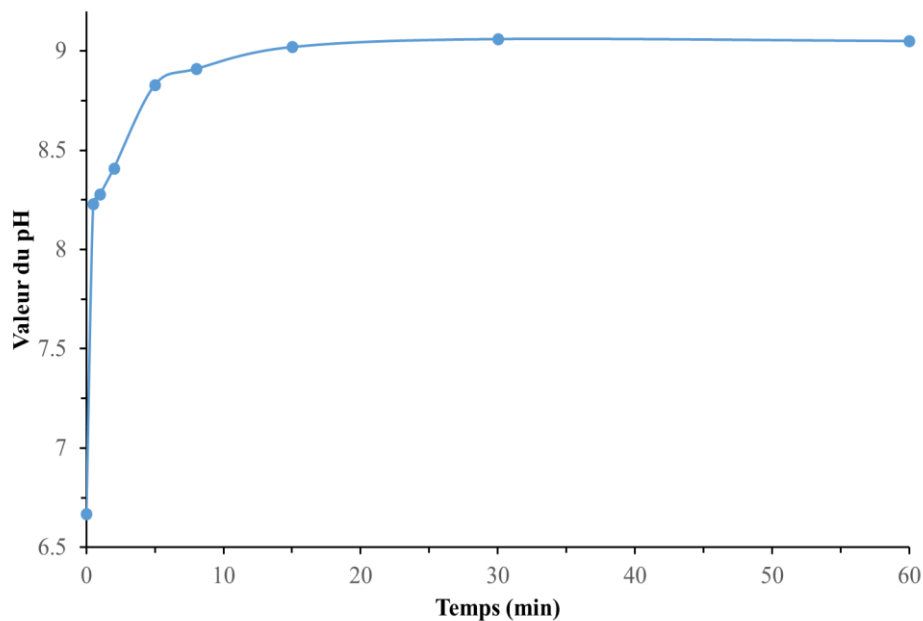
La composition chimique en oxyde de la cendre de bagasse a été déterminée à partir des données de la diffraction de rayons X. Les résultats regroupés dans le tableau IX montrent que la cendre est essentiellement composée de silice. Elle contient de l'alumine en faible quantité (1,07 %). La cendre étudiée est composée de différents oxydes alcalins tels que  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , et  $\text{Cs}_2\text{O}$  à 0,1 % ; 0,88 % ; et 1,07 % respectivement. La présence de ces métaux alcalins pourrait affecter les propriétés du matériau.

**Tableau IX** : Composition chimique de la cendre de bagasse

Eléments chimiques	Pourcentage massique (%)
$\text{SiO}_2$	91,4
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,07
$\text{K}_2\text{O}$	0,88
$\text{Na}_2\text{O}$	0,1
$\text{TiO}_2$	0,61
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,39
$\text{CdO}$	0,7
$\text{WO}_3$	0,63
$\text{Cs}_2\text{O}$	1,07
$\text{CaO}$	0,39
Perte au feu	2,76

### 3.1.2.4 Caractère acido-basique

La nature de la surface d'un matériau joue un rôle important sur sa réactivité en présence de l'eau. Le caractère acido-basique de la cendre en milieu aqueux a été déterminé à partir de la mesure du pH de la solution aqueuse contenant la cendre. La variation de la valeur du pH en fonction du temps est montrée à la figure 21.



**Figure 21** : Evolution du pH en fonction du temps de la suspension contenant la cendre de bagasse

Le pH de l'eau de robinet utilisé pour l'analyse est de 6,67. On remarque que dès la mise en solution de la cendre, le pH de l'eau augmente rapidement pour atteindre la valeur 8,23. Le pH continue d'augmenter jusqu'à atteindre la valeur constante de 9,02 à partir de 30 min (Figure 21).



### 3.2 Discussion

Après la présentation et l'analyse des résultats, ceux-ci sont discutés dans la suite du mémoire. En effet, les résultats de la diffraction des rayons X réalisée sur la cendre de bagasse de canne à sucre ont montré la présence en quantité majoritaire du quartz. Ces résultats sont en accord avec les observations des cristaux de quartz au microscope optique. La présence de la silice dans la cendre de bagasse suppose que la bagasse contient à la fois de la matière organique et minérale. La combustion à 900 °C permet l'élimination d'une partie importante de matière organique. Ce qui est en accord avec la perte au feu de seulement 2,76 % de la cendre. Aussi, la température à laquelle a lieu la combustion peut favoriser la dissolution de la matière minérale et sa cristallisation lors du refroidissement. L'absence de silice amorphe indique que le système de refroidissement serait lent d'où la présence de silice sous forme de quartz. Par ailleurs, la présence du quartz peut être aussi attribuée à d'autres facteurs tels que la contamination lors de la coupure de la canne et/ou de la bagasse exposée dans l'industrie. En effet, tous les résidus n'entrent pas dans le four après le processus de broyage et certains restent à l'air libre jusqu'au retour au four. De plus, dans le cas des industries qui utilisent le système d'épuration des gaz où les cendres sont déposées dans les bassins de décantations, une contamination peut se produire.

En raison de la teneur élevée en silice cristalline (90 %) de la cendre, cette dernière serait moins réactive et présenterait une activité pouzzolanique moindre. Ces résultats rejoignent ceux de Mansaneira *et al.* (2017) qui affirme qu'une grande partie de la silice présente dans les cendres de bagasse est sous forme cristalline diminuant ainsi la réactivité du matériau qui va développer une faible activité pouzzolanique. Par contre, les analyses DRX de cendre de bagasse étudiée par Jagadesh *et al.* (2015) ont montré une proportion importante de silice amorphe avec la présence tout de même de silice sous forme de quartz et de cristobalite.

Cependant, les analyses granulométriques de la cendre étudiée dans le cadre de nos travaux, ont révélé la présence d'une proportion importante de fines d'environ 60 % avec un module de finesse de 0,46. Ces résultats indiquent que la cendre étudiée possède une grande surface de réactivité et pourrait avoir une bonne réactivité malgré son caractère cristallin. Aussi, selon la norme américaine ASTM C618 (2012), un matériau pulvérulent peut être considéré comme un ajout cimentaire pouvant développer une activité pouzzolanique et susceptible d'être utilisé dans le béton en remplacement partiel du ciment si la somme des oxydes le constituant  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  est supérieure ou égale à 70 % et que la perte au feu et le taux d'humidité sont respectivement inférieurs

à 10 % et 3 %. Or, la cendre étudiée répond à ces exigences puisque la somme des oxydes considérés est de 92,47 % avec une perte au feu de 2,76 % et un taux d'humidité de seulement 0,38 %.

Il est important de noter que la valeur de 90 % de silice sous forme de quartz contenue dans la cendre de bagasse étudiée est supérieure à celle souvent observée dans les études de certains auteurs. Payà *et al.* (2002) ont étudié une cendre de bagasse contenant 59,87 % de silice sous forme de quartz avec un pourcentage d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dont la provenance serait liée à l'ajout de charbon à la bagasse pour la combustion. Janjaturaphan & Wansom (2010) affirment que les teneurs en  $\text{SiO}_2$  des cendres de bagasses de canne à sucre sont de l'ordre de 42-49 % et 34-43 % en poids pour les CBCS fins et grossiers respectivement.

Par ailleurs, bien que la cendre soit composée essentiellement de quartz, elle possède une densité de 1,07 qui est plus faible que celle de la silice cristalline normale, du sable qui est d'environ 2,5 ou même des cendres volantes des centrales thermiques qui est de 2,2794 (Halleux, 2013). Les études de Halleux (2013) nous permettent de comparer la cendre de bagasse de canne à sucre (CBCS) et les cendres volantes des centrales thermiques (CVCT) qui sont beaucoup utilisés dans la confection de matériau de construction. Dans un premier temps, on remarque que les particules de CVCT sont plus fines que celles des CBCS. Par contre, elles possèdent toutes deux une granulométrie plutôt élargie. Ensuite, les CBCS sont plus grossières, leur surface extérieure est moins lisse. La CBCS présente beaucoup plus d'aspérités ce qui constitue sa forte demande en eau observée grâce à sa porosité qui est de 61 %. Cette forte demande en eau doit être prise en compte lors de la conception de matériau contenant une telle cendre. Cette porosité représente quasiment le double de celle du sable fin qui est estimée en moyenne à 33 %. Enfin, la CBCS présente aussi une forme plus allongée que la CVCT. Cela peut s'expliquer par la nature première de ces cendres. La CBCS est issue d'un végétal fibreux et garde son caractère de forme allongé après la combustion. Ces caractéristiques de la cendre de bagasse, différentes de celle du sable ainsi que de celle des CVCT seraient liées à sa teneur en d'autres éléments mineurs notamment le microsilice qui est un aluminosilicate alcalin ainsi que les éléments traces.

Le suivi du caractère acido-basique de la cendre en solution a révélé un relargage d'éléments alcalins et/ou d'ions hydroxydes par la cendre puisque le pH de l'eau initialement égale à 6,67 devient 9,07 au bout de 30 min (Figure 21). La surface de la cendre pourrait fixer les protons de l'eau et relarguer les cations alcalins en solution ainsi que les ions hydroxydes  $\text{OH}^-$ . En effet, en

milieu aqueux, il pourrait avoir un échange ionique entre les cations alcalins et les protons de l'eau selon l'équation de la réaction  $\equiv\text{Si-O-M} + \text{H-OH} \rightleftharpoons \equiv\text{Si-OH} + \text{MOH}$  (8)

Avec M correspondant aux cations alcalins Na, K ou Cs.

Ces ions alcalins proviennent probablement du microline et du fluorure de césium et de calcium qui contiennent tous deux des métaux alcalins. La surface de la cendre est donc basique. Le milieu alcalin pourrait favoriser la mise en solution de la silice fine. Car l'alcalinisation de la suspension conduirait à la dissolution partielle de la cendre selon l'équation de la réaction (9). Ce qui augmenterait sa réactivité en milieu cimentaire qui a un pH supérieur à 12 à cause de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ).



Néanmoins, en raison de ses propriétés physiques, la cendre de bagasse étudiée ne pourrait être utilisée dans les matériaux de construction qu'à faible proportion.

D'autre part, comme la cendre de bagasse est cristalline, son activité pouzzolanique en partie due à sa fraction fine (60 %) sera naturellement plus faible qu'une cendre de structure amorphe. Aussi, la taille moyenne des particules de 120  $\mu\text{m}$  et la fraction grossière d'environ 40 % suggère que la cendre contient des particules inertes. Cette particularité de la cendre présente un double avantage. Elle pourrait être utilisée comme matériau de remplissage comme proposé par Payà *et al.* (2002). Ainsi, le remplissage des vides pourra affiner la microstructure du matériau dans laquelle sera incorporer la cendre. De même, les particules fines pourraient constituer des sites de nucléation pour la croissance des hydrates de silicate de calcium hydraté ou CSH, produits d'hydratation du ciment (Land & Stephan, 2012 ; Wang *et al.*, 2016). Ce qui pourrait augmenter la cinétique d'hydratation du ciment comme dans le cas de la fumée de silice (Wei *et al.*, 2012). La fumée de silice est en effet, un ajout cimentaire particulièrement fine constituée de particule de silice amorphe de forme sphérique. Toutefois, la cendre de bagasse pourrait développer des propriétés qui s'apparentent à celle des cendres volantes qui sont constituées de particules plus grossières que celle de la fumée de silice (Wei *et al.*, 2012).

Par ailleurs, les études de Cordeiro (2016) montrent qu'une amélioration de l'activité pouzzolanique des cendres de bagasse de canne à sucre est possible par broyage et classification sélective pour réduire la teneur en quartz des cendres de bagasse. Les résultats de ses études ont montré que la teneur en quartz diminuait de manière significative à la suite de broyage et d'une classification sélective augmentant ainsi la teneur en amorphe et par conséquent l'activité pouzzolanique. Par conséquent, l'activité pouzzolanique pourrait être améliorée après un broyage

## Résultats et discussion

très fin des cendres de bagasse. La demande en eau de la CBCS est intimement liée à la taille des particules car plus les particules sont fines, plus elles nécessitent une assez grande quantité d'eau pour produire une bonne maniabilité. Une étude préalable de la demande en eau serait nécessaire pour optimiser l'utilisation des cendres de bagasse de canne à sucre broyée ou non.

# **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**

## Conclusion

L'objectif de ce travail était d'évaluer la possible valorisation de la cendre de bagasse de canne à sucre provenant de SUCRIVOIRE Zuénoula dans les matériaux de construction. Pour ce faire, la cendre de bagasse collectée sur le site d'étude a été soumise à plusieurs tests de caractérisations physiques tels que la granulométrie, la densité, la porosité et à plusieurs tests de caractérisations chimiques tel que le taux d'humidité, la perte au feu et la composition minéralogique ainsi que le caractère acido-basique. Les résultats de la caractérisation sont présentés comme suit :

- la cendre de bagasse présente un faible taux d'humidité de 0,38 % et une perte au feu de 2,76 % indiquant une faible teneur en matière organique et/ou volatile.
- La diffraction des rayons X a révélé que la cendre est composée majoritairement de silice sous forme de quartz. Des éléments mineurs tels que le microline et le fluorure de césium et de calcium ont également été détectée avec la présence d'autres éléments traces. La forme cristalline de la silice va réduire la réactivité du matériau qui va développer une faible activité pouzzolanique du fait de l'absence de la phase amorphe.
- En milieu aqueux, la cendre libère des cations alcalins et des ions hydroxydes entraînant un environnement alcalin de pH 9,07. La surface de la cendre est donc basique. Cette caractéristique de la cendre pourrait augmenter sa réactivité en milieu cimentaire.
- la cendre présente deux familles de granulométrie, 60 % de fraction fine et 40 % de fraction grossière. La taille moyenne des particules est estimée à 120  $\mu\text{m}$  avec un module de finesse de 0,46. Ce qui suggère que la cendre présente une grande surface de réactivité qui pourrait compenser l'effet contraire de sa cristallinité. Aussi, cette particularité de la cendre pourrait lui conférer le rôle de matière de remplissage pour les grosses particules et de sites de nucléation pour la croissance des hydrates du ciment pour les fines. Ce qui conduira à l'affinage de la microstructure du matériau final.

En clair, l'objectif de valorisation dans les matériaux de construction des CBCS a été atteint.

Cependant, l'utilisation plus efficace de la cendre de bagasse en remplacement partiel du ciment dans la construction nécessitera d'abord une combustion contrôlée pour favoriser l'obtention de silice amorphe, un procédé de broyage et de classification pour lui permettre d'atteindre la finesse et l'homogénéité requises pour répondre aux normes de l'industrie.

Les perspectives de cette étude sont :

- évaluer la surface spécifique de la cendre par la méthode BET ;
- effectuer l'analyse chimique ICP ;
- Déterminer la morphologie par la Méthode Electronique à Balayage (MEB) ;

## Conclusion

- Effectuer l'analyse thermogravimétrique ;
- Déterminer l'indice d'activité pouzzolanique ;
- Effectuer des tests de résistance à la compression sur des pâtes et mortiers contenant CBCS en remplacement partiel du ciment.

# RÉFÉRENCES



## Références

- Aneeza S. (2010). Impacts agronomiques et environnementaux de l'épandage de vinasse et de cendre de charbon/bagasse sur les terres agricoles de l'île Maurice. Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse (Avignon, France), 172 p.
- Archimède H., Xande X., Gourdine J.L., Fanchone A., Alexandre G., Boval M., Coppry O., Arquet R., Fleury J., Regnier C. & Renaudeau D. (2011). La canne à sucre et ses coproduits dans l'alimentation animale. *Innovations Agronomiques*, 16 : 165-179.
- Arzate A. (2005). Extraction et raffinage du sucre de canne. Centre de recherche, de développement et de transfert technologique en acériculture, Québec (Canada), 45 p.
- ASTM C618-12a. (2012). Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Batra V.S., Urbonaitė S. & Svensson G. (2008). Characterization of un-burned carbon in bagasse fly ash. *Fuel*, 87 : 2972-2976.
- Bernard M., Chapoutot P., Chatelet M., Gueroult M., Jubert M., Morel A.F., Taccard M., Mariani M. & Tierny M. (1991). Synthèse sure : la mélasse. Comité des sous-produits – RNED Bovins, 19 p.
- Bragg W.L. (1913). The reflexion of X-rays by crystals. *Proceedings of the royal society*, 88 (605) : 428-438.
- Cameron K.C., Di H.J. & McLaren R.G. (1997). Is soil an appropriate dumping ground for our wastes?. *Australian journal of soil research*, 35(5) : 995-1036.
- Chusilp N., Jaturapitakkul C. & Kiattikomol K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construction and Building Materials*, 23 : 3523-3531.
- Chusilp N., Jaturapitakkul C. & Kiattikomol K. (2009). Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. *Construction and Building Materials*, 23 : 3352-3358.
- Contreras M.A., Elena R., Pérez M., Langenhove H.V. & Dewulf J. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of cleaner production*, 17(8) : 772-779.
- Cordeiro G.C., Toledo-Filho R.D., Tavares L.M. & Fairbairn E.M. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and concrete composites*, 30 : 410-418.
- Cordeiro G.C., Toledo-Filho, R.D. & Fairbairn E.M. (2009). Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 23 : 3301-3303.
- Cordeiro G.C., Toledo-Filho R.D., Tavares L.M. & Fairbairn E.M.R. (2009). Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. *Cement and concrete research*, 39 : 110-115.
- Cordeiro G.C., Toledo-Filho R.D., Tavares L.M. & Fairbairn E.M.R. (2012). Experimental characterization of binary and ternary blended-cement concretes containing ultrafine residual rice husk and sugar cane bagasse ashes. *Construction and Building Materials*, 29 : 641-646.
- Cordeiro G.C., Tavares L.M. & Toledo-Filho R.D. (2016). Improved pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash by selective grinding and classification. *Cement and concrete research*,

## Références

- 89 : 269-275.
- Das S.K., Mishra J. & Mustakim M.S. (2018). Rice husk ash as a potential source material for geopolymer concrete : a review. *International journal of applied engineering research*, 13(7) : 81-84.
- El-Haggag S.M. (2007). Sustainability of agricultural and rural waste management, 424p.
- Fairbairn E.M., Americano B.B., Cordeiro G.C., Paula T.P., Toledo-Filho R.D. & Silvano M.M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO<sub>2</sub> emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9) : 1864-1871.
- Frías M., Villar E. & Savastano H. (2011). Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement and concrete Composites*, 33(4) : 490-496.
- Ganesan K., Rajagopal K. & Thangavel K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29 : 515-524.
- Halleux E. (2013). Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar. Mémoire de master Ingénieur Civil des Constructions en agronomie, Université de Liège (France), 111 p.
- INRA (1988). Alimentation des bovins, ovins et caprins. Ed. R. Jarrige, INRA, Paris, 471 p.
- International Standardization Organization ISO 1183.
- International Standardization Organization ISO 11508.
- Jagadesh P., Ramachandramurthy A., Murugesan R. & Sarayu K. (2015). Micro-analytical studies on sugar cane bagasse ash. *Sadhana*, 40(5) : 1629-1938.
- Janjaturaphan S. & Wansom S. (2010). Pozzolanic activity of industrial sugar cane bagasse ash. *Suranaree journal scientific technology*, 17(4) : 349-357.
- Jiménez Q.V.G., León F.M., Montes-García P., Gaona-Tiburcio C. & Chacón-Nava J.G., Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 40 : 691-701.
- Kedi A.B.B., Kouamé Y.F., Kouassi S.S., Abry A.O. & Konan K.F. (2020). Physico-chemical characterization of liquid waste from sugar production unit labs in Zuenoula, Côte d'Ivoire. *International journal biology chemical sciences*, 14(7) : 2641-2651.
- Kouamé K.B.J., Orega Y.B., Touré Y.A. & Abo K. (2014). Determination of critical period for weed control in intensive and non-intensive sugarcane (*Saccharum officinarum* L., Poaceae) production systems in center Ivory Coast. *International journal of biological and chemical sciences*, 8(5) : 2244-2257.
- Korentajer A. (1991). A review of the agricultural use of sewage sludge: benefits and potential hazards. *Water S.A.*, 17(3) : 189-196.
- Land G. & Stephan D. (2012). The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement. *Journal of materials science*, 47(2) : 1011-1017.
- Mansaneira E.C., Schwantes C.N., Barreto S.G. F. & Martins T.B. (2017). Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic material. *DYNA*, 84(201) : 163-171.
- Martirena H.J.F., Middendorf B., Gehrke M. & Budelmann H. (1998). Use of wastes of the sugar

## Références

- industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement and Concrete Research*, 28(11) : 1525-1536.
- Norme Européenne EN 15935 : 2021.
- Norme Française X15-110.
- Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO-ONU), 2021.
- Overcash M., Sims R.C., Sims J.L. & Nieman J.K.C. (2005). Beneficial reuse and sustainability: the fate of organic compounds in land applied waste. *Journal of environmental quality*, 39 : 29-41.
- Paterson A.H., Moore P.H. & Tew T.L. (2013). The gene pool of saccharum species and their improvement. In: genomics of the saccharinae, plant genetics and genomics: crops and models, Paterson A.H. (Eds). New York (Amérique), pp. 43-71.
- Payá J., Monzó J., Borrachero M.V., Díaz-Pinzón L. & Ordóñez L.M. (2002). Sugar-cane bagasse ash (SCBA): Studies on its properties for reusing in concrete production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 77(3) : 321-325.
- Pelis Y. (2005). La houille verte ou l'énergie de biomasse. In : les nouveaux défis de l'énergie à la Martinique, publiobook (Eds). Paris (France), pp. 99-100.
- Péné C.B. & Assa D.A. (2003). Variations interannuelles de la pluviométrie et de l'alimentation hydrique de la canne à sucre en Côte d'Ivoire. *Science et changements planétaires/sécheresse*, 14(1) : 43-52.
- Perez S., Farre M., Garcia M.J. & Barcelo D. (2001). Occurrence of polynuclear aromatic hydrocarbons in sewage sudge and their contribution to its toxicity in the toxAlaert 100 bioassay. *Chemosphere*, 45 : 705-712.
- Ramaswamy H.S., Ahuja B.M. & Krishnamoorthy S. (1983). Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. *International journal of cement composites and lightweight concrete*, 5(1) : 3-13.
- Ramjeawon T. (2008). Life cycle assement of electricity generation from bagasse in Mauritius. *Journal of cleaner production*, 16(16) : 1727-1734.
- Rasul M. G. & Rudolph V. (2000). Fluidized bed combustion of Australian bagasse. *Fuel*, 79(2) : 23-30.
- Sales A. & Lima S.A. (2010). Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste management*, 30(6) : 1114-1122.
- Salim R.W., Ndambuki J.M. & Adedokun D.A. (2014). Improvising the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugarcane bagasse ash. *Sustainability*, 6(6) : 3686-3696.
- Souza A.E., Teixeira S.R., Santos G.T.A, Costa F.B. & Longo E. (2011). Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Management*, 92 : 2774-2780.
- Standard Test Method for particle-Size Analysis of Soils (ASTMD 422).
- Toory V., Bholah M.A. & Ng K.F. (2003). Leaching and uptake of heavy metals from soils amended with sewage sludge under rainfed sugar cane in Mauritius. In: Lalouette J.A., Bachraz D.Y. & Bheenick K.J. (Eds). Réduit (Mauritius), pp. 233-238.

## Références

- Walter B.B. & Heber M.P. (2021). Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar. *Journal of cleaner production*, 291 : 125-869.
- Wang L., Zheng D., Zhang S., Cui H. & Li D. (2016). Effect of nano-SiO<sub>2</sub> on the hydration and microstructure of Portland cement. *Nanomaterials*, 6(12) : 241.
- Wei Y., Yao W., Xing X. & Wu M. (2012). Quantitative evaluation of hydrated cement modified by silica fume using QXDR, 27Al MAS NMR, TG-DSC and selective dissolution techniques. *Construction and Building Materials*, 36 : 925-932.

## **Résumé**

La bagasse de canne à sucre est un sous-produit agro-industriel qui est utilisée dans le monde entier comme combustible dans l'industrie sucrière. Cela génère des déchets sous forme de cendres qui nécessite d'être valorisées. Ainsi, pour évaluer la possible valorisation de ce type de déchets comme ajout cimentaire en remplacement partiel du ciment dans l'industrie de la construction, des cendres de bagasse de canne à sucre (CBCS) de SUCRIVOIRE Zuénoula ont été soumises à des tests préliminaires de caractérisations physico-chimiques. Les caractérisations physiques se sont accentuées sur la détermination des paramètres tels que la densité, la porosité et la granulométrie des particules de CBCS. Quant à ses propriétés chimiques, elles ont été évaluées par la détermination des teneurs en eau et en matière organique, la concentration en ions hydronium  $H_3O^+$ , la composition minéralogique par la diffraction des rayons X et par observation microscopique. Les résultats ont montré que CBCS est composée essentiellement de silice sous forme de quartz. Ce qui pourrait réduire sa réactivité. En revanche, la présence de composés mineurs aluminosilicates alcalins favorise un environnement alcalin. Cette caractéristique associée à la grande finesse de la cendre pourrait augmenter sa réactivité ; ce qui compenserait en partie l'effet de la cristallinité de CBCS.

**Mots clés** : industrie sucrière, déchets agro-industriels, cendre de bagasse, caractérisation, industrie cimentaire.

## **Abstract**

Sugar cane bagasse is an agro-industrial by-product that is used worldwide as a fuel in the sugar industry. This generates waste in the form of ash which requires to be valorized. Thus, to assess the possibility of using this type of waste as a supplementary cementitious material for partial cement replacement in the construction industry, sugar cane bagasse ash (SCBA) from SUCRIVOIRE Zuénoula was subjected to preliminary physicochemical characterization tests. The physical characterizations concerned the determination of parameters such as density, porosity and particles size distribution of SCBA. Its chemical properties were evaluated by determining water and organic matter content, concentration of hydronium  $H_3O^+$  ions, mineralogical composition through X-ray diffraction and chemical composition by deduction from the XRD data. The results showed that SCBA is mainly composed of silica quartz which could reduce its reactivity. In contrast, the presence of minor alkaline aluminosilicate compounds promotes an alkaline environment. This characteristic associated with the great fineness of the ash, could increase its reactivity partially offsetting the effect of SCBA crystallinity.

**Keywords** : sugar industry, agro-industrial waste, bagasse ash, characterization, cement industry.