



# MISE EN ŒUVRE D'UN ECO-CIMENT A BASE DE MÂCHEFER DE CHARBON MINERAL

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
**MASTER II**  
OPTION : .Routes et Ouvrages d'Art

---

Présenté et soutenu publiquement le 24/06/2013 par

**Nafissatou SAVADOGO**

**Travaux dirigés par : Dr. Adamah MESSAN, Pr. François TSOBNANG, Abdou Lawane GANA**  
Enseignants chercheurs au 2iE  
Centre Commun de Recherche Energie et Habitat Durable

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Adamah MESSAN

Membres et correcteurs : Agbévidé Koffi KOKOLE  
Souleymane BARRO

**Promotion [2012/2013]**

## CITATIONS

*"La planète terre ne nous est pas léguée par nos ancêtres,  
nous l'empruntons à nos enfants":* proverbe du Cachemire.

## DEDICACES

Nous dédions ce travail, fruit d'un dur labeur à :

*ALLAH Le Tout Puissant, mon éternel Soutient*

*Feu mon papa SAVADOGO Adama*

*Ma maman Adja SAVADOGO/PORGO Maïmouna*

*Mon frère aîné SAVADOGO Aly*

*Mon frère cadet SAVADOGO Ibrahim*

*Ma petite sœur SAVADOGO Hahiba*

*Ma tante Adja BARRY/PORGO Ramata*

*Mon oncle ING. PORGO Idrissa*

*Mon oncle SAWADOGO Moussa*

*Mon oncle SAWADOGO Alassane*

*Mon oncle SAWADOGO Salif*

*Mon compagnon TAMALGO Hervé*

D'une manière ou d'une autre, vous êtes tous des piliers sur lesquels je me suis appuyée pour arriver à là. Que ceci fasse votre fierté et qu'Allah Le Tout Puissant nous garde toujours unis. Amin.

**NAFISSATOU SAVADOGO**

## REMERCIEMENTS

De près ou de loin, moralement ou financièrement, vous avez été un soutien indéniable au cours de cet enrichissant parcours. Nous adressons donc nos sincères remerciements à:

- ✿ **Pr François TSOBNANG, le responsable du LEMC :** Vos conseils et remarques pertinentes ont contribué fortement à l'élaboration de ce travail.
- ✿ **Dr Adamah MESSAN :** Votre disponibilité et votre assistance n'est plus à redire, ce travail est le vôtre.
- ✿ **Mr Abdou Lawane GANA, mon maître de stage:** Vos recommandations et directives ont conduit à l'élaboration de ce document.
- ✿ **Mr Agbévidé Koffi KOKOLE:** Pour les conseils et directives
- ✿ **Mr Jacques Rémy MINANE :** Pour toute l'assistance et le soutien
- ✿ **Mr Salif KABORE :** Votre concours tout au long de cette étude
- ✿ **Ma mère SAVADOGO/PORGO Maimouna :** votre soutien moral, affectif et vos prières m'ont accompagnés tout au long de ce parcours
- ✿ **Ma tante BARRY/PORGO Ramata :** votre soutien et votre foi en moi ont permis le démarrage de tout ceci
- ✿ **Mes collègues de stage :** TRAORE Yasmine B., ILBOUDO Amine I., SOMDA Axelle Y., ZAGRE Brice R., SORE Seick O., TCHOUATEU Roosevelt, DJIPSU Eric Thibaud, BRAHIM Togoï Issa : L'ambiance fraternelle de travail et l'aide reçue de tout un chacun
- ✿ **Tout le corps professoral du 2iE :** Pour le dur labeur effectué
- ✿ **Toute l'équipe du Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB)** particulièrement MBAYE Gueye, Yohann RICHARDSON et Eric NOUMI
- ✿ **Mes camarades de la promotion 2013 :** Pour le travail d'équipe

*NAFISSATOU SAVADOGO*

## AVANT-PROPOS

2iE est un Institut international d'enseignement supérieur et de recherche spécialisé dans les domaines de l'Eau et l'Assainissement, l'Environnement, l'Énergie, le Génie civil, les Mines et les Sciences Managériales. Il est composé de deux centres communs de recherche en Eau et Climat et Énergie et Habitat Durables. Les masters Génie Civil font partie de ce dernier centre, Energie et Habitat Durable qui est composé de trois laboratoires à savoir :

- Le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB)
- Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE)
- Le Laboratoire Eco-Matériaux de Construction (LEMC)

C'est au sein du laboratoire LEMC que nous avons effectué notre stage de fin d'étude. Il vise les enjeux suivants:

- Accès des populations à un logement décent et maîtrise de l'urbanisation des villes africaines;
- Défis du développement des infrastructures de transport en Afrique
- Protection de l'environnement et limitation des effets du changement climatique;
- Emergence de l'économie verte.

Le LEMC a deux axes de recherche qui sont :

- Conception, optimisation et caractérisation de matériaux de construction : géo matériaux (latérites, argiles, roches, ..), déchets urbains, miniers et industriels, fibres végétales (bois, sous-produits agricoles et agro-forestiers) et éco-ciments et éco-bétons.
- Comportement thermomécanique et durabilité des structures : structures mixtes (terre/bois, terre/béton, bois/acier, ..), énergétique du bâtiment, durabilité des ouvrages.

Son expertise est basé sur les caractérisations physico-chimiques et mécaniques des matériaux ; les études géotechniques, énergétiques et physiques du Bâtiment ; l'analyse du cycle de vie des matériaux de construction et la modélisation et la simulation multi-échelle des matériaux et des structures

Les activités, produits et services du laboratoire sont : la recherche, le développement, l'innovation, le contrôle qualité de matériaux naturels et élaborés, la formation par la recherche (Thèses, Stages académiques, Perfectionnement technique, etc.), les publications, communications et vulgarisations scientifiques.

## RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de valorisation du mâchefer de charbon produit dans les usines de la SONICHAR. Il vise à recycler les quantités importantes de mâchefers de charbon produites par l'entreprise SONICHAR dans divers secteurs notamment dans le domaine du génie civil. La présente étude expérimentale porte essentiellement sur la possibilité d'utiliser les mâchefers comme addition partielle en masse au ciment Portland. Elle évalue l'activité pouzzolanique du mâchefer en comparant les caractéristiques physiques et mécaniques d'un mortier témoin en ciment de type CEMI 42,5 et d'un mortier de ciment du même type avec ajout de 5 à 25% de mâchefer.

L'étude des caractéristiques mécaniques et de l'indice de pouzzolanicité ont montré que la silice présente dans le mâchefer réagit avec la portlandite de l'hydratation du ciment pour former des CSH de deuxième génération. L'incorporation des cendres volantes de mâchefer, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé avec une substitution de 15% de ciment par le mâchefer.

### Mots Clés :

- 
- 1 –Résidu de combustion du charbon RCCs**
  - 2 –Cendre volante de mâchefer**
  - 3 – Addition**
  - 4 – Ciment composé**
  - 5 –Activité pouzzolanique**

## ABSTRACT

This work is about the valorization of the coal combustion residues (CCRs) produced by the Niger Coal Society SONICHAR. It aims at recycle the important quantity of bottom ash produced by SONICHAR in different area especially in civil engineering. The present experimental study is essentially focused on studying the possibility of using bottom ash as part addition to Portland cement. It study the pozzolanic activity of bottom ash by comparing physical and mechanical characteristics of reference mortar with CEMI 42.5 cement and mortar with the same cement with additive which bottom ash substitution rate is 5 – 25%.

Mechanic characteristics study and the pozzolanic activity shown that silica present in the bottom ash react with cement hydration portlandite to create second generation of CSH. Bottom ash incorporation like partial substitution of Portland cement enables to have a new variety of composite cement with 15% of bottom ash.

**Key words:**

---

**1 –Coal Combustion Residues CCRs**

**2 –Bottom ash**

**3 –Additive**

**4 –Composite cement**

**5 – Pozzolanic activity**

## LISTE DES ABREVIATIONS

- 2iE** : Institut International D'Ingénierie
- ACAA**: American Coal Ash Association
- AFNOR**: Association Française de Normalisation
- ANPRM**: Advanced Notice of Proposed Rulemaking
- ASTM**: American Society for Testing and Materials
- BA**: Bottom Ash
- BIS**: Bureau of Indian Standard
- BTP**: Bâtiment et travaux publics
- CBR**: California Bearing Ratio
- CCRs**: Coal Combustion Residues
- CPA** : Ciment Portland Artificiel
- CTI**: Centre Technique Industriel
- COT**: Carbone organique total
- EPA**: U.S. Environmental Protection Agency
- LBEB** : Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant
- LEMC**: Laboratoire Eco-Matériaux de Construction
- MAPE**: Mesure Analyse Process Environment
- MIOM**: Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères
- PEF**: Produits d'Épuration des Fumées
- RCC**: Résidus de la combustion du charbon
- SONICHAR**: Société Nigérienne de Charbon d'Anou Araren
- USCS**: Unified Soils Classification System
- WRI**: World Resources Institute



## TABLE DES MATIERES

Citations .....	ii
Dédicaces.....	iii
Remerciements .....	iv
Avant-propos .....	v
Résumé .....	vi
Abstract.....	vii
Liste des abréviations .....	viii
Table des matières.....	1
Liste des tableaux.....	3
Liste des figures.....	4
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique</b> .....	<b>7</b>
<b>1.1 Les mâchefers</b> .....	<b>7</b>
1.1.1 Généralités.....	7
1.1.2 Les caractéristiques des mâchefers de charbon .....	8
1.1.3 Utilisation des mâchefers dans le BTP.....	11
<b>1.2 Le ciment</b> .....	<b>12</b>
1.2.1 Généralité .....	12
1.2.2 Les différents types de ciments .....	13
<b>1.3 Conclusion partielle</b> .....	<b>15</b>
<b>Chapitre 2: Matériaux et dispositifs expérimentaux</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Les matériaux étudiés</b> .....	<b>16</b>
2.1.2 Caractéristiques des matériaux .....	23
2.1.3 Le mâchefer de la SONICHAR.....	23
2.1.4 Le ciment.....	25
2.1.5 Le sable .....	25
2.1.6 Conclusion partielle .....	26
<b>2.2 Dispositifs expérimentaux</b> .....	<b>27</b>

2.2.1	Formulation .....	27
2.2.2	Les essais chimiques et minéralogique.....	28
2.2.3	Les essais mécaniques .....	29
<b>2.3</b>	<b>Conclusion partielle .....</b>	<b>33</b>
<b>Chapitre 3 : Résultats et Discussions.....</b>		<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Réactivité pouzzolanique du mâchefer de charbon .....</b>	<b>34</b>
3.1.1	Analyses chimiques.....	34
3.1.2	Essais mécaniques.....	35
<b>3.2</b>	<b>Optimisation de la teneur du ciment en mâchefer .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3</b>	<b>Influence du rapport Eau/Liant.....</b>	<b>38</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>		<b>39</b>
<b>RECOMMANDATIONS.....</b>		<b>41</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>42</b>
<b>Annexes.....</b>		<b>45</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:Récapitulatif des caractéristiques physiques du mâchefer de charbon [5][4][2][3]..	8
Tableau 2: Récapitulatif des paramètres chimiques des mâchefers indiens [2].....	9
Tableau 3: Applications potentielles des mâchefers de charbon dans les BTP .....	12
Tableau 4 : Composition minéralogique du ciment .....	13
Tableau 5: Nombre de boulets et de tours en fonction de la classe granulaire .....	20
Tableau 6: Classement et qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable .....	21
Tableau 7: Analyse chimique du mâchefer [34] .....	24
Tableau 8: Eléments chimiques identifiés par lixiviation [34] .....	24
Tableau 9: Propriétés physiques des mâchefers de la SONICHAR.....	25
Tableau 10 : Indice d'activité (%) du mâchefer à différentes dates .....	36
Tableau 11 : Evaluation du module dynamique en fonction du rapport E/L .....	38

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Tamis utilisés pour l'essai granulométrique.....	16
Figure 2 : Pycnomètre à air du laboratoire LEMC.....	18
Figure 3 : Cône normalisé .....	19
Figure 4 : Machine Los Angeles .....	20
Figure 5 : Boulets de l'essai Los Angeles.....	20
Figure 6 : Photographie de l'analyseur de la porosité et de la surface spécifique modèle ASAP 2020 Micromeritics .....	22
Figure 7 : Montagne de mâchefer à la SONICHAR .....	23
Figure 8: Courbe granulométrique du sable.....	26
Figure 9 : Différence entre mortier adjuvanté et mortier non adjuvanté.....	28
Figure 10 : Essai de résistance à la flexion à l'aide du portique universel.....	30
Figure 11: dispositif de rupture des éprouvettes à la flexion trois point.....	30
Figure 12: dispositif de rupture des éprouvettes à la compression .....	31
Figure 13 : Equipement pour l'essai poundite .....	32
Figure 14: Résultat de l'essai d'ATG effectué à 28 jours .....	34
Figure 15: indice d'activité pouzzolanique du mâchefer à différents âges.....	35
Figure 16: Résistance à la compression (MPa) des différents mortiers à 45 jours de cure.....	37
Figure 17: résistance à la flexion (MPa) des différents mortiers avec à 45 jours de cure.....	37

## INTRODUCTION

---

Le béton hydraulique est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde grâce à ses performances mécaniques, sa tenue au feu et son coût compétitif dont la mise en œuvre repose principalement sur l'utilisation de ciment Portland. Cependant, la fabrication du ciment dégage une quantité importante de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. L'émission mondiale de  $\text{CO}_2$  de l'industrie cimentière est estimée à 375 millions de tonnes en 2007 soit 7% des émissions mondiales de  $\text{CO}_2$  [1]. L'industrie du béton classique impacte donc notablement l'environnement. Outre ce caractère non écologique, le béton hydraulique, compte tenu de sa grande conductivité thermique (0,9-1,7  $\text{W.mK}^{-1}$ ) ne permet pas aux usagers d'avoir un confort thermique dans les lieux de vie, surtout dans les pays tropicaux et désertiques.

Il convient donc de développer des éco-matériaux de construction qui assurent le confort thermique des usagers tout en conservant des performances mécaniques équivalentes. Ce résultat peut être obtenu en remplaçant partiellement le ciment Portland par des résidus de mâchefer de charbon qui présentent un caractère pouzzolanique.

La Société Nigérienne de Charbon (SONICHAR), par son activité de production d'énergie à base de charbon minéral rejette dans la nature plus de 150 000 tonnes de mâchefers de charbon chaque année qui constituent de nos jours un problème environnemental sérieux.

Ce projet d'étude a donc pour objectif principal de proposer une formule d'un ciment composé à base de cendre volante de mâchefer de charbon pour non seulement résoudre le problème de la pollution spatiale causée par les centrales de la SONICHAR, mais aussi de contribuer à la réduction de la pollution atmosphérique due à la fabrication du ciment. De façon spécifique, il s'agit :

- D'évaluer la réactivité de la cendre de mâchefer vis-à-vis de la chaux
- De déterminer le taux maximal de substitution du ciment par le mâchefer
- Déterminer les propriétés physico-mécaniques du ciment composé élaboré.

Ce rapport s'articule autour de trois chapitres:

- Le premier chapitre porte sur l'étude bibliographique sur l'état de connaissances générales sur le mâchefer et les procédés de son recyclage ainsi que sur les ciments composés, leur fabrication et leur composition.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'identification des matériaux utilisés et la présentation des méthodes expérimentales permettant de mettre en évidence la réactivité du mâchefer de charbon de la SONICHAR.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenue avec les différents essais réalisés.
- Et enfin, le rapport se terminera par une conclusion synthétisant les résultats et discussions.

# CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans ce chapitre, nous parlerons des mâchefers en généralité et spécifiquement du mâchefer de charbon minéral. Nous parlerons des caractéristiques physico chimiques des mâchefers et de leurs différentes utilisations notamment dans l'industrie cimentière. En plus des mâchefers nous parlerons du ciment, sa composition minéralogique, les différents types de ciments que l'on rencontre et de son processus d'hydratation.

## 1.1 LES MACHEFERS

### 1.1.1 Généralités

Les mâchefers sont des résidus d'incinération desquels se distinguent deux grandes familles de mâchefers: les **mâchefers de charbon** et les **mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM)**.

Le mâchefer qui fait l'objet de notre étude est le mâchefer de charbon. C'est un Résidu de la Combustion du Charbon (RCC) dans les usines de production d'énergie et les chaudières industrielles. Ce charbon de type minéral peut être de l'antracite, du charbon bitumineux, semi-bitumineux ou du lignite. Les résidus synthétisés à la fin du processus d'incinération sont entre autres les mâchefers et les produits d'épuration des fumées (PEF). Les résidus pouvant être utilisés dans l'industrie cimentière sont:

- les cendres volantes qui constituent la partie fine des particules de cendre de charbon.
- le mâchefer avec une taille de grains allant du sable fin au gravier fin. Ce mâchefer est donc plus grossier que les cendres volantes.

En Inde, la quasi-totalité des centrales thermiques collectent les cendres volantes sèches par le biais d'un électro-précipitateur statique. Cependant la plupart des centrales thermiques ne disposent pas d'installation de système automatique de collecte des cendres. Les cendres volantes et les mâchefers sont alors évacués ensemble, sous forme de boues, à l'étang de cendres [2].

## 1.1.2 Les caractéristiques des mâchefers de charbon

### 1.1.2.1 Caractéristiques physiques des mâchefers de charbon

Le mâchefer de charbon est un produit grossier partiellement vitrifié composé de minéraux non combustibles qui sont présents dans le charbon [3]. La distribution de la taille des grains est similaire à celle de gravier sableux avec une densité particulièrement faible du grain qui varie entre 1,8 et 2,2 t/m<sup>3</sup> et une densité apparente d'environ 0,7 à 0,9 t/m<sup>3</sup> et pouvant atteindre 1,2 t/m<sup>3</sup> après compactage [4]. La conductivité hydraulique (perméabilité) des mâchefers qui varie entre 10<sup>-2</sup> et 10<sup>-5</sup> m/s est dans les mêmes ordres de grandeur que celles obtenues pour les matériaux naturels avec la même répartition granulométrique. Il est très poreux avec une porosité allant de 30 à 55% [2].

**Tableau 1:Récapitulatif des caractéristiques physiques du mâchefer de charbon**  
[5][4][2][3]

PARAMETRES	VALEURS
<b>Couleur</b>	Gris au noir
<b>Forme</b>	Sphérique
<b>Granulométrie</b>	Gravier au sable
<b>Masse volumique spécifique</b>	2,2 à 2,8 t/m <sup>3</sup>
<b>Masse volumique apparente</b>	0,7 à 1,6 t/m <sup>3</sup>
<b>Porosité</b>	30 à 55 %
<b>Perméabilité</b>	35 à 55 %
<b>Plasticité</b>	non plastique
<b>Cohésion</b>	Négligeable
<b>Module de Young</b>	30 à 55 MPa
<b>Angle de frottement</b>	35°
<b>CBR</b>	70 à 110 %



### 1.1.2.2 Propriétés chimiques et minéralogiques des mâchefers de charbon

Les caractéristiques chimiques des mâchefers varient selon le type, la source et la finesse du combustible dont ils proviennent, et les conditions d'exploitation de la centrale à charbon. En général, les RCC sont caractérisés par une fraction élevée d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). En effet P. Asokan[2] montre que dans les RCC, le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), l'aluminosilicate (gehlenite,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ) et l'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) représentent les principaux constituants qui influencent la concentration en alumine, silice et oxydes de fer (environ 87%).

La teneur élevée en  $\text{SiO}_2$  (35%) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (70%),  $\text{MgO}$  (5%),  $\text{SiO}_3$  (2,75%), et  $\text{Na}_2\text{O}$  (1,5%) dans les RCCs est favorable à son utilisation comme pouzzolane de ciment. Le **tableau n°2** présente un récapitulatif des différents éléments chimiques présents dans les résidus de combustion d'une usine indienne.

**Tableau 2: Récapitulatif des paramètres chimiques des mâchefers indiens [2]**

Chemical properties of typical Indian CCRs		
Sl. no.	Parameters	Indian CCRs
Range (%)		
1	Aluminium (Al)	15.167–20.45
2	Calcium (Ca)	0.37–0.76
3	Iron (Fe)	4.447–6.562
4	Manganese (Mn)	0.002–0.84
5	Magnesium (Mg)	0.02–0.9
6	Phosphorous (P)	0.06–0.3
7	Potassium (K)	0.14–1.8
8	Silicon (Si)	27.413–29.554
9	Sodium (Na)	0.07–0.71
10	Sulphur (S)	0.03–0.055
Range (ppm)		
11	Arsenic (As)	5–68
12	Barium (Ba)	26–1275
13	Boron (B)	100–1000
14	Cadmium (Cd)	1–26
15	Chromium (Cr)	10–353
16	Copper (Cu)	39–1000
17	Cobalt (Co)	7–128
18	Lead (Pb)	10–144
19	Nickel (Ni)	29–265
20	Mercury (Hg)	0–0.005
21	Molybdenum (Mo)	8–100
22	Scandium (Sc)	0.5–106
23	Selenium (Se)	1–10
24	Vanadium (V)	40–190
25	Zinc (Zn)	10–250

Les substances toxiques retrouvables dans les mâchefers sont : l'arsenic, le mercure, le fer, le chrome, le cadmium, le sélénium et le nickel. Elles sont considérées potentiellement dangereuses lorsqu'on les retrouve dans des proportions très élevées.

### 1.1.2.3 Les propriétés pouzzolaniques des mâchefers de charbon minéral

Dans les normes ASTM sur les ciments [6], les pouzzolanes sont définies comme étant des matériaux siliceux ou silico-alumineux qui ne possèdent en eux-mêmes pas de propriétés liantes mais qui, sous forme finement divisée et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former des composés possédants des propriétés liantes. D'après la norme [7] un matériau a la caractéristique d'une pouzzolane si :

- Sa composition chimique vérifiée :  $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70\%$
- Son indice d'activité  $I$  est :  $0,67 < I < 1$ .

Ainsi, en nous basant sur la composition chimique des mâchefers, nous pouvons leur associer un caractère pouzzolanique. Cependant peu d'étude ont été menées sur les potentielles propriétés pouzzolaniques des mâchefers. Au niveau des RCCs, les études sur la pouzzolanicité ont plus concernées les cendres volantes parce qu'elles ont l'avantage d'avoir une granulométrie fine comme celle du ciment. Néanmoins depuis 1999 des études sont menés sur l'utilisation potentielle des mâchefers également comme additif dans le ciment. Les études menées par M.Cheriaf et al.[8] sur du mâchefer brésilien montrent que le mâchefer possède une réactivité pouzzolanique (de l'ordre de 88% à 28jours) permettant son utilisation en tant qu'additif dans la production du ciment portland. Haldun Kurama et al.[9] montrent également qu'en substituant le ciment par 15% de mâchefer, on observe une augmentation des résistances à la flexion et à la compression des mortiers après 56 jours de cure.

### 1.1.3 Utilisation des mâchefers dans le BTP

La production mondiale actuelle de résidus de combustion de charbon est estimée à plus de 600 million de tonne. En 2008, la Chine a produit 2716 millions de tonnes de charbon brut, soit environ 40% de la production totale dans le monde et a ainsi dépassé le record des Etats-Unis comme le plus grand producteur mondial de dioxyde de carbone [10]. Nous pouvons nous rendre compte de l'importante quantité de déchet que l'industrie du charbon rejette chaque année dans la nature. D'après Bian et al.[11], Il y a environ 4,5 milliards de tonnes de déchets miniers de charbon stockés dans 1700 décharges, soit environ 15 000 ha de terres occupés. Il est donc impératif de trouver des voies et moyens de recyclage de ce déchet qui nous envahit et il ressort de la littérature que plusieurs études ont été menées dans ce sens.

De la plupart des études, nous constatons que l'utilisation potentielle des mâchefers est déterminée plus par ses caractéristiques physiques telles que la granulométrie, la solidité, le potentiel de coloration, et la couleur. En effet, la texture normalement grossière, vitreuse des mâchefers en fait un substitut idéal pour les granulats naturels [12]. Il est souvent utilisé en remplacement à faible coût du sable plus coûteux dans la production de béton et dans de nombreux pays, il est utilisé comme une base dans la construction de routes [13], [14]. Néanmoins certaines utilisations des mâchefers sont plus liées à ses caractéristiques chimiques que physiques, notamment dans l'industrie cimentière. Cette utilisation reste encore limitée.

En effet, selon une évaluation de ACAA en 2002, le taux de recyclage des cendres volantes dans le béton et des produits en béton est de 47%, tandis que pour les mâchefers, ce taux est évalué à seulement 5,28% de la production totale de mâchefer estimée à environ 19,8M tonnes. La production est plutôt principalement recyclés dans les remblais structurels (26,61%) ; la base / la fondation / le pavage des chaussée (19,15%) et des applications dans l'exploitation minière (10,43%). Le même profil d'utilisation peut également être donné pour l'Europe. Près de 89% de la production de mâchefer a été recyclée, avec 54% recyclé pour la remise en état et la restauration. Des études antérieures révèlent que les mâchefers sont utilisables pour la production des céramiques [15], la stabilisation ou la solidification des bétons [16] et la fabrication des briques [17], [2].

Plusieurs exemples de l'usage des mâchefers en génie civil dans le développement des matériaux de construction (ciment, briques, béton, agrégats, le bois substitué, etc.) et le

remblaiement des routes ou bien des applications dans le développement des terres incultes et dans l'agriculture ont généré une confiance générale qui a amenée à une augmentation substantielle de son utilisation. Le **tableau n°3** récapitule les applications envisagées dans le domaine du génie civil.

**Tableau 3: Applications potentielles des mâchefers de charbon dans les BTP**

APPLICATIONS POTENTIELLES	EXEMPLES	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
<b>Fabrication du ciment</b>	Production du ciment indien avec les mâchefers de charbon (1 200 000 tonnes par an)	[2]
<b>Confection des briques</b>	Résistance mono axial des briques cuites est supérieure à 12 MPa	[2]
<b>Confection du béton</b>	Utilisation des grains de mâchefers comme agrégats (fc28 = 20 à 25MPa)	[18]
<b>Couche de base des routes</b>	CBR des étangs de mâchefers 70 à 110 %	[2]

## 1.2 LE CIMENT

### 1.2.1 Généralité

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer, en durcissant, des substances variées. Il désigne également, dans un sens plus large, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

La composition de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires,

l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne. Calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450°C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker. La composition minéralogique du clinker est alors la suivante :

**Tableau 4 : Composition minéralogique du ciment**

Nom	Formule	Abréviation
<b>Alite (silicate tricalcique)</b>	$\text{SiO}_2\text{3CaO}$	$\text{C}_3\text{S}$
<b>Bélite (silicate bicalcique)</b>	$\text{SiO}_2\text{2CaO}$	$\text{C}_2\text{S}$
<b>Aluminate tricalcique</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{3CaO}$	$\text{C}_3\text{A}$
<b>Aluminoferrite tétracalcique</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3\text{4CaO}$	$\text{C}_4\text{AF}$
<b>Chaux libre</b>	$\text{CaO}$	$\text{C}$

On ajoute du gypse (minéral de formule  $\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})$ ) (3 à 5 %) au clinker refroidi afin d'apporter des sulfates qui permettent de ralentir la prise du ciment puis le tout est broyé en une fine poudre (gains de 40 microns environ), la poudre obtenue est du ciment Portland.

### 1.2.2 Les différents types de ciments

Lorsque le clinker est refroidi, on peut avant le broyage le mélanger à d'autres composés comme des résidus de la sidérurgie (laitier de hauts fourneaux), des cendres volantes de centrales électriques, etc. [19] pour obtenir d'autres types de ciment. Ainsi on distingue :

- **Le CEM I ou ciment Portland** qui contient au moins 95 % de clinker et au plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
- **Le CEM II A ou B ou Ciment Portland composé** qui contient au moins 65% de clinker et au plus 35 % d'autres constituants (laitier de haut-fourneau, fumée de silice (limitée à 10%), pouzzolane naturelle, cendres volantes, calcaires...). Les CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs

- **Le CEM III A ou B ou ciment de haut-fourneau** qui contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker.
- **Le CEM III C ou ciment de haut-fourneau** qui contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker
- **Le CEM IV A ou B est un ciment de type pouzzolanique.** Avant l'introduction de la NF EN 197-1, il était connu sous l'appellation CPZ.
- **Le CEM V A ou B ou ciment composé** (anciennement ciment au laitier et aux cendres) contient 20 à 64 % de clinker, 18 à 50% de cendres volantes et 18 à 50% de laitier de haut-fourneau.
- **Les CEM III et CEM V** qui comportent du laitier de haut-fourneau sont bien adaptés aux travaux hydrauliques souterrains, aux fondations et aux travaux en milieu agressif. Leur utilisation permet de réduire considérablement les émissions de CO<sub>2</sub> grâce à la substitution du clinker par d'autres constituants.

Les ciments composés sont donc des ciments où une partie du clinker est remplacé par d'autres constituants. Depuis 1970, un grand effort de recherches a été fourni sur l'utilisation des additifs cimentaires en tant que substitution partielle au ciment Portland. Ces additifs proviennent de sources naturelles ou de sous-produits d'autres industries (Menéndez G., 2003) nécessitant peu ou pas d'énergie pour leur extraction. L'une des propriétés essentielles de ces additifs pour la production du ciment est la pouzzolanité. Ils présentent une activité liante croissant avec leur quantité, leur finesse, leur composition minéralogique et le type de ciment influe également. En termes pratiques, cette activité liante se traduit par un gain de résistance [20]. La compacité de la pâte de ciment peut être améliorée par la formation des silicates de calcium hydratés de deuxième génération CSH II. Ces derniers s'obtiennent par introduction de fines particules siliceuses dotées d'un rôle pouzzolanique certain et contribuent à l'augmentation de la résistance et de la durabilité des bétons [21]. Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes. [22], [23], [24], [25], [26] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions :

- Un effet granulaire favorable qui conduit à amélioration de la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci.

- Un effet physico-chimique qui agit sur l'évolution de l'hydratation au cours de la prise et du durcissement et sur les propriétés physiques des matériaux cimentaires durcis qui concerne d'une façon générale tous les additifs minéraux indépendamment de leur nature minéralogique.
- Un effet chimique lié à la composition minéralogique des additifs et concerne leur capacité pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment [24]. Cet effet est propre à certains additifs en milieu cimentaire et interagit fortement avec l'effet physico-chimique.

Le présent projet porte sur la mise en place d'un ciment composé par incorporation dans le ciment portland d'un matériau à caractère pouzzolanique : le mâchefer.

### **1.3 CONCLUSION PARTIELLE**

En conclusion, nous pouvons dire que le mâchefer est un matériau recyclable dans l'industrie cimentière. Des études antérieures effectuées en Inde, en Turquie etc. montre que le mâchefer peut être utilisé comme additif à caractère pouzzolanique dans le ciment. Cette étude que nous menons est une première en Afrique de l'Ouest.

## CHAPITRE 2: MATERIAUX ET DISPOSITIFS

### EXPERIMENTAUX

Dans ce chapitre, nous parlons des différents matériaux que nous avons utilisés dans cette étude ainsi que de la procédure d'expérimentation utilisée.

#### 2.1 LES MATERIAUX ETUDIES

Avant l'utilisation des différents matériaux, nous avons effectué une caractérisation physique de ceux-ci. Cette caractérisation a consisté en la détermination des paramètres tels que : l'analyse granulométrique, la masse volumique spécifique, la masse volumique apparente, la surface spécifique BET, l'équivalent de sable, le coefficient Los Angeles.

##### 2.1.1 Les protocoles d'essais

###### 2.1.1.1 L'analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique est le procédé par lequel on détermine la proportion des différents constituants solides d'un matériau grenu en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis (**figure1**).



**Figure 1 : Tamis utilisés pour l'essai granulométrique**



L'essai est effectué en se basant sur les Normes [27], [28] et a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes dimensions qui constituent un matériau grenu (un sable, gravier ou mélange).

L'opération se fait par tamisage après avoir éliminé à l'eau les fillers (< 80 mm). Les pourcentages ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'un graphique appelé courbe granulométrique. A partir de cette courbe, un certain nombre d'indicateurs permettent de caractériser la distribution granulométrique du matériau tels que :

- Coefficient d'uniformité ou de Hazen :  $C_u = D_{60}/D_{10}$
- Coefficient de Courbure :  $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60})$

$D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 60% de tamisât cumulé.

D'après Caquot et Kérisel :

- Pour  $C_u < 2$  la granulométrie est dite uniforme
- Pour  $C_u > 2$  la granulométrie est dite étalée

Par ailleurs, un sable est bien gradué si  $C_c$  est compris entre 1 et 3.

- Diamètre déterminant :

**( $d_{60}$ )**: C'est le diamètre correspondant au passage de 60% des grains.

- Diamètre efficace :

**( $d_{10}$ )** : C'est le diamètre correspondant au passage de 10% des grains.

- Module de finesse :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

Cet essai a été effectué sur le sable utilisé pour la formulation des mortiers.

### 2.1.1.2 La masse volumique spécifique

La masse volumique spécifique est déterminée à l'aide du pycnomètre à air. Le pycnomètre à air peut être considéré schématiquement comme 2 enceintes volumiques communiquant entre elles par une soupape (**figure2**).



**Figure 2 : Pycnomètre à air du laboratoire LEMC**

L'essai est effectué conformément à la norme [29] et consiste à déterminer la masse volumique des grains solides de l'échantillon. Pour cela, une masse connue  $W_s$  de l'échantillon est introduite dans la cuve du pycnomètre auquel on ajoute une masse connue d'eau assez pour submerger l'échantillon. Une pression d'environ 23,5 mWs est appliquée dans la chambre à air qui est ensuite répartie dans les deux enceintes de façon égale et cette pression égalisée est lue et avec la formule suivante l'on détermine la masse volumique spécifique.

$$V_{tu} = \frac{P' - 4.4174}{P' - 1} * 1214.7465 \quad (1)$$

Avec :

$P'$ : pression moyenne lue (mWs);

1214,7465: volume total des 2 cuves (cm<sup>3</sup>);

4,4174: pression obtenue en partant de 23 mWs quand la cuve est vide (mWs);

1: pression atmosphérique (mWs).

Le poids spécifique est calculé grâce à la formule:

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_{tu} - V_e} \quad (2)$$

$M_s$  : masse de l'échantillon de terre sèche ;

$V_e$  : volume d'eau ajoutée.

Cet essai a été effectué sur le mâchefer, le ciment et le sable.

### 2.1.1.3 La masse volumique apparente

En se basant sur la norme [30] , [31] l'essai a pour but de déterminer la masse volumique apparente sèche ( $\gamma_d$ ). La densité apparente varie avec le degré de tassement de l'échantillon ; ce qui fait que l'on utilise un cône normalisé (**figure3**) permettant d'avoir un tassement identique lors de tous les essais. Il s'agit d'un entonnoir muni d'une passoire qui limite la hauteur de chute de l'échantillon dans un litre taré. La masse volumique apparente est donc obtenue en faisant le rapport de la masse par le volume. L'essai est répété deux fois et on obtient alors une valeur moyenne. Nous avons effectué cet essai sur le mâchefer, le ciment et le sable.



Figure 3 : Cône normalisé

### 2.1.1.4 Le coefficient Los Angeles

Cet essai est effectué suivant la norme [32] et a pour but de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulat.



Figure 4 : Machine Los Angeles



Figure 5 : Boulets de l'essai Los Angeles

Le coefficient Los Angeles par définition est le rapport entre la masse du refus lavé au tamis de 1.6mm de l'échantillon après passage en machine sur la masse initiale.

L'essai consiste donc à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm produite par fragmentation, en soumettant le matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation. Selon la classe granulaire, on a un nombre donné de boulet et un nombre de cycle de rotation.

Cet essai a été effectué sur les granulats de mâchefer afin d'évaluer la broyabilité de ce matériaux. Il permettra de voir si le mâchefer peut être utilisé en remplacement des granulats fins dans les bétons.

Tableau 5: Nombre de boulets et de tours en fonction de la classe granulaire

Classe granulaire	4/6.3	6/10	10/14	10/25	16/31.5	25/50
<b>Nombre de boulets</b>	7	9	11	11	12	12
<b>Masse totale de la charge de boulets</b>	3080 g	3960 g	4840 g	4840 g	5280 g	5280 g
<b>Tolérance sur la charge de boulet</b>	+20 à -150 g					
<b>Nombre de tours</b>	500 tours					1000 trs
<b>Durée de l'essai</b>	15'9 à 16'30					à 33'

Le coefficient Los Angeles est obtenu par :

$$L_A = \frac{P}{M} * 100 \quad (3) \text{ Avec}$$

P = passant du tamis de 1.6mm

M = masse de la prise d'essai = 5000g

### 2.1.1.5L'équivalent de sable

Basé sur la norme [33], l'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable. Il rend compte globalement de la quantité des éléments fins contenus dans ce sable.

L'équivalent de sable (ES) est le rapport le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sableuse sédimentée à la hauteur totale du flocculat. L'essai consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavante puis, après un temps de mise au repos, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés.

Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à maille carrées de 5mm.

On détermine l'équivalent de sable à vue ( $ES_v$ ) et l'équivalent de sable à piston ( $ES_p$ ).

$$ES_v = \frac{H'2}{H1} * 100 \quad (4) \text{ Et } ES_p = \frac{H2}{H1} * 100 \quad (5) \text{ avec}$$

H1= hauteur du flocculant (cm)

H'2= hauteur à vue du sédiment

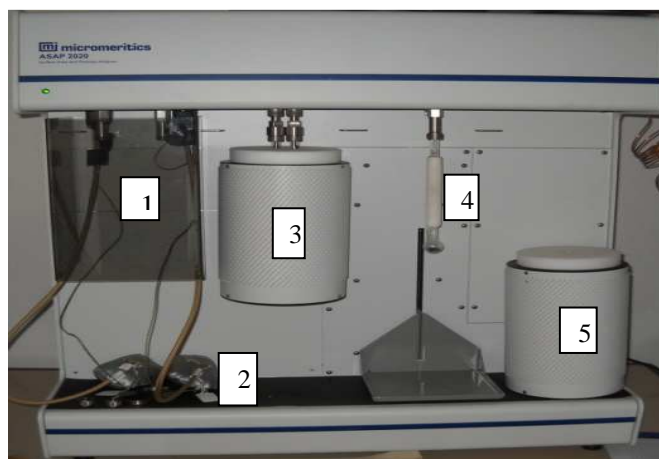
H2= hauteur au piston du sédiment

**Tableau 6: Classement et qualité du sable en fonction de l'équivalent de sable**

ES à vue	ES à piston	Classement et qualité du sable
<b>ES&lt;65</b>	ES<60	Sable argileux : risque de retrait ou gonflement pas bon pour béton de qualité
<b>65≤ES&lt;75</b>	60≤ES<70	Sable légèrement argileux : propreté admissible pour béton de qualité courante (retrait possible)
<b>75≤ES&lt;85</b>	70≤ES<80	Sable propre à faible % de fines argileuses, bon pour béton de haute qualité
<b>ES≥85</b>	ES≥80	Sable très propre : pas de fines argileuses, ce qui risque en fait d'amener un défaut de plasticité du béton ⇒ augmenter le dosage d'eau donne des bétons exceptionnels de très haute résistance

### 2.1.1.6 La surface spécifique BET

”La surface spécifique BET”. Cet essai a été effectué en collaboration avec le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB). Les surfaces spécifiques (SBET) ont été déterminées en utilisant la méthode de BET (Brunauer-Emmett-Teller) en supposant que la surface d’encombrement de la molécule d’azote est de  $0,162 \text{ nm}^2$ . Les analyses ont été effectuées en utilisant un instrument automatique d’adsorption du modèle ASAP 2020, Micromeritics (**Figure6**) à la température d’azote liquide (77 K).



**Figure 6 : Photographie de l’analyseur de la porosité et de la surface spécifique modèle ASAP 2020 Micromeritics**

Avant d’effectuer les mesures, les échantillons ont été dégazés à haute température  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  pendant 8h sous vide ( $P < 0,1 \text{ mm}$  de mercure) afin d’épurer la surface des pores (1, 2, 3). Lors de l’étape d’analyse, l’échantillon est placé dans une ampoule porte-échantillon (4) que l’on immerge par la suite dans un vase Dewar contenant de l’azote liquide (5) (à 77 K). Un courant d’azote sous différentes pressions circule alors à l’intérieur de l’ampoule et s’adsorbe sur l’échantillon, permettant ainsi de tracer l’isotherme d’adsorption du produit. A partir de cette isotherme, le logiciel couplé à l’analyseur de surface ASAP 2020 permet d’accéder à la surface spécifique (calculée par la méthode BET).

## 2.1.2 Caractéristiques des matériaux

### 2.1.3 Le mâchefer de la SONICHAR

Le mâchefer de charbon utilisé en tant qu'additif provient de la SONICHAR qui en produit environ 150000 tonnes par ans.



Figure 7 : Montagne de mâchefer à la SONICHAR

#### 2.1.3.1.1 Propriétés chimiques et minéralogiques

R. Vinai et al. [34] ont effectué des analyses chimiques et minéralogiques du mâchefer de la SONICHAR qui montrent que ce mâchefer ne contient pas de quantités significatives d'uranium et que la radioactivité enregistrée reste dans des intervalles acceptables ; les essais de lixiviation montre que les quantités des éléments détectés sont inférieures aux exemples proposés dans la littérature[2] et la concentration des métaux lourds détectés dans le lixiviat est inférieure aux seuils proposés par les normes allemandes [35]. Ainsi, le danger dû aux métaux lourds est principalement la possibilité d'accumulation dans l'organisme humain ; et 61,3 % du mâchefer est en forme amorphe dû aux températures de combustion et soit l'analyse MEB, soit l'analyse DRX montrent que les silices, les aluminiums et les oxydes de fer constituent environ les 99% de la masse totale ; ce qui est conforme aux résultats consultés dans la bibliographie.

Tableau 7: Analyse chimique du mâchefer [34]

Eléments	Mg	Al	Si	K	Ti	Fe	Oxydes	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	FeO	CaO
<b>Wt%</b>	1.04	27,90	59.59	5.33	2,68	3,90	Wt%	0,95	27,21	62,32	2,58	2,15	3,57	0,5
<b>At %</b>	1.23	30.01	61.53	3.97	1.63	2.05								

Tableau 8: Eléments chimiques identifiés par lixiviation [34]

Paramètres	Unités	Min.	Max.	Moyenne
<b>pH</b>	-	7.42	7.62	7,52
<b>Température</b>	°C	28.40	28.50	28.43
<b>Conductivité</b>	µS/cm	52.70	108.60	79.87
<b>Fraction soluble</b>	(%)	6.61	16.39	12,10
<b>Potassium K</b>	(mg/kg)	10.00	24.00	18.00
<b>Sodium Na</b>	(mg/kg)	75.00	155.00	106.67
<b>Nickel Ni</b>	(mg/kg)	0.03	0.03	0,03
<b>Plomb Pb</b>	(mg/kg)	0.01	0.01	0,01
<b>Chrome Cr</b>	(mg/kg)	0.01	0.01	0,01
<b>Cadmium Cd</b>	(mg/kg)	0.12	0.41	0,22
<b>Cuivre Cu</b>	(mg/kg)	0.03	0.24	0,10

### 2.1.3.1.2 Propriétés physiques

La fraction granulaire utilisée dans cette étude est le passant au tamis de 80 micron. Un essai de sédimentométrie a été effectué sur ces cendres volantes de mâchefer mais l'expérience n'a pas été concluante dû au fait que les particules flottent sur l'eau au lieu de sédimenter. Néanmoins afin de caractériser physiquement le mâchefer de charbon nous avons déterminé les caractéristiques telles que:

La masse volumique spécifique (*annexe2*)

La masse volumique apparente (*annexe3*)

L'indice Los Angeles (*annexe5*)

La surface spécifique BET

Le **tableau9** donne un récapitulatif des valeurs obtenues et l'on constate que les valeurs



obtenues sont dans la fourchette lue dans la littérature.

**Tableau 9: Propriétés physiques des mâchefers de la SONICHAR**

Essais	Normes utilisées	Résultats obtenus	Références bibliographiques	
Masse volumique spécifique	[29]	<b>2,31 t/m<sup>3</sup></b>	2,2 à 2,8 (t/m <sup>3</sup> )	[3]
Masse volumique apparent	[30]	<b>0,77 t/m<sup>3</sup></b>	0,7 à 0,9 (t/m <sup>3</sup> )	[4]
Surface spécifique BET	-	<b>13.89m<sup>2</sup>/g</b>	-	-
Indice Los Angeles	[32]	<b>62.78%</b>	-	-

### 2.1.4 Le ciment

Le ciment utilisé pour cette étude est un CPA45 de la société CIMTOGO. Il correspond à un CEM I 42.5 selon la norme [36]. Les caractéristiques physiques du ciment déterminées sont :

La masse volumique spécifique = 3.56t/m<sup>3</sup> (*annexe2*)

La masse volumique apparente = 1.06 t/m<sup>3</sup> (*annexe3*)

La surface spécifique BET = 2.96 m<sup>2</sup>/g

### 2.1.5 Le sable

Egalement sur le sable nous avons déterminé quelques paramètres physiques tels que la masse volumique spécifique, la masse volumique apparente ainsi que l'équivalent de sable.

L'équivalent de sable nous montre que le sable utilisé est un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses, bon pour béton de haute qualité. On obtient en effet un équivalent de sable à vue (ESV) de 81.12 et un équivalent de sable au piston (ESP) de 74.49 (*annexe 4*).

Une analyse granulométrique faite sur le sable montre qu'il a une granulométrie étalée (**Cu=3 > 2**) mais c'est un sable mal graduée (**Cc=0.9** (*annexe1*)). La courbe granulométrique du sable est donnée par la **figure 5**.

Masse volumique apparente = 1.53 t/m<sup>3</sup>

Masse volumique spécifique =  $2.67\text{t/m}^3$

Module de finesse = 2.90

ESV et ESP = 81.12 et 74.49

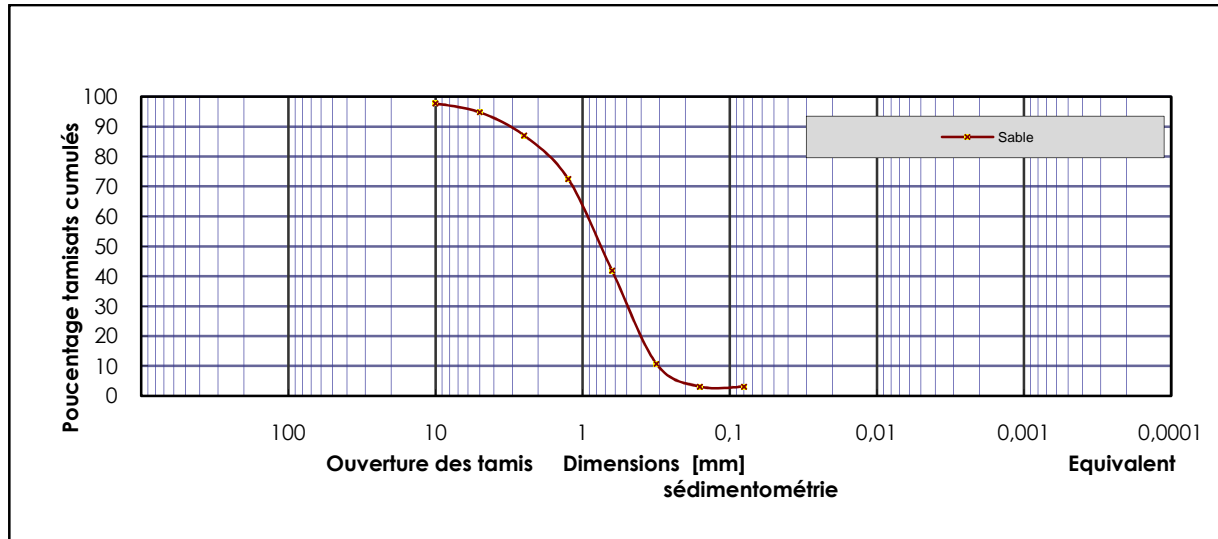


Figure 8: Courbe granulométrique du sable

## 2.1.6 Conclusion partielle

Nous constatons que le mâchefer utilisé a une surface spécifique BET plus grande que le ciment. Alors que plus la surface spécifique d'un matériau est grande plus il faut de l'eau pour son mélange. Cet état de fait nous amène à présager que les mortiers que nous confectionnerons avec le ciment composé demanderont plus d'eau que les mortiers avec uniquement le ciment portland. Il serait donc préférable d'utiliser un fluidifiant dans la formulation des mortiers afin de ne pas augmenter la porosité des mortiers fabriqués.

## 2.2 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

### 2.2.1 Formulation

Pour cette étude, plusieurs essais ont été effectués tant minéralogiques, chimiques que mécaniques.

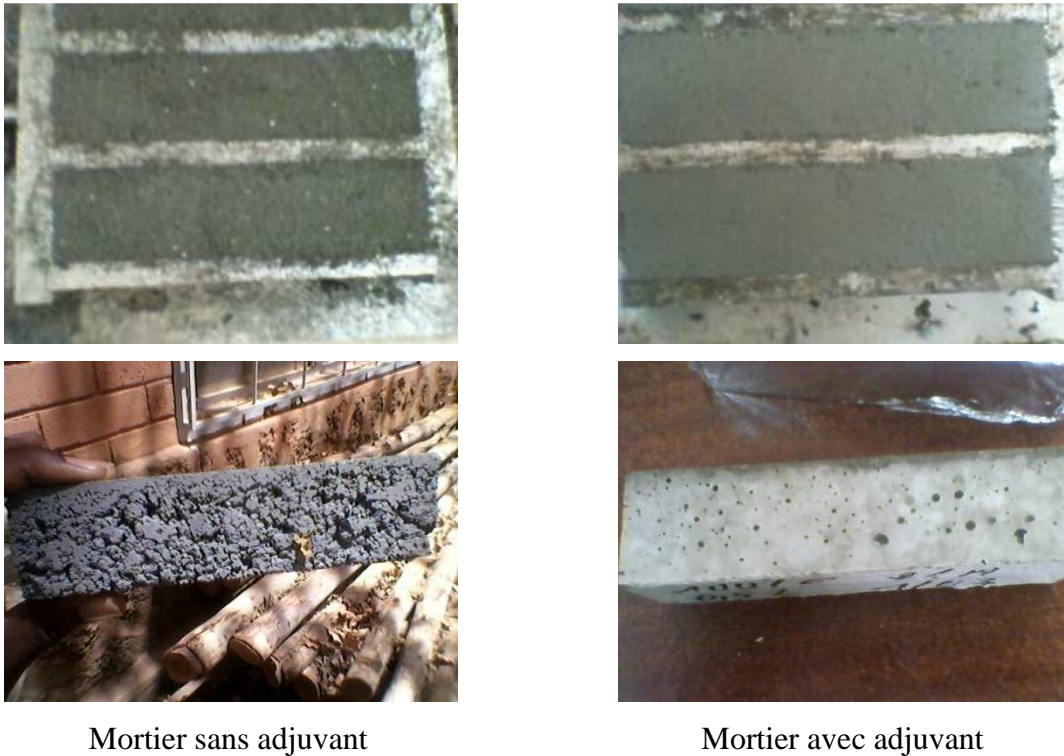
Les essais minéralogiques et chimiques ont consisté à des analyses thermo gravimétrique (ATG) .Pour cet essai, des pâtes plastiques de chaux, de mâchefer et de mélange 50% chaux – 50% mâchefer sont confectionnées, conservées bien emballées dans une glacière à 100% d'humidité jusqu'aux jours prévus pour l'essai.

Comme essais mécaniques, nous avons la résistance à la compression et celle à la flexion ainsi que le module d'élasticité dynamique. Les résistances à la compression ont permis de déterminer l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer.

Pour ces différents essais nous avons confectionné des éprouvettes de 40X40X160mm<sup>3</sup> de mortier conformément à la norme européenne [37], que nous avons conservées dans de l'eau de chaux jusqu'au jour prévu pour l'essai. Les éprouvettes sont placés dans de l'eau de chaux et non dans l'eau simple afin d'éviter que la portlandite qui est de la chaux produite lors de l'hydratation du ciment ne se dissolve pas l'eau. En effet c'est avec cette portlandite que va réagir le mâchefer pour former les CSH II.

La formulation de ces mortiers a été faite suivant les rapports massiques suivants. Initialement nous avons  $S/C = 3$  et  $E/C = 0,5$  avec C : masse de Ciment, S : masse de Sable et E : masse d'Eau ; mais avec cette formulation nous nous retrouvons avec des problèmes de consistance des mortiers. Afin de résoudre ce problème de consistance, nous avons ajouté du super plastifiant à concentration de 2% de la masse de ciment.

Pour le malaxage des mortiers, nous avons utilisé une malaxeuse électrique dans laquelle nous introduisons d'abord le ciment, le sable et le mâchefer le cas échéant. Le tout est mélangé à sec pendant deux minutes avant que l'eau soit introduite et qu'on effectue encore un malaxage de deux minutes.



Mortier sans adjuvant

Mortier avec adjuvant

**Figure 9 : Différence entre mortier adjuvanté et mortier non adjuvanté**

Ces images montrent la différence entre un mortier confectionné sans adjuvant et un autre avec adjuvant. Le mortier sans adjuvant est sec au mélange et après démoulage il présente une texture rugueuse et très poreuse. L'adjuvant permet de fluidifier le mélange et après démoulage le mortier est lisse et peu poreux.

### **2.2.2 Les essais chimiques et minéralogique**

Il s'agit ici des essais d'ATG effectués afin de mettre en évidence la réactivité du mâchefer en présence de chaux donc en présence de ciment. En effet, il s'agit de montrer ici que la silice présente dans le mâchefer réagit avec la chaux pour former des silicates de calcium hydratés CSH. Ces analyses nous permettent donc de montrer que si la chaux est consommée en présence de mâchefer alors si une partie du ciment portland est remplacé par le mâchefer, il réagira avec la portlandite contenue dans le ciment lors de son hydratation pour former des silicates de calcium hydratés de deuxième génération.

Cet essai a été effectué en collaboration avec le Laboratoire Biomasse Energie et Biocarburant (LBEB) de 2iE. En effet le jour de l'essai, les pâtes sont déballé, moulues et les

poudres envoyé au laboratoire LBEB pour analyse. Cette analyse est effectuée à 28, 45 et 90 jours après la confection des pâtes. Dans ce rapport nous nous sommes limités à 28 jours. L'ATG consiste en une pyrolyse de l'échantillon et en fonction de la vitesse et de la température à laquelle les éléments chimiques se pyrolyses permet d'obtenir une courbe montrant la masse d'échantillon qui été consommée. En superposant les courbes que nous obtenons avec les trois échantillons, nous pouvons montrer si des éléments ont disparus ou diminués dans les uns ou apparus dans les autres.

### 2.2.3 Les essais mécaniques

Par essais mécaniques, nous entendons les essais de résistance à la compression qui conduisent à la détermination de l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer, les essais de résistance à la flexion trois points ainsi que des essais de détermination du module élastique dynamique.

Toujours en se basant sur la norme européenne [37], nous avons substitué 25% en masse de ciment portland par le mâchefer dans les mortiers afin de déterminer l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer. Et afin de déterminer la proportion optimale de mâchefer à incorporer dans le ciment composé, nous avons effectué une substitution progressive en masse de ciment par le mâchefer allant de 5%, 10%, 15%, 20% et 25%. Les essais de résistance à la flexion trois points et de compression nous permettent de trouver le taux de substitution optimal pour la formulation du ciment.

Pour ces essai, à la veille du jour prévu, les éprouvettes sont retiré de l'eau de chaux et exposé à température ambiante pendant 24h jusqu'au jour de l'essai.

Ces essais sont effectués à 7, 28 et 45 jours à l'aide d'un portique universel (**figure10**). A l'âge prévu, nous effectuons sur 3 éprouvettes l'essai de résistance à la flexion, et la résistance à la compression sur les 6 demi-prismes obtenus.



Figure 10 : Essai de résistance à la flexion à l'aide du portique universel

### 2.2.3.1 Résistance à la flexion

L'essai est effectué conformément à la norme [37] qui prévoit le dispositif représenté à la figure 11 à suivre pour la rupture des éprouvettes.

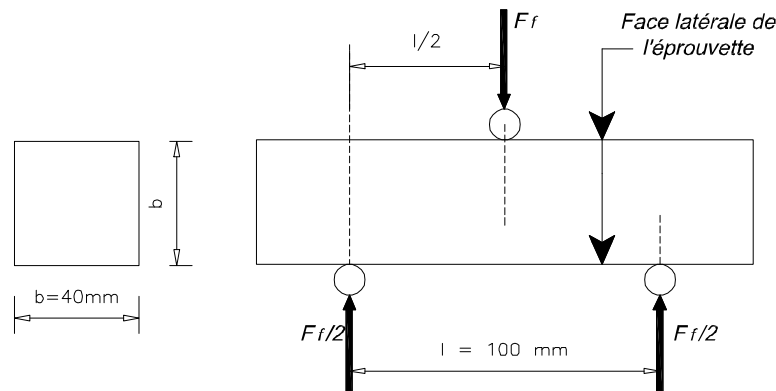


Figure 11: dispositif de rupture des éprouvettes à la flexion trois point

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f l/4$  et la contrainte de traction correspondant sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = 1.5 * F_f * \frac{l}{b^3} \quad (6)$$

$R_f$  = résistance à la flexion

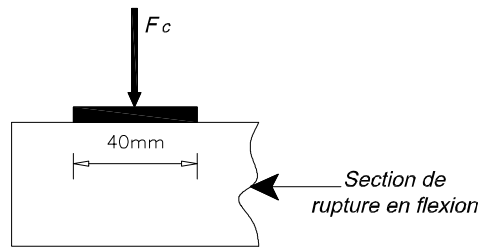
$l$  et  $b$  sont respectivement la longueur (16mm) et la hauteur (4mm) de l'éprouvette.

Si  $F_f$  est exprimé en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_f \text{ (MPa)} = 2.34 \times 10^{-3} \times F_f \text{ (N)} \quad (7)$$

### 2.2.3.2 Résistance à la compression

Pour la détermination de la résistance à la compression, nous nous sommes basés sur le dispositif représenté à la **figure 12** :



**Figure 12: dispositif de rupture des éprouvettes à la compression**

Si  $F_c$  est la charge de rupture de l'éprouvette à la compression, la contrainte exercée sur l'éprouvette est :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (8)$$

$R_c$  = résistance à la compression

Si  $F_c$  est exprimé en newtons (N), cette résistance exprimée en mégapascals (MPa) vaut :

$$R_c \text{ (MPa)} = \frac{F_c \text{ (N)}}{1600} \quad (9)$$

### 2.2.3.3 Indice d'activité pouzzolanique

L'indice d'activité pouzzolanique est le rapport entre la résistance à la compression du mortier avec 25% d'ajout de mâchefer et la résistance à la compression d'un mortier témoin avec 100% de ciment.

$$i = \frac{R_p}{R_0} \quad (10) \text{ Avec}$$

$i$  = indice d'activité pouzzolanique

$R_p$  = résistance à la compression du mortier avec 25% de mâchefer en masse de ciment

$R_0$ = résistance à la compression du mortier témoin avec 100% de ciment.

### 2.2.3.4 Le module dynamique

L'essai consiste à mesurer le temps  $t$  que mettent des ultrasons à se propager dans l'éprouvette à l'aide d'un contrôleur de vitesse de pulsation d'ultrason (**figure13**).



**Figure 13 : Equipement pour l'essai poundite**

De la valeur obtenue par mesure nous déterminons avec la formule suivante le module dynamique :

$$E_D = V^2 * Q * \frac{(1+n)(1-2n)}{1-n} \quad (11) \text{ avec } V = L/t$$

Où :

$L$ = longueur de propagation en mm

$t$ = le temps de propagation en  $\mu s$

$V$  = vitesse de l'onde en Km/s

$Q$  = densité du béton en  $Kg/m^3$

$n$  = coefficient de poisson (pour béton de haute résistance  $n=0.15$  ; pour béton de faible résistance  $n=0.30$ )

$E_D$  = module dynamique élastique  $MN/m^2$



## **2.3 CONCLUSION PARTIELLE**

Tous ces différents essais nous ont donc permis de mettre en évidence la réactivité pouzzolanique du mâchefer de charbon, dévaluer son indice d'activité et de ressortir le taux optimal de mâchefer à incorporer dans le ciment composé à mettre en œuvre.

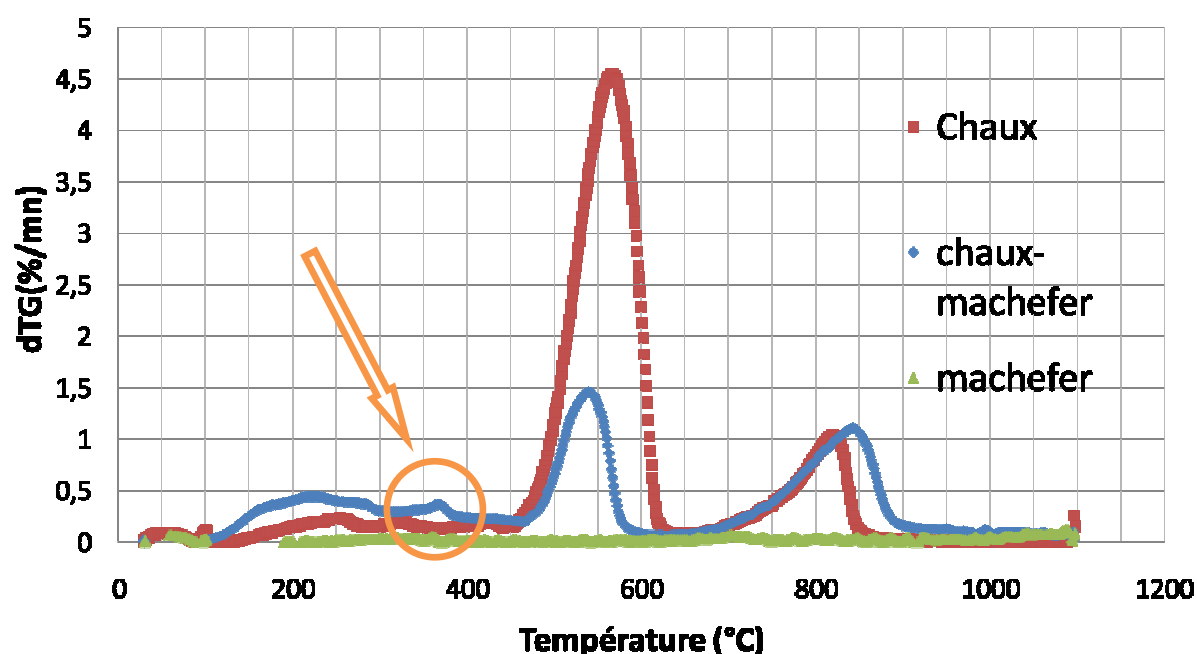
## CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre détaille tous les résultats que nous avons obtenus avec les différents essais évoqués plus haut.

### 3.1 REACTIVITE POUZZOLANIQUE DU MACHEFER DE CHARBON

#### 3.1.1 Analyses chimiques

L'analyse d'ATG effectuée à 28 jours de confection des pâtes montre qu'effectivement le mâchefer a la capacité de réagir avec la chaux. La **figure 14** montre les résultats obtenus.



**Figure 14: Résultat de l'essai d'ATG effectué à 28 jours**

On constate :

- Une baisse considérable du pic de chaux à 570°C lorsqu'on mélange la chaux et le mâchefer. Cette baisse ne peut être expliquée par le simple fait de la dilution de la chaux par le mâchefer (50% chaux – 50% mâchefer). Une partie de la chaux a donc été consommée par le mâchefer.
- On remarque également l'apparition d'un nouveau pic à 370°C au niveau de la courbe du mélange chaux mâchefer. Ce nouveau pic peut s'expliquer par fait que de nouveaux composés tels que les silicates de calcium hydratés (CSH) se sont formés.

Nous pouvons donc déjà dire que le mâchefer réagit en présence de chaux. Cette réaction se produisant entre la silice présente dans le mâchefer et la chaux pour former des CSH. Le mâchefer de charbon de la SONICHAR semble avoir une réactivité pouzzolanique. Les essais à 45 et 90 jours permettront de confirmer ces résultats.

### 3.1.2 Essais mécaniques

Lorsque l'indice d'activité pouzzolanique d'un additif est inférieur 67% à 28 jours alors cet additif est dit inerte [7].

Nous remarquons que l'indice d'activité augmente en fonction du temps de cure. Cependant, notons une baisse de cette activité en fonction du taux de substitution en masse de ciment par le mâchefer. Nous obtenons à 28 jours avec la substitution de 25% un indice d'activité  $i=70.10\%$ . Cette valeur étant supérieure à la limite normative (67%), nous pouvons confirmer les résultats obtenus chimiquement.

L'ensemble de ces deux résultats montrent que le mâchefer produit par la SONICHAR n'est pas inerte et possède des propriétés pouzzolaniques. Les cendres volantes de mâchefer pourraient donc être utilisées comme addition dans la fabrication du ciment.

L'évolution de l'indice d'activité avec le temps est représentée à la **figure15**. Nous constatons que les résistances augmentent significativement à 45 jours où nous avons un indice d'activité de 97.97%.

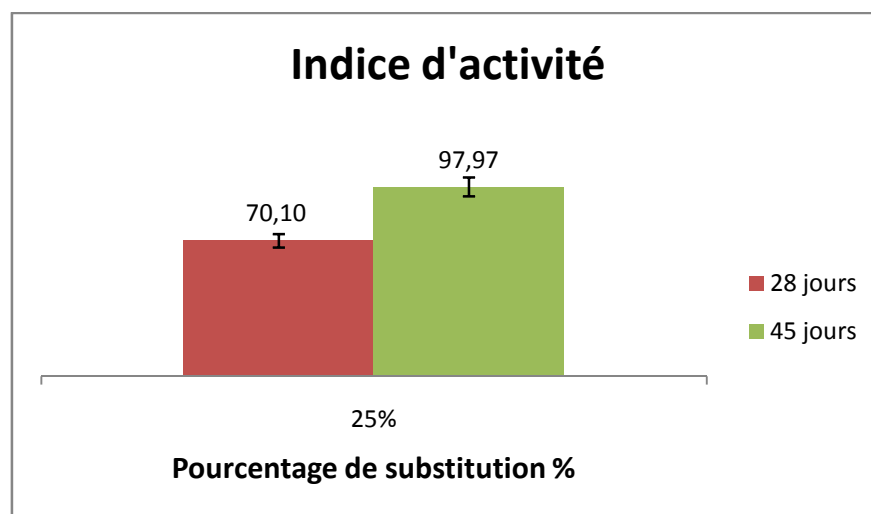


Figure 15: indice d'activité pouzzolanique du mâchefer à différents âges

### 3.2 OPTIMISATION DE LA TENEUR DU CIMENT EN MACHEFER

L'objectif de ce projet est de mettre en place un ciment composé. Afin de trouver la proportion de mâchefer à incorporer dans ce ciment composé, nous avons fait varier le taux de substitution du ciment par le mâchefer de 5% à 25% avec un pas de 5%. En évaluant les résistances à la compression et à la flexion de ces différents mortiers, nous constatons 28 et 45 jours que l'optimum se situe autour de 10% et 15% de substitutions. Les essais effectués 45 jours donnent des résistances supérieures à celles du mortier témoins jusqu'à 15% de substitution. A partir de 20% et 25% les résistances baissent.

Nous avons alors un optimum à 15% de substitution du ciment par le mâchefer.

**Tableau 10 : Indice d'activité (%) du mâchefer à différentes dates**

Indice d'activité (%)		
Taux de substitution	28 jours	45 jours
0%	100	100
5%	93,77	109,76
10%	80,97	102,22
15%	79,05	104,70
20%	72,89	91,19
25%	70,10	97,97

Nous avons à 28 jours un indice d'activité pouzzolanique de 79% avec 15% de substitution. Cette valeur monte à 104% à 45 jours. Le mâchefer possède donc une activité pouzzolanique non négligeable selon la norme [7], qui prévoit un minimum d'indice d'activité pouzzolanique de 75% à 28 jours avec le ciment Portland artificiel.

Nous prévoyons donc de retenir pour la formulation de notre ciment composé, une substitution en masse de ciment par 15% de mâchefer.

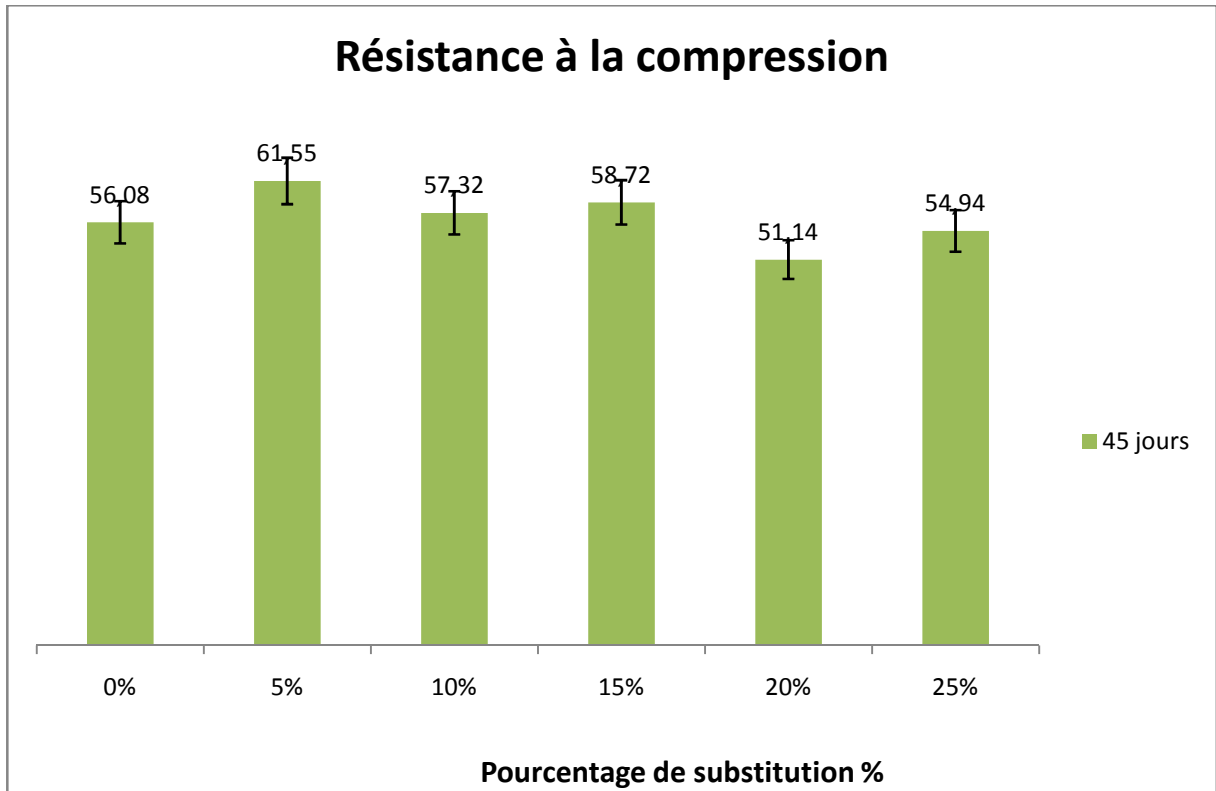


Figure 16: Résistance à la compression (MPa) des différents mortiers à 45 jours de cure

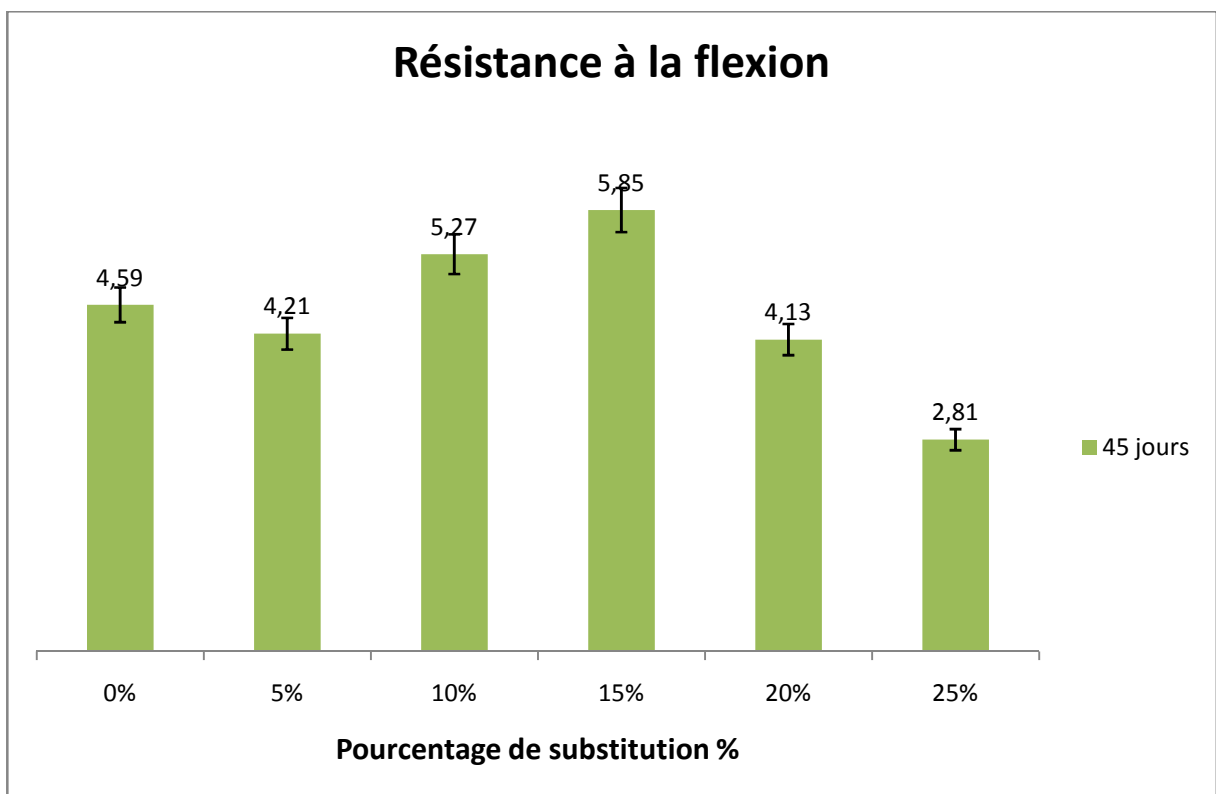


Figure 17: résistance à la flexion (MPa) des différents mortiers avec à 45 jours de cure

### 3.3 INFLUENCE DU RAPPORT EAU/LIANT

Pour étudier l'influence du rapport E/L sur les mortiers, nous avons comparé les résultats de l'essai poundite effectué sur des mortiers confectionnés avec le ciment composé mis en place (15% de substitution en masse de ciment par le mâchefer). Nous avons confectionné un mortier avec un rapport E/L = 0,5 et un mortier avec un rapport E/L = 0,4.

L'essai qui a été effectué à 28 jours de cure montre que lorsque le rapport E/C diminue, le module dynamique augmente.

**Tableau 11 : Evaluation du module dynamique en fonction du rapport E/L**

Module dynamique à 28 jours de cure						
E/C	T (μs)	V (Km/s)	Masse (Kg)	Q (Kg/m <sup>3</sup> )	n	E (MN/m <sup>2</sup> )
<b>0,5</b>	31	5,16	0,57	2213,79	0,30	<b>43808,47</b>
<b>0,4</b>	27,57	5,80	0,59	2294,53	0,30	<b>57407,11</b>

Les résultats obtenus sont cohérents car il semblerait que la résistance augmente lorsque l'on diminue l'eau de gâchage des mortiers.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

---

Cette étude avait pour objectif la mise en place d'un ciment composé par substitution partielle du ciment portland par du mâchefer. Pour cela nous avons effectué des analyses chimiques (ATG) et mécaniques (indice d'activité) afin de mettre en évidence la réactivité pouzzolanique du mâchefer en présence de chaux donc en présence de ciment. Ensuite nous avons déterminé le taux optimal de mâchefer à incorporer dans le ciment composé. Et enfin nous avons étudié l'influence du rapport E/C sur les caractéristiques mécaniques des mortiers confectionnés avec le ciment composé mis en place.

A la lumière des essais chimiques réalisés (ATG), on peut affirmer que le mâchefer de charbon de la SONICHAR a une réactivité pouzzolanique car la silice qu'il contient capterait la chaux pour former des silicates de calcium hydratés de deuxième génération CSH II.

Cela est confirmé par l'évaluation de l'indice d'activité pouzzolanique du mâchefer évalué à partir d'un mortier avec 25% de substitution du ciment par du mâchefer. La valeur obtenue à 28 jours de cure est d'environ 70%. Ainsi donc, conformément à la norme [7], nous pouvons affirmer que le mâchefer de la SONICHAR n'est pas un ajout inerte car son indice d'activité à 28 jours est supérieur à 67%.

Aussi, les essais de poundite réalisés montrent que le module d'élasticité dynamique augmente lorsque l'on diminue la quantité d'eau de gâchage. Il semblerait donc que lorsque le rapport E/C baisse les résistances mécaniques des mortiers augmentent.

On peut alors affirmer que l'utilisation du ciment mélangé au mâchefer de charbon minéral nous permet d'atteindre les objectifs fixés et de contribuer ainsi à la :

- Diminuer des émissions de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> par l'industrie cimentaire par la diminution de l'utilisation du clinker
- Préservation du milieu environnemental de la SONICHAR par la valorisation de ses déchets

En effet les résultats obtenus montrent que l'on peut mettre en place un ciment composé avec une substitution de 15% en masse de ciment par le mâchefer. Ce ciment composé possède un indice d'activité de 79% à 28 jours alors que la norme [7] prévoit lorsque l'on met en place un ciment composé, un minimum d'indice de 75% à 28 jours. Avec ce ciment nous

obtenons à 45 jours de cure une valeur allant jusqu'à 104%.

En perspective nous avons :

- Analyse de la cinétique d'hydratation des pâtes de ciment avec 25% de mâchefers (Suivi de la conductivité et du pH pendant 24H, Evolution des diffractogrammes RX à 28, 45 et 90 jours.
- Détermination de la classe du ciment suivant la norme [37]
- Formulations de ciment/mâchefers pour différentes applications (Formulation pour liant hydraulique routier, Formulation pour bétons d'ouvrages, formulation pour bétons de hautes performances ;



## RECOMMANDATIONS

---

Comme recommandations, nous proposons pour la suite de l'étude que les conditions de cure des mortiers soient revues. En effet, les mortiers lorsqu'ils sont démoulés 24 heures après leur confection sont sensé être gardés dans de l'eau saturée à la chaux. Dans cette étude la quantité de chaux nécessaire pour saturer l'eau n'a pas été évaluée. Nous ignorons donc si l'eau dans laquelle étaient plongées les éprouvettes était saturée et si la portlandite ne s'est pas dissoute. Nous proposons donc d'évaluer la quantité de chaux qu'il faut pour saturer l'eau afin de s'assurer que les conditions dans lesquelles la cure doit se faire sont respectées.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] WRI, «proparco - Secteur Privé et Développement,» 2011.
- [2] M. S. S. R. A. P. Asokan, «Coal combustion residues – environmental implications and recycling potentials,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 43, 239–262, 2005.
- [3] R. Siddique, «Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials,» *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 54, 1060–1066, 2010.
- [4] K. e. A. J. Rogbeck, «Coal bottom ash as light fill material in construction,» *agement*, Vol. 16, Nos 1 3, pp. 125-128, 1996.
- [5] e. a. P. Kishor, «Use of Fly Ash in agriculture: a way to improve soil fertility and its productivity,» *Asian Journal of Agriculture research*, vol. 4 , n° %11, pp. 1-14, 2010.
- [6] Norme, *ASTM C 340-58 T*.
- [7] Norme, *ASTM C618*.
- [8] J. J. M. Cheriaf, «Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash,» *Cem. Concr. Res.* 29, p. 1387–1391, 1999.
- [9] M. K. Haldun Kurama, «Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture,» *Construction and Building Materials*, n° %122 , 2007.
- [10] L. Z. Liu Haibin, «Recycling utilization patterns of coal mining waste in China,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, p. 1331–1340, 2010.
- [11] D. J. e. a. Bian Z, «The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. *Environmental Geology*,» vol. 58(3):625–34, 2009.
- [12] J. L. T. N. B.W. Ramme, «Coal combustion products utilization-An environmental approach, in: *Proceedings of the Three-Day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*, Ottawa, Canada,» p. 349–383., October 21–23, 1998.
- [13] Y. C. N. Ghgafoori, «Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: Part I - Long term durability,» *ACI Mater Journal* 95 (2), p. 121–130, 1998.
- [14] R. Ranganath, «A study on the characterisation and use of ponded fly ash as fine aggregate in cement concrete,» *Ph.D. Thesis, IIT Delhi, Delhi, India*, 1996.

- [15] I. K. G. Y. A. S. D. V. T. a. D. O. L. V. G. Lemeshev, «Utilization of Coal-Mining Waste in the Production of Building Ceramic Materials,» *Translated from Steklo i Keramika*, pp. No. 9, pp. 30 – 32, September, 2004.
- [16] K. K. K. S. Y. N. Bakoshi T, «Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate,» *ACI Special Publication (SP-179-10)*, p. 159–72, 1998.
- [17] C. J. Xiaoyan Y, «Comprehensive utilization of the coal gangue. *Coal Technology*,» 26(10):108–10., 2007.
- [18] I. Y. Ö. M. Ömer Özkan, «Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag,» *Waste Management*, 27, p. 161–167, 2007.
- [19] Norme, *NF EN 206 -1*.
- [20] Bessa, «Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers,» 2004.
- [21] Aïtcin, «Bétons Hautes performances,» vol. vol. 683, 2001.
- [22] Benezet, «Réactivité pouzzolanique dans le système quartz-oxyde de calcium-eau,» 1997.
- [23] L. P. R. E. Cyr M., «Efficiency of mineral admixtures in mortars, quantification of physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength,» vol. vol. 36, n° %1n° 2, pp. 264-277, 2006.
- [24] A. Kara, «Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires,» 2002.
- [25] C. M. R. E. Lawrence P., «Mineral admixtures in mortars, effect of type, amount and finesses of fine constituents on compressive strength,» *Cement and Concrete Research*, vol. vol. 35, n° %1n° 6, pp. 1092-1105, 2005.
- [26] T. K. B. B. A. A. U. B. Felekoglu B., «The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars,» *Cement and Concrete Research*, vol. vol. 36, n° %1n° 9, pp. 1719-1726, 2006.
- [27] Norme, *NFP 18-560*.
- [28] Norme, *NFP 18-540*.
- [29] Norme, *EN 1097-7*.

[30] Norme, *NFP 18-554*.

[31] Norme, *NFP 18-555*.

[32] Norme, *NFP 18-573*.

[33] Norme, *NF 18-598*.

[34] A. L. J. R. M. A. A. R. Vinai, «Coal combustion residues valorisation: Research and development on compressed brick production,» *Construction and Building Materials* 40 1088 - 1096, 2013.

[35] K. E. T. L. t. W. H. Meij R, «Field leaching of bricks and concrete containing coal fly ash. In: International ash utilisation symposium,» *Center for Applied Energy research*, n° 197, 22–24 October 2001.

[36] Norme, *EN 197-1*.

[37] Norme, *EN 196-1*.

## ANNEXES

---

Annexe I : Tableau d'analyse granulométrique par tamisage .....	46
Annexe II : Calcul du poids spécifique des matériaux .....	47
Annexe III : Calcul de la masse volumique apparente des matériaux .....	47
Annexe IV : Equivalent de sable .....	48
Annexe V : Coefficient Los Angeles du mâchefer .....	48

## Annexe I : Tableau d'analyse granulométrique par tamisage

	Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
	50	80				
	49	63				
	48	50				
	47	40				
	46	31,5				
	45	25				
	44	20		0,0		
	43	16		0,0		
->	42	12,5		0,0		
->	41	10	22,4	22,4	2,2%	97,8%
	40	8		22,4	2,2%	
->	39	6,3		22,4	2,2%	
->	38	5	29,8	52,2	5,2%	94,8%
	37	4		52,2	5,2%	
->	36	3,15	46,3	98,4	9,8%	90,2%
->	35	2,5	31,5	129,9	13,0%	87,0%
	34	2		129,9	13,0%	
	33	1,6		129,9	13,0%	
->	32	1,25	144,9	274,8	27,5%	72,5%
	31	1		274,8	27,5%	
	30	0,8		274,8	27,5%	
->	29	0,63	306,3	581,1	58,1%	41,9%
	28	0,5		581,1	58,1%	
	27	0,4		581,1	58,1%	
->	26	0,315	311,4	892,4	89,2%	10,8%
	25	0,25		892,4	89,2%	
	24	0,2		892,4	89,2%	
->	23	0,16	76,4	968,9	96,9%	3,1%
	22	0,125		968,9	96,9%	
	21	0,1		968,9	96,9%	
Sédiments.	20	0,08		968,9	96,9%	
	19	0,063				
	18	0,050				
	17	0,040				
		Module de finesse Mdf =			2,90	
		Coefficient de HAZEN Cu =			3	
		Coefficient de courbure Cc =			0,9	

**Annexe II : Calcul du poids spécifique des matériaux**

N° échantillon (le cas échéant)	Poids sec matériaux mis dans la cuve (g)	Volume d'eau distillé ajouté (cm <sup>3</sup> )	Pression finale (P') cuve échantillon + chambres (mWs)				Valeur V <sub>lu</sub> (cm <sup>3</sup> )	y <sub>s</sub> (KN/m <sup>3</sup> )	Moyenne	Ecart type
			1ère essai	2ième essai	3ième essai	$\bar{P}$ moy (mWs)				
<b>S</b>	1 185 g	448 cm <sup>3</sup>	14,00	13,85	13,80	13,88	893 cm <sup>3</sup>	26,7 KN/m <sup>3</sup>	26,7 KN/m <sup>3</sup>	0,11
<b>S</b>	1 226 g	484 cm <sup>3</sup>	16,21	16,19	16,15	16,18	941 cm <sup>3</sup>	26,8 KN/m <sup>3</sup>		
<b>S</b>	1 174,7 g	453,8 cm <sup>3</sup>	14,15	13,91	13,90	13,99	895 cm <sup>3</sup>	26,6 KN/m <sup>3</sup>		
<b>C</b>	693 g	424 cm <sup>3</sup>	8,10	7,95	7,95	8,00	622 cm <sup>3</sup>	35,0 KN/m <sup>3</sup>	35,6 KN/m <sup>3</sup>	0,52
<b>C</b>	594 g	428 cm <sup>3</sup>	7,69	7,70	7,65	7,68	593 cm <sup>3</sup>	35,9 KN/m <sup>3</sup>		
<b>C</b>	633 g	428 cm <sup>3</sup>	7,85	7,75	7,80	7,80	604 cm <sup>3</sup>	36,0 KN/m <sup>3</sup>		
<b>M</b>	558 g	623 cm <sup>3</sup>	13,15	13,15	13,15	13,15	873 cm <sup>3</sup>	22,3 KN/m <sup>3</sup>	23,1 KN/m <sup>3</sup>	0,73
<b>M</b>	538 g	588 cm <sup>3</sup>	11,50	11,50	11,50	11,50	819 cm <sup>3</sup>	23,2 KN/m <sup>3</sup>		
<b>M</b>	550 g	507 cm <sup>3</sup>	9,72	9,75	9,72	9,73	739 cm <sup>3</sup>	23,7 KN/m <sup>3</sup>		

**Annexe III : Calcul de la masse volumique apparente des matériaux**

Prise N°		Mâchefer		Sable		Ciment	
		N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6
Volume du récipient en (l)	V	1	1	1	1	1	1
Poids de la tare (g)	T	322,2	322,2	320,99	320,99	320,99	320,99
Poids tare+ matériau sec (g)	P1	1065,9	1113,7	1846,12	1858,01	1386,2	1374,34
Poids matériau sec (g)	Pm=P1-T	743,7	791,5	1525,13	1537,02	1065,21	1053,35
Masse volumique apparente (g/l)	Mv=Pm/V	743,7	791,5	1525,13	1537,02	1065,21	1053,35
Masse volumique moyenne (g/l)	Mv moy	767,6		1531,075		1059,28	
Masse volumique apparente (g/Cm <sup>3</sup> )		0,77		1,53		1,06	

**Annexe IV : Equivalent de sable**

	Prise d'essai n°	1	2	3
Masse d'essai	Masse sec (g)	120	120	120
Mesures	Hauteur de flocculant $h_1$ (cm)	11.50	11.40	12.00
	Hauteur à vue $h'_2$ (cm)	9.60	9.20	9.50
	Hauteur au piston $h_2$ (cm)	8.40	8.60	9.00
	Equivalent de sable à vue (ESV)	83.43	80.70	79.17
	Equivalent de sable au piston (ES)	73.04	75.44	75.00
	Température °C	35.10	34.80	35.10
		<b>Moyenne ESV</b>	<b>81.12</b>	
	<b>Moyenne Esp</b>	<b>74.49</b>		

**Annexe V : Coefficient Los Angeles du mâchefer**

Echantillon		
Préparation de l'essai	Masse totale prélevée	5000 g
	Classe granulaire	4/6.3
	Nombre de boulets introduits	7
	Poids de la charge de boulet	3080 g
	Nombre de tours programmés	500
	Masse d'échantillon sec introduit	5000
Mesures	Poids du refus sec	3139 g
	<b>Coefficient Los Angeles</b>	<b>62.78</b>