



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**CARACTERISATION PHYSIQUE DU MACHEFER DE
CHARBON EN VUE DE LA PRODUCTION DE BTC ET
VERIFICATION MECANIQUE DES BLOCS PRODUITS**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT
OPTION : GENIE CIVIL**

LABORATOIRE D'ECO-MATERIAUX DE CONSTRUCTION (LEMC)



Présenté et soutenu publiquement le 9 Juin 2011 par:

François EMAKO

Travaux dirigés par : Dr. Raffaele VINAI

Responsable de l'UTER ISM

Jury d'évaluation:

Président: **Dr. Ismaila GUEYE**

Membres et correcteurs : **Pr. Jean Hugues THOMASSIN
Dr. Raffaele VINAI
Mr. Mahamoudou ZI**

Promotion 2010/2011

CITATION

«Une personne ne se résume pas à ce qu'elle a été lors de notre dernière conversation mais elle se résume plutôt à ce qu'elle a été tout au long de notre relation.»

DEDICACES

Au Seigneur tout-puissant

A ma sœur adorée Flora WONDJE

A mes frères, les jumeaux Théophile NGAMENI DONFACK et Thierry WEMENI

A tous mes frères et sœurs

A mes chers parents Jean-Marie WANKOUE DEANGO et Pélagie WANKOUE

A mon oncle et homonyme François EMAKO

A ma valable cousine Jeannette DJEUMENI MONKAM

Entre les efforts accomplis, les défis surmontés et le bonheur vécu à l'issue de cette formation, je ne me suis pas un seul instant douté de l'amour et du soutien inconditionnels de toutes ces âmes, c'est pourquoi cette œuvre leur est spécialement dédiée.

REMERCIEMENTS

Je remercie de prime abord le Service de Coopération et d'Action Culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Cameroun pour son soutien financier au cours de cette année académique 2010/2011.

Je remercie ensuite la Fondation 2iE de m'avoir accordé ce stage de fin d'études au sein de son laboratoire, le LEMC.

Je remercie du fond du cœur mon encadreur, Dr. Raffaele VINAI pour tous les conseils prodigués et l'écoute qu'il n'a cessé de m'accorder tout au long de cette épreuve.

Je témoigne également toute ma reconnaissance à Dr. Ismaila GUEYE pour toute l'énergie déployée afin que les objectifs fixés pour ces deux années de Master soient effectifs.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de l'entreprise ZI Matériaux, et spécialement à son promoteur Mr. Mahamoudou ZI qui nous a apporté son expérience et son savoir-faire en matière de production de briques de terre compressée dans le cadre de ces travaux.

J'adresse toute ma reconnaissance à l'équipe de l'UTER ISM, notamment Mr. Jacques-Rémy MINANE, Mr. Agbévidé Koffi KOKOLE, Mr. Abdou LAWANE et Mr. Salif KABORE.

J'exprime également ma gratitude aux membres de l'UTER GVEA/LEDES, et principalement à Mr. Boukary SAWADOGO et Mr. Armel YAPI.

Enfin, je témoigne toute ma sympathie à mes promotionnaires du cycle Master qui, d'une quelconque manière, m'ont soutenu, et particulièrement à ceux de ma filière, le génie civil.

RESUME

La problématique du développement durable est au centre de toute activité de cette ère où l'on assiste à une substitution progressive de l'économie traditionnelle par l'économie moderne ou de recyclage. Comme la plupart des centrales à charbon, la SONICHAR au Niger est confrontée aux difficultés économiques et environnementales de gestion de ses déchets. La présente étude a été menée en vue de déterminer si l'utilisation des mâchefers de la SONICHAR dans la production des blocs de terre comprimée (BTC) est possible. Le premier axe de la recherche, la caractérisation physique, révèle que le mâchefer a une porosité élevée (70,95%), une masse volumique apparente et une densité sèche estimées respectivement à 724,14 et 648,19 kg/m³. Ensuite le calcul de simulation des granulométries des 5 mélanges réalisés (avec 10, 20, 30, 40 et 50% de mâchefer) révèle une bonne compatibilité entre la terre latéritique (44% d'argile) et le mâchefer (assimilable à un gravier sableux). Le second axe d'étude dont l'objet est la caractérisation chimique, met en évidence le caractère non polluant des métaux Pb, Cr et Cd dans le mâchefer. En revanche, la fraction soluble trouvée (12,1%) n'est pas en accord avec la valeur admissible pour les MIOM de catégorie V. Enfin, l'axe final a consisté à vérifier la performance mécanique des blocs produits à 7 et 14 jours de séchage. La résistance maximale en compression sèche à 7 jours, estimée à 1,68 MPa, est observée chez les blocs dosés à 20% de mâchefer. Cependant après 14 jours de séchage, elle diminue d'environ 0,4 MPa, faute des conditions de cure. La résistance en flexion à 7 jours (0,35 MPa) est aussi maximale pour le même type de blocs et décroît d'environ 0,03 MPa à 14 jours. Le module tangentiel de Young, de l'ordre de 82 à 107 MPa, est lié au module sécant par un rapport de 1,2-1,3. L'étude nécessite davantage d'essais pour aboutir à des conclusions plus prononcées.

Mots-Clés:

-
- 1 – Mâchefer de charbon**
 - 2 – Valorisation**
 - 3 – BTC**
 - 4 – Caractérisation physique**
 - 5 – Caractérisation mécanique**

ABSTRACT

The issue of sustainable development is central to any activity of this era where we are witnessing a gradual substitution of the traditional economy with the modern economy or recycling. Like most coal plants, SONICCHAR in Niger is facing economic difficulties and environmental management of its waste. This study was conducted to determine if the use of coal bottom ash of SONICCHAR in the production of earth compressed blocks is feasible. The first line of research, physical characterization, revealed that the bottom ash has a high porosity (70.95%), a bulk density and a dry density estimated respectively at 724.14 and 648.19 kg/m³. Then the simulation calculation of particle sizes of the 5 mixtures produced (with 10, 20, 30, 40 and 50% of bottom ash) shows a good compatibility between the lateritic soil (44% of clay) and the bottom ash (similar to a sandy gravel). The second area of this study, whose object is the chemical characterization, highlights the non-pollutant character of lead, chrome and cadmium in bottom ash. In contrast, the soluble fraction found (12.1%) is not in agreement with the value acceptable for MSWI class V. The final axis was to verify the mechanical performance of the blocks produced at 7 and 14 days drying. The maximum dry compression strength at 7 days, estimated at 1.68 MPa, is observed in blocks containing 20% of bottom ash. However after 14 days of drying, it decreases by about 0.4 MPa, because of curing conditions. The flexural strength at 7 days (0.35 MPa) is also maximum for the same type of blocks and decreases to about 0.03 MPa after 14 days drying. The tangential modulus of Young, which is about 82 to 107 MPa, is bound to the secant modulus by a ratio range of 1.2-1.3. The study requires more trials to reach conclusions more pronounced.

Key Words:

-
- 1 – Coal bottom ash**
 - 2 – Recycling**
 - 3 – Earth compressed blocks**
 - 4 – Physical characterization**
 - 5 – Mechanical characterization**

LISTE DES ABREVIATIONS

- ACAA:** American Coal Ash Association
- ADEME:** Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
- AFNOR:** Association Française de Normalisation
- ANPRM:** Advanced Notice of Proposed Rulemaking
- ASTM:** American Society for Testing and Materials
- BIS:** Bureau of Indian Standard
- BTC:** Blocs de terre comprimée
- BTP:** Bâtiment et travaux publics
- BTS:** Blocs de terre stabilisée
- CBR:** California Bearing Ratio
- CTI:** Centre Technique Industriel
- COT:** Carbone organique total
- CRATerre-EAG:** Centre international de Construction en Terre - Ecole d'Architecture de Grenoble
- CTMNC:** Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction
- DO:** Densité optique
- EPA:** U.S. Environmental Protection Agency
- IGCC:** Installations à gaz de cycle combiné
- LEMC:** Laboratoire d'éco-matériaux de construction
- LMD:** Limite minimale de détection
- LVDT:** Linear Variable Differential Transformer
- MAPE:** Mesure Analyse Process Environment
- MIOM:** Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères
- MPU:** Manitowac Public Utilities
- MSWI:** Municipal Solid Waste Incineration
- PEF:** Produits d'Épuration des Fumées
- RCC:** Résidus de la combustion du charbon
- SONICHAR:** Société Nigérienne de Charbon d'Anou Araren
- TEO:** Teneur en eau optimale
- USCS:** Unified Soils Classification System

SOMMAIRE

CITATION.....	ii
DEDICACES	iii
REMERCIEMENTS.....	iv
RESUME.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES GRAPHS.....	5
LISTE DES FIGURES.....	6
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	9
1.1. Généralités sur les mâchefers	9
1.1.1. Etymologie et définition.....	9
1.1.2. D'où proviennent les mâchefers ?	9
1.2. Propriétés des mâchefers	11
1.2.1. Propriétés physico-chimiques	11
1.2.2. Propriétés minéralogiques	14
1.2.3. Comportement mécanique.....	15
1.3. Valorisation des mâchefers.....	16
1.3.1. Les chiffres de production.....	17
1.3.2. Les différentes utilisations	17
1.3.3. Les impacts sur l'environnement	18
1.4. Etude des BTC standards.....	19
1.4.1. Caractéristiques idéales de la terre	19
1.4.2. Spécificités technico-mécaniques des BTC normalisés	20

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION PHYSIQUE DES MATERIAUX.....	22
2.1. Cas de la terre	22
2.1.1. Courbe granulométrique.....	22
2.1.2. Limites d'Atterberg	24
2.1.3. Teneur en eau optimale et densité sèche maximale	26
2.1.4. Poids spécifique.....	27
2.2. Cas du mâchefer	28
2.2.1. Granulométrie.....	28
2.2.2. Poids spécifique.....	29
2.2.3. Masse volumique apparente, teneur en eau naturelle et autres propriétés	29
2.3. Cas du mélange terre-mâchefer	30
2.3.1. Granulométries des mélanges.....	30
2.3.2. Interprétation des résultats	31
CHAPITRE 3 : ANALYSE CHIMIQUE DU MACHEFER.....	32
3.1. Méthodologie.....	32
3.2. Caractérisation chimique	33
3.2.1. Mesure de la fraction soluble, du pH et de la conductivité électrique	33
3.2.2. Concentrations en potassium et en sodium	33
3.2.3. Teneurs en nickel, plomb, chrome, cadmium et cuivre	34
CHAPITRE 4 : CARACTERISATION MECANIQUE DES BRIQUES PRODUITES... 35	
4.1. Résistance à la compression humide	35
4.2. Résistance à la compression sèche	35
4.2.1. Procédures d'essais	35
4.2.2. Résultats	36
4.2.3. Interprétation	37
4.3. Résistance à la flexion	38
4.3.1. Méthodologie	38
4.3.2. Résultats	39

4.3.3. Analyse des résultats	40
CONCLUSION GENERALE.....	41
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	42
BIBLIOGRAPHIE	43
ANNEXES.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des MIOM en fonction de leur potentiel polluant	11
Tableau 2: Paramètres physico-chimiques des RCC (Inde).....	13
Tableau 3: Composition chimique des RCC typiques de l'Inde.....	14
Tableau 4: Composition minéralogique des RCC (Chine).....	15
Tableau 5: Propriétés typiques des terres utilisées pour la production des BTC	20
Tableau 6: Caractéristiques physico-thermiques des terres recommandées pour les BTC.....	21
Tableau 7: Propriétés mécaniques des BTS normalisés.....	21
Tableau 8: Masse volumique sèche, porosité et indice des vides du mâchefer	30
Tableau 9: Types de mélanges terre-mâchefer.....	30
Tableau 10: Ratios liquide/solide pour la lixiviation	32
Tableau 11: Fraction soluble, pH et conductivité thermique du mâchefer	33
Tableau 12: Teneurs en potassium et sodium du mâchefer	34
Tableau 13: LMD des métaux évalués	34
Tableau 14: Teneurs en nickel, plomb, chrome, cadmium et cuivre du mâchefer.....	34
Tableau 15: Paramètres de la résistance en compression.....	37
Tableau 16: Moyennes des paramètres mesurés à la compression	37
Tableau 17: Paramètres de la résistance en flexion.....	39
Tableau 18: Moyennes des paramètres obtenus à la flexion.....	40

LISTE DES GRAPHES

Graphe 1: Granulométrie des mâchefers des IGCC (Espagne).....	12
Graphe 2: Courbe granulométrique de la terre utilisée	23
Graphe 3: Identification de la granulométrie de la terre au fuseau de CRATerre	24
Graphe 4: Détermination de la limite de liquidité de la terre.....	25
Graphe 5: Identification des propriétés plastiques de la terre aux critères de CRATerre.....	25
Graphe 6: Proctor normal de la terre utilisée	26
Graphe 7: Identification de la compressibilité de la terre aux critères de CRATerre	27
Graphe 8: Répartition granulométrique du mâchefer.....	28
Graphe 9: Comparaison des granulométries de la terre et des mélanges réalisés	31
Graphe 10: Mesure de contrainte-déformation des blocs M20 à 7 jours	36
Graphe 11: Mesure de contrainte-déformation des blocs M20 à 14 jours	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Mâchefers du MPU (zoom x 20)	12
Figure 2: Cendres volantes du MPU (zoom x 1000)	12
Figure 3: Micrographie d'une scorie de mâchefer	14
Figure 4: Matériels de tamisage	22
Figure 5: Pycnomètre à air utilisé	27
Figure 6: Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme	32
Figure 7: Spectrophotomètre à émission de flamme.....	32
Figure 8: Malaxage du mélange	35
Figure 9: Presse hydraulique munie du capteur LVDT.....	35
Figure 10: Pupitre pour la compression.....	35
Figure 11: Rupture d'un bloc à la flexion	38
Figure 12: Modélisation de la brique	39

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, l'homme est confronté à de sérieux problèmes environnementaux et socio-économiques. D'un côté, les industries ont des difficultés pour se débarrasser des grandes quantités de déchets générés par leurs productions. De plus, la gestion de ces déchets nécessite des dépenses. Aux Etats-Unis, par exemple, le traitement d'une tonne de produits issus de la combustion du charbon est estimé à 30 \$ ([Siddique, 2010](#)). De l'autre côté, le coût du ciment (un des principaux matériaux de construction) et des agrégats est de plus en plus élevé, du fait des charges liées au transport et de l'amenuisement des ressources naturelles. Au-delà de ses préoccupations quant à l'élimination des déchets industriels et à la cherté des matières premières de construction, l'être humain doit préserver l'environnement dans lequel il vit. En effet, de pareils déchets sont nocifs à l'air, à l'eau et au sol. Le mâchefer de charbon est l'un d'entre eux. Il provient généralement des centrales thermiques au charbon. Le stockage des mâchefers en usines de production devient non seulement encombrant de nos jours car ils occupent des espaces considérables et pourrait constituer, sous l'effet du vent, un facteur de pollution de l'air ambiant.

Pourtant les mâchefers constituent un énorme potentiel pour l'économie de recyclage. Ils revêtent des caractéristiques intéressantes pour la filière Bâtiment et Travaux Publics. En Europe, par exemple, les ingénieurs civils les emploient en substitution des granulats naturels dans les techniques routières, précisément dans les sous-couches de forme, de fondation ou de base et ainsi que dans les remblais compactés. Des études antérieures révèlent que les mâchefers sont utilisables pour la production des céramiques ([Lemeshev, 2004](#)), la stabilisation ou la solidification des bétons ([Bakoshi et al., 1998](#)) et la fabrication des briques ([Xiaoyan et Changsheng, 2007](#); [Asokan et al., 2005](#)). C'est dans une optique similaire à celles-ci et notamment dans un contexte de pérennisation que la Société Nigérienne de Charbon d'Anou Araren (SONICHAR) envisage, avec le concours du Laboratoire d'Eco-matériaux de Construction (LEMC) de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) de Ouagadougou, de valoriser ses stocks de mâchefers en produisant des briques de terre comprimée (BTC).

Créée en 1975 dans le cadre de la recherche des voies et moyens pour réduire la dépendance énergétique du Niger, la SONICHAR est une centrale équipée de deux tranches thermiques de puissance 18,8 MW chacune. Elle produit de l'électricité à partir du charbon qu'elle extrait localement sur le site de TEFEREYRE situé à 75 km au nord-ouest d'Agadez. Ainsi la centrale à charbon libère chaque année plus de 150 000 tonnes de mâchefers qui restent

stockés dans les usines, tout en constituant un énorme volume de déchets solides. Il devient alors impératif pour la SONICHAR de trouver des stratégies pour les éliminer dans le respect de l'environnement.

La valorisation de ces mâchefers comme matériaux locaux permettra entre autres à l'entreprise SONICHAR de:

- ✓ mettre en œuvre une politique RSE efficace;
- ✓ apporter une solution économique à son projet qui vise la construction de nouveaux logements pour son personnel;
- ✓ promouvoir la création des PMI/PME au Niger.

L'**objectif global** de cette recherche est donc de mener une étude de faisabilité qui consiste à déterminer si les mâchefers de charbon produits par la SONICHAR sont adéquats pour la stabilisation des briques de terre comprimée. L'atteinte de cet objectif passe nécessairement par la caractérisation physico-chimique des mâchefers en question et par la vérification mécanique des blocs conçus à partir de ces matériaux.

Ainsi, pour conduire ce travail expérimental dans les règles de l'art, il a été adopté la démarche suivante :

- une première étape consiste à la synthèse bibliographique des données disponibles sur les mâchefers suivie de l'étude des performances mécaniques des BTC normalisés;
- la deuxième partie détermine les propriétés physiques des matériaux terre et mâchefer qui serviront aux expériences;
- la troisième étape analyse le comportement chimique des mâchefers typiques de la SONICHAR;
- la quatrième partie consiste à caractériser mécaniquement les BTC conçus.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre propose une synthèse des résultats scientifiques disponibles sur les mâchefers, puis énumère quelques caractéristiques techniques et mécaniques des BTC standards utilisés dans la plupart des constructions en terre, aussi bien en Europe qu'en Afrique.

1.1. GENERALITES SUR LES MACHEFERS

L'objet de cette partie est d'expliquer ce que l'on entend par mâchefer en général et de préciser ses différentes origines.

1.1.1. Etymologie et définition

Le mot « mâchefer » vient de « maquer », terme usité dans l'ancien picard (dialecte de langue d'oïl de la Picardie et de l'Artois en France) et qui signifie *frapper*. Toutefois avant d'aborder la notion de mâchefer, il importe de savoir ce que c'est qu'un déchet. Un déchet est défini comme toute matière produite par l'homme ou l'activité industrielle et qui ne possède aucune valeur résiduelle (Serpell and Alarcon, 1998). On appelle *déchet ultime* tout résidu émis par un traitement quelconque et n'étant plus susceptible d'être traité dans les conditions économiques et techniques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant (MAPE, 1992). Le Petit Larousse 2010 définit le mâchefer comme une scorie poreuse provenant de la combustion du charbon (houille) et parfois utilisée dans la construction ou pour la réalisation de chaussées. Par **mâchefers de charbon**, on désigne donc les substances solides grisâtres obtenues par combustion du charbon ou du coke minéral dans les fours industriels.

1.1.2. D'où proviennent les mâchefers ?

Les centrales au charbon produisent de l'énergie par incinération du charbon dans les chaudières. Ce charbon de type minéral peut être de l'antracite, du charbon bitumineux, semi-bitumineux ou du lignite (Proposed Rulemaking, 2010). Les fours utilisés sont généralement des fours à charbon pulvérisé ou des fours à cyclone. La combustion dans les fours à cyclone se produit en faisant tourner en continu le charbon dans une zone de chaleur à haute intensité (Siddique, 2010). Ceci entraîne la fusion des particules en scories vitreuses qui tombent au fond du four.

Parmi les résidus synthétisés à la fin du processus d'incinération, on peut citer: les mâchefers et les produits d'épuration des fumées (PEF). Les PEF se constituent dans la plupart des cas, de cendres volantes (issues de la dépoussiération) ou des résidus de déchloruration, de désulfuration (gypse) et de lavage des gaz (dans le cas où les centrales sont équipées des

technologies de contrôle des SO_x et NO_x). Ainsi la combustion du charbon émet différentes formes de résidus, chacune caractérisée par le processus qui la génère ([ANPRM, 2010](#)). Toutefois les éléments les plus récurrents sont:

- **les cendres volantes:** ce sont les particules les plus fines et les plus abondantes (70-90%), les gaz s'échappant de la chambre de combustion de la centrale entraînent des particules pendant le processus d'incinération du charbon; pour éviter que les cendres volantes ne s'échappent dans l'atmosphère, l'on utilise des dispositifs de collecte exceptionnels pour les extraire des gaz qui quittent la pile;
- **les mâchefers:** avec des tailles de grains allant du sable fin au gravier fin, ils sont plus grossiers que les cendres volantes et moins abondants (10-30%); les mâchefers sont collectés au fond des fours à charbon utilisés dans la production de vapeur et d'énergie électrique; ils peuvent provenir du refroidissement hydrique des scories de chaudières à cyclone.

Actuellement, dans la quasi-totalité des centrales thermiques en Inde, les cendres volantes sèches sont collectées par le biais d'un électro-précipitateur statique. La plupart des centrales 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 ([Asokan et al., 2005](#)).

Les mâchefers ne proviennent pas seulement de la combustion du charbon, ils sont aussi produits lors de l'incinération des ordures ménagères. On distingue donc 2 grandes familles de mâchefers : les **mâchefers de charbon** et les **mâchefers d'incinération d'ordures ménagères** (MIOM). En Europe, les MIOM ont déjà fait l'objet de plusieurs études. [Bröns-Laot \(2002\)](#) leur attribue une structure binaire car ils sont essentiellement composés de verres et de scories. Elle cite [Blanchard J. M. et al. \(1989\)](#) et [Lesueur H. et al. \(2001\)](#), pour mentionner que la nature des déchets collectés en amont, les conditions de collecte, la technologie d'incinération et le traitement subi par les résidus finaux sont autant de paramètres qui peuvent influencer la composition physico-chimique, minéralogique des MIOM, et de ce fait leur caractère polluant.

Il existe de nos jours une multitude de normes relatives aux MIOM. En France, par exemple, la circulaire DDPR/SEI/BPSIED n° 94-IV du 9 mai 1994 fixe les règles concernant le suivi de production, les conditions de valorisation et la stabilisation des MIOM. Le classement des MIOM dans l'une des 3 catégories V (valorisation) ou « MIOM à faible fraction lixiviable », M (maturation) ou « MIOM intermédiaires » ou encore S (stockage) ou « MIOM à forte

fraction lixiviable » est déduit des critères du tableau ci-dessous:

Tableau 1: Classification des MIOM en fonction de leur potentiel polluant

Test de lixiviation NF X31-210	Catégorie V	Catégorie M	Catégorie S
Fraction soluble	<5%	<10%	>10%
Pb lixiviable	<10 mg/kg	<50 mg/kg	>50 mg/kg
Cd lixiviable	<1 mg/kg	<2 mg/kg	>2 mg/kg
Hg lixiviable	<0,2 mg/kg	<0,4 mg/kg	>0,4 mg/kg
As lixiviable	<2 mg/kg	<4 mg/kg	>4 mg/kg
Cr lixiviable	<1,5 mg/kg	<3 mg/kg	>3 mg/kg
SO ₄ ²⁻ lixiviable	<10000 mg/kg	<15000 mg/kg	>15000 mg/kg
COT lixiviable	<1500 mg/kg	<2000 mg/kg	>2000 mg/kg

Source : [Circulaire française du 9 mai 1994](#)

Il ressort d'un certain nombre de travaux antérieurs ([Bernard F., 2003](#) ; [Gaëlle TRIFFAULT-BOUCHET, 2004](#) ; [Frédéric BECQUART, 2006](#)) que les MIOM sont valorisables sur les plans environnemental et géotechnique.

1.2. PROPRIETES DES MACHEFERS

Ce point traite respectivement des propriétés physico-chimiques, minéralogiques et mécaniques des mâchefers de charbon.

1.2.1. Propriétés physico-chimiques

Les caractéristiques physiques et chimiques du mâchefer peuvent varier selon le type, la source et la finesse du combustible parent, ainsi que les conditions d'exploitation de la centrale à charbon. Il est recueilli au fond de la chambre de combustion sous une forme solide granulaire ([Ömer Özkan et al., 2007](#)).

Les constituants chimiques majeurs des résidus de la combustion du charbon (RCC) sont la silice, l'alumine et les oxydes de fer (environ 87%). [Asokan \(2000\)](#) et [Rao \(1999\)](#) révèlent que la densité de la plupart des RCC est considérablement inférieure à celle du sol, en raison de la variation de la taille des particules, leur forme, leur composition chimique et minéralogique. Le coefficient de perméabilité des RCC varie de 10^{-4} mm/s à 10^{-3} mm/s ([Rajasekhar, 1995](#)).

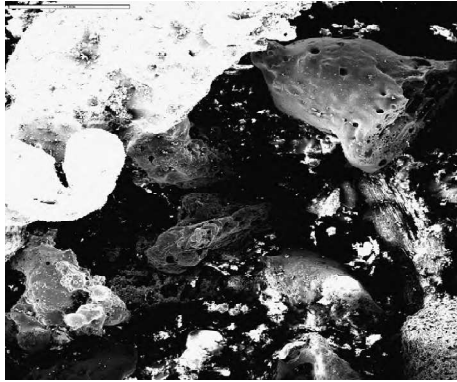


Figure 1: Mâchefers du MPU
(zoom x 20)

Les mâchefers sont généralement de forme non-sphérique et typiquement composés de particules dont la taille va de 2 μm à 20 mm. Les particules des mâchefers pourraient être de forme arrondie ou angulaire. Ils ont généralement une structure poreuse; ce sont des scories composées de particules anguleuses avec un aspect vitreux. [Siddique \(2010\)](#) révèle que leur densité apparente évolue entre 737 et 1586 kg/m^3 .

Les cendres volantes, quant à elles, sont un mélange hétérogène de particules inorganiques, de forme, de taille et de composition chimique variantes. [Wigley et Williamson \(1998\)](#) les décrivent comme étant essentiellement composées de particules sphériques, vitreuses de taille variant entre 20 μm et 150-200 μm . Généralement, leur densité varie entre 1,6 et 2,8 g/cm^3 .

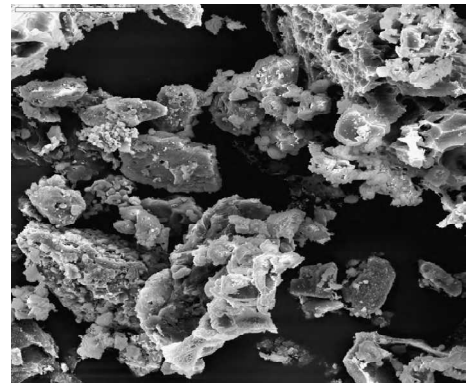
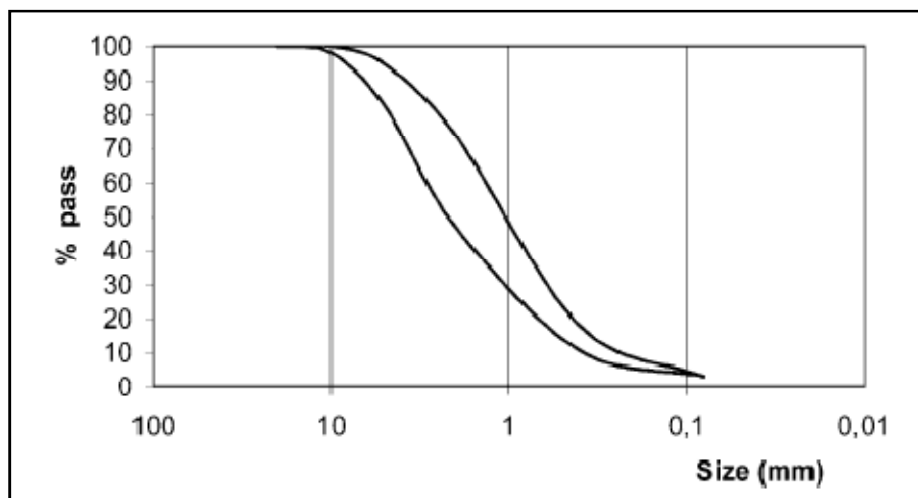


Figure 2: Cendres volantes du MPU
(zoom x 1000)

La valeur CBR des mâchefers (de 15,3 à 36,5%) trouvée par [Toth et al. \(1987\)](#) est plus grande que celle des cendres volantes. Les mâchefers de charbon ont généralement une granulométrie similaire à celle des graviers sableux.

Source: [A. Acosta et al., 2001](#)



Graph 1: Granulométrie des mâchefers des IGCC (Espagne)

L'étude de [Naik and Singh \(1998\)](#) renseigne sur la taille des RCC spécifiée par diverses

normes internationales. En France, par exemple, les particules de diamètres respectifs 50, 80 et 315 μm doivent être représentées au moins à 40, 70 et 90%. Tandis que l'ASTM aux Etats-Unis recommande pour les particules de 45 μm de diamètre une présence équivalant à plus de 34%. La densité des grains des mâchefers varie entre 1,8 et 2,2 t/m^3 . Pris en vrac, les grains ont une densité moyenne d'environ 0,7- 0,9 t/m^3 mais après compactage (Proctor modifié), celle-ci se situe entre 0,9 et 1,2 t/m^3 . Les courbes de compactage ont généralement une forme similaire, ce qui indique que le matériau est insensible aux variations de teneur en eau causées par les précipitations, par exemple. Les particules dans les cendres résiduelles sont plus fragiles que dans le gravier naturel et ont une plus grande ressemblance avec le clinker léger (J. Rogbeck et al., 1996).

Généralement, la densité correspondant aux grains de taille inférieure à 50 μm est 2,586 g/cm^3 et la surface spécifique est 1,066 m^2/g . Bien que cette dernière soit très faible, en raison peut-être de la porosité élevée sans aucune compacité de poudre, le caractère non-poreux est lié à la vitrification de laitier de haut, ce qui peut faciliter la fusion du matériau. Le Tableau 2 présente d'autres données caractéristiques des mâchefers :

Tableau 2: Paramètres physico-chimiques des RCC (Inde)

Couleur	Gris
Densité apparente (kg/m^3)	960-1500
Porosité (%)	30-55
Capacité de rétention en eau (%)	35-55
Sable (%)	60-80
Limon (%)	10-35
Argile (%)	0,5-1,5
Surface spécifique (m^2/g)	0,104-2,408
pH	3,5-12,5
Conductivité (dS/m)	0,075-1

Source : Asokan (2000, 2003), Dubey et al., (2000), Pandan et al. (1988) et Sridharan et al. (1996)

L'analyse chimique des mâchefers révèle qu'ils se composent:

- majoritairement de l'aluminium, de la silice, du fer, du calcium, du potassium etc.;
- minoritairement du bore, du cuivre, du baryum, du nickel, du vanadium, etc.

Tableau 3: Composition chimique des RCC typiques de l'Inde

Eléments majoritaires (%)		Eléments minoritaires (ppm)	
Al	15,167-20,45	As	5-68
Ca	0,37-0,76	Ba	26-1275
Fe	4,447-6,562	B	100-1000
Mn	0,002-0,84	Cd	1-26
Mg	0,02-0,9	Cr	10-353
P	0,06-0,3	Cu	39-1000
K	0,14-1,8	Co	7-128
Si	27,413-29,554	Pb	10-144
Na	0,07-0,71	Ni	29-265
S	0,03-0,055	Hg	0-0,005
		Mo	8-100
		Sc	0,5-106
		Se	1-10
		V	40-190
		Zn	10-250

Source: [Asokan \(2000, 2003\)](#), [Saxena et Asokan \(2001\)](#), [Dubey et al. \(2000\)](#) et [Pandian et al. \(1988\)](#)

1.2.2. Propriétés minéralogiques

L'analyse minéralogique des RCC montre qu'ils pourraient être séparés en 3 matrices ([Twardowska and Szczepanska, 2002](#)):

- o le verre,
- o le quartz,
- o et la magnétite.

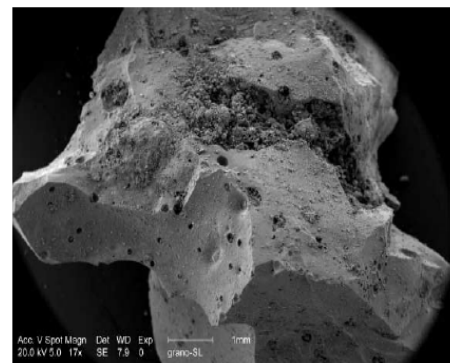


Figure 3: Micrographie d'une scorie de mâchefer

Dans les RCC, le quartz (SiO_2), l'aluminosilicate (gehlenite, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) et l'hématite (Fe_2O_3) représentent les principaux constituants qui influencent la concentration en alumine, silice et oxydes de fer ([Asokan, 2003; Janos et al., 2002](#)).

Le principal composant minéralogique des cendres volantes est le verre de silice-aluminate. Il contient les oxydes suivants: Fe_2O_3 , CaO et MgO . Les matrices $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ (70%), SiO_2

(35%), MgO (5%), SiO₃ (2,75%), et Na₂O (1,5%) présentes dans les RCC ont des propriétés requises pour la fabrication de pouzzolane de ciment (Roongta, 2000). La réactivité à la chaux des cendres volantes est beaucoup plus grande que celle des mâchefers. Elle dépend de la teneur en silice. Les études de Sivapullaiah et al. (1998) et Prasad et Bai (1999) démontrent qu'un pourcentage élevé de la teneur en chaux dans les cendres volantes contribue à accroître sa résistance à la compression avec le temps de durcissement, en raison de la réactivité pouzzolanique qui a lieu.

Tableau 4: Composition chimique des RCC (Chine)

Constituants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Autres	Matières imbrulées
Cendres volantes (%)	50,6	27,2	7	2,8	1,2	2,1	8,2
Gangue de charbon (%)	53,16	15,53	7,43	4,14	0,97	-	16,3
Les données sur les cendres volantes proviennent des provinces de Jincheng et Shanxi; Celles des mâchefers représentent les moyennes nationales.							

Source: Liu Haibin et Liu Zhenling, 2010

1.2.3. Comportement mécanique

Les mâchefers ont des propriétés mécaniques intéressantes pour diverses branches de l'ingénierie en général, et pour le génie civil en particulier. Il intervient comme matériau de substitution que ce soit dans les constructions en béton ou celles en terre.

a) Le béton

Bakoshi et al. (1998) ont démontré que les résistances à la compression et à la traction des bétons stabilisés au mâchefer augmentent selon que le taux de remplacement des granulats fins est grand.

Contrairement aux mâchefers, les cendres volantes se révèlent plus adaptées à la production des bétons. Swamy et Hung (1998) ont constaté que les bétons incorporant un volume élevé de cendres volantes en remplacement partiel du ciment et du sable et une petite quantité de fumée de silice ont des propriétés mécaniques de haute performance. Les mélanges ont donné à 28 jours d'âge, une résistance à la compression de 30-40 MPa. Poon et al. (2000) a montré qu'un béton de 80 MPa de résistance à la compression après 28 jours pourrait être obtenu avec un rapport eau/liant de 0,24 et une teneur en cendres volantes de 45%.

b) La terre

Il existe à ce jour peu d'exemples d'emploi des mâchefers dans la filière des BTC. Pour le cas de l'Inde, par exemple, Asokan et al. (2005) présentent deux modèles de BTC incorporant les

RCC, à savoir les briques en terre cuite (briques frittées) ou les briques de chaux et de silice (briques silico-calcaires). La brique frittée stabilisée aux RCC contribue à remplacer la couche arable et donc à apporter la silice, les oxydes de fer et l'aluminium qui jouent un rôle important du point de vue mécanique. La présence du carbone imbrûlé dans les RCC devient un avantage car il permet d'économiser la consommation de carburant.

En ce qui concerne les briques silico-calcaires traitées à l'air et l'eau, les RCC jouent un rôle majeur en tant que matériau pouzzolanique. La présence de CaO , de silice soluble, Al_2O_3 et d'une plus grande surface contribue à l'amélioration de la qualité du bloc (Kumar et al., 1999). Mais la présence du carbone organique affecte négativement la qualité des briques. La résistance à la compression de la brique de terre traitée aux RCC est d'environ 12 MPa, l'absorption de l'eau est inférieure à 18% et le retrait est inférieur à 10% (Karade et al., 1995). Comme autre produit à base de pouzzolane de cendres, on a la brique **Fal-G** qui contient 60-75% de cendres volantes. La résistance à la compression des briques Fal-G varie entre 8 à 16 MPa (Bhanumathidas et Kalidas, 1997).

Il existe différentes méthodes de fabrication de briques avec l'application de la teneur en cendres variant de 30% pour les briques de terre, à 80% pour les briques de chaux-gypse sans en compromettre la qualité. Il est rapporté que les briques de cendres et de chaux ont montré une bonne résistance à l'écrasement par rapport aux briques d'argile. Ces briques de cendres sont plus résistantes à la salinité et à l'eau.

Par ailleurs, une étude (Lemeshev et al., 2004) conforme à la norme **GOST 6841-84** sur les céramiques et consistant à produire des plaquettes de parement en terre cuite avec ajout de mâchefer traduit que l'augmentation de la proportion de mâchefer dans le mélange jusqu'à 50% entraîne une diminution graduelle de la résistance des plaquettes et accroît leur porosité. La résistance maximale à la compression des plaquettes (de l'ordre de 40,1 à 98,3 MPa) après chauffage à une température de 950°C est atteinte lorsque le dosage en mâchefer est équivalent à 20%. Les autres paramètres qui influencent cette résistance sont: le temps de chauffage, l'énergie de compactage appliquée sur la presse.

1.3. VALORISATION DES MACHEFERS

Stratégie efficace de minimisation des déchets, le recyclage offre trois avantages (Edwards, 1999): (i) réduire la demande en ressources naturelles, (ii) réduire le transport et les coûts de production d'énergie et de déchets utilisation (iii) optimiser les tonnages de déchets en sites d'enfouissement. De plus, les traitements des RCC et leur stockage en décharge n'étant pas toujours viables pour des raisons économiques et environnementales, la nécessité de les

valoriser tend à s'imposer.

1.3.1. Les chiffres de production

L'une des raisons pour lesquelles l'on s'attèle à réutiliser les mâchefers est qu'ils sont produits en abondance. 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 ([Liu Haibin et Liu Zhenling, 2010](#)).

De plus si les déchets sont éliminés de manière incorrecte, cela menacerait l'environnement et entraînerait de graves pollutions qui compromettraient enfin le développement de l'économie ([Skarzynska, 1995](#); [Bell et al., 2000](#); [McKinnon, 2002](#); [Bian et Zhang, 2006](#)). 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 ([Bian et al., 2009](#)).

Selon [ACAA \(2007\)](#), environ 20 millions de tonnes de mâchefers ont été produits en 2007.

En Suède, la production d'électricité et les installations de chauffage génèrent un total d'environ 900 000 tonnes de cendres et de scories de mâchefers chaque année ([J. Rogbeck et A. Knutz, 1996](#)). A la fin des années 80 en Russie, la quantité de déchets de charbon généré annuellement était évaluée à 500 millions de tonnes, soit à peu près le volume d'argile extraite dans le monde ([Lemeshev et al., 2004](#)).

1.3.2. Les différentes utilisations

La littérature scientifique révèle que les résidus de la combustion du charbon ont de nombreux potentiels d'utilisation dans les remblais, dans le développement des briques, du ciment, du béton et même dans l'amélioration des sols en agriculture ([Ferraiolo et al., 1990](#); [Iyer and Scott, 2001](#); [Kazuo, 2000](#); [Saxena and Asokan, 2003](#)).

En prenant compte les propriétés physico-chimiques, la minéralogie et les propriétés morphologiques des résidus de l'incinération du charbon, le BIS (Bureau Indian Standard) a publié la norme **IS 10153:1982** indiquant différentes applications des RCC ([Asokan et al., 2005](#)):

- composants dans l'industrie du ciment ;
- produits de substitution du bois ;
- remise en état des friches et l'agriculture ;
- restauration des mines abandonnées ;
- solidification/stabilisation des déchets dangereux ;
- extraction des cénoosphères et des métaux et développement des peintures.

Siddique (2010) recommande l'utilisation :

- des mâchefers à la fois comme granulats fins et grossiers;
- des cendres volantes en remplacement de plus de 50% du ciment dans le béton.

Le tableau de l'Annexe 1 récapitule quelques normes d'emploi des mâchefers mises en place par l'organisation ASTM:

Toutefois, pour qu'un matériau soit considéré recyclable, trois besoins majeurs doivent être pris en compte (Mindess et al., 2003): l'économie, la compatibilité avec les autres matériaux et les caractéristiques propres au matériau. P. Asokan et al. (2005) affirment que pour le développement d'une meilleure qualité des matériaux de construction, une bonne qualité de RCC est nécessaire. Pour atteindre cet objectif, le système de stockage des RCC existant dans les centrales en Inde devrait être amélioré et une technique apte devrait être mise au point pour la ségrégation efficace des tailles de résidus. Le système automatique favorisera la collecte optimale:

- de cendres fines sèches en quantité énorme pour la production de ciment et des engrais;
- et des particules grossières (mâchefers) pour l'aménagement des routes et la remise en état des sites miniers.

EPA (2009) a initié un programme de recyclage de matières industrielles dans le but de développer et d'appliquer des stratégies répondant aux objectifs de l'action "Ressource Conservation Challenge". Parmi les matières industrielles qui ne constituent pas de réel danger pour l'environnement, on peut citer: le sable de fonderie; les résidus de l'incinération du charbon dont les mâchefers, les cendres volantes, le gypse; les déchets de construction et de démolition. Ces matières peuvent être utilisées pour plusieurs applications telles que les routes, les bâtiments, les ponts, etc.

1.3.3. Les impacts sur l'environnement

Le stockage des mâchefers sur les sites de production peut avoir des retombées négatives sur l'environnement. En effet, l'exposition des mâchefers à l'air et leur accumulation à même le sol, causent de sérieux dommages naturels. Liu Haibin et Liu Zhenling (2010) se réfèrent à Ma et al. (2008) en mentionnant le fait que les instabilités physiques, chimiques ou biologiques perpétuellement subies par les mâchefers favorisent des réactions spontanées de combustion et de pollution des eaux. Les principaux dangers observés sont:

- les calamités naturelles telles que les glissements de terrain, le drainage des débris dus à l'entassement incorrect des déchets;

- la libération des poisons, les intempéries naturelles et le ruissellement des eaux pluviales entraînant la pollution des sols et de la nappe phréatique;
- les combustions spontanées et les gaz toxiques émis dans l'atmosphère;
- la formation des pluies acides près des montagnes de déchets.

De même, des expériences de laboratoire ont montré que l'exposition des cendres volantes à des températures élevées (atteignant 1510 °C) dans les fours de ciment libère facilement le mercure (Pflughoeft-Hasset et al., 2007). Dès lors, il ne présente pas encore de risque pour la santé. Des sensibilisations sont de plus en plus faites aujourd'hui sur l'utilisation des technologies de capture du mercure en centrales. Mais certains établissements peuvent ne pas disposer des moyens de mise en œuvre. La teneur en mercure devient alors beaucoup plus élevée qu'il n'est indiqué pour une valorisation, ce qui peut nuire à la santé.

Par ailleurs, l'analyse des mâchefers de charbon indique qu'ils sont faiblement radioactifs. En Inde, le niveau mesuré des radionucléides sur les RCC est inférieure aux limites spécifiées pour l'environnement. Ces limites supérieures, pour des radionucléides naturels tels que le thorium 232 (parent radionucléide de ^{228}Ac), ^{226}Ra et ^{40}K , sont respectivement estimées à 259, 370 et 925 Bq/kg (Moghissis et al., 1978).

Cependant, l'utilisation des produits de la combustion du charbon peut s'avérer bénéfique pour l'environnement. Si la production courante d'une tonne de ciment génère environ 1 t de CO_2 et d'autres substances nocives telles que le NO_x et le CH_4 , l'incorporation des RCC dans la fabrication contribue quant à elle à réduire cette émission. Des études montrent que l'utilisation de cendres volantes dans le béton permet de réduire l'émission de CO_2 , ce qui limite considérablement les menaces sur l'environnement (Krishnamoorthy, 2000; Naik and Tyson, 2000).

Les particules du mâchefer sont faiblement radioactives. On note un niveau radioactif des RCC de lignite nettement inférieur à celui des cendres de charbon bitumineux et sub-bitumineux (Vijayan et Behera, 1999).

1.4. ETUDE DES BTC STANDARDS

Une synthèse des données et caractéristiques existant à ce jour sur les BTC est importante dans la mesure où elle permettra de mieux interpréter les paramètres mesurés sur les modèles de briques à concevoir.

1.4.1. Caractéristiques idéales de la terre

Généralement, les sols souhaitables pour la fabrication de briques de terre compressée sont compris entre ceux qui contiennent :

- minimum 45% de sable et 55% de limon et d'argile;
- maximum 80% de sable et 20% de limon et d'argile (dont au moins 10% d'argile).

La teneur en matières organiques doit être inférieure à 2%, surtout si l'on désire stabiliser la terre au ciment. Les autres données sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5: Propriétés typiques des terres utilisées pour la production des BTC

Densité	1800 à 2000 kg/m ³
Résistance à la compression à sec (28 jours)	non stabilisé: 0,5 à 3 MPa stabilisé (chaux, ciment): 2 à 8 MPa
Résistance à la compression humide (28 jours)	environ la moitié de la résistance à sec
Module de Young :	700 à 7 000 MPa
Chaleur spécifique	0,2 kcal/kg
Coefficient de conduction	environ 0,5 kcal/hm°C
Conductibilité thermique	0,6 à 0,9 W/mK

Source: [Laurent Guérin, 1985](#)

Pour le choix des terres, les caractéristiques suivantes sont aussi à prendre en compte:

- I_p : idéalement proche de 9, compris entre 7 et 25,
- ω_L : idéalement proche de 27, compris entre 25 et 45,
- ω_p : idéalement proche de 17, compris entre 10 et 25.

Avec I_p , ω_L et ω_p désignant respectivement l'indice de plasticité, la limite de liquidité et la limite de plasticité.

1.4.2. Spécificités technico-mécaniques des BTC normalisés

La tradition de production des BTC adopte généralement pour un poids unitaire allant de 6 à 8 kg les dimensions conventionnelles suivantes: 29,5 x 14 x 9 cm.

Les briques de terre compressée sont fabriquées à partir de terre humide compactée dans une presse. On peut ajouter à la terre, différents produits (stabilisants) pour en améliorer les performances mécaniques (compression, cohésion) ou pour réduire la sensibilité à l'eau (gonflement et retrait) et la perméabilité. Le mortier utilisé pour la production des briques contient généralement 8 à 12% de ciment en fonction de l'utilisation qu'on veut en faire.

Pour les blocs de terre stabilisée (BTS) au ciment, un certain nombre de caractéristiques mécaniques sont connues à ce jour. On admet généralement que la résistance humide n'atteigne que la moitié de la résistance sèche. [Fitzmaurice, \(1959\)](#) et d'autres auteurs recommandent une résistance humide minimale de 14 kg/cm².

Il existe une relation linéaire entre la pression exercée sur la presse et la résistance à la compression de la brique obtenue, pour des pressions faibles ou moyennes. Les briques de terre compressée résistent très mal à la traction et au cisaillement ([Laurent Guérin, 1985](#)).

Les travaux d'[Hubert Guillaud et al. \(1995\)](#) sur la conception et la construction des bâtiments en BTC ont abouti à un certain nombre de résultats dont les suivants:

Tableau 6: Caractéristiques physico-thermiques des terres recommandées pour les BTC

Dilation thermique réversible (%)	Isolation thermique (W/m°C)	Masse volumique apparente (kg/m ³)
0,02 à 0,2	0,81 à 1,04	1700 à 2200

Source : [Hubert Guillaud et al., 1995](#)

A ceci s'ajoutent les recommandations du centre de recherche [CRATerre-EAG \(1995\)](#) concernant les performances mécaniques des blocs stabilisés de format 29,5 x 14 x 9 cm:

Tableau 7: Propriétés mécaniques des BTS normalisés

Résistance à la compression sèche (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Flexion par rapport aux joints horizontaux (MPa)	Cisaillement (MPa)	Coefficient de poisson (-)	Module d'élasticité (MPa)
4 à 5	0,5 à 1	0,5 à 1	0,5	0,5	5 à 7 000

Source : [CRATerre-EAG, 1995](#)

D'autre part, les études d'[Hugo Houben et al. \(1996\)](#), en collaboration avec le CTI, prescrivent pour un BTC standard à 28 jours d'âge les caractéristiques suivantes: un poids variant entre 6,3 kg et 7,4 kg, une résistance en compression supérieure à 4 MPa.

CHAPITRE 2 : CARACTERISATION PHYSIQUE DES MATERIAUX

Cette partie détermine les propriétés physiques des matériaux (terre et mâchefer) qui présentent un intérêt pour le génie civil, et notamment la conception des blocs de terre comprimée.

2.1. CAS DE LA TERRE

La nécessité d'étudier la terre réside dans le fait que l'on prévoit de faire des briques en utilisant un mélange terre-mâchefer. La terre utilisée est de nature latéritique. Par conséquent, tous les résultats obtenus en aval ne seront valables que pour une telle catégorie. Ainsi, il a été évalué la granulométrie, les limites d'Atterberg, la teneur en eau optimale de compactage (Proctor normal), la densité sèche maximale et la densité spécifique.

2.1.1. Courbe granulométrique

a) Méthodologie

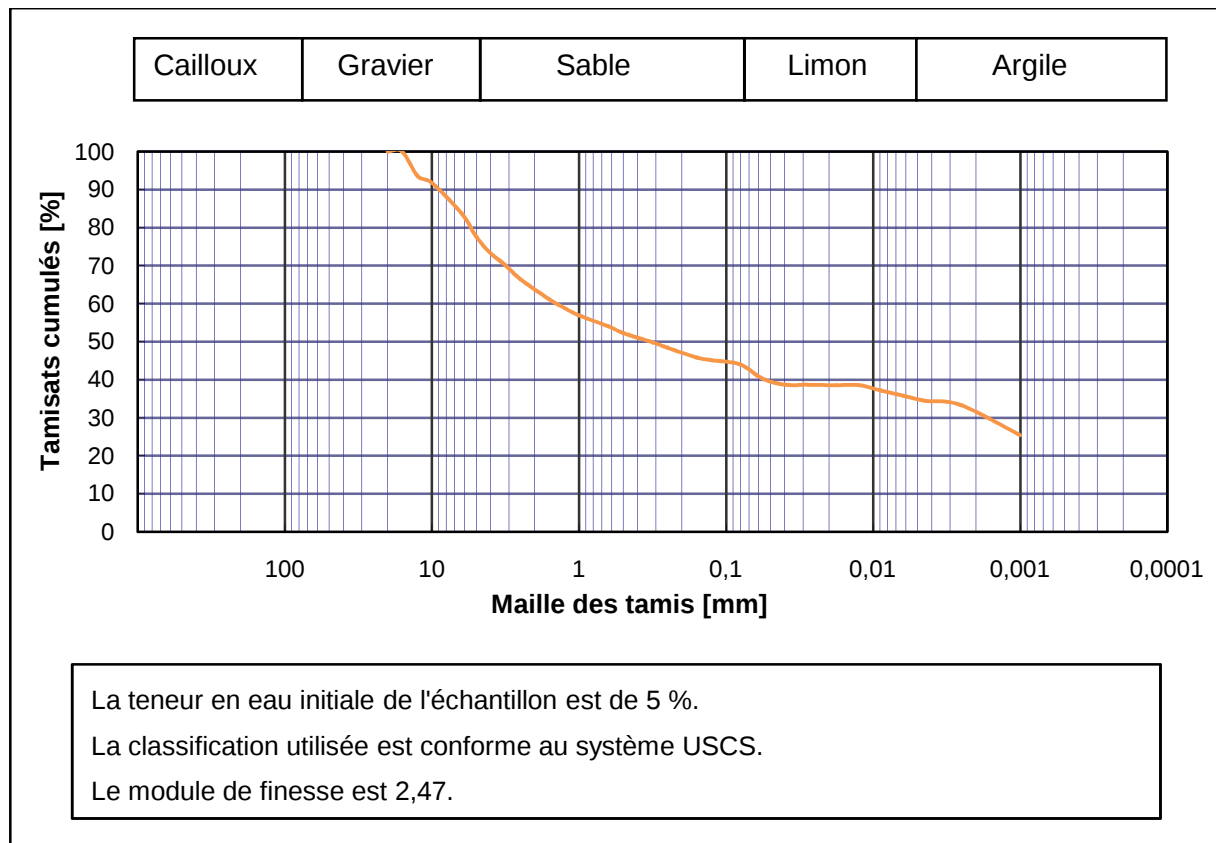
On a procédé en utilisant les protocoles d'essais **NFP 18-560** et **NFP 94-093 & 057**. La teneur en eau de l'échantillon de terre a été déterminée avant l'analyse. Celle-ci a nécessité l'utilisation de la gamme de tamis AFNOR et la tamiseuse électrique ci - contre. Pour ce qui est de la sédimentométrie, elle a été faite à l'aide de 2 éprouvettes (dont un témoin) de 2l chacune et d'un densimètre.



Figure 4: Matériels de tamisage

b) Granulométrie

L'Annexe 2 détaille les calculs et les résultats du tamisage et de la sédimentométrie. L'analyse granulométrique complète de la terre donne le graphe suivant:



Graphe 2: Courbe granulométrique de la terre utilisée

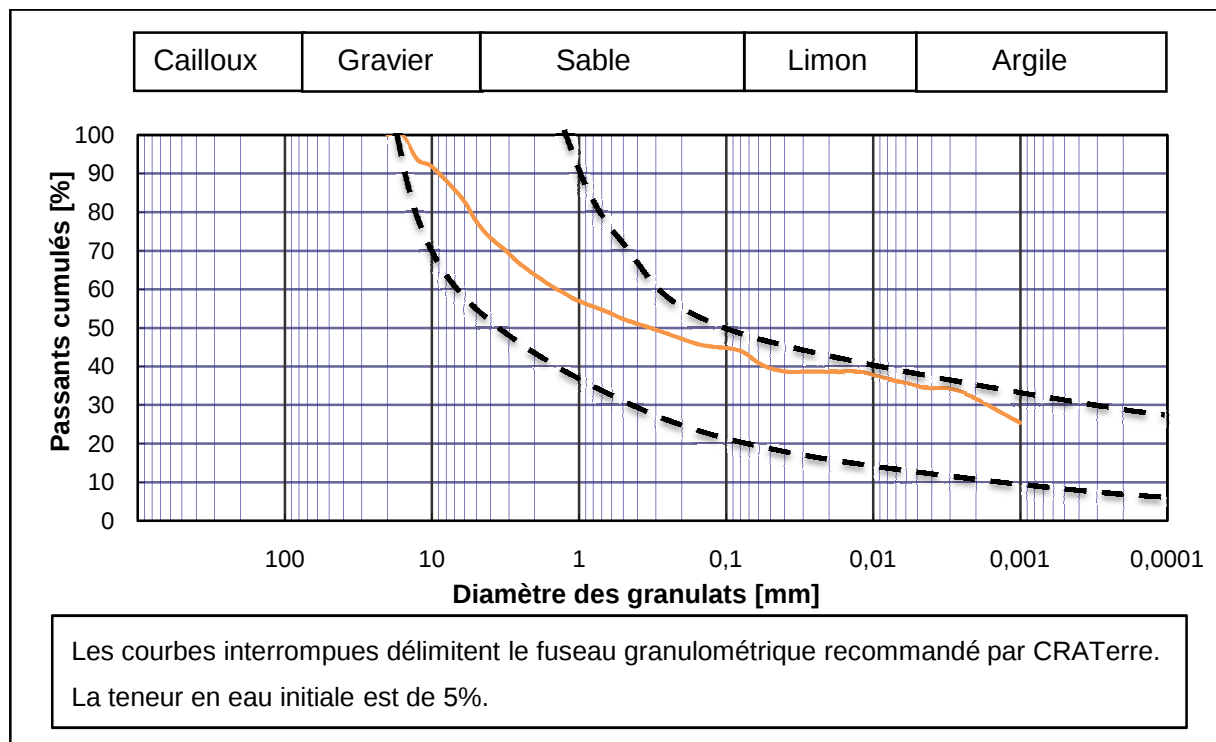
c) Interprétation

Les grains du matériau sont répartis de sorte qu'on ait:

- 76,5% de particules de taille inférieure à 4,75 mm ;
- 64% de particules de taille inférieure à 2 mm ;
- 52% de particules de taille inférieure à 0,425 mm ;
- 45,5% de particules de taille inférieure à 0,150 mm ;
- 44% de particules de taille inférieure à 0,075.

La classification révèle que la terre est une grave argileuse.

Afin de s'assurer que le matériau peut être utilisé pour la production des briques, il est nécessaire d'identifier sa granulométrie à la gamme des granulométries préconisées par CRATerre-EAG.



Graphe 3: Identification de la granulométrie de la terre au fuseau de CRATerre

La remarque faite est que la courbe se loge dans le fuseau granulométrique en question. La granulométrie de la terre est donc conforme à la production des BTC selon CRATerre.

2.1.2. Limites d'Atterberg

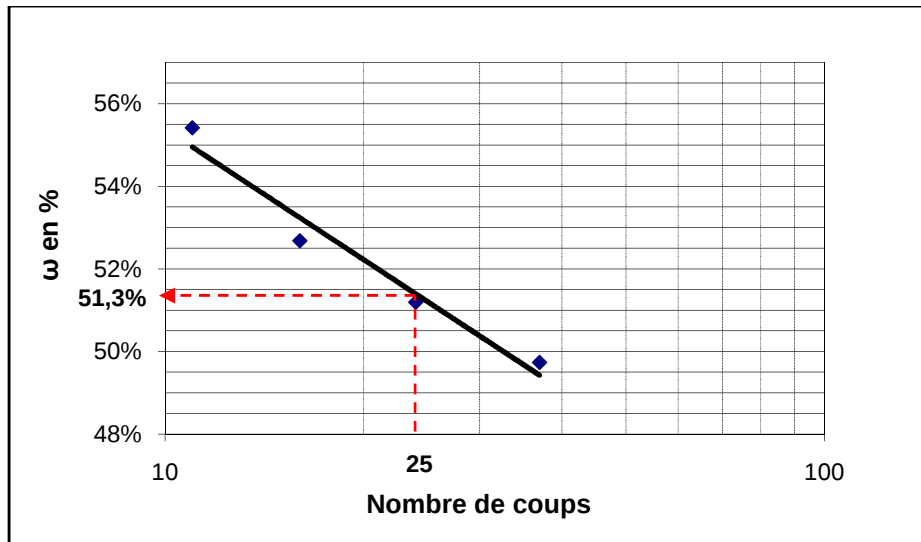
Ce volet détermine la limite de liquidité et la limite de plasticité de la terre.

a) Méthodologie

Pour se faire, on a eu recours aux méthodes à la coupelle et du cigare (norme **NFP 94-051**).

b) Résultats

Les différentes mesures obtenues ont été consignées dans l'Annexe 3. La courbe ci-dessous permet de déterminer la limite de liquidité qui est de **51,3%** :



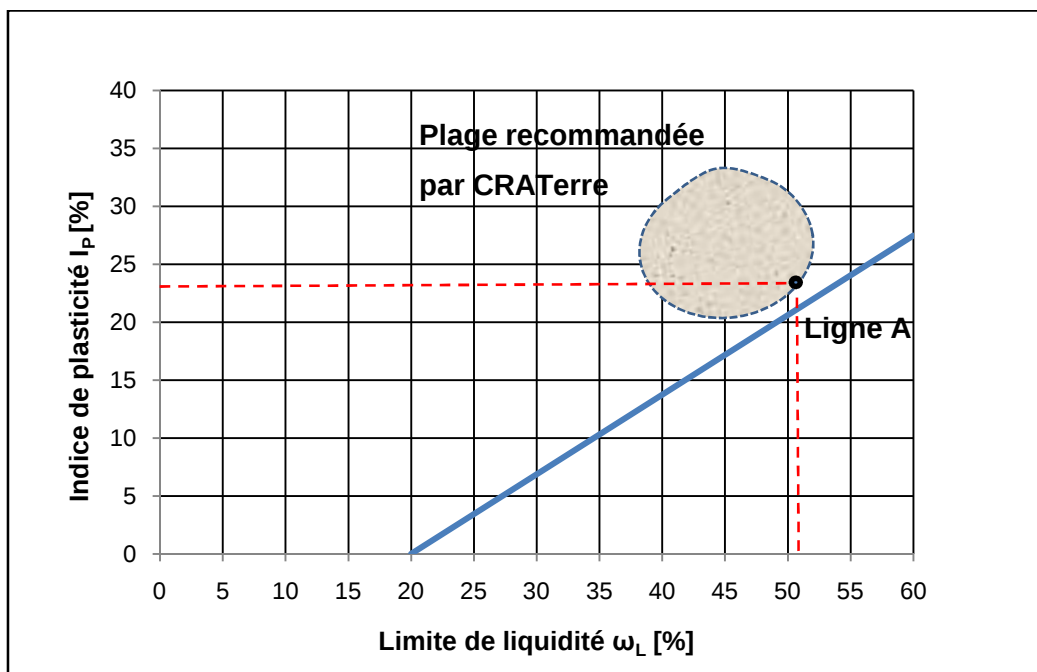
Graph 4: Détermination de la limite de liquidité de la terre

La limite de plasticité, quant à elle, vaut **28,4%**. On en déduit l'indice de plasticité:

$$I_p = \omega_L - \omega_P = 51,3 - 28,4 = 22,9\%.$$

c) Interprétation

Toujours en se référant aux prescriptions de CRATerre-EAG, il faut vérifier si les propriétés plastiques de la terre sont idéales, notamment par un repérage sur le graphique ci-dessous:



Graph 5: Identification des propriétés plastiques de la terre aux critères de CRATerre

La terre étudiée répond de justesse aux critères de plasticité de CRATerre. Avec un indice de consistance égal à 2, le matériau a des propriétés plastiques acceptables pour une utilisation

dans la filière BTC.

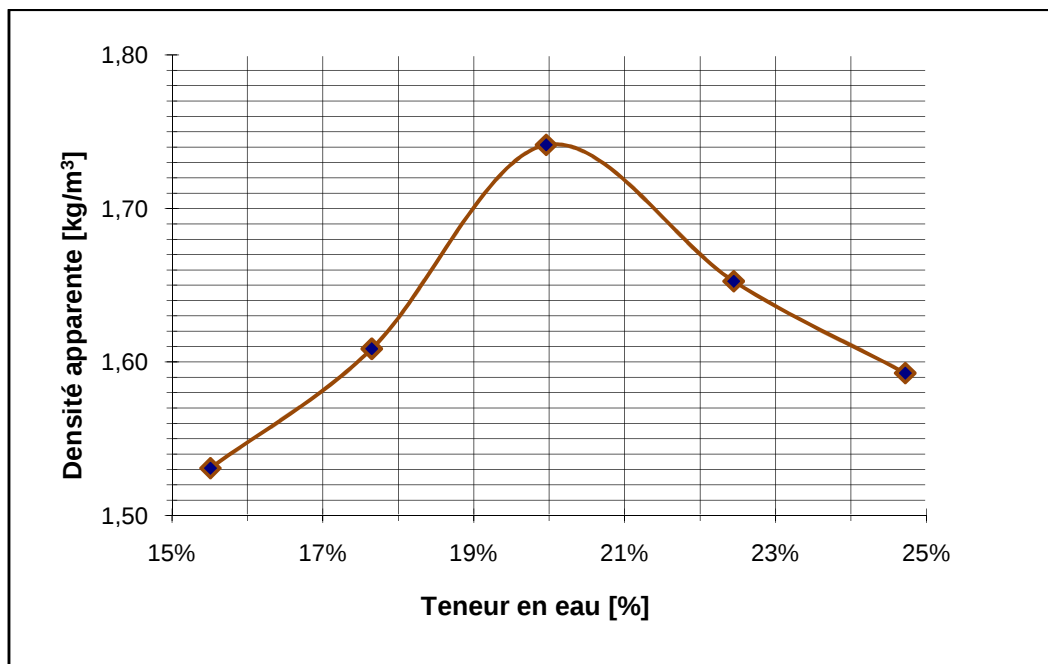
2.1.3. Teneur en eau optimale et densité sèche maximale

a) Méthodologie

L'essai Proctor normal a été réalisé suivant le protocole expérimental **NFP 94-093**. Il a nécessité 5 échantillons de masse 3000 g chacun. Les valeurs résumant l'essai sont consignées dans l'Annexe 4.

b) Résultats

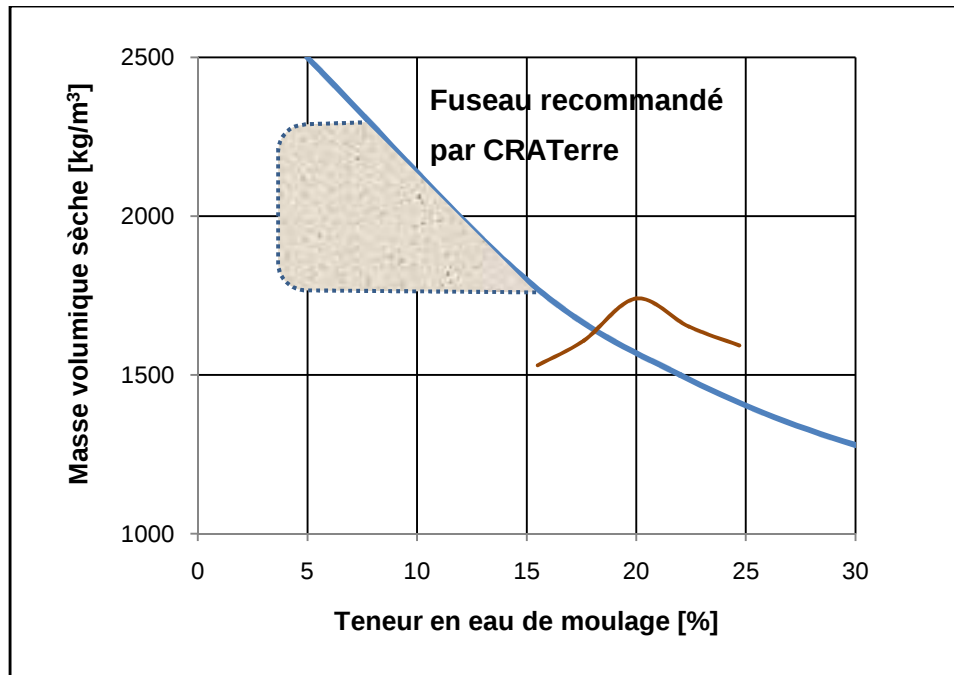
On peut lire sur la courbe en cloches ci-dessous une teneur en eau optimale (TEO) de compactage égale à **20%** et une densité sèche maximale de **1,74 t/m³**:



Graphe 6: Proctor normal de la terre utilisée

c) Analyse

CRA Terre recommande pour le compactage de la terre une densité sèche et une teneur en eau comprises dans la fourchette de valeurs ciblées sur le Graphe 7.



Graph 7: Identification de la compressibilité de la terre aux critères de CRATerre

La courbe de compactage du matériau ne vérifie pas cette condition. Cela se justifie par le fait que la TEO (20%) est élevée. De plus la densité sèche maximale (1,74 t/m³) est faible comparativement aux valeurs couramment observées pour les sols latéritiques (environ 2 t/m³).

2.1.4. Poids spécifique

a) Méthodologie

La masse volumique des grains est déterminée à l'aide d'un pycnomètre à air. L'étalonnage de ce dernier nous donne, pour une pression initiale 23 mWs, la valeur V de l'échantillon de terre contenu dans la cuve par la relation suivante:



Figure 5: Pycnomètre à air utilisé

$$V = \frac{P - 4,4174}{P - 1} \cdot 1214,7465$$

- ✓ P: pression moyenne lue (mWs);
- ✓ 1214,7465: volume total des 2 cuves (cm³);
- ✓ 4,4174: pression obtenue en partant de 23 mWs quand la cuve est vide (mWs);
- ✓ 1: pression atmosphérique (mWs).

Les valeurs de V obtenues pour les 2 matériaux sont regroupées dans le tableau de l'Annexe 5.

Le poids spécifique est calculé grâce à la formule:

$$\gamma_s = \frac{Ms}{V - V_e}$$

- ✓ Ms : masse de l'échantillon de terre sèche ;
- ✓ Ve : volume d'eau ajoutée.

b) Résultats

En utilisant une masse d'échantillon $M_s = 919$ g et une quantité d'eau de 370 g, on trouve $\gamma_s = 29,3 \text{ kN/m}^3$.

c) Interprétation

Le poids spécifique est un peu grand par rapport aux valeurs de référence (de l'ordre de 25,5 à 28,5 kN/m^3).

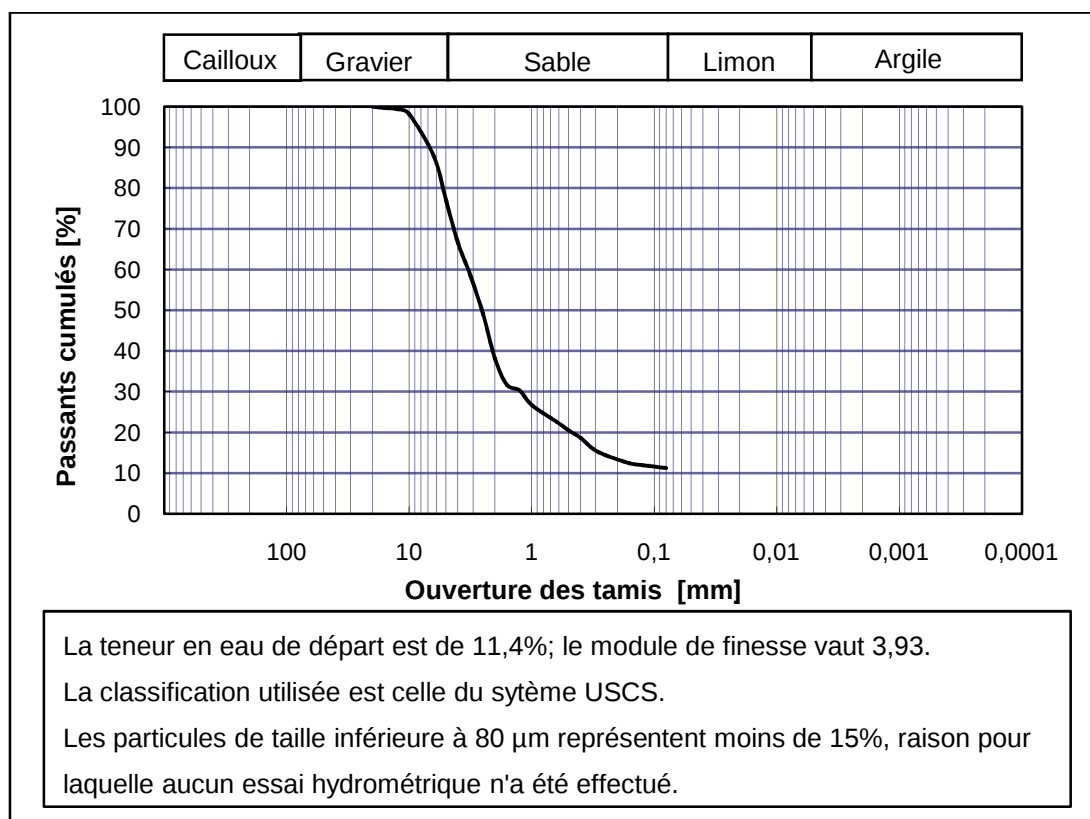
2.2. CAS DU MACHEFER

L'objectif de cette partie est de déterminer les propriétés physiques du mâchefer qui faciliteront la formulation des mélanges. Il s'agit notamment de la granulométrie, la teneur en eau optimale de compactage (Proctor modifié), la densité sèche maximale, le poids spécifique des grains, la masse volumique apparente, la teneur en eau naturelle et d'autres caractéristiques.

2.2.1. Granulométrie

a) Répartition granulométrique

L'analyse suit un mode opératoire identique à celui de la terre. L'échantillon représentatif prélevé est proprement lavé, séché à l'étuve (105°C) pendant 24h avant d'être soumis à l'essai. La courbe obtenue est représentée ci-dessous :



Graph 8: Répartition granulométrique du mâchefer

Les détails de mesures et de calculs sont présentés dans l'Annexe 6.

b) Interprétation

Les granulats sont répartis comme suit :

- 75% de particules ont une taille inférieure à 4,75 mm;
- 38,2% de particules ont une taille inférieure à 2 mm;
- 18,8% de particules ont une taille inférieure à 0,425 mm;
- 31% de particules ont une taille inférieure à 0,150 mm;
- 11,2% de particules ont une taille inférieure à 0,075 mm.

Le mâchefer étudié est classé comme un gravier sableux. La courbe granulométrique du mâchefer s'apparente à l'allure proposée par la plupart des chercheurs ([A. Acosta et al., 2001](#)).

2.2.2. Poids spécifique

a) Procédure d'essai

Comme dans le cas de la terre, on se sert d'un pycnomètre à air. Pour une masse d'échantillon sec de 572 g et une quantité d'eau égale à 420,4 g, la densité de grains obtenue est $\gamma_s = 2,23 \text{ t/m}^3$.

b) Interprétation

La valeur précédente est conforme aux résultats donnés par le corpus des mâchefers (de l'ordre de 1,8 à 2,2 t/m^3).

2.2.3. Masse volumique apparente, teneur en eau naturelle et autres propriétés

a) Méthodologie

Les essais nécessitent une burette graduée et une balance électronique. La teneur en eau mesurée est celle du matériau peu avant la production des briques.

b) Résultats obtenus

La masse volumique apparente s'obtient en faisant le rapport de la masse par le volume pour 5 échantillons de matériau. On obtient alors une valeur moyenne de **724,14 kg/m^3** .

La teneur en eau est mesurée sur 3 échantillons et elle donne en moyenne **11,72%**. Tous les détails de calculs sont consignés dans l'Annexe 7.

Les autres propriétés déterminées sont la masse volumique sèche, la porosité et l'indice des vides. Le tableau suivant récapitule les expressions de calcul et les valeurs obtenues :

Tableau 8: Masse volumique sèche, porosité et indice des vides du mâchefer

	Masse volumique sèche (kg/m ³)	Porosité (%)	Indice des vides (-)
Formule	$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \omega}$	$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \cdot 100$	$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}$
Valeur obtenue	648,19	70,95	2,44

c) Discussion

La masse volumique apparente et la masse volumique sèche sont en accord avec les résultats de la synthèse bibliographique (respectivement 737-1586 kg/m³ et 700-900 kg/m³). La porosité est supérieure à celle des RCC typiques de l'Inde (30-55%), ce qui explique en partie son fort pouvoir d'absorption en eau et sa faible compacité (environ 29%).

2.3. CAS DU MELANGE TERRE-MACHEFER

L'objectif de nos travaux étant d'associer la terre au mâchefer pour confectionner des BTC, nous nous sommes proposé dans cette séquence d'étudier la répartition granulométrique de ce mélange en considérant les différents dosages ci-dessous :

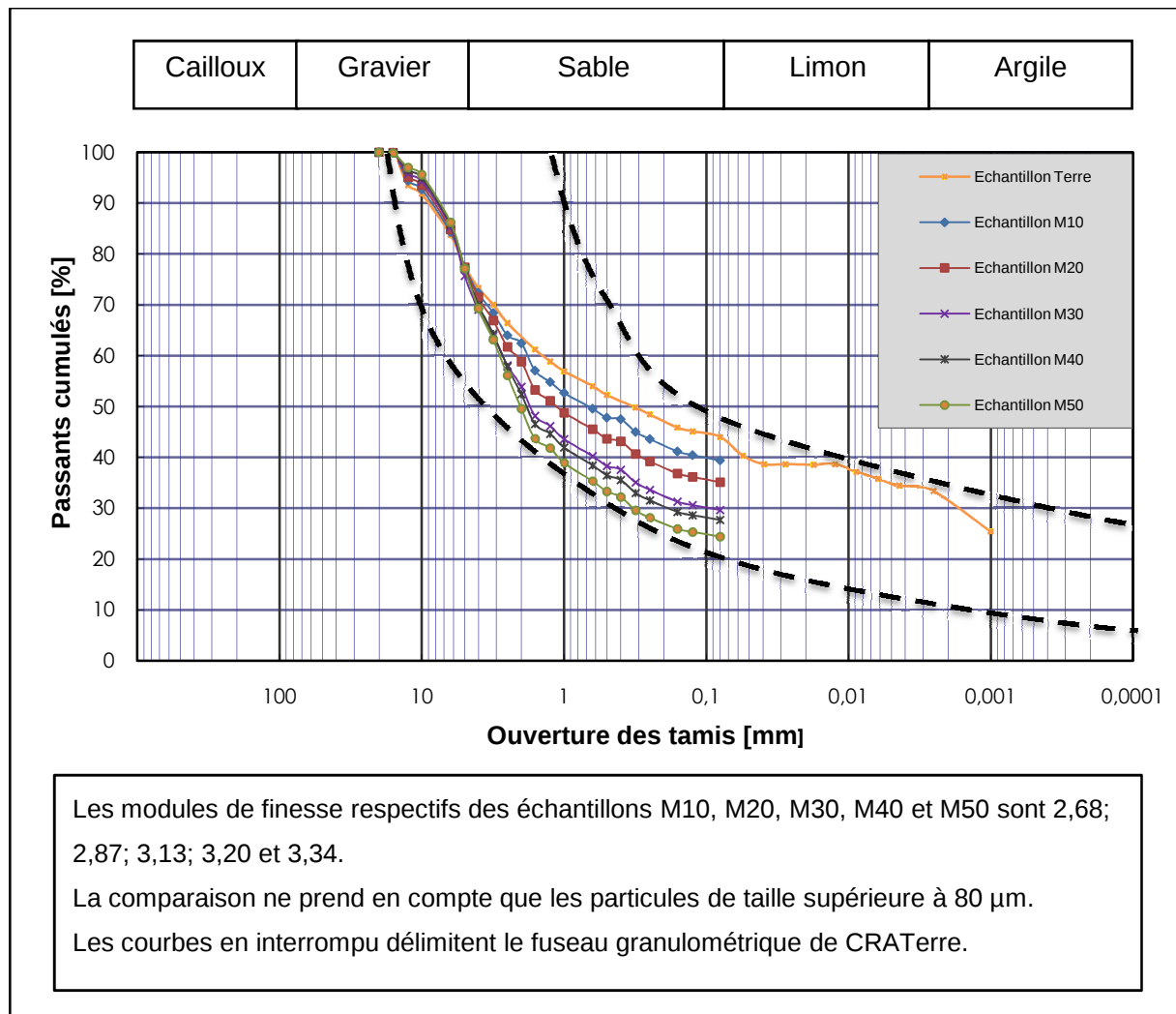
Tableau 9: Types de mélanges terre-mâchefer

Echantillon	Proportion de terre (%)	Proportion de mâchefer (%)
M10	90	10
M20	80	20
M30	70	30
M40	60	40
M50	50	50

Par exemple, pour le mélange de type M10, la production de 9 briques entières (pour la flexion) a nécessité 54 l de terre et 6 l de mâchefer. La production de 48 demi-briques (pour la compression) quant à elle a nécessité 135 l de terre et 15 l de mâchefer. Le malaxage des deux matériaux se fait progressivement, en superposant lors de leur introduction dans le malaxeur les couches de la terre sur celles du mâchefer, puis en y ajoutant de l'eau.

2.3.1. Granulométries des mélanges

L'Annexe 8 récapitule les calculs opérés en vue de simuler les différents mélanges de terre et de mâchefer. Le graphe ci-dessous compare la granulométrie de la terre à celles des différents mélanges :



Graphe 9: Comparaison des granulométries de la terre et des mélanges réalisés

2.3.2. Interprétation des résultats

L'analyse faite est que plus la proportion du mâchefer augmente dans le mélange, plus la courbe granulométrique de ce dernier s'allonge vers le bas. La terre tend donc à devenir sableuse et le mâchefer traite en quelque sorte l'argilosité de la terre. Les matériaux sont donc compatibles car contribuant chacun à la stabilisation de l'autre.

CHAPITRE 3 : ANALYSE CHIMIQUE DU MACHEFER

Dans cette partie, les caractéristiques chimiques des échantillons de mâchefer ont été déterminées en vue d'étudier leur potentiel polluant.

3.1. METHODOLOGIE

La lixiviation a été réalisée suivant le protocole expérimental **NF EN 12457-2**. Il consiste à mettre les granulats de mâchefer en contact avec de l'eau déminéralisée de sorte que le ratio liquide/solide soit égal à 10.

Tableau 10: Ratios liquide/solide pour la lixiviation

Echantillon	E1	E2	E3
Masse de solide (g)	20,13	20,44	20,38
Volume d'eau distillée (ml)	201,3	204,4	203,8

Le mélange est maintenu sous agitation magnétique pendant 24h avant d'être filtré avec des membranes filtrantes de porosité $0,45\ \mu\text{m}$. L'on procède aux mesures de pH, température et conductivité à l'aide d'un multiparamètre de marque **WTW** (voir *Annexe 9*). Ensuite le filtrat obtenu est centrifugé et soumis aux différentes analyses. Les appareils employés sont le spectrophotomètre à émission de flamme **Jenway** (pour les éléments K et Na) et le spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme **SAA 200 Perkin Elmer** (pour les éléments Ni, Pb, Cr, Cd et Cu).



Figure 6: Spectrophotomètre d'absorption atomique à flamme



Figure 7: Spectrophotomètre à émission de flamme

La détermination de la teneur en chaque élément se fait à l'aide de la concentration caractéristique, qui est elle-même fournie par le fabricant.

3.2. CARACTERISATION CHIMIQUE

Dans la mesure du possible, les résultats obtenus sont comparés aux valeurs caractéristiques des MIOM, ceci pour une éventuelle classification du mâchefer étudié dans l'une des catégories V, M ou S.

3.2.1. Mesure de la fraction soluble, du pH et de la conductivité électrique

a) Résultats

Le tableau suivant donne les valeurs de la fraction soluble, du pH et de la conductivité relevés dans chaque solution :

Tableau 11: Fraction soluble, pH et conductivité électrique du mâchefer

Fraction soluble (%)			Température (°C)			pH (-)			Conductivité (µS/cm)		
Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
6,61	12,10	16,39	28,40	28,43	28,50	7,42	7,52	7,62	52,70	79,87	108,60

b) Discussion

Le pH et la conductivité entrent dans les fourchettes établies par la littérature scientifique (respectivement 3,5-12,5 et 75-1000 µS/cm). La fraction soluble s'identifie à celle des MIOM de type S (> 10%). L'utilisation du mâchefer est donc problématique selon la circulaire française de 1994 car il libère plus de particules (au contact de l'eau) qu'il n'est admis pour les MIOM de type V.

3.2.2. Concentrations en potassium et en sodium

a) Résultats

L'appareil donne des mesures exprimées en DO (densité optique) que l'on reporte en mg/l au moyen des courbes d'étalonnage des éléments (confère *Annexe 10*). Les teneurs finales en mg/kg sont données par la formule suivante:

$$C = \frac{Ce}{m} \cdot v$$

- ✓ Ce : concentration de l'élément en solution ou lixiviat (mg/l) ;
- ✓ m : masse de l'échantillon soumis à la lixiviation (kg) ;
- ✓ v : volume d'eau déminéralisée mis en contact avec le mâchefer (l).

Le tableau suivant résume les concentrations finales de K et Na dans le mâchefer :

Tableau 12: Teneurs en potassium et sodium du mâchefer

Teneur en K (mg/kg)			Teneur en Na (mg/kg)		
Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
10,00	18,00	24,00	75,00	106,67	155,00

b) Analyse des résultats

La concentration en Na (0,11%) appartient à l'intervalle suggéré pour les RCC de l'Inde (0,07-0,71%) alors que celle de K (0,02%) est faible par rapport à l'ordre des valeurs des mêmes RCC (0,14-1,8%).

3.2.3. Teneurs en nickel, plomb, chrome, cadmium et cuivre

a) Résultats de l'essai

Contrairement au spectrophotomètre à émission de flamme, le spectrophotomètre d'absorption atomique affiche directement les mesures en mg/l après transposition à l'aide des courbes d'étalonnage des absorbances mesurées (se référer à l'Annexe 11). L'appareil admet une LMD (Limite Minimale de Détection). On admet pour tout élément dont la concentration mesurée est négative ($< \text{LMD}$), une teneur $C_e = 0,5 \text{ LMD}$ (Alam et al., 2002). Le tableau suivant donne les LMD des éléments évalués :

Tableau 13: LMD des métaux évalués

	Ni	Pb	Cr	Cd	Cu
LMD (mg/l)	0,005	0,002	0,002	0,002	0,005

La conversion des mesures en mg/kg donne le tableau récapitulatif suivant:

Tableau 14: Teneurs en nickel, plomb, chrome, cadmium et cuivre du mâchefer

Teneur en Ni (mg/kg)			Teneur en Pb (mg/kg)			Teneur en Cr (mg/kg)			Teneur en Cd (mg/kg)			Teneur en Cu (mg/kg)		
Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max
0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,12	0,22	0,41	0,03	0,10	0,24

b) Interprétation

Les teneurs en Pb, Cr et Cd sont largement inférieures aux valeurs-seuils interdites pour les MIOM de classe V. Le mâchefer est donc valorisable car il n'est pas susceptible de souiller l'eau avec les substances Pb, Cr et Cd. Les pourcentages de Cu et de Ni (respectivement 1 et 0,3 ppm) sont inférieurs à ceux déterminés par Asokan et al. (2005) pour le cas des RCC de l'Inde.

CHAPITRE 4 : CARACTERISATION MECANIQUE DES BRIQUES PRODUITES

Ce chapitre aborde un point important de l'étude, la vérification des performances mécaniques des BTC conçus. Les paramètres recherchés sont particulièrement la compression et la flexion. Leur comportement a été observé pendant une période de 14 jours. Pour plus de fiabilité dans les mesures, l'on prévoit une série de 3 échantillons (A, B et C) par type de dosage.

4.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION HUMIDE

Suivant le protocole proposé par le [CTMNC \(2010\)](#), les blocs ont été immergés dans l'eau à une hauteur d'environ 80%. L'observation faite après 25 à 30 minutes est qu'ils commencent à se dégrader. Au bout de 40 minutes, l'eau a complètement imbibé le matériau qui se décompose alors. Le temps d'érosion des échantillons évolue selon que leur dosage en mâchefer est élevé.

4.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION SECHE

4.2.1. Procédures d'essais



Figure 8: Malaxage du mélange

Elles englobent la formulation des mélanges et l'écrasement normalisé des briques. Les briques destinées à la compression sont des demi-blocs de dimensions nominales 14 x 14 x 9 cm. L'appareillage de production comprend un malaxeur planétaire et une presse de marque TERSTARAM (*Annexe 12*). L'arrosage du mélange se fait en fonction des teneurs en eau initiales des matériaux. Toutefois, sa teneur en eau avoisine 20%; l'on procède en plus au test dit «de la boule» ([Guillaud et al., 1995](#)) pour vérifier que la quantité d'eau est suffisante. Chaque matériau est tamisé à 6 mm selon les

recommandations de CRA Terre. Le dispositif d'écrasement se compose d'un pupitre, d'une presse de capacité maximale 1500 kN, d'un capteur de pression de 400 bar et d'un capteur de déplacement de type LVDT. Le pupitre commande un



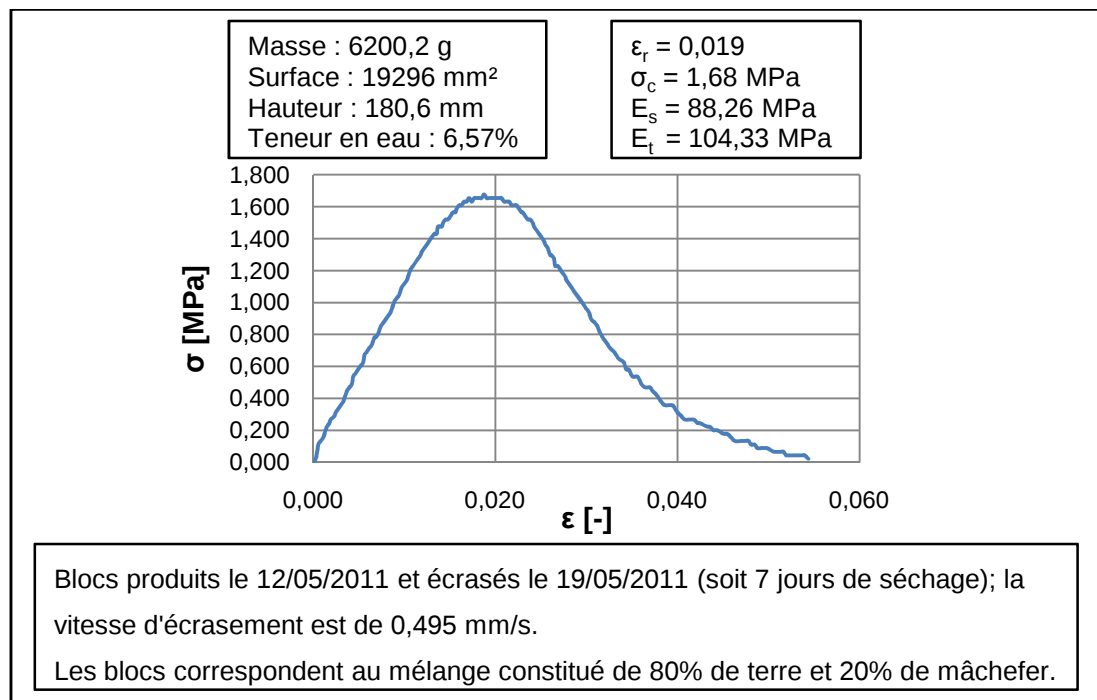
Figure 10: Pupitre pour la compression

Figure 9: Presse hydraulique munie du capteur LVDT

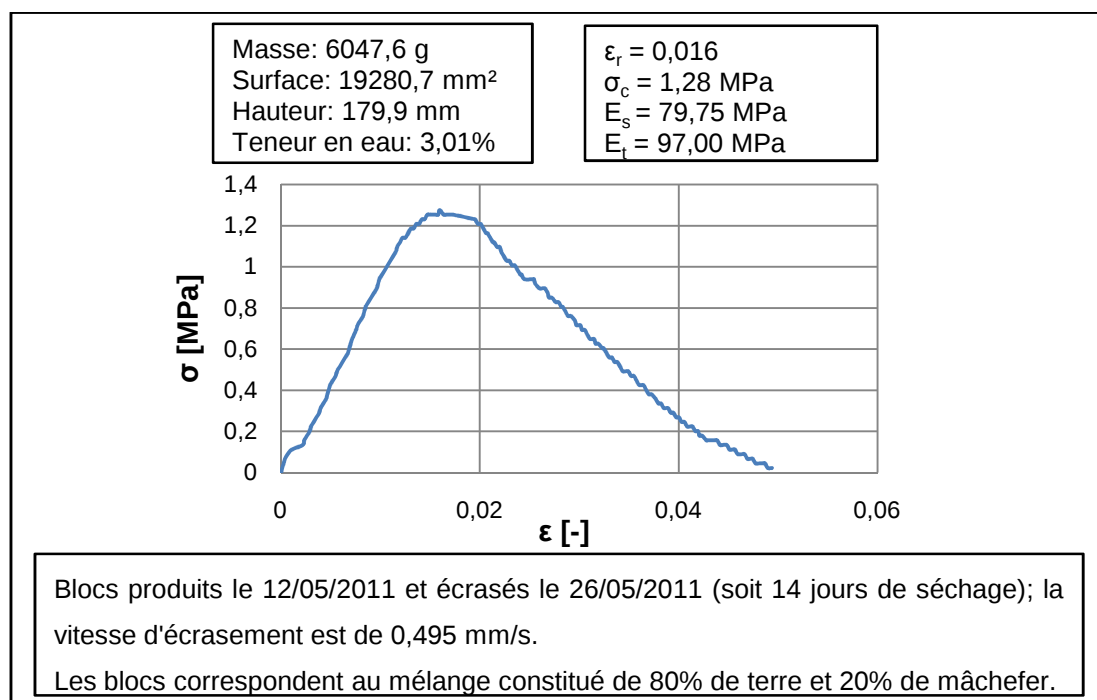
système d'acquisition de données qui permet, au moyen du logiciel Labview, de mesurer la pression et le déplacement dans les blocs.

4.2.2. Résultats

Seuls les graphes des échantillons M20 sont présentés dans ce volet, en raison des valeurs maximales de résistance qu'ils ont enregistrées. Toutes les autres courbes sont répertoriées à l'Annexe 13.



Graph 10: Mesure de contrainte-déformation des blocs M20 à 7 jours



Graph 11: Mesure de contrainte-déformation des blocs M20 à 14 jours

Le tableau ci-dessous résume pour tous les dosages, les contraintes à la rupture des blocs lors de l'écrasement :

Tableau 15: Paramètres de la résistance en compression

		Après 7 jours				Après 14 jours			
Echantillon		ε_r (-)	σ_c (MPa)	Es (MPa)	Et (MPa)	ε_r (-)	σ_c (MPa)	Es (MPa)	Et (MPa)
M10	A	0,021	1,449	69,000	79,000	0,017	1,081	63,588	90,200
	B	0,021	1,402	66,762	72,400	0,020	1,150	57,500	82,667
	C	0,019	1,310	68,947	94,800	0,020	1,107	55,350	75,333
Moyenne		0,020	1,387	68,236	82,067	0,019	1,113	58,813	82,733
M20	A	0,019	1,613	84,895	100,500	0,013	1,141	87,769	106,250
	B	0,019	1,677	88,263	104,333	0,016	1,276	79,750	97,000
	C	0,014	1,275	91,071	98,400	0,013	1,228	94,462	117,250
Moyenne		0,017	1,522	88,076	101,078	0,014	1,215	87,327	106,833
M30	A	0,021	1,212	57,714	64,143	0,021	0,899	42,810	60,000
	B	0,020	1,213	60,65	74,833	0,021	0,988	47,048	60,857
	C	0,020	1,325	66,250	78,500	0,019	1,075	56,579	80,6
Moyenne		0,020	1,250	61,538	72,492	0,020	0,987	48,812	67,152
M40	A	0,021	1,379	65,667	81,500	0,018	1,067	59,278	89,000
	B	0,021	1,377	65,571	85,571	0,019	1,132	59,579	77,500
	C	0,018	1,177	65,389	81,500	0,019	1,022	53,789	66,667
Moyenne		0,020	1,311	65,542	82,857	0,019	1,074	57,549	77,722
M50	A	0,020	1,239	61,950	69,571	0,020	1,152	57,600	73,833
	B	0,018	1,150	63,889	77,500	0,017	1,150	67,647	81,167
	C	0,019	1,237	65,105	84,667	0,016	0,950	59,375	99,500
Moyenne		0,019	1,209	63,648	77,246	0,018	1,084	61,541	84,833

Les moyennes donnent le récapitulatif ci-après:

Tableau 16: Moyennes des paramètres mesurés à la compression

		Après 7 jours				Après 14 jours			
Echantillon		ε_r	σ_c (MPa)	Es (MPa)	Et (MPa)	ε_r	σ_c (MPa)	Es (MPa)	Et (MPa)
M10		0,020	1,387	68,236	82,067	0,019	1,113	58,813	82,733
M20		0,017	1,522	88,076	101,078	0,014	1,215	87,327	106,833
M30		0,020	1,250	61,538	72,492	0,020	0,987	48,812	67,152
M40		0,020	1,311	65,542	82,857	0,019	1,074	57,549	77,722
M50		0,019	1,209	63,648	77,246	0,018	1,084	61,541	84,833

4.2.3. Interprétation

Les blocs de type M20 présentent une résistance maximale en compression. Entre 10 et 20%

de dosage en mâchefer, la résistance augmente d'abord et diminue ensuite au fur et à mesure que la proportion du mâchefer tend vers 50%. Le rapport du module d'élasticité transversal par le module d'élasticité sécant vaut respectivement environ **1,2** et **1,3** (voir *Annexe 14*) pour les blocs écrasés à 7 et 14 jours. Ces résultats sont proches de **1,07**, la valeur caractéristique du même rapport pour le cas des sols granulaires (Maalej et al., 2007).

Entre 7 et 14 jours de séchage sans bâches de couverture:

- la différence entre les résistances des blocs est d'environ **0,24 MPa**;
- leur teneur en eau diminue de quasiment **50%**;
- leur poids diminue pratiquement de **255 g**.

La chute de la résistance entre 7 et 14 jours peut s'expliquer par le fait que le séchage des blocs ne se soit pas fait convenablement. Le stabilisant n'a pas atteint son durcissement maximal. Le séchage irrégulier aurait entraîné la formation de microfissures dans la brique, ce qui a facilité sa rupture rapide pendant l'écrasement. Le fait que la teneur en eau ne soit pas optimale dans le mélange peut aussi justifier cette diminution. En effet, l'essai Proctor normal réalisé sur le mâchefer n'a pas été concluant, ce qui n'a pas permis de maîtriser sa TEO.

4.3. RESISTANCE A LA FLEXION

4.3.1. Méthodologie



Figure 11: Rupture d'un bloc à la flexion

Dans ce cas, l'essai pratiqué s'appelle l'essai de flexion à 3 points. Il nécessite des blocs entiers de format 29,5 x 14 x 9 cm. La brique est disposée sur les 2 appuis de la presse de sorte que l'écartement du milieu soit au moins égal à 20 cm. L'essai se distingue de la traction par le fait que la fibre inférieure reçoit le maximum de sollicitation, c'est d'ailleurs ce qui explique la fissure ascendante.

4.3.2. Résultats

L'appareil donne les mesures en kN. Pour obtenir la contrainte en MPa, on pose l'expression:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

$$\begin{cases} M = F \cdot \frac{l}{4} \\ I = b \cdot \frac{h^3}{12} \end{cases}$$

$$\sigma = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{bh^2}$$

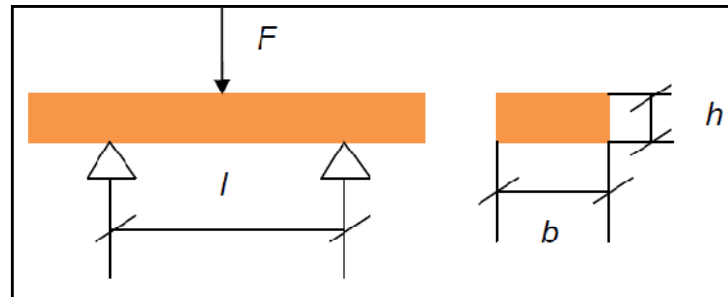


Figure 12: Modélisation de la brique

Où M et I désignent respectivement le moment fléchissant dans la brique et le moment d'inertie de la section sollicitée.

Ainsi, en calculant, on obtient l'ensemble des valeurs ci-dessous:

Tableau 17: Paramètres de la résistance en flexion

Echantillon		Après 7 jours		Après 14 jours	
		F (kN)	σ (MPa)	F (kN)	σ (MPa)
M10	A	1,240	0,361	0,610	0,203
	B	1,490	0,423	0,950	0,312
	C	0,780	0,266	1,020	0,330
Moyenne		1,170	0,350	0,860	0,281
M20	A	1,210	0,390	0,900	0,291
	B	1,020	0,328	1,140	0,361
	C	0,960	0,320	1,010	0,325
Moyenne		1,063	0,346	1,017	0,326
M30	A	0,900	0,296	0,960	0,312
	B	0,960	0,310	0,980	0,316
	C	0,970	0,315	0,780	0,251
Moyenne		0,943	0,307	0,907	0,293
M40	A	0,860	0,278	0,810	0,261
	B	0,850	0,275	0,730	0,236
	C	0,730	0,236	0,750	0,244
Moyenne		0,813	0,263	0,763	0,247
M50	A	0,790	0,256	0,700	0,226
	B	0,630	0,204	0,690	0,224
	C	0,620	0,207	0,610	0,198
Moyenne		0,680	0,222	0,667	0,216

Le récapitulatif des moyennes est représenté dans le tableau ci-dessous:

Tableau 18: Moyennes des paramètres obtenus à la flexion

Echantillon	Après 7 jours		Après 14 jours	
	F (kN)	σ (MPa)	F (kN)	σ (MPa)
M10	1,170	0,350	0,860	0,281
M20	1,063	0,346	1,017	0,326
M30	0,943	0,307	0,907	0,293
M40	0,813	0,263	0,763	0,247
M50	0,680	0,222	0,667	0,216

4.3.3. Analyse des résultats

Les blocs de type M20 présentent toujours une résistance maximale. En général, la résistance diminue selon que le pourcentage en mâchefer du mélange augmente. On en déduit que la TEO de dosage en mâchefer pour la production des BTC est en moyenne de **20%**.

CONCLUSION GENERALE

De cette étude sur la valorisation des mâchefers de la SONICHAR dans la production des briques de terre comprimée, il ressort un certain nombre de résultats intéressants. Premièrement, la caractérisation physique révèle que la terre est de nature latéritique (avec 44% d'argile) tandis que le mâchefer s'apparente à un gravier sableux (comprenant 11% de particules fines). Bien que la terre respecte la plupart des critères du centre expérimental CRATerre pour les constructions en terre, ses paramètres de compressibilité ne s'identifient pas aux choix de ce dernier. Les paramètres physiques du mâchefer concordent avec la majeure partie des résultats obtenus dans les recherches antérieures. L'on note particulièrement qu'il a une grande porosité (70,95%). Les analyses granulométriques réalisées en vue de simuler les différents mélanges (terre et mâchefer) révèlent une bonne compatibilité entre le mâchefer et la terre argileuse.

Deuxièmement, la caractérisation chimique, ne prenant en compte que les concentrations des métaux Pb, Cr, Cd dans la classification des MIOM, indique que les mâchefers peuvent être valorisables. Mais leur fraction soluble est supérieure à la limite admise pour les MIOM de type V. Le résultat précédent en appelle donc à une analyse chimique plus approfondie de ces mâchefers.

Enfin, la vérification mécanique des blocs produits conformément aux essais normalisés traduit:

- o entre 7 et 14 jours d'âge, une légère diminution des résistances à la compression (de l'ordre de 0,24 MPa) et à la flexion (de l'ordre de 0,03 MPa);
- o entre 7 et 14 jours d'âge, une chute considérable du poids (de l'ordre de 255 g) et de la teneur en eau (de l'ordre de 50%) des blocs ;
- o une résistance maximale des briques en compression comme en flexion lorsque le dosage en mâchefer avoisine les 20%;
- o une chute graduelle de cette résistance au fur et à mesure que la proportion du mâchefer augmente dans le mélange.

En somme, les résultats précédents montrent que l'utilisation des mâchefers de charbon de la SONICHAR en vue de produire des BTC est possible. Cependant elle doit être précédée et validée par un certain nombre de vérifications techniques et environnementales, donc par une étude expérimentale plus poussée.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Parmi les recommandations qui peuvent être apportées à cette étude, l'on distingue principalement: les vérifications liées aux *conditions de cure* et au *temps de durcissement des blocs*, puis les vérifications relatives au *caractère polluant du mâchefer utilisé*. En effet, les conditions de traitement des blocs après la production peuvent influencer leur résistance mécanique. En recouvrant hermétiquement les briques de bâches noires en plastique, l'on contribue à ce qu'elles conservent une certaine quantité d'eau, ce qui, moyennant une certaine température, les maintient dans une ambiance (à la fois humide et chaude). Celle-ci permet au stabilisant d'atteindre sa résistance maximale. La cure doit durer 7 à 14 jours au maximum avant la suppression des bâches (Rigassi et CRA Terre-EAG, 1995). Il faut aussi poursuivre les essais d'écrasement à 28 jours et plus afin de mieux caractériser la performance mécanique des blocs. L'autre recommandation concerne le volet environnemental. Afin de mieux évaluer le potentiel polluant des mâchefers, il est nécessaire de les soumettre à plus d'*analyses chimiques*, notamment celles qui déterminent les teneurs en mercure, en arsenic, en carbone organique total (COT) et en sulfate. Une attention particulière doit être portée sur la concentration en mercure car celui-ci s'avère extrêmement nocif pour la santé (Pflughoeft-Hasset et al., 2007).

Comme perspectives pour cette recherche, il peut être envisagé d'employer les mâchefers dans les *bétons légers avec fonction d'isolation thermique*. Il s'agit d'ajouter les mâchefers dans le béton en substitution d'un pourcentage donné de granulats légers. Dans ce cas, la porosité élevée des mâchefers pourrait constituer un atout. Les vides du matériau contribueraient alors à réduire au maximum les transmissions de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur d'un bâtiment construit à base dudit béton. Ainsi le confort thermique (fraicheur intérieure) du local sera amélioré car le mouvement d'humidité diffuse généralement de l'intérieur à la surface du matériau où l'eau s'évapore (Lewis, 1921). Enfin, l'on pourrait également étudier les effets d'un éventuel *ajout du ciment dans le mélange terre-mâchefer* en vue d'obtenir des blocs plus résistants, particulièrement en présence de l'eau. Cette étude consiste à trouver la teneur optimale du ciment qu'il faudrait introduire dans le mélange pour assurer aux blocs une meilleure prise et une performance mécanique supérieure à celle des BTC courants. Cette dernière recommandation nécessite une vérification du comportement à la lixiviation du mélange mâchefer-ciment dont la composition chimique est différente de celle du mâchefer seul.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Pflughoeft-Hasset et al., (2007), *Analysis of How Carbon-Based Sorbents Will Impact Fly Ash Utilization and Disposal*, Presented at 2007 World of Coal Ash, May 7-10, 2007, Covington, Kentucky.
- [2] Xiaoyan Y, Changsheng J. (2007), *Comprehensive utilization of the coal gangue*. *Coal Technology*, 26(10):108–10.
- [3] Bian Z, Dong J, et al. (2009), *The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland*. *Environmental Geology*, 58(3):625–34.
- [4] Bian Z, Zhang Y. (2006), *Land use changes in Xuzhou coal mining are*. *Acta Geographica Sinica*, 61:349–58 (in Chinese).
- [5] Poon CS, Lam L, Wong YL. (2000), *A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash*, *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 447–55.
- [6] Bakoshi T, Kohno K, Kawasaki S, Yamaji N. (1998), *Strength and durability of concrete using bottom ash as replacement for fine aggregate*, *ACI Special Publication (SP-179-10)*:159–72.
- [7] Edwards B. (1999), *Sustainable architecture: European directives and building design*, 2nd ed. Oxford: Architectural Press.
- [8] Serpell A, Alarcon LF. (1998), *Construction process improvement methodology for construction projects*, *Int J Project Manag*, 16(4):215–21.
- [9] M.G.M. Alam, G. Allinson, L.J.B. Laurenson, F. Stagnitti and E.T. Snow (2002), *A comparison of trace element concentrations in cultured and wild carp (Cyprinus carpio) of Lake Kasumigaura, Japan*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 53, 348-354.
- [10] Dubey PN, Sanghal SP, Puttevar SP. (2000), *Elemental concentration versus particulate size profile of the fly ash from Koradi Thermal Power Station*, In: Verma CVJ, Rao SV, Kumar V, Krishnamoorthy R, editors, *Proceedings of the Second International Conference on Fly Ash Disposal and Utilisation*, p. 48–55.
- [11] Lewis W.K. (1921), *Ind. Eng. Chem*, 13, 427-432
- [12] ACAA (2008), *2008 Coal Combustion Product (CCP) Production & Use Survey Report*, www.ACAA-USA.org.
- [13] EPA (2009), *U.S. EPA Region 8 Performance Standard Specifications and Guidelines for industrial Materials*, pp 9-18, December.
- [14] Vivian W.Y. Tam & C.M. Tam (2006), *A review on the viable technology for*

construction waste recycling, Resources, Conservation and Recycling, 47, 209–221.

[15] Ömer Özkan, Isa Yüksel, Özgür Muratoglu (2007), *Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag*, Waste Management, 27, 161–167.

[16] Gwénaëlle Bröns-Laot (2002), *Evaluation environnementale de la valorisation des mâchefers d'ordures ménagères en remplissage de carrière*, N° d'ordre 2002ISAL0050.

[17] Circulaire DPPR/SEI/BPSIED n° 94-IV-1 du 09/05/94 relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains, Ministère de l'environnement, France.

[18] V. G. Lemeshev, I. K. Gubin, Yu. A. Savel'ev, D. V. Tumanov and D. O. Lemeshev (2004), *Utilization of Coal-Mining Waste in the Production of Building Ceramic Materials*, Translated from Steklo i Keramika, N° 9, pp. 30 – 32, September.

[19] A. Acosta, M. Aineto, I. Iglesias, M. Romero, J.Ma. Rinco'n (2001), *Physico-chemical characterization of slag waste coming from GICC thermal power plant*, Materials Letters, 50, 246–250.

[20] Rafat Siddique (2010), *Utilization of coal combustion by-products in sustainable construction materials*, Resources, Conservation and Recycling, 54, 1060–1066.

[21] Liu Haibin, Liu Zhenling (2010), *Recycling utilization patterns of coal mining waste in China*, Resources, Conservation and Recycling, 54, 1331–1340.

[22] J. Rogbeck et A. Knutz (1996), *Coal bottom ash as light fill material in construction*, agement, Vol. 16, N° 1-3, pp. 125-128.

[23] P. Asokan, Mohini Saxena, Shyam R. Asolekar (2005), *Coal combustion residues – environmental implications and recycling potentials*, Resources, Conservation and Recycling, 43, 239–262.

[24] Yamen Maalej et Luc Dormieux (2007), *Comportement élastique non linéaire d'un milieu granulaire : approche micromécanique*, Comptes Rendus Mécanique, Volume 335, N° 8, pages 461-466.

[25] Vincent Rigassi, CRATerre-EAG (1995), *Blocs de terre comprimée Volume I. Manuel de production*, DZE-GATE.

[26] Hubert Guillaud, Thierry Joffroy, Pascal Odul, CRATerre-EAG (1995), *Blocs de terre comprimée, Volume II. Manuel de conception et de construction*, DZE-GATE.

[27] <http://www.freepatentsonline.com>, 18/03/2011.

[28] <http://www.planseisme.fr>, 06/06/2011.

ANNEXES

Annexe 1: Quelques normes et applications des RCC définies par l'organisation ASTM	46
Annexe 2: Hypothèses et calculs de l'analyse granulométrique complète de la terre	47
Annexe 3: Mesures et calculs pour la détermination des limites d'Atterberg de la terre	49
Annexe 4: Mesures et calculs pour l'essai Proctor normal de la terre	49
Annexe 5: Mesures pour la détermination des densités spécifiques des matériaux.....	49
Annexe 6: Mesures pour la détermination de la granulométrie du mâchefer	50
Annexe 7: Détermination de la masse volumique apparente et de la TEN du mâchefer	51
Annexe 8: Détails des répartitions granulométriques des mélanges réalisés	52
Annexe 9: Dispositif d'agitation magnétique et multimètre pour l'analyse chimique.....	57
Annexe 10: Courbes d'étalonnage des éléments K et Na	57
Annexe 11: Courbes d'étalonnage des éléments Ni, Pb, Cr, Cd et Cu.....	58
Annexe 12: Appareillage de production des briques et tamisage du mâchefer.....	59
Annexe 13: Courbes contrainte-déformation des différents blocs produits	61
Annexe 14: Relation entre le module d'élasticité tangentiel et le module d'élasticité sécant ..	75

Annexe 1: Quelques normes et applications des RCC définies par l'organisation ASTM

Norme	Description	Applications
C593 - 06 Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization	Qualification des cendres volantes et autres pouzzolanes pour une utilisation avec la chaux dans les mélanges plastiques ou non plastiques et les autres qui affectent la réaction pouzzolanique que requiert la stabilisation des sols.	Base stabilisée Ciment
E1861-97 Standard Guide for Use of Coal Combustion By-Products in Structural Fills	Procédures pour la conception et la construction des structures de chaussées utilisant les sous-produits de la combustion de charbon	Structures de chaussées
E2060 - 06 Standard Guide for Use of Coal Combustion Products for Solidification/Stabilization of Inorganic Wastes	Méthodes pour la sélection et l'application des produits de combustion du charbon pour utilisation dans la stabilisation chimique des oligo-éléments dans les déchets et des eaux usées	Stabilisation des sols Solidification des déchets
E2243 - 02 Standard Guide for Use of Coal Combustion Products (CCPs) for Surface Mine Reclamation: Re-Contouring and Highwall Reclamation	Fourniture de conseils sur l'identification des produits de combustion du charbon selon les techniques appropriées et les performances environnementales	Restauration de sites miniers (sites d'emprunt) Substitution des sols, Structures de chaussées Construction routière Amendement sols, isolement des acides en formant des matériaux
E2277 - 03 Standard Guide for Design and Construction of Coal Ash Structural Fills	Procédures pour la conception et la construction des structures de chaussées	Structures de chaussées et remblais

Source: [EPA, 2009](#)

Annexe 2: Hypothèses et calculs de l'analyse granulométrique complète de la terre

Projet : SONICHAR Opérateur: François EMAKO Matériau: Terre	Norme opératoire: NFP 18-560 Provenance : Ouagadougou Poids initial sec (g) : 3290
--	---

A noter :

Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à :

- 100 g si d < 1 mm
- 200 g si 1 < d < 4 mm
- 700 g si d > 4 mm

Espace où saisir les données

Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu

Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier)

$$MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$$

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
42	12,5	212,4	212,4	6,5%	93,5%
41	10	57,6	270,0	8,2%	91,8%
40	8		270,0	8,2%	
39	6,3	265,4	535,4	16,3%	83,7%
38	5	202,1	737,5	22,4%	77,6%
37	4	140,8	878,3	26,7%	73,3%
36	3,15	107,2	985,5	30,0%	70,0%
35	2,5	118,9	1 104,4	33,6%	66,4%
34	2		1 104,4	33,6%	
33	1,6	171,4	1 275,8	38,8%	61,2%
32	1,25	77,5	1 353,3	41,1%	58,9%
31	1	64,4	1 417,7	43,1%	56,9%
30	0,8		1 417,7	43,1%	
29	0,63	95,7	1 513,4	46,0%	54,0%
28	0,5	57,2	1 570,6	47,7%	52,3%
27	0,4		1 570,6	47,7%	
26	0,315	81,3	1 651,9	50,2%	49,8%
25	0,25	44,9	1 696,8	51,6%	48,4%
24	0,2		1 696,8	51,6%	
23	0,16	83,8	1 780,6	54,1%	45,9%
22	0,125	25,4	1 806,0	54,9%	45,1%
21	0,1		1 806,0	54,9%	
20	0,08	35,7	1 841,7	56,0%	44,0%

Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et vérification mécanique des blocs produits

Chantier: SONICHAR Opérateur: François EMAKO Provenance: Ouagadougou Norme opératoire : NF P 94-093 & 057	Type d'agent dispersant: Hexamétaphosphate de sodium Concentration (%): 5% Tamis d'écèlement ϕ : 0,08 mm (n°20 AFNOR) Proportion pondérale C de la fraction 0/ϕ (%): 44 % Poids initial sec W, introduit et prélevé sur le tamisât 0/ϕ (g) : 40 g Poids spécifique γ_s (t/m3) : 2,93 Volume V d'eau distillée utilisée (cm3) : 2000 Diamètre intérieur de l'éprouvette (cm) : 7,77
--	---

$$F = \sqrt{\frac{1,80 \cdot \eta}{(\gamma_s - \gamma_w)}}$$

$$\eta = 1,002 \cdot 10^B \quad \text{où} \quad B = \left(\frac{1,3272(20 - T) - 0,001053(T - 20)^2}{T + 105} \right)$$

$$H_r = (L_0 - d \cdot (R_c - 1000)) + \frac{1}{2} \cdot \left(h_0 - \frac{V}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2} \right)$$

$$P = \frac{V \cdot \gamma_s \cdot (R_c - 1000) \cdot \gamma_w}{10 \cdot W \cdot (\gamma_s - \gamma_w)}$$

$$\Phi = F \cdot \sqrt{\frac{H_r}{t_c}}$$

$$R_c = R + (C_T + C_m) - C_d$$

$$C_T = 0,3333 T - 6,6666$$

$$C_m = 1$$

$$C_d = 1$$

Heure 13h:46	Temps cumulé tc de lecture	Lecture R	T °C	Correction Ct+Cm-Cd	Lecture corrigée Rc	Profondeur effective Hr (cm)	Facteur F	Diamètre équivalent Φ (μ m)	Pourcentage des grains < Φ P (%)	Passant p (p = C.P) en %
13:46:30	30 s	1007,5	33,7	4,6	1012,1	13,3	0,83	55	91,6	40,32
13:47:00	1 min	1007,0	33,7	4,6	1011,6	13,4	0,83	39	87,8	38,65
13:48:00	2 min	1007,0	33,7	4,6	1011,6	13,4	0,83	28	87,8	38,65
13:51:00	5 min	1007,0	33,6	4,5	1011,5	13,4	0,83	18	87,5	38,54
13:56:00	10 min	1007,0	33,6	4,5	1011,5	13,4	0,83	12	87,5	38,54
14:06:00	20 min	1006,5	33,8	4,6	1011,1	13,5	0,83	9	84,2	37,09
14:26:00	40 min	1006,0	34,1	4,7	1010,7	13,6	0,83	6	81,2	35,75
15:06:00	80 min	1005,5	34,4	4,8	1010,3	13,7	0,82	4	78,2	34,41
17:46:00	4 h	1005,0	34,9	5,0	1010,0	13,7	0,82	3	75,6	33,3
13:46:00 J+1	24 h	1004,0	30,8	3,6	1007,6	14,2	0,86	1	57,7	25,4

Annexe 3: Mesures et calculs pour la détermination des limites d'Atterberg de la terre

N°tare	Limite de liquidité				Limite de plasticité			
	1	2	3	4	A	B	C	D
Poids total humide (g)	17,90	15,35	15,63	15,49	9,71	9,91	10,15	9,61
Poids total sec (g)	14,06	12,60	12,84	12,72	9,18	9,33	9,53	9,13
Poids tare (g)	7,13	7,38	7,39	7,15	7,32	7,31	7,34	7,41
Poids de l'eau (g)	3,84	2,75	2,79	2,77	0,53	0,58	0,62	0,48
Poids sec (g)	6,93	5,22	5,45	5,57	1,86	2,02	2,19	1,72
Teneur en eau (g)	55,4%	52,7%	51,2%	49,7%	28,5%	28,7%	28,3%	27,9%
Nombre de coups N	11	16	24	37				

Annexe 4: Mesures et calculs pour l'essai Proctor normal de la terre

Teneur en eau souhaitée		8%		10%		12%		14%		16%	
Eau de mouillage		240		300		360		420		480	
Densité	Poids total humide (g)	3841		3957		4142		4080		4046	
	Poids du moule (g)	2179		2179		2179		2179		2179	
	Poids net humide (g)	1662		1779		1963		1902		1867	
	Volume du moule (cm3)	940		940		940		940		940	
Teneur en eau	Numéro tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids tare (g)	18,7	16,8	17,7	17,6	17,3	17,8	17,4	16,8	17,9	17,6
	Poids total humide (g)	117,3	108,2	102,9	112,4	101,7	99,2	103,2	93,2	100,7	94,7
	Poids total sec (g)	104,0	96,0	90,1	98,2	87,8	85,5	87,2	79,4	84,3	79,4
	Teneur en eau (%)	15,6	15,4	17,7	17,6	19,7	20,2	22,8	22,1	24,7	24,7
Teneur en eau moyenne (%)		15,5		17,6%		20,0%		22,4%		24,7%	
Densité humide γ (g/cm3) :		1,77		1,89		2,09		2,02		1,99	
Densité sèche γ_d (g/cm3) :		1,5309		1,6086		1,7415		1,6527		1,5928	

Annexe 5: Mesures pour la détermination des densités spécifiques des matériaux

Type de matériau	Pression finale P: cuve échantillon + chambres (mWs)				Valeur de V (cm3)
	1er essai	2ième essai	3ième essai	Moyenne P	
Terre	8,80	8,85	8,80	8,82	684
Mâchefer	8,80	8,70	8,65	8,72	677

Annexe 6: Mesures pour la détermination de la granulométrie du mâchefer

Projet: SONICHAR Opérateur: François EMAKO Matériau: Mâchefer	Norme opératoire : NFP 18-560 Provenance : Agadez Poids initial sec (g) : 4880,3
--	---

A noter :

Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à :

- 100 g si d < 1 mm
- 200 g si 1 < d < 4 mm
- 700 g si d > 4 mm

Espace où saisir les données

Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu

Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier)

$$MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$$

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	12,9	12,9	0,3%	99,7%
42	12,5	16,6	29,5	0,6%	99,4%
41	10	57,4	86,9	1,8%	98,2%
40	8		86,9	1,8%	
39	6,3	503,9	590,8	12,1%	87,9%
38	5	537,8	1 128,6	23,1%	76,9%
37	4	503,4	1 632,0	33,4%	66,6%
36	3,15	395,7	2 027,7	41,5%	58,5%
35	2,5	453,1	2 480,8	50,8%	49,2%
34	2	533,5	3 014,3	61,8%	38,2%
33	1,6	314,8	3 329,1	68,2%	31,8%
32	1,25	72,8	3 401,9	69,7%	30,3%
31	1	172,0	3 573,9	73,2%	26,8%
30	0,8		3 573,9	73,2%	
29	0,63	199,3	3 773,2	77,3%	22,7%
28	0,5	104,4	3 877,6	79,5%	20,5%
27	0,4	91,7	3 969,3	81,3%	18,7%
26	0,315	131,5	4 100,8	84,0%	16,0%
25	0,25	75,5	4 176,3	85,6%	14,4%
24	0,2		4 176,3	85,6%	
23	0,16	95,7	4 272,0	87,5%	12,5%
22	0,125	24,8	4 296,8	88,0%	12,0%
21	0,1		4 296,8	88,0%	
20	0,08	35,6	4 332,4	88,8%	11,2%

Annexe 7: Détermination de la masse volumique apparente et de la TEN du mâchefer

Echantillon	E1	E2	E3	E4	E5	Moyenne
Masse (g)	299,98	216,62	145,4	71,12	106,57	167,94
Volume (ml)	400	300	200	100	150	230,00
Masse volumique (kg/m ³)	749,95	722,07	727	711,2	710,47	724,14

	E1	E2	E3	Moyenne
Masse humide (g)	322,7	517,5	409,2	416,47
Masse sèche (g)	287,25	464,43	367,39	373,02
Teneur en eau (%)	0,1234	0,1143	0,1138	0,1172

Annexe 8: Détails des répartitions granulométriques des mélanges réalisés

Projet: SONICHAR			Norme opératoire: NFP 18-560		
Opérateur: François EMAKO			Provenance : Ouagadougou		
Matériau: M10			Poids initial sec (g): 3449		
A noter : Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : - 100 g si d < 1 mm - 200 g si 1< d < 4 mm - 700 g si d > 4 mm Espace où saisir les données Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier) $MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$					
Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	1,3	1,3	0,0%	100,0%
42	12,5	192,8	194,1	5,6%	94,4%
41	10	57,6	251,7	7,3%	92,7%
40	8		251,7	7,3%	
39	6,3	289,3	540,9	15,7%	84,3%
38	5	235,7	776,6	22,5%	77,5%
37	4	177,1	953,7	27,7%	72,3%
36	3,15	136,1	1 089,7	31,6%	68,4%
35	2,5	152,3	1 242,0	36,0%	64,0%
34	2	53,4	1 295,4	37,6%	62,4%
33	1,6	185,7	1 481,1	42,9%	57,1%
32	1,25	77,0	1 558,2	45,2%	54,8%
31	1	75,2	1 633,3	47,4%	52,6%
30	0,8		1 633,3	47,4%	
29	0,63	106,1	1 739,4	50,4%	49,6%
28	0,5	61,9	1 801,3	52,2%	47,8%
27	0,4	9,2	1 810,5	52,5%	47,5%
26	0,315	86,3	1 896,8	55,0%	45,0%
25	0,25	48,0	1 944,8	56,4%	43,6%
24	0,2		1 944,8	56,4%	
23	0,16	85,0	2 029,7	58,8%	41,2%
22	0,125	25,3	2 055,1	59,6%	40,4%
21	0,1		2 055,1	59,6%	
20	0,08	35,7	2 090,8	60,6%	39,4%
Projet: SONICHAR			Norme opératoire: NFP 18-560		

*Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et
vérification mécanique des blocs produits*

Opérateur: François EMAKO	Provenance: Ouagadougou
Matériau: M20	Poids initial sec (g): 3608,1

A noter :
Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à :

- 100 g si d < 1 mm
- 200 g si 1 < d < 4 mm
- 700 g si d > 4 mm

Espace où saisir les données

Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu

Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier)

$$MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$$

Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	2,6	2,6	0,1%	99,9%
42	12,5	173,2	175,8	4,9%	95,1%
41	10	57,6	233,4	6,5%	93,5%
40	8		233,4	6,5%	
39	6,3	313,1	546,5	15,1%	84,9%
38	5	269,2	815,7	22,6%	77,4%
37	4	213,3	1 029,0	28,5%	71,5%
36	3,15	164,9	1 193,9	33,1%	66,9%
35	2,5	185,7	1 379,7	38,2%	61,8%
34	2	106,7	1 486,4	41,2%	58,8%
33	1,6	200,1	1 686,5	46,7%	53,3%
32	1,25	76,6	1 763,0	48,9%	51,1%
31	1	85,9	1 848,9	51,2%	48,8%
30	0,8		1 848,9	51,2%	
29	0,63	116,4	1 965,4	54,5%	45,5%
28	0,5	66,6	2 032,0	56,3%	43,7%
27	0,4	18,3	2 050,3	56,8%	43,2%
26	0,315	91,3	2 141,7	59,4%	40,6%
25	0,25	51,0	2 192,7	60,8%	39,2%
24	0,2		2 192,7	60,8%	
23	0,16	86,2	2 278,9	63,2%	36,8%
22	0,125	25,3	2 304,2	63,9%	36,1%
21	0,1		2 304,2	63,9%	
20	0,08	35,7	2 339,8	64,9%	35,1%

*Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et
vérification mécanique des blocs produits*

Projet: SONICHAR			Norme opératoire: NFP 18-560		
Opérateur: François EMAKO			Provenance: Ouagadougou		
Matériau: M30			Poids initial sec (g): 3767,1		
A noter : Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : - 100 g si d < 1 mm - 200 g si 1< d < 4 mm - 700 g si d > 4 mm Espace où saisir les données Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier) $M_d F = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$					
Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	3,9	3,9	0,1%	99,9%
42	12,5	153,7	157,5	4,2%	95,8%
41	10	57,5	215,1	5,7%	94,3%
40	8		215,1	5,7%	
39	6,3	337,0	552,0	14,7%	85,3%
38	5	363,4	915,5	24,3%	75,7%
37	4	249,6	1 165,0	30,9%	69,1%
36	3,15	193,8	1 358,8	36,1%	63,9%
35	2,5	219,2	1 578,0	41,9%	58,1%
34	2	160,1	1 738,0	46,1%	53,9%
33	1,6	214,4	1 952,4	51,8%	48,2%
32	1,25	76,1	2 028,5	53,8%	46,2%
31	1	96,7	2 125,2	56,4%	43,6%
30	0,8		2 125,2	56,4%	
29	0,63	126,8	2 252,0	59,8%	40,2%
28	0,5	71,4	2 323,3	61,7%	38,3%
27	0,4	27,5	2 350,8	62,4%	37,6%
26	0,315	96,4	2 447,2	65,0%	35,0%
25	0,25	54,1	2 501,3	66,4%	33,6%
24	0,2		2 501,3	66,4%	
23	0,16	87,4	2 588,7	68,7%	31,3%
22	0,125	25,2	2 613,9	69,4%	30,6%
21	0,1		2 613,9	69,4%	
20	0,08	35,7	2 649,5	70,3%	29,7%

*Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et
vérification mécanique des blocs produits*

Projet: SONICHAR			Norme opératoire: NFP 18-560		
Opérateur: François EMAKO			Provenance: Ouagadougou		
Matériau: M40			Poids initial sec (g): 3926,1		
A noter : Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : - 100 g si d < 1 mm - 200 g si 1< d < 4 mm - 700 g si d > 4 mm Espace où saisir les données Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier) $MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$					
Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	5,2	5,2	0,1%	99,9%
42	12,5	134,1	139,2	3,5%	96,5%
41	10	57,5	196,8	5,0%	95,0%
40	8		196,8	5,0%	
39	6,3	360,8	557,6	14,2%	85,8%
38	5	336,4	893,9	22,8%	77,2%
37	4	285,8	1 179,8	30,0%	70,0%
36	3,15	222,6	1 402,4	35,7%	64,3%
35	2,5	252,6	1 655,0	42,2%	57,8%
34	2	213,4	1 868,4	47,6%	52,4%
33	1,6	228,8	2 097,1	53,4%	46,6%
32	1,25	75,6	2 172,7	55,3%	44,7%
31	1	107,4	2 280,2	58,1%	41,9%
30	0,8		2 280,2	58,1%	
29	0,63	137,1	2 417,3	61,6%	38,4%
28	0,5	76,1	2 493,4	63,5%	36,5%
27	0,4	36,7	2 530,1	64,4%	35,6%
26	0,315	101,4	2 631,5	67,0%	33,0%
25	0,25	57,1	2 688,6	68,5%	31,5%
24	0,2		2 688,6	68,5%	
23	0,16	88,6	2 777,2	70,7%	29,3%
22	0,125	25,2	2 802,3	71,4%	28,6%
21	0,1		2 802,3	71,4%	
20	0,08	35,7	2 838,0	72,3%	27,7%

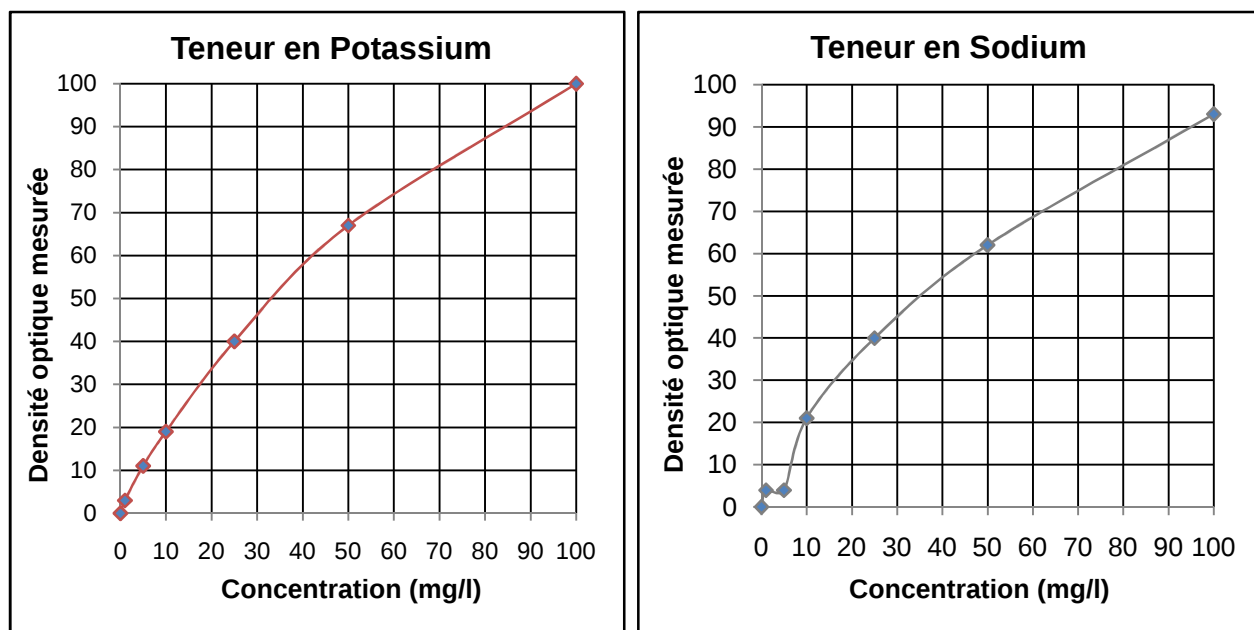
Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et vérification mécanique des blocs produits

Projet: SONICHAR			Norme opératoire: NFP 18-560		
Opérateur: François EMAKO			Provenance: Ouagadougou		
Matériau: M50			Poids initial sec (g) : 4085,2		
A noter : Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : - 100 g si d < 1 mm - 200 g si 1< d < 4 mm - 700 g si d > 4 mm Espace où saisir les données Série de tamis de base préconisée pour l'étude d'un matériau grenu Série de tamis imposée par la norme NFP 18-540 pour le calcul du module de finesse d'un granulat (béton et mortier) $MdF = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des Tamis de module déterminé}$					
Modules AFNOR	φ tamis mm	Refus partiels	Refus cumulés	% Refus cumulés	% Passants cumulés
43	16	6,5	6,5	0,2%	99,8%
42	12,5	114,5	121,0	3,0%	97,0%
41	10	57,5	178,5	4,4%	95,6%
40	8		178,5	4,4%	
39	6,3	384,7	563,1	13,8%	86,2%
38	5	370,0	933,1	22,8%	77,2%
37	4	322,1	1 255,2	30,7%	69,3%
36	3,15	251,5	1 506,6	36,9%	63,1%
35	2,5	286,0	1 792,6	43,9%	56,1%
34	2	266,8	2 059,4	50,4%	49,6%
33	1,6	243,1	2 302,5	56,4%	43,6%
32	1,25	75,2	2 377,6	58,2%	41,8%
31	1	118,2	2 495,8	61,1%	38,9%
30	0,8		2 495,8	61,1%	
29	0,63	147,5	2 643,3	64,7%	35,3%
28	0,5	80,8	2 724,1	66,7%	33,3%
27	0,4	45,9	2 770,0	67,8%	32,2%
26	0,315	106,4	2 876,4	70,4%	29,6%
25	0,25	60,2	2 936,6	71,9%	28,1%
24	0,2		2 936,6	71,9%	
23	0,16	89,8	3 026,3	74,1%	25,9%
22	0,125	25,1	3 051,4	74,7%	25,3%
21	0,1		3 051,4	74,7%	
20	0,08	35,7	3 087,1	75,6%	24,4%

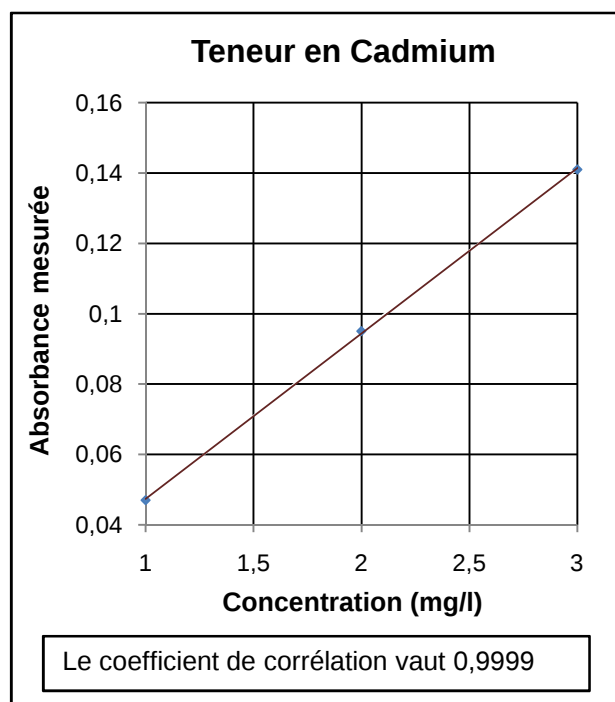
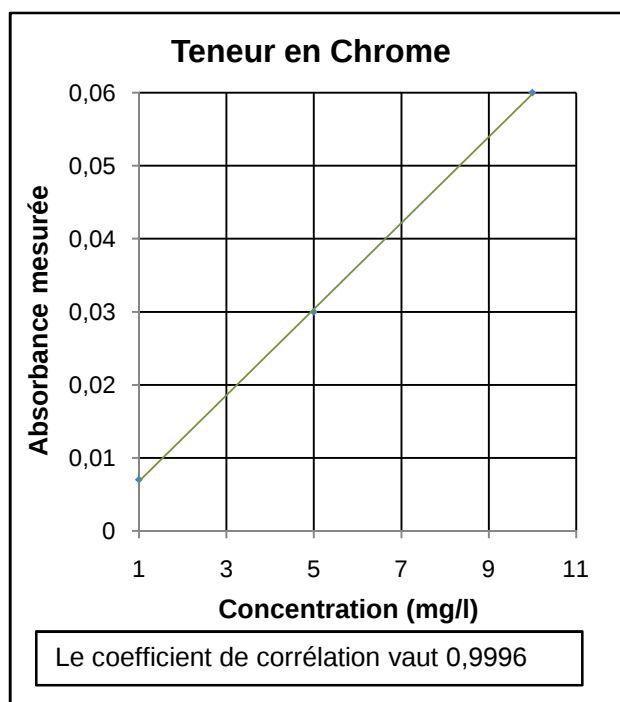
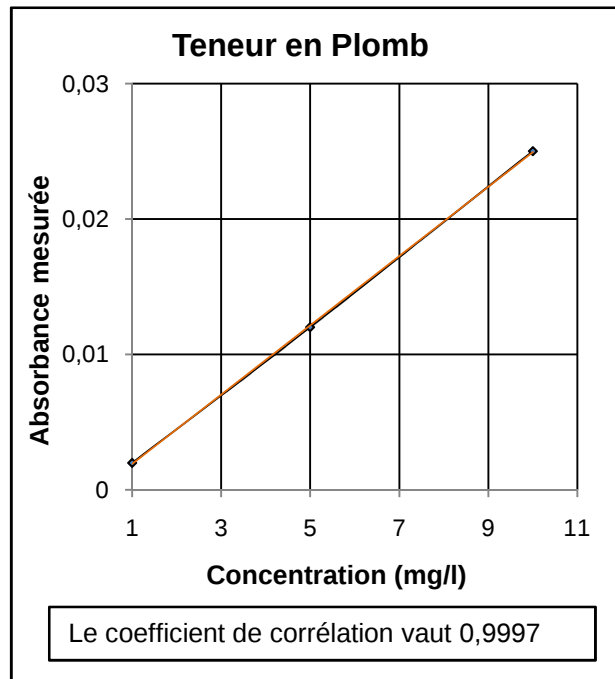
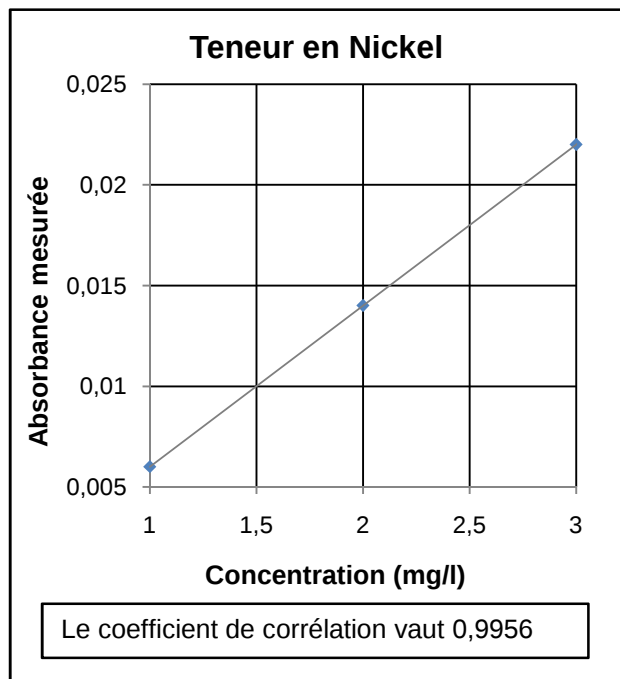
Annexe 9: Dispositif d'agitation magnétique et multimètre pour l'analyse chimique

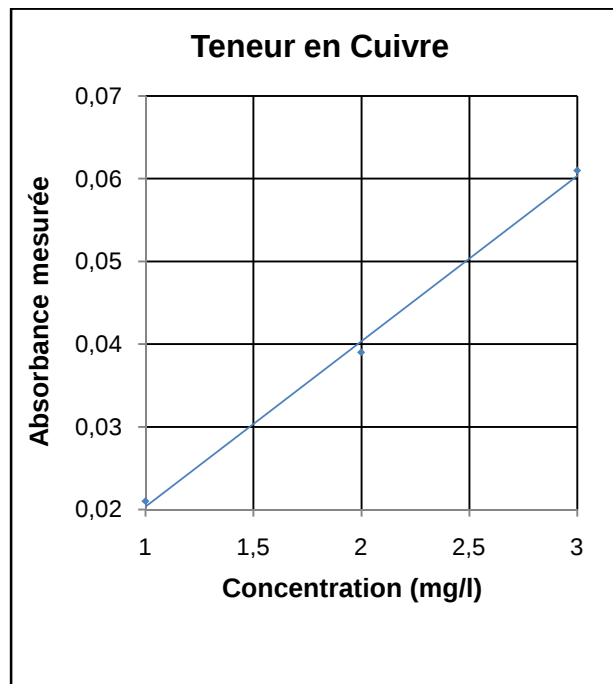


Annexe 10: Courbes d'étalonnage des éléments K et Na



Annexe 11: Courbes d'étalonnage des éléments Ni, Pb, Cr, Cd et Cu





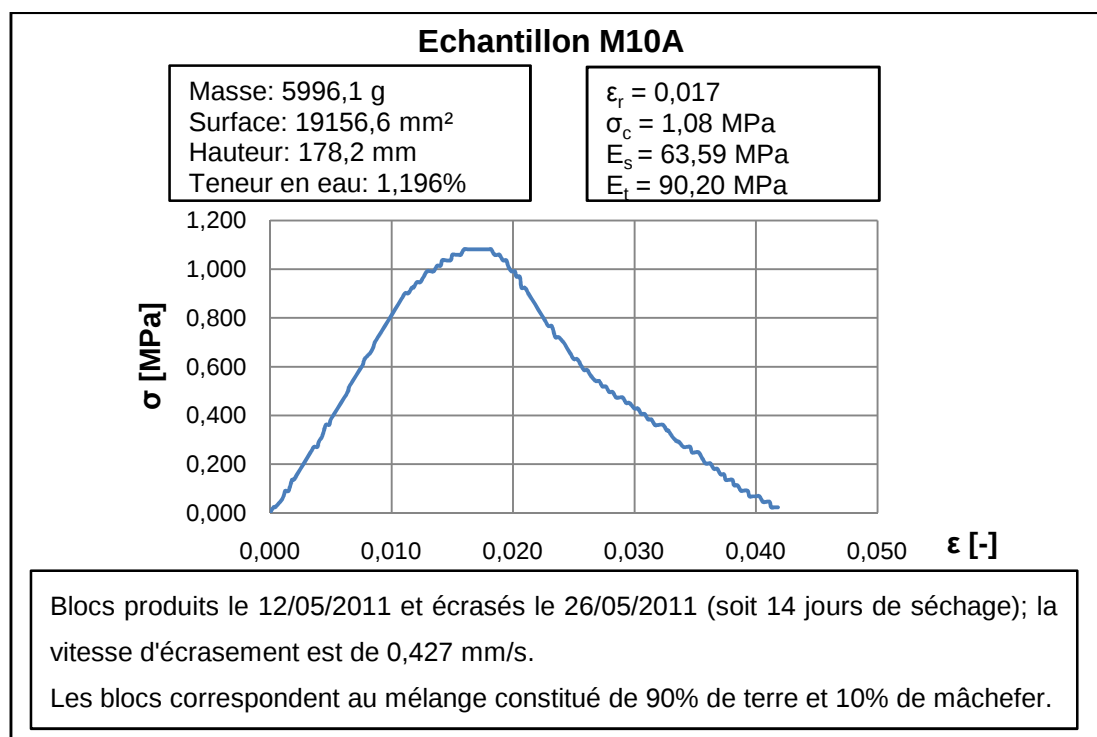
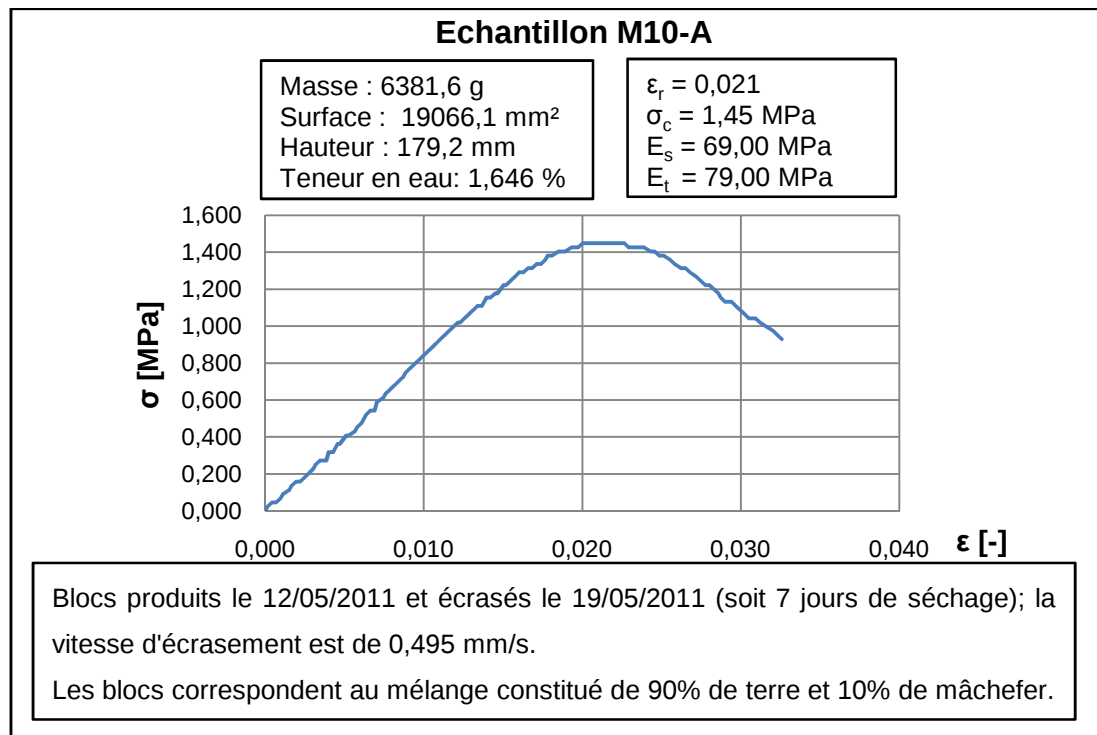
Annexe 12: Appareillage de production des briques et tamisage du mâchefer



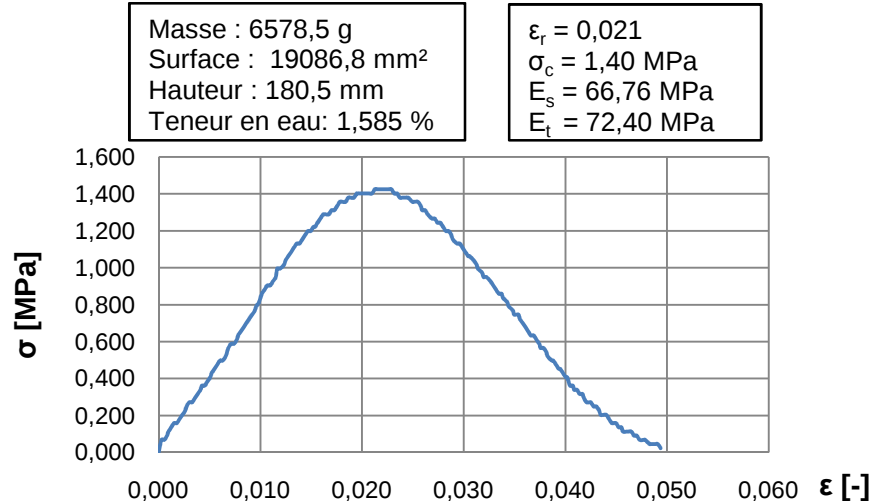
*Caractérisation physique du mâchefer de charbon en vue de la production de BTC et
vérification mécanique des blocs produits*



Annexe 13: Courbes contrainte-déformation des différents blocs produits



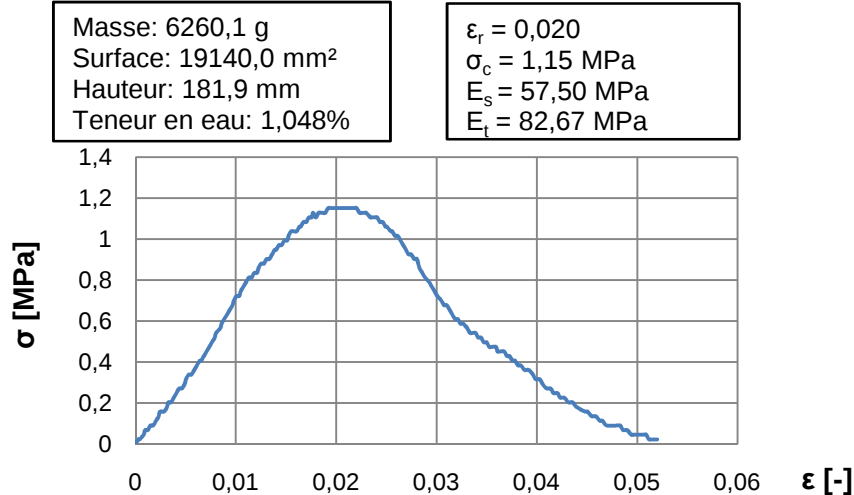
Echantillon M10-B



Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,484 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 90% de terre et 10% de mâchefer.

Echantillon M10B



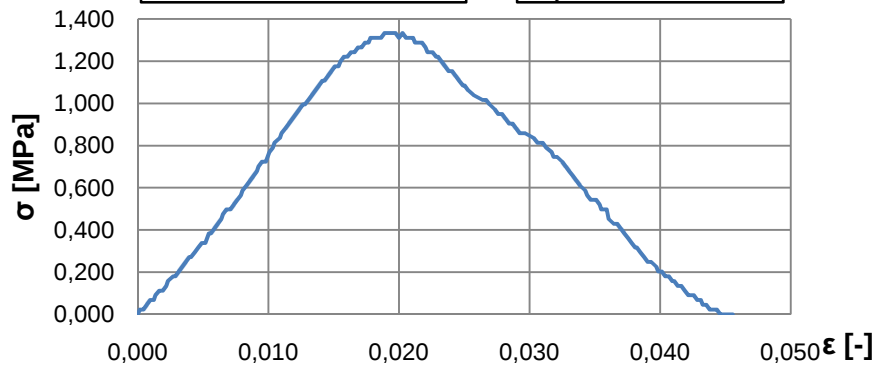
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,460 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 90% de terre et 10% de mâchefer.

Echantillon M10-C

Masse : 6530,2 g
Surface : 19105,5 mm²
Hauteur : 182 mm
Teneur en eau: 4,802 %

$\epsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,31$ MPa
 $E_s = 68,95$ MPa
 $E_t = 94,80$ MPa



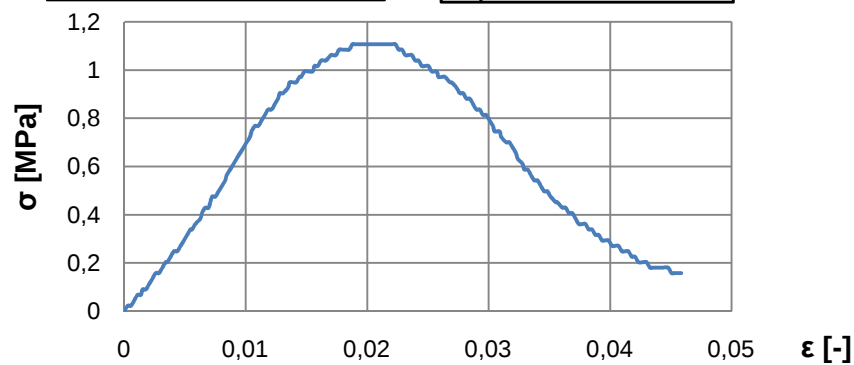
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,463 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 90% de terre et 10% de mâchefer

Echantillon M10C

Masse: 6178,8
Surface: 19097,2 mm²
Hauteur: 181,8 mm
Teneur en eau: 2,895%

$\epsilon_r = 0,020$
 $\sigma_c = 1,11$ MPa
 $E_s = 55,35$ MPa
 $E_t = 75,33$ MPa



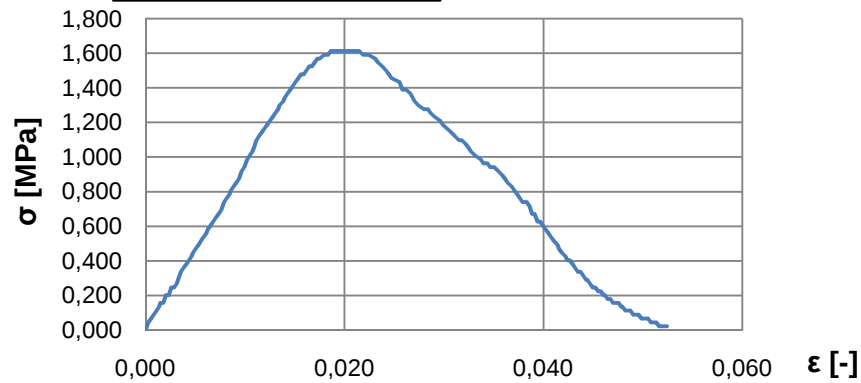
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,454 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 90% de terre et 10% de mâchefer

Echantillon M20-A

Masse : 6263,5 g
Surface : 19263,3 mm²
Hauteur : 182,3 mm
Teneur en eau: 6,000 %

$\varepsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,61$ MPa
 $E_s = 84,90$ MPa
 $E_t = 100,50$ MPa



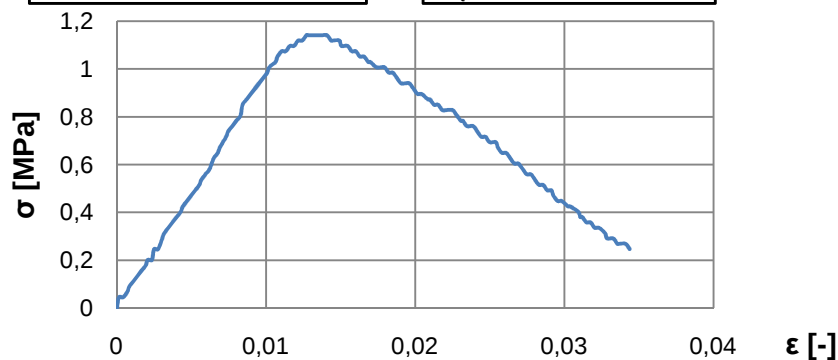
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,560 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 80% de terre et 20% de mâchefer

Echantillon M20A

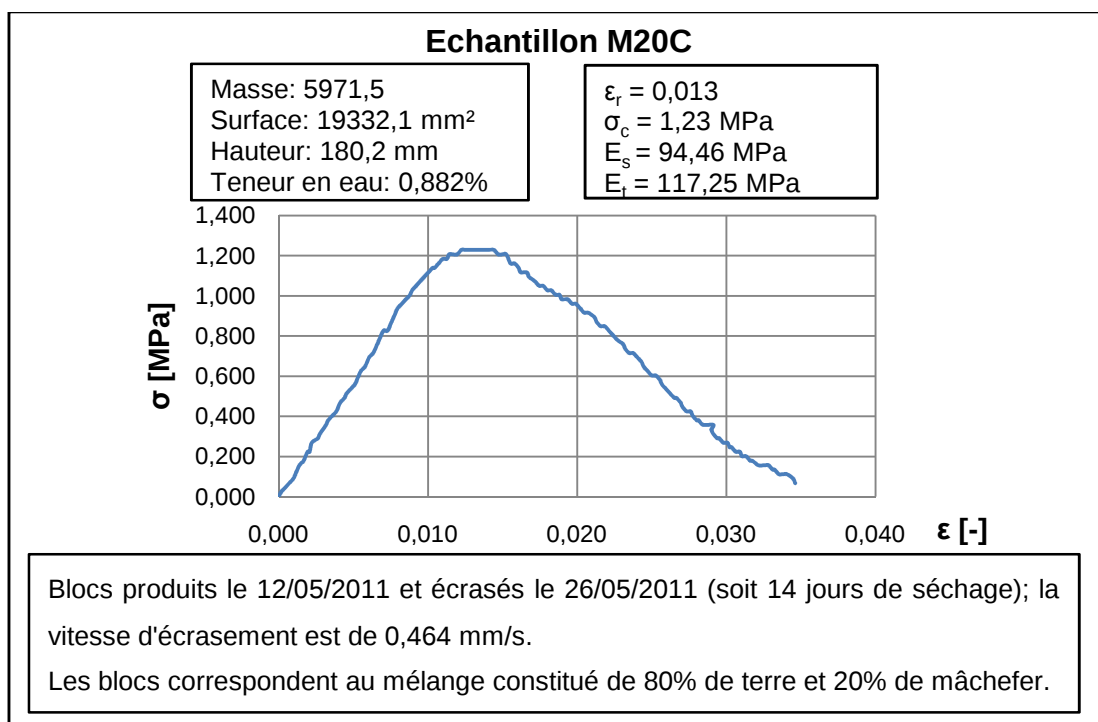
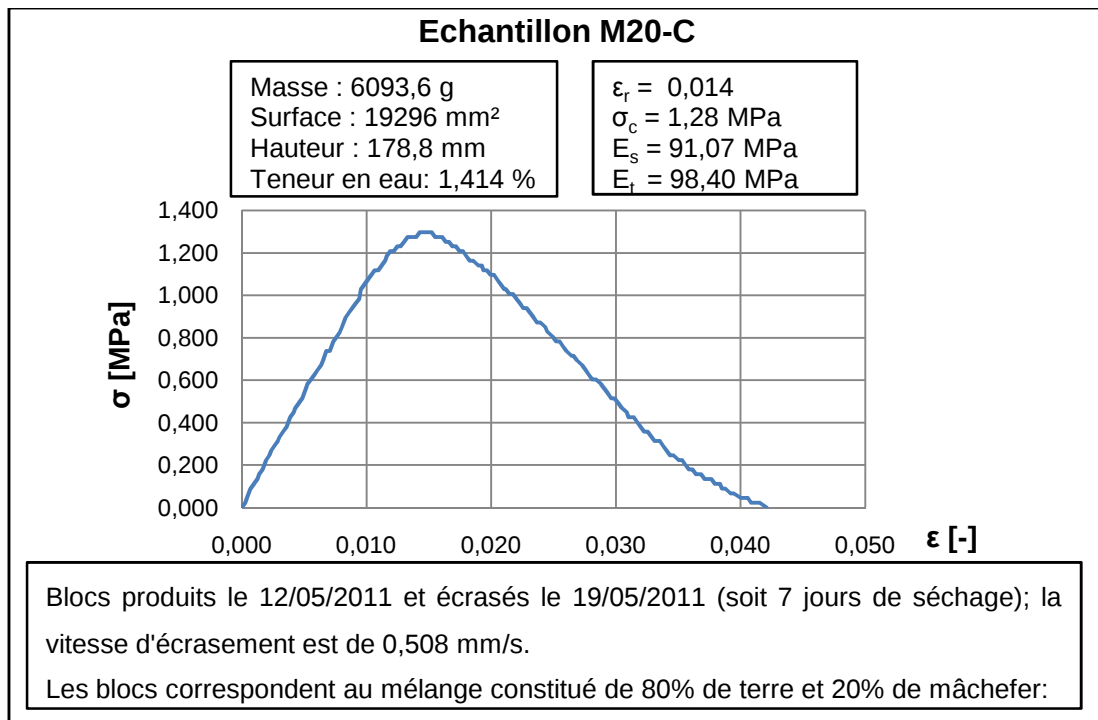
Masse: 5926,5 g
Surface: 19295,3 mm²
Hauteur: 179,2 mm
Teneur en eau: 3,105%

$\varepsilon_r = 0,013$
 $\sigma_c = 1,14$ MPa
 $E_s = 87,77$ MPa
 $E_t = 106,25$ MPa



Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,495 mm/s.

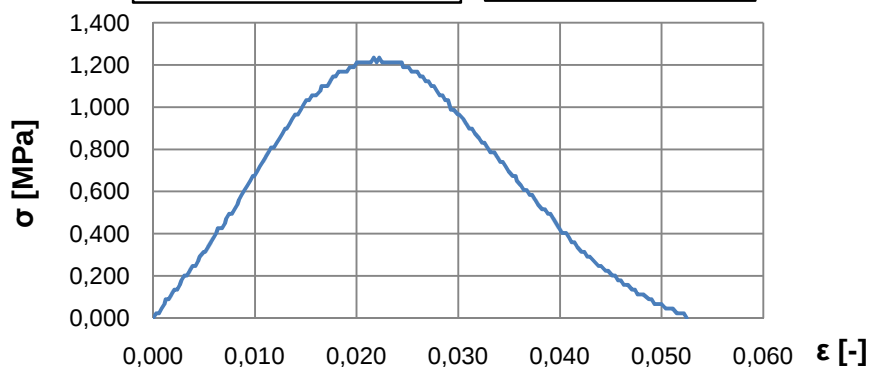
Les blocs correspondent au mélange constitué de 80% de terre et 20% de mâchefer.



Echantillon M30-A

Masse : 5791 g
Surface : 19224,5 mm²
Hauteur : 179,3 mm
Teneur en eau: 3,980 %

$\varepsilon_r = 0,021$
 $\sigma_c = 1,21$ MPa
 $E_s = 57,71$ MPa
 $E_t = 64,14$ MPa



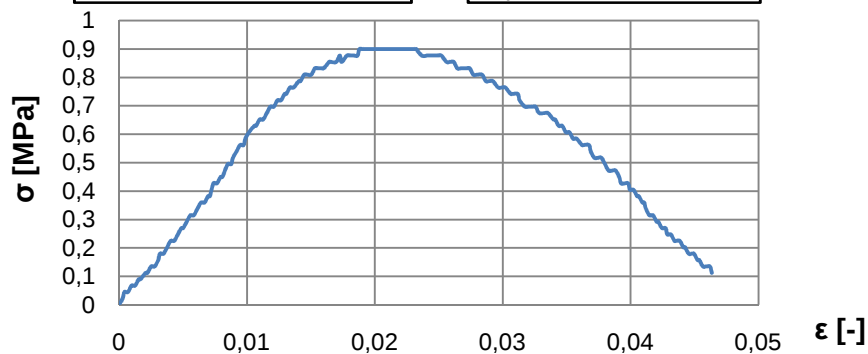
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,483 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer

Echantillon M30A

Masse: 5575,9 g
Surface: 19207,2 mm²
Hauteur: 177,8 mm
Teneur en eau: 2,635%

$\varepsilon_r = 0,021$
 $\sigma_c = 0,90$ MPa
 $E_s = 42,81$ MPa
 $E_t = 60,00$ MPa



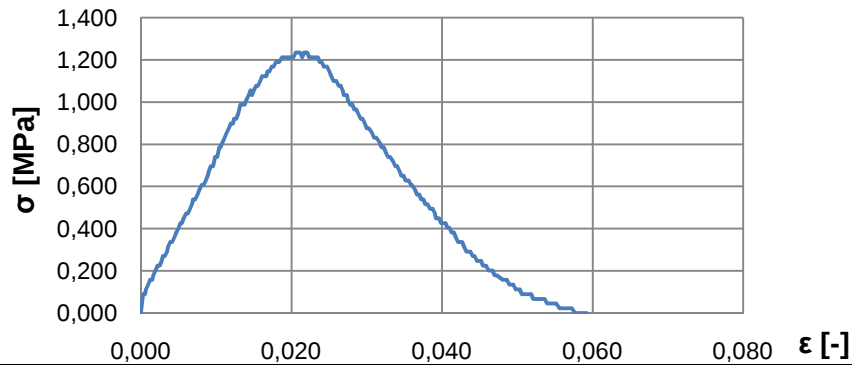
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,517 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer.

Echantillon M30-B

Masse : 5812,7 g
Surface : 19217,5 mm²
Hauteur : 178 mm
Teneur en eau: 3,531 %

$\epsilon_r = 0,020$
 $\sigma_c = 1,21$ MPa
 $E_s = 60,65$ MPa
 $E_t = 74,83$ MPa



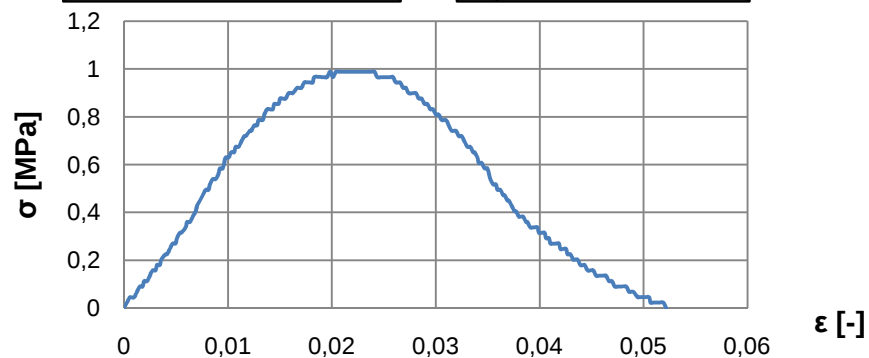
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,466 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer

Echantillon M30B

Masse: 5722,9 g
Surface: 19223,8 mm²
Hauteur: 179,8 mm
Teneur en eau: 1,522%

$\epsilon_r = 0,021$
 $\sigma_c = 0,99$ MPa
 $E_s = 47,05$ MPa
 $E_t = 60,86$ MPa



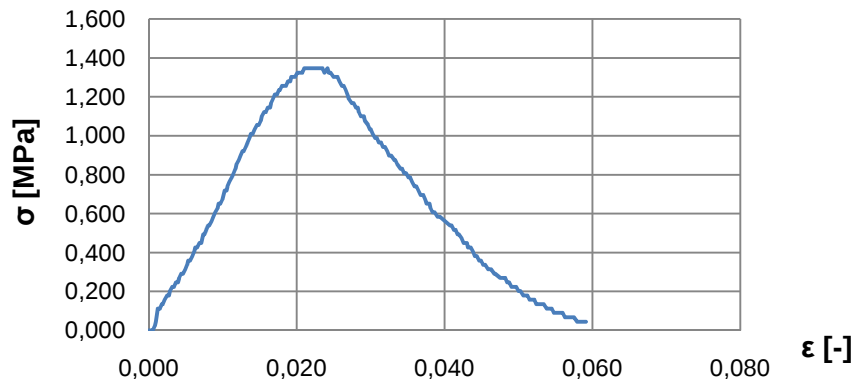
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,525 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer.

Echantillon M30-C

Masse : 5868 g
Surface : 19222,4 mm²
Hauteur : 181,3 mm
Teneur en eau: 2,067 %

$\varepsilon_r = 0,020$
 $\sigma_c = 1,33$ MPa
 $E_s = 66,25$ MPa
 $E_t = 78,50$ MPa



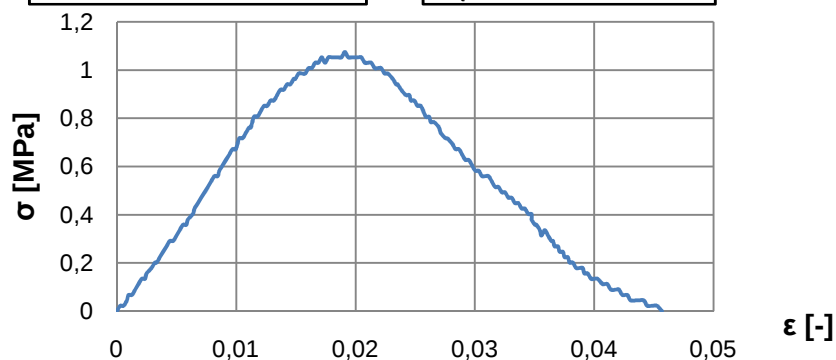
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,447 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer:

Echantillon M30C

Masse: 5549,0 g
Surface: 19267,5 mm²
Hauteur: 178,7 mm
Teneur en eau: 1,228%

$\varepsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,075$ MPa
 $E_s = 56,579$ MPa
 $E_t = 80,600$ MPa



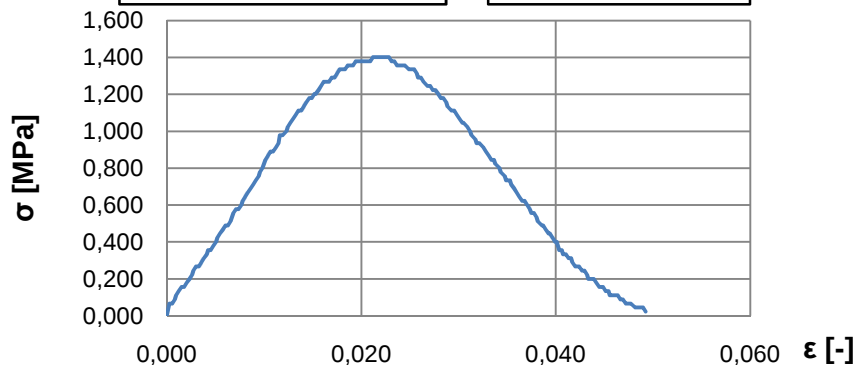
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,495 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 70% de terre et 30% de mâchefer.

Echantillon M40-A

Masse : 5741,5 g
Surface : 19398,9 mm²
Hauteur : 181,1 mm
Teneur en eau: 3,708 %

$\epsilon_r = 0,021$
 $\sigma_c = 1,38 \text{ MPa}$
 $E_s = 65,67 \text{ MPa}$
 $E_t = 81,50 \text{ MPa}$



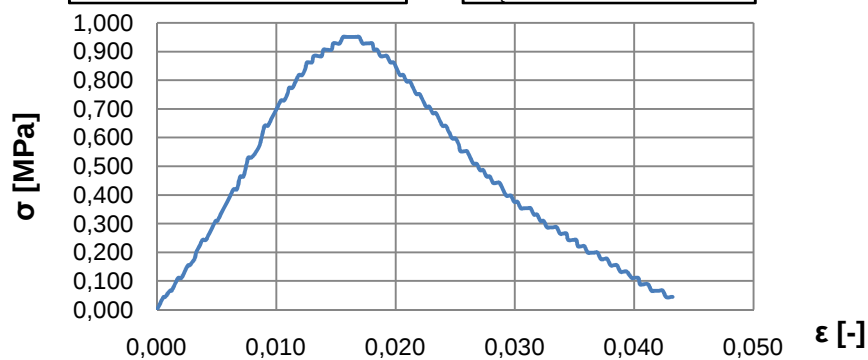
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,484 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer

Echantillon M40A

Masse: 5441,9 g
Surface: 19406,6 mm²
Hauteur: 178,3 mm
Teneur en eau: 1,844%

$\epsilon_r = 0,018$
 $\sigma_c = 1,07 \text{ MPa}$
 $E_s = 59,28 \text{ MPa}$
 $E_t = 89,00 \text{ MPa}$



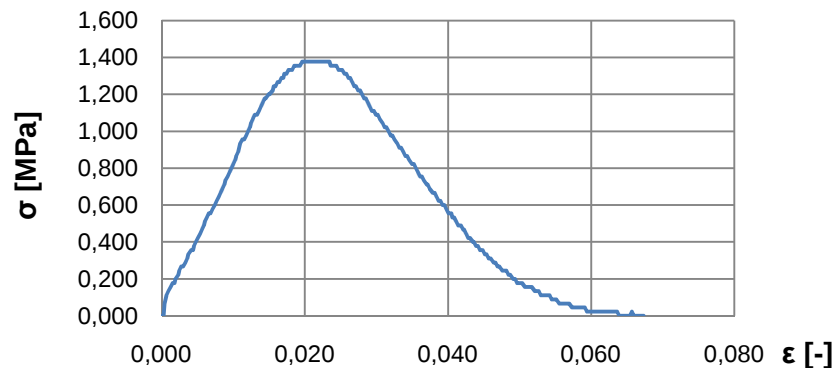
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,507 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer.

Echantillon M40-B

Masse : 5762,9 g
Surface : 19427,5 mm²
Hauteur : 180,4 mm
Teneur en eau: 4,132 %

$\epsilon_r = 0,021$
 $\sigma_c = 1,38$ MPa
 $E_s = 65,57$ MPa
 $E_t = 85,57$ MPa



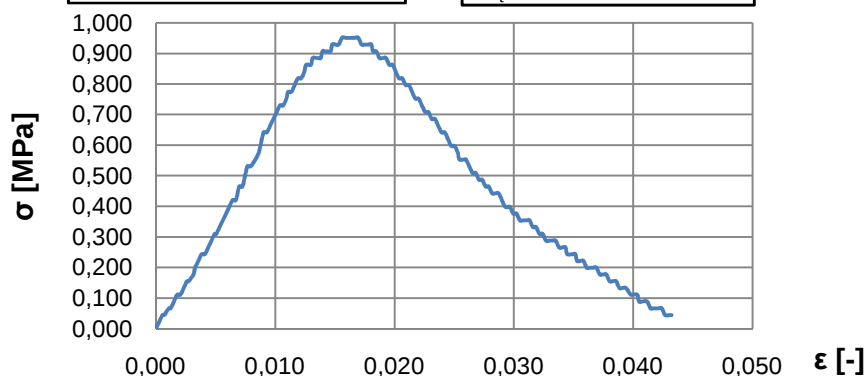
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,475 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer.

Echantillon M40B

Masse: 5579,7 g
Surface: 19445,5 mm²
Hauteur: 180,4 mm
Teneur en eau: 2,456%

$\epsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,13$ MPa
 $E_s = 59,58$ MPa
 $E_t = 77,50$ MPa



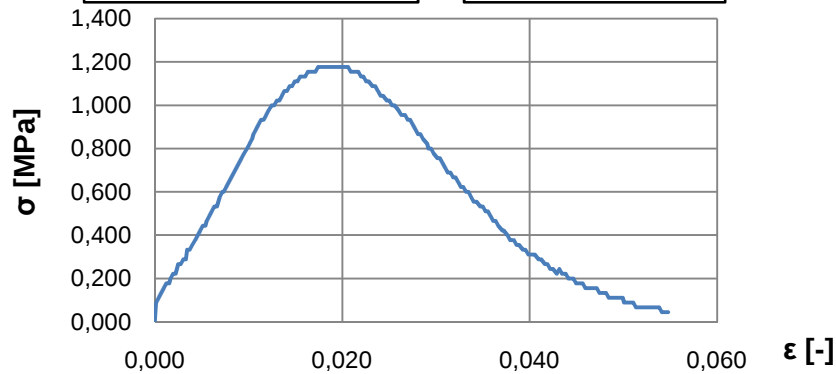
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,485 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer

Echantillon M40-C

Masse : 5658,4 g
Surface : 19435,8 mm²
Hauteur : 178,9 mm
Teneur en eau: 1,537 %

$\varepsilon_r = 0,018$
 $\sigma_c = 1,18$ MPa
 $E_s = 65,39$ MPa
 $E_t = 81,50$ MPa



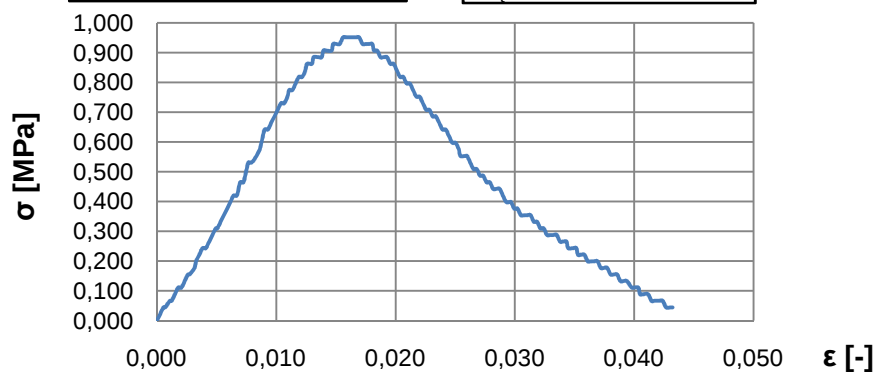
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,505 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer:

Echantillon M40C

Masse: 5460,5 g
Surface: 19426,8 mm²
Hauteur: 180,2 mm
Teneur en eau: 0,931%

$\varepsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,02$ MPa
 $E_s = 53,79$ MPa
 $E_t = 66,67$ MPa



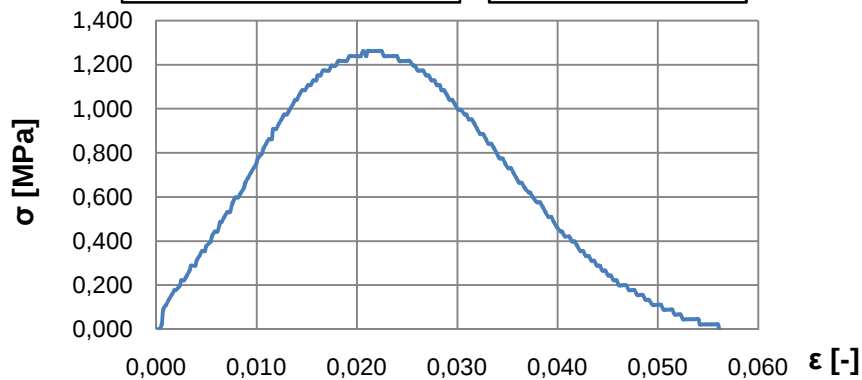
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,557 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 60% de terre et 40% de mâchefer.

Echantillon M50-A

Masse : 5350,2 g
Surface : 19503,5 mm²
Hauteur : 178,7 mm
Teneur en eau: 2,349 %

$\epsilon_r = 0,020$
 $\sigma_c = 1,24$ MPa
 $E_s = 61,95$ MPa
 $E_t = 69,57$ MPa



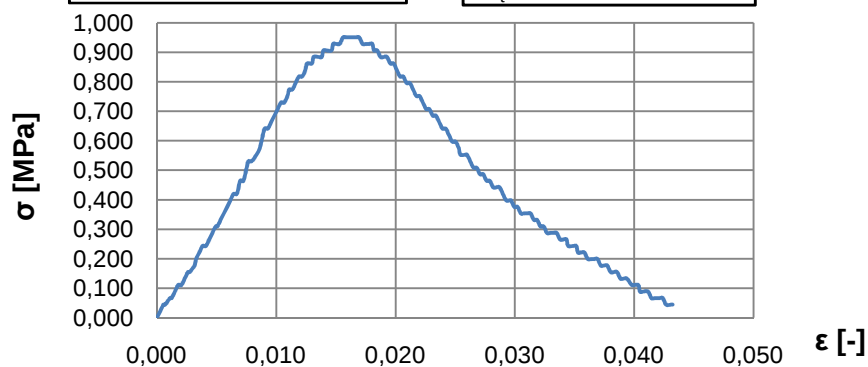
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,476 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer

Echantillon M50A

Masse: 5260,7 g
Surface: 19472,1 mm²
Hauteur: 180,4 mm
Teneur en eau: 1,187%

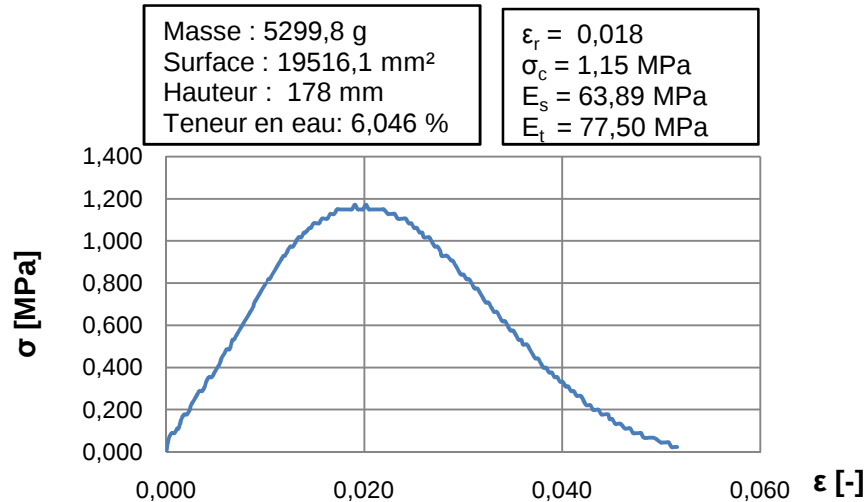
$\epsilon_r = 0,020$
 $\sigma_c = 1,15$ MPa
 $E_s = 57,60$ MPa
 $E_t = 73,83$ MPa



Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,495 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer.

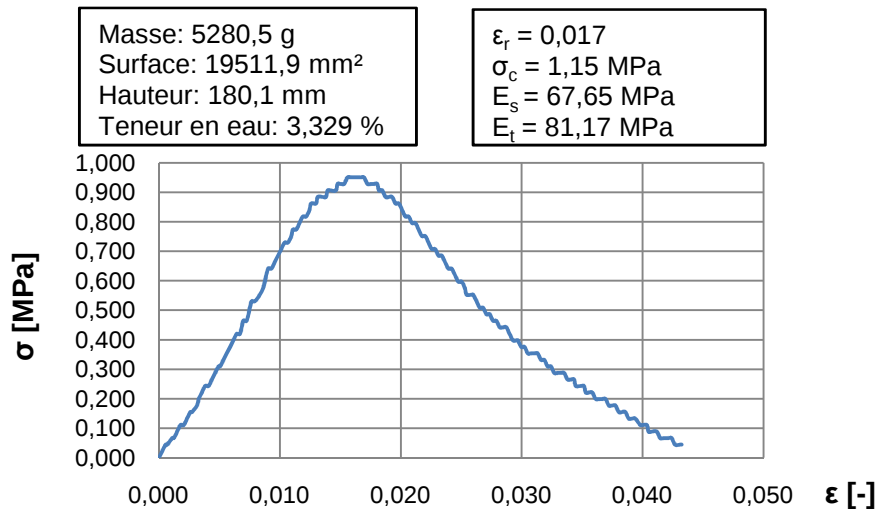
Echantillon M50-B



Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,472 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer:

Echantillon M50B



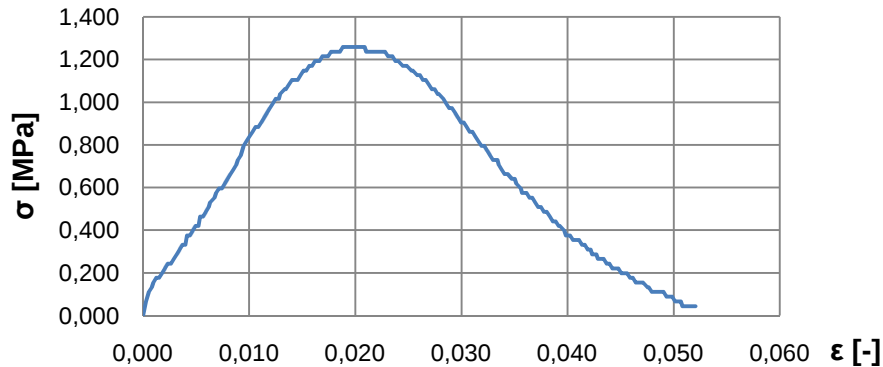
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,495 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer

Echantillon M50-C

Masse : 5295,1 g
Surface : 19532,8 mm²
Hauteur : 180,2 mm
Teneur en eau: 2,813

$\epsilon_r = 0,019$
 $\sigma_c = 1,237$ MPa
 $E_s = 65,105$ MPa
 $E_t = 84,667$ MPa



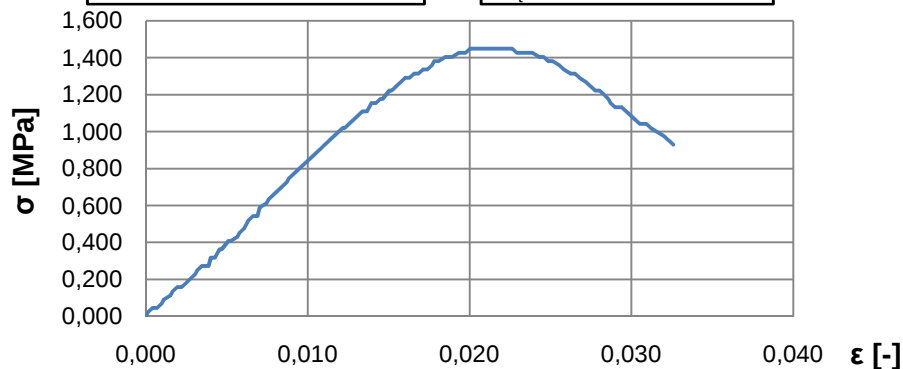
Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 19/05/2011 (soit 7 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,484 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer:

Echantillon M50C

Masse: 5246,1 g
Surface: 19526,5 mm²
Hauteur: 180,9 mm
Teneur en eau: 1,629 %

$\epsilon_r = 0,016$
 $\sigma_c = 0,95$ MPa
 $E_s = 59,38$ MPa
 $E_t = 99,50$ MPa



Blocs produits le 12/05/2011 et écrasés le 26/05/2011 (soit 14 jours de séchage); la vitesse d'écrasement est de 0,495 mm/s.

Les blocs correspondent au mélange constitué de 50% de terre et 50% de mâchefer

Annexe 14: Relation entre le module d'élasticité tangentiel et le module d'élasticité sécant

