



Université Sidi Mohammed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques
www.fst-usmba.ac.ma



Année Universitaire : 2014-2015



Licence Sciences et Techniques : Géorressources et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et
Techniques

Valorisation des marnes de la région de Fès par l'ajout de la pouzzolane

Présenté par:

LAARAJ Marouane
MESRAR Hamza

Encadré par:

Pr. RAOUF JABRANE
Dr. LAILA MESRAR

Soutenu Le 16/06/2015 devant le jury composé de:

- *Pr. Naoual RAIS*
- *Pr. Abdelkader El Garouani*
- *Pr. Raouf JABRANE*
- *Dr. Laila MESRAR*

Stage effectué à : FST FES

Logo :





Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Licence Sciences et Techniques

Prénom et NOM : Hamza MESRAR , Marouane LAARAJ

Année Universitaire : 2014/2015

Titre : Valorisation des marnes de la région de Fès par l'ajout de la pouzzolane.

Résumé

En vue de valoriser les marnes Miocène de la région de Fès, nous avons procédé à l'ajout de la pouzzolane à différents pourcentages (5%, 10%, 15% et 20%) dans nos marnes. La valorisation consiste à observer et comparer les changements qu'on subi les marnes modifiées par rapport aux marnes brutes, sur le plan géochimique et géotechniques. Les résultats géochimiques mettent en évidence l'augmentation de la teneur des oxydes de fer, d'alumine et de titane dans les marnes modifiées.

Les essais géotechniques ont montré que les marnes modifiées présentent un retrait, une perte de poids stable, une plasticité importante, une augmentation de la résistance mécanique et une diminution de l'absorption de l'énergie thermique par rapport à nos matériaux bruts.

En effet, les résultats obtenus montrent que le meilleur échantillon qui donne des bons résultats est l'échantillon III à 10% de pouzzolane cuit à une température de 1000°C.

Mots clés: Pouzzolane, Marne, géochimique, plasticité, flexion, retrait, perte en feu.

Dédicaces

A nos très chers parents pour leur amour, leur tendresse et leurs sacrifices.

A nos chers frères et sœurs pour leurs soutiens, Leurs aides et leurs encouragements.

A tous nos amis à la faculté des sciences et Techniques de Fès et nos collègues de stage.

A toute personne qui a pris le soin de feuilleter ce rapport par curiosité.

MESRAR Hamza
LAARAJ Marouane



Remerciements

Avant tout, il apparaît opportun de commencer ce rapport de projet par des remerciements, à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce stage, et même à ceux qui ont eu la gentillesse de faire de ce stage un moment très profitable.

*On tient à remercier notre encadrant le Professeur Raouf **JABRANE** Pour ces conseils précieuses et pour la confiance qui nous a donné, afin de prouver que nous pouvons réaliser ce sujet récent.*

*On tient à remercier **Mme Laila MESRAR** pour les informations et les données qu'elle nous a fournies, et aussi pour son suivi et la motivation durant toute la période de notre stage.*

Nous exprimons nos sincères remerciements au Professeur Mr chaouni responsable de

La filière GRE, pour sa disponibilité et ses divers aides. Nous remercions également

*notre Professeur **Mme Naoual RAIS** et **Mr. Abdelkader El Garouani** d'avoir accepté de juger notre travail.*

Nous tenons à remercier également tous les Professeurs du cycle LST

«Géoressource et Environnement », qui nous ont généreusement transmis des connaissances de hauts niveaux scientifiques dont on est fiers.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail

SOMMAIRE

Introduction.....	8
Chapitre I : Cadre géologique de la zone d'étude.....	9
I.1. cadre géographique	9
I.2. Cadre géologique.....	10
I.3. Description lithostratigraphique.....	12
I.4.Carrière de Ben Jallik (région de Fès)	15
Chapitre II : Méthodologie et instruments	16
II.1 .Introduction.....	16
II.2. Préparation de l'ensemble Marne/pouzzolane.....	16
II.3.Méthode d'analyse chimique quantitative par FX.....	16
II.4.diffraction des rayon x (DRX)	18
II.5. Limite de plasticité : testes d'Atterberg.....	19
II.6. Confection des briquettes.....	22
II.7. La cuisson	22
C'est une caractéristique importante, dans les domaines de l'industrie céramique et de sanitaire, elle est évaluée visuellement.	23
II.8. La résistance à la flexion	23
II.9. Calorimétrie différentielle a balayage (DSC)	24
Chapitre III : Résultats et discussions	25
III.1.INTRODUCTION	25
III.2. Compositions chimiques et identifications des marnes	25
-Par la fluorescence X	25
III.3. Limite d'Atterberg.....	26
III.4. Les effets de séchages a température ambiante.....	28
III.5. Les effets de la cuisson.....	31
III.6. La résistance à la flexion	37
III.7. Calorimétrie différentielle a balayage (DSC)	41
Conclusion	43

Listes des figures

Figure I-1 Carte géologique et structurale de la région de Fez avec localisation de nos échantillons (Z) (Mesrar .L, 2013).....	9
Figure 0-2: Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Saïss (in Mesrar. L,2013).....	13
Figure I-3 Coupe géologique Nord - Sud à Travers le Sillon Sud Rifain (in Mesrar.L,2013).	15
Figure II 1: Principe de la spectroscopie de fluorescence X.....	17
Figure II 2 :Les limites de plasticités.....	19
Figure II 3:les dimensions du rouleau de la limite de plasticité	21
Figure II 4:Schémas du principe de la calorimétrie différentielle à balayage.	24
Figure III: 1: Résultat de limite de plasticité	27
Figure III: 2: Résultat de limite de liquidité	28
Figure III: 3 Evolution du retrait des marnes brutes et amélioré par la pouzzolane en fonction du temps.....	30
Figure III: 4 Evolution de la perte de poids en fonction du temps.	31
Figure III: 5: Evolution de retrait en fonction de la cuisson.....	33
Figure III: 6: Evolution de la perte au feu en fonction de la cuisson.....	34
Figure III: 7: Résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon I	38
Figure III: 8: Résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon II.....	39
Figure III: 9résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon III	41
Figure III: 10Résultat de l'essai Calorimétrie différentielle à balayage.	42
Tableau III 1: La composition chimique des marnes exprimée en pourcentage massique %, CNRST	26

Listes des photos

Photo II 1:Pastilleuse en aluminium.....	18
Photo II 2:Photo montrant la forme de la rainure réalisée sur les marnes	20
Photo II 3 :L'appareillage utilisé pour déterminer les limites de liquidité et de plasticité.....	21
Photo II 4 : Four programmable du laboratoire Géoresources et Environnement FSTF.....	22
Photo II 5: Appareil de la flexion du laboratoire Génie Mécanique de la FSTF.	23
Photo III 1: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon I après cuisson	35
Photo III 2: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon II après cuisson.	35
Photo III 3: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon III après cuisson.	36

Introduction

Ce projet a été l'opportunité pour nous d'apprendre et de concrétiser nos connaissances théoriques et aussi d'acquérir plus de savoir dans le domaine de notre formation.

Le stage a été réalisé au laboratoire Géomatériaux et Environnement de la faculté des sciences et Techniques de Fès.

L'objectif de ce travail est d'améliorer les caractéristiques physicochimiques des marnes Miocène de la région de Fès, douar Ben Jelik par ajout de la pouzzolane à différents pourcentages 5, 10, 15 et 20%.

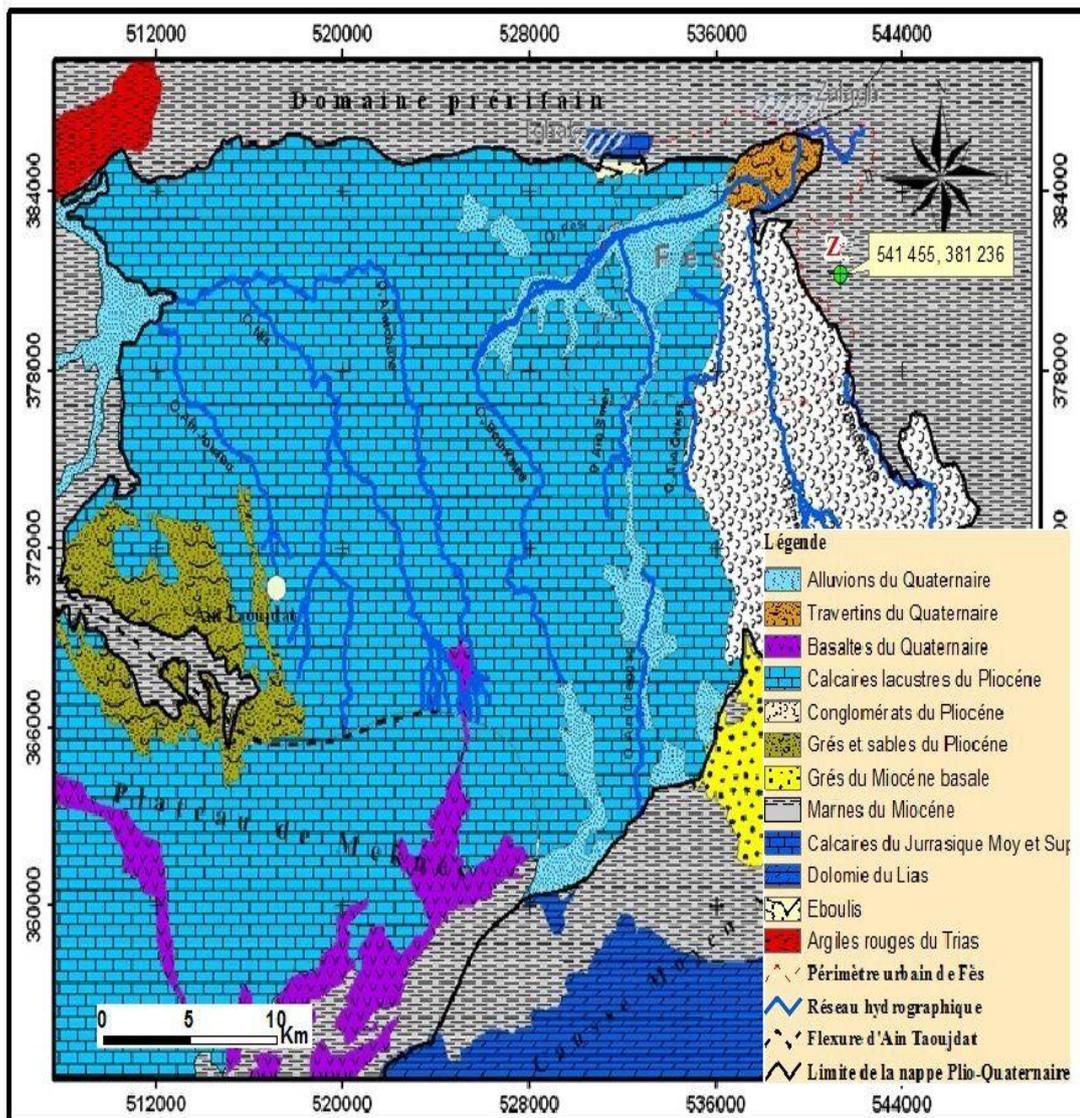
La méthode adopter pour l'élaboration de ces matériaux est la voie sèche. Ce procédé est peu coûteux et sans préparation préliminaire des produits.

La mise en œuvre de marnes/pouzzolane, consiste au broyage dans un broyeur agate pendant 5 minutes de notre matériau brut. Ensuite, on fait un mélange direct à l'état solide des marnes avec la pouzzolane, à différents pourcentages 5, 10, 15 et 20%. Le mélange est de nouveau broyé pendant également 5 minutes. Elle permet l'obtention des poudres homogènes à grains relativement fins et à distribution granulométrique étroite et cela à température ambiante.

Chapitre I : Cadre géologique de la zone d'étude

I.1. cadre géographique

La zone d'étude est situer entre Fès-Taza à l'Est de Sidi Hrazem, plus précisément dans une région qui s'appelle koudiat ben jalik près de Oud Boufekran. A cette zone on a prélevé 3 échantillons des marnes du miocène supérieur, moyen et inférieur (Figure I.1).



1.2. Cadre géologique

1.2.1. Couloir Taza-Fès

Faisant partie du sillon sud rifain, le couloir de Fès-Taza constitue la terminaison orientale du Saiss de Fès. C'est une dépression étroite allongée E-W encadrée au sud par le causse moyen atlasique et la terminaison septentrional du massif paléozoïque de Tazekka, alors qu'au Nord elle est limitée par le front des nappes de charriage du complexe pré-rifain.

Ce couloir subit un étranglement au niveau du col de Touahar mettant en contact direct les nappes tertiaires pré-rifaines avec le massif paléozoïque de Tazekka.

D'après Leblanc (1979), les couches de base du miocène existent dans deux secteurs : au sud (zone du col de Touahar) et à l'Est de Taza (Jbel Isly) sur la route de Msoun à Mezguitem, Au col de Touahar le miocène fait totalement défaut et les marnes blanches à silex de la nappe pré-rifaine reposent directement sur le socle paléozoïque du Massif de Tazekka. De part et d'autre de ce col, les assises transgressives miocènes reposent directement sur les schistes paléozoïque de Tazekka. Les premiers niveaux sont une « molasse de base » surmontée par des grés calcareux jaunes dont la base est fortement détritique à grands Clypeâstres, pectens et Huitres témoins de dépôt tout à fait littoraux. Ces grés passent latéralement aux marnes bleues. Les datations par microfaune ont donné un âge Tortonien inférieur Basal aux grés jaunes (Leblanc, 1979), alors que les marnes bleues ont livré une microfaune Tortono-Messénienne (Rebillard, 1978), dans le détail, la coupe du col de Touaher montre, de la base au sommet, la succession suivant (Rachid, 1997), des conglomérats très bréchiques à élément anguleux arrachés au substratum :

-grés grossier à grains bien émoussés de schistes, grés, calcaires, de quartz laiteux et de dolérites

-biocalcarénites avec des coquilles de clypeastres et de lamellibranches.

- sables fins argileux jaunes. Ces sables passent latéralement aux marnes grises du sillon sud rifain

1.2.2. Climat :

La région de Fès-Taza est située entre le Maroc d'Atlantique et le Maroc Est se caractérise par un climat de type continental relativement tempéré avec une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 500 à 700 mm. Les hivers sont très froids (moins de 4 °C) et les étés très chauds (plus de 43°C).

1.2.3. Hydrologie de la Zone

Les réservoirs carbonates jurassiques des Atlas marocains sont réputés pour leur fort potentiel en eau souterraine et pour des productivités unitaires élevées. Cependant, ces réservoirs sont caractérisés par une hétérogénéité manifeste, liée à des variations lithologiques, structurales et hydrodynamiques, en relation avec leur évolution diagenétique, leur déformation fragile engendrant la fracturation, et leur dissolution engendrant la karstification.

Lorsqu'ils constituent des nappes libres, les guides de prospection des ressources en eau de ces aquifères peuvent être directement établis à partir des données de surface (Fassi-Fihri, 1996). Cependant, lorsque ces déformations sont couvertes par les remplissages des bassins sédimentaires bordant les chaînes atlasiques, la prospection de leur ressource en eau est plus complexe.

L'aquifère liasique du couloir Fes-Taza s'étend sur une surface totale de 1500 km². Il représente le prolongement vers l'est de la nappe profonde du bassin Fés-Meknes (Combe, 1975). Au nord, il s'étend sur une plaine de Sebou à l'est de Sidi Hrazem et sur la rive gauche de l'Oued Inaouène jusqu'au col de Sebou en aval d'Ain Sebou, et la partie septentrionale du causse moyen-atlasique (Bentayeb & Leclerc, 1975). Ses limites sont constituées par l'accident sud-rifain au nord, les limites des affleurements du socle schisteux au sud et à l'est, et le système de failles de Sidi Hrazem à l'ouest (McDonald & Partners, 1990).

1.2.4. Ressource en eau

- Superficielle

La région regorge des ressources importantes en eau superficielle, des rivières et des barrages : principalement les grands bassins hydrauliques du Sebou au niveau du

couloir Fès-Taza est celui de moulouya, l'oued Inaouène, l'oued Melloulou, l'oued Za, ...

- Le barrage Allal El Fassi (335 Mm³, mis en service en 1991) destiné à la production d'énergie, à l'irrigation et à la production d'eau potable et industrielle

- Souterraine

A l'exception d'une partie de la nappe de Fès/Meknès utilisée pour l'irrigation, le couloir de Fès-Taza est pauvre en eau souterraine (bassin d'alimentation des calcaires peu étendu dans le Causse et pas de nappe phréatique généralisée) .

-Topographie et sols

Le couloir est un fossé situé entre la chaîne du Rif au nord, et celle du Moyen Atlas avec une grande diversité en termes de reliefs. Les sols, sont dans cette zone peu évolués et l'érosion constitue la problématique centrale de la dégradation de ces sols.

1.3. Description lithostratigraphique

Les études effectuées par de nombreux auteurs dans cette zone, ont permis d'établir la stratigraphie détaillée des différentes formations (Figure I.2).

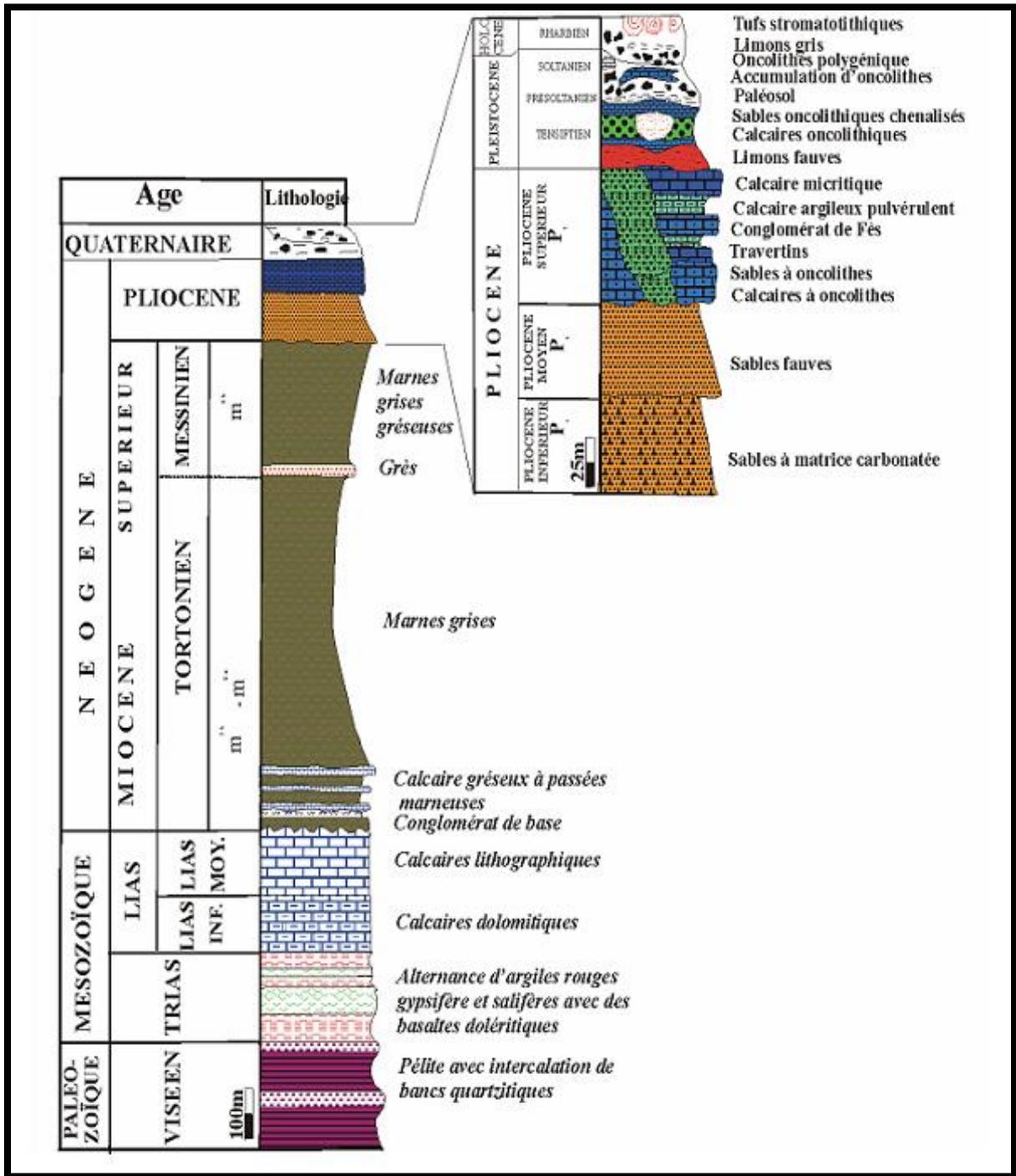


Figure 0-2: Colonne lithostratigraphique synthétique du bassin de Saïss (in Mesrar. L,2013).

Miocène-Pliocène :

Les marnes du couloir Fès-Taza, attribuées au faciès miocène, forment une puissante série monotone et d'une grande homogénéité lithologique atteignant à Fès près de 1 000 m. La

base de la série est constituée par des faciès transgressifs (sables plus ou moins consolidés passant à des grès compacts, calcaires sableux localement cristallins, conglomérats) pouvant passer latéralement ou verticalement aux marnes bleues du Toronien, situées normalement au-dessus.

Le Miocène transgressif est venu se déposer sur un Causse émergé depuis le Jurassique (Domérien), érodé, plissé par des mouvements tardifs de faible importance.

-Dolomies et brèches dolomitiques :

En discordance sur les calcaires jurassiques et même probablement sur le Trias, apparaissent des faciès dolomitiques du Tortonien. A l'est, ce sont des dolomies massives et beiges, parfois un peu sableuses et de faible épaisseur. A l'ouest, ce sont des brèches dolomitiques à patine noire, très épaisses (environ 100m) qu'il est difficile de distinguer du Lias.

-Faciès Détritiques :

Au dessus des dolomies, on a souvent un niveau conglomératique peu épais (zéro à quelques mètres) à galets roulés, principalement de calcaires liasiques.

Des marnes gréseuses surmontent la série conglomératique et gréseuse de base vers le N et le NE (Oued Inaouène). Des bancs de grès peu épais (1 à 3m) s'intercalent dans cette série qui peut s'épaissir jusqu'à 150 ou 200 mètres.

-Marnes Bleues :

Ce sont des marnes compactes contenant quelques rares niveaux gréseux. Le plus souvent, elles passent latéralement aux formations détritiques que nous venons de décrire par l'intermédiaire de marnes sableuse blanches. Vers l'est, les marnes bleues reposent sur les conglomérats et même très souvent, directement sur les dolomies. Elles renferment une microfaune abondante qui a permis de les dater du Tortonien ou du Messinien. Ces marnes peuvent être très épaisses (425 m à Matmata, mais plus de 1000 m au N de Fès), (Figure I.3).

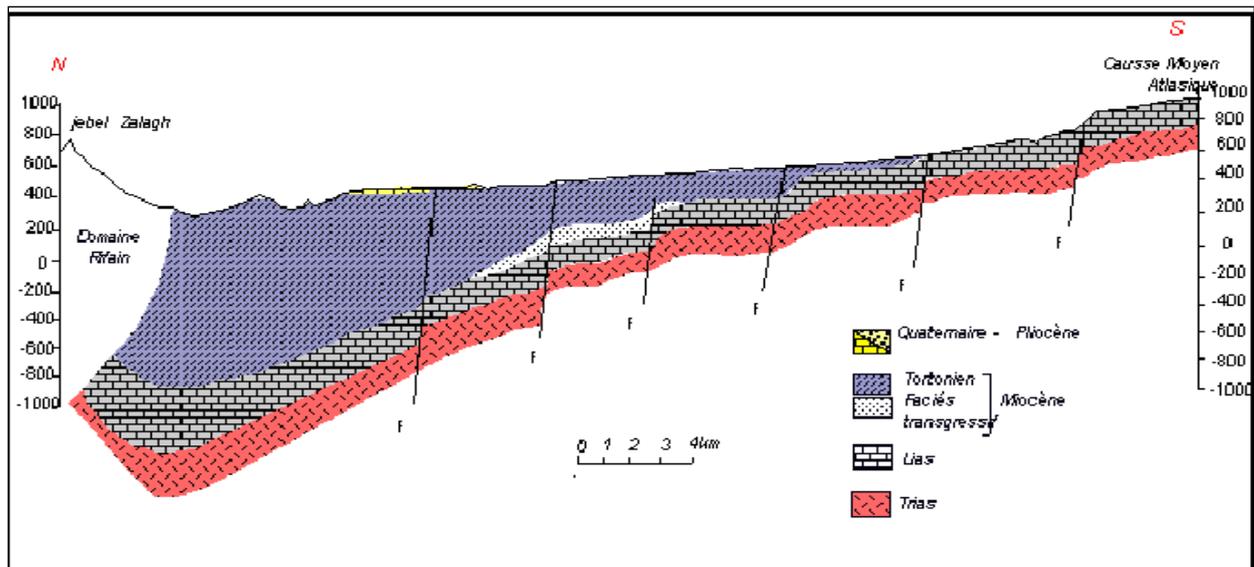


Figure I-3 Coupe géologique Nord - Sud à Travers le Sillon Sud Rifain (in Mesrar.L,2013).

1.4. Carrière de Ben Jallik (région de Fès)

Les marnes constituent avec les argiles la majorité des substrats qui affleurent dans le sillon sud rifain. Ce sont des roches sédimentaires relativement tendres, formées par un mélange de carbonate et de minéraux argileux.

Situé dans la partie Est de la ville de Fès, en allant vers Taza, l'affleurement se localise au niveau des carrières des marnes miocènes.

Ces marnes constituent le substratum régional de toute la région et apparaissent localement au nord de la ville. Cette marne se distingue par sa couleur grise ou bleue.

Chapitre II : Méthodologie et instruments

II.1 .Introduction

Dans ce chapitre nous avons décrit les analyses d'identifications géochimiques et géotechniques effectuées sur les trois types de marnes brutes et mélangées à différentes pourcentages de pouzzolane.

Ce chapitre est consacré aux généralités, sur la méthode adoptée pour élaborer les composites marnes/pouzzolane, suivie par une brève définition des différentes méthodes analytiques employées pour la caractérisation de nos matériaux à savoir :

- L'analyse chimique par fluorescence X qui permet de déterminer avec précision la composition chimique globale de nos échantillons en éléments majeurs (%) ;
- L'analyse au rayon X ;
- Les analyses géotechniques (les limites d'Atterberg, les retraits et la résistance mécanique) .

II.2. Préparation de l'ensemble Marne/pouzzolane

Dans cette étude, nous avons procédé au dopage de la marne avec la pouzzolane et ceci à différentes pourcentage (à savoir 5%, 10%, 15% et 20%).

Pour la préparation des échantillons on a procédé à deux types de broyage, la pouzzolane qui provient de la région volcanique du Moyen Atlas plus exactement de la région d'Ifrane. C'est un produit d'origine volcanique.

Bien que la pouzzolane est un matériau terreux, elle est très dure, dès lors on a procédé préalablement à son broyage manuel avec le marteau pour rétrécir le diamètre des grains, puis le matériau est mis au broyeur pendant 5 min à l'échelle 3, ensuite on a pris 1000g de marne, en lui ajoutant la poudre de pouzzolane de même taille granulométrique à cinq différents pourcentages (5% ,10%,15%, 20%) . Ensuite, chaque mélange a été broyé à l'échelle7, également pendant cinq minutes.

II.3.Méthode d'analyse chimique quantitative par FX

II.3.1. Principe

L'analyse chimique quantitative des argiles a été réalisée par spectrométrie à fluorescence X (WD-XRF) de type spectromètre séquentiel Axios de marque Panalytical avec un canal de mesure basé sur un seul goniomètre couvrant la gamme complète de mesure du Bore (N=5) à l'Uranium (N=92).

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse multi-élémentaire non destructive, elle a pour avantage une préparation simple des échantillons et une bonne reproductibilité. Cette

méthode permet de déterminer avec précision la composition chimique globale de nos échantillons en éléments majeurs (%) et en éléments traces jusqu'à 0.01 ppm.

Elle est basée sur une excitation (Figure II. 1) à l'aide d'un tube à rayons X, est une technique d'analyse élémentaire globale d'un échantillon.

L'analyse des rayonnements secondaires émis par l'échantillon permet l'identification des éléments chimiques présents dans ce dernier échantillon et leur concentration massique.

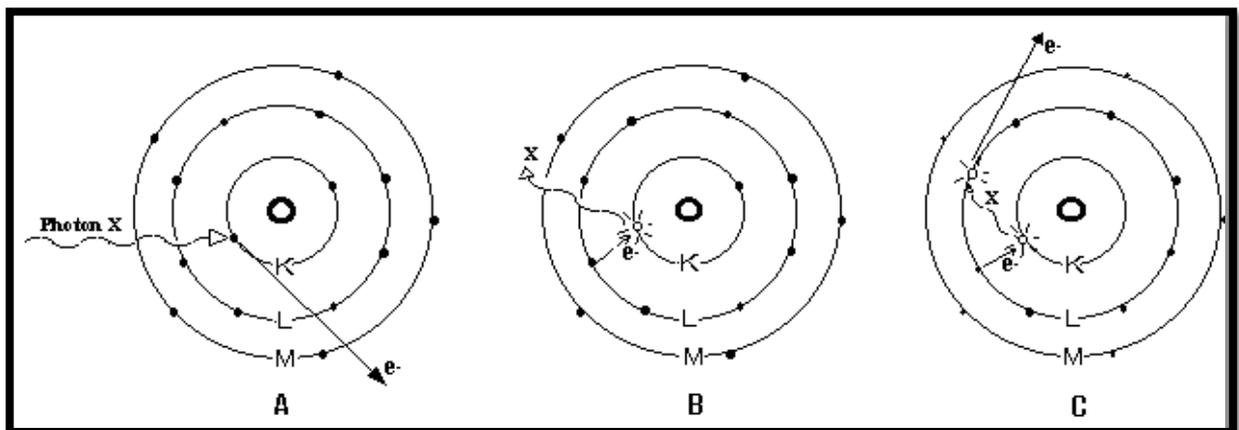


Figure II 1: Principe de la spectroscopie de fluorescence X.

II.3.2. Préparation des échantillons (NF 15-406)

Nous avons nous même fabriqué nos pastille pour analyse .il a été effectuer après d'abord broyage du matériau et une prise de 10 g de chaque échantillons, ensuite la poudre est pressée dans une presse hydraulique (Photo.II.1), les pastilles (poudre pressée) prête pour analyse.



Photo II 1:Pastilleuse en aluminium

L'analyse chimique des matériaux étudiés a été réalisée au centre national de recherche scientifique et technologique de Rabat,

II.4. diffraction des rayons x (DRX)

II.4.1. Principe

La diffraction des rayons X consiste à appliquer un rayonnement de la longueur d'onde ($0.1 < \lambda < 10\text{nm}$) sur un échantillon argileux orienté ou non. On utilise un rayonnement électromagnétique en cuivre dont la longueur d'onde est $\text{Cu}_{K\alpha} = 1,542 \text{ \AA}$. Ce rayonnement pénètre le cristal, il y a absorption d'une partie de l'énergie et excitation des atomes avec émissions de radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau cohérent qui pourra être détecté.

La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par **la loi de Bragg** :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta$$

Où

n : Nombre entier correspondant à l'ordre de la diffraction,

λ : Longueur d'onde du rayonnement utilisé (nm)

d : distance entre les plans réticulaires d'une même famille désignée conventionnellement par les indices de Miller h,k,l (\AA)

θ : Angle de diffraction ($^{\circ}$) .

La valeur de d_{hkl} dépend du paramètre de la maille et de mode de réseau

II.4.2. Préparation des échantillons et condition opératoire

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre XPERT-PRO, opérant sur une radiation de $K\alpha$ de cuivre (de longueur d'onde = 1,540598 Å) a été produite sous une tension 45 KV et une intensité de 40 mA.

II.5. Limite de plasticité : testes d'Atterberg

II.5.1. Introduction

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir des indicateurs qualifiant la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action des variations de teneur en eau. Notons que cet essai se fait uniquement sur les éléments fins du sol et il consiste à faire varier la teneur en eau de l'élément en observant sa consistance, ce qui permet de faire une classification du sol (**Figure II.2**).

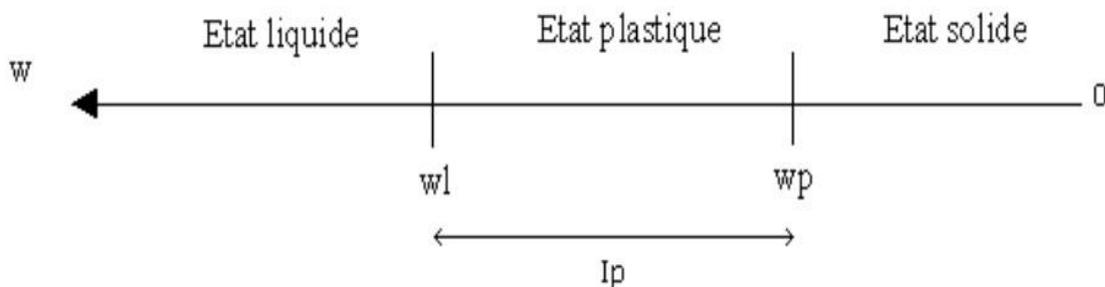


Figure II 2 :Les limites de plasticités

II.5.2. Expériences

Le but de ces tests est de déterminer les limites de consistance (Photo II.2) qui sont exprimées en termes de teneur en eau marquant les limites entre état solide, plastique, et liquide. Il est important de noter que ces tests ne s'appliquent que pour les sols fins, définis comme ayant des grains de diamètres inférieurs à 0.06 [mm].

- Détermination de la limite de liquidité :

1. Prendre environ 300 grammes de sol préalablement tamisé au tamis 0,4 mm par voie humide et séché ;
2. Malaxer la totalité de la prise de telle sorte à obtenir une pâte homogène et presque fluide ;
3. Prendre une partie de la pâte et l'étaler dans la coupelle de l'appareil de Casagrande à l'aide de la spatule ;
4. Pratiquer une rainure dans cette pâte de telle sorte à la diviser en deux. L'outil à rainurer devra être tenu perpendiculairement à la coupelle en présentant sa partie biseautée face à la direction du mouvement.
5. Soumettre la coupelle et le matériau qu'elle contient à des chocs répétés avec une cadence de 2 coups par seconde.
6. Arrêter les chocs quand les deux lèvres se rejoignent sur environ 2 cm, noter le nombre de coups N correspondant ;



Photo II 2:Photo montrant la forme de la rainure réalisée sur les marnes

7. Prélever des deux côtés des lèvres à l'endroit où elles se sont refermées environ 5 grammes de sol afin d'en déterminer la teneur en eau (Photo II.3) ;
8. Réhomogénéiser le sol et le sécher un peu puis reprendre les opérations de 3 à 7. Il faut au moins trois essais avec un nombre de coups croissant et de préférence bien étalé entre 15 et 35coups.



Photo II 3 :L'appareillage utilisé pour déterminer les limites de liquidité et de plasticité.

-Détermination de la limite de plasticité :

La procédure envisagée pour la détermination de la limite de plasticité est la suivante :

1-Prendre un peu de matériau et former une petite boule.

2-Rouler à la main sur la plaque de marbre cette boule de telle sorte à obtenir un bâtonnet qui atteint une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm et commence à se fissurer, la limite de plasticité et considérer comme sa teneur en eau ;

- Si le sol est encore fluide, il sera difficile de confectionner le bâtonnet. Il faut sécher un peu le matériau ;

- Par contre, si le bâtonnet commence à se fissurer trop tôt, le matériau est donc sec. Il faut l'humidifier un peu

Il faut réaliser au moins deux essais pour la limite de plasticité.

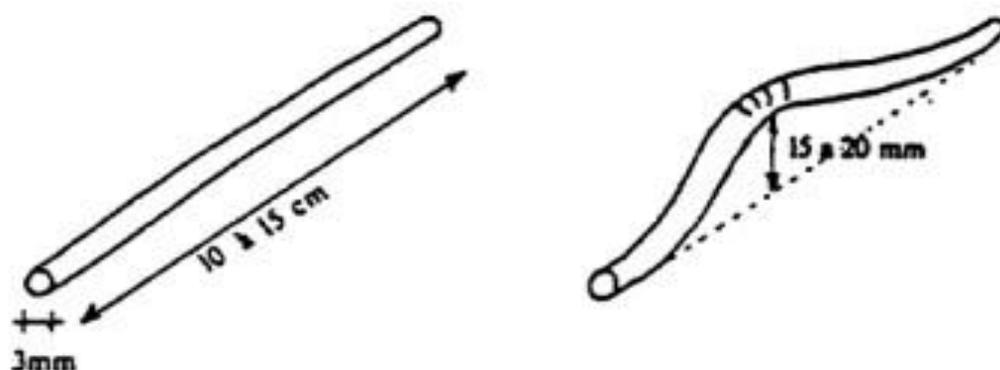


Figure II 3:les dimensions du rouleau de la limite de plasticité

II.6. Confection des briquettes

On procède à la confection des briquettes en mélangeant 1000g de matériau broyé avec une quantité d'eau de chaque type de marne. On laisse séjourner cette pâte pendant 24h dans un dessiccateur, puis on fabrique avec cette pâte 20 briquettes et ceci pour chaque pourcentage à l'aide d'un moule métallique prévu à cet effet.

II.6.1. Mesure de retrait et perte de poids

Après le démoulage, on pèse les briquettes puis on les laisse sécher à l'air libre en les pesant périodiquement et en mesurant (toutes les 24h) les diagonales des briquettes à l'aide du pied à coulisse jusqu'à stabilisation du poids et du retrait.

II.7. La cuisson

La cuisson des pâtes façonnées est la deuxième technique du feu maîtrisé par l'homme, après la cuisson de ces aliments. La cuisson va du simple séchage à l'air libre jusqu'au four, nos marnes sont cuits dans un four électrique de marque **FP34G**. Le cycle de la cuisson adopté dans ce travail se compose de 3 étapes (Photo II. 4) :

-1ère étapes : c'est l'étape avant le début d'augmentation de la température, elle dure 15 min

-2ème étapes : le passage de la température la plus basse vers la température désirée, elle dure 30 min ;

-3ème étapes : La température se stabilise, elle dure 1h30 min.



Photo II 4 : Four programmable du laboratoire Géoressources et Environnement FSTF.

II.7.1. Mesures de perte au feu et du retrait

La perte au feu et le retrait sont mesurés après chaque température de cuisson.

II.7.2. Détermination de la couleur

C'est une caractéristique importante, dans les domaines de l'industrie céramique et de sanitaire, elle est évaluée visuellement.

II.8. La résistance à la flexion

Le comportement des sols peut être appréhendé par les seuils d'élasticité et de rupture à l'effort. Le passage de l'état élastique à l'état plastique se traduit par l'apparition de déformations irréversibles. Ce seuil, correspond à l'équilibre limite d'un sol qui dans la pratique se traduit par la rupture (EN 772-1), lorsque l'intensité de la contrainte augmente, il y a d'abord déformation élastique (le matériau se déforme proportionnellement à l'effort appliqué et reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît), suivie parfois (en fonction de la ductilité du matériau) d'une déformation plastique (le matériau ne reprend pas sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît, il subsiste une déformation résiduelle), et enfin rupture (la sollicitation dépasse la résistance intrinsèque du matériau) (**Photo II. 1**).



Photo II 5: Appareil de la flexion du laboratoire Génie Mécanique de la FSTF.

II.9. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La calorimétrie différentielle à balayage par compensation de puissance est une méthode dynamique de mesure de dégagement de chaleur (phénomène exothermique) ou d'absorption de chaleur (phénomène endothermique).

Cet appareillage de calorimétrie, au même titre que les calorimètres adiabatiques est très répandu dans les laboratoires. La quantité de matière utilisée est très faible (Quelques mg) et les résultats sont obtenus assez rapidement. La calorimétrie DSC est donc une méthode de caractérisation très efficace.

II.6.1.Principe

Il y a deux récipients. Dans l'un des deux, le récipient témoin, vous mettez votre échantillon. L'autre, que vous laissez vide, est le récipient de référence. Les deux récipients se trouvent dans un four qui chauffe habituellement à quelque chose comme 10°C/minute. Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur. L'ordinateur fait la différence entre la température de l'échantillon et celle de référence, et les convertit en flux de chaleur.

Pourquoi les deux récipients n'auraient-ils pas la même température? C'est simple : ils sont différents! L'un contient l'échantillon et l'autre pas...

L'échantillon représente de la matière supplémentaire dans le récipient témoin par rapport au récipient de référence. La présence de cette matière supplémentaire et son "inertie thermique" (plus y'a de matière, plus il faut de temps pour que tout soit chaud!) font que le récipient témoin ne sera pas à la même température que le récipient de référence (Figure II. 6).

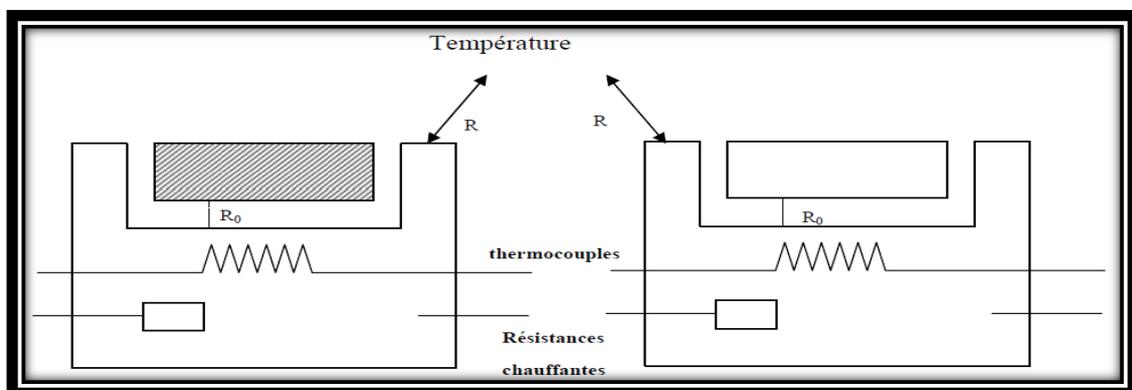


Figure II 4:Schémas du principe de la calorimétrie différentielle à balayage.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. INTRODUCTION

Pour mieux comprendre l'influence de la pouzzolane sur les propriétés physico-chimique de nos marnes, nous avons juger utile de faire une caractérisation géochimique et technologique des échantillons bruts et modifier.

III.2. Compositions chimiques et identifications des marnes

-Par la fluorescence Xⁱ

Le moyen le plus simple pour déterminer l'influence de la pouzzolane sur nos matériaux consiste à effectuer des mesures de dosage sur le matériel avant et après ajout.

Ainsi, l'analyse de la composition chimique par la fluorescence X, des marnes modifiées, révèle cependant un enrichissement notable en oxyde d'alumine (Al_2O_3), oxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde de titane (TiO_2). Ce dernier augmente parallèlement avec le taux d'ajout (Tableau II.1).

On remarque que ces marnes sont essentiellement constituées de SiO_2 , Al_2O_3 de Fe_2O_3 et CaO , ces oxydes présentent plus 70 % en poids de fraction total de ces marnes. Les teneurs en TiO_2 et celle en Fe_2O_3 peut être considérée comme acceptable pour l'usage en céramique.

Les teneurs enregistrées en CaO sont très élevée attestant la présence des carbonates en quantité importante d'où le caractère marneux de ces matériaux.

La teneur en SiO_2 est importante et celle d' Al_2O_3 semble cependant relativement élevée attribuant a ces matériaux un caractère plastique.

Par ailleurs, l'enrichissement en pouzzolane, entraîne en concomitance une légère diminution de certain élément majeur (CaO , SO_3) qui reste variable d'un point de vue quantitatif.

ECHANTILLON I						
Nom du Composé	0%	5%	10%	15%	20%	PZL
SiO ₂	42,3	42,5	42,3	42,9	42,5	37,8
Al ₂ O ₃	13,1	13,3	13,5	13,4	13,4	17
CaO	9,18	8,77	8,75	8,93	8,92	3,88
Fe ₂ O ₃	7,63	7,58	7,63	8,51	8,86	17,3
MgO	3,2	3,22	3,27	3,27	3,4	6,2
Cr ₂ O ₃	2,41	2,27	2,19	2,3	2,36	2,87
K ₂ O	1,02	1,01	1,06	1,03	1,06	0,355
Na ₂ O	1	0,98	1,01	0,97	0,942	0,821
SO ₃	0,837	0,725	0,657	0,644	0,728	0,33
TiO ₂	0,369	0,353	0,431	0,446	0,565	2,3
MnO ₂	0,268	0,241	0,262	0,27	0,29	0,435
P ₂ O ₅	0,243	0,223	0,258	0,253	0,266	0,72

ECHANTILLON II						
Nom du Composé	0%	5%	10%	15%	20%	PZL
SiO ₂	42,2	43,1	42,3	42,2	42,3	37,8
Al ₂ O ₃	11,9	12,3	12,2	12,6	13	17
CaO	9,98	9,56	9,41	9,26	8,84	3,88
Fe ₂ O ₃	8,32	8,47	9,1	9,17	9,48	17,3
MgO	2,78	3,04	3,08	3,19	3,31	6,2
Cr ₂ O ₃	2,66	2,57	2,65	2,66	2,66	2,87
SO ₃	2,34	1,67	1,93	1,64	1,93	0,355
Na ₂ O	1,35	1,39	1,32	1,3	1,32	0,821
K ₂ O	1,11	0,98	0,97	1,01	0,97	0,33
TiO ₂	0,36	0,407	0,514	0,575	0,595	2,3
MnO ₂	0,261	0,283	0,281	0,298	0,341	0,435
P ₂ O ₅	0,226	0,254	0,276	0,281	0,306	0,72

ECHANTILLON I						
Nom du Composé	0%	5%	10%	15%	20%	PZL
SiO ₂	42,3	42,5	42,3	42,9	42,5	37,8
Al ₂ O ₃	13,1	13,3	13,5	13,4	13,4	17
CaO	9,18	8,77	8,75	8,93	8,92	3,88
Fe ₂ O ₃	7,63	7,58	7,63	8,51	8,86	17,3
MgO	3,2	3,22	3,27	3,27	3,4	6,2
Cr ₂ O ₃	2,41	2,27	2,19	2,3	2,36	2,87
K ₂ O	1,02	1,01	1,06	1,03	1,06	0,355
Na ₂ O	1	0,98	1,01	0,97	0,942	0,821
SO ₃	0,837	0,725	0,657	0,644	0,728	0,33
TiO ₂	0,369	0,353	0,431	0,446	0,565	2,3
MnO ₂	0,268	0,241	0,262	0,27	0,29	0,435
P ₂ O ₅	0,243	0,223	0,258	0,253	0,266	0,72

Tableau III 1: La composition chimique des marnes exprimée en pourcentage massique %, CNRST¹

III.3. Limite d'Atterberg

III.3.1. Les limites de plasticité

Les propriétés mécaniques évoluent depuis celles d'un solide jusqu'à celles d'un liquide, entre ces deux états le sol à l'état plastique.

On remarque que le comportement de nos marnes avant et après mélange a évoluée. En effet, pour l'échantillon I, les valeurs de limites de plasticité sont comprises entre 40% et 70% et elle augmente avec l'augmentation de la quantité de la pouzzolane dans nos matériaux (Figure III.1).

¹ CNRST : centre national de rabat

Pour l'échantillon II, on observe que la courbe de la limite de plasticité est en augmentation jusqu'à 10% puis elle diminue au delà de cette valeur.

Pour l'échantillon III, on remarque que le brute présente la valeur la plus faible de la limite de plasticité, ainsi la valeur la plus élevée atteint 73% pour le mélange de 5% de la pouzzolane qui va par la suite arrive jusqu'à 50% puis se stabilise.

On conclut, que l'ajout de la pouzzolane augmente la plasticité de nos matériaux, ceci en relation avec le taux d'oxyde d'alumine qui augmente dans les matériaux modifiés. Donc ces derniers conviennent très bien pour utilisation dans la poterie.

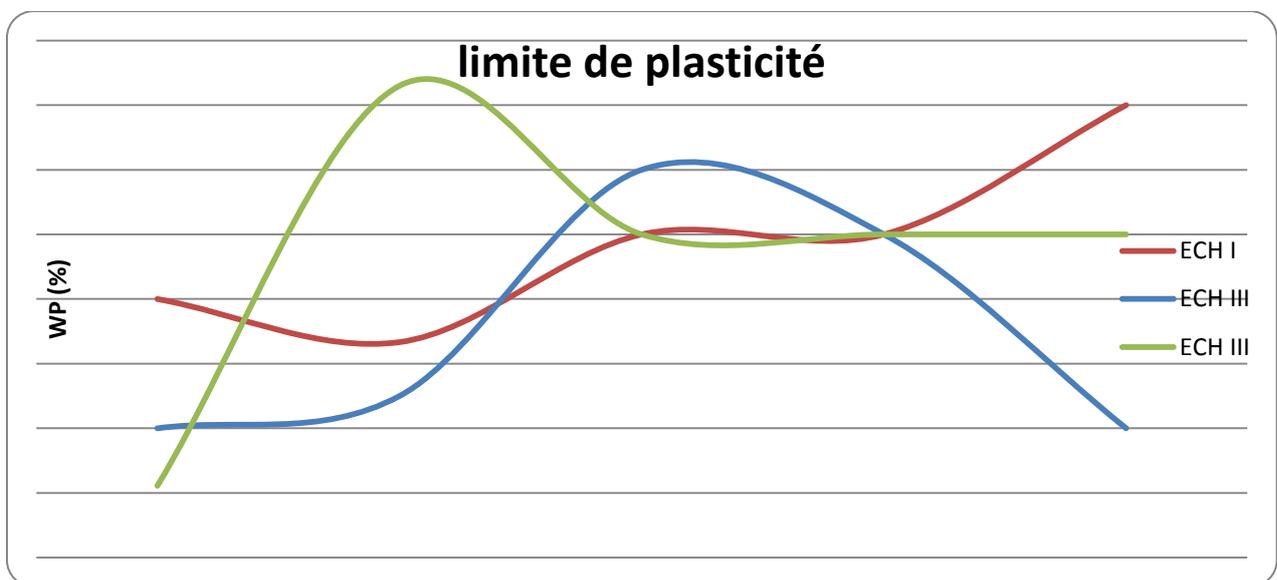


Figure III: 1: Résultat de limite de plasticité

III.3.2.Limite de liquidité

Les valeurs de limite de liquidité (Figure III.2) pour l'échantillon I sont hétérogènes, et la valeur la plus élevée est représentée par les marnes à 20% de pouzzolane et la valeur la plus faible est donnée par les marnes dopées à 15%.

- Pour l'échantillon II on constate que la limite de liquidité augmente en parallèle avec l'augmentation de la pouzzolane, elle a passé de 32% à 45%.

- Pour l'échantillon III, la limite de liquidité a connu une légère diminution de 5% par rapport au brute. A 10% ,on remarque une nette augmentation qui atteint 56 % qui va par la suite diminuer en corrélation avec l'augmentation de la quantité de la pouzzolane. D'après ces résultats, on peut dire que le comportement de la pouzzolane vis-à-vis des marnes change. En effet, l'ajout de la pouzzolane dans les marnes de l'échantillon I et III a introduit une augmentation de la plasticité et une diminution de la limite de liquidité. Mais pour l'échantillon II on constate une augmentation de la limite de liquidité en concomitance avec le taux de la pouzzolane (Figure III.2).

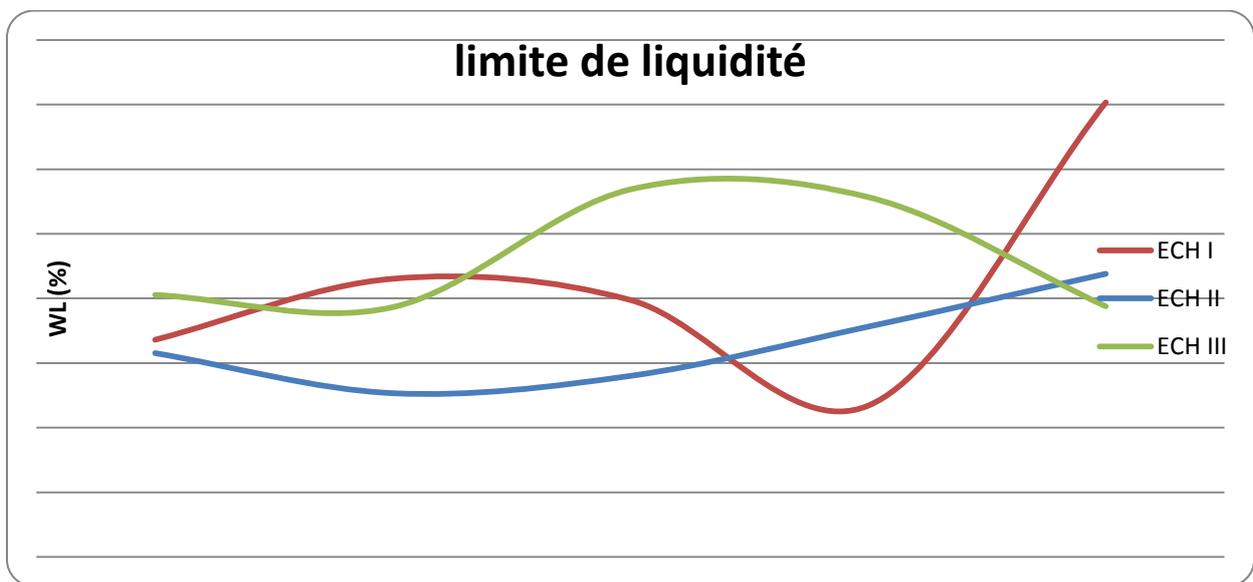


Figure III: 2: Résultat de limite de liquidité

III.4. Les effets de séchages a température ambiante

III.4.1 Mesure de retrait

Le matériau ainsi modelé à partir duquel nous avons confectionné des briquettes pleines, qui sont généralement de forme parallélépipédique obtenu par façonnage d'une pâte argileuse séchée à l'air libre et cuite ensuite dans un four programmable.

C'est au cours du séchage à l'air libre de ces briquettes qu'on obtient l'élimination progressive d'eau absorbé par simple évaporation ; cela entraîne une diminution de volume, c'est-à-dire le retrait (in Mesrar. L, 2013) qui est proportionnel au volume d'eau éliminé par séchage, et par conséquent une perte de poids.

Le calcul du retrait en longueur de tous les échantillons durant le séchage est obtenu grâce aux marques gravées sur la face externe des briquettes façonnées.

Les courbes de l'évolution du retrait du au séchage des différentes briquettes du même site (Fig. 9), présentent les mêmes variations de retrait en fonction du temps, les quelques différences qui existent sont peut-être dues à des erreurs dans l'emplacement des marques qui servent à prendre les mesures du retrait durant le séchage, ainsi qu'à la température de l'atmosphère.

Nous constatons dès le deuxième jour, qui suit la confection des briquettes, le maximum de retrait est atteint, car cette évaporation est facilitée par la structure encore lâche des particules élémentaires, et il se stabilise dès le troisième jour de la confection (Figure III.3).

En général, le retrait à l'air libre accusé par ces marnes bruts est faible et se stabilise dès le deuxième jour, par contre dans les marnes modifier par la pouzzolane il est retardé jusqu'à le troisième jour.

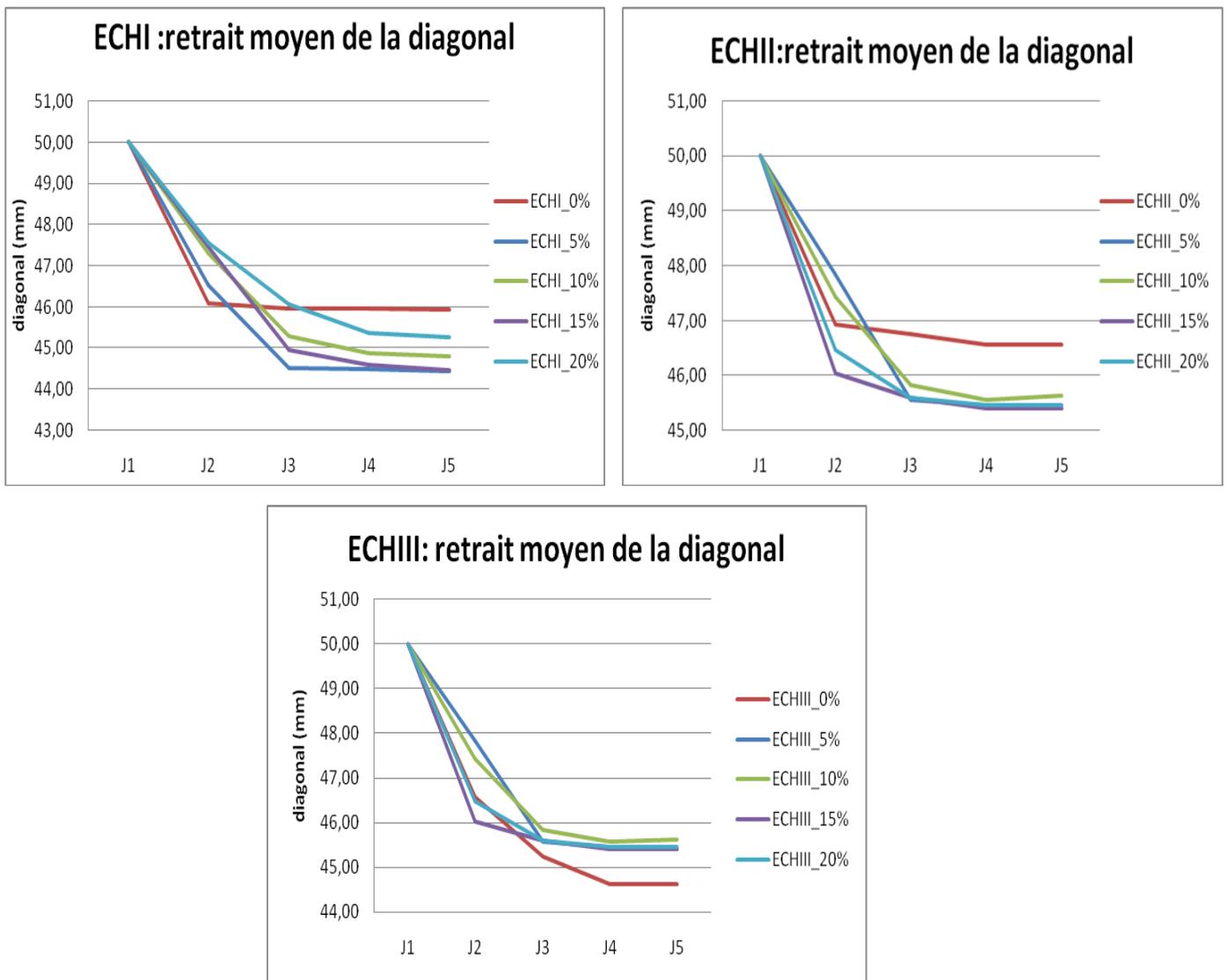


Figure III: Evolution du retrait des marnes brutes et amélioré par la pouzzolane en fonction du temps

III.4.2. Perte de poids

En parallèle, la mesure de la perte de poids est la même pour les trois marnes, il est en moyenne de 1.5 % (Figure III.4).

Les courbes de la perte de poids en fonction du temps montrent des droites descendantes, qui se stabilisent dès le troisième jour de leur confection. En effet, durant cette première phase, la perte de poids est due à l'évaporation de l'eau libre des briquettes (Figure III.4).

Chez toutes les marnes modifiées par la pouzzolane on observe une stabilité de la perte de poids. Cette dernière qui diminue avec l'augmentation de la quantité de pouzzolane,

donc la pouzzolane joue le rôle d'un stabilisateur du poids. Ce résultat, explique l'effet positif de la pouzzolane sur la stabilisation de masse des briquettes.

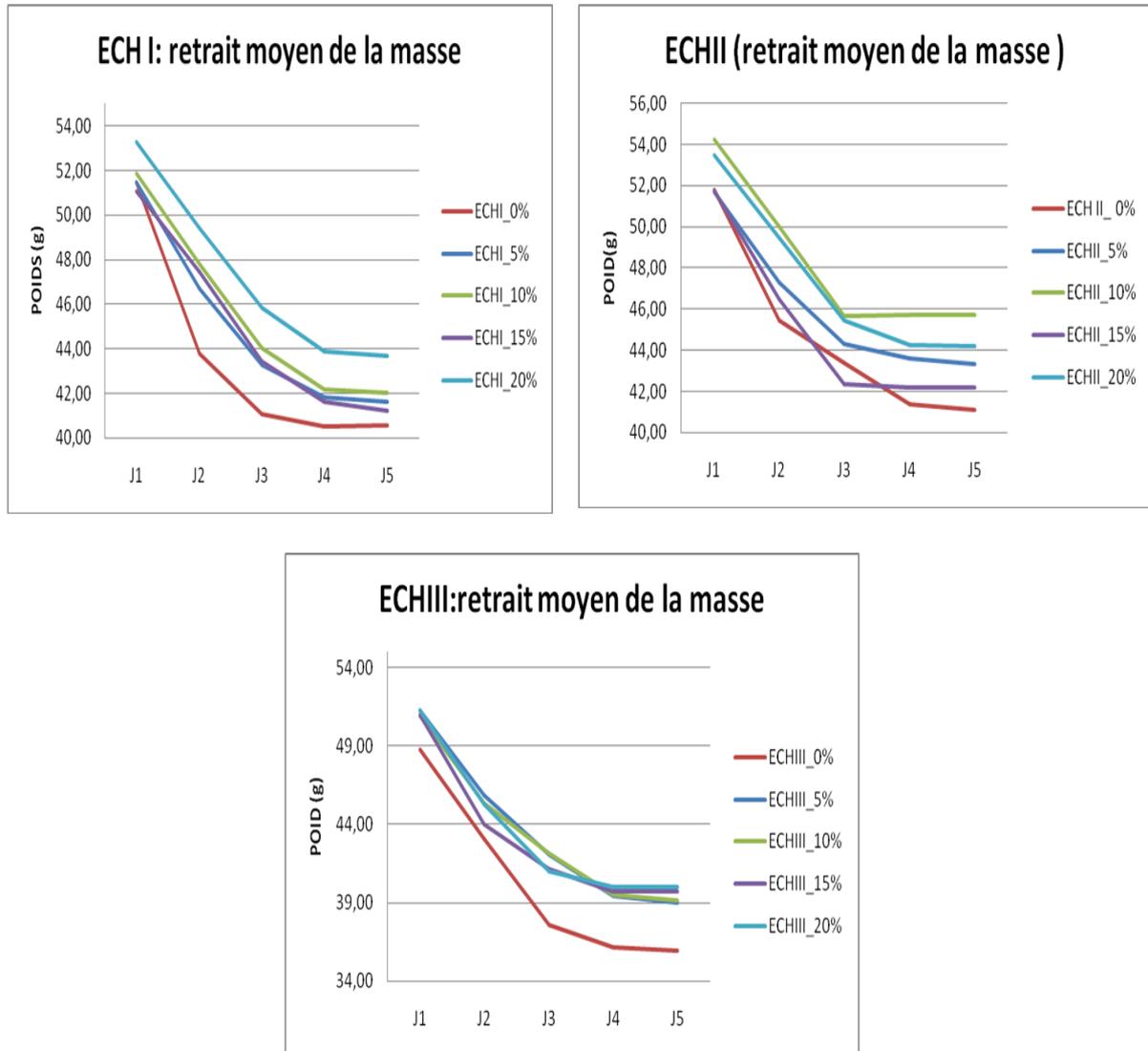


Figure III: 4 Evolution de la perte de poids en fonction du temps.

III.5. Les effets de la cuisson

Au cours de l'élévation importante de la température du four de cuisson, des transformations physico-chimiques vont affecter nos marnes.

III.5.1. Le retrait à la cuisson

Les pourcentages du retrait à la cuisson déterminés à des températures de cuisson de 900°, 1000° et 1100°C, sont données sur la Figure III.5

On a constaté que le retrait augmente avec la vitrification du matériel étudié à des températures de cuisson élevées. La diminution du volume du matériel est généralement due à la disparition progressive de la porosité. On dit qu'il y a frittage du produit.

-A 900°C, on observe une diminution de retrait dans tous les échantillons bruts et améliorés par la pouzzolane. Cette diminution est due à la transformation du quartz α en quartz β , et au départ des carbonates. Toutefois les matériaux modifiés affichent un retrait très faible (1%) par rapport aux bruts (2%).

-A 1000°C, on remarque une nette dilatation de 0.5% de tous nos matériaux qui est du au début de phénomène vérification. Cependant les matériaux modifiés présentent une faible dilatation en comparaison avec les marnes brutes.

- A 1100°C, à cette température le retrait reste un peu près stable, et la vérification du matériel continu.

D'après les courbes de retrait en fonction de la température (Figure III.5), on constate qu'ils n'ont pas eu un changement du retrait, ils restent stable pendant la cuisson dans les différents températures. Donc la pouzzolane joue un rôle de dégraissons en limitant le retrait.

III.5.2. Perte au feu à la cuisson

On rappelle qu'à 500°C, les échantillons perdent leur eau de constitution. Entre 700 et 900°C, plusieurs réactions se produisent parmi celles la décarbonatation des carbonates. Les pourcentages de la perte en poids à des températures de 900°C, 1000°C et 1100°C sont fournis dans la Figure III.5.

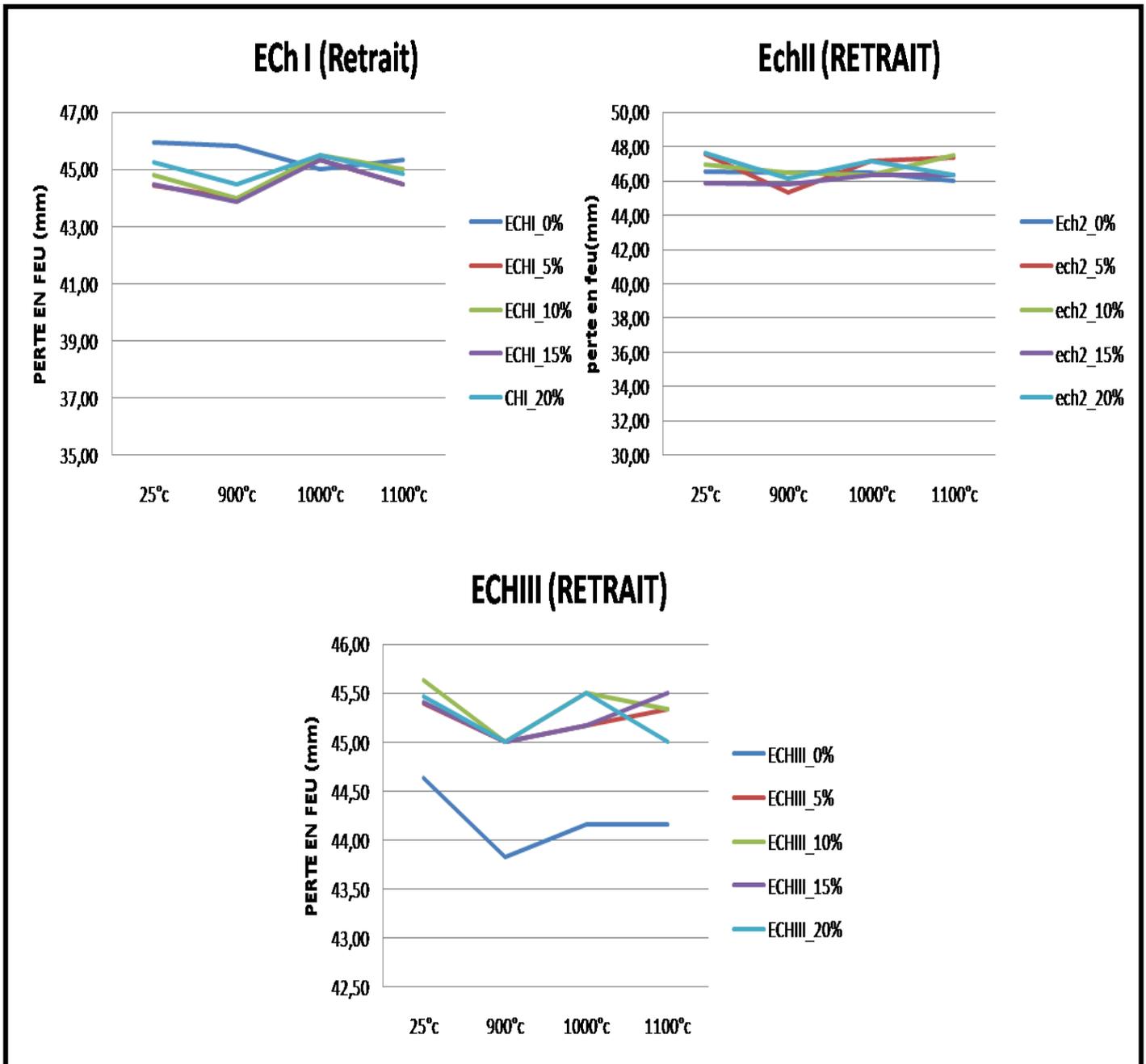


Figure III: 5: Evolution de retrait en fonction de la cuisson

On remarque que la perte en poids est à peu près constante (1%) quelle que soit la température et quel que soit l'échantillon. Ce pourcentage concerne surtout l'eau moléculaire, l'oxydation de Fe_2O_3 et la décomposition des sulfates. Ces pourcentages sont très tolérables, ce qui rend le matériau très rentable pour l'exploitation industrielle.

En revanche, les matériaux modifiés avec la pouzzolane affichent une perte au feu faible que les matériaux bruts, l'effet important que joue la pouzzolane sur nos marnes est la stabilisation du poids pendant les différentes températures de cuisson (Figure III.6).

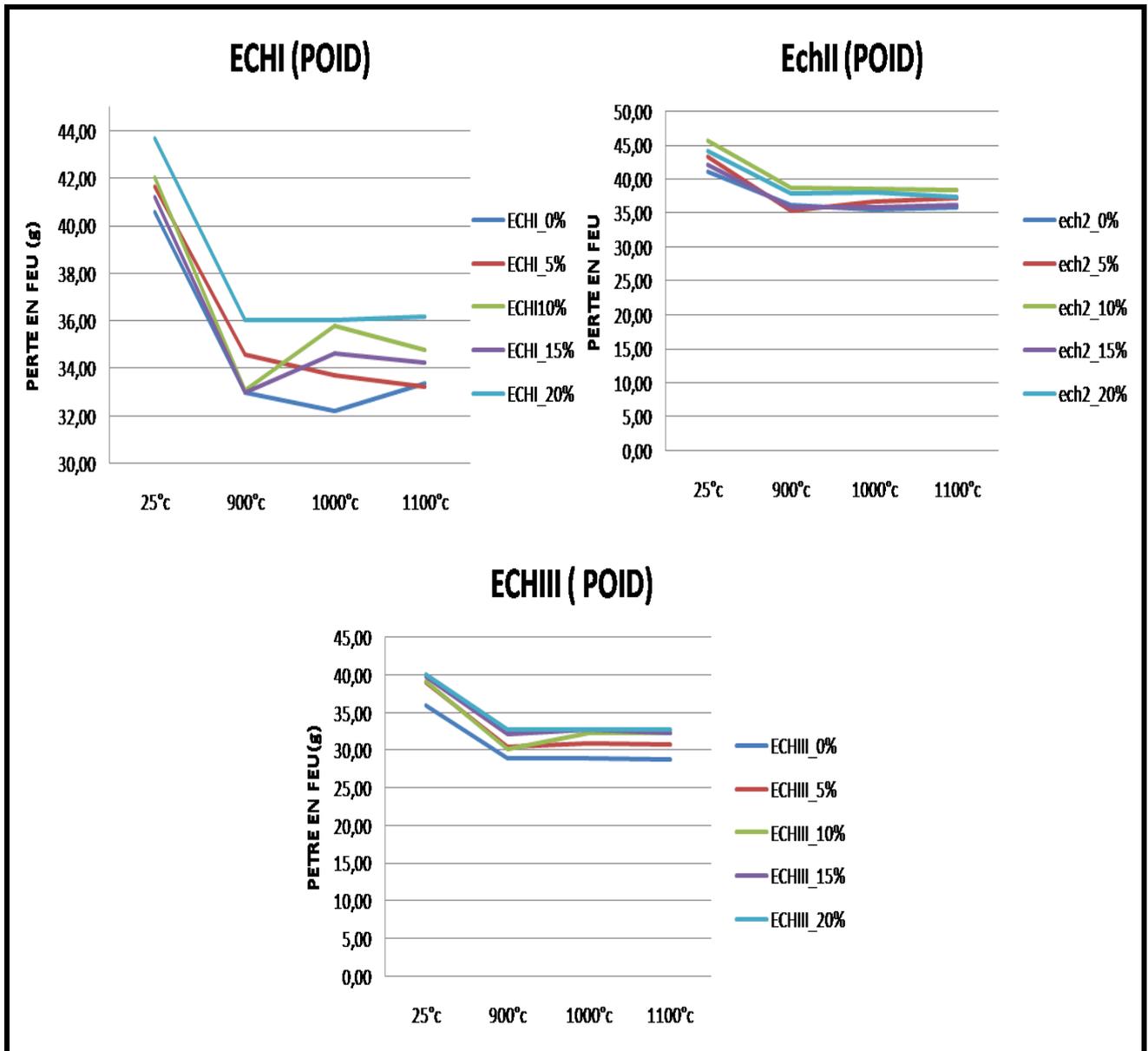


Figure III: 6: Evolution de la perte au feu en fonction de la cuisson.

III.5.3. Couleur après cuisson

Les échantillons aboutissent après chaque cuisson presque la même gamme de couleur, en effet l'évolution de la couleur et en fonction de la température (Photo III.1).

- Pour l'échantillon I caractérisé par le passage de la couleur
 - Jaune –verdâtre vers le rouge brique à 900 °C ;

- A celle rouge à 1000°C ;
- Et au marron clair avec des taches blanches.



Photo III 1: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon I après cuisson

Pour l'échantillon II caractérisé par le passage de la couleur (**Photo III.2**):

- gris clair au rouge avec des taches blanches à 900°C ;
- A une couleur rouge brun à 1000°C ;
- Et à une couleur jaune-verdâtre a 1100°C .



Photo III 2: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon II après cuisson.

Pour l'échantillon III caractérisé par le passage de la couleur (**Photo III.3**) :

- Gris foncé au rouge brique à 900°C ;
- A une couleur rouge brun à 1000°C ;
- Et à une couleur jaune-verdâtre a 1100°C .



Photo III 3: Variation de la couleur des briquettes de l'échantillon III après cuisson.

En Général, la couleur en cuit des échantillons dépend essentiellement de la teneur en fer. Ainsi d'une solution solide de Fe_2O_3 présent dans nos matériaux en quantité appréciable.

De ce fait 900°C et 1000°C, la légère différence du degré de la couleur rouge existante entre les deux briquettes confirme bien la différence du taux de Fe_2O_3 .

D' autre part l'apparition de la pellicule blanche sur la surface des briquettes de l'Ech .II cuit à 900°C et l'Ech III cuit à 1100°C due à la présence dans les matières première de sels solubles dont le principal est le sulfate de chaux.

On ce qui concerne les briquettes de couleur jaune à gris verdâtre cuit à une température de 1100°C, elles ont connu la métaphase qui se traduit par la formation d'une solution solide des deux éléments Fe et Ti ce sont les cristaux qui donnent la couleur verdâtre.

III.6. La résistance à la flexion

Les essais de résistance à la flexion sont réalisés par une machine W 500 pour les petits échantillons (au laboratoire de la Physique mécanique de la FST Fès).

Pour l'échantillon I on a effectué trois essais pour chaque température et on a établi la moyenne (**Figure III.7**).

A 900 °C :

- Tous les briquettes affichent une nette amélioration de la résistance mécanique par rapport aux briquettes non cuit.

On remarque que les briquettes de marnes dopées à 10% donnent les meilleures résistances à la flexion qui atteint 550N.

A 1000°C :

-À cette température, la résistance à la flexion a augmenté par rapport à 900°C dans tous les briquettes et atteint son maximum (670N) dans les marnes mélangés à 10% et le pourcentage qui présente la plus faible résistance est celui de 20% avec une valeur de 440N.

A 1100°C :

-A cette température, la résistance à la flexion présente une légère diminution, estimée d'un peu près 30N, pour le pourcentage de 10% qui affiche le maximum de résistance qui atteint (640N).

-Donc pour l'échantillon I le pourcentage qui montre la meilleure résistance à la flexion est celui de 10% sous une température de 1000°C.

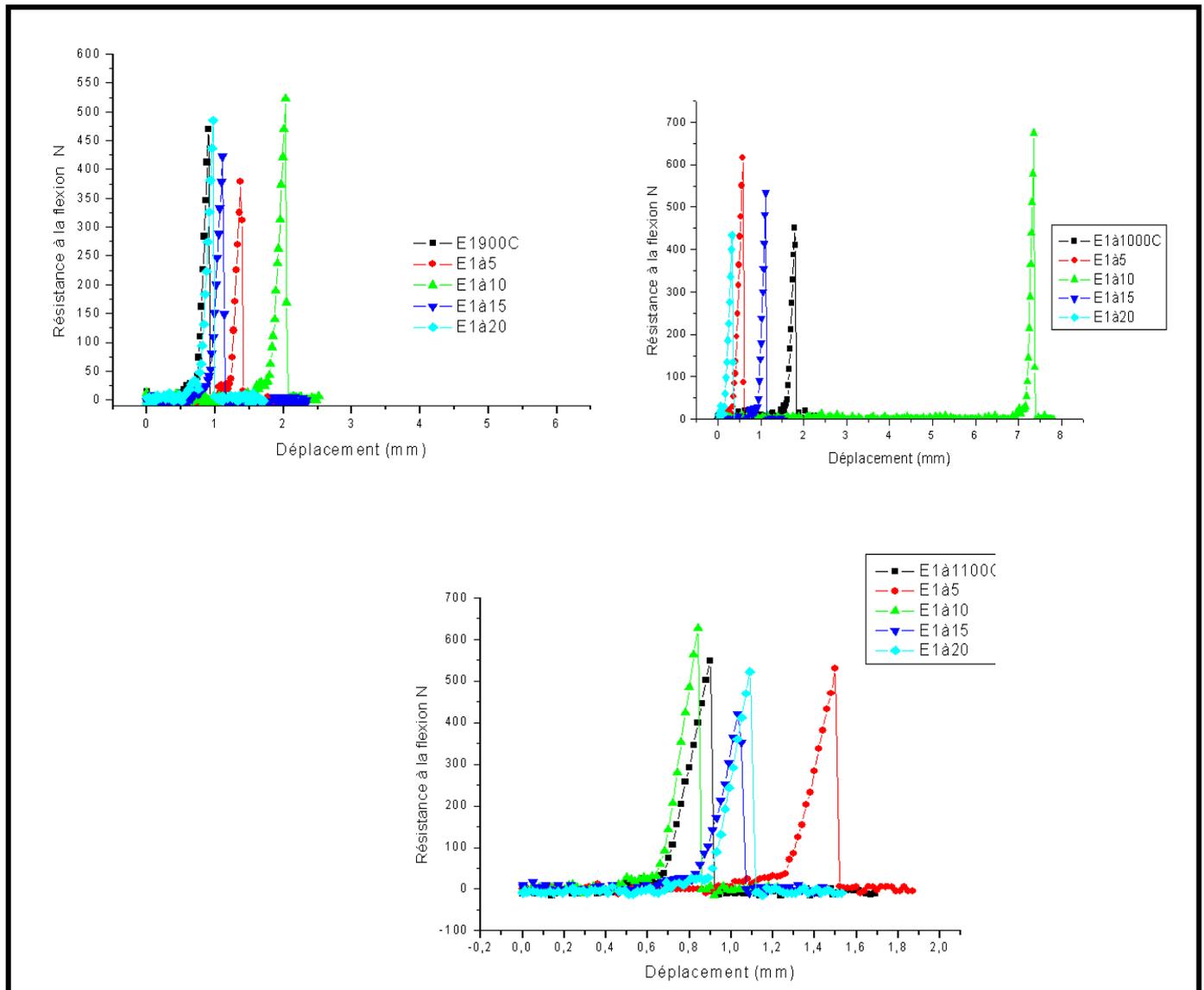


Figure III: 7: Résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon I

Pour l'échantillon II on a effectués trois essais pour chaque température et on a établi la moyenne.

A 900 °C :

D'après la courbe de la résistance à la flexion on remarque que les briquettes à une faible résistance qui ne dépasse pas les 30N pour tous les pourcentages, alors que l'échantillon brute présente la valeur la plus élevée 260N.

A 1000°C :

- Tous les briquettes affichent une nette amélioration de la résistance mécanique par rapport aux briquettes cuites à 900°C avec un maximum de 370N pour le pourcentage de 15%, et la valeur la plus faible correspond à celle du 5% qui atteint 270N, alors on constate que les valeurs de résistance son très proche Mais ils restent faible si on les compare avec l'échantillon I.

A 1100°C :

-A cette température, la résistance à la flexion présente une légère augmentation, pour le pourcentage de 5% qui affiche le maximum de résistance qui atteint (410N) et la valeur la plus faible exprimait par le pourcentage de 0% qui atteint (250N).

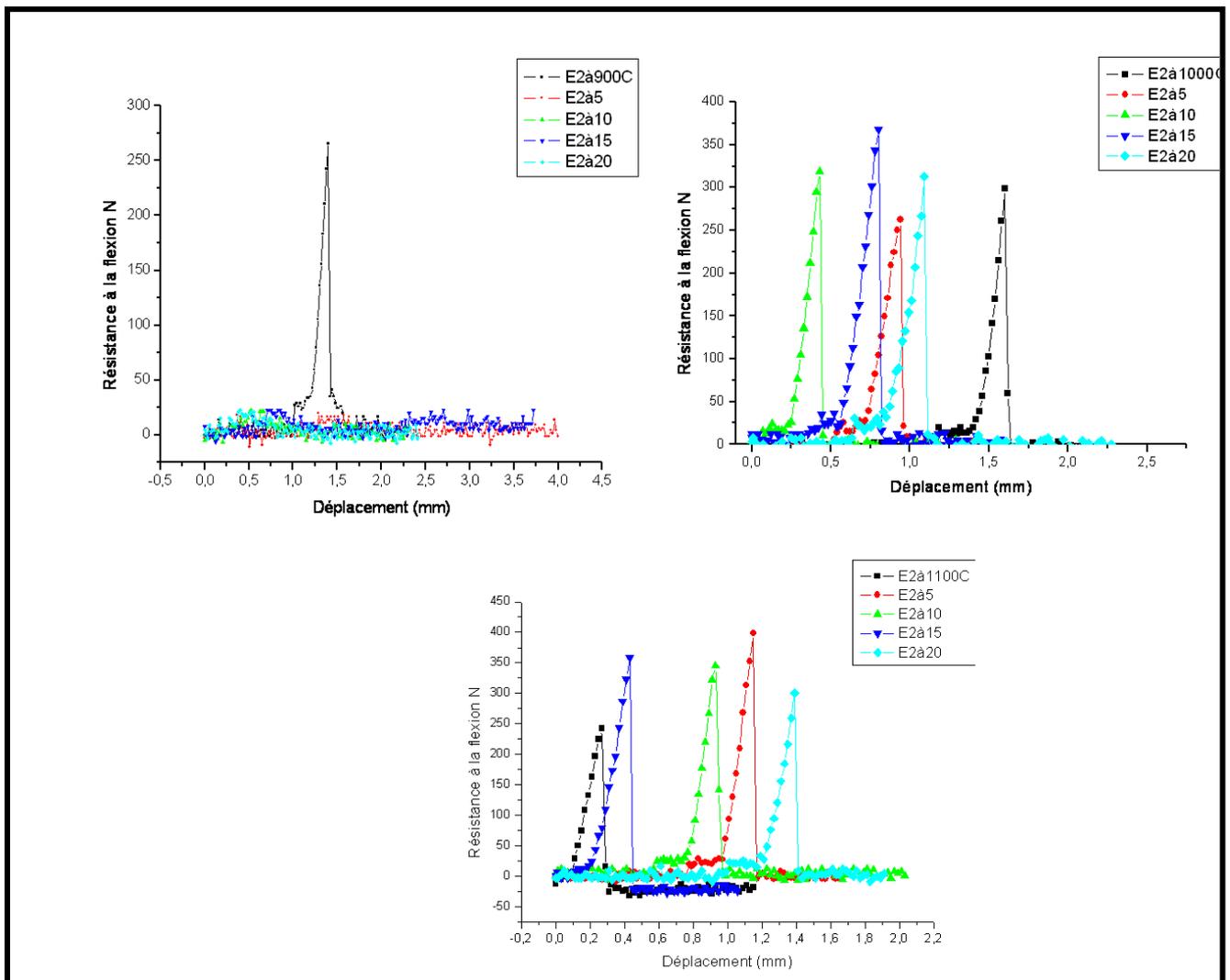


Figure III: 8: Résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon II

-Alors la résistance à la flexion augmente en parallèle avec l'augmentation de la température.
-Donc pour l'échantillon II le pourcentage qui montre la meilleure résistance à la flexion est celui de 5% sous une température de 1100°C.

Pour l'échantillon III on a effectué trois essais pour chaque température et on a établi la moyenne (**Figure III.9**).

A 900 °C :

- Tous les briquettes de différent pourcentage affichent une nette amélioration de la résistance à la flexion par rapport aux briquettes de l'échantillon I et II.

On constate que les briquettes non doper donnent une résistance plus élevée qui atteint 750N alors que la valeur la plus faible est celle de 20% atteint 550N. Donc la PZL n'a pas un effet à cette température.

A 1000°C :

-À cette température, la résistance à la flexion à augmenter dans tous les briquettes et atteint son maximum (940N) dans les marnes mélangés à 10% et la résistance la plus faible et celle de 20% qui atteint 510N. L'explication de l'augmentation de la résistance à la flexion est liée à la modification de structure cristalline de nos marnes. En effet, aux alentours de 1000°C la cuisson, détruit presque tous les composants des marnes, notamment la matière organique, de l'eau, des carbonates, des oxydes, de la silice, et de l'illite, et que à cette température la porosité est minimal, ce qui induit une forte résistance à la flexion.

A 1100°C :

-A cette température, la résistance à la flexion présente une légère diminution, pour le pourcentage de 10% qui affiche le maximum de résistance qui atteint (900N) et la valeur la plus faible au allant tour de 550N présentait par le pourcentage 5% de PZL.

-Alors, on constate que les valeurs de la résistance de 10% et 15% sont très proche dans les températures de 1000°C et 1100°C, mais si on prend en considération le côté financier, le pourcentage le plus rentable est celui de 10% à 1000°C, car on économise l'énergie et la matière.

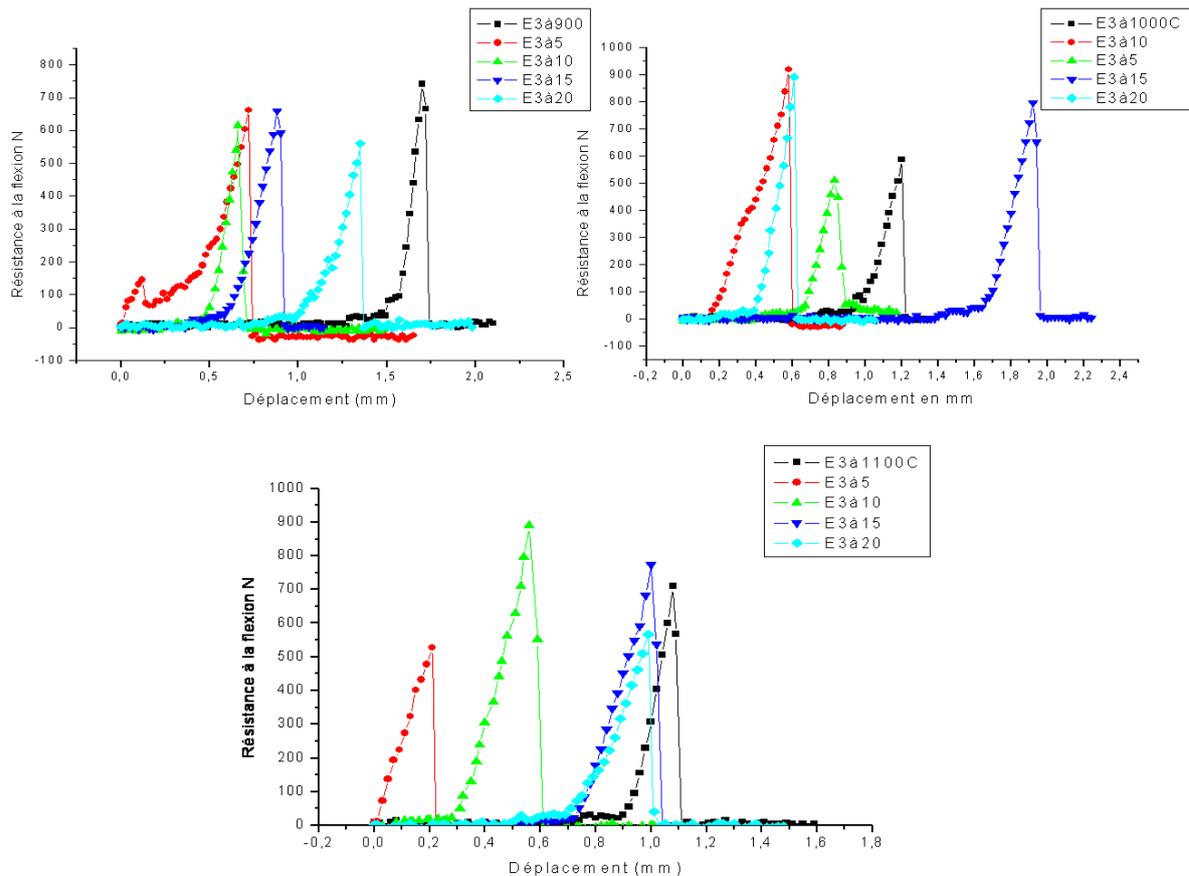


Figure III: Résultat de la flexion après cuisson à (900°C, 1000°C, 1100°C) pour l'échantillon III

III.7. Calorimétrie différentielle a balayage (DSC2)

-Les courbes de calorimétrie différentielle (Figure III.11) représentent la variation de l'énergie absorbée en fonction du temps par chaque échantillon.

-La diminution de l'énergie absorbée est proportionnelle avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane ajouté.

-Chaque courbe est constituée de quatre parties :

-La 1ere partie entre 0s et 6s ou il y a une stabilité de l'énergie absorbés par chaque échantillon (Ech (0%)= 0,42mW , Ech (5%)= 0,41mW , Ech (10%)= 0,2mW).

-La 2 ème partie entre 6s et 30s ou il y a une forte augmentation de l'énergie absorbée par chaque échantillon.

² - Laboratoire du Génie des Matériaux de l'ENSAM-Meknès, Université Moulay Ismail

-La 3ème partie entre 30s et 240s ou il y a une moyenne diminution de l'énergie absorbée Par chaque échantillon.

-La 4ème partie ou il y a peut être une transition physique de phase des échantillons (à partir de 240s il y a une augmentation de l'énergie absorbée par chaque échantillon).

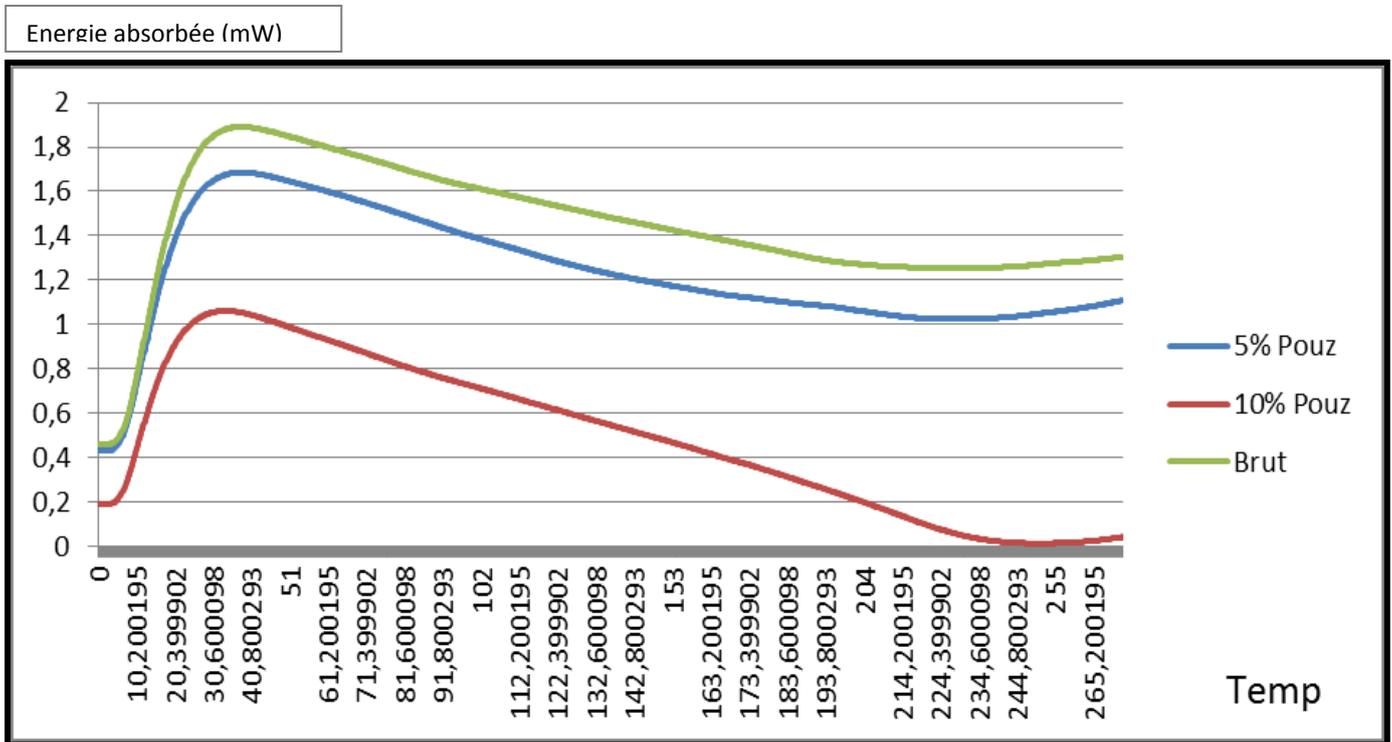


Figure III: 10Résultat de l'essai Calorimétrie différentielle à balayage.

Conclusion

Ce stage a été la continuation de nos recherches dans le cadre de l'amélioration des paramètres physico-chimique des marnes par l'ajout de la pouzzolane. Avec toutes les informations recueillies durant cette période, on a pu mettre en œuvre des résultats importants sur la valorisation des marnes.

En effet, les résultats des essais ont permis de montrer qu'il y a une stabilité du retrait, de perte de poids avant et après cuisson, une amélioration de plasticité et une augmentation de la résistance mécanique des marnes est enregistré dans les matériaux modifiés par ajout de la pouzzolane .

Les meilleurs résultats sont représentés par l'échantillon III avec un ajout de 10% de pouzzolane.

En effet, il donne un faible retrait après cuisson et une perte en feu tolérable et ceci a toutes les températures de cuisson 900°C, 1000°C et 1100°C.

Pour la limite d'Atterberg le même échantillon à une haute plasticité, une faible limite de liquidité et une grande résistance mécanique.

On peut dès lors, conclure que l'échantillon III constitue le meilleur type de marne étudiée qui donne de très bons résultats avant et après ajout, ainsi le pourcentage qui a la capacité d'améliorer efficacement les paramètres physico-chimiques de ce type de marne est celui de 10% de PZL.

En effet, ces marnes répondent parfaitement à l'exigence industrielle pour une éventuelle utilisation dans le domaine de la construction, la poterie et la céramique.

Références bibliographiques

-Mesrar L. (2013): Caractérisation géochimiques, minéralogiques, technologiques et nanotechnologiques des marnes miocènes du couloir sud rifain (Fès-Taza) : Etudes et valorisations. Thèse National, FST., Fès, 204p.

-Bouyahyaoui F.(1996) : Etudes géologique, minéralogique et technologique des marnes du miocène supérieur à pliocène inférieur de la région de Fés-Mekness et de Rabat-Salé.

-El Qandil M. (2007) : recherche et valorisation des matériaux de constructions et des argiles industrielle dans les provinces nord du Maroc ; possibilités d'exploitation et problèmes environnementaux.
