

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : Génie Civil

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par: ARIOUA Ahmed et TAHMI Lakhdar

Intitulé

**Caractérisation de durabilité de la brique de
terre comprimée et stabilisée (BTC) sous l'effet
des actions cycliques de mouillage- séchage**

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et prénom Enseignant

Pr. NASRI Abdelghani	Université M'sila	Président
Pr. BENCHEIKH Mohamed	Université M'sila	Rapporteur
Dr. SILINE Mohamed	Université M'sila	Examineur
Dr. BOUALAG Saida	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

REMERCIEMENT

*Avant tout nous tenons à remercier **Allah** tout puissant de nos avoir donné la volonté, la santé et la patience durant nous années d'études et surtout pendant la réalisation de ce mémoire.*

*Nous ne pouvons pas réellement trouver les expressions élégantes que mérite notre encadreur **Pr. BENCHEIKH Mohamed** pour son écoute, son aide, sa sympathie et sa patience, son encouragements et ses conseils, ainsi que pour le temps qui il a consacré pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence total au cours de cette modeste étude.*

*De même, nous remercions vivement l'ingénieur de laboratoire de développement Géomatériaux Université de M'sila **CHOUKEIR SAWSEN** pour leur conseil, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.*

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du Département de génie civil en particulier dans notre spécialité Matériaux. Avec un remerciement spécial aux étudiants du département de génie civil et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACE

Nous dédions ce travail à :

Nos pères, qui nous ont toujours soutenus et qui ont fait tout possible pour nous aider.

Nos mères, sources de tendresse pour leurs soutiens tout le long de notre vie scolaire.

Nos frères et nos sœurs.

Nos grandes familles.

Nos chers amis et enseignants.

Tous qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

RÉSUMÉ :

La recherche présentée porte sur l'application de la méthode des plans d'expériences (MPE), à l'étude des caractéristiques de durabilité des briques de terre comprimée et Stabilisée au ciment. Contrairement aux autres matériaux de construction, tels que le béton et l'acier, la composition relativement non précise et non normalisée de la terre rend ce matériau difficile à identifier et à caractériser. En effet, le matériau terre devrait passer par une série d'essais pour caractériser son aptitude à l'emploi dans le secteur de la construction.

L'étude porté sur des briques en argile choisi comme matériau de référence au quel nous avons associé le ciment, la chaux, le sable dune. Nous avons fait varier le pourcentage de ces matériaux en masse.

MOTS-CLÉS:

La méthode des plans d'expériences, caractéristiques de durabilité, terre comprimée, terre stabilisée au ciment, brique en terre, argile, sable de dune, sable concassé.

ملخص

يتناول البحث المقدم تطبيق طريقة التصميم التجريبية لدراسة خصائص الديمومة لأجر الطين المضغوط و المستقر بالاسمنت. عكس مواد البناء التقليدية (الخرسانة، الحديد...) فان مكونات التربة غير المستقرة تجعل منها مادة من الصعب تحديد مواصفاتها وخصائصها و لهذا يجب تطبيق عدة تجارب على التربة لجعلها صالحة للاستخدام في قطاع البناء. أجريت الدراسة على أجر الطين المصنوع في المختبر و الذي أضفنا إليه الاسمنت ، الرمل ، مع تغيير نسب هاته المواد من مزيج لأخر

الكلمات المفتاحية :

طريقة التصميم التجريبية، خصائص الديمومة، التربة المضغوطة، التربة المستقرة بالاسمنت، طوب التربة، الطين، رمل الكثبان، الرمل المكسر.

ABSTRACT

Our work deals with the application of experimental design method (EDM) to the study the durability characteristics of the earth compressed stabilised with the cement. On the opposite of the other building materials, such as the concrete and the steel, the composition relatively not accurate and not normalized of the earth makes this material difficult to be identified and characterized. Indeed, the earth should pass by a series of tests to characterize its aptitude for the particular use in the construction sector.

The study focused on the bricks of clay chosen as reference material to which we associate the cement, lime, sand dune. We have varied the percentage of these materials in mass.

KEYWORDS

Experimental design method, durability characteristics, compressed earth, cement stabilized earth, the bricks of earth, clay, Sand dune, Sand crushed.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1- histoire de la terre.....	4
I.1.1- Antiquité	4
I.1.2- Moyen-âge.....	5
I.1.3- La renaissance.....	6
I.1.4- L'ère contemporaine	6
I.2- Le matériau terre.....	7
I.2.1- Au niveau géologique.....	7
I.2.2- Au niveau microscopique.....	8
I.2.2.1- Des grains.....	8
I.2.2.2- Les argiles.....	8
I.2.3- Minéralogie de l'argile.....	9
I.2.3.1- Structure.....	9
I.2.4- Classification des argiles.....	10
I.2.5- Principaux types d'argiles.....	10
a- La kaolinite.....	10
b. La montmorillonite.....	10
c. L'illite.....	10
I.2.6- Caractéristiques de terre.....	10
I.2.7- La texture.....	11
a- La plasticité.....	11
b- La compressibilité.....	12
c- La cohésion.....	12
I.2.8- La stabilisation.....	12
I.3- La stabilisation.....	13
I.3.1- Définition.....	13
I.3.2- Procédés.....	13
a- Stabilisation mécanique.....	13
b- Stabilisation physique.....	13
c- Stabilisation chimique.....	14
I.3.3- Stabilisation par le ciment.....	14

I.3.3.1- Définition.....	14
I.3.3.2- Les constituants principaux.....	14
I.3.3.3- Les types du ciment.....	15
I.3.3.4- Les classes du ciment.....	15
I.3.3- Stabilisation par la chaux.....	16
I.3.3.1- Définition.....	16
I.3.3.1.1- Les chaux aériennes.....	16
I.3.3.1.2- La chaux vive (CaO).....	16
I.3.3.1.3- La chaux éteinte (CaOH ₂).....	16
I.3.3.1.4- Les chaux hydrauliques.....	17
I.3.3.2- Caractéristiques de la chaux.....	17
I.4- Les différents types de construction en terre.....	17
I.4.1- Adobe.....	18
I.4.2- Pisé.....	19
I.4.3- Terre-paille.....	19
I.4.4- Torchis.....	20
I.4.5- Terre façonnée.....	20
I.4.6- Blocs de terre comprimée.....	21
I.4.7- Bauge.....	21
I.4.8- Terre extrudée.....	21
I.5- Blocs de terre comprimée (BTC).....	22
I.5.1- Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	23
a- Blocs pleins.....	23
b- Blocs creux.....	23
c- Blocs alvéolaires.....	23
d- Blocs à emboitements.....	23
e- Blocs parasismiques.....	24
f- Blocs spéciaux.....	24
I.6- La brique de terre comprimée et stabilisée.....	24
I.6.1- Résistance.....	24
I.6.2- Flexibilité.....	24
I.6.3- Standardisation.....	24

I.6.4- Adaptabilité.....	25
I.6.5- Finition.....	25
I.6.6- Ressource locale.....	25
I.7- La cure.....	25
I.8- Conclusion.....	25

CHAPITRE II : METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1- Introduction.....	27
II.2- Choix de la méthode d'expérimentations.....	27
II.3- Les différents types de facteurs.....	27
a- Facteurs continus.....	27
b- Facteurs discrets.....	27
c- Facteurs ordonnables.....	28
d- Facteurs booléens.....	28
II.4- Notion d'espace expérimental.....	28
II.5- Logiciel utilise.....	29
II.5.1- Présentation de logiciel « minitab ».....	29
II.5.2- Diagramme de pareto.....	29
II.5.3- Diagramme des effets principaux.....	29
II.5.4- Diagramme des interactions.....	31
II.5.5- Equation de régression.....	31
II.6- Conclusion.....	32

CHAPITRE III : MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1- Introduction.....	34
III.2- Matériaux utilisés.....	34
III.2.1- Sol.....	34
III.2.1.1- Essais d'identifications.....	35
a- Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056).....	35
b- Les limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	39
III.2.2 : Sable.....	46
III.2.2.1- Les essais d'identifications.....	46
a- Analyse granulométrique par tamisage.....	46
b- Equivalent de sable (NF P 18-598).....	47
III.3- Observations microscopiques par MEB.....	49

III.3.1- Résultats de DRX.....	50
III.4- Conclusion.....	51

CHARITRE IV : ELABORATION D'UN MODELE EXPERIMENTALE DE BTC

IV.1- Introduction.....	53
IV.2- Confection des blocs.....	53
IV.2.1- Mélanges	53
IV.2.2- Préparation des mélanges	53
IV.2.2.1- Etapes de préparation	53
IV.2.2.2- Préparation du mélange	56
IV.3- La cure des éprouvettes	57
IV.4 - Essai de mouillage-séchage : (norme americana ASTM 559-44).....	58
IV.5 – Conclusion.....	59

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1- Introduction	61
V.2- Résultats des essais	61
V-2.1- Les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab	61
V.2.1.1- Diagramme de Pareto	61
V.2.1.2-Graphiques des effets principaux et les interactions.....	68
V.3- Equation de régression.....	82
Conclusion générale.....	83
Liste des références.....	

Liste des figures

Figure I.1 : Ruines du Ramasseum, Egypte.....	4
Figure I.2 : Ziggourat de Babylone, ou tour de Babel (image réelle et virtuelle).....	5
Figure I.3 : Mosquée de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso (gauche) et Remparts massifs de l'Alhambra à Grenade (droite).....	5
Figure I.4 : Le Manhattan du désert, à Shibam au Yémen.....	6
Figure I.5 : Carte de répartition des constructions de terre.....	7
Figure I.6 : Schéma différentes utilisations de la terre.....	18
Figure I.7 : Exemple de Fabrication d'Adobe.....	18
Figure I.8 : Les techniques de la construction en pisé (vallée du Todrha,).....	19
Figure I.9 : Fabrication de la terre-paille.....	20
Figure I.10 : Les techniques de la construction en torchis.....	20
Figure I.11 : Mure en terre façonnée.....	20
Figure I.12 : Les techniques de fabrication de la BTC.....	21
Figure I.13 : Les techniques de la construction avec la bauge.....	21
Figure I.14 : Construction en terre extrudée.....	22
Figure I.15 : Différents produits de blocs de terre comprimée.....	24
Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur.....	28
Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.....	29
Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.....	29
Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'étude.....	30
Figure III.1 : Argile rouge crue	34
Figure III.2: Argile grise crue.....	34
Figure III.3: Argile verte crue.....	34
Figure III.4 : Argile n°1 R.....	35

Figure III.5: Argile n°2 G.....	35
Figure III.6: Argile n°3 V.....	35
Figure III.7 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.....	36
Figure III.8- Analyse granulométrique d'argile G.....	37
Figure III.9- Analyse granulométrique d'argile R.....	38
Figure III.10- Analyse granulométrique d'argile V.....	39
Figure III.11- Analyse granulométrique des 3 types d'argile.....	39
Figure III.12 : Limite de liquidité.....	40
Figure III.13 : Limite de plasticité.....	40
Figure III.14: Appareillage de limites d'Atterberg.....	40
Figure III.15- Courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.....	41
Figure III.16- Courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.....	43
Figure III.17- Courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.....	44
Figure III.18- Courbe de casagrande.....	45
Figure III.19- Analyse granulométrique par tamisage du sable.....	47
Figure III.20: Essai d'équivalent de sable.....	47
Figure III.21 : Appareil de l'essai d'équivalent de sable.....	48
Figure III.22 : Métalliseur et MEB HITACHI S-3600N.....	49
Figure III.23- Analyse minéralogique d'argile grise.....	50
Figure III.24- Analyse minéralogique d'argile verte.....	50
Figure III.25- Analyse minéralogique d'argile grise.....	51
Figure IV.1 : Malaxeur.....	54
Figure IV.2 : Un mélange.....	54
Figure IV.3 : Moule utilisé.....	54

Figure IV.4 : Presse manuelle.....	54
Figure IV.5 : Presse mécanique.....	54
Figure IV.6 : Technique de pression par le moule et les pistons.....	55
Figure IV.7 : Humidificateur	57
Figure IV.8 : Bac d'eau	58
Figure IV.9 : Etuve.....	58
Figure V.1: Diagramme des effets pour la masse volumique.....	61
Figure V.2: Diagramme des effets pour l'absorption dans le 1er cycle.....	62
Figure V.3 : Diagramme des effets pour de perte de masse dans le 1er cycle.....	63
Figure V.4 : Diagramme des effets le pourcentage d'absorption dans le 6eme cycle.....	64
Figure V.5 : Diagramme des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 6eme cycle.....	65
Figure V.6 : Diagramme des effets pour le pourcentage d'absorption dans le 12eme cycle.....	66
Figure V.7 : Diagramme des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 12eme cycle.....	67
Figure V.8 : Graphique des effets principaux pour la masse volumique.....	68
Figure V.9 : Diagramme des interactions pour la masse volumique.....	69
Figure V.10 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 1er cycle.....	70
Figure V.11 : Diagramme des interactions pour l'absorption dans 1er cycle.....	71
Figure V.12 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 1er cycle.....	72
Figure V.13 : Diagramme des interactions pour la masse volumique dans 1er cycle.....	73
Figure V.14 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 6 eme cycle.....	74
Figure V.15 : Diagramme des interactions pour l'absorption dans 6 eme cycle.....	75
Figure V.16 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 6eme cycle.....	76

Figure V.17 : Diagramme des interactions pour la masse volumique dans 6 eme cycle.....	77
Figure V.18 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 12eme cycle.....	78
Figure V.19 : Diagramme des interactions pour l'absorption dans 12 eme cycle.....	79
Figure V.20 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 12eme cycle....	80
Figure V.21 : Diagramme des interactions pour la perte masse dans 12 eme cycle.....	81

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates , d'après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993).....	9
Tableau I.2 : Diamètres des différent tybe des grains.....	11
Tableau I. 3: liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.....	15
Tableau I. 4: les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.....	16
Tableau III. 1: analyse granulométrique pour le type d'argile G.....	36
Tableau III. 2: analyse granulométrique pour le type d'argile Argile R.....	37
Tableau III.3 : analyse granulométrique pour le type d'argile Argile V.....	38
Tableau III-4 : Limites de liquidité.....	41
Tableau III.5 : Conduite d'essai de limite de plasticité.....	41
Tableau III.6 : Limites de liquidité.....	42
Tableau III.7: Conduite d'essai de limite de plasticité.....	42
Tableau III.8 : Limites de liquidité.....	44
Tableau III.9 : Conduite d'essai de limite de plasticité.....	44
Tableau III.10 : Analyse granulométrique par tamisage de sable.....	46
Tableau III.11 : la nature du sable en fonction des mesures par l'équivalent de sable selon la norme (NF P 18-598).....	48
Tableau III.12 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable.....	49
Tableau IV.1 : élaboration des éprouvettes.....	56

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

On considère aujourd'hui qu'environ un tiers de la population mondiale vit dans des bâtiments en terre crue. Effectivement, il est tout à fait logique de bâtir avec la matière disponible à même le sol. Cependant, bien qu'adaptée au climat, la construction en terre crue est de moins en moins utilisée en Afrique et dans les pays limitrophes. Elle est assimilée à un matériau peu résistant qui nécessite beaucoup d'entretien. A l'inverse, la construction en béton connaît un certain essor et est associée à la réussite sociale. Souvent, les blocs de béton sont apparents, sans enduits.

Les coûts énergétiques associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. Le développement de pratiques de construction durables est donc primordial, non seulement afin de se conformer aux objectifs actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour limiter la consommation d'énergie à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, le développement de matériaux de construction économes en énergie, mais aussi dont les impacts environnementaux sont limités et notamment en termes d'épuisement des ressources, apparaît comme un challenge prometteur. Une des possibilités est l'utilisation de terre crue compressée : matériau local [Rachana, M'sila] et dont la mise en forme ne nécessite que peu d'énergie, il peut être entièrement recyclable.

Matériau de construction majoritairement utilisé depuis des millénaires, la terre est toujours employée en Afrique, notamment pour les habitations dans les régions rurales. Il est tout à fait possible de construire avec une terre non stabilisée. C'est une technique écologique, simple et locale, mais également vulnérable. En effet, lorsque la terre crue est laissée à l'air libre, elle est particulièrement sensible aux conditions climatiques (pluie, vent, gel...). Il faut alors la protéger via un enduit par exemple, ce qui implique un entretien plus important. D'autre part, les caractéristiques mécaniques du matériau terre non stabilisé sont assez faibles et souvent aléatoires dans un contexte de construction très majoritairement artisanal. Ceci contraint fort les possibilités architecturales. Aujourd'hui, on cherche donc à combiner les atouts du matériau local qu'est la terre, tout en gommant ses défauts en renforçant ses caractéristiques par une stabilisation.

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la

législation au nouveau contexte international en matière du développement durable.

Ce travail vise à répondre à la problématique suivante : Comment stabiliser la terre crue pour la construction en Algérie ? Il traitera donc particulièrement de la typologie que constitue la brique de terre comprimée (BTC) stabilisée, qui représente l'un des modes de construction en terre crue des plus rapides, fiables et résistants.

Le chapitre I est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC), les différents matériaux utilisés, et les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.

Dans le chapitre II nous avons présenté une petite présentation sur le plan d'expérience et une définition de logiciel utilisé dans notre recherche « Minitab ».

Dans le chapitre III voir les matériaux et techniques expérimentales.

Le chapitre IV présente les essais réalisés sur la brique de terre comprimée BTC, ce chapitre présente aussi les mélanges et les procédures de confection des éprouvettes.

Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre V.

Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents ainsi que des recommandations.

Dans ce travail sur la Brique de Terre Comprimée (BTC), on ne traitera pas volontairement d'autres éléments intervenants dans une maçonnerie en BTC comme les mortiers et ou les enduits. En effet, le cœur de l'étude est le matériau terre lui-même et son comportement vis à vis le mouillage-séchage.

OBJECTIFS ET ORGANISATION DE L'ETUDE :

L'objectif de ce travail consiste à apporter notre contribution à la valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment dans le but d'économiser les ressources naturelles, de limiter les émissions de gaz (transports, fabrication, etc.) et veiller à la santé des occupants et pour obtenir une BTCS durable.

CHAPITRE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1- HISTOIRE DE LA TERRE:

Les premières traces de construction en terre remontraient donc à environ 11 millénaires tandis que les plus anciens bâtiments qui nous sont parvenus datent du début de l'antiquité.

Les origines du bloc de terre comprimé remontent à des milliers d'années où la terre était moulée en briques séchées au soleil. Cette technique nouvelle qu'on nomme adobe, marque une étape historique dans l'évolution de l'habitat humain. (HOUBEN et GUILLAUD, 1989).

I.1.1- Antiquité :

Selon l'Auroville Earth Institute, le bâtiment de terre le plus ancien encore debout aujourd'hui daterait d'environ 3300 ans. Il s'agit du Ramesseum en Egypte construit à Thèbes en face de Louxor, de l'autre côté du Nil. Actuellement en cours de rénovation, ses voûtes en berceau font partie des plus anciennes. Les briques constituant les voûtes et les murs sont de taille différente. Des matières comme du limon, sable, paille, tessons de céramique et petits galets entrent dans la composition de ces briques, mortiers et enduits, qui ont permis de traverser les âges. En effet, les ressources de la vallée du Nil sont plurielles : le Nil apporte le limon argileux et l'eau, les céréales fournissent la paille et le désert contient le sable. D'autres mastabas funéraires royaux ont été construits en briques moulées. La technique évolue ensuite vers des constructions en briques de terre recouvertes par de la pierre, matériau plus noble et d'éternité. L'architecture de terre est alors plutôt utilisée pour les bâtiments civils, de la maison populaire aux cités des grands rois.



Figure I.1 : Ruines du Ramesseum, Egypte

En Mésopotamie, des constructions à nombreux étages appelés ziggourats ont été construites. La tour de Babel, appelée également ziggourat Etemenanki (maison du ciel et de la Terre)

a été construite vers -600 avant JC. Elle s'étale sur une base carrée de 90 mètres de côté et culmine à une altitude vertigineuse de 90 mètres sur 7 niveaux. Pour monter si haut avec de la terre crue, les babyloniens ont inventé la technique de la terre armée selon laquelle des roseaux torsadés sont insérés dans les parties centrales de briques de terre crue perforées. De l'asphalte et du bitume rentrent parfois dans la composition de ces constructions hors norme. Enfin, l'enceinte extérieure de la tour est protégée par une enveloppe de brique de terre cuite qui protège la terre crue des intempéries.



Figure I.2 : Ziggourat de Babylone, ou tour de Babel (image réelle et virtuelle)

D'autres techniques plus ou moins avancées se développent également en parallèle dans d'autres régions du monde comme en Extrême-Orient, en Europe ainsi qu'en Amérique.

1.1.2- Moyen-âge :

Les romains diffusent la technique de cuisson des briques et le blocage, les constructions rudimentaires faites de long bois fendus et torchis sont couramment employées au moyen-âge.

Le savoir-faire propre à l'architecture des mosquées a su traverser les siècles pour nous parvenir et a permis de construire relativement récemment des édifices religieux remarquables, comme la grande mosquée de Bobo-Dioulasso construite en 1882 au Burkina Faso.



Figure I.3 : Mosquée de Bobo-Dioulasso au Burkina Faso (gauche) et Remparts massifs de l'Alhambra à Grenade (droite)

1.1.3- La renaissance :

Au XVIème siècle, apparaissent les premiers gratte-ciels en briques de terre crue. Le but de ces cités états est de densifier l'habitat en bâtissant sur plusieurs niveaux pour former des cités entières en terre massive, protégées ainsi des assaillants. Pour alléger les immeubles, les murs sont plus épais en bas qu'en haut et les ouvertures sont plus importantes en haut qu'en bas. Au Yémen, la cité Shibam compte des ensembles de huit étages jusqu'à 30 mètres, également classés patrimoine mondial de l'UNESCO.



Figure I.4 : Le Manhattan du désert, à Shibam au Yémen

1.1.4- L'ère contemporaine :

La construction en terre crue perdure alors jusqu'au milieu du XXème siècle grâce à la simplicité et au faible cout de ce matériau local. Durant cette période, la technique de compactage fait son apparition suite à la nécessité d'améliorer la qualité des matériaux et la durabilité des bâtiments voulues par tout un chacun. La progression récente vers le bloc de terre comprimé (BTC) est une extension logique du développement de la brique de terre cuite suite à la révolution industrielle. En effet, la technique de compression de la BTC vient directement des industries des tuiles et briques de terre cuite. Après la deuxième guerre mondiale et plus tard pendant la crise du pétrole, la volonté d'économiser de l'énergie, cumulée aux problèmes d'approvisionnement en cas de pénurie d'énergie, ont été deux facteurs catalyseur du développement de la BTC encourageant même l'élargissement de son application architecturale dans des régions confrontées à des coûts énergétiques élevés.

Cependant, l'usage du béton, acier et verre vient largement concurrencer la construction en terre pour la rendre minoritaire dans les pays les plus développés. Plus récemment, les matériaux naturels retrouvent un regain d'intérêt dans la construction, grâce à la prise de conscience environnementale. La terre crue intéresse à nouveau car elle présente de nombreux

avantages que ne présentent pas nos matériaux de constructions modernes (recyclable, locale, non polluante, saine, naturelle, sans déchets, réparable, inertie et hygrométrie...)

I.2- LE MATERIAU TERRE :

I.2.1- Au niveau géologique :

La terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. A l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil ou encore le gel, les particules de roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petits, les sédiments.

Dans le monde, La terre est utilisée dans des territoires extrêmement différents depuis les plus hautes régions du monde comme au Tibet ou dans les Andes au Pérou, jusqu'au territoire les plus bas comme au bord du Nil en Egypte ou dans les vallées fertiles de Chine le long du Huanghe. Elle est utilisée sur tous les continents comme matériau de construction depuis plus de onze millénaires comme on le peut le voir sur cette carte réalisée par le CRATerre :

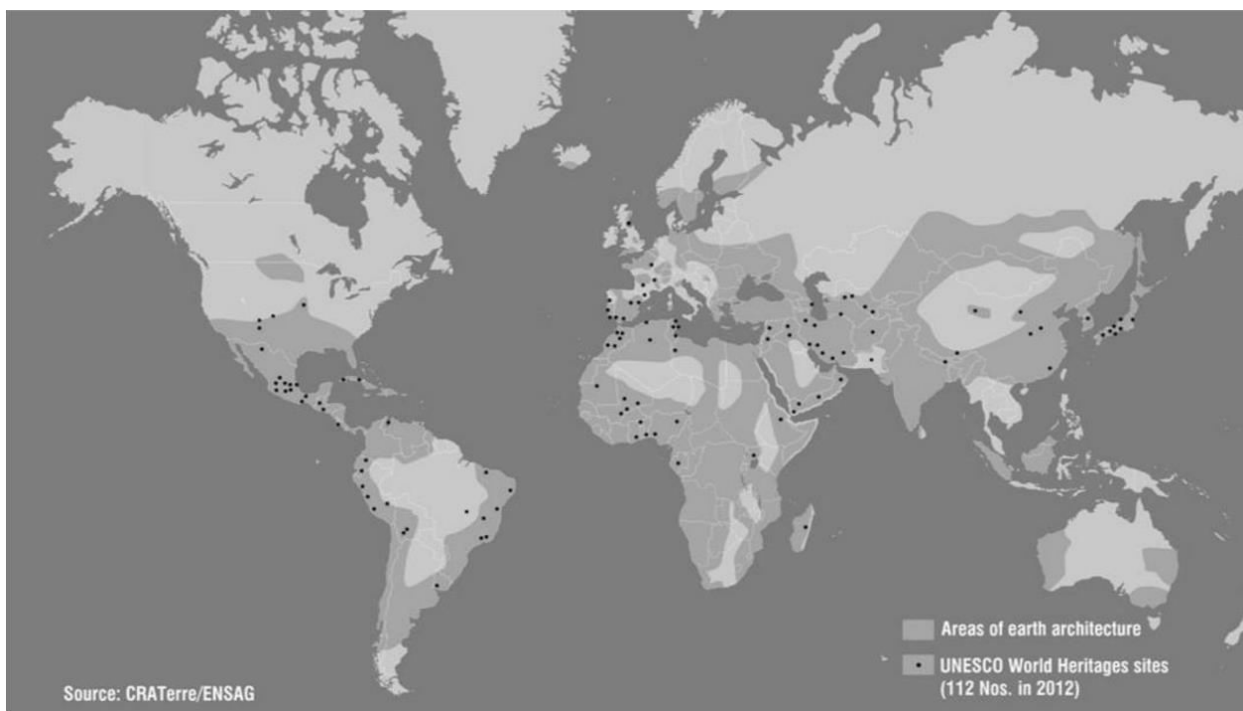


Figure I.5 : Carte de répartition des constructions de terre en le monde.

La terre représente une partie importante des matériaux d'architecture utilisés dans le monde.

I.2.2- Au niveau microscopique :

La partie microscopique de la terre est constituée par nature de différentes phases. La première est la phase liquide, contenant majoritairement de l'eau et quelques corps en solution. La seconde est la phase gazeuse, qui contient essentiellement de l'air. Enfin, la phase solide comprend des matières minérales et organiques insolubles dans l'eau.

On cherche à réduire son incorporation dans les terres. L'eau par contre est un facteur important et se présente sous plusieurs formes. L'eau libre est mobile par gravitation ou capillarité en fonction des paramètres thermohydriques. L'eau interstitielle est contenue dans les pores fins où la capillarité la retient, et peut être éliminée par séchage en étuve.

Les matières minérales sont issues de l'altération de la roche mère et forment la partie mécanique du sol. Elles sont des fragments de la roche initiale et des minéraux silicatés ou calcaires. Ce sont celles-ci qui forment le matériau principal de construction et que l'on nommera terre crue pour la suite. Les éléments minéraux sont généralement majoritaires dans le sol. Selon leur état, on peut les classer en deux sous-catégories (HOUBEN et GUILLAUD, 2006) :

- Minéraux non dégradés : semblables à la roche mère, ils sont constitués des graviers, sables et silts.

- Minéraux dégradés : ils ont été fortement altérés et forment par leur taille réduite (2µm), une pâte collante en présence d'eau. On les dénomme colloïdes de par la propriété collante qu'ils confèrent à la terre. Ils sont principalement constitués d'argiles.

I.2.2.1- Des grains :

Les graviers, les sables et, dans une moindre mesure, les limons se caractérisent donc par leur stabilité en présence d'eau. Lorsqu'ils sont secs, ils ont peu ou pas de cohésion et, par conséquent, ils ne peuvent pas être utilisés seuls comme matériaux principaux d'un bâtiment.

II .2.2.2- Les argiles :

Les argiles font partie des colloïdes et sont extrêmement importants pour la cohésion des sols. Elles sont des particules minérales microscopiques avec des caractéristiques complètement différentes des silts, sables et graviers d'un point de vue chimique comme physique.

A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillet.

Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique.

I.2.3- Minéralogie de l'argile :

L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral. Ainsi, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom. Il y a de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspore,...) ou encore des minéraux ferrifères (lépidocrocite, maghémite...). Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2 μm (Michot, 2008).

I.2.3.1- Structure :

Les phyllosilicates sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de SiO_4 forment des feuillets infinis bi-dimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1.

Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates , d'après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993).

Nature du feuillet	Exemples
1 :1	- Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 :1	- Talc - Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite - Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique - Muscovite, Illite, Paragonite, biotite - Margarite, clintonite - Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	- Sépiolite, Palygorskite

I.2.4- Classification des argiles :

1 :1 : - Pas de cations ou seulement de l'eau.

2 :1 : - Pas de cations.

- Cations hydratés et échangeables.
- Cations monovalents nonhydratés.
- Cations divalents non-hydratés.
- Hydroxyles.

I.2.5- Principaux types d'argiles :**a. La kaolinite :**

Les kaolinites sont des argiles dioctaédriques de type 1:1 (ou T-O) avec une épaisseur du feuillet de l'ordre de 7,2 Å.

b. La montmorillonite :

Le feuillet élémentaire (type 2:1 ou T-O-T) est constitué de deux couches tétraédriques de silice encadrant une couche octaédrique d'alumine. L'empilement des feuillets est désordonné:

Chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent et a une extension latérale extrêmement importante par rapport à son épaisseur qui est d'environ 9,6 Å.

c. L'illite :

Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å.

I.2.6- Caractéristiques des terres :

Les propriétés de la terre changent d'un sol à l'autre en fonction de la nature des fractions de particules qui la compose. En général, c'est la fraction dominante d'un sol qui caractérise ses propriétés fondamentales et dicte son comportement. On peut distinguer d'une part les propriétés chimiques qui sont liées à la présence de sels, d'oxydes et de sulfates, et d'autre part

entre les propriétés physiques, nombreuses et qui incluent la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la densité apparente sèche, la teneur en humidité, la porosité, la capacité d'absorption, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance à la sécheresse etc.

I.2.7- La texture :

La distribution granulométrique du sol, c'est-à-dire la quantité de graviers, de sables, de limons et d'argiles proportion massique.

La classification des fractions des grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et réfèrent aux normes (A.S.T.M, AFNOR) est la suivante (Houben, 2006):

Tableau I.2 : Diamètres des différent tybe des grains

Type des grains	Diamètre max	Diamètre min
Cailloux	200 mm	20 mm
Graviers	20 mm	2 mm
Sables grossiers	2 mm	0.2 mm
Sables fins	0.2 mm	0.06 mm
Silts	0.06 mm	0.02 mm
Silts fins	0.02 mm	0.002 mm
Argiles	0.002 mm	0

a- La plasticité :

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité, l'indice de plasticité).

Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols (Burrough, 2001).

Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent (USACE, 2000).

b- La compressibilité :

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée et moins l'eau pourra y pénétrer.

La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et de ce fait, incompressibles.

c- La cohésion :

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier qui lie les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. (Houben, 2006). La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

Les matériaux inertes du sol (graviers à limons) agissent comme un squelette et les colloïdes (argiles) agissent comme un agent liant, assimilable à un ciment léger. La structure d'une terre est donc comparable à celle du béton avec un liant différent.

I.2.8- La stabilisation :

Afin de remédier aux principaux problèmes rencontrés avec l'utilisation de la terre crue dans le domaine de la construction, plusieurs techniques de stabilisations sont utilisées. Les caractéristiques d'un mélange terre-eau sont ainsi améliorées : résistance mécanique, résistance à l'eau de pluie ou diminution de la fissuration lors du séchage.

I.3- LA STABILISATION :

I.3.1- Définition :

Le terme stabiliser signifie intervenir sur les caractéristiques d'un mélange terre-eau-air afin de lui conférer des propriétés particulières permanentes et supérieures à l'état initial. On veut en général augmenter les résistances mécaniques, réduire la porosité, réduire la sensibilité à l'eau et aux agressions extérieures et obtenir une meilleure cohésion. Il n'est possible d'agir que sur deux critères de la terre, sa texture et sa structure selon les 3 procédés suivants :

- Résistance mécanique : augmenter les forces de liaisons internes.

- Porosité : diminuer le volume des vides entre les grains.

- Perméabilité : combler les vides impossibles à éliminer.

I.3.2- Procédés :

On dénombre trois procédés de stabilisation (Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992, Webb, 1994) :

a- Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

b- Stabilisation physique :

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

c- Stabilisation chimique :

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité (Akpokodje, 1985).

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée (Ghoumari, 1989).

I.3.3- Stabilisation par le ciment :**I.3.3.1- Définition :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le ciment est obtenu à partir d'un ou plusieurs constituant(s).

La norme NF EN 197-1

I.3.3.2- Les constituants principaux :

Les ciments courants ont pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : (Festa Jean et Dreux Georges, 2007).

- Calcaire - Laitier de haut fourneau - Cendres volantes - Fines calcaires - Pouzzolane naturelle - Schistes calcinés - Fumées de silice.

I.3.3.3- Les types du ciment :

L'industrie cimentière commercialise de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction des ouvrages :

- Résistances mécaniques
- Résistance à une attaque physique ou chimique
- Mise en œuvre particulière.

Tableau I. 3: liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 %	
CEM II /B		65 à 79 %		- 21 à 35 %
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %		-35 à 65 %
CEM III/B		20 à 34 %	Laitier	- 66 à 80 %- 0 à 5%
CEM III/C		5 à 19 %		- 81 à 95 %
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, cendre	- 10 à 35 %
CEM IV/B		45 à 64 %	ou fumée silice	- 36 à 55 %
CEM V/ A	Ciment au laitier et	40 à 64 %	Laitier et cendre	-18 à 30 %
CEM V/ B	aux cendres	20 à 39 %		- 31 à 50 %

I.3.3.4- Les classes du ciment :

En plus des valeurs caractéristiques des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs limites de résistance à la compression applicables à chaque résultat d'essai. Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal » selon la norme NF EN 196-1.

Tableau I. 4: les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.

Valeurs limites de résistance à la compression		
Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa	
	2 jours	28jours
32,5 N	-	≥ 32.5
32,5 R	≥ 13.5	≥ 32.5
42,5 N	≥ 12.5	≥ 42.5
42,5 R	≥ 20	≥ 42.5
52,5 N	≥ 20	≥ 52.5
52,5 R	≥ 30	≥ 52.5

I.3.3- Stabilisation par la chaux :

I.3.3.1- Définition :

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique.

Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

I.3.3.1.1- Les chaux aériennes : Fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.

I.3.3.1.2- La chaux vive (CaO) : C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avide d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150° (réaction très exothermique).

I.3.3.1.3- La chaux éteinte(CaOH₂) : Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

I.3.3.1.4- Les chaux hydrauliques : Sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent. (Mahamat S, 2010)

I.3.3.2- Caractéristiques de la chaux :

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que :

- Un pouvoir assainissant et désinfectant.
- Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant.
- Une participation à la respiration de l'ouvrage.
- Une élasticité.
- Une tenue dans le temps encore inégalité.
- Une absorption des CO₂ lors de la carbonisation.(Mahamat S, 2010)

I.4- LES DIFFERENTS TYPES DE CONSTRUCTION EN TERRE :

Il existe plusieurs possibilités de constructions en terre. On dénombre 12 techniques radicalement différentes mais il existerait plus d'une centaine de variantes employées en fonction de paramètres comme le type de terre disponible, l'usage voulu, le climat etc. Toutes ces techniques n'ont pas connu le même succès et ne sont pas toutes utilisées dans la même mesure (ANGER et FONTAINE, 2009) :

I.4.2- Pisé : la terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Traditionnellement, ces outils sont en bols.



Figure I.8 : Les techniques de la construction en pisé (vallée du Todrha.)

I.4.3- Terre-paille : pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille.



Figure I.9 : Fabrication de la terre-paille

I.4.4- Torchis : une structure en colombages et claires de bois est hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres, constitue les parois de la bâtisse.



Figure I.10 : Les techniques de la construction en torchis.

I.4.5- Terre façonnée: cette technique ancestrale est toujours fréquemment utilisée. La terre est façonnée de la même façon que pour la poterie, sans outils.

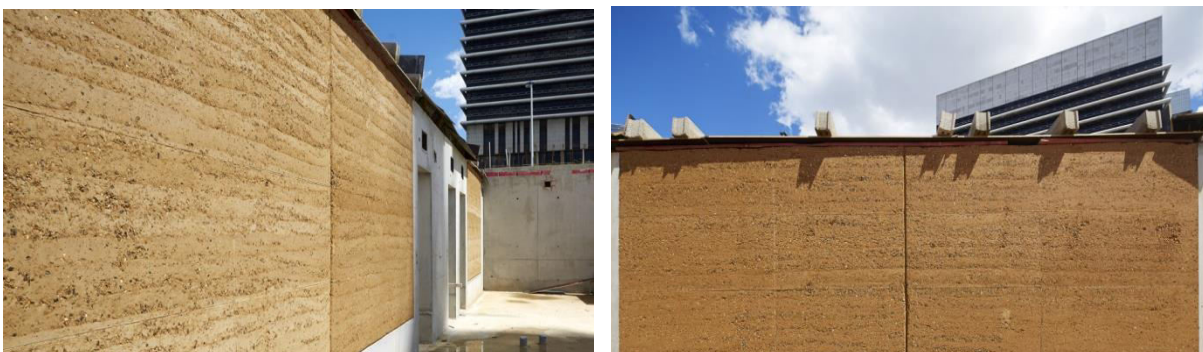


Figure I.11 : Mure en terre façonnée.

I.4.6- Blocs de terre comprimés : pendant longtemps, on a fabriqué des blocs de terre à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes. Les produits obtenus sont extrêmement variés.



Figure I.12 : Les techniques de fabrication de la BTC.

I.4.7- Bauge : ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.



Figure I.13 : Les techniques de la construction avec la bauge.

I.4.8- Terre extrudée : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.



Figure I.14 : Construction en terre extrudée.

Aujourd'hui, ce sont les techniques de l'adobe, du pisé et du bloc comprimé qui sont les plus à l'honneur et même abordées à un très haut niveau de recherche scientifique et technologique. On peut regretter que ces trois genres techniques majeurs s'imposent au détriment des autres dont l'intérêt n'a pas été encore épuisé.

I.5- Blocs de terre comprimée (BTC) :

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente. Elle a été développée dans les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compression de la terre, légèrement humide dans une presse métallique. Comparé au bloc moulé à la main, la BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau (CRATerre, 1991).

L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance des blocs de terre moulée est pourtant ancienne et c'est à l'aide de pions en bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Ce procédé est encore utilisé de par le monde. Les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées au XVIIIe siècle. Mais ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on imagina les premières presses mécaniques qui utilisaient de lourds couvercles rabattus avec force dans le moule. Des presses de ce type ont même été motorisées.

L'industrie de la brique cuite a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux. Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la fameuse petite presse "CINVA RAM", imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie. Elle fut utilisée dans le monde entier. Les années 70 et 80 ont amené l'apparition d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée (Rigassi, 1995).

I.5.1- Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Houben, 2006) (voir figure 1.2):

a- Blocs pleins :

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.

b- Blocs creux :

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

c- Blocs alvéolaires :

Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.

d- Blocs à emboitements :

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.

e- Blocs parasismiques :

Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.

f- Blocs spéciaux :

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.



Figure I.15 : Différents produits de blocs de terre comprimée.

I.6- LA BRIQUE DE TERRE COMPRIMÉE ET STABILISÉE :

Aujourd'hui, la BTC fait figure de favori en tant que matériau de construction fabriqué à partir de terre. Effectivement, dans certaines conditions, elle peut rivaliser avec les briques cuites ou des blocs de béton. Parce qu'elle fait intervenir plusieurs secteurs, la BTC est en outre un véritable vecteur de développement social et durable au niveau local. Mais elle présente également de nombreux avantages par rapport à d'autres techniques :

I.6.1- Résistance : performances mécaniques améliorées grâce à l'effort de compression appliqué.

I.6.2- Flexibilité : la BTC peut être fabriquée selon des procédés très simples (de façon artisanale ou industrielle, avec un traitement mécanique ou manuel, avec des moyens très sommaires ou dans de grosses installations, dans des milieux urbains comme ruraux etc.).

I.6.3- Standardisation : Les dimensions sont standardisées et les exigences de qualités sont élevées.

I.6.4- Adaptabilité : Utilisée en murs porteurs ou remplissage, en paroi plane, courbe ou voutes, la BTC est polyvalente,

I.6.5- Finition : La BTC est propice à une architecture de grande finesse, laissant la matière s'exprimer à travers sa texture et sa couleur. Elle peut être utilisée pour des projets modestes comme pour les plus somptueux,

I.6.6- Ressource locale : Une excellente alternative à l'importation.

I.7- LA CURE :

Cette étude des blocs de terre comprimée destinés à la construction. Ce choix résulte à l'intérêt économique et thermique que revêt ce matériau. D'après les résultats expérimentaux on peut tirer :

- La cure par vapeur à 24 heures accélère le durcissement des briques de terre stabilisée à la chaux et donne des meilleures résistances mécaniques surtout la résistance en compression humide par rapport au durcissement à l'atmosphère humide à 28jours.

I.8- CONCLUSION :

A travers cette analyse bibliographiques, nous avons remarqué que plusieurs recherches ont mis l'accent sur la compressibilité de la brique de terre comprimée. Afin d'aboutir à des BTC durable le mode cure est très indispensable selon la diversité des environnements.

Donc la synthèse des recherches antérieures ont mis en évidence le besoins de faire des recherches sur la durabilité de la BTC tout en respectant l'environnement.

Nous essayons à travers de cette d'aboutir à des résultats efficace afin d'améliorer les paramètres de durabilité de BTC.

CHAPITRE II

METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1- INTRODUCTION :

Les plans d'expérience sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité.(Tinsson, 2010).

II.2- CHOIX DE LA METHODE D'EXPERIMENTATION :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum. (Cours Pr bencheikh).

II.3- LES DIFFERENTS TYPES DE FACTEURS :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens. (Cours Pr bencheikh).

a- facteurs continus :

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

b- Facteurs discrets :

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

c- Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

d- Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.4- NOTION D'ESPACE EXPERIMENTAL :

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

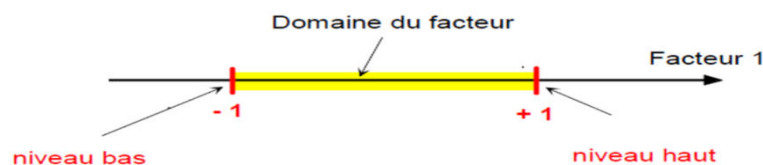


Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur.

Le niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par $+1$. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de

variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure II.2).

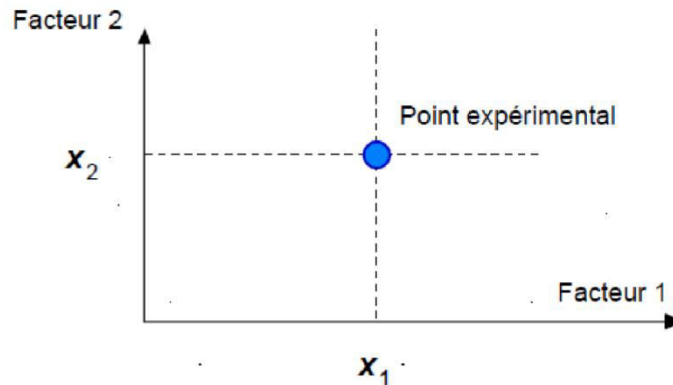


Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental. Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

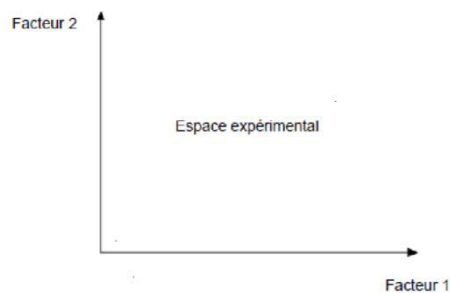


Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le

domaine d'étude (Figure II.4). Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

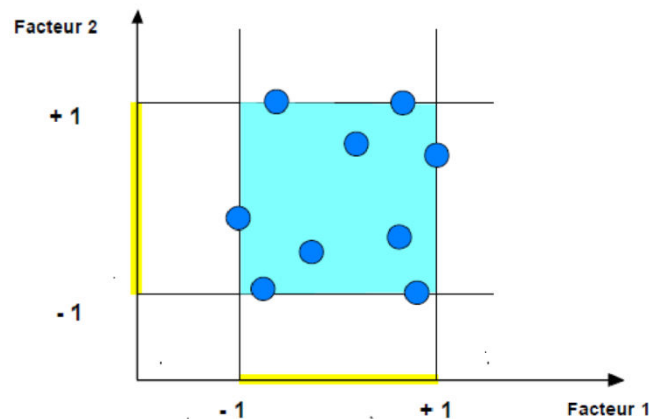


Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

II.5- LOGICIEL UTILISÉ :

II.5.1- Présentation de logiciel « Minitab » :

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par Minitab, Inc. pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ». Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

II.5.2- Diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto est un graphique représentant l'importance de différentes causes d'un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation.

II.5.3- Diagramme des effets principaux :

Un graphique des effets principaux permet d'examiner les différences entre les moyennes des niveaux d'un ou plusieurs facteurs. On parle d'effet principal lorsque les différents niveaux d'un facteur ont une incidence sur la réponse. Un graphique des effets principaux affiche la moyenne de la réponse pour chaque niveau de facteur connecté par une ligne.

Lorsque vous sélectionnez **Stat > ANOVA > Graphique** des effets principaux, Minitab

créé un graphique qui utilise les moyennes des données. Après avoir ajusté et stocké un modèle, vous pouvez l'utiliser pour générer des graphiques utilisant des moyennes ajustées.

II.5.4- Diagramme des interactions :

La fonction Diagramme des interactions permet de déterminer l'influence d'un facteur de catégorie sur la relation entre un second facteur de catégorie et une réponse continue. Ce diagramme affiche les moyennes correspondant aux niveaux d'un facteur sur l'axe des X, ainsi qu'une courbe distincte pour chaque niveau d'un autre facteur.

II.5.5- Equation de régression :

Une équation de régression permet de décrire la relation entre la réponse et les termes du modèle. L'équation de régression est une représentation algébrique de la droite de régression. L'équation de régression pour le modèle linéaire prend la forme suivante : $Y = b_0 + b_1x_1$. Dans l'équation de régression, Y représente la variable de réponse, b_0 est la constante ou l'ordonnée à l'origine, b_1 est le coefficient estimé du terme linéaire (également appelé pente de la droite) et x_1 est la valeur du terme.

L'équation de régression avec plusieurs termes prend la forme suivante :

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k$$

Dans l'équation de régression, les lettres représentent les éléments suivants :

y est la variable de réponse

b_0 est la constante

b_1, b_2, \dots, b_k sont les coefficients

X_1, X_2, \dots, X_k sont les valeurs du terme

Si le modèle contient à la fois des variables continues et des variables de catégories, le tableau de l'équation de régression peut afficher une équation pour chaque combinaison de niveaux des variables de catégorie. Pour utiliser ces équations afin d'effectuer des prévisions, vous devez choisir celle qui est la mieux adaptée, en vous fondant sur les valeurs des variables de catégorie, puis entrer les valeurs des variables continues.

II.6- CONCLUSION :

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.

CHAPITRE III

MATERIAUX ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1- Introduction :

À travers la synthèse bibliographique, on a pu voir que les phénomènes physicochimiques jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique des blocs de terre comprimée et sur leur durabilité.

Dans ce chapitre on présente les différents critères de sélection d'un matériau destiné à la confection de brique de terre comprimée (BTC).

III.2- Matériaux utilisés :

III.2.1- Sol :

Pour fabriquer notre BTCS nous utilisons des matériaux locaux sont toujours disponibles se forme de roche à notre wilaya de M'sila et sont des matériaux presque gratuit (juste prix de livraison).



Figure III.1 : Argile rouge



Figure III.2 : Argile grise



Figure III.3 : Argile verte

Nous avons utilisés trois types d'argile, argile n°1 « argile rouge (R) », argile n°2 « argile grise (G) » et argile n°3 « argile verte (V) » (après broyage).



Figure III.4 : Argile n°1 R



Figure III.5: Argile n°2 G



Figure III.6: Argile n°3 V

III.2.1.1- Essais d'identifications :

a- Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de chacun dans le granulat la représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement (Figure III. 7).



Figure III.7 : Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.

Tableau III. 1: analyse granulométrique pour le type d'argile G.

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus (g)	Cumulés (%)	Tamisât (%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	543,6	543,6	27,18	72,82
0,315	568,8	1112,4	55,62	44,38
0,160	465,3	1577,7	78,88	21,12
0,08	240,5	1817,5	90,87	9,13
Fond	182,4	1999,9	99,99	0,01

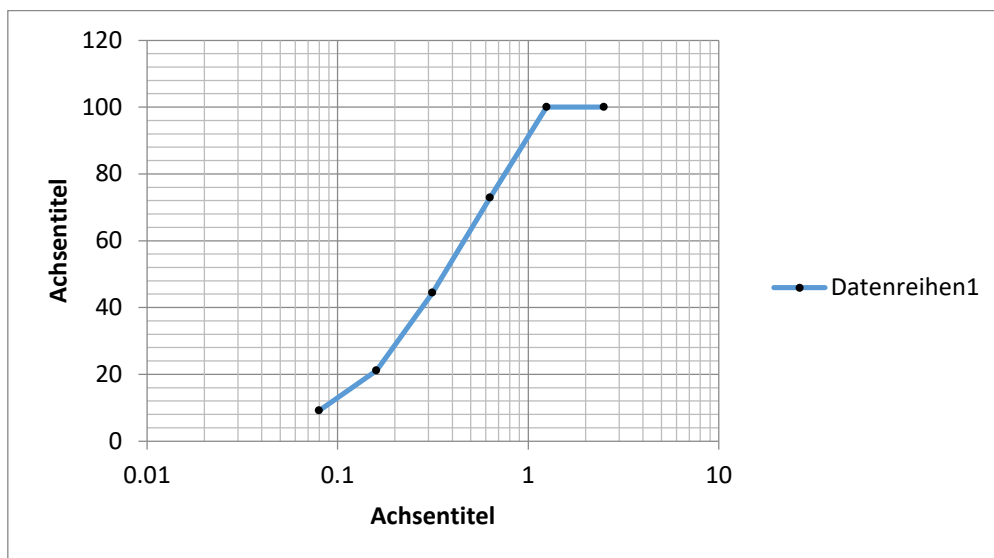


Figure III.8- Analyse granulométrique d'argile G

Tableau III. 2: analyse granulométrique pour le type d'argile Argile R.

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus Cumulés (g)	Cumulés (%)	Tamisât (%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	438	438	21,9	78,1
0,315	532,8	970,8	48,54	51,46
0,160	601,8	1572,6	78,63	21,37
0,08	302,7	1875,3	93,76	6,24
Fond	124,3	1999,6	99,98	0,02

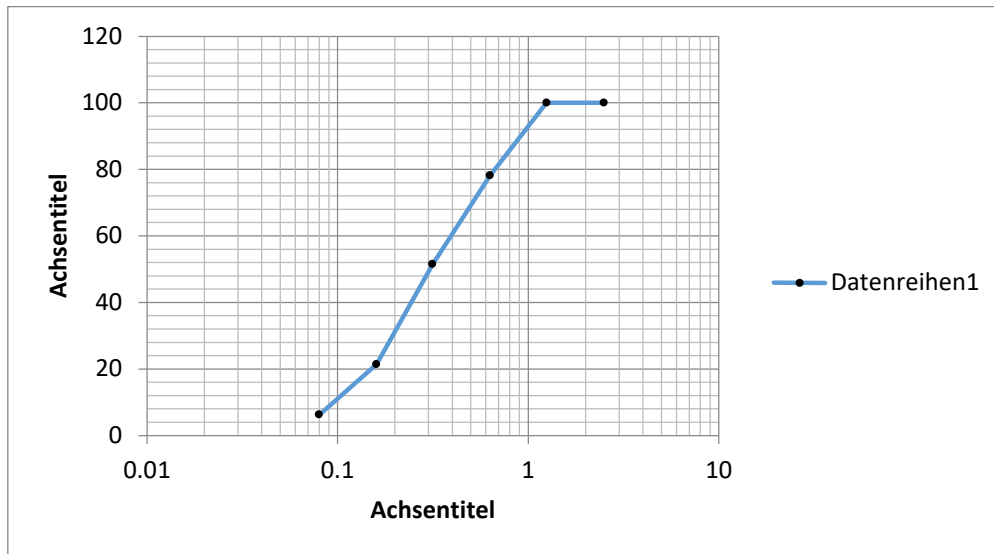


Figure III.9- Analyse granulométrique d'argile R

Tableau III.3 : analyse granulométrique pour le type d'argile Argile V.

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus Cumulés		Tamisât
		(g)	(%)	(%)
2,5	00	00	00	100
1,25	00	00	00	100
0,630	664,8	664,8	33,24	66,76
0,315	633,9	1298,7	64,93	35,07
0,160	630,8	1929,5	96,47	3,53
0,08	53,2	1982,7	99,13	0,87
Fond	16,8	1999,5	99,97	0,03

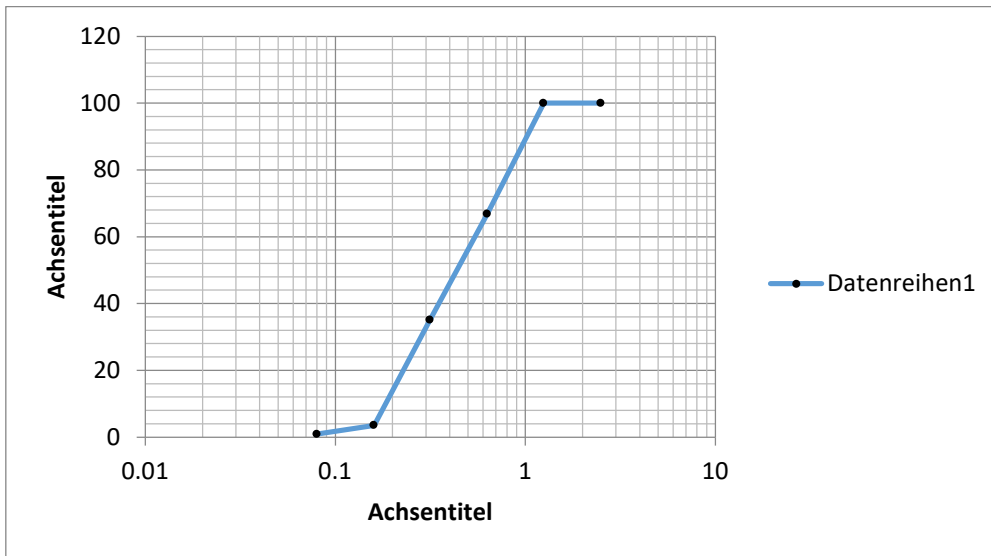


Figure III.10- Analyse granulométrique d'argile V

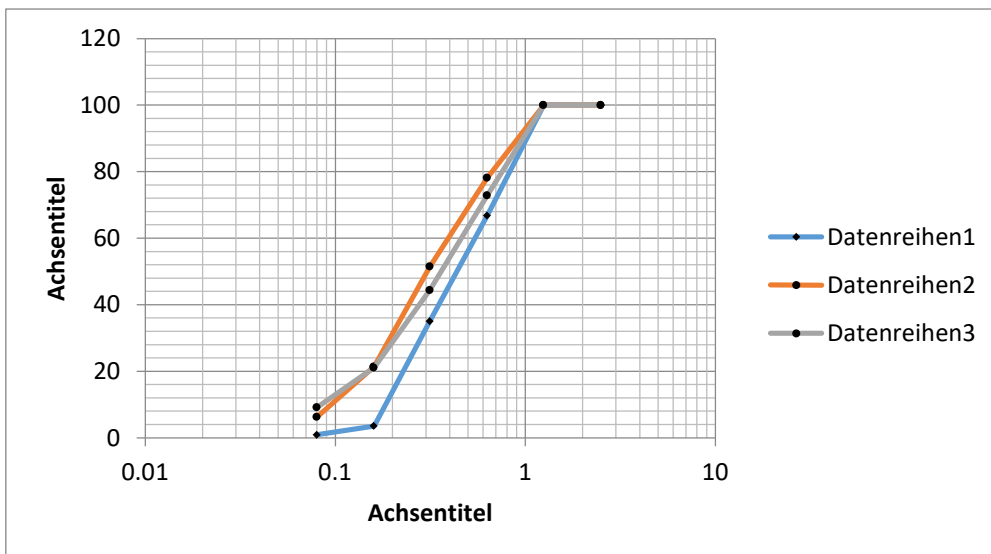


Figure III.11- Analyse granulométrique des 3 types d'argile.

b- Les limites d'Atterberg (NF P 94-051):

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_L),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).



Figure III.12 : Limite de liquidité



Figure III.13 : Limite de plasticité

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_L - W_p$ d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon. Figure III.10



Figure III.14: Appareillage de limites d'Atterberg

Résultats de :

- L'argile verte :

Tableau III-4 : Limites de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	18		27		35	
Tare N°	H	C	R	E	G	Z
Masse de la tare m_T (g)	20.55	20.52	19.77	20.76	20.36	23.89
Masse (sol humide + Tare) (g)	36.99	40.21	33.97	38.03	38.33	45.29
Masse (sol sec + Tare) (g)	33.3	36	31	34.4	34.7	40.9
Masse d'eau m_W (g)	3.62	4.21	2.97	3.64	3.63	4.39
Masse du sol sec m_d (g)	12.75	15.48	11.23	13.64	14.34	17.01
Teneur en eau $W(\%) = m_W/m_d$	28.39	27.19	26.44	26.68	25.31	25.80
$W_{moy}(\%)$	27.79		26.51		25.55	

Tableau III.5 : Conduite d'essai de limite de plasticité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Tare N°	L		G		B	
Masse de la tare m_T (g)	13.62		23.47		13.75	
Masse (sol humide + Tare) (g)	15.16		25.73		15.36	
Masse (sol sec + Tare) (g)	14.8		25.4		15	
Masse d'eau m_W (g)	0.36		0.33		0.36	
Masse du sol sec m_d (g)	1.18		1.93		1.25	
Teneur en eau $W(\%) = m_W/m_d$	30.50		17.09		28.8	
$W_{moy}(\%)$	25.46					

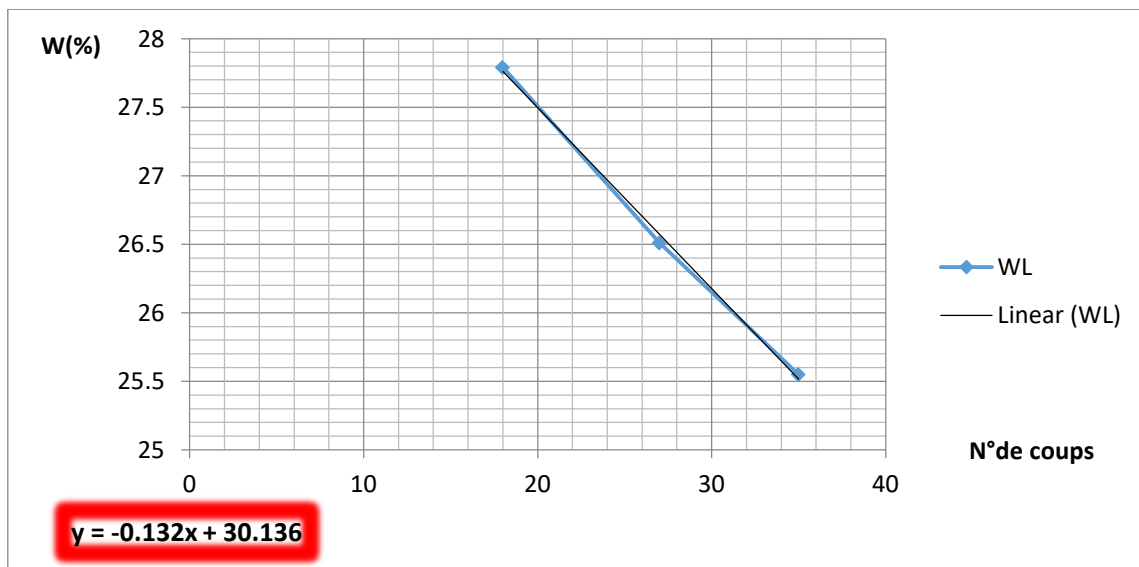


Figure III.15-courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.

W(%)	N° de coupe
27.79	18
26.51	27
25.55	35
WL =	26.83
WP =	25.46
IP = WL-WP	1.37

	a	b
y= ax + b	-0.132	30.13
Wl=	26.83	

D'après le diagramme de Casagrande l'argile étudiée cette classe parmi les sols Limons Peu plastiques.

- L'argile rouge :

Tableau III.6 : Limites de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	17		24		33	
Tare N°	H	C	R	E	G	Z
Masse de la tare m _T (g)	22.55	20.52	19.77	20.76	20.36	23.89
Masse (sol humide + Tare) (g)	48.55	46.83	36.58	44.62	36.15	39.89
Masse (sol sec + Tare) (g)	43.05	41.67	33.30	39.92	33.16	36.83
Masse d'eau m _W (g)	5.5	5.16	3.28	4.7	2.99	3.06
Masse du sol sec m _d (g)	22.5	21.15	13.53	19.16	12.8	12.94
Teneur en eau W(%) = m _W /m _d	24.44	24.39	24.24	24.53	23.35	23.64
W _{moy} (%)	24.415		24.385		23.495	

Tableau III.7: Conduite d'essai de limite de plasticité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Tare N°	L		J		B	
Masse de la tare m _T (g)	13.62		23.47		13.75	
Masse (sol humide + Tare) (g)	16.12		25.06		15.85	
Masse (sol sec + Tare) (g)	15.71		24.81		15.53	
Masse d'eau m _W (g)	0.41		0.25		0.32	
Masse du sol sec m _d (g)	2.09		1.34		1.78	
Teneur en eau W(%) = m _W /m _d	19.61		18.65		17.97	
W _{moy} (%)	18.74					

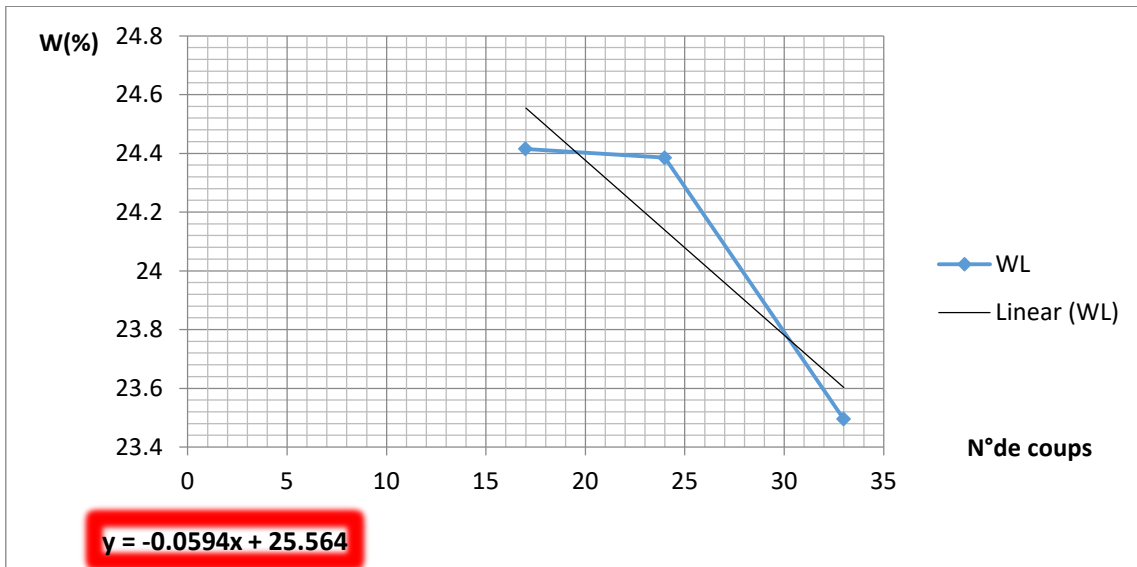


Figure III.16-courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.

W(%)	N° de coupe
24.415	17
24.385	24
23.495	33
WL =	24.085
WP =	18.74
IP = WL-WP	5.345

	a	b
$y = ax + b$	-0.059	25.56
WL =	24.085	

D'après le diagramme de Casagrande l'argile étudiée cette classe parmi les sols Limons Peu plastiques.

- L'argile grise :

Tableau III.8 : Limites de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre de coups	19		24		32	
Tare N°	10A	12A	12B	22A	H	C
Masse de la tare m_T (g)	24.01	24.17	23.59	23.81	13.01	23.66
Masse (sol humide + Tare) (g)	42.57	43.38	36.19	42.44	28.98	42.08
Masse (sol sec + Tare) (g)	36.2	36.8	32	36.2	23.7	36
Masse d'eau m_W (g)	6.37	6.58	4.19	6.24	5.28	6.08
Masse du sol sec m_d (g)	12.19	12.63	8.41	12.39	10.69	12.34
Teneur en eau $W(\%) = m_W/m_d$	52.25	52.09	49.82	50.36	49.39	49.27
$W_{moy}(\%)$	52.17		50.09		49.33	

Tableau III.9 : Conduite d'essai de limite de plasticité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Tare N°	21		25		28	
Masse de la tare m_T (g)	13.63		13.70		23.8	
Masse (sol humide + Tare) (g)	15.86		14.95		25.25	
Masse (sol sec + Tare) (g)	15.3		14.7		24.82	
Masse d'eau m_W (g)	0.56		0.25		0.43	
Masse du sol sec m_d (g)	1.67		1		1.02	
Teneur en eau $W(\%) = m_W/m_d$	33.53		25		42.15	
$W_{moy}(\%)$	33.56					

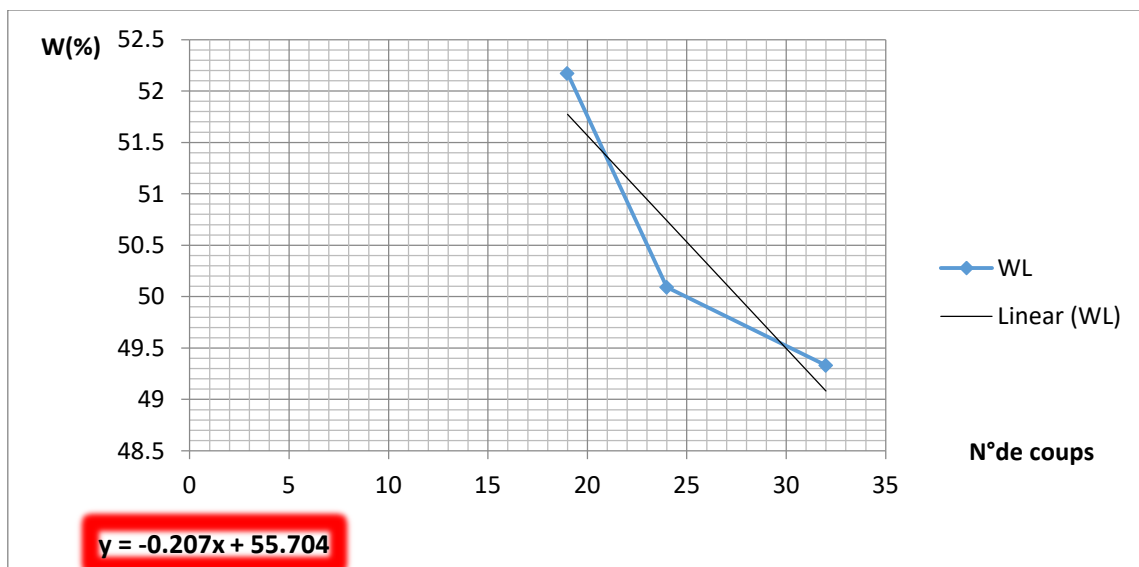


Figure III.17-courbe de teneur en eau (W) en fonction de nombre de coups.

W(%)	N° de coupe
52.17	19
50.09	24
49.33	32
WL =	50.525
WP =	33.56
IP = WL-WP	16.965

	a	b
y= ax + b	-0.207	55.70
Wl=	50.525	

D'après le diagramme de Casagrande l'argile étudiée cette classe parmi les sols argileux très plastique.

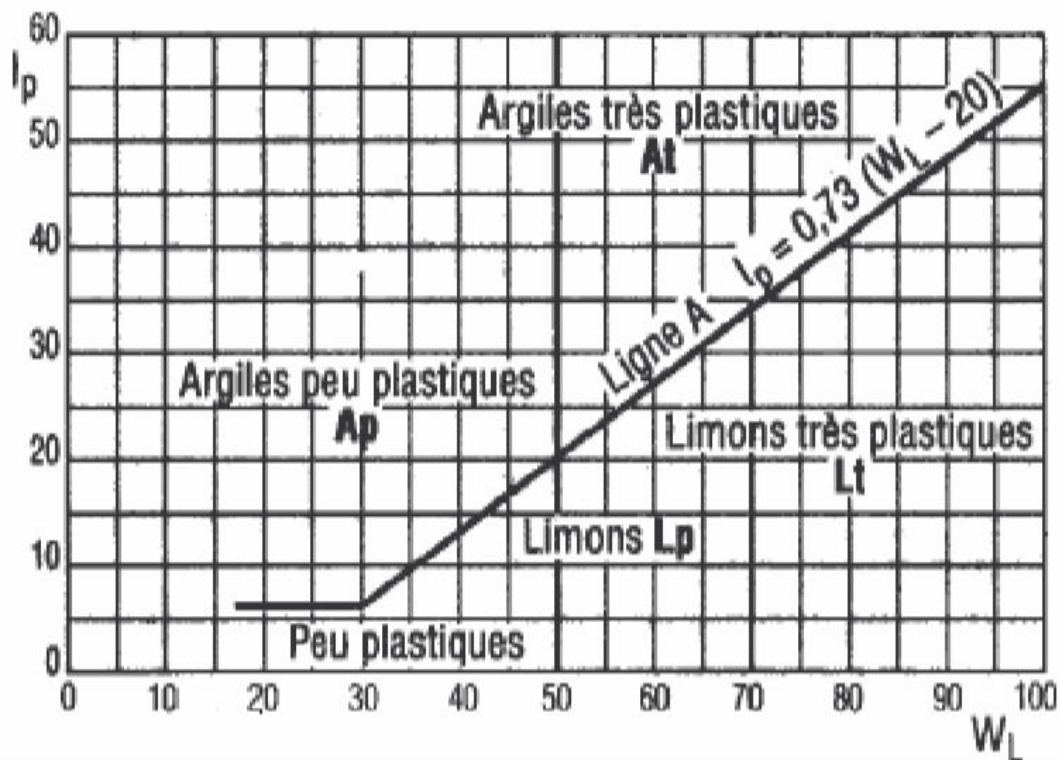


Figure III.18-courbe de casagrande.

III.2.2 : Sable

III.2.2.1- Les essais d'identifications :

a- Analyse granulométrique par tamisage :

Tableau III.10 : Analyse granulométrique par tamisage de sable.

Masse de l'échantillon soumis à l'essai : M =2000gr						
Tamis	Tamis vide (g)	Tamis plain (g)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés en (%) $R(\%) = (R_n/M) \times 100$	Tamisât cumulés en(%) $T(\%) = 100\% - R(\%)$
5	624.8	624.9	0.1	0.1	0.005	99.995
2.5	602.7	637.5	34.8	34.9	1.745	98.255
1.25	507.9	575.7	67.8	102.7	5.135	94.865
0.630	500	677	177	279.7	13.085	86.015
0.315	462.1	1602.2	1140.1	1419.8	70.99	29.01
0.160	278.3	743.3	465	1884.8	94.24	5.76
0.08	273.6	375	101.4	1986.2	99.31	0.96
fond	452	463.8	11.8	1998	99.9	0.1

Module de finesse (NF P 18-540):

MF=1/100 Refus cumulés en % des tamis {0,16- 0,315- 0,63- 1,25- 2,5- 5 mm}

$$M_f = \frac{\sum \text{refus des tamis } 0,16, 0,315, 0,63, 1,25, 2,5, 5}{100} = 0.69$$

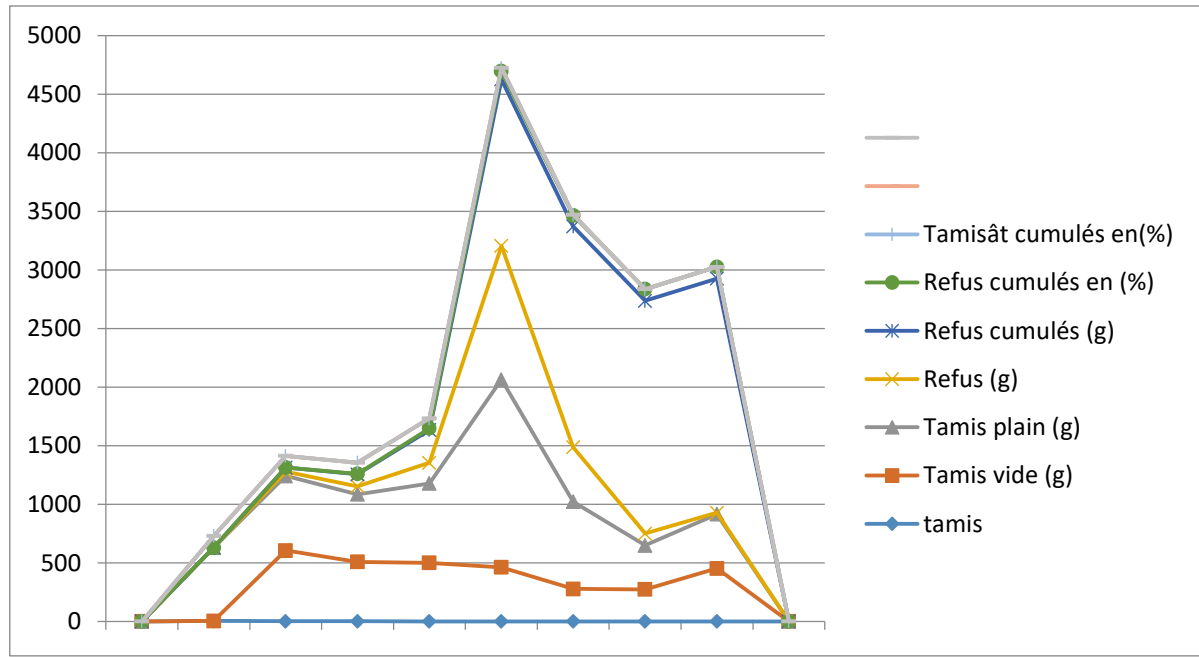


Figure III.19- Analyse granulométrique par tamisage du sable.

b- Equivalent de sable (NF P 18-598) :

L'équivalent de sable (ES) est un essai qui permet de mesurer la propreté du sable.

Il est destiné aux sols plastiques pour lesquels la mesure de l'indice de plasticité est peu précise.

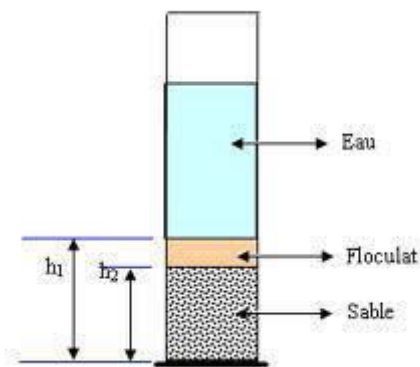


Figure III.20: Essai d'équivalent de sable

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ESV = (h_2 / h_1) * 100$$

$$ESP = (h_2' / h_1) * 100\%$$

Tableau III.11 : la nature du sable en fonction des mesures par l'équivalent de sable selon la norme (NF P 18-598) :

ESV (visuel)	ESP (par piston)	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité
$65\% \leq ES < 75\%$	$60\% \leq ES < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
$75\% \leq ES < 85\%$	$70\% \leq ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de hautes qualités
$ES \geq 85\%$	$ES \geq 80\%$	Sable très propre ; l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.



Figure III.21 : Appareil de l'essai d'équivalent de sable.

TABLEAU III.12 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable

Eprouvette	H1 (cm)	H2 (cm)	H1' (cm)	ESV (%)	ESP (%)
1	11.8	9.2	8.6	77.96	72.88
2	12.5	9.2	9	73.6	72
3	12.4	9.2	9	74.19	72.58
ES moyen (%)				75.25	72.48

Donc la nature et la qualité du ce sable est : Sable propre à faible proportion de fines argileuses.

III.3- OBSERVATIONS MICROSCOPIQUES PAR MEB :

La microstructure des échantillons a été observée et analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) HITACHI S-3600N, comme le montre la figure III.21. Le MEB permet d'observer la topographie de surface d'un échantillon en balayant sa surface par un faisceau d'électrons et en recueillant l'image formée. Vu que les échantillons ne sont pas conducteurs, une métallisation des surfaces est nécessaire en les recouvrant d'une couche fine d'or. Deux méthodes permettent d'obtenir ce résultat. Pour cette étude, la pulvérisation cathodique a été employée. Elle consiste à déposer sur l'échantillon des atomes arrachés à un morceau de métal (or) par de l'argon ionisé dans une enceinte à vide partiel.



Figure III.21 : Métalliseur et MEB HITACHI S-3600N

III.3.1- Résultats de DRX :

Analyse des courbes : les courbes suivantes représentent les courbes d’analyse minéralogique des trois types d’argile.

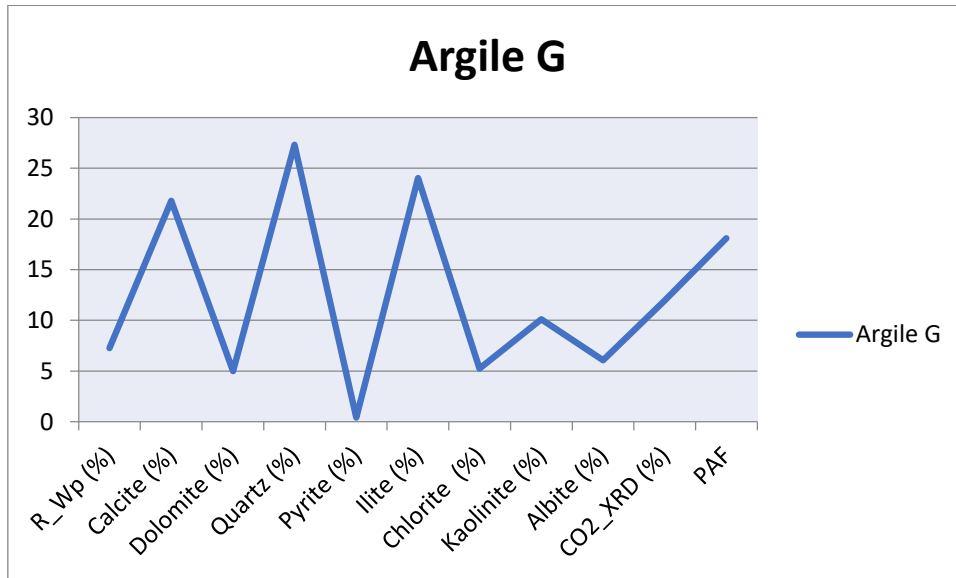


Figure III.22- Analyse minéralogique d’argile grise.

Analyse de l’argile G : d’après ce graphe, on remarque du plus quantité de composante c’est la quantité de quartz après l’illite et la calcite et les autres composante représente des faibles quantités.

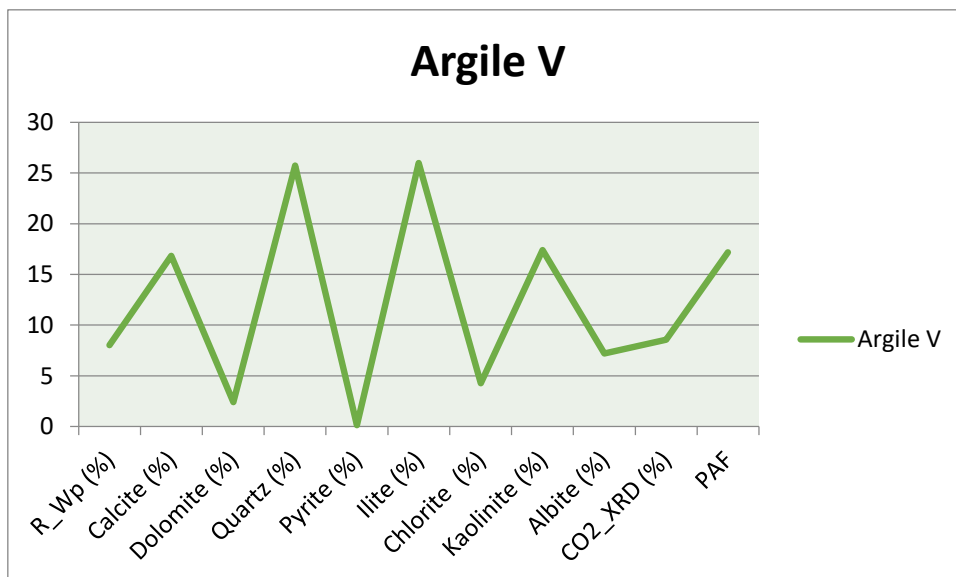


Figure III.23- Analyse minéralogique d’argile verte.

Analyse de l'argile V : d'après ce graphe, on remarque que les plus quantités de composante c'est la quantité de quartz, l'ilite après la kaolinite, et les autres composante représente des faibles quantités.

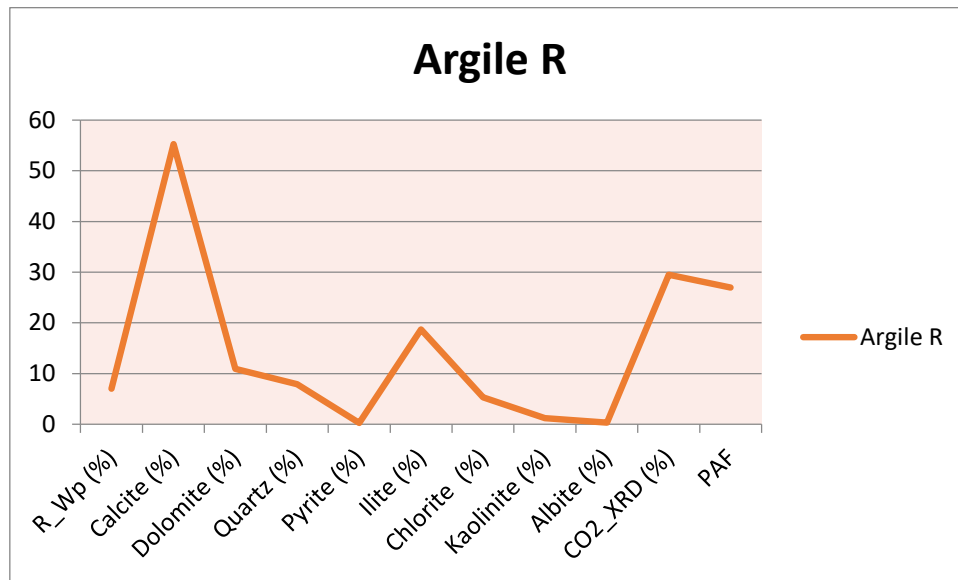


Figure III.24- Analyse minéralogique d'argile rouge.

Analyse de l'argile R : d'après ce graphe, on remarque que la plus quantité de composante c'est la quantité de calcite après les autres composante représente des faibles quantités.

III.4- CONCLUSION :

Ces essais d'identification des matériaux (argiles et sable) complémentaires, ils permettent d'expliquer et d'analyser les résultats obtenus lors d'autres essais. Par exemple, la granulométrie, la composition minéralogique contribuent dans la compréhension des résultats des essais comme DRX et les limites d'Atterberg.

Ce chapitre, avec les différents résultats obtenus, a permis de mettre en place une fiche technique des différents échantillons.

CHAPITRE IV

ELABORATION D'UN MODELE EXPERIMENTALE DE BTC

IV.1- Introduction :

D'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, et après la détermination des caractéristiques des différents matériaux utilisés, nous allons présenter dans ce chapitre les essais réalisées sur les briques de terre comprimées et stabilisées par ciment.

IV.2- Confection des blocs :**IV.2.1- Mélanges :**

Dans le but d'améliorer la durabilité des matériaux locaux utilisés dans les constructions, plusieurs traitements ont vu le jour. Il s'agit par exemple des traitements des latérites par le ciment. Ces techniques d'amélioration de la durabilité des matériaux locaux font appel à la technique de mélange afin d'homogénéiser et de bien répartir le traitement dans l'ensemble du matériau.

IV.2.2- Préparation des mélanges :**IV.2.2.1- Etapes de préparation :**

Les étapes suivantes :

- 1- On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : argile, ciment, sable et eau.
- 2- Préparation des moules : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les moules sont prêts pour utilisation.
- 3- le malaxage : L'opération est exécutée comme suit:

On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment, le sable dans le malaxeur (figure IV.2) et on malaxe le mélange à sec durant 40 à 60 secondes.

On ajoute une quantité d'eau, puis on malaxe pendant 120 à 180 seconde jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

Le malaxage est la préparation des moules sont des opérations importantes dans la fabrication de la BTC. La répartition du stabilisant doit être homogène pour que son effet soit uniforme pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage.

- 4- Le moulage des éprouvettes : cette opération est exécutée a l'aide d'une presse manuelle du laboratoire de développement Géomatériaux d'université de M'sila (figure IV.3).



Figure IV.1 : malaxeur



Figure IV.2 : un mélange



Figure IV.3 : moule utilisé



Figure IV.4 : presse manuelle



Figure IV.5 : Presse mécanique.

Remarque : le moule et les pistons utilisés se forme cylindrique spéciaux de dimensions suivants figure :

- Hauteur de moule : 22 cm.
- Diamètre intérieur de moule : 7cm.
- Diamètre extérieur de moule : 10cm.
- Hauteur de piston : 8cm.
- Diamètre de piston : ≈ 7 cm.

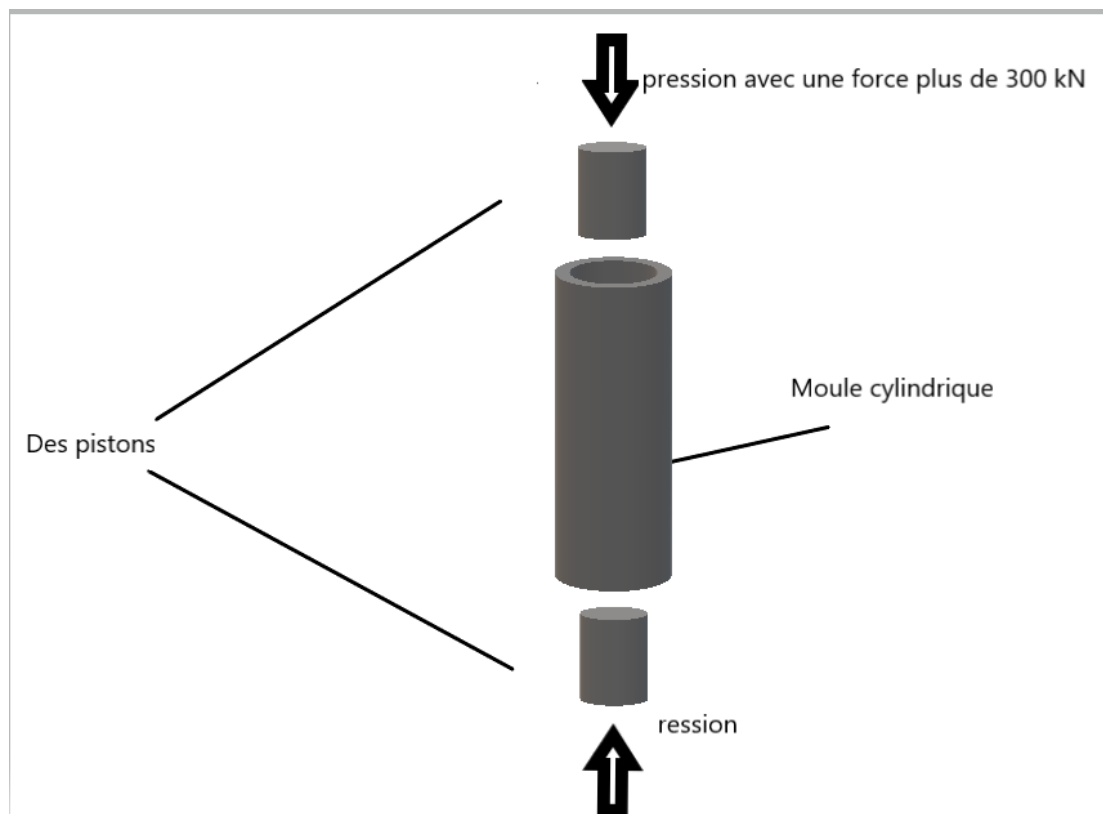


Figure IV.6 : Technique de pression par le moule et les pistons.

IV.2.2.2- Préparation du mélange :

Nous avons fait les études à l'aide d'un logiciel « Minitab », on a choisi les formulations présenté dans les tableaux ci-dessous.

Tableau IV.1 : élaboration des éprouvettes.

nom epv	Mélange	% Eau	Type stab	% Stabilisant
1A	75G/25R+MC	5	S	10
1B	75G/25R	5	S	10
2A	75G/25R+MC	10	S	10
2B	75G/25R	10	S	10
3A	50G/50R+MC	5	S	10
3B	50G/50R	5	S	10
4A	50G/50R+MC	10	S	10
4C	50G/50R	10	S	10
5A	75G/25R+MC	5	S	6
5B	75G/25R	5	S	6
6A	75G/25R+MC	8	S	6
6B	75G/25R	8	S	6
7A	50G/50R+MC	5	S	6
7B	50G/50R	5	S	6
8A	50G/50R+MC	8	S	6
8B	50G/50R	8	S	6
9A	75G/25R+MC	5	M	10
9B	75G/25R	5	M	10
10A	75G/25R+MC	8	M	10
10B	75G/25R	8	M	10
11A	50G/50R+MC	5	M	10
11B	50G/50R	5	M	10
12A	50G/50R+MC	8	M	10
12B	50G/50R	8	M	10
13A	75G/25R+MC	5	M	6
13B	75G/25R	5	M	6
14A	75G/25R+MC	8	M	6

14B	75G/25R	8	M	6
15A	75R/25G	15	M	10
16A	1/3G,1/3R,1/3S	15	M	10
17A	1/3R,1/3G,1/3CC	15	M	10
18A	75R/25S	15	M	10
19A	50R/50V	15	M	10
20A	1/3R,1/3G,1/3V	15	M	10
21A	75R/25V	15	M	10
22A	50G/50R	15	M	10

IV.3- La cure des éprouvettes :

Après le démoulage, les éprouvettes sont introduites dans une étuve climatique à 20 °C avec humidité de 90% pendant 28 jours.



Figure IV.7 : Humidificateur

IV.4- ESSAI DE MOUILLAGE-SECHAGE : (norme Américaine ASTM 559-44)

Selon les normes ASTM D 559-44, il consiste à faire sécher les éprouvettes jusqu'à poids constant à une température de 60° à 70°, les éprouvettes sont pesées après le séchage puis soumises à une série de cycles comprenant :

-5 heures d'immersion au bout des quelles l'éprouvette est pesée.

-42heures de séchage à l'étuve à 71°C.

La perte de poids maximum admissible est de 10% (climat sec) ou 5% (autre climat) après 12 cycles de mouillage - séchage.

Remarque : En Algérie y a juste des recommandations comme la recommandation de CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiment).

Cette recommandation dépend à l'immersion de la brique pendant 24 heures.



Figure IV.8 : Bac d'eau



Figure IV.9 : étuve

IV.5- CONCLUSION :

À travers ce chapitre, Nous avons vu comment fabriqué nos éprouvettes et les appareillages de fabrication.

En Algérie n'y a pas des normes réelles pour tester la durabilité. C'est pour ça on a choisir la norme Américaine comme une base

Afin de ce chapitre, on propose une norme plus dure que la norme Américaine :

L'essai du mouillage-séchage se fait à l'aide d'un une éprouvette. Après séchage a l'air libre. (Température ambiante de laboratoire).

L'échantillon est soumis à 12 cycles de mouillage et de séchage.

Le cycle correspond aux étapes suivantes, l'échantillon est d'abord immergé durant 24h, après il sera pesé et mesuré (dimensions). Ensuite il sera séché à l'étuve à 75 °C durant 24h.

CHAPITRE V

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V.1- Introduction :

Dans ce chapitre, après avoir réalisé toutes les formulations nécessaires de tous les mélanges des éprouvettes. On va présenter les résultats et donner les interprétations convenables pour les valeurs obtenues par les différents essais.

V.2- Résultats des essais :

V.2.1- Les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :

V.2.1.1- Diagramme de Pareto :

- Des effets pour la masse volumique :

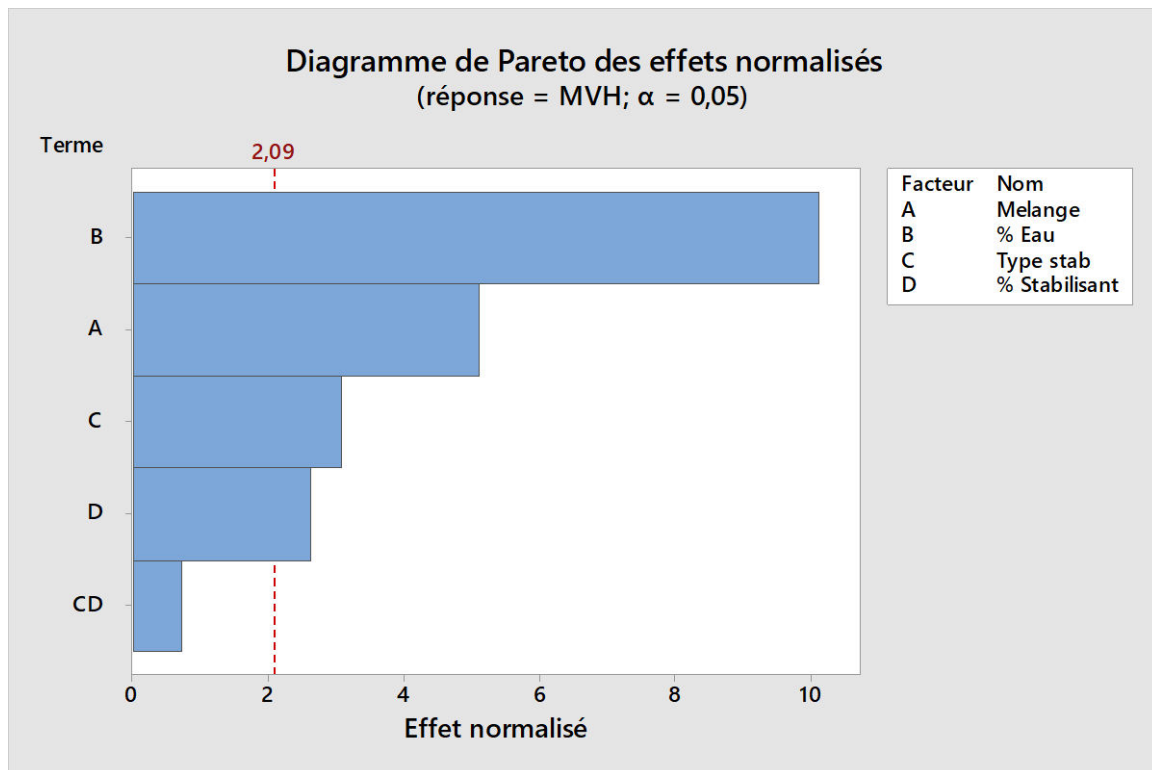


Figure V.1: Diagramme des effets pour la masse volumique.

Les facteurs influant sur la masse volumique sont classés par ordre

- 1- pourcentage d'eau 10.1190
- 2- type de mélange 5.11691
- 3- type de stabilisant 3.08349

4- pourcentage de stabilisant 2.64067

Conclusion :

Pour avoir un mélange compacte il faut bien choisir la quantité d'eau en premier lieu et puis choisir le type de mélange en deuxième lieu et en troisième lieu choisir le type de stabilisant et le pourcentage de stabilisant en quatrième lieu.

- des effets pour le pourcentage d'absorption dans le 1^{er} cycle :

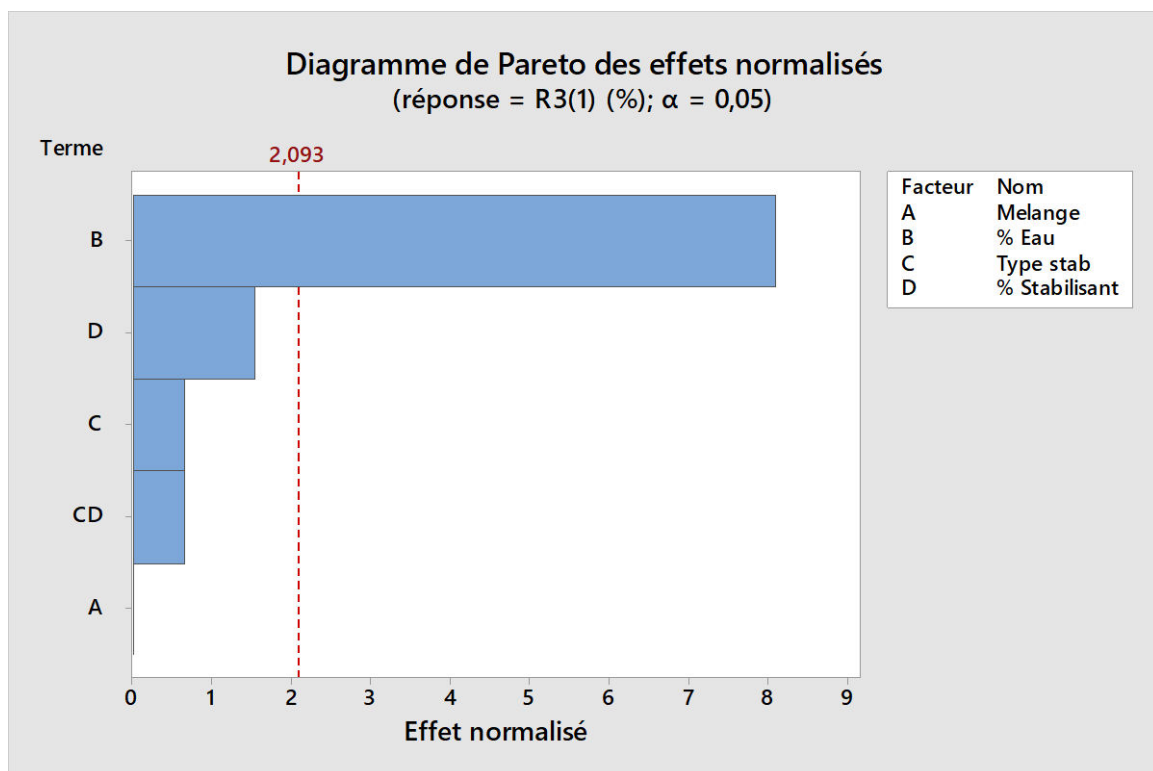


Figure V.2: Diagramme des effets pour l'absorption dans le 1er cycle.

Le facteur influent sur l'absorption dans le premier cycle est seulement le pourcentage d'eau avec une valeur de 8.09780

Conclusion :

En premier cycle, Pour contrôler l'absorption il faut bien contrôler la quantité d'eau.

- des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 1^{er} cycle :

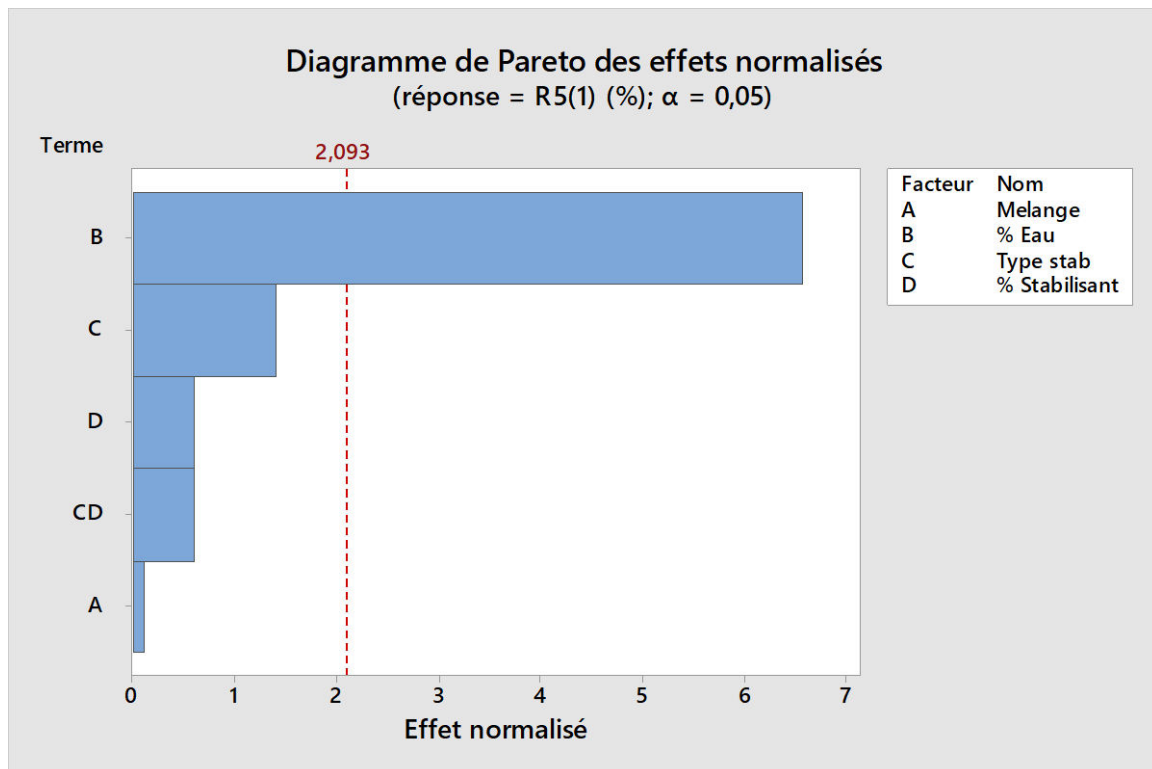


Figure V.3 : Diagramme des effets pour de perte de masse dans le 1er cycle

Le facteur influent sur la perte de masse dans le premier cycle est seulement le pourcentage d'eau avec une valeur de 6.56689

Conclusion :

En premier cycle, Pour contrôler la perte de masse il faut bien contrôler la quantité d'eau.

- des effets pour le pourcentage d'absorption dans le 6^{ème} cycle :

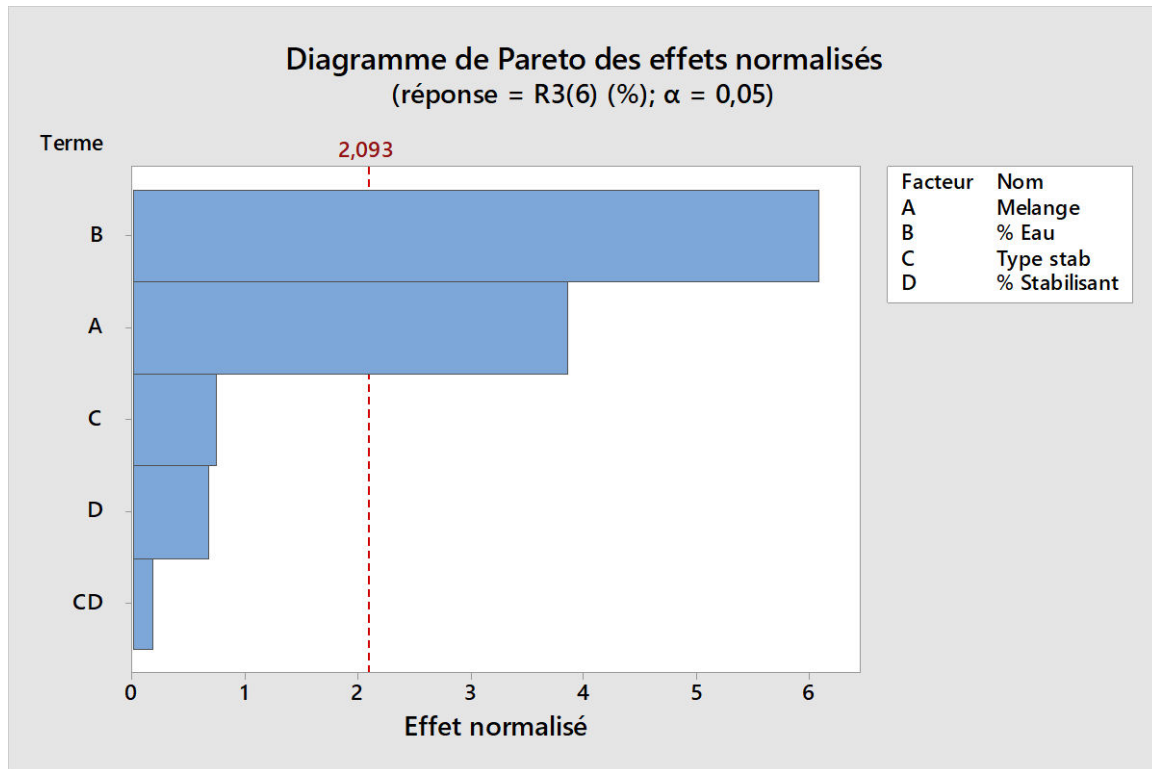


Figure V.4 : Diagramme des effets le pourcentage d'absorption dans le 6ème cycle.

Les facteurs influant sur l'absorption dans le sixième cycle sont classés par ordre :

- 1- le pourcentage d'eau 6.08099.
- 2- type de mélange 3.85634.

Conclusion :

En sixième cycle, Pour contrôler l'absorption il faut bien contrôler la quantité d'eau en premier lieu, et le type de mélange en deuxième lieu.

- des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 6^{ème} cycle :

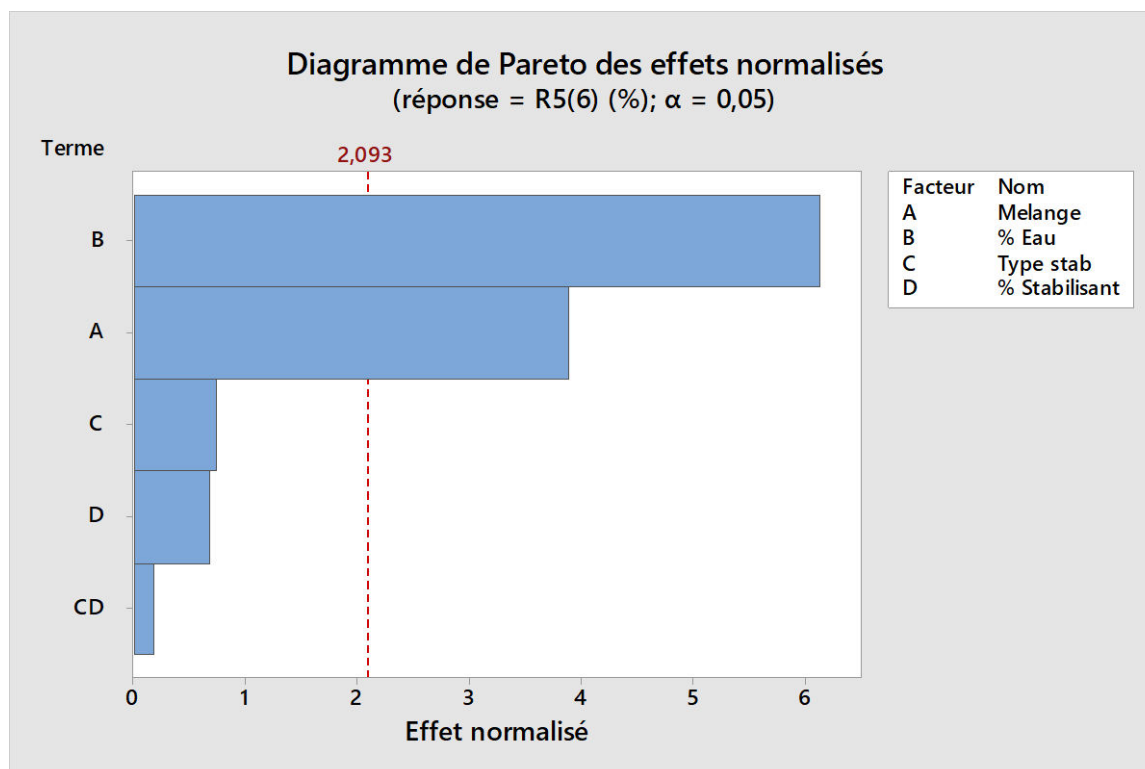


Figure V.5 : Diagramme des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 6ème cycle.

Les facteurs influant sur la perte de masse dans le sixième cycle sont classés par ordre :

- 1- Le pourcentage d'eau 6.12745
- 2- Type de mélange 3.88240

Conclusion :

En sixième cycle, Pour contrôler la perte de masse il faut bien contrôler la quantité d'eau en premier lieu, et le type de mélange en deuxième lieu.

- des effets pour le pourcentage d'absorption dans le 12^{ème} cycle :

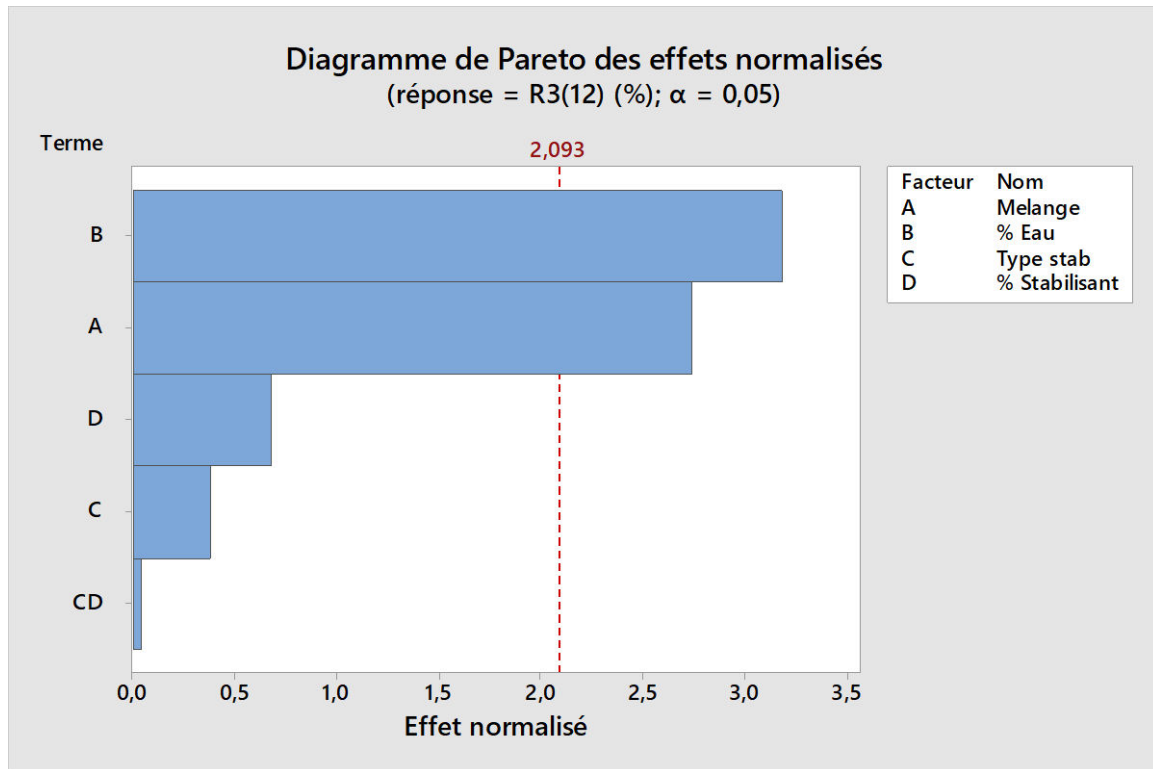


Figure V.6 : Diagramme des effets pour le pourcentage d'absorption dans le 12ème cycle.

Les facteurs influant sur l'absorption dans le douzième cycle sont le pourcentage d'eau avec une valeur de 3.18281 et le type de mélange avec une valeur de 2.74455.

Conclusion :

En douzième cycle, pour contrôler l'absorption il faut bien choisir la quantité d'eau en premier lieu, et contrôler le type de mélange en deuxième lieu.

- des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 12^{ème} cycle :

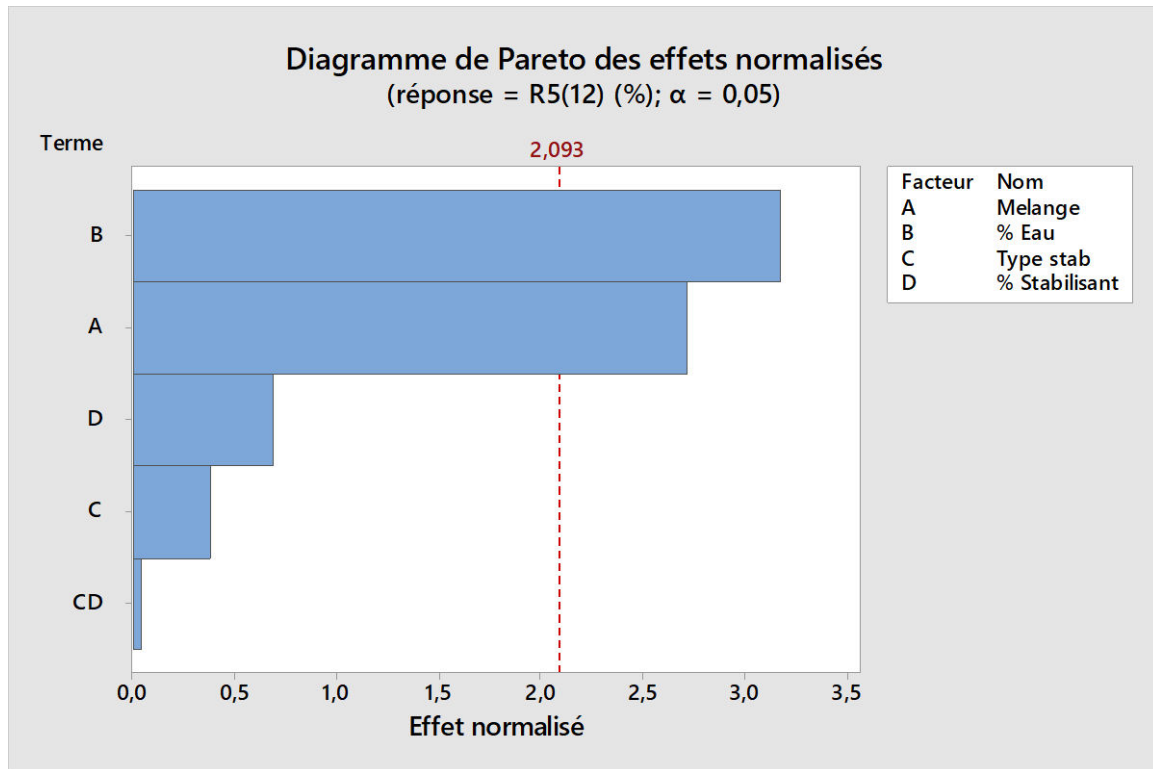


Figure V.7 : Diagramme des effets pour le pourcentage de perte de masse dans le 12ème cycle.

Les facteurs influant sur la perte de masse dans le douzième cycle sont le pourcentage d'eau avec une valeur de 3.17143 et le type de mélange avec une valeur de 2.720937.

Conclusion :

En douzième cycle, pour contrôler la perte de masse il faut bien choisir la quantité d'eau en premier lieu, et contrôler le type de mélange en deuxième lieu.

V.2.1.2-Graphiques des effets principaux et les interactions :

- les effets principaux pour la masse volumique :

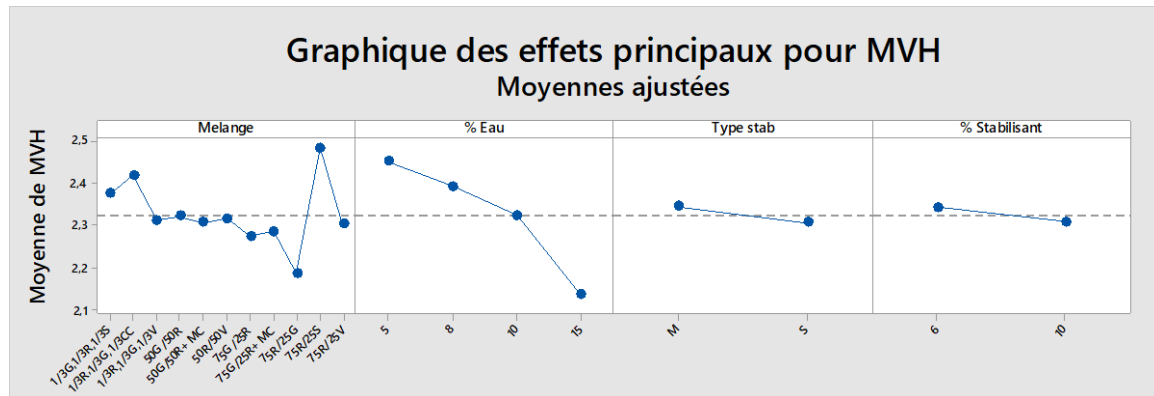


Figure V.8 : Graphique des effets principaux pour la masse volumique.

La masse volumique par rapport :

- les types de mélange : dans ce graphe on remarque que les mélanges de 1/3G, 1/3R, 1/3S et 1/3R,1/3G,1/3CC et 75R/25R ont les meilleurs masse volumique ,et les autres mélanges ont de moins le moyenne.

- pourcentage d'eau : on remarque de la quantité d'eau est faible la masse volumique est grande (entre 5 et 15%).

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur la masse volumique.

-pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur la masse volumique.

Conclusion :

On conclue que le type de mélange et la quantité d'eau ont une grande influence sur la masse volumique. Et puisque le CRS et Matine, et 6 et 10% de stabilisant ont le même effet on prend les plus économique (Matine et 6%) (6 et 10%).

- l'interaction pour la masse volumique :

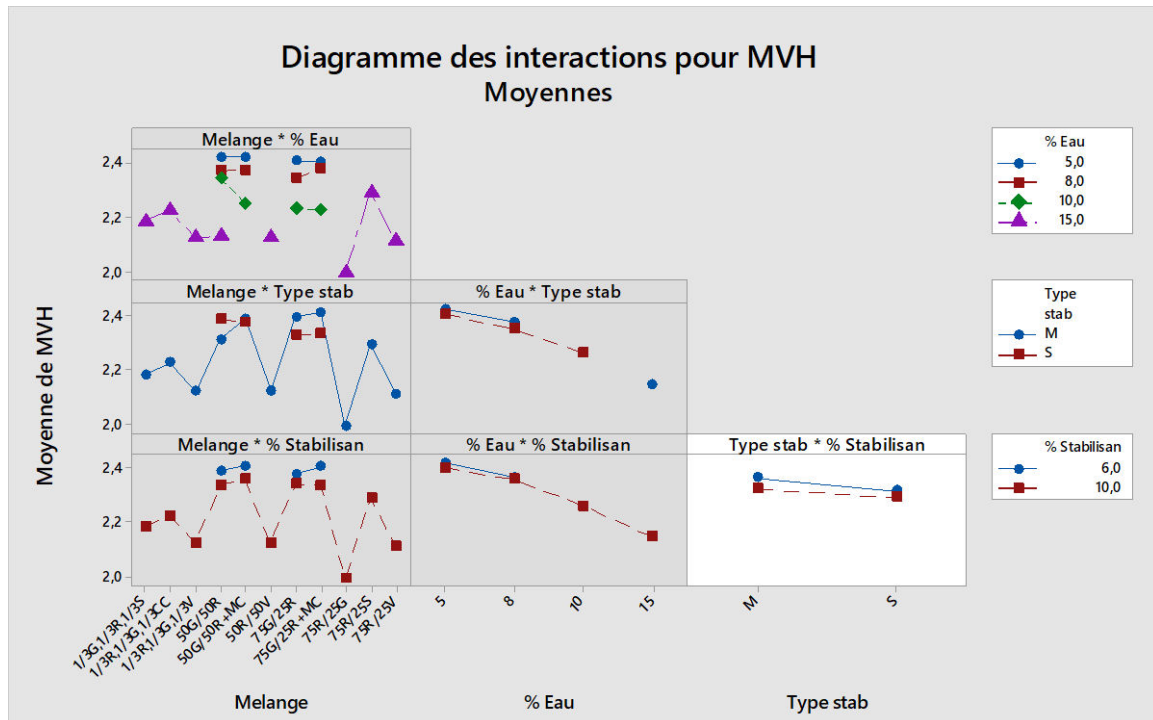


Figure V.9 : Diagramme des interactions pour la masse volumique

Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les meilleures masses volumiques obtenues par classement suivant :

1- 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R et 75G/25R+MC avec 5% d'eau.

2- 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R et 75G/25R+MC avec 8% d'eau.

3- 50G/50R avec 10% d'eau.

4- 75R/25S avec 15% d'eau.

- type de mélange avec type de stabilisant, les meilleures masses volumiques obtenues par les mélanges 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R, 75G/25R +MC et 75R/25S avec CRS et Matine.

- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les meilleures masses volumiques obtenues par les mélanges 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R, 75G/25R+MC et 75R/25S avec 6 et 10% de stabilisant.

- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, la meilleure masse volumique obtenue par 5 et 8% d'eau avec quelque soit le type de stabilisant CRS ou Matine.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage stabilisant, la meilleure masse volumique obtenue par 5 et 8% d'eau avec quelque soit le pourcentage de stabilisant 6 ou 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) et (6 ou 10%) y a aucun effet.

- **les effets principaux pour le pourcentage d'absorption dans le 1^{er} cycle :**

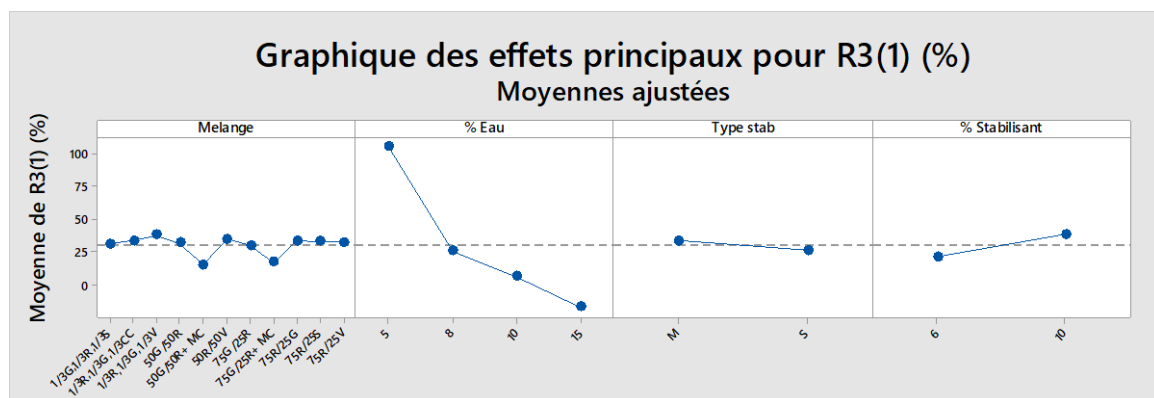


Figure V.10 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 1^{er} cycle.

Pourcentage d'absorption en premier cycle par rapport :

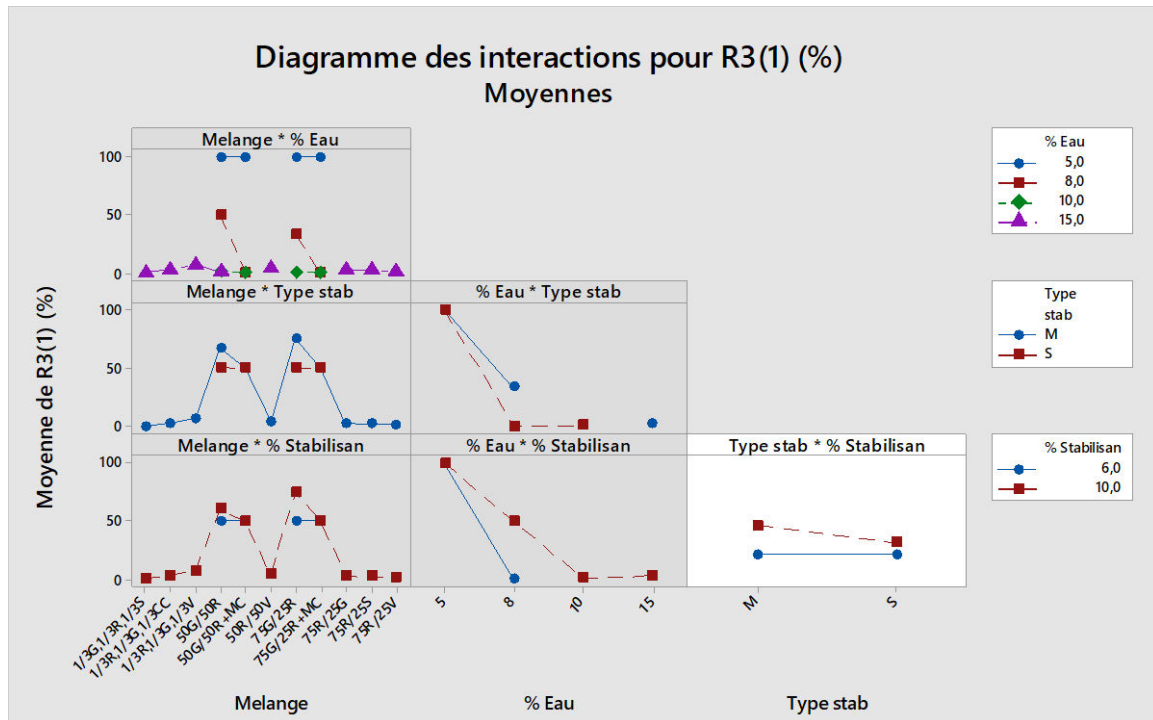
- type de mélange : tous les types de mélanges ont presque le même effet sur l'absorption.

- pourcentage d'eau : on obtient la moindre absorption avec 15% d'eau après 10% après 8%.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur l'absorption.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur l'absorption.

- l'interaction pour le pourcentage d'absorption dans le 1^{er} cycle :



Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par tous les mélange avec 15% d'eau sauf les mélange 50G/50R, 75G/25R obtenues avec 10% d'eau et 50G/50R+MC, 75G/25R+MC avec 8 et 10% d'eau.
- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par tous les mélanges avec les deux type de stabilisant (CRS et Matine) sauf les mélanges 50G/50R, 75G/25R, 50G/50R+MC et 75G/25R+MC sont les mauvaises.
- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par tous les mélanges avec les deux pourcentages (6 et 10%) de stabilisant sauf les mélanges 50G/50R, 75G/25R, 50G/50R+MC et 75G/25R+MC sont les mauvaises.
- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 8, 10 et 15% d'eau avec quelque soit le type de stabilisant CRS ou Matine.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 8, 10 et 15% d'eau avec quelque soit le pourcentage de stabilisant 6 ou 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) et (6 ou 10%) y a aucun effet.

- les effets principaux pour le pourcentage de perte de masse dans le 1^{er} cycle :

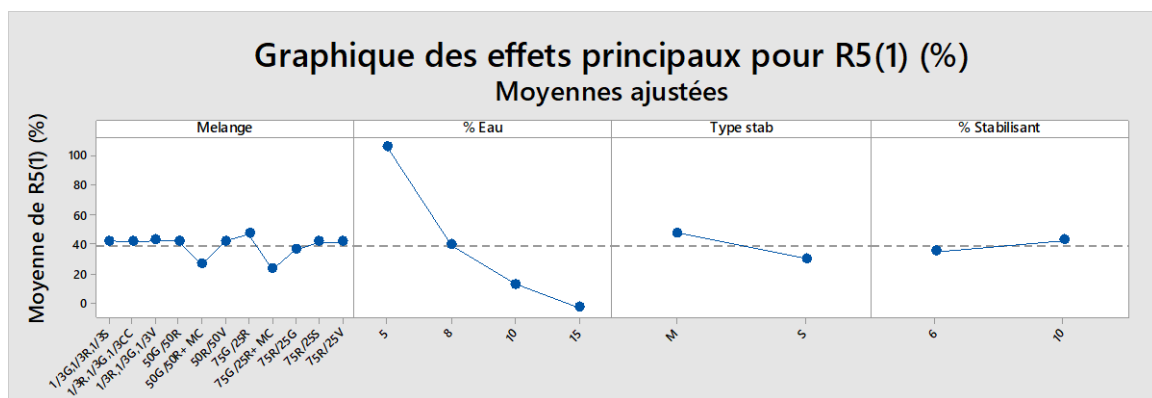


Figure V.12 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 1^{er} cycle.

Pourcentage de perte de masse en premier cycle par rapport :

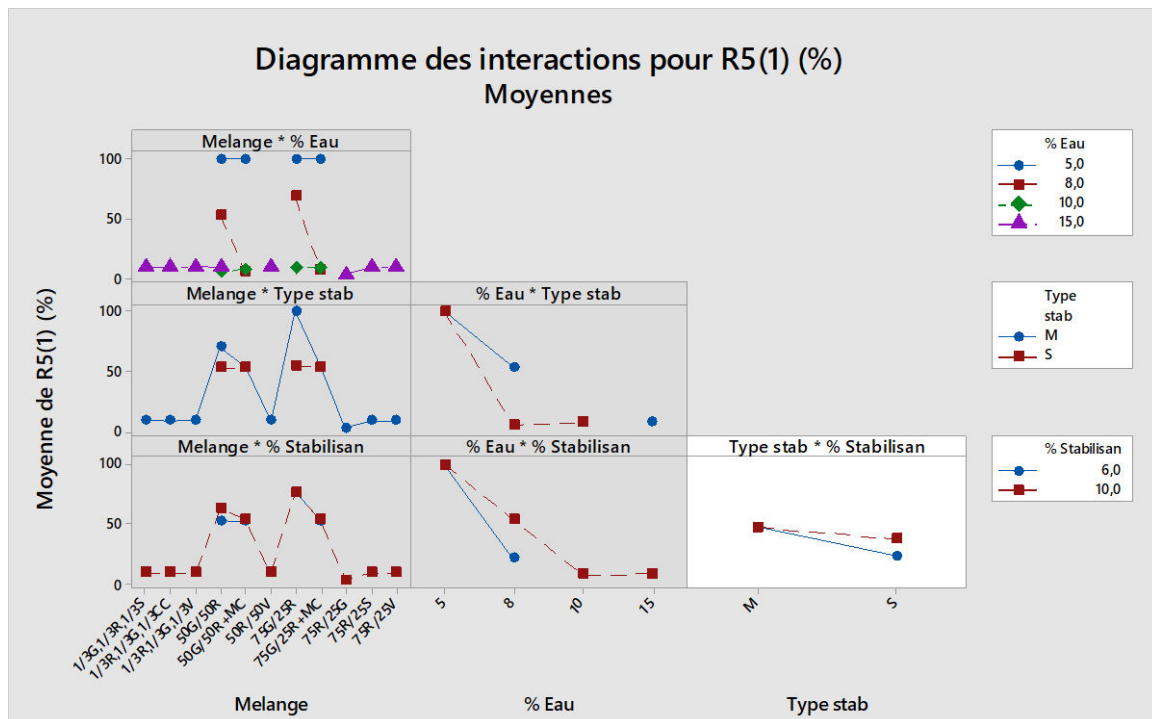
- type de mélange : tous les types de mélanges ont presque le même effet sur la perte de masse sauf les mélanges 50G/50R+MC et 75G/25R+MC ont des moins de pourcentage de perte.

- pourcentage d'eau : on obtient la moindre perte de masse avec 15% d'eau après 10% après 8%.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- l'interaction pour le pourcentage de perte de masse dans le 1^{er} cycle :



Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par tous les mélange avec 15% d'eau et les mélange de 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R et 75G/25R+MC avec 10% d'eau et 50G/50R+MC, 75G/25R+MC avec 8%.
- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par tous les mélanges avec type de stabilisant Matine sauf les mélanges 50G/50R 50G/50R+MC, 75G/25R, 75G/25R+MC.
- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par tous les mélanges avec pourcentages de 10% de stabilisant sauf les mélanges 50G/50R et 75G/25R.
- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par 8, 10 et 15% d'eau avec quelque soit le type de stabilisant CRS ou Matine.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par 8, 10 et 15% d'eau avec quelque soit le pourcentage de stabilisant 6 ou 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) et (6 ou 10%) y a aucun effet.

- les effets principaux pour le pourcentage d'absorption dans le 6^{ème} cycle :

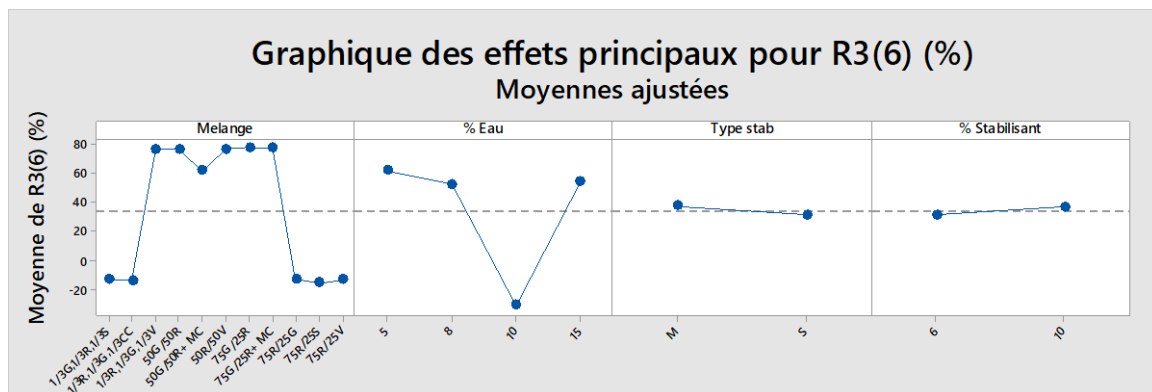


Figure V.14 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 6^{ème} cycle.

Pourcentage d'absorption en sixième cycle par rapport :

- type de mélange : les mélange (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75R/25G), (75R/25S) et (75R/25V) sont les moins absorbants à l'eau

- pourcentage d'eau : on obtenue la moindre absorption avec 10% d'eau et la plus élevée avec 5, 8 et 15%.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur l'absorption.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur l'absorption.

- l'interaction pour le pourcentage d'absorption dans le 6^{ème} cycle :

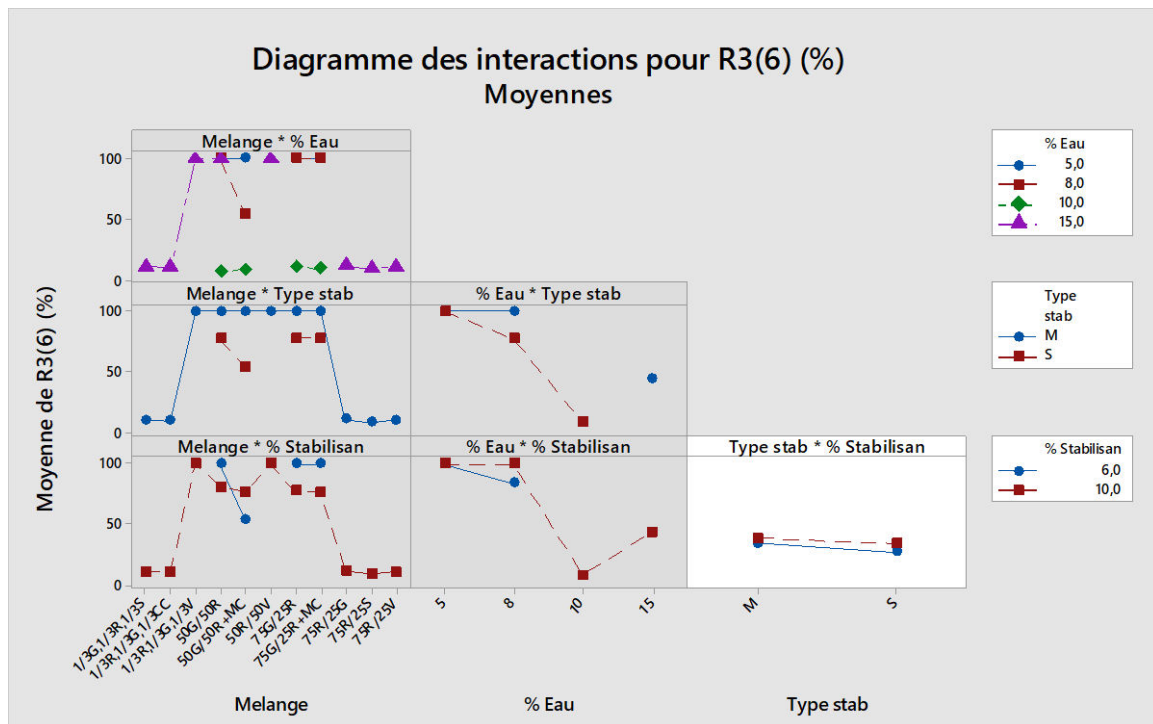


Figure V.15 : Diagramme des interactions pour l'absorption dans 6 eme cycle.

Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélange (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75G /25R), (75R/25S) et (75R/25V) avec 15% d'eau et les mélange 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R et 75G/25R+MC avec 10% d'eau.
- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélanges (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75G /25R), (75R/25S) et (75R/25V) avec type de stabilisant (Matine).
- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélanges (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75G /25R), (75R/25S) et (75R/25V) avec pourcentage de stabilisant de 10%.
- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 10% d'eau ave stabilisant CRS.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 10% d'eau avec pourcentage de stabilisant de 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) y a aucun effet.

- les effets principaux pour le pourcentage de perte de masse dans le 6^{ème} cycle :

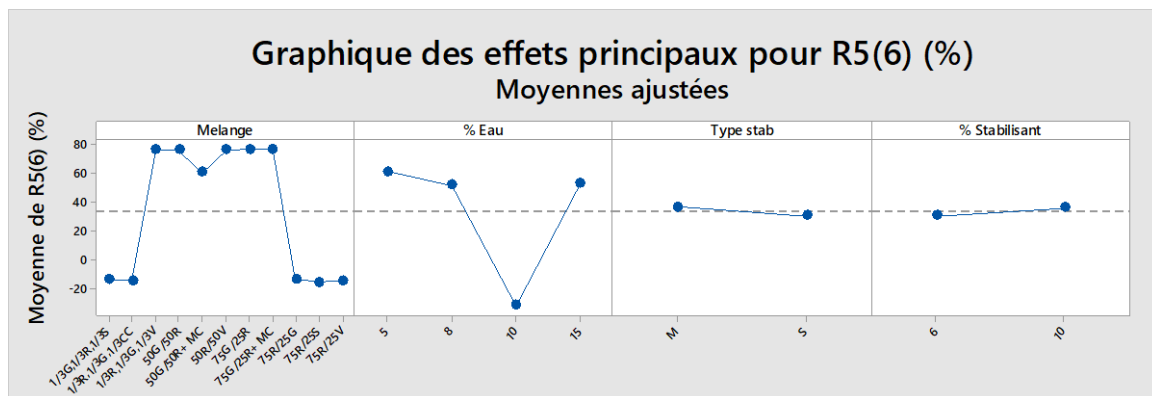


Figure V.16 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 6^{ème} cycle.

Pourcentage de perte de masse en sixième cycle par rapport :

- type de mélange : les mélange (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75G/25R), (75R/25S) et (75R/25V) sont les moindres pertes de masse.

- pourcentage d'eau : on obtenue la moindre perte de masse avec 10% d'eau et la plus élevée avec 5, 8 et 15%.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- l'interaction pour le pourcentage de perte de masse dans le 6^{ème} cycle :

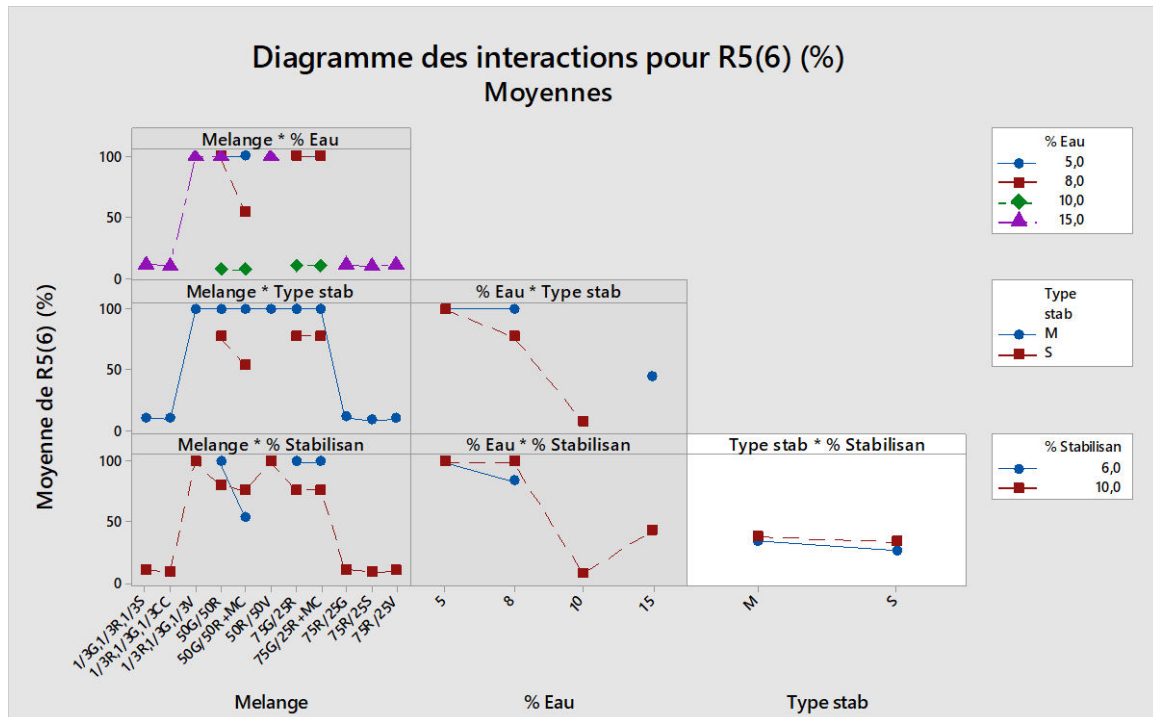


Figure V.17 : Diagramme des interactions pour la masse volumique dans 6 eme cycle.

Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par les mélange (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75R /25G), (75R/25S) et (75R/25V) avec 15% d'eau et les mélange 50G/50R, 50G/50R+MC, 75G/25R et 75G/25R+MC avec 10% d'eau.
- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par les mélanges (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75R /25G), (75R/25S) et (75R/25V) avec type de stabilisant (Matine).
- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par les mélanges (1/3G, 1/3R, 1/3S), (1/3G, 1/3R, 1/3CC), (75R /25G), (75R/25S) et (75R/25V) avec pourcentage de stabilisant de 10%.
- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par 10% d'eau ave stabilisant CRS.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages de perte de masse obtenue par 10% d'eau avec pourcentage de stabilisant de 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) y a aucun effet.

- les effets principaux pour le pourcentage d'absorption dans le 12^{ème} cycle :

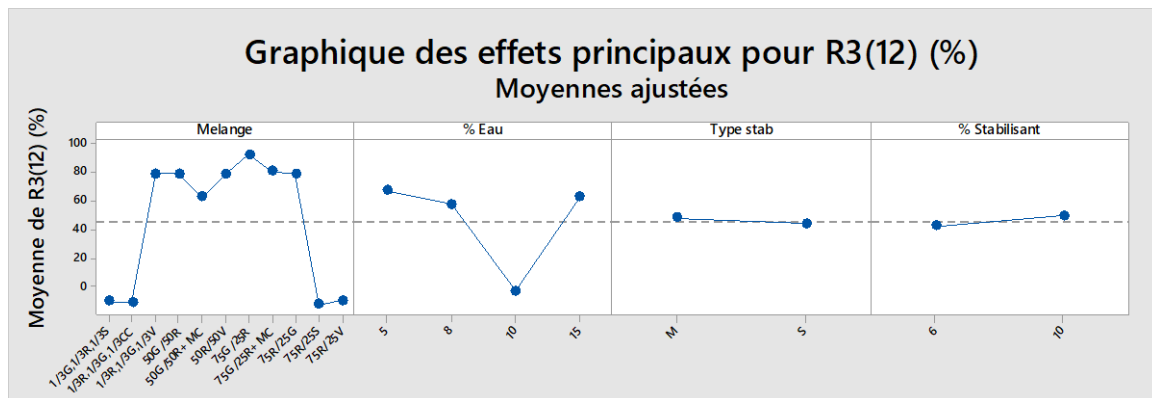


Figure V.18 : Graphique des effets principaux pour l'absorption dans 12^{ème} cycle.

Pourcentage d'absorption en premier cycle par rapport :

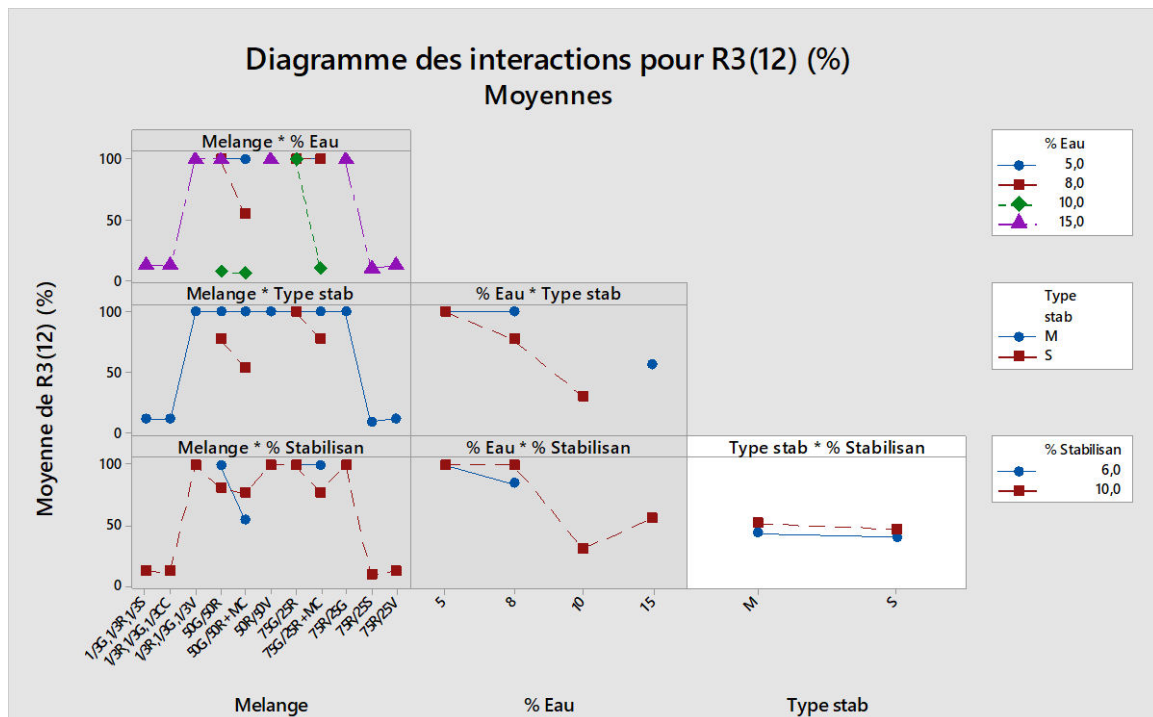
- type de mélange : les mélanges 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V sont les moins absorbants à l'eau.

- pourcentage d'eau : on obtient la moindre absorption avec 10% d'eau.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur l'absorption.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur l'absorption.

- l'interaction pour le pourcentage d'absorption dans le 12^{eme} cycle :



Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélange : 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC, 75R/25S et 75R/25V avec 15% d'eau et les mélange 50G/50R, 50G/50R+MC et 75G/25R avec 10%.
- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélanges : 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V avec type de stabilisant Matine.
- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par les mélanges 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V avec pourcentage de 10% de stabilisant.
- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 10 et 15% d'eau avec quelque soit le type de stabilisant CRS ou Matine.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages d'absorption obtenue par 10 et 15% d'eau avec quelque soit le pourcentage de stabilisant 6 ou 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) et (6 ou 10%) y a aucun effet.

- les effets principaux pour le pourcentage de perte de masse dans le 12^{ème} cycle :

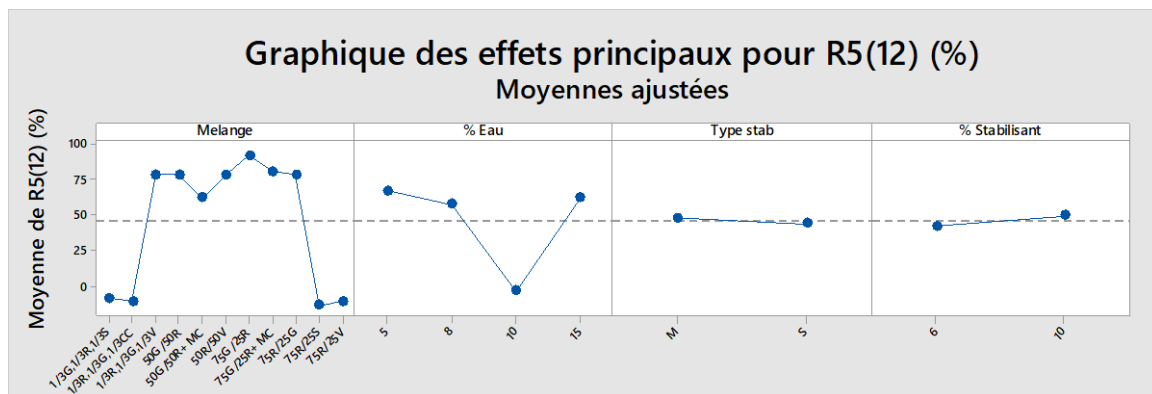


Figure V.20 : Graphique des effets principaux pour la perte de masse dans 12^{ème} cycle.

Pourcentage de la perte de masse en douzième cycle par rapport :

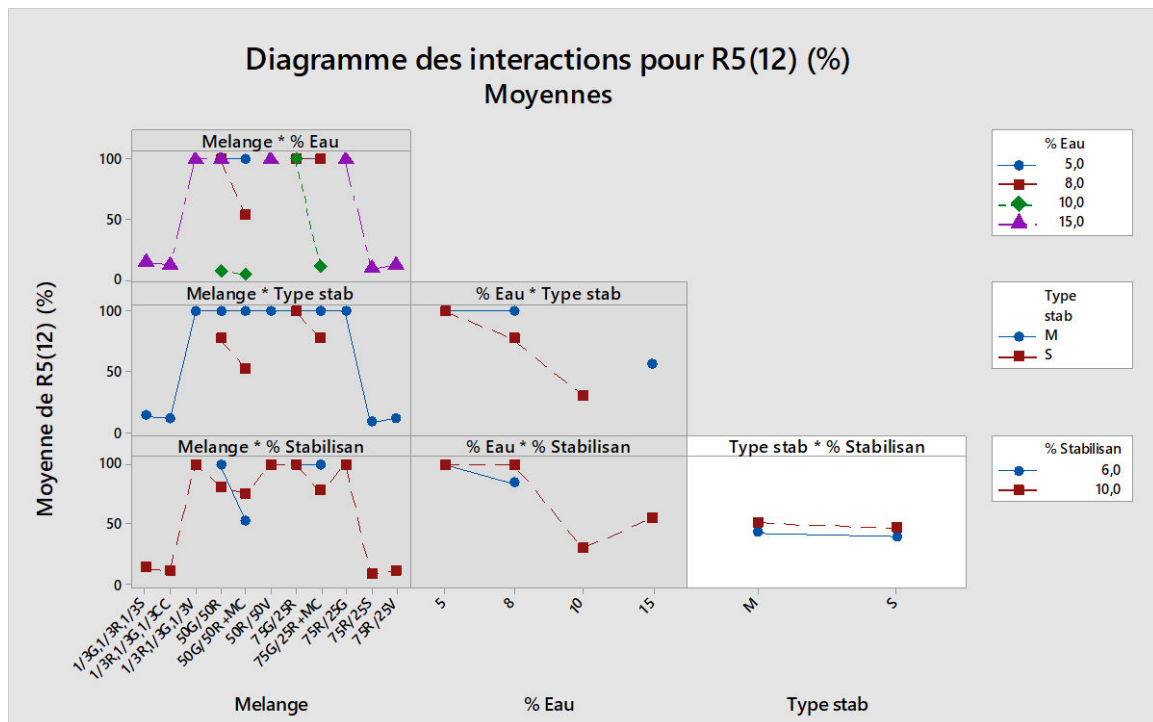
- type de mélange : les mélanges 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC, 75R/25S et 75R/25V sont les moindres pertes de masse.

- pourcentage d'eau : on obtient la moindre perte de masse avec 10% d'eau.

- type de stabilisant : on remarque que les deux types de stabilisant (CRS et Matine) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- pourcentage de stabilisant : on remarque que les deux pourcentages de stabilisant (6 et 10%) ont presque la même influence sur la perte de masse.

- l'interaction pour le pourcentage de perte de masse dans le 12^{eme} cycle :



Par l'interaction de :

- type de mélange avec pourcentage d'eau, les moindres pourcentages perte de masse obtenue par les mélange : 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V avec 15% d'eau et les mélange 50G/50R, 50G/50R+MC et 75G/25R avec 10%.

- type de mélange avec type de stabilisant, les moindres pourcentages de la perte de masse obtenue par les mélanges : 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V avec type de stabilisant Matine.

- type de mélange avec le pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages la perte de masse obtenue par les mélanges 1/3G.1/3R.1/3S et 1/3R.1/3G.1/3CC et 75R/25S et 75R/25V avec pourcentages de 10% de stabilisant.

- pourcentage d'eau avec de type stabilisant, les moindres pourcentages la perte de masse obtenue par 10 et 15% d'eau avec quelque soit le type de stabilisant CRS ou Matine.

- pourcentage d'eau avec de pourcentage de stabilisant, les moindres pourcentages la perte de masse obtenue par 10 et 15% d'eau avec quelque soit le pourcentage de stabilisant 6 ou 10%.

- type de stabilisant avec le pourcentage de stabilisant, quelque soit le type et le pourcentage de stabilisant (CRS ou Matine) et (6 ou 10%) y a aucun effet.

V.3- Equation de régression :

$$\begin{aligned}
 R5(12) &= 45,1 - 54,4 \text{ Melange_1/3G,1/3R,1/3S} - 56,3 \text{ Melange_1/3R,1/3G,1/3CC} \\
 (\%) &+ 32,4 \text{ Melange_1/3R,1/3G,1/3V} + 32,4 \text{ Melange_50G/50R} \\
 &+ 16,2 \text{ Melange_50G/50R+MC} \\
 &+ 32,4 \text{ Melange_50R/50V} + 46,1 \text{ Melange_75G/25R} \\
 &+ 34,8 \text{ Melange_75G/25R+MC} \\
 &+ 32,4 \text{ Melange_75R/25G} - 59,5 \text{ Melange_75R/25S} - 56,6 \text{ Melange_75R/25V} \\
 &+ 21,08 \% \text{ Eau_5} + 11,7 \% \text{ Eau_8} - 49,1 \% \text{ Eau_10} + 16,4 \% \text{ Eau_15} \\
 &+ 2,10 \text{ Type stab_M} - 2,10 \text{ Type stab_S} - 3,79 \% \text{ Stabilisant_6} \\
 &+ 3,79 \% \text{ Stabilisant_10} - 0,26 \text{ Type stab*} \% \text{ Stabilisant_M 6} + 0,26 \text{ Type stab*} \\
 &\% \text{ Stabilisant_M 10} + 0,26 \text{ Type stab*} \% \text{ Stabilisant_S 6} - 0,26 \text{ Type stab*} \\
 &\% \text{ Stabilisant_S 10}
 \end{aligned}$$

CONCLUSION
GENERAL

La terre crue est utilisée dans la construction depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète, vu son intérêt économique et sa facilité d'exploitation. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés.

Pour valoriser les matériaux et les savoir-faire locaux, Des blocs de terre comprimée sont réalisés après stabilisation par le ciment, un intérêt croissant est porté à la terre crue en tant qu'éco-matériau de construction pour son caractère local et la faible consommation d'énergie qui caractérise son cycle de vie global.

Le principal but de cette étude est d'améliorer la durabilité de briques de terre crue stabilisé par l'emploi d'une nouvelle procédure de compactage à pression élevée maintenue dans des conditions de cure bien déterminés.

Dans le cadre de cette étude, nous avons entrepris de contribuer à l'étude des blocs de terre comprimée destinés à la construction. Ce choix résulte à l'intérêt économique et thermique que revêt ce matériau.

La méthode de plan d'expérience est la méthode de base de notre étude car la théorie des plan d'expérience assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum.

Les différents type de facteurs choisis selon l'étude ont été ou nombre quatre dont les réponses seront établies, sous forme de différent graphes, afin de déterminés les facteurs influent et principaux dans cette étude.

Les réponses ont été comme suivantes :

2A, 4A, 4C, 8A, 16A, 17A, 18A, 21A.

L'équation de régression dont La composition qui a but d améliorer la durabilité d'un pourcentage de 45.1% a été donnée par le logiciel « Mini tab » :

- 59,5 Mélange de 75R/25S ; 49,1 % Eau de 10% ; 2,10 Type stabilisant de CRS ; 3,79 % Stabilisant de 6%.

On conclue que pour fabriquer une BTCS durable, faut bien choisir les paramètres et les facteurs influents de durabilité et sont :

- le bon choix de mélange et de type de stabilisant ; le bon contrôle des pourcentages d'eau et de pourcentage stabilisant.

Un moule a donc été spécialement développé pour cette étude. Il consiste en un cylindre creux d'acier inoxydable (diamètre extérieur 92 mm, diamètre intérieur 70 mm et hauteur de 220 mm). Les 11 mm d'épaisseur de ce moule lui permettent de résister à la pression latérale développée par le matériau au cours du compactage.

Grâce aux résultats de cette étude pilote, nous avons identifié les principales conclusions suivantes :

- ✓ L'augmentation de l'eau est bloqué le compactage et diminue la masse volumique.
- ✓ Les facteurs les plus influents sur la durabilité sont le type de mélange et la quantité d'eau.

L'étude a pour perspective de trouver une de mode de construction durable, économique et écologique.

Liste des références

AFNOR NF P 94-100.Sols : reconnaissance et essais –Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques–Essai d'évaluation de l'aptitude d'un matériau au traitement.1999.

Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 173-180, 1985.

Burrough VS. Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction, PhD Thesis , University of New South Wales, Australia, 2001.

CRATerre. (1991). Le bloc de terre comprimée Elements de base.

Houben H, Guillaud H. Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.

Houben H, Rigassi V, Garnier P. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996.

Houben H, G. H. (2006). Traité de construction en terre, CRATerre, éditions parenthèses. (France, Ed.) (Edition Pa).

Ghoumari F. Matériau en Terre Crue Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon,France, 1989.

Mahamat S. (2010). étude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte.

Michot A. Caractéristiques thermophysiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.

MITCHELL JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.

Talla, A. P. (2010). Étude Des Constructions En Briques De Terre Stabilisée À L ' Aide Des extraits du Parkia Biglobosa.

USACE. Soil engineering and stabilization. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.

Winterkorn HF. Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook",
Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.