

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie civil



جامعة محمد البشير الإبراهيمي « برج بوعريريج »
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : (Master)

Filière : Génie civil
Option : Matériaux

THÈME : INFLUENCE DES ARGILES SUR LES GRAVES-CIMENT

Préparé par : Melle. Abdi Ghozlane
Melle. Boufous Hakima

Soutenu le : 22/06/2014

Devant le jury :

Encadreur : Mr. ACHOUR -Y
Président : Mr. ATTIA -A
Examineur : Mr. BOUZID-C
Examineur : Mme. TABET-S
Examineur : Mr. BOUGUERRA-A

Année Universitaire 2013-2014



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

Remerciements

Nous d'abord avant tous remercions notre **dieu** qui a donnée à nous la volonté le courage le pourvoir et l'aide pour la réalisation de ce travail.

Notre encadreur **Mr : ACHOUR YACINE** de nous avoir proposé ce sujet de recherche et bien sûr pour ses remarques et ses conseils merci beaucoup.

Et aussi de même nous remercions tous les enseignants de génie civil et le département et aussi sont oublier le jury et les ingénieurs de laboratoire surtout Zoubir.

Un grande merci à BELAALA YUCEF et kessal ousama pour les idées les informations et aussi leurs conseils, merci également à tout personne du Laboratoire des Travaux Publics de L'EST à Sétif pour leur accueil et aide pendant notre travail.

Merci également à tous les ingénieurs de laboratoire (géo math-sol de B.B.A).

A tous ceux qui nous ont aidés et encouragés.

B. Hakima ***** A. Ghozlane

DÉDICACE

Avec joie, fierté et respect, Je dédie ce mémoire à :

Très chère Ma mère et bien sur mon père
Je dédie également ce travaille à mon chér Helmi
Chamsane pour sa patience et sons Courages tous
le temps.

A mon frère et mes sœurs (Adel, Abla, chahra et
Soumaya), et bien sûr à toute la famille Boufous
sans exception.

A tous mes amis que je le connues, à mon cher
binôme Ghozlane et a tous mes enseignants avec
l'encadreur «Mr. Achour Yacine ».

A toute la promotion 2014 spécialité génie civil.
Finalement je vous dédie cette travaille à tout
personne qui ma aider à terminer ce projet.

Boufous Hakima

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à mon très cher père mon professeur de toujours aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous.

À ma très chère mère mon ange gardien tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de sacrifier et de prier pour moi.

À mon très cher frère zohir

À mes très chères sœurs salima, merieme, et farida.

Et toute la famille abdi et mahdadi, Sans oublier hichem et les deux enfants ritadj et souhaib.

À mes ami(e)s surtout monira, afaf, hanane, soumia, et sarra, à mon cher binôme hakima en témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail.

Abdi ghozlane

SOMMAIRE

RESUME

INTRODUCTION GENERALE.....	Page 1
-----------------------------------	---------------

Chapitre I : GENERALITES

I) GRAVE-CIMENT (GC)

1) Introduction.....	Page 3
2) Définition d'une grave-ciment.....	Page 3
3) Caractéristiques des Graves-Ciments.....	Page 4
4) Constituants des graves-ciments.....	Page 4
4.1) Grave non traitée (GNT).....	Page 4
a) Processus de fabrication de la GNT	Page 5
• Extraction	Page 5
• Elaboration des granulats.....	Page 5
• Concassage primaire.....	Page 5
• Concassage secondaire	Page 5
b) Modalités de stockage.....	Page 5
4.2) Ciments.....	Page 7
4.2.1) Fabrication du clinker.....	Page 7
4.2.2) Autres constituants des ciments.....	Page 7
4.2.3) Processus de fabrication des ciments courants.....	Page 9
4.2.4) Classification des ciments.....	Page 12
a) Classification en fonction de leur composition.....	Page 12
b) Classification en fonction de leur résistance.....	Page 12
c) Désignation normalisée des ciments.....	Page 13

II) LES ARGILES

1) Définitions scientifiques et terminologie.....	Page 14
2) Domaines d'études.....	Page 14
3) L'origine des argiles dans les sols et les roches.....	Page 15
a) L'altération.....	Page 15
b) Le transport et le dépôt des produits.....	Page 16
c) Les transformations.....	Page 16
4) Les argiles dans les roches.....	Page 16
a) Présence due à la genèse et à l'altération.....	Page 16
b) Présence due à la tectonique	Page 17

SOMMAIRE

c) Argiles dans les roches meubles	Page 18
5) Composition minéralogique	Page 18
6) Les types d'argiles.....	Page 19
a) La kaolinite.....	Page 19
b) La Montmorillonite	Page 20
c) L'Illite	Page 20
d) La Chlorite.....	Page 21
e) Les Smectites.....	Page 21
7) Identification des minéraux argileux.....	Page 22
III) PROVENANCE DES MATERIAUX DE L'ETUDE	
1) Grave Non Traité (GNT).....	Page 23
1.1) Localisation.....	Page 23
1.2) Contexte géologique	Page 23
2) Ciment.....	Page 24
2.1) Localisation	Page 24
2.2) Caractéristiques	Page 25
3) Argile.....	Page 25
3.1) Localisation	Page 25
Chapitre II : ESSAIS GEOTECHNIQUE REALISES	
I) ESSAIS PHYSIQUES	
1) Détermination de la teneur en eau.....	Page 26
2) Analyse granulométrique par tamisage.....	Page 27
3) Analyse granulométrique par sédimentation.....	Page 30
4) Valeur de bleu par l'essai a la tache.....	Page 34
5) Essai de propreté: Equivalent de sable a 10 % de fines.....	Page 36
II) ESSAIS MECANIQUE ET DE PORTANCE	
1) Essai Micro- Deval	Page 41
2) Essai Los Angeles.....	Page 43
3) Essai Proctor Modifier	Page 44
4) Essai de la résistance à la compression simple	Page 48
5) Essai de résistance à la traction indirecte.....	Page 50
III) ESSAIS CHIMIQUES	
1) Détermination de la teneur en carbonates Méthode du calcimètre.....	Page 53

SOMMAIRE

2) Détermination de la teneur en sulfates.....	Page 56
--	----------------

Chapitre III : Résultats Des Essais D'identification - Discussions

I) RESULTATS

1) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LA GNT.....	Page 57
1.1) Résultats des essais de propriétés.....	Page 57
1.1.1) Equivalent de sable à 10 % de fines.....	Page 57
1.1.2) Valeur de bleu de méthylène.....	Page 58
1.2) Résultats des autres essais physiques.....	Page 59
1.2.1) Teneur en eau	Page 59
1.2.2) Analyse granulométrique par tamisage.....	Page 60
1.2.3) Los Angeles et Micro-Deval.....	Page 61
1.2.4) Teneur en carbonates et teneur en sulfates.....	Page 61
2) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR L' ARGILE	
2.1) Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation.....	Page 62
2.2) Autres essais réalisés sur l' argile.....	Page 62

II)DISCUSSIONS

1) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LA GNT	Page 63
1.1) Résultats des essais de propriétés.....	Page 63
1.2) Autres essais physiques.....	Page 63
1.2.1) Teneur en eau.....	Page 63
1.2.2) Analyse granulométrique par tamisage.....	Page 63
1.2.3) Los Angeles et Micro-Deval.....	Page 64
1.2.4) Teneur en carbonates et teneur en sulfate	Page 64
2) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR L' ARGILE	Page 64
3) COMPARAISON VIS-A-VIS DES SPECIFICATIONS.....	Page 65
3.1) Valeurs préconisées ou spécifiées.....	Page 65
3.2) Comparaison.....	Page 65

Chapitre IV : RESULTATS DES ESSAIS MECANQUES – DISCUSSIONS

I) RESULTATS

1) ESSAI PROCTOR.....	Page 66
-----------------------	----------------

SOMMAIRE

2) ESSAIS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (R_C) ET A LA TRACTION INDIRECTE (R_{tb}).....	Page 69
1) <i>Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du temps</i>	
a) <i>Cas de la GNT 0/31.5 mm</i>	Page 70
b) <i>Cas de la GC</i>	Page 71
2) <i>Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du dosage en argile</i>	Page 72
3) <i>Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du temps</i>	
a) <i>Cas de la GNT 0/31.5 mm</i>	Page 74
b) <i>Cas de la GC</i>	Page 75
4) <i>Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du dosage en argile</i>	Page 76
3) ESSAI COMPLEMENTAIRES.....	Page 78
II) INTERPRETATION DES ESSAIS MECANIQUES	
1) ESSAI PROCTOR.....	Page 79
2) ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (R_C).....	Page 80
2.1) <i>Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du temps</i>	
a) <i>Cas de la GNT</i>	Page 80
b) <i>Cas de la GC</i>	Page 80
c) <i>Rapport Immersion-Compression</i>	Page 81
d) <i>Comparaison entre R_c GC et R_c GNT</i>	Page 82
2.2) <i>Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du dosage en argile</i>	Page 83
3) ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION INDIRECTE (R_{tb}).....	Page 83
3.1) <i>Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du temps</i>	Page 83
a) <i>Cas de la GNT</i>	Page 83
b) <i>Cas de la GC</i>	Page 83
3.2) <i>Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du dosage en argile</i> ...	Page 83
4) ESSAI COMPLEMENTAIRES.....	Page 84
5) COMPARAISON VIS-A-VIS DES SPECIFICATIONS.....	Page 85
5.1) <i>Valeurs préconisées ou spécifiées</i>	Page 85
5.2) <i>Comparaison</i>	Page 86

SOMMAIRE

Conclusion générale..... Page 87

REFERANCES BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques.
CBR	Indice CBR immédiat.
E	Module d'élasticité.
Es	Equivalent de sable.
Et 360	Module sécant à 360 jours.
Et 360	Module sécant à 360 jours.
GC	Grave ciment
GNT	Grave non traitée
GTR	Guide des terrassements routier.
HF	Haut fourneau.
Ic	Indice de consistance.
I.Q.E	Indice de qualité élastique.
LA	Los Angeles.
MDE	Micro Deval en présence d'eau.
Msc	Masse du sable correcteur
NF	Normes Françaises.
Rt 360 j	Résistance à la traction à 360jours
Rc	Résistance à la compression simple
R_{tb}	Résistance à la traction indirecte (brésilienne).
Ve	Volume dégagé par l'échantillon.
Vc	Volume dégagé par le carbonate de calcium pur.
VBS	Valeur de bleu de sol.
WL	Limite de liquidité.
W_n	Teneur en eau naturelle.
W_{OPM}	Teneur en eau de l'optimum Proctor modifié.
Y_{d OPM}	Densité sèche de l'optimum Proctor modifié.

LISTE DES ABREVIATIONS

CHAPITRE I : GENERALITES

Photo 1	GNT 0/31,5 mm de la carrière de -Cosidère-El EUCH.....	Page 4
Photo 2	Ciment CPJ-CEM II/A 42,5 de Ain kebira.....	Page 25

CHAPITRE II : ESSAI GEOTECHNIQUE REALISES

Photo 3	Sable (0/2 mm) après étuvage.....	Page 26
Photo 4	Colonne des tamis.....	Page 27
Photo 5	Etuve Ventilée.....	Page 27
Photo 6	Balance.....	Page 27
Photo 7	Lavage et étuvage de la GNT « 0/31,5mm ».....	Page 28
Photo 8	Lavage et étuvage de la GNT « 0/31,5mm ».....	Page 28
Photo 9	Densimètre utilisé.....	Page 30
Photo 10	Imbibition de l'argile.....	Page 31
Photo 11	Argile (Eléments inférieurs à 80µm).....	Page 32
Photo 12	Préparation des échantillons d'argile.....	Page 32
Photo 13	Exécution de l'essai pour l'argile	Page 33
Photo 14	Agitateur mécanique.....	Page 34
Photo 15	Exécution de l'essai au bleu.....	Page 36
Photo 16	Exécution de l'essai	Page 38
Photo 17	Agitation électrique de l'éprouvette.....	Page 39
Photo 18	Lavage à l'aide d'un tube laveur.....	Page 39
Photo 19	Lecture des valeurs h1 et h2 à règle et au piston.....	Page 40
Photo 20	Machine Micro-Deval utilisé.....	Page 41
Photo 21	Préparation de l'échantillon dans le cylindre.....	Page 42
Photo 22	Lavage et étuvage de l'échantillon testé.....	Page 42
Photo 23	Appareil Los Angeles utilisé.....	Page 43
Photo 24	Déroulement de l'essai Los Angeles.....	Page 44
Photo 25	Fraction 0/14 mm + Argile.....	Page 47
Photo 26	Réalisation de l'essai Proctor sur la fraction 0/14 mm.....	Page 47
Photo 27	GNT 0/14+ différents % d'argile +3.5% de ciment.....	Page 47
Photo 28	Appareille Marshall.....	Page 48
Photo 29	Ecrasement d'une éprouvette de grave ciment.....	Page 50
Photo 30	Essai brésilien.....	Page 52
Photo 31	Calcimètre Dietrich-Fruhling utilisé.....	Page 53

LISTE DES PHOTOS

- Photo 32** Déroulement de l'essai..... **Page 55**
Photo 33 Filtration de l'échantillon..... **Page 56**

CHAPITRE III : RESULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION - DISCUSSIONS

- Photo 34** Introduction des fines argileuses dans la GNT..... **Page 57**

CHAPITRE IV : RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES - DISCUSSIONS

- Photo 35** Moule utilisé..... **Page 69**
Photo 36 Conservation des éprouvettes confectionnées..... **Page 70**
Photo 37 Eprouvettes plongées dans de l'eau..... **Page 79**
Photo 38 Eprouvettes plongées dans un bac d'eau..... **Page 81**
Photo 39 Destruction instantanée des éprouvettes des graves non traitée..... **Page 84**
Photo 40 Stabilité des éprouvettes des graves-ciments dans l'eau..... **Page 85**

CHAPITRE I : GENERALITES

Figure 1	Schéma structural d'une chaussée.....	Page 3
Figure 2	Schéma de principe de production de granulats : exemple d'installation et de production.....	Page 6
Figure 3	Clinker après refroidissement.....	Page 10
Figure 4	Schéma de fabrication du ciment.....	Page 11
Figure 5	Domaines d'études.....	Page 15
Figure 6	Minéralogie des sols en tenant compte de la granularité	Page 18
Figure 7	Structure des minéraux argileux.....	Page 19
Figure 8	Structure de Kaolinite.....	Page 19
Figure 9	Structure atomique de montmorillonite.....	Page 20
Figure 10	Structure de l'illite.....	Page 20
Figure 11	Structure de chlorite.....	Page 21
Figure 12	Structure de smectites.....	Page 21
Figure 13	Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande	Page 22
Figure 14	Localisation de la carrière de Cosidère	Page 23
Figure 15	Extrait de la carte géologique au 1/50000 de MAADID.....	Page 24
Figure 16	Localisation de la cimenterie d'Ain Kebira.....	Page 24
Figure 17	Lieu de prélèvement de l'argile.....	Page 25

CHAPITRE II : ESSAI GEOTECHNIQUE REALISES.

Figure 18	Exemple des courbes granulométriques.....	Page 29
Figure 19	Agitateur	Page 31
Figure 20	principe d'essai VB.....	Page 34
Figure 21	Nombre des coups pour Proctor modifié	Page 46
Figure 22	Procédure d'extraction des éprouvettes	Page 49
Figure 23	Un gabarit de centrage adapté aux éprouvettes cylindriques.....	Page 51
Figure 24	Schéma a un calcimètre.....	Page 53

CHAPITRE III : RESULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION

DISCUSSIONS.

Figure 25	Histogramme de variation des valeurs de l'ES à 10 % de fines en fonction du dosage en argile.....	Page 58
------------------	---	----------------

LISTE DES FIGURES

Figure 26	Influence de l'ajout de fines argileuses sur l'Equivalent de sable à 10 % de fines.....	Page 58
Figure 27	Histogramme de variation des valeurs de bleu en fonction du dosage en argile.....	Page 59
Figure 28	Influence de l'ajout de fines argileuses sur la valeur de bleu.....	Page 59
Figure 29	Courbe granulométrique 01.....	Page 60
Figure 30	Courbe granulométrique 02.....	Page 61
Figure 31	Courbe granulométrique et sédimentométrique de l'argile.....	Page 62

CHAPITRE IV : RESULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION - DISCUSSIONS

Figure 32	Courbe Proctor de la fraction 0/14 mm.....	Page 66
Figure 33	Courbe Proctor de la fraction 0/10 mm.....	Page 67
Figure 34	Influence du pourcentage d'ajout de fines argileuses sur la valeur de la densité sèche à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié (cas de la GNT).....	Page 69
Figure 35	Influence du pourcentage d'ajout de fines argileuses sur la valeur de la densité sèche à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié (cas de la GC).....	Page 69
Figure 36	Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la grave non traité de Cosidère.....	Page 71
Figure 37	Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la grave ciment (3.5% de ciment).....	Page 72
Figure 38	Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 3 heures.....	Page 72
Figure 39	Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 7 jours.....	Page 72
Figure 40	Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 14 jours.....	Page 73
Figure 41	Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 28 jours.....	Page 74
Figure 42	Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la grave non traité de Cosidère.....	Page 75

LISTE DES FIGURES

Figure 43	Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la grave non traité de Cosidère	Page 76
Figure 44	Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 3 heures.....	Page 76
Figure 45	Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 7 jours.....	Page 77
Figure 46	Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 14 jours.....	Page 77
Figure 47	Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 28 jours.....	Page 78
Figure 48	Evolution de la valeur du rapport $\frac{R_{ci}}{R_c}$ à 28 j, en fonction du pourcentage d'ajout des fines.....	Page 82

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GENERALITES.

Tableau 1	Dosage en liant suivant la dimension des granulats.....	Page 3
Tableau 2	Composition chimique de clinker.....	Page 7
Tableau 3	Classification du ciment en fonction de leur composition.....	Page 12
Tableau 4	Classification du ciment en fonction de leur résistance.....	Page 13
Tableau 5	Résultats des analyses chimiques du ciment d'Ain El Kebira.....	Page 25

CHAPITRE II : ESSAI GEOTECHNIQUE REALISES.

Tableau 6	Classes granulaires avec leur charge nécessaire.....	Page 41
Tableau 7	Classe de granulaire.....	Page 43

CHAPITRE III: RESULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION - DISCUSSIONS.

Tableau 8	Résultats des teneurs en eau naturelle.....	Page 60
Tableau 9	Valeurs des essais LA et MDE.....	Page 61
Tableau 10	Résultats des analyses chimiques.....	Page 61
Tableau 11	Résultats des essais réalisés sur l'argile.....	Page 62

CHAPITRE IV : RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES - DISCUSSIONS.

Tableau 12	Références de compactage.....	Page 70
Tableau 13	Résultats des essais de résistance à la compression simple réalisés sur la GNT.....	Page 71
Tableau 14	Résultats des essais de résistance à la compression simple réalisés sur la GC.....	Page 71
Tableau 15	Résultats des essais de résistance à la traction indirecte réalisés sur la GNT.....	Page 74
Tableau 16	Résultats des essais de résistance à la traction indirecte réalisés sur la GC.....	Page 75
Tableau 17	Comportement des éprouvettes après immersion dans de l'eau.....	Page 78
Tableau 18	Valeurs de rapport immersion – compression.....	Page 81
Tableau 19	L'écart entre les valeurs de la résistance à la compression simple de la GC et la GNT.....	Page 82
Tableau 20	Valeurs de R_t (28j) calculées à partir des valeurs de R_{tb} (28j).....	Page 86
Tableau 21	Performances mécaniques des graves traitées aux liants hydrauliques.....	Page 86
Tableau 22	Valeurs de R_t 360j estimées à partir des valeurs R_t 28j.....	Page 86

RESUME

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre des projets de traitement des matériaux aux liants hydrauliques en vue d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques à court et à long terme.

Ce mémoire a pour principal objectif le traitement d'une grave non traitée de la région d'el Euch (Bordj Bou Arréridj) au ciment et de donner l'incidence d'une nature d'argile (illite) et de son dosage sur les valeurs des essais de propriétés, et sur le niveau des performances mécaniques atteintes..

Une étude bibliographique a été menée, pour recueillir le maximum des informations qui concerne les matériaux d'étude.

Une caractérisation des matériaux utilisés était effectuée à la base de l'étude Bibliographique, il s'agit des essais géotechniques physiques et mécaniques standards, en plus des essais chimiques.

La résistance, la qualité et même la durabilité des graves-ciment peuvent être perturbés en fonction de la présence possible des minéraux argileux qui sont presque toujours présentes dans les roches en quantité variable. Pour cette raison, on a pensé d'ajouter le polluant (argile) en toutes proportions afin d'étudier, en laboratoire, l'influence des argiles sur les propriétés des graves-ciment.

Les résultats montrent que les fines argileuses ont une incidence sur les indicateurs de propriété (Equivalent de sable à 10 % de fines, Essai au bleu de méthylène) et de même sur les indicateurs de qualité (Rc, Rtb et Rt).

L'effet de l'eau sur la résistance, la stabilité et la durabilité de ces matériaux (avant et après traitement) a été également mis en évidence. Nous avons trouvé que seuls les éprouvettes confectionnées par la grave traitée avec 3.5% de ciment (GC) présentent une vulnérabilité moindre à ce facteur. Cette singularité vient confirmer les résultats des essais physiques.

MOTS-CLES : Pollution - essai brésilien - Grave traitée - Argile - Ciment - propriétés mécanique
- Résistance à la compression simple.

ABSTRACT

The work presented in this memory is registered in the context of treatment of materials by hydraulic binders in order to improve their mechanical characteristics in the short and long term. This memory has as a main objective the treatment of gravel untreated in the région of el Euch (Bordj Bou Arréridj) with cement and to give the effect of a nature of clay (illite) and its dosage on the values of the proprieties tests, and on the level of the mechanical performances.

A literature review was conducted to collect the maximum information on this materials. Then, a characterization of materials used used was made at the base of the study Literature, this geotechnical testing physical and mechanical standards, in addition to chemical testing.

Strength, quality and durability of the cement-treated base can be disturbed with the possible presence of the fine clay particles which are almost always present in the rocks in variable quantity. For this reason, one thought of adding the pollutant (clay) in all proportions in order to study, in laboratory, the influence of clays on the properties of the cement sand-gravel mixes.

The results shows that clay particles are an affect on the indicators of cleanliness (sand Equivalent test, methylene blue test) and of the same on the indicators of quality (R_c , R_{tb} and R_t). The effect of water on the strength, the stability and the durability of these materials (before and after treatment) was also highlighted. We found that only the test-tubes made by the gravel treated with 3.5% of cement (GC) keep the shape of the initial state which confirms the results of physicals tests.

KEY-WORDS : Pollution - indirect tensile strength test - gravel treated - clay - cement - mechanical properties - unconfined compressive strength.

Depuis toujours l'homme utilise les matériaux naturels du sous-sol, les roches, pour ses industries et ses constructions. Il n'a pas cessé d'extraire les diverses matières minérales dont il a besoin pour vivre et se développer.

Parmi ces constructions : les routes qui sont des axes de communication nécessaires au développement économique et social d'un pays. Elles permettent le transport de marchandises, le déplacement des personnes et contribuent à l'occupation du territoire ainsi qu'à l'exploitation des ressources.

La conception d'une route repose sur une optimisation de sa structure de chaussée afin d'obtenir le maximum de qualité et de durabilité. Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini. [11]

Tout d'abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme. Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Enfin, une couche de surface.

Les couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. Pour assurer ce rôle, il est indispensable de réaliser ces couches (base et fondation) par des matériaux résistants et durables tels que les graves traités aux liants hydrauliques (ciment,...).

La résistance, la qualité et même la durabilité d'une grave traitée au ciment peuvent être perturbés en fonction de la présence possible des minéraux argileux qui sont presque toujours présentes dans les roches en quantité variable. Ces minéraux, par leur grande surface spécifique, jouent un rôle d'écran entre le granulat et le liant ; par leur affinité pour l'eau et par leur plasticité, elles conduisent à des difficultés lors de la mise en œuvre des assises de chaussées. [2]

Il est possible d'ajouter le polluant (argile) en toutes proportions afin d'étudier, en laboratoire, l'influence des argiles sur les propriétés des graves-ciment. L'objet de notre étude est de donner l'incidence d'une nature d'argile (illite) et de son dosage sur les valeurs des essais de propriétés d'une grave destinée à être traitée par 3,5 % de ciment, et sur le niveau des performances mécaniques atteintes.

Les résultats montrent que les fines argileuses ont une incidence sur les indicateurs de propreté (Equivalent de sable à 10 % de fines, Essai au bleu de méthylène) et de même sur les indicateurs de qualité (R_c , R_{tb} et R_t).

Le présent travail comporte, après une introduction, quatre chapitres.

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les graves-ciment ainsi que sur les argiles. On aborde les notions générales de ces deux matériaux ainsi que la répartition des argiles dans le monde. La formation de ces matériaux est présentée et discutée aussi.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'identification géotechnique :
 - Des graves non traités de la carrière de COSIDER El EUCH ;
 - Des argiles illitiques d'Ain Arnat ;

On s'intéresse plus particulièrement à montrer les modes opératoires de tous les essais réalisés sur les matériaux précités

- Les résultats des différents essais physico-chimiques réalisés sur la GNT et sur l'argile ainsi que leurs interprétations sont présentés en détail dans le troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques mécaniques des graves ciment. On présente en particulier le mode de traitement des graves étudiés ainsi que les essais mécaniques réalisés et leurs résultats. Ces résultats sont ensuite comparés vis-à-vis des spécifications. Les résultats obtenus semblent être à la hauteur de nos espérances.

Les essais géotechniques effectués dans cette étude ont été réalisés au laboratoire des travaux publics de l'Est (LTPE) à Sétif, laboratoire GEOMAT-SOL (Bordj Bou Arreridj) et le laboratoire du département de Génie Civil de notre université.

I) GRAVE-CIMENT (GC) :

1) Introduction :

La grave est un granulé composé d'un mélange de sable et de gravillons. Celui-ci est utilisé principalement dans l'exécution des corps de chaussées (routes et autoroutes), de plates-formes (parcs de stationnement, aires de stockage...), de pistes d'aérodromes. Dans toutes ces réalisations, ce sont quelques décimètres d'épaisseur de grave qui sont utilisées sous la couche de finition (enrobé bitumineux de couverture, dallage béton, enduit superficiel d'usure...). Les graves peuvent être naturelles, reconstituées en centrale, **traitées aux liants hydrauliques** (ciment, laitier...) ou à la chaux, ou encore traitées aux liants hydrocarbonés (bitume). [24]

Le traitement des graves aux ciment consiste à incorporer un liant dans le sol, avec éventuellement un complément en eau, et à mélanger le tout plus ou moins intimement jusqu'à l'obtention d'un matériau suffisamment homogène (grave-ciment) pour lui conférer des propriétés nouvelles. [12]

2) Définition d'une grave-ciment:

Une Grave-Ciment est un béton maigre (mélange de granulats et de ciment), éventuellement de retardateur de prise, et d'eau ; utilisé en travaux neufs ou en renforcement pour la confection de couches d'assise de chaussées (couche de fondation, couche de base). [14]

Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents dont l'ensemble est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure. Dans l'infrastructure nous avons le sol de plate-forme et une couche de forme, la superstructure est constituée d'une couche de fondation (réalisée généralement par des graves-ciments), d'une couche de base et d'une couche de surface ou de revêtement. (Figure 1) [24]

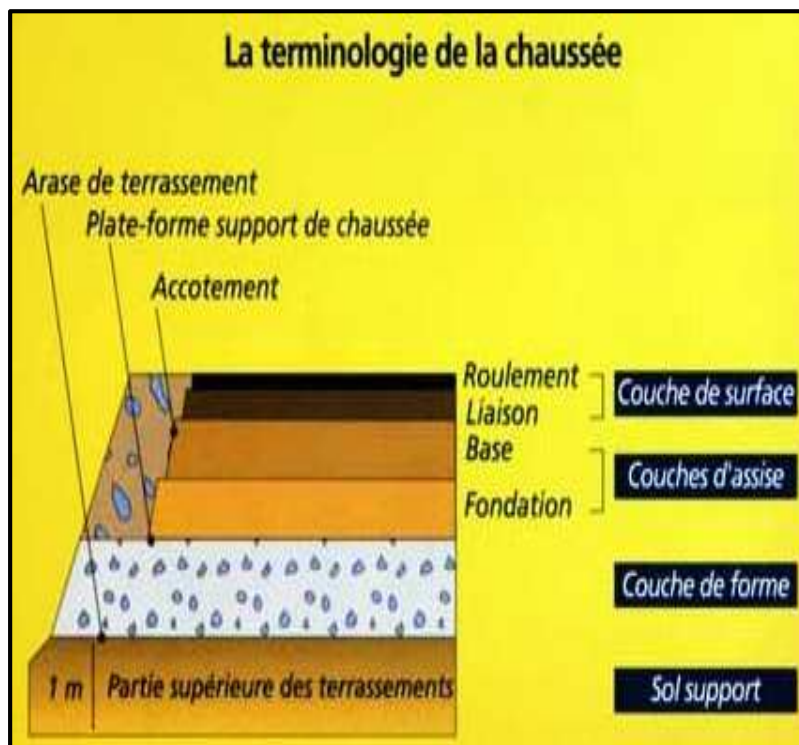


Figure 1 – Schéma structural d'une chaussée [14]

3) Caractéristiques des Graves-Ciment:

Elles sont conformes à la norme EN 14 227-1 “Mélanges granulaires traités au ciment”. Les teneurs en liant (ciment) sont comprises entre 3 % et 4 %, et exceptionnellement 5 % du poids des constituants.

Tableau 1 : Dosage en liant suivant la dimension des granulats [23]

Dimension nominale du granulat (mm)	Teneur minimale en liant (en masse)
> 8 à 31,5	3%
2 à 8	4%
< 2	5%

Les teneurs en eau sont déterminées par référence à la norme NF P 98-114-1, elles sont généralement comprises entre : 4 % et 7 % du poids total. Les granulats utilisés peuvent être naturels ou issus du recyclage. La Grave-Ciment correspond aux mélanges granulaires de granularités suivantes : 0/20 mm, 0/14 mm ou 0/10 mm

Remarque : Les accélérateurs ou retardateurs de prise peuvent être intégrés au mélange. [17]

4) Constituants des graves-ciment:

4.1) Grave non traitée (GNT) :

La grave non traitée (photo 1) est un mélange à granularité continue de cailloux, de graviers et de sables, avec généralement une certaine proportion de particules plus fines.

Pour pouvoir être mise en œuvre dans de bonnes conditions et jouer correctement son rôle dans la chaussée, la grave non traitée doit répondre à un certain nombre de conditions bien définies.



Photo 1 – GNT 0/31,5 mm de la carrière de - Cosidère - El EUCH.

Quelle que soit leur qualité, les graves non traités ont l'inconvénient d'avoir un module «E» faible. Elles répartissent assez mal les charges sur le sol de fondation et ne peuvent convenir que pour les chaussées à faible trafic. Pour les chaussées à trafic élevé, un traitement au liant hydraulique de ces matériaux est indispensable pour pouvoir être mise en œuvre dans de bonnes conditions.

a) Processus de fabrication de la GNT :

L'élaboration des granulats dans une carrière peut être schématisée selon la figure 2. Toutefois, le processus de fabrication varie d'un site à l'autre. Il est optimisé en fonction du gisement et de l'emploi des matériaux.

D'une manière générale, on peut citer les étapes suivantes :

- **Extraction :**

Lors de l'extraction, une bonne connaissance du gisement est indispensable notamment pour éviter de mélanger des matériaux altérés et/ou les marnes aux « bruts ». Cette remarque est valable lorsque les épaisseurs sont conséquentes. S'il s'agit d'inter-stratifications de faibles épaisseurs, l'extraction sélective est impossible. Dans ce cas, la constance de la qualité du granulat est recherchée par exploitation simultanée de toute l'épaisseur du gisement.

- **Elaboration des granulats :**

Ce qui est extrait du front de taille est nommé « brut d'abattage » ou « brut de tir ». Ce matériau est transporté à la centrale d'élaboration où il est débarrassé de la fraction argileuse qui l'enrobe.

- **Concassage primaire :**

Production de graves 0/20 mm, 0/40 mm, 0/60 mm ... etc., qui sont utilisées en l'état ou qui partent dans la chaîne suivante d'élaboration. Cette opération de fragmentation est généralement faite avec un concasseur à mâchoires.

- **Concassage secondaire :**

Et éventuellement **tertiaire** : en général, le concasseur employé est à *percussion*. La volonté de procéder à des concassages successifs est dictée par le niveau de qualité du produit final qui est imposé en termes de propretés, formes, caractéristiques mécaniques et intrinsèques. [20]

b) Modalités de stockage:

La qualité des granulats est tributaire à des modes de stockage et des reprises. Des dispositions sont à prendre pour limiter la ségrégation, l'évolution granulaire et la pollution des granulats. [19]

CHAPITRE I : GENERALITES

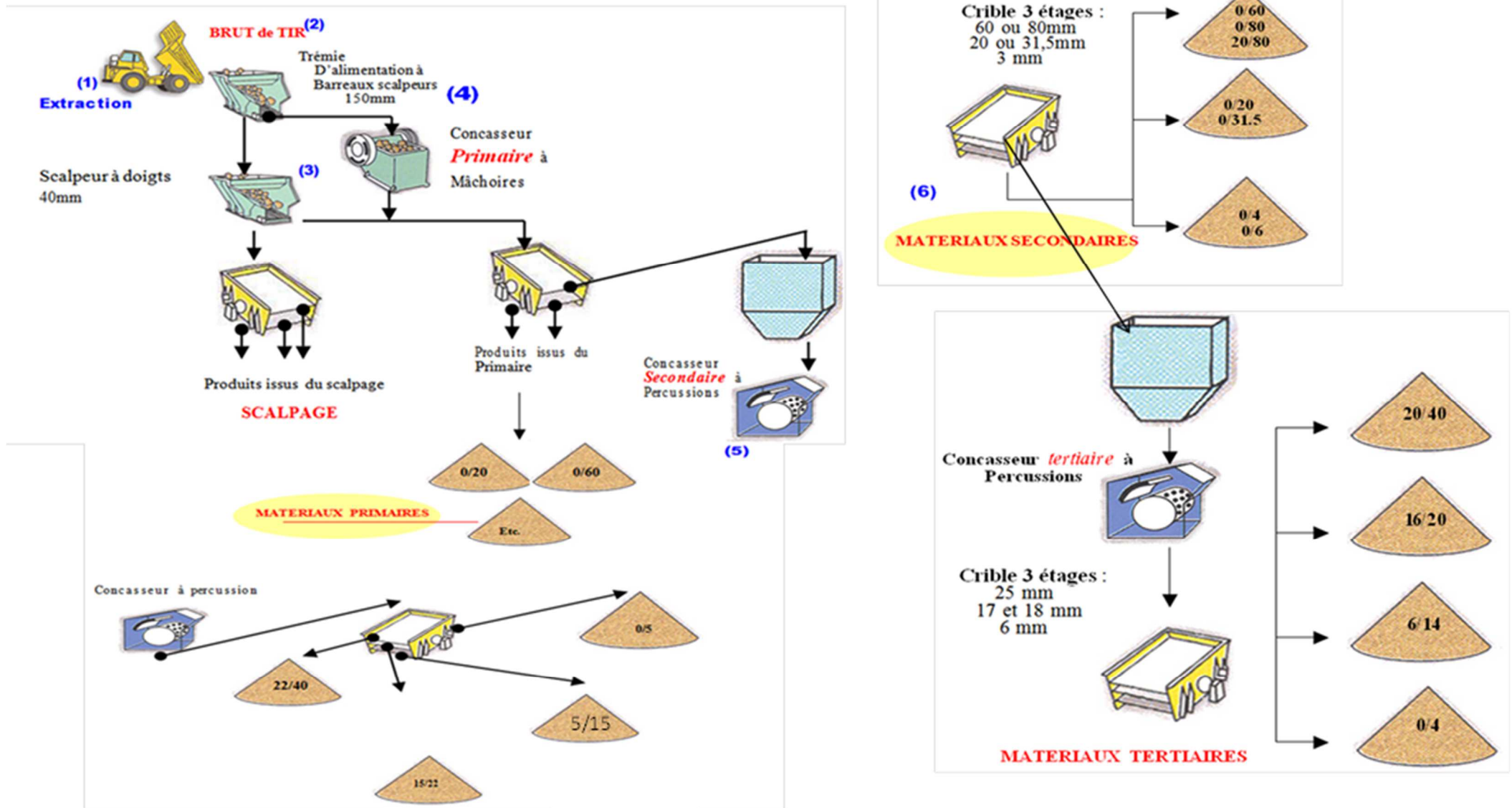


Figure 2 – Schéma de principe de production de granulats : exemple d'installation et de production. [20]

4.2) Ciments :

Les ciments usuels sont aussi appelés liants hydrauliques car ils ont la propriété de s'hydrater en présence d'eau et parce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. [22]

Il ne faut pas confondre:

- ❖ le ciment, poudre commercialisée en sac ou en vrac, avant son gâchage avec l'eau;
- ❖ la pâte de ciment, au moment du gâchage du ciment avec l'eau;
- ❖ le ciment hydraté ou pâte de ciment durcie lorsque le mélange eau + ciment s'est solidifié. [9]

4.2.1) Fabrication du clinker :

Le composé de base des ciments est un mélange de chaux apportée par des roches calcaires et d'alumine, de silice et d'oxyde de fer apportés par des argiles.

Calcaires et argiles sont extraits de carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 ° C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le **clinker Portland**.

Le clinker, auquel on ajoute quelque pourcentage de gypse est ensuite finement broyé de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 kg/dm³.

Tableau 2 : Composition chimique de clinker [16]

Les oxydes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	F ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	Cl	Perte au feu
Minimum(%)	20.0	3.7	1.7	61.0	1.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0	0.2
Maximum(%)	24.3	7.1	5.7	68.1	4.0	1.4	0.7	1.3	0.6	1.2	0.4	0.1	1.1

4.2.2) Autres constituants des ciments :

Ils modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Par leur nature, ils permettent aussi d'abaisser le prix de revient.

➤ **Laitier granulé de haut fourneau (S) :**

Il est obtenu par refroidissement rapide de scories provenant de la fusion de minerai de fer dans un haut fourneau. Le laitier a des **propriétés hydrauliques**.

➤ **Pouzzolanes naturelles (Z) :**

Ce sont des roches d'origine volcanique ou sédimentaires ayant une composition appropriée, ou des argiles et schistes activés thermiquement. Les pouzzolanes n'ont pas de propriété

hydrauliques, mais en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment des hydrates stables: on dit qu'elles ont des **propriétés pouzzolaniques**.

➤ **Cendres volantes (V ou W) :**

Elles proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques au charbon. On distingue:

- Les cendres volantes siliceuses (**V**) qui ont des **propriétés pouzzolaniques**;
- Les cendres volantes calciques (**W**) qui ont des **propriétés hydrauliques** et parfois **Pouzzolaniques**.

➤ **Schistes calcinés (T) :**

Ce sont des schistes portés à une température de 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes **propriétés hydrauliques** et aussi **pouzzolaniques**.

➤ **Calcaires (L) :**

Ils doivent être constitués de 75% au moins de CaCO_3 .

➤ **Fumées de silice (D) :**

Proviennent de l'industrie du silicium et des alliages. Elles ont des **propriétés pouzzolaniques**.

➤ **Fillers (F) :**

Ce sont des constituants secondaires et n'excèdent pas 5% dans la composition des ciments. Ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d'eau).

➤ **Constituants secondaires :**

a) **Sulfate de calcium :**

Le sulfate de calcium a pour effet de régler la prise du ciment. Le sulfate de calcium qui peut être du gypse, de l'anhydrite ou de l'hémi hydraté, doit être ajouté en faible quantité, c'est-à-dire de l'ordre de 3 à 5 % maximum.

b) **Additifs :**

Les additifs ne doivent pas présenter des actions nocives sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

La proportion d'additifs doit toujours rester très faible, le pourcentage admis ne doit pas dépasser 0.5 % de la masse totale, valeur dans laquelle se trouve comprise la proportion d'agent de mouture, et ceci pour tous les ciments à l'exception des CHF-CEM III/A ou B et des CLK-CEM III/C, pour lesquelles la proportion de sels chlorés (Na Cl) est autorisée jusqu'à 1 %. [1]

4.2.3) Processus de fabrication des ciments courants :

Les matières premières entrant dans la fabrication du clinker sont le calcaire et l'argile dans les proportions respectivement proche de 80 et 20%. La fabrication du ciment passe par les étapes suivantes (figure 4).

❖ Extraction :

L'extraction consiste en générale pour le calcaire, à abattre la roche à l'explosif, dans des carrières généralement à ciel ouvert, de façon à la fragmenter en blocs chargé ensuite dans des dumpers pour alimenter les concasseurs, alors que l'argile, beaucoup plus meuble est exploité au moyen d'excavateurs avant d'être transportée par camions

❖ Concassage :

Les matériaux extraits de la carrière présentent des granulométries grossières allant jusqu'au m³, le concassage effectué plus souvent sur le lieu même de l'extraction a pour but d'en limiter la granulométrie à 50 voire 100 mm au maximum.

❖ Préparation du cru :

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire et de l'argile dans des proportions définies en fonction de leurs compositions chimiques particulières, mais toujours proche du rapport 80% de calcaire pour 20 % d'argile.

La préparation du cru peut être réalisée par quatre procédés différents :

- **La voie sèche** : la plus généralement utilisé (en Algérie toutes les cimenteries travaillent à voie sèche).
- **La voie humide**
- **La voie semi-sèche**
- **La voie semi-humide**

❖ Cuisson :

Réalisé dans des fours rotatifs dont les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 5 m de diamètre et de 80 à 100 m de longueur dans les procédés à voie sèche (de 150 m dans le procédé à voie humide), à une température compris entre 1400 et 1500 °C. La cuisson permet la transformation du cru en clinker, le cycle de traitement comprend les phases suivantes :

- Le préchauffage qui s'effectue dans un échangeur de chaleur qui se trouve à l'amont du four (tour de préchauffeur à cyclones), les gaz récupéré du four y brassant la farine à contre-courant.
- La décomposition des argiles qui se situe au-dessus de 500°C.

- La décarbonatation des calcaires qui s'effectue à 950°C dans la partie médiane du four dont les températures sont comprises 550 et 1100°C ;
- La formation du clinker ou clinkérisation à 1450°C qui s'effectue en partie avale du four près du brûleur.

❖ Refroidissement :

Cette opération a pour but d'abaisser la température du clinker qui est de l'ordre de 1200 à 1450°C à la sortie du four à environ 50/250°C suivant le type de refroidisseur. Cette opération a également une incidence sur la qualité du ciment, un refroidissement trop lent peut amener la libération de chaux libre et la transformation de C_3S en C_2S qui entraîne une baisse de résistances.



Figure 3 – Clinker après refroidissement. [5]

❖ Broyage :

Il est réalisé et contenu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts. Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout de gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi que celui de éventuels autres constituants (laitier, cendre...) ce qui fait d'obtenir les différents types de ciments normalisés, cette opération est effectuée dans des broyeurs à boulets.

- Stockages et ensachage et expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. [10]

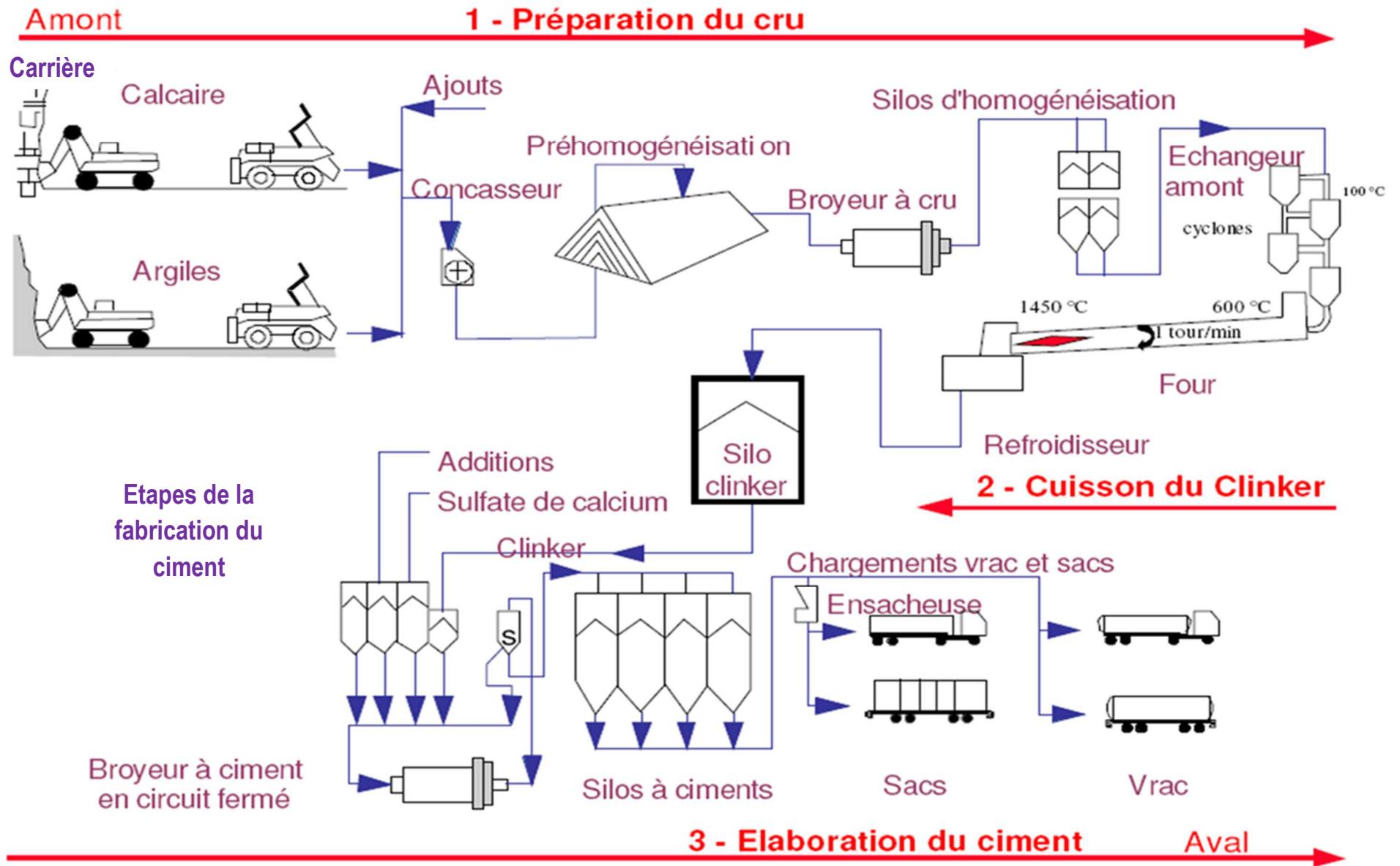


Figure 4 – Schéma de fabrication du ciment [3]

4.2.4) Classification des ciments :

a) Classification en fonction de leur composition :

Tableau 3 : Classification du ciment en fonction de leur composition d'après la norme NF P 15-301

	Ciment Portland	Ciment portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pouzzolaniques		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA-CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B	CHF-CEM III/A	CHF-CEM III/B	CLK-CEM III/C	CPZ-CEM IV/A	CPZ-CEM IV/B	CLC-CEM V/A	CLC-CEM V/B
Clinker (K)	≥ 95%	≥ 80% ≤ 94%	≥ 65% ≤ 79%	≥ 35% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 34%	≥ 5% ≤ 19%	≥ 65% ≤ 90%	≥ 45% ≤ 64%	≥ 40% ≤ 64%	≥ 20% ≤ 39%
Laitier (S)	*	6% ≤ total ≤ 20% (fumée de silice ≤ 10%)	21% ≤ total ≤ 35% (fumée de silice ≤ 10%)	≥ 36% ≤ 65%	≥ 66% ≤ 80%	≥ 81% ≤ 95%	*	*	≥ 18% ≤ 30%	≥ 31% ≤ 50%
Pouzzolane (Z)	*			*	*	10% ≤ total 35 % (fumée ≤ 10%)	36% ≤ total ≤ 55 % (fumée ≤ 10%)	18% ≤ total ≤ 30%	31% ≤ total ≤ 50%	
Cendres siliceuses (V)	*			*	*	*	*	*	*	
Fumée de silice (D)	*			*	*	*	*	*	*	
Cendres calciques (W)	*			*	*	*	*	*	*	
Schistes (T)	*			*	*	*	*	*	*	
Calcaires (L)	*			*	*	*	*	*	*	
Fillers (F)	*			*	*	*	*	*	*	*

Le tableau ci-dessus indique les différents ciments et les proportions en masse de leurs constituants. Les constituants marqués d'une étoile sont secondaires (*moins de 5 %*)

b) Classification en fonction de leur résistance :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous-classes sont associées aux 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées.

Les classes doivent respecter les spécifications indiquées dans le tableau ci-dessous. Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs garanties lorsqu'elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées.

Tableau 4 : Classification du ciment en fonction de leur résistance d'après la norme NF P 15-301.

Classe	Résistance à la compression (MPa) norme EN 196-1				Retrait à 28 jours norme P 15-433 ($\mu\text{m/m}$)	Début de prise norme EN 196-3 (min)	Stabilité norme EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini	maxi			
32,5		(17,5)	$\geq 32,5(30)$	$\leq 52,5$	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32,5 R	$\geq 13,5(12)$		$\geq 32,5(30)$	$\leq 52,5$	≤ 1000	≥ 90	≤ 10
42,5	$\geq 12,5(10)$		$\geq 42,5(40)$	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
42,5 R	$\geq 20(18)$		$\geq 42,5(40)$	$\leq 62,5$	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
52,5	$\geq 20(18)$		$\geq 52,5(50)$			≥ 60	≤ 10
52,5 R	$\geq 30(28)$		$\geq 52,5(50)$			≥ 60	≤ 10

c) Désignation normalisée des ciments :

- CEM I :

C'est le ciment portland artificiel et il est constitué de clinker pur avec un faible pourcentage de gypse (environ 5%)

- CEM II :

C'est le ciment portland aux ajouts il regroupe le ciment :

Au laitier ; à la fumée de silice ; à la pouzzolane ; aux cendres volantes ; au schiste calcine ; au calcaire et composé.

Il se constitue de :

- au moins 65% de clinker
- au maximum 35% du constituant secondaire

- CEM III ciment de haut fourneau :

Constitué d'un mélange de clinker et de laitier granulé de HF (teneur minimale 36%).

- **CEM VI ciment pouzzolaniques :**

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolanes et de cendres et doit en plus satisfaire l'essai de pouzzolanité.

- **CEM V ciment composé :**

Constitué d'un mélange d'un mélange de clinker, de laitier granulé et d'autre constituant secondaire.

II) LES ARGILES:

Il n'existe pas de définition unique du terme "argile". Le mot "argile" englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains et l'autre à la minéralogie. La définition dépend de la discipline concernée. Le géologue ou le pédologue considèrent comme "argile" tout minéral de faible granulométrie, la limite étant fixée à 2 ou 4 microns selon les cas. Les ingénieurs s'attachent plutôt aux propriétés de plasticité des matériaux argileux quel que soit leur taille. Les céramistes regroupent les matériaux selon leur comportement au chauffage. [08]

1) Définitions scientifiques et terminologie :

Généralement, les minéraux argileux sont des phyllosilicates hydratés de petite taille. Cependant des minéraux comme les illites ou les chlorites sont fréquents dans la fraction silteuse des roches magmatiques et métamorphiques; tous les minéraux argileux ne sont pas des phyllosilicates (quartz, feldspath), ni même des silicates (oxydes). Les argiles sont généralement cristallisées, même si des argiles amorphes existent (allophanes dans les sols développés sur substrat volcanique ou andosols). Dans les ouvrages de référence, il existe différentes propositions de définitions. Par exemple, **Eslinger & Peaver (1988)** proposent de définir les argiles comme un minéral qui domine dans la fraction fine < 2 microns des roches et des sols. Par contre, **Weaver (1989)** regroupe tous les minéraux phyllosilicatés sans aucune connotation de taille et propose pour éviter les confusions d'utiliser le terme de "physils". [21]

2) Domaines d'études :

Les minéraux argileux et les argiles sont étudiés dans de nombreux domaines. Pour les géologues, les argiles apportent des informations sur les conditions environnementales (source, condition de formation, diagenèse...). Les ingénieurs pétroliers déduisent les conditions thermiques des gisements (degré de maturation). Les ingénieurs civils s'intéressent aux propriétés des argiles en tant que matériel industriel (réfractaires, matériaux de construction). Les agronomes analysent les propriétés d'hydratation et d'adsorption des argiles pour concevoir les fertilisants. Quel que soit

la discipline, la structure cristalline des argiles est importante car elle est responsable des propriétés spécifiques du minéral. Il existe une très vaste littérature concernant les argiles et les matériaux argileux, dispersée selon l'orientation des revues. [6]

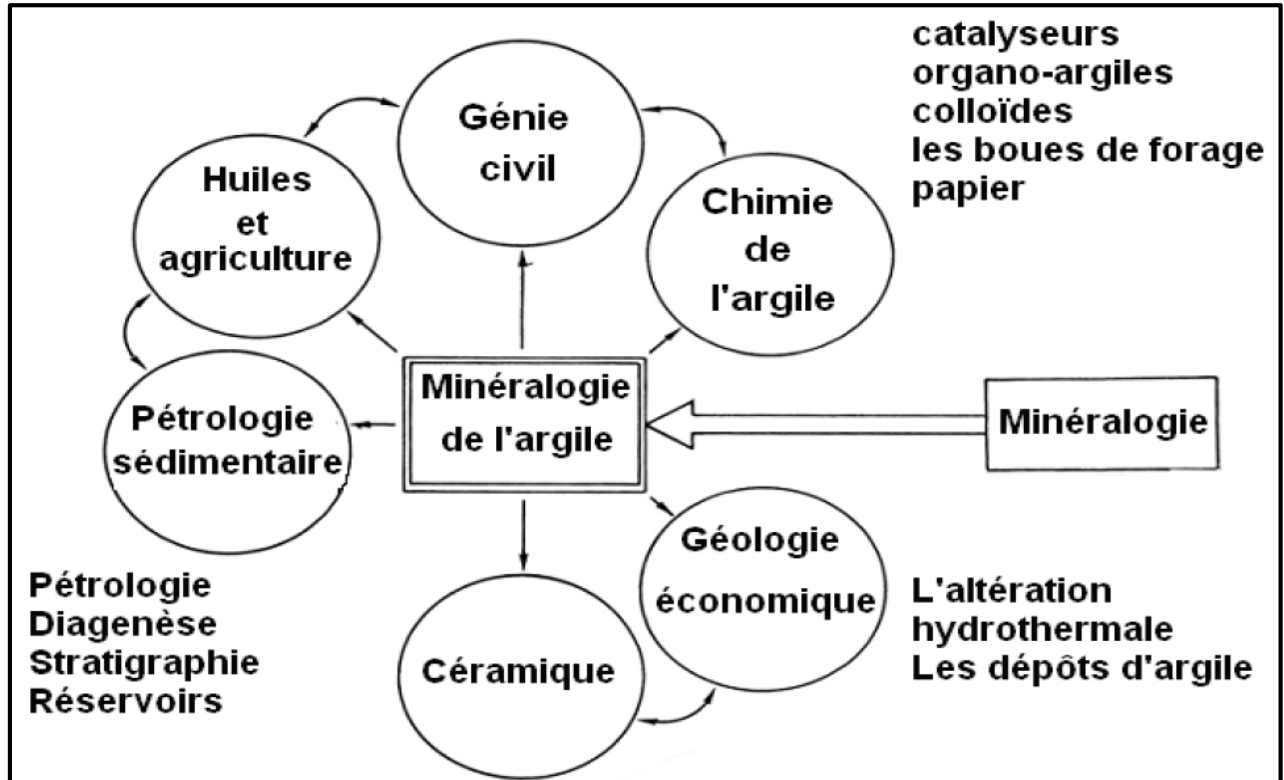


Figure 5 – Domaines d'études (Eslinger & Peaver, 1988).

3) L'origine des argiles dans les sols et les roches :

L'origine des argiles dans les sols et les roches est à rechercher dans un ensemble de processus de la géodynamique externe dont les principaux points sont les suivants :

- l'altération des minéraux,
- le transport des produits d'altération et leur dépôt,
- la transformation de ces minéraux.

Le rôle de ces argiles dépendra de leur nature, de leur proportion et de la texture du matériau.

a) L'altération :

Au début de l'histoire de l'écorce terrestre, les premières roches formées étaient d'origines magmatiques.

Dès l'apparition de l'eau, érosion et altération chimique se développent, dissociant et détruisant les grains minéraux. Les argiles se forment ainsi au détriment des autres espèces minérales : les feldspaths se transforment en séricite, puis illite (I), avec des variantes possibles en climat

intertropical; si le drainage est bon, il se forme de la kaolinite(K) ; en milieu alcalin, avec un mauvais drainage, il se forme des smectites (M).

Les micas donnent des vermiculites, chlorites (Ch) et illites, les ferromagnésiens produisent des chlorites. Il en résulte des associations plus ou moins caractéristiques. Ces altérations peuvent conduire à des sols (dépôts détritiques continentaux), caractérisés par un type d'argile : latérites à kaolin, arènes à illite, etc.

b) Le transport et le dépôt des produits :

Transportés par l'eau, le vent etc., les minéraux argileux hérités des zones érodées et altérées finissent par se déposer pour constituer les roches sédimentaires, plus ou moins cohérentes et plus ou moins riches en argiles : alluvions des rivières, sables éoliens, limons, flyschs et molasses, calcaires, marnes et argiles avec tous leurs intermédiaires ; ces dépôts se situent en milieu continental pour les premiers et marin pour les derniers.

La nature du minéral argileux dominant est liée à la pétrographie et au climat présent ou passé de la région dont il provient.

c) Les transformations :

Ces héritages minéraux sont souvent plus ou moins transformés. Par exemple, l'arrivée en eau de mer de suspensions fluviátiles fait évoluer les argiles vers l'illite ; c'est le cas des argiles du Keuper, des flyschs et des molasses.

Les transformations peuvent se produire pendant l'altération, la sédimentation, la diagénèse et le métamorphisme ; en général, il y aura dégradation lors des deux ou trois premières phases : micas → illite → smectite, et aggradation (c'est-à-dire transformation inverse) dans les deux dernières phases.

Dans des conditions de sédimentation liées aux milieux basiques lacustres ou marins carbonates, il se développe de préférence des argiles fibreuses aux propriétés voisines des smectites. [4]

4) Les argiles dans les roches :

a) Présence due à la genèse et à l'altération :

- Roches magmatiques et métamorphiques :

Les argiles n'existent dans ces roches que par altération des feldspaths, micas et ferromagnésiens. Il y en a donc très peu, moins de 1 %, sauf cas particuliers où les feldspaths sont totalement transformés dans les parties les plus superficielles des gisements ou dans les arènes qui se forment aux dépens de ces roches. On passe alors à un sol, au sens que lui donnent les géotechniciens.

Ces argiles sont disposées dans les joints de clivage ou de macle, ou dans les espaces intergranulaires. Pour une telle répartition, la sensibilité à l'eau de ces roches est toujours notable et bien

sûr, fonction de la nature et de la proportion d'argiles : l'eau ayant toujours accès à ces discontinuités, sa fixation sur les argiles leur fait jouer le rôle de vérins écartant ces discontinuités et entraînant un gonflement plus ou moins important. Dans les laves, basaltes en particulier, on a souvent observé, en plus de cette localisation dans les discontinuités, leur présence dans des cavités ; dans ces derniers cas, une partie de l'argile est donc inactive vis-à-vis du gonflement.

Dans les roches métamorphiques feuilletées, les argiles ont tendance à se répartir dans les plans de schistosité ; le gonflement est alors fortement anisotrope.

- *Roches massives sédimentaires* :

Les argiles sont ici des constituants hérités, transformés ou néoformés, provenant dans quelques rares cas d'une altération (grès feldspathiques).

Quand la proportion d'argiles est faible (inférieure à 5 %), leur localisation est la même que pour les roches magmatiques et les comportements vis-à-vis de l'eau ne sont pas différents (calcaires, dolomies, grès).

Si la proportion d'argiles est plus importante (supérieure à 10 %), elles peuvent être :

- disséminées dans toute la masse comme dans les cas précédents,
- réunies en petits flocons voisins de 0,1 mm répartis dans la masse,
- rassemblées en lits alternants avec des lits carbonates ou silteux,
- orientées quand les phyllites se déposent parallèlement à la stratification (calcaires argileux, marnes, grès argileux).

b) Présence due à la tectonique :

La présence quasi générale de diaclases dans toutes les roches massives, et la présence occasionnelle de fissures et de failles, offrent autant de voies de pénétration à l'altération dans les roches. Ceci conduit toujours à des concentrations argileuses qui peuvent être importantes. L'ouverture de ces discontinuités planaires est de l'ordre de quelques millimètres à quelques mètres ; leur extension dans l'espace peut être plus grande. Le remplissage meuble argilo-sableux peut contribuer à des défauts de stabilité de la roche en masse (orientation défavorable des plans).

La fabrication de granulais à partir de ces roches, qu'il faut concasser, ne peut éviter, sans traitement particulier, que l'on retrouve des argiles dans toutes les granulantes. Elles restent piégées, car existant d'origine dans les plus gros éléments, elles se retrouvent libérées par le concassage dans les parties les plus fines des sables. Ces argiles libérées polluent la surface des gravillons, mais leur quantité n'est pas plus élevée dans les sables que dans la roche d'origine.

Par contre, l'apport très fréquent d'argiles venant des parties supérieures du gisement, où la roche est la plus altérée, et des cassures qui en contiennent est le plus important.

c) Argiles dans les roches meubles :

Toutes les roches sédimentaires à cohésion nulle ou faible sont des sols au sens des mécaniciens. Ce sont des ensembles de particules silicatées (quartz, argiles et plus rarement d'autres silicates) et carbonatées (calcite et plus rarement dolomite). Ils se mélangent en toutes proportions (figure 6) et, mis à part les argiles dont les dimensions n'excèdent pas quelques micromètres, tous les autres minéraux ou fragments de roches peuvent avoir des dimensions allant du micromètre à quelques décimètres. Nous laisserons de côté les sols organiques qui, avec ou sans argiles, posent des problèmes très particuliers. Il y a donc dans ces sols un squelette (quartz, calcite), dont la connaissance de la granularité est seule importante, et une phase argileuse, dont il faudrait connaître la proportion et l'aptitude à fixer de l'eau.

La texture des argiles peut contribuer largement à l'anisotropie des sols lorsqu'elles sont orientées ou disposées en lits, soulignant la stratification.

Elles sont parfois réparties dans la masse, désorientées par la présence d'une phase silteuse, ou réunies en amas qui contribuent à une désagrégation en petits fragments esquilleux.

Dans les gisements alluvionnaires, les argiles sont dans les galets, qui peuvent être des roches altérées, dans la matrice sableuse et parfois en lentilles d'importance très variable. [4]

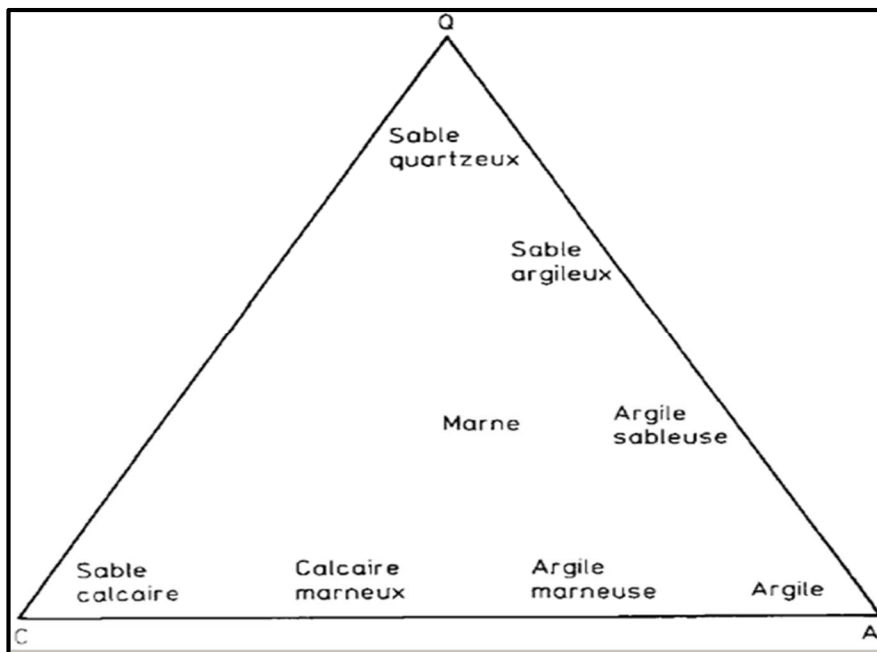


Figure 6 – Minéralogie des sols en tenant compte de la granularité. [4]

5) Composition minéralogique :

Les minéraux argileux sont des substances cristallines qui tirent essentiellement leur origine de l'altération chimique de certains minéraux composant la roche. Les cristaux ressemblent à de minces plaques ou plaquettes, des études par diffraction de rayons X ont permis aux chercheurs d'établir que ces plaquettes sont un empilement de feuillets à structure atomique répétée. [15]

En réalité, il n'existe que deux types de feuillets de cristaux de base, les feuillets en **Tétraèdre** ou de silice et les feuillets en **Octaèdre** ou d'alumine. Leur constitution se différencie par le mode d'empilement de ces feuillets et par les divers liants et ions métallique contenus dans le treillis cristallin.[8]

Le feuillet en tétraèdre est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène ou sommets entourant un atome unique de silicium.

Le feuillet en octaèdre est une combinaison d'unités octaédriques composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyle entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément. [7]

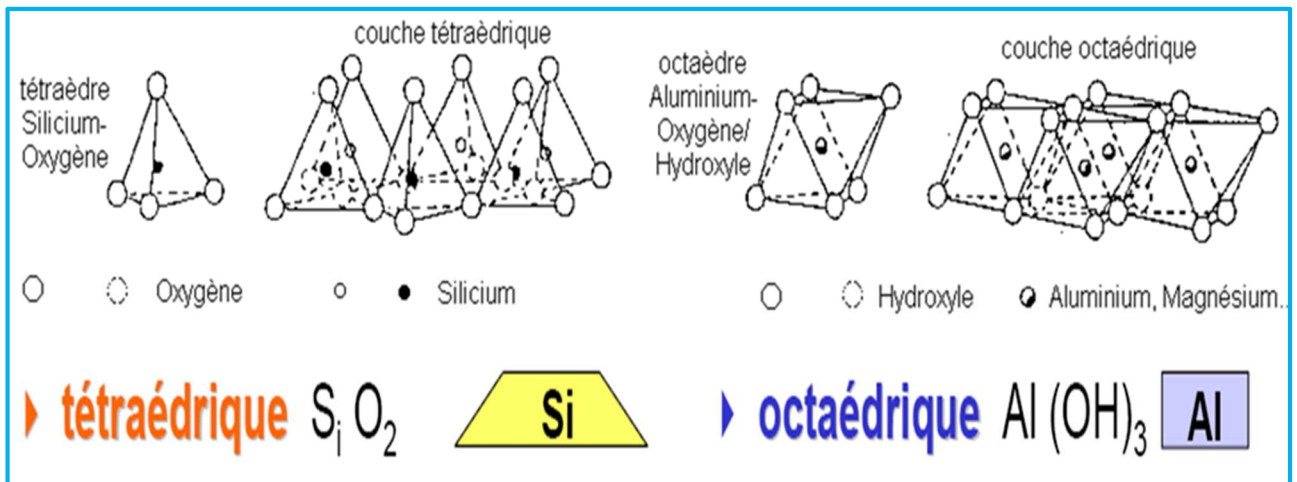


Figure 7 – Structure des minéraux argileux. (Velde, 1995).

6) Les types d'argiles :

a) La kaolinite :

Associe, dans son feuillet, une couche de tétraèdre à cœur de silicium et une couche d'octaèdre à cœur d'aluminium, le feuillet est neutre. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0.7 nm. La formule chimique structurale est. $Si_2Al_2O_5(OH)_4$.

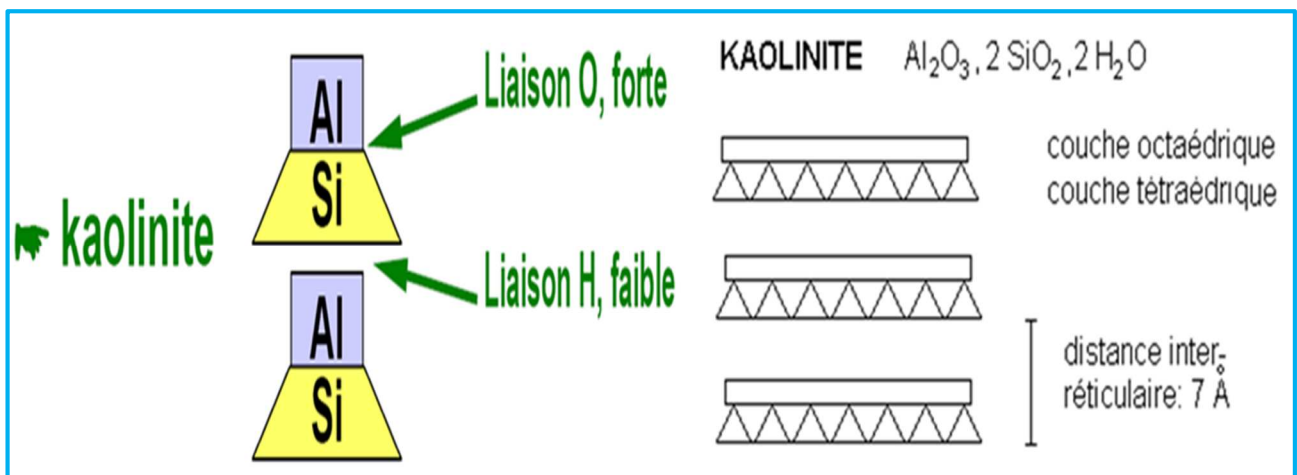


Figure 8 – Structure de Kaolinite suivant (Eslinger & Peaver, 1988).

b) La Montmorillonite :

Parfois appelée smectite, est un minéral argileux important, composé de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'alumine. Le feuillet en octaèdre se trouve entre deux feuillets de silice et les sommets des tétraèdres se conforme avec les hydroxyles du feuillet en octaèdre pour ne former qu'une seule couche. Les sols qui contiennent de la montmorillonite peuvent être gonflants lorsque leur teneur en eau augmente ; les pressions de gonflement qui en résultant peuvent facilement causer des dommages aux structures légères et aux pavages.

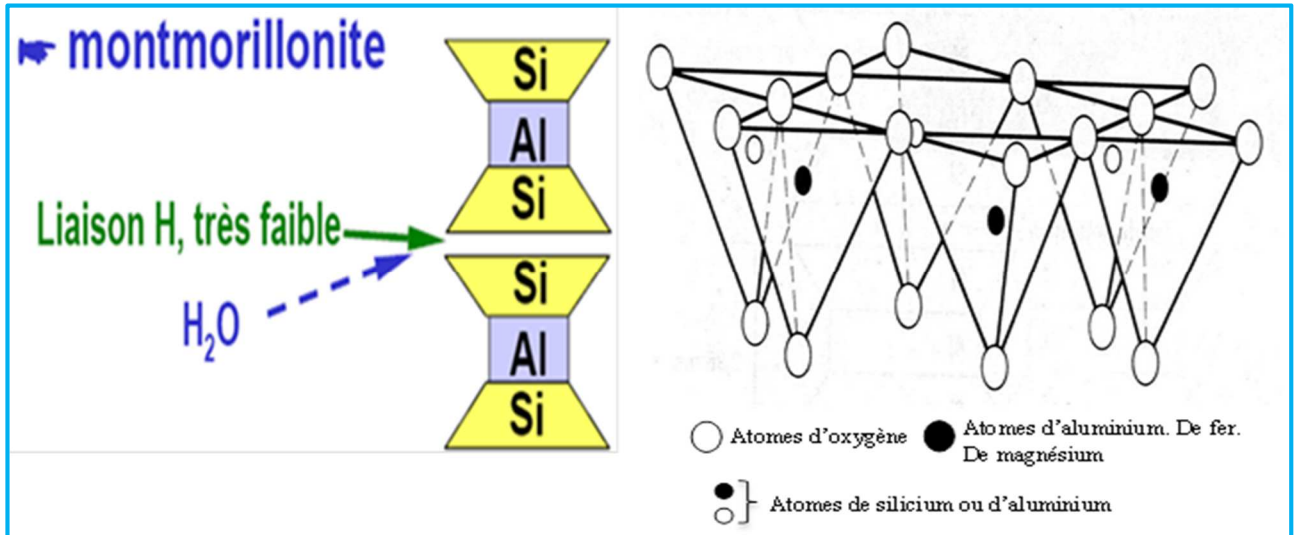


Figure 9 – Structure atomique de montmorillonite (D'après Grim ,1959).

c) L'Illite :

Associent, comme les micas, une couche octaédrique surtout alumineuse à deux couches tétraédriques surtout siliceuses. Mais les ions Al peuvent remplacer Si, et des ions Mg et Fe peuvent remplacer Al le feuillet n'est plus équilibré, et des ions k viennent le saturer en position inter foliaire. L'équidistance réticulaire est de 1nm la formule générale des illites est donc (S_{14-x}Al_x) (Al, M1, M2)₂ O₁₀ (OH) 2K. La glauconite est l'iso type ferrique de l'illite.

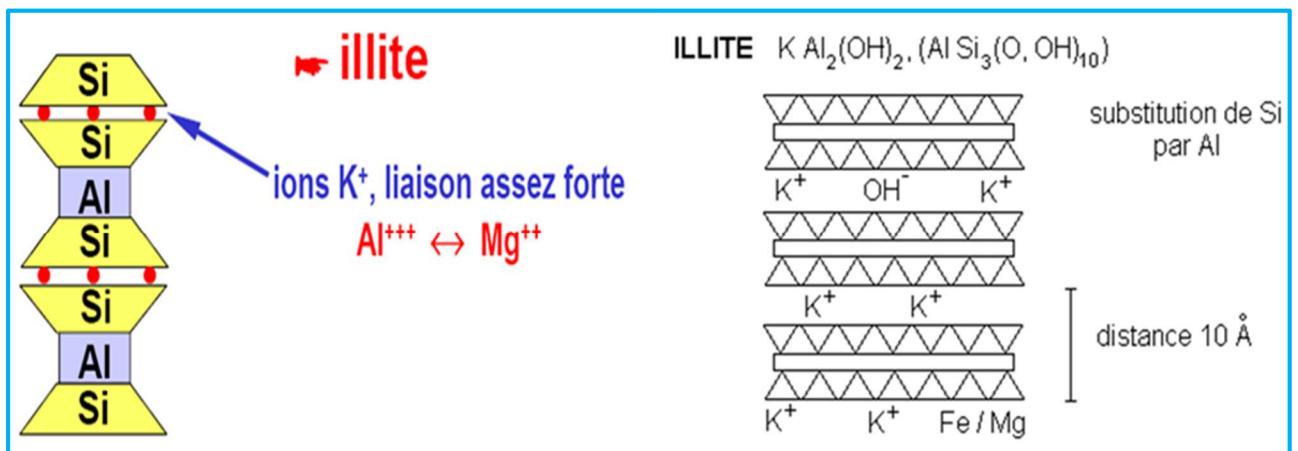


Figure 10 – Structure de l'illite (Eslinger & Peaver, 1988).

d) La Chlorite :

Sont construites sur un modèle analogue à celui des illites, des chlorites et, donc, des micas. Mais l'espace inter foliaire est garni d'une couche continue d'hydroxydes de natures variées cette couche octaédrique supplémentaire est stable et l'équidistance réticulaire est fixe à 1,4nm. La chlorite peut être gonflante, elle n'est cependant pas aussi active que la montmorillonite. Le chlorite est relativement fréquente dans les sols argileux, elle est constituée d'une répétition des couches suivantes : un feuille de silice, un feuillet d'alumine, un autre feuille de silice et finalement un feuillet de gibbsite (Al) ou de brucite (Mg). [7]

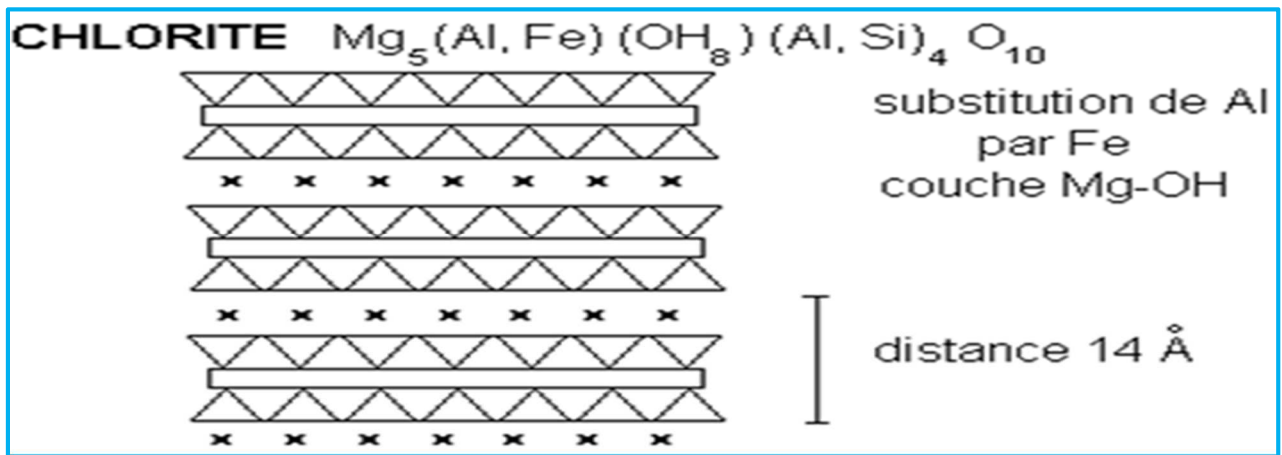


Figure 11 – Structure de chlorite suivant (Eslinger & Peaver, 1988).

e) La Smectite :

Ancienne famille des montmorillonites forment une famille nombreuse, bâtie sur le même modèle que les illites, mais l'empilement des feuillet élémentaires est désordonné : chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent. Ce désordre et la faible charge des feuillet facilitent écartement. Peuvent se loger dans cet espace inter foliaire des cations divers des molécules d'eau des molécules organiques, d'encombrement variable. C'est pourquoi l'équidistance réticulaire peut varier de 1 à 1.8nm. Toute une systématique est construite pour décrire et nommer la variété des smectites. [06]

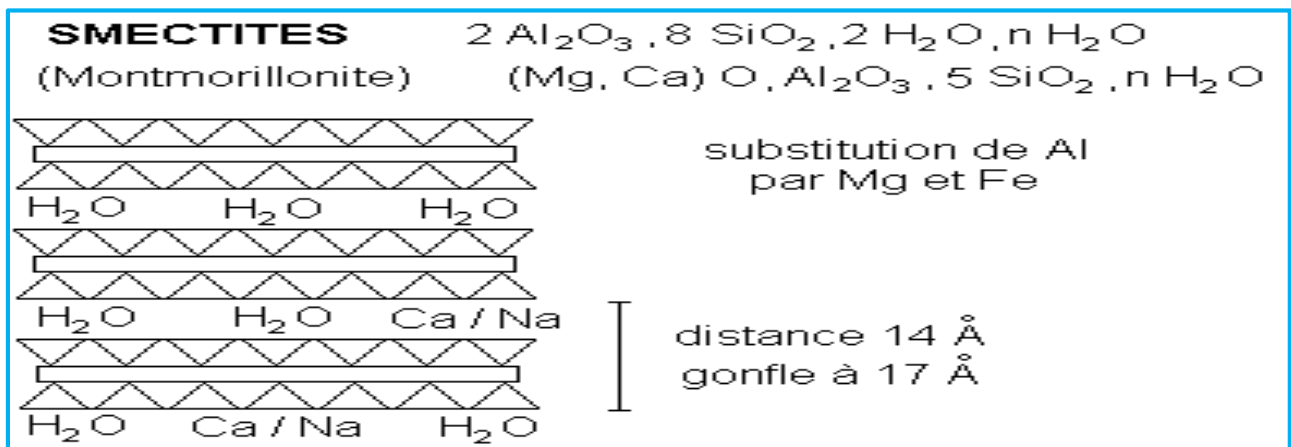


Figure 12 – Structure de smectites suivant (Eslinger & Peaver, 1988).

7) Identification des minéraux argileux :

Dans les cours qui portent sur les matériaux, il est expliqué que les matériaux qui présentent une structure cristalline répétée diffractent les rayons X. Ces minéraux dont les structures cristallines sont différentes présentent des spectres de diffraction des rayons X différents. L'analyse différentielle thermique est une technique parfois utilisée pour l'identification des minéraux argileux, elle consiste à chauffer continuellement un échantillon de sol inconnu en présence d'une substance inerte de référence, dans un four électrique, à une température bien définies pour des minéraux donnés ; les variations enregistrées peuvent ensuite être comparées avec celles de minéraux connus.

L'identification des minéraux argileux dans un échantillon de sol peut aussi se faire à l'aide d'un microscope électronique à transmission et à balayage.

Ce procédé présente cependant des difficultés sur le plan de l'interprétation et ne permet pas d'obtenir des données quantitatives.

Casagrande a suggéré une démarche simplifiée, basée sur les limites d'atterberge.

L'abaque de plasticité de Casagrande peut donner autant de renseignements pertinents que n'importe quelle analyse de haute précision par diffraction ou par différentiation thermique.

La marche à suivre est indiquée à la figure 13 il s'agit de placer sur le graphique W_L - I_P les points correspondant connus.

Si les points de l'échantillon sont situés bien au-dessus de la ligne A et près de la ligne U, il est très probable que cet échantillon contienne une grande quantité de minéraux argileux actifs, comme la montmorillonite.

Même si le sol est classifié CL et qu'il se trouve près de la ligne U, la portion argileuse du sol est surtout composée de montmorillonite. [7]

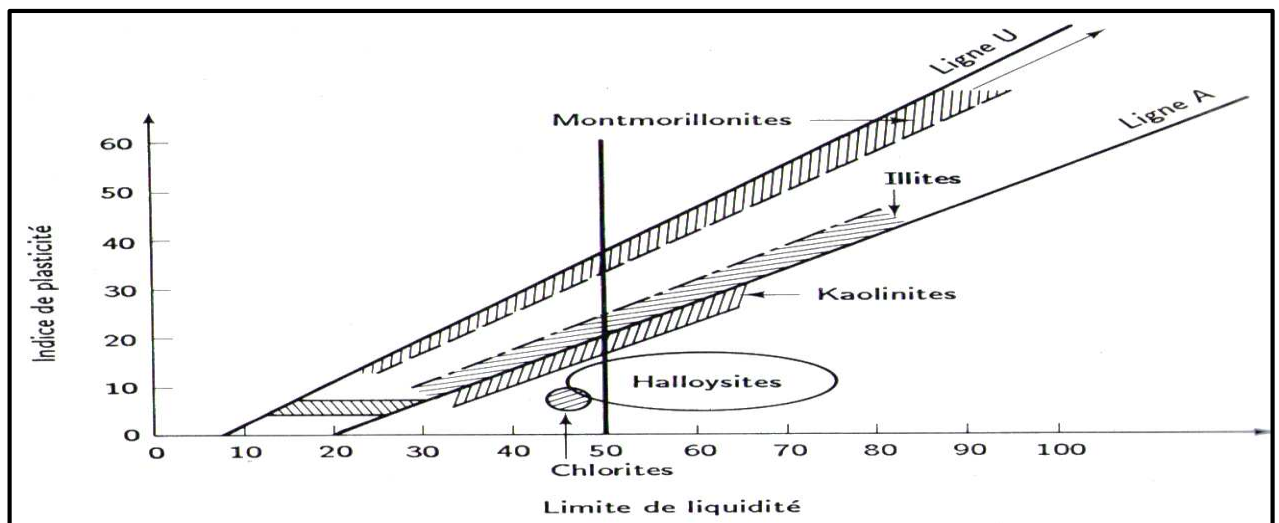


Figure 13 – Position des minéraux argileux les plus communs sur l'abaque de plasticité de Casagrande (d'après Casagrande, 1948 et Mitchell, 1976).

III) PROVENANCE DES MATERIAUX DE L'ETUDE :

1) Grave Non Traité (GNT) :

1.1) Localisation :

La GNT utilisé dans cette étude provenant de la carrière de Cosidère EL Euch (Latitude 35°54'2.81"N, longitude 4°37'15.92"E), distant de 25 Km au sud du chef-lieu de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.

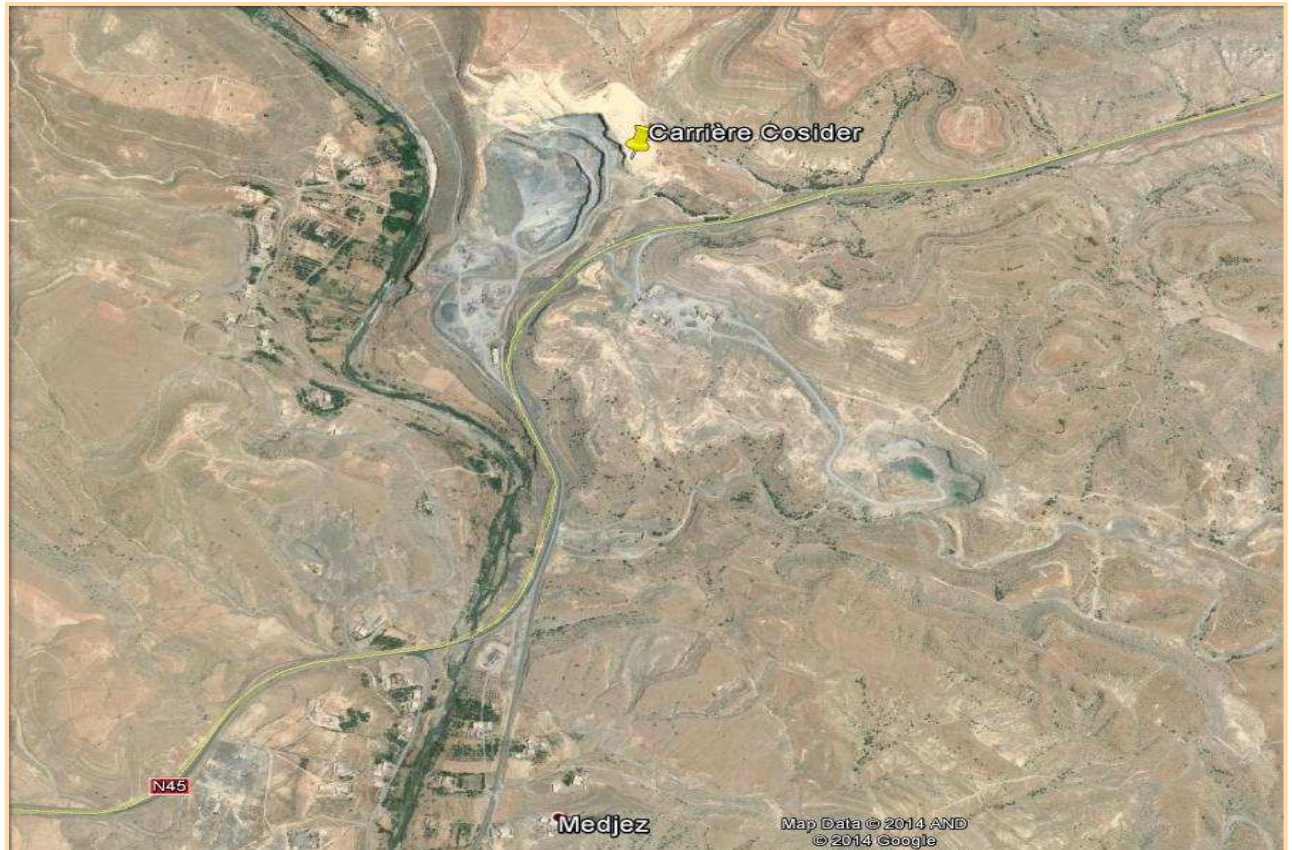


Figure 14 – Localisation de la carrière de Cosidère. (google earth -2014)

1.2) Contexte géologique :

Les formations géologiques faisant l'objet d'une exploitation pour la production de granulats utilisés dans cette étude sont en général des roches massives (calcaire, marno-calcaire, dolomies).

- Les formations calcaires

Les formations calcaires sont d'âge Crétacé supérieur à l'éocène et sont présentes dans une grande extension entre la région d'El Euch et Mdjez.

L'éocène affleure dans le sud de la carte géologique au 1/50000, le crétacé supérieur affleure suivant une ligne Est – Ouest. Ce dernier est caractérisé par la présence d'un nombre important des failles orientés Sud-Ouest-Nord Est (figure 15).

L'analyse des sondages exécutés dans la carrière calcaire de Cosidère où les matériaux de l'étude ont été prélevés montre une lithologie constituée essentiellement de Marne-Calcaire Lumachellique, Calcaire à Chalmasia et Tissotia, Marno Calcaire à Astrate, Calcaire et Dolomie Lités.

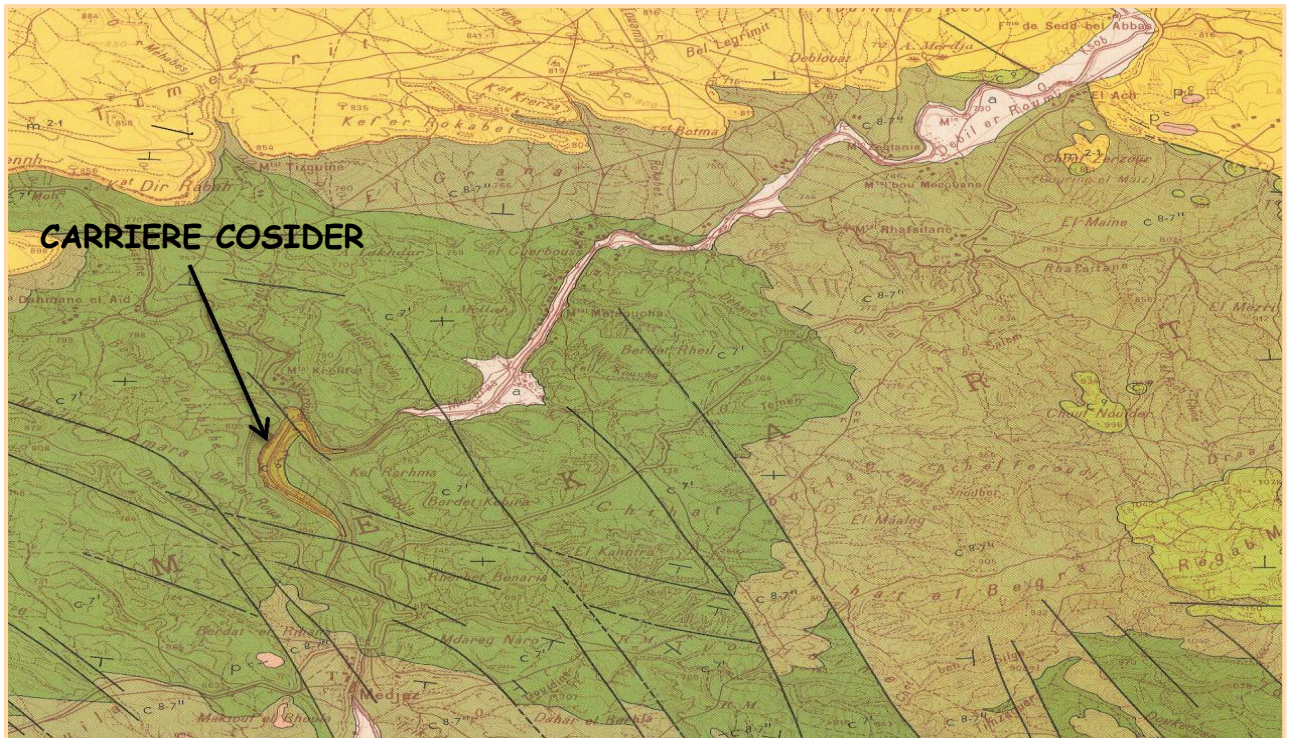


Figure 15 – Extrait de la carte géologique au 1/50000 de MAADID, 1949.

2) Ciment :

2.1) Localisation :

Le ciment utilisé dans notre travail est un ciment CPJ-CEM II /A 42.5 (Photo2), produit par la Société des Ciments de Ain El Kebira domiciliée à 25 km du chef-lieu de la wilaya de Sétif.



Figure 16 – Localisation de la cimenterie d'Ain Kebira. (Google earth, 2014)



Photo 2 – Ciment CPJ-CEM II/A 42.5de Ain Kebira.

2.2) Caractéristiques :

Tableau 5 : Résultats des analyses chimiques du ciment d'Ain El Kebira d'après le laboratoire de la cimenterie.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	SO ₃	Ca OL	PAF
27.34	4.61	4.52	58.02	1.36	1.80	0.93	3.10

3) Argile :

3.1) Localisation :

L'argile utilisée est une argile rouge de mio-pliocène provenant de la commune d'Ain Arnat wilaya de Sétif.



Figure 17 – Lieu de prélèvement de l'argile. (Google earth, 2014)

I) ESSAIS PHYSIQUES :

1) Détermination de la teneur en eau (NF P 94 - 050) :

a) Principe:

La perte d'eau d'un échantillon de sol est déterminée par étuvage, l'échantillon est pesé avant et après étuvage et le calcul de la différence des masses humide et sèche est effectué afin d'obtenir la masse d'eau libérée, l'étuvage est réalisé pendant 24h dans une étuve à 105°C dans le cas d'un sol insensible à la chaleur.

b) Méthode de calcul :

La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$W (\%) = [(Ph - Ps)/Ps] \times 100$$

Avec:

- **W** : teneur en eau naturelle en (%).
- **Ph** : poids du sol humide en (g).
- **Ps** : poids du sol sec en (g).



Photo 3 – Sable (0/2 mm) après étuvage.

2) Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94 - 056) :

a) Principe:

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

b) Appareillage et exécution de l'essai :

- **Appareillage :**

- ✓ Une série de tamis dont les diamètres varient comme suit : 31.5 - 20 - 14 - 10 - 6.3 - 4 - 2 - 0.5 - 0.2 - 0.08 (mm) et un fond.
- ✓ Étuve.
- ✓ Balance.
- ✓ Un dispositif de lavage.



Photo 4 – Colonne des tamis.



Photo 5 – Etuve Ventilée.



Photo 6 – Balance.

- **Lavage :**

Dans le cas de matériaux particulièrement argileux, l'échantillon est trempé préalablement au lavage, pendant plusieurs heures. L'échantillon humide, avec éventuellement les eaux de trempage, est versé sur un ou plusieurs tamis de décharge protégeant le tamis de lavage. La maille du tamis de lavage correspond à la plus petite maille de la colonne utilisée lors du tamisage. On doit veiller à ce que l'eau ne déborde pas du tamis de lavage.

Le tamisat est :

- soit éliminé avec les eaux de lavage.
- soit éventuellement récupéré pour d'autres analyses.

-Le refus est récupéré et séché jusqu'à masse constante.



Photo 7 – Lavage et étuvage de la GNT « 0/31,5mm ».

- **Tamisage :**

- ✓ Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.
- ✓ Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre les tamis un à un, en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle, on agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture, d'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.
- ✓ Verser le tamisat recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.



Photo 8 – Vibration mécanique de la colonne des tamis.

c) Expression des résultats :

- Calculs :

Les masses des différents refus cumulés « Ri », sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec « Ms » et Les pourcentages des tamisats correspondants sont égaux à :

$$100 - \left(\frac{R_i}{M_s} \times 100 \right) \text{en \%}$$

- Présentation des résultats:

Les pourcentages des tamisats cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableaux (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

- Tracé de la courbe granulométrique :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats ou des différents refus cumulés sur la feuille de papier semi-logarithmique.

- ✓ **En abscisse :** les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique.
- ✓ **En ordonnée :** les pourcentages sur une échelle arithmétique.

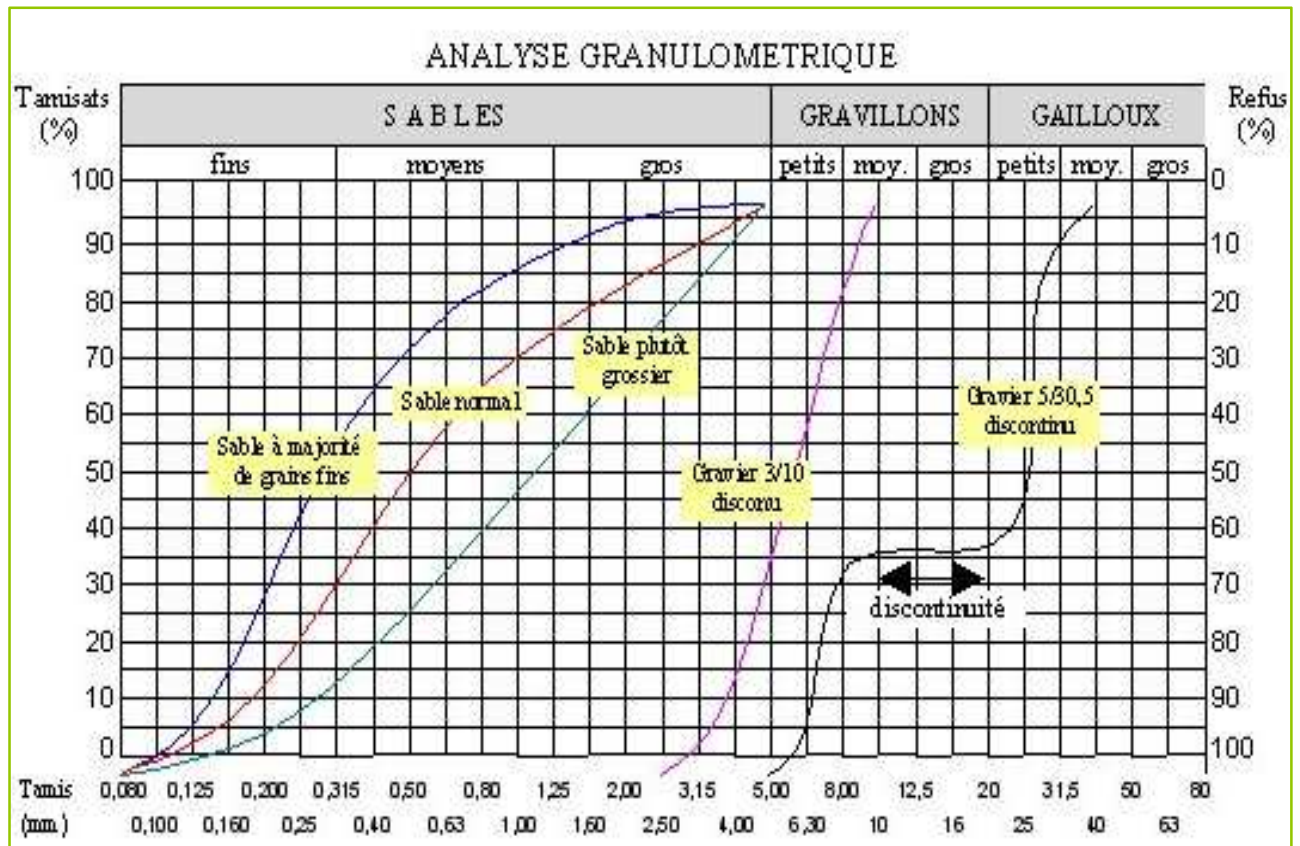


Figure 18 – Exemple des courbes granulométriques. [1]

3) Analyse granulométrique par sédimentation (NF P 94 - 057) :

L'analyse granulométrique par sédimentation ; appelée aussi sédimentométrie ; a pour objet la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol passant à travers le tamis d'ouverture de maille carrée de 80 μ m. cependant, les particules inférieures à 1 μ m ne peuvent être différenciés par cet essai.

a) principe :

Cet essai utilise le fait que, dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins dépend de leur dimension. Dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la loi de Stokes donne la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Cette loi est donc par convention, appliquée aux éléments d'un sol afin de déterminer des diamètres équivalents de particules. La loi de stokes est définie suivant la relation suivante :

$$V = g \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2$$

Avec :

V: vitesse de chute (cm/s).

D: Dimension des grains (cm).

γ_s : Poids spécifique des grains (g/ cm³).

γ_w : Poids spécifique de l'eau (g/ cm³).

G : Accélération de la pesanteur (cm/ s²).

μ : viscosité dynamique du liquide (poises).

b) Appareillage :

- Balance.
- Tamis.
- éprouvettes d'essais.
- Agitateur électrique. (Figure19)
- Eau distillée ou déminéralisée et dé flocculant.
- Thermomètre.
- Chronomètre.
- Agitateur.
- Densimètre. (Photo9)



Photo 9 – Densimètre utilisé.

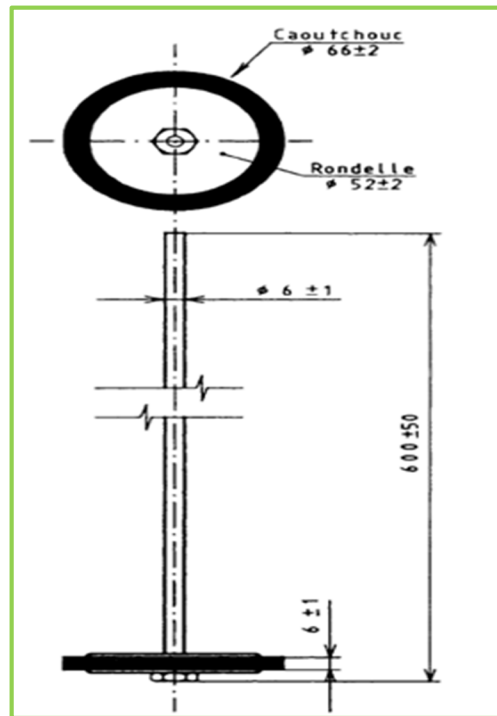


Figure 19 – Agitateur (NF P 94-057)

c) Exécution de l'essai :

- Mode opératoire :

Les opérations décrites ci-dessous sont successivement à réaliser dans une salle d'essai dont la température doit être contrôlée.

• *Imbibition de la prise d'essai :*

Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500cm^3 du mélange, garder la température, et laisser imbiber au moins 15 h.



Photo 10 – Imbibition de l'argile.

- *Traitement de l'échantillon de sol :*

Le tamis 0.08mm, échantillon de sol et argile selon la norme NF P 94-056, est recueilli avec son eau de lavage dans un bac. Le tout est mise à décanter. Une fois redevenue claire, l'eau du bac est siphonnée sans entrainer d'éléments fins. En suite placés dans une étuve jusqu'à séchage les matériaux.



Photo 11 – Argile (Eléments inférieurs à 80µm).

- *Dispersion à l'agitateur mécanique :*

La prise de l'essai est dispersée dans la solution d'eau et de défoulant au moyenne de l'agitateur mécanique qui doit être fonctionné pendant 3 min à 10000 tr/min.

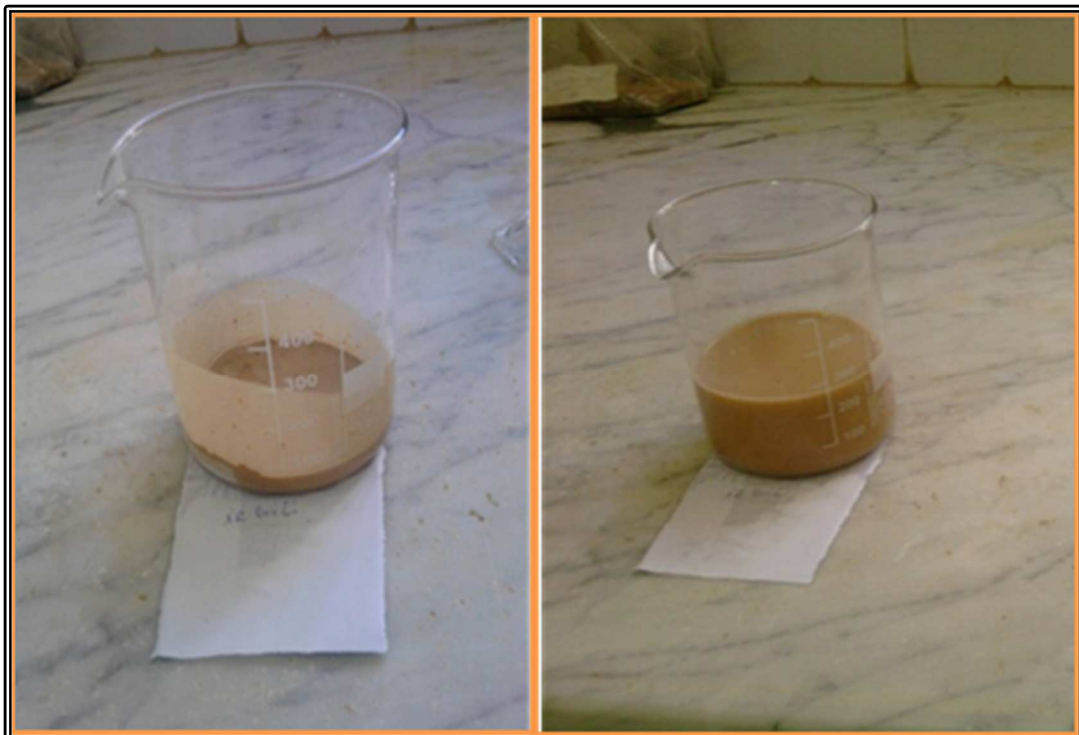


Photo 12 – Préparation de l'échantillon d'argile.

- Démarrage de l'essai :

- ✘ Verser la suspension dans les éprouvettes d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique.
- ✘ Rincer le récipient ainsi que l'arbre et palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée
- ✘ Le liquide de Rinçage est recueilli dans l'éprouvette afin d'éviter de perdre une partie de l'échantillon de sol du transfert.
- ✘ Compléter par de l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 2000 cm^3 .
- ✘ Verser 2000 cm^3 de la même eau dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres.
- ✘ Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette.
- ✘ Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre.
- ✘ Plonger le densimètre dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre.



Photo 13 – Exécution de l'essai pour l'argile.

4) Valeur de bleu par l'essai a la tache (NF P 94 - 068):

a) Principe:

L'essai consiste à mesurer la quantité et l'activité argileuse d'un sol par dosage de la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/2 mm du sol. La valeur au bleu du sol est directement liée à la surface des particules constituant le sol.

Le VB correspond à la quantité de bleu de méthylène absorbée par 100g de particules fines. L'absorption est considérée réalisée lorsqu'apparaît autour de la tache sombre une auréole claire persistante.

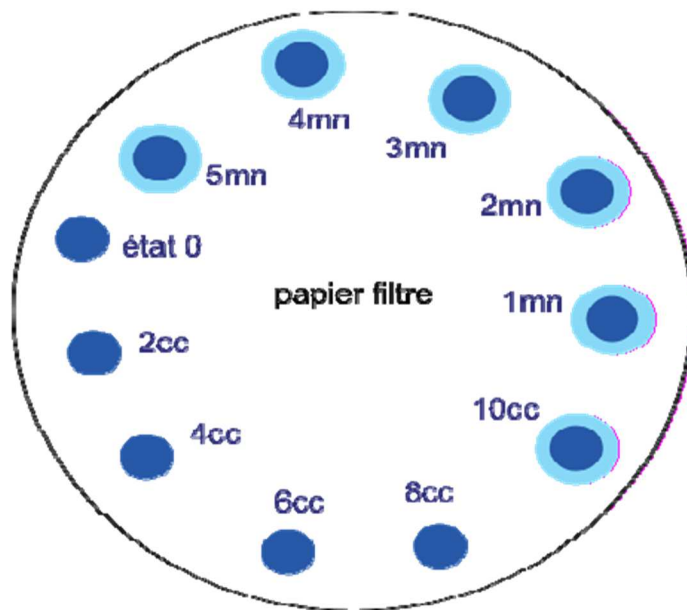


Figure 20 – Principe d'essai VB (NF P 94-068).

b) Appareillage d'essai :

- un dispositif de dosage permettant d'injecter par de 10 cm³, 5 cm³ et 2 cm³ des volumes de solution de bleu et de connaître la quantité totale injectée à ± 1 cm³
- un agitateur mécanique d'une vitesse de rotation couvrant au moins la plage de 400tr/min à 700 tr/min, un récipient cylindrique (plastique) d'une capacité minimale de 3000 cm³
- un papier filtre blanc de masse spécifique (95 \pm 5) g/m².



Photo 14 – Agitateur mécanique.

c) Exécution de l'essai :

La prise d'essai étant mise en suspension comme décrit précédemment, procéder au dosage de bleu de méthylène comme indiqué ci-après.

Pendant toute la durée du dosage, l'agitateur permanent (vitesse 400tr/min \pm 100tr/min) doit être telle que toutes les particules de sol en suspension soient mises en mouvement.

A l'aide du dispositif de dosage, introduire dans la suspension 5cm³ à 10cm³ de solution de bleu selon l'argilosité estimée du matériau ,procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant ;
- Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre, la tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore.
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8mm et 12mm de diamètre.

Procéder à des injections successives par pas de 5cm³ à 10cm³ de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tâche.

L'essai est alors positif. A partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution.

Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2cm³ à 5cm³, selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5cm³ à 10cm³ introduits précédemment. En effet, il est nécessaire de réduire les quantités injectées, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation.

Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (v) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume v doit être supérieur à 10cm³. Si le volume v est inférieur à 10cm³, l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire.

Si en vidant le récipient sur le tamis de 80µm, on observe des agglomérats de particules non colorés on recommencera l'essai avec la troisième prise d'essai en augmentant la durée de mise en suspension du sol ou en adoptant toute disposition permettant de minimiser la formation de ces

agglomérats (exemple : séchage à 50°C maximum, puis imbibition de durée suffisante pour favoriser le délitage des éléments argileux).



Photo 15 – Exécution de l'essai au bleu.

d) Expression des résultats :

Les calculs à exécuter sont :

$$VB = (B/M_0) \times 100$$

Avec :

- ✓ **B** : masse de la solution du bleu utilisée ($B = V \cdot 0,01$) g.
- ✓ **V** : volume totale de la solution du bleu utilisée cm³.
- ✓ **M₀** : masse sèche de la prise d'essai ($M_0 = M_{h1}/(1+w)$).

VB est exprimée en grammes de bleu pour 100 g de matériaux sec.

5) Essai de propreté: Equivalent de sable a 10 % de fines (NF P 18 - 597) :

a) Principe :

L'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur (si cette teneur en fines est supérieure à 11 %). Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable à 10 % de fines (PS) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée.

b) Appareillage :

- Tamis de 2 mm d'ouverture de mailles avec fond.
- Spatule et cuillère.
- Récipients.
- Balance.
- Chronomètre.
- Réglet.

c) Préparation des échantillons pour essai :

- *Détermination de la teneur en fines et préparation du sable correcteur :*

Tamiser sous eau le deuxième échantillon de masse M_{h2} sur le tamis de 0,08 mm, Sécher et peser les éléments retenus sur ce tamis pour déterminer la teneur en fines f , exprimée en pourcentage, du sable ; ce refus servira de sable correcteur. Si m_s est la masse de ce refus à 0,08 mm.

$$f = 100 - m_s(100 + W) / M_{h2}$$

La masse m_{sc} de sable correcteur (refus sec à 0,08 mm) à ajouter pour la préparation d'un échantillon pour essai, exprimée en grammes, est donnée par la formule :

$$m_{sc} = 120 - \frac{1200}{f}$$

- *Préparation des échantillons pour essai :*

- ✓ Si f est inférieur à 11 %, il n'y n'a pas lieu d'utiliser de sable correcteur et l'essai s'effectue directement sur le troisième et le quatrième échantillon à leur teneur en fines d'origine. La masse de chaque échantillon pour essai, exprimée en grammes, est alors égale à:

$$120(1+W/100)$$

✓ Si f est supérieur à 11 %, prendre une masse égale à :

$$\frac{1200}{f} \left(1 + \frac{W}{100}\right)$$

d) Exécution de l'essai :

- **Mise en place de la première prise d'essai :**

La solution lavant ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120\text{g} \pm 1\text{g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement. Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Laisser reposer dix minutes.



Photo 16 – Exécution de l'essai.

- **Agitation de l'éprouvette :**

A la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation. Faire subir à l'éprouvette $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycles}$ en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais.

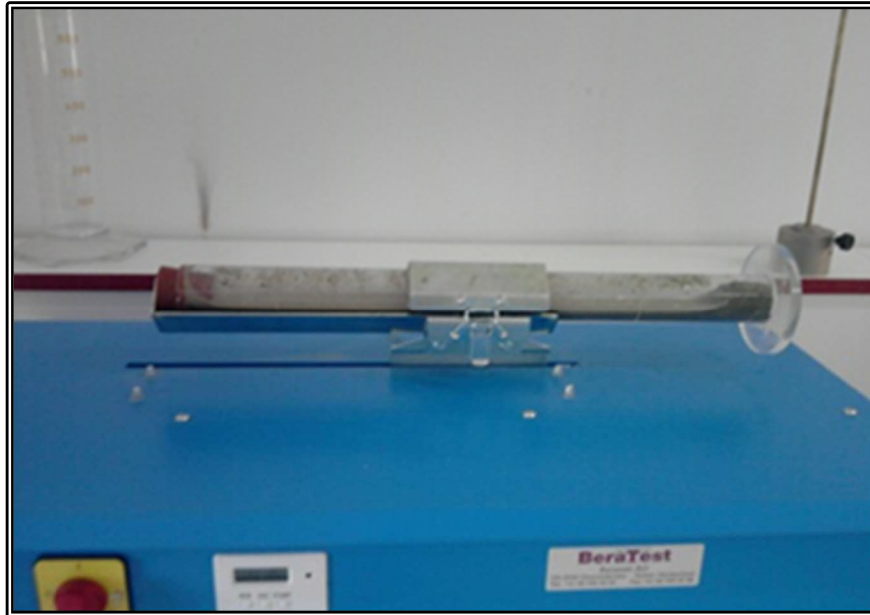


Photo 17 – Agitation électrique de l'éprouvette.

- Lavage :

Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant. On descendant le tube laveur dans l'éprouvette, rincer les parois avec la solution lavant, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette. Laver le sable pour faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale. Procéder de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

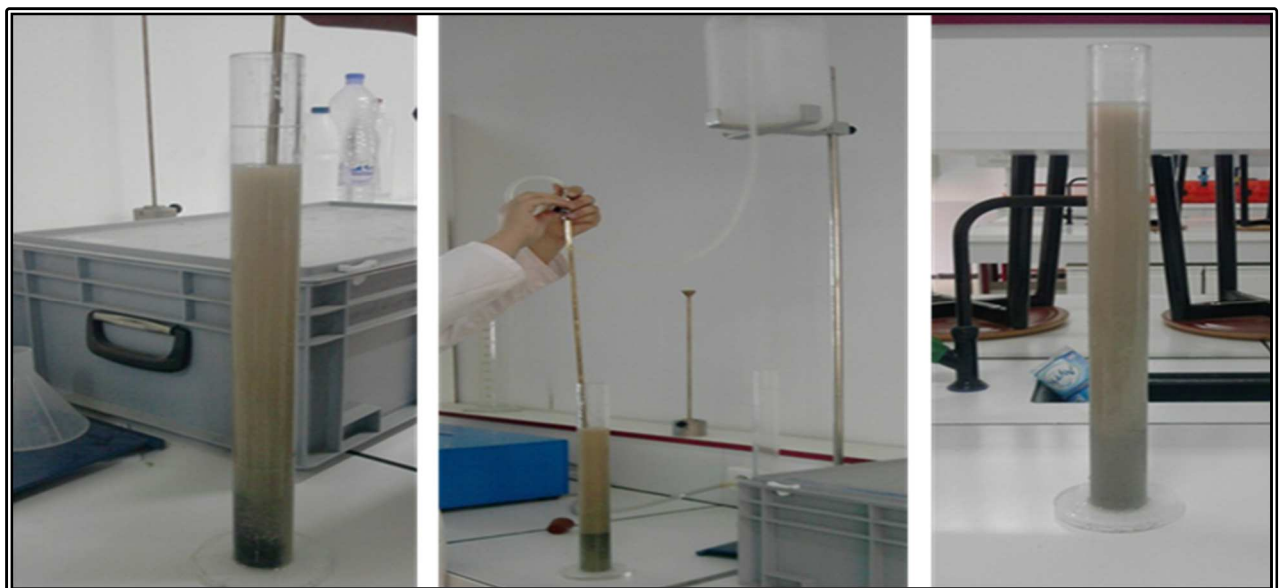


Photo 18 – Lavage à l'aide d'un tube laveur.

- **Mesure :**

Laisser reposer pendant 20 minutes.

Au bout de 20 min :

Mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.

Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.

Arrondir les hauteurs h_1 et h_2 au millimètre le plus proche.

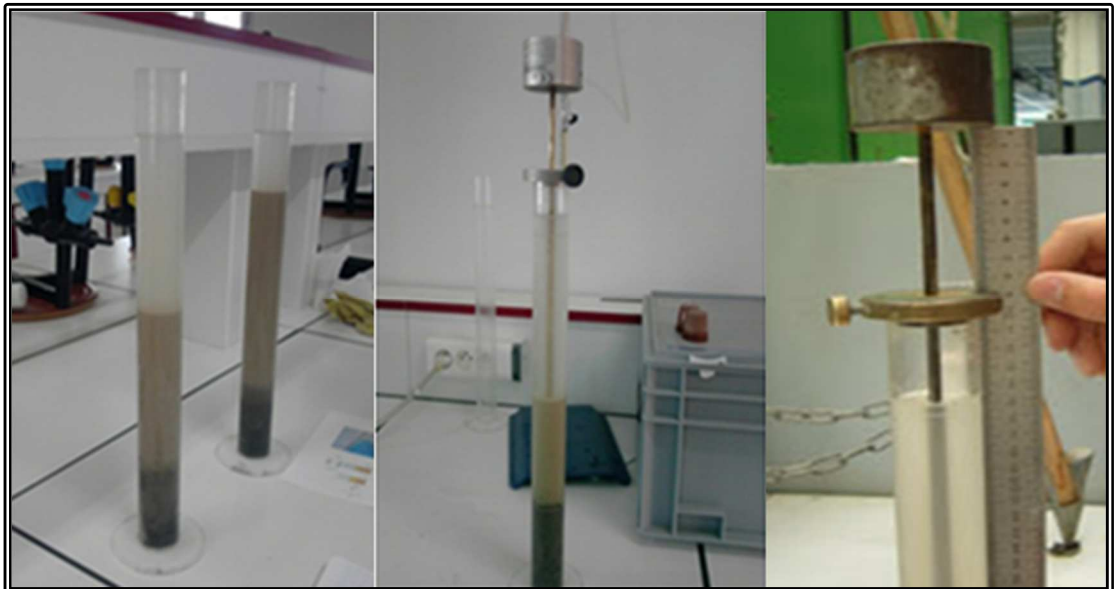


Photo 19 – Lecture des valeurs h_1 et h_2 à la règle et au piston.

e) Expression Des Résultats :

L'équivalent de sable visuel (ES_v) est donné par la formule suivant :

$$ES_{\text{visuel}} = (h_2 \times 100) / h_1$$

Et par définition, ES mesurée au piston est donné par la formule suivant :

$$ES_{\text{piston}} = (h_2' \times 100) / h_1$$

II) ESSAIS MECANIQUE ET DE PORTANCE :

1) Essai Micro - Deval (NF P 18 - 572):

a) Principe :

C'est un essai dont le principe est de reproduire, dans un cylindre en rotation, des phénomènes d'usure par frottement.

b) Appareillage:

- ✓ Appareil micro-Deval.
- ✓ Tamis 1,6mm pour lavage.
- ✓ Tamis 6,3 et 10mm.

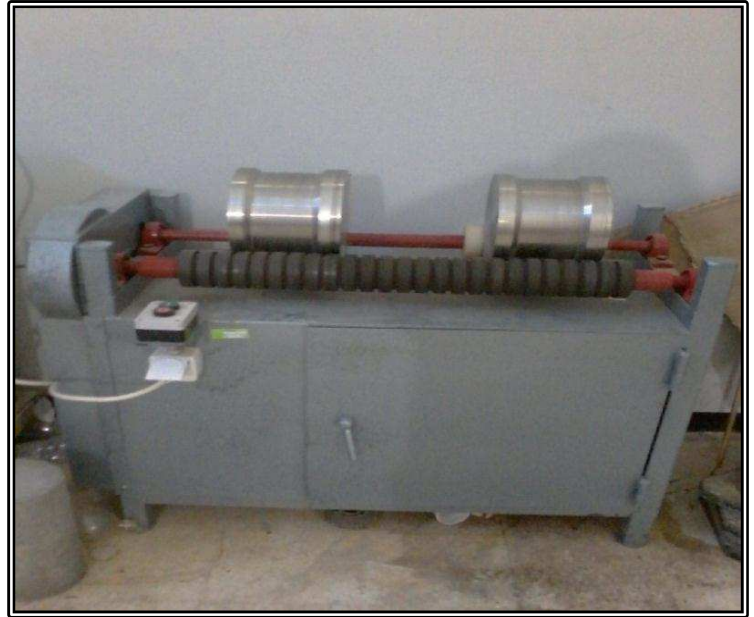


Photo 20 – Machine Micro-Deval utilisé.

c) Exécution de l'essai:

- Introduire dans le cylindre d'essai, la charge abrasive puis les 500g de matériau préparé (6.3/10) mm. La charge est fixée conformément aux indications du tableau (6),

Tableau 6 : Classes granulaires avec leur charge nécessaire. (NF P 18 - 572)

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 - 6.3	2000±5
6.3 - 10	4000±5
10 - 14	5000±5

- Ajouter 2,5 litres d'eau , Replacer le couvercle du cylindre.
- Mettre les cylindres en rotation à une vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant 02 heures ou 12000 tours.



Photo 21 – Préparation de l'échantillon dans le cylindre.

- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac avec soin pour éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement à la pissette l'intérieure du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm.
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- Sécher le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près ; soit M' le résultat de la pesée.



Photo 22 – Lavage et étuvage de l'échantillon testé.

d) Expressions des résultats:

La valeur de **MDE** est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{MDE = (500 - M') / 500 \times 100} \text{en \%}$$

M' : La masse sèche de la fraction du matériau passant au tamis de 1,6mm après l'essai.

2) Essai Los Angeles (NF P 18 - 573) :

a) Principe :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires montrées dans le tableau (7).

Tableaux 7: Classe de granulaire.

Classes granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge(g)
4-6.3	7	3080
6.3-10	9	3960
10-14	11	4840
10-25	11	4840
16-31.5	12	5280
25-50	12	5280

b) Appareillage:

- ✓ Appareil los Angeles.
- ✓ Tamis 6,3 et 10mm pour la fraction (6.3-10) mm.
- ✓ Tamis 1,6mm.



Photo 23 – Appareil Los Angeles utilisé.

c) Exécution de l'essai:

l'essai consiste à mettre une prise d'essai de 5000g d'un gravier (6.3-10) mm lavée et séchée à l'étuve à 105C° sur la fraction (6,3-10) mm dans un tambour contenant 9 boulets métallique, Le

tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation de 33 tours/min, tamiser le matériau contenu dans le bac dans le tamis de 1,6 mm..

- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- Sécher le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- Peser ce refus au gramme près ; soit M' le résultat de la pesée.



Photo 24 – Déroulement de l'essai Los Angeles.

d) Expressions des résultats:

La valeur de LA est donnée par la formule suivante :

$$LA = \left\{ \frac{5000 - M'}{5000} \right\} \times 100 \text{en \%}$$

M' : la masse sèche de la fraction du matériau passant après l'essai au tamis de 1,6mm.

3) Essai Proctor Modifier (NF P 94 - 093):

a) Principe :

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau.

Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

b) Appareillage:

- Moule Proctor modifié et une dame Proctor modifié ;
- Une règle à araser ;
- Disque d'espacement ;
- Une éprouvette graduée, 150 ml environ ;
- Des bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ;
- Une truelle, spatule, pinceau, huile;
- Tamis 6 et 14 mm ;
- Petits récipients (mesures des teneurs en eau) ;
- Une balance portée 20 kg, précision + 5 g ;
- Balance de précision 200g.precision (+ou -) 0.1g ;
- Etuve 105°c (+ ou -) 5°c.

c) Préparation des échantillons soumis à l'essai :

- *Prise d'échantillon :*

La masse totale de matériau nécessaire à l'exécution d'un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n'est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor. Elle varie entre 15 kg et 100 kg suivant la granularité du matériau et suivant que l'on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son Indice CBR après immersion et/ou de son Indice Portant Immédiat. Il s'agit de quantités minimales nécessaires à la détermination de la courbe Proctor en cinq points.

- *Préparation des éprouvettes :*

La totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50 °C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai.

Après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisat est conservé pour l'exécution de l'essai.

Le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales. Les parts sont humidifiées à une teneur en eau telle que les teneurs en eau de trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre :

0,8 WOPN (ou WOPM) et 1,2 WOPN (ou WOPM)

Après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau. C'est à partir de chacune de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor (et le cas échéant la détermination de l'Indice Portant Immédiat et l'Indice CBR Immédiat ou après immersion des éprouvettes aux teneurs en eau considérées).

- Exécution de l'essai :

Avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :

- solidariser : moule, embase et rehausse ;
- lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
- placer le disque d'espacement au fond du moule CBR lorsqu'il est utiliser ;
- placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage. Introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normale et pour l'essai Proctor modifié.

Compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquent respectivement **25** coups ou **56** coups par couche, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couches à réaliser.

Après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit alors dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre au maximum. Cet excédent est araser soigneusement au niveau du moule .Si des éléments > 10mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvette, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser.

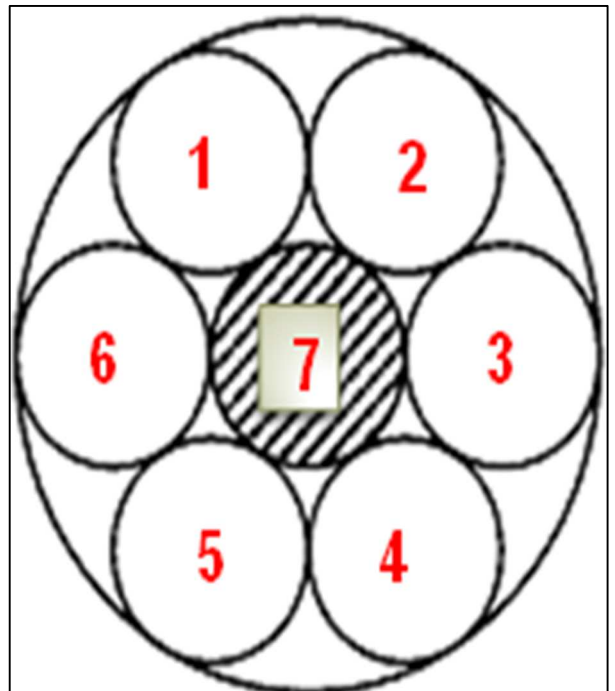


Figure 21 – Nombre des coups pour Proctor modifié

Peser l'ensemble du moule avec le matériau :

- S'il n'est pas prévu de poursuivre l'essai par la détermination des indices CBR et /ou de indice portant immédiat, on procède au démoulage de l'éprouvette. On extrait, ensuite, un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau ;

CHAPITRE II : ESSAIS GEOTECHNIQUE REALISES

-Si à l'inverse, on prévoit la détermination concomitante de l'indice portant immédiat, on procède immédiatement après le compactage au poinçonnement de l'éprouvette puis à son démoulage et à sa dessiccation pour mesurer la teneur en eau.

-Si on prévoit la détermination concomitante de l'indice portant immédiat et de l'indice CBR après immersion, il convient de compacter deux éprouvettes identiques, la première servant à la détermination de l'IPI et de la teneur en eau, la seconde étant mise en immersion 4 jours puis poinçonnée conformément à la norme NF P 94-078.

-Enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'indice CBR après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage.

-La teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré-humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette.

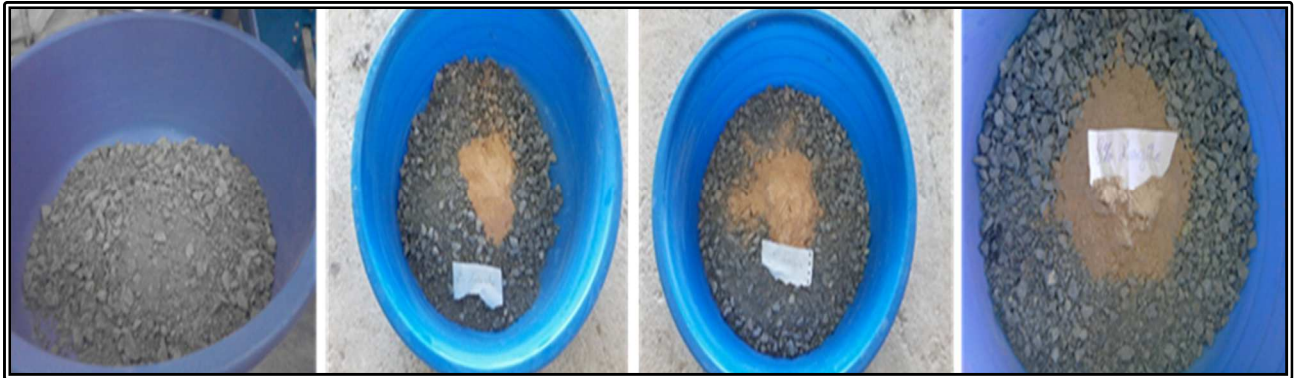


Photo 25 – Fraction 0/14 mm + Argile.



Photo 26 – Réalisation de l'essai Proctor sur la fraction 0/14 mm.



Photo 27 – GNT 0/14+ différents % d'argile +3.5% de ciment.

e) Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- la teneur en eau ;
- la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
- la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utiliser,

Pour la densité humide, connaissant le poids du moule et son volume, puis la détermination de la densité sèche par la formule suivante :

$$\gamma d = \{ \gamma h / (1 + \omega) \} \times 100$$

Avec:

↪ γd : densité sèche en (kN/m³).

↪ γh : densité humide en (kN/m³).

↪ ω : teneur en eau.

4) Essai de la résistance à la compression simple (NF EN 12390 - 3) :

a) Principe :

Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

b) Préparation du matériau :

Le matériau séché à l'étuve à 105°C à une granularité 0/10 mm, Il est imbibé à une teneur en eau égale à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié exécuté sur la fraction 6,3/10mm.

c) Exécution de l'essai :

- Compactage de l'éprouvette :

La prise d'essai est versée dans un moule cylindrique de diamètre 50 mm muni d'une embase inférieure. On place l'embase supérieure après avoir soulevé le moule de sorte que les hauteurs d'enfoncement des deux embases soient égales. Le moule est placé sur le plateau de l'appareil Marshall. (Photo 28)



Photo 28 – Appareille Marshall.

- Extraction de l'éprouvette :

Après avoir enlevé les deux embases, on introduit un piston dans le moule et on place l'ensemble piston – moule sur le plateau de la presse CBR, la partie du moule ayant le diamètre le plus grand venant en contact de l'échancrure du piston de la presse CBR.

En poussant sur le piston placé à l'intérieur du moule, l'éprouvette est extraite facilement. Après extraction on vérifie les dimensions de l'éprouvette ; diamètre et hauteur ainsi que son poids pour s'assurer qu'elle se trouve bien à la densité choisie.

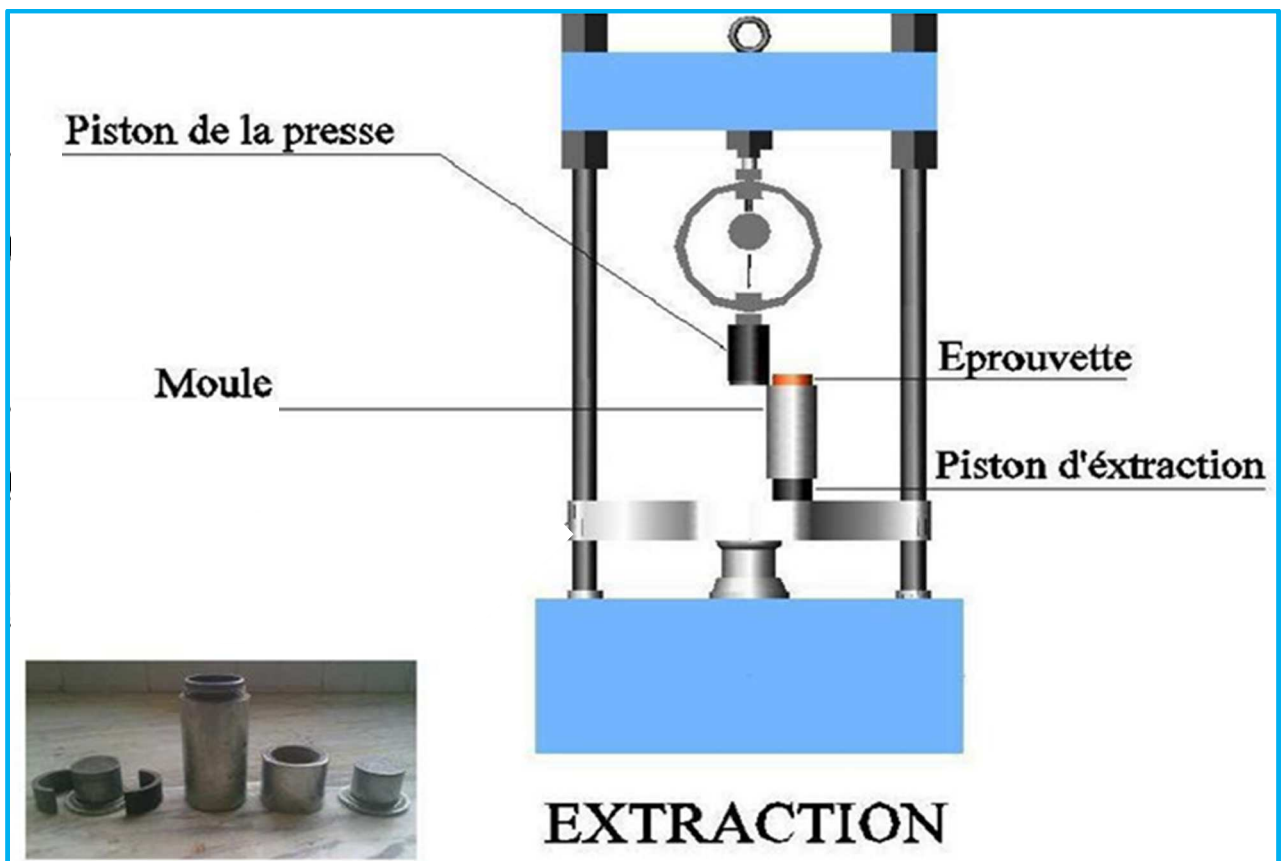


Figure 22 – Procédure de l'extraction des éprouvettes.

- Ecrasement de l'éprouvette:

Après l'extraction de l'éprouvette, cette dernière est placée entre les deux plateaux de la presse CBR puis écrasée à l'aide de la presse CBR jusqu'à la rupture.

Avant l'écrasement

Début de l'écrasement

Après l'écrasement



Photo 29 – Ecrasement d'une éprouvette de grave ciment.

e) Expression des résultats :

Par définition la résistance est la limite du rapport entre une force et la surface sur laquelle, elle s'exerce. Donc, les valeurs de résistance sont obtenues en divisant les forces (charges) appliquées par le piston de la presse CBR sur la surface de l'éprouvette à écraser.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$R_c = F/S$$

Avec :

- ✓ **R_c** : Résistance à la compression simple, exprimée en (bar).
- ✓ **F** : Force maximale à la rupture, exprimée en (kgf).
- ✓ **S** : Surface de l'éprouvette, exprimée en (cm²).

5) Essai de résistance à la traction indirecte « Essai brésilien » (NF EN 12390 - 6):

a) Principe :

Une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction indirecte.

b) Appareillage :

- ✓ Presse CBR.
- ✓ Gabarit de centrage: Il permet de positionner l'éprouvette et les bandes de chargement Il ne doit pas s'opposer à la déformation de l'éprouvette au cours de l'essai.

✓ Bandes de chargement.

Un matériau dur d'une longueur supérieure à la longueur de la ligne de contact avec l'éprouvette.

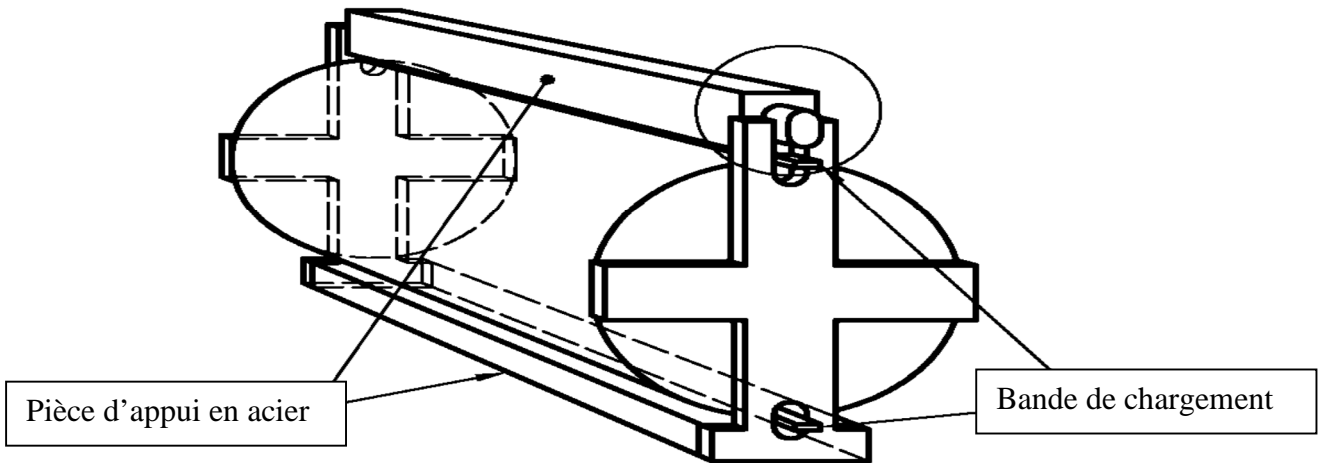


Figure 23 – Un gabarit de centrage adapté aux éprouvettes cylindriques.

c) Mode opératoire :

- **Préparation de l'éprouvette :**

Si l'éprouvette a été conservée à l'air, placé sur la machine d'essais pour éliminer l'humidité en excès.

Essuyer les surfaces d'appui du gabarit de centrage, des bandes de chargement, des pièces d'appui et des plateaux. Nettoyer la surface de l'éprouvette qui sera en contact avec les bandes de chargement et en éliminer toute particule ou corps étranger.

- **Positionnement de l'éprouvette :**

Centrer l'éprouvette dans la machine, éventuellement au moyen d'un gabarit de centrage. Positionner soigneusement les bandes de chargement et les pièces d'appui, le cas échéant, le long des parties supérieure et inférieure du plan de chargement de l'éprouvette.

S'assurer que le plateau supérieur est parallèle au plateau inférieur au cours de la mise en charge.

Avant l'écrasement

Début de l'écrasement

Après l'écrasement



Photo 30 – Essai brésilien.

d) Expression des résultats :

La résistance à la traction indirecte est calculée par la formule suivante :

$$R_{tb} = 2F / \pi H D$$

Avec :

- ✓ **R_{tb}**: Résistance à la traction indirecte, exprimée en (MPa).
- ✓ **F**: Force maximale à la rupture, exprimée en (kN).
- ✓ **H**: La longueur de l'éprouvette, exprimée en (m).
- ✓ **D**: Le diamètre de l'éprouvette, exprimé en (m).

III) ESSAIS CHIMIQUES :

1) Détermination de la teneur en carbonates Méthode du calcimètre (NF P 94 - 048) :

a) Principe :

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique en excès (dans des conditions de température et de pression atmosphérique connues) par un échantillon préparé pour l'essai.

b) Appareillage :

1) Calcimètre :

Le calcimètre se compose d'un bâti ainsi que il y a un exemple d'appareille pour expliquer bien les composant d'un calcimètre (figure 24) :

1. Un flacon avec ampoule de niveau
2. Burette graduée
3. Robinet
4. Flacon à réaction
5. Tube à essai
6. Matériau soumis à essai
7. Gaz dégagé par la réaction
8. Tubulure souple reliant 1 et 2
9. Liquide (avec colorant éventuel)

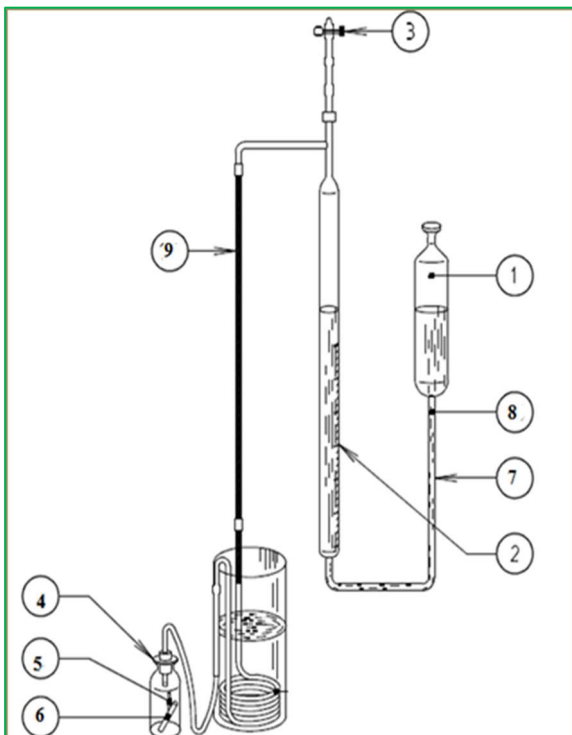


Figure 24 – Schéma d'un calcimètre.



Photo 31 – Calcimètre Dietrich-Fruhling utilisé.

2) Matériel et produits :

- ✓ une balance dont les portées minimale et maximale sont compatibles avec les masses à peser et telle que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1 000 de la valeur mesurée ;
- ✓ un thermomètre avec lequel le mesurage est effectué avec une exactitude de 1°C. La plage d'utilisation du thermomètre est de 10 °c à 35 °c ;
- ✓ une pipette pour l'acide chlorhydrique ;
- ✓ matériel courant de laboratoire ;
- ✓ une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 105 °C de classe d'exactitude C,
- ✓ eau distillée, à la température du local d'essai ;
- ✓ acide chlorhydrique concentré de densité 1,19 (qualité analytique reconnue) ;
- ✓ poudre de carbonate de calcium pur pour analyse (si nécessaire).

c) Mode opératoire :

L'essai est effectué sur deux prises d'essai.

- Préparation de l'échantillon :

Après un séchage préalable, le matériau est broyé dans le mortier afin d'obtenir une poudre passant en totalité à un tamis d'ouverture de maille inférieure ou égale à 400 µm. Le séchage du matériau est poursuivi, à une température de 105 °C, jusqu'à ce que sa masse ne varie pas de plus de 2/1 000 entre deux pesées successives, espacées de 1 h.

En l'absence d'information sur la teneur en carbonate présumée, choisir des prises d'essai d'une masse d'environ 1 g.

- Déroulement de l'essai :

- Introduire la prise d'essai, une fois pesée (de masse m) dans le flacon (4) propre et sec.
- Remplir le flacon (1) et la burette (2) d'eau distillée ou déminéralisée.
- Faire coïncider le niveau bas du flacon (1) avec le zéro en partie haute de la burette (2).
- Introduire environ 10 cm³ d'acide chlorhydrique concentré dans un tube à essai (5) placé dans le flacon (4) (ou, selon le matériel utilisé, dans la tubulure latérale du flacon (7) au moyen d'une pipette à bout recourbé).
- Ouvrir le robinet (3). Obturer le flacon à réaction (4) au moyen de son bouchon. La tubulure qui traverse ce dernier est reliée par (9) à la partie supérieure de la burette (2).
- Fermer le robinet (3) .Mettre en contact l'acide chlorhydrique contenu dans le réservoir du flacon (4).au dans le tube d'essai avec le matériau. Au fur et à mesure que le dégagement gazeux exerce une pression sur l'eau de la burette (2), en déplaçant le flacon (1), le niveau dans le flacon(1), Agiter le flacon (4) jusqu'à ce que le niveau d'eau ne varie plus.

- Après équilibre de la température (environ 5 min) amener les niveaux dans (1) et(2) dans le même plan horizontal et lire le volume V_b correspondant sur la burette (2). Noter la température de la salle d'essai et, le cas échéant, la pression atmosphérique.
- S'assurer que le gaz recueilli dans la burette ne contient pas d'hydrogène sulfuré (H_2S) à l'odeur très caractéristique. Ce serait un indice que la prise d'essai contenait des sulfures. Si cela était le cas, il faudrait refaire un essai en ajoutant à l'acide chlorhydrique quelques centimètres cubes d'acétate de calcium à 5 % afin de neutraliser les dégagements gazeux parasites qui s'ajoutaient à ceux du dioxyde de carbone.

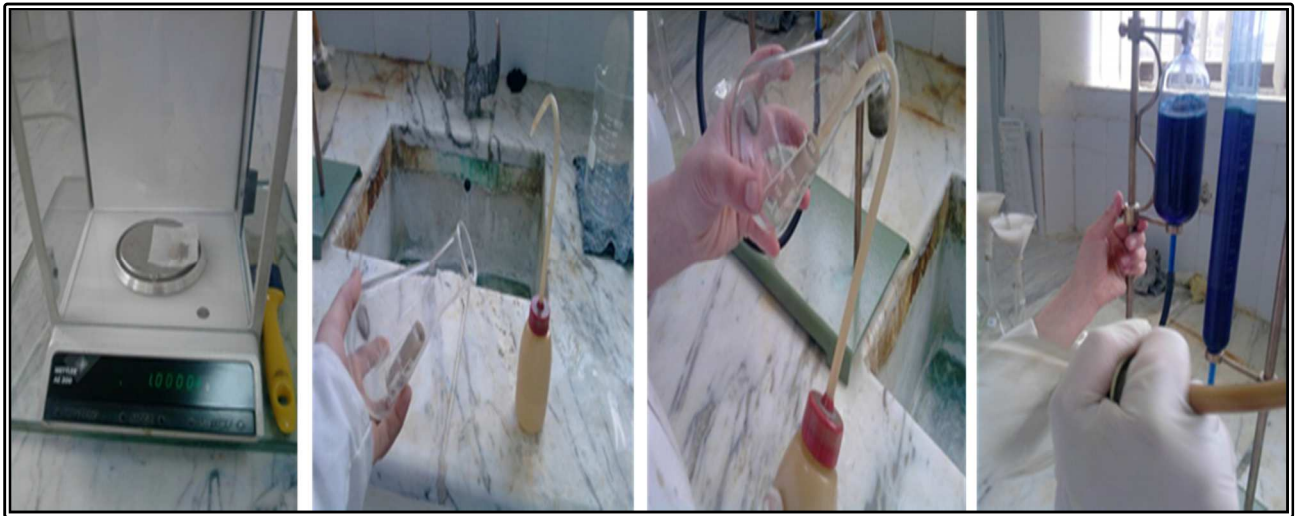
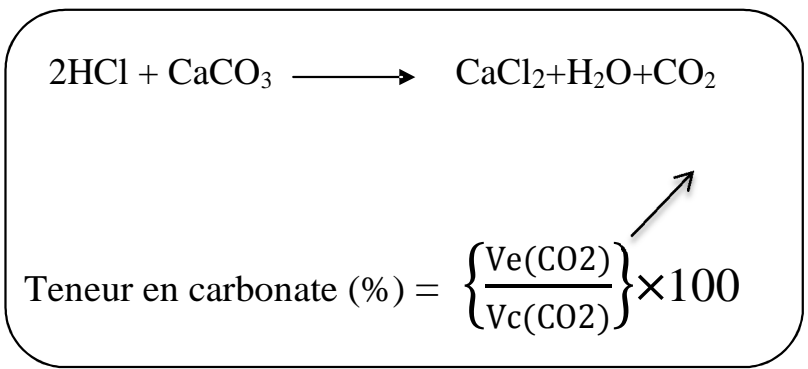


Photo 32 – Déroulement de l'essai.

d) Détermination de la teneur en carbonate :

- Calcul de la masse de CO_2 dégagé :

On fait basculer le tube contenant l'acide et on mesure le volume de CO_2 dégagé.



Avec:

- $V_e(CO_2)$: volume de CO_2 dégagé par l'échantillon.
- $V_c(CO_2)$: volume de CO_2 dégagé par le carbonate de calcium pur.

2) Détermination de la teneur en sulfates :

a) principe :

Détermination du pourcentage de la fraction sulfatée dans les sols et matériaux.

b) Mode opératoire :

L'essai se déroule comme suit :

- Peser 1g d'échantillon, l'on place dans un bécher 250 ml puis on ajoute 100 cc de sol à 10 % d'acide chlorhydrique, on porte à douce ébullition pendant 10 minutes, faire une filtration moyenne, au-dessus d'une fiole jaugée de 250 cc, on lave à l'eau distillée tiède jusqu'à élimination de l'acide et l'échantillon.
- Sécher les filtres à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant, on les pèse un à un.
- Le filtrat recueilli dans la fiole jaugée est amené exactement à 250 cc d'eau distillée, on homogénéise en agitant plusieurs fois.
- Prélever 100 cc du filtrat précédent, on le porte à douce ébullition.
- Verser 35 cc à 40 cc de chlorure de baryum à 10 % également portée à ébullition (douce ébullition) dans les 100 cc du filtrat précédent.
- Laisser bouillir pendant 20 minutes.
- Laisser reposer une nuit à température ambiante.
- Filtrer sur filtre taré (filtration lente) P1, on lave le précipité à l'eau distillée chaude, on sèche à l'étuve à 105°C jusqu'à poids constant P2.

a) Expression de calcul : On a utilisé les formules suivant :

$$\% \text{ gypse} = \{(P_2 - P_1) + (f_{t1} - f_{t2})\} 184,5$$
$$SO_4^{2-} = \% \text{ gypse} \times (96/172)$$

avec : $\left\{ \begin{array}{l} p_1 : \text{ poids du filtre} \\ p_2 : \text{ p. filtre + échantillon} \\ Ft_1 : \text{ filtre témoin} \\ Ft_2 : \text{ filtre lente} \end{array} \right.$



Photo 33 – Filtration de l'échantillon.

I) RESULTATS :

1) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LA GNT :

L'aptitude des granulats (GNT) à être utilisés dans les assises de chaussée est appréciée par un certain nombre d'essais. Ces essais ont été effectués aux laboratoires : des travaux publics de l'Est à Sétif (LTPE), GEOMAT-SOL à Bordj Bou Arreridj et le laboratoire du génie civil de notre université.

1.1) Résultats des essais de propretés :

Des quantités croissantes d'argiles (2%, 4% et 8%) ont été introduites dans un grave non traité (Photo34), le but étant de connaître l'influence des argiles sur les indicateurs de propretés des graves (GNT) et de voir si la valeur du bleu de méthylène à la tâche et l'équivalent de sable à 10 % de fines pouvaient être des bons indicateurs de la pollution des sables utilisés. (Voir mode opératoire des deux essais, chapitre 2)



Photo 34 – Introduction des fines argileuses dans la GNT.

1.1.1) Equivalent de sable à 10 % de fines :

Les figures (25, 26) et le tableau 1 (Annexe A) montrent l'influence de fines argileuses sur l'Equivalent de sable.

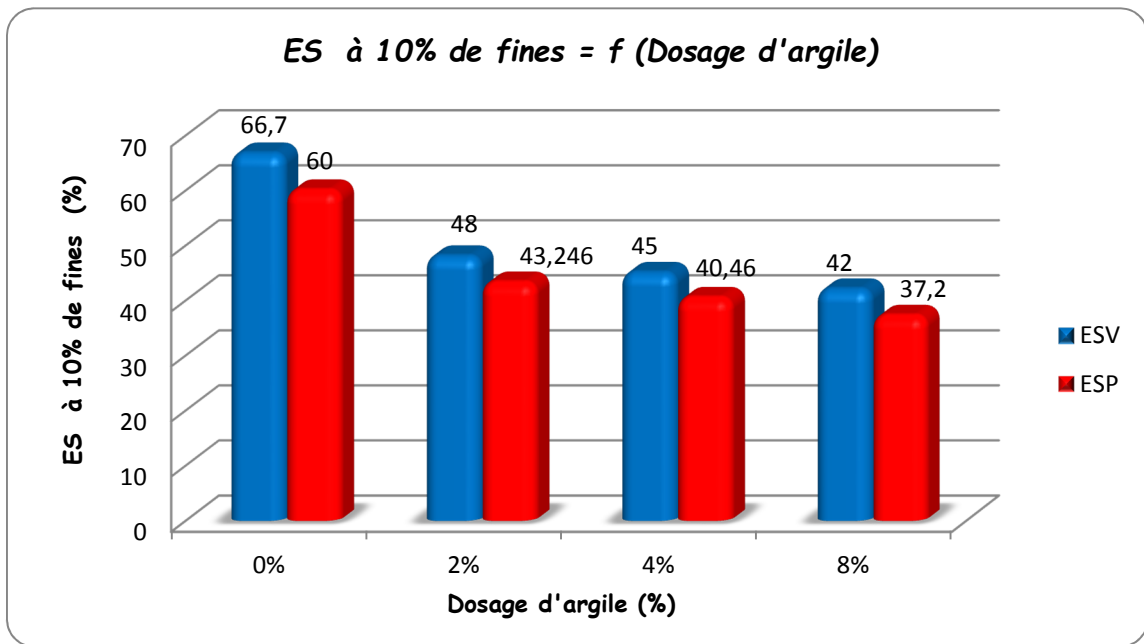


Figure 25 – Histogramme de variation des valeurs de l'ES à 10 % de fines en fonction du dosage en argile.

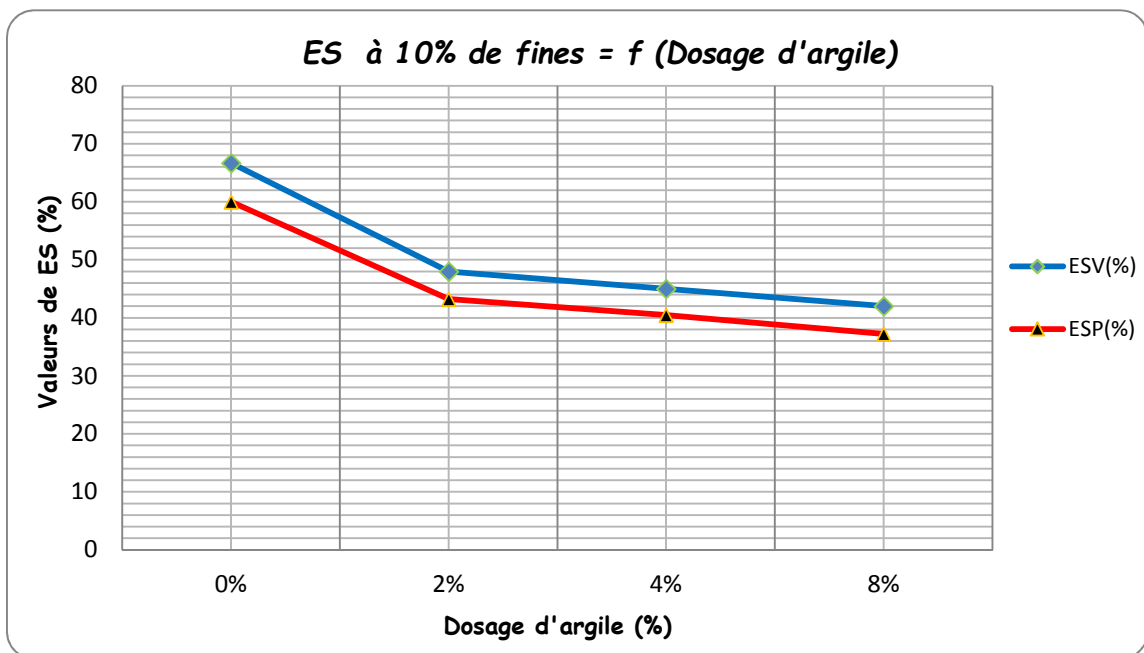


Figure 26 – Influence de l'ajout de fines argileuses sur l'Equivalent de sable à 10 % de fines.

1.1.2) Valeur de bleu de méthylène :

Les figures (27, 28) et le tableau 2 (Annexe A) montrent l'influence de fines argileuses sur la valeur de bleu.

Les papiers filtres qui montrent les résultats de la valeur de bleu de sol à la tâche avec des différents pourcentages d'argile (0%, 2%, 4% et 8%) sont représentés à l'annexe A.

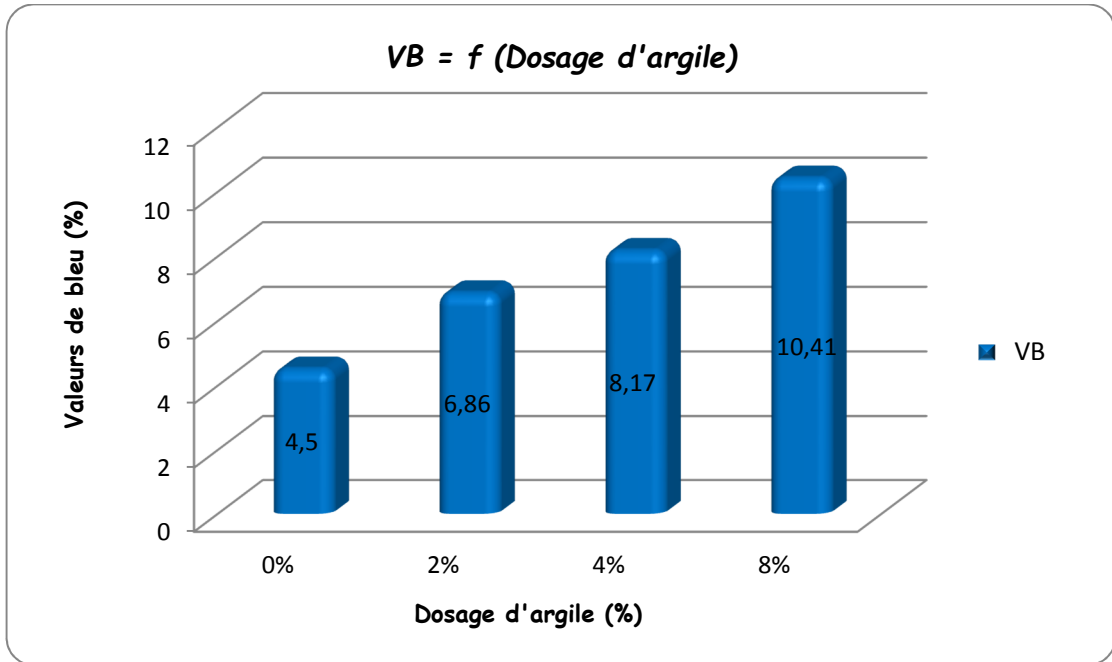


Figure 27 – Histogramme de variation des valeurs de bleu en fonction du dosage en argile.

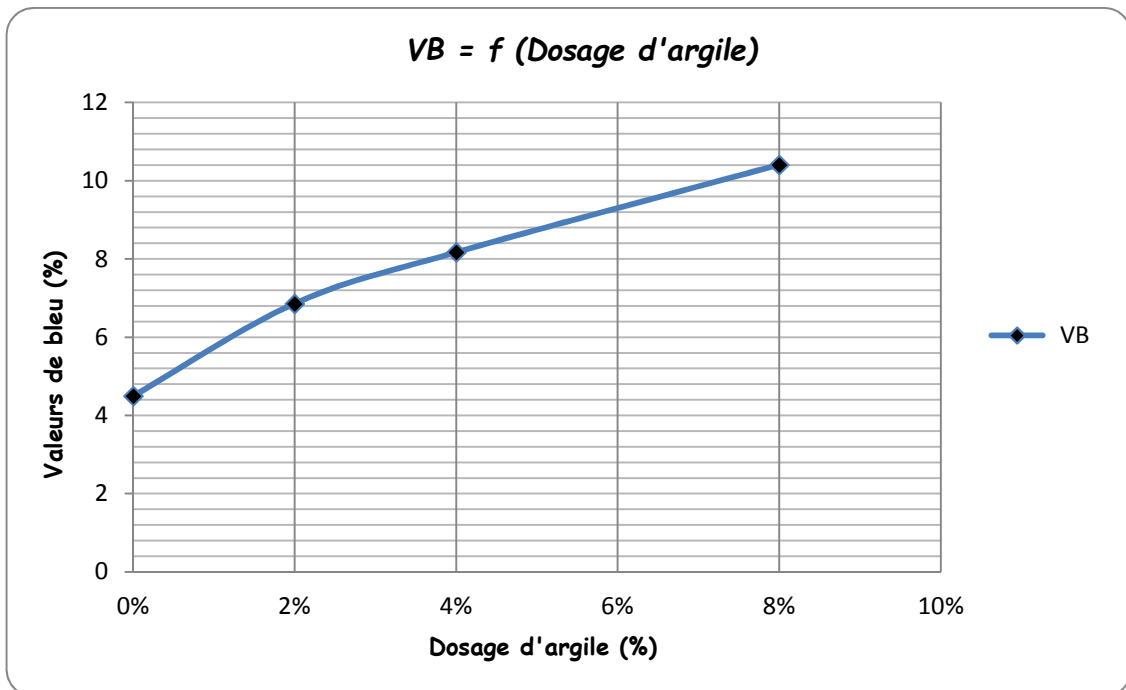


Figure 28 – Influence de l'ajout de fines argileuses sur la valeur de bleu.

1.2) Résultats des autres essais physiques :

1.2.1) Teneur en eau :

Deux échantillons de sable 0/2 mm ont été préparés et pesés puis séchés dans l'étuve pendant 24 h à 105°C. Une fois la dessiccation réalisée, une nouvelle pesée des deux échantillons a été

faite à l'aide d'une balance de haute précision. Les deux pesées donnent par différence la masse d'eau évaporée. (Voir chapitre 2)

Les résultats des teneurs en eau sont présentés dans le tableau 8:

Tableau 8: Résultats des teneurs en eau naturelle.

Sable (0/2) mm	W naturelle (%)
Echantillon 01	4
Echantillon 02	3.5

1.2.2) Analyse granulométrique par tamisage :

Deux essais granulométriques ont été effectués sur la fraction 0/31,5 mm. (Voir mode opératoire, chapitre 2)

Le tableau 3 (Annexe A) ainsi que les figures (29 et 30) montrent les résultats des deux essais.

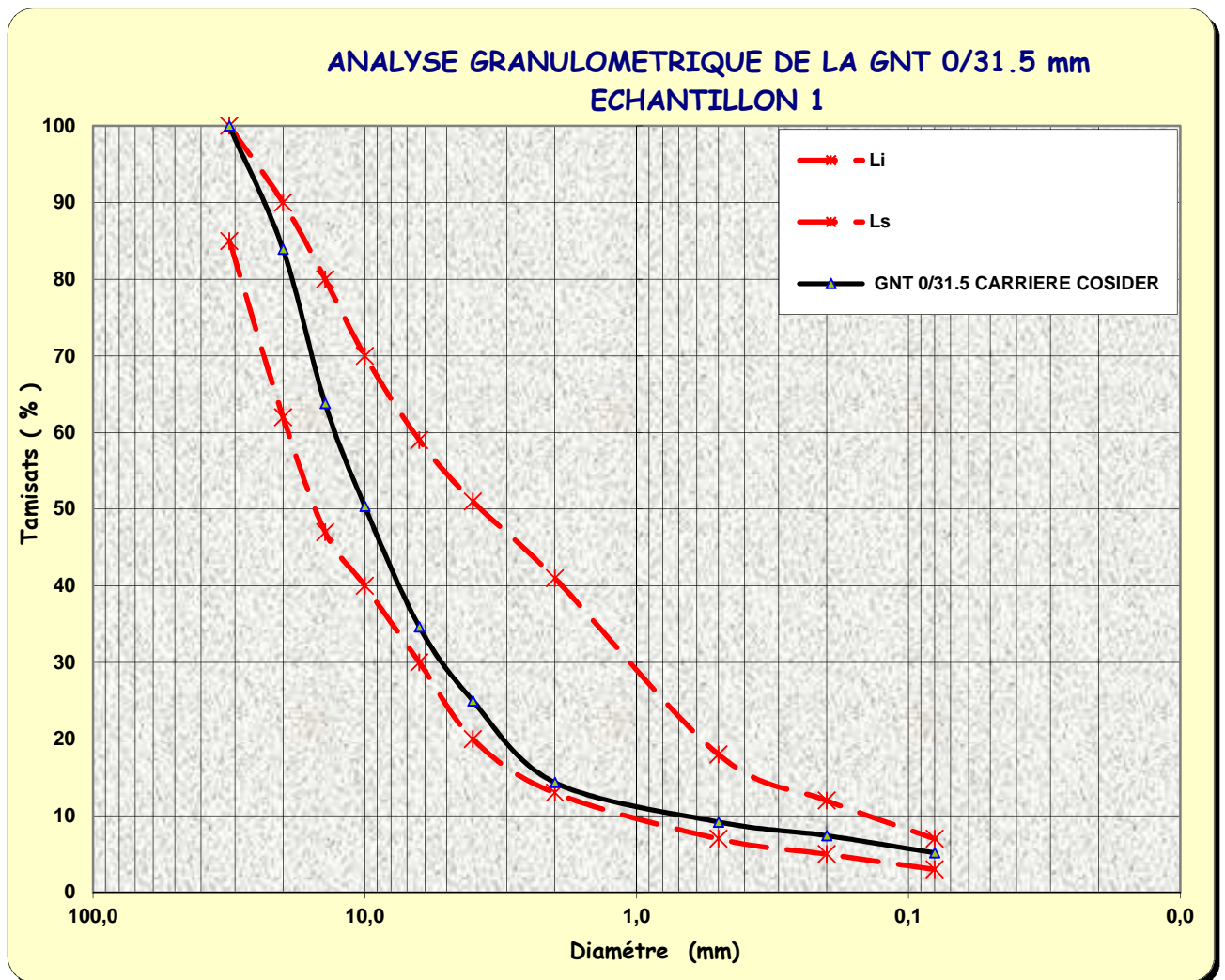


Figure 29 – Courbe granulométrique 01.

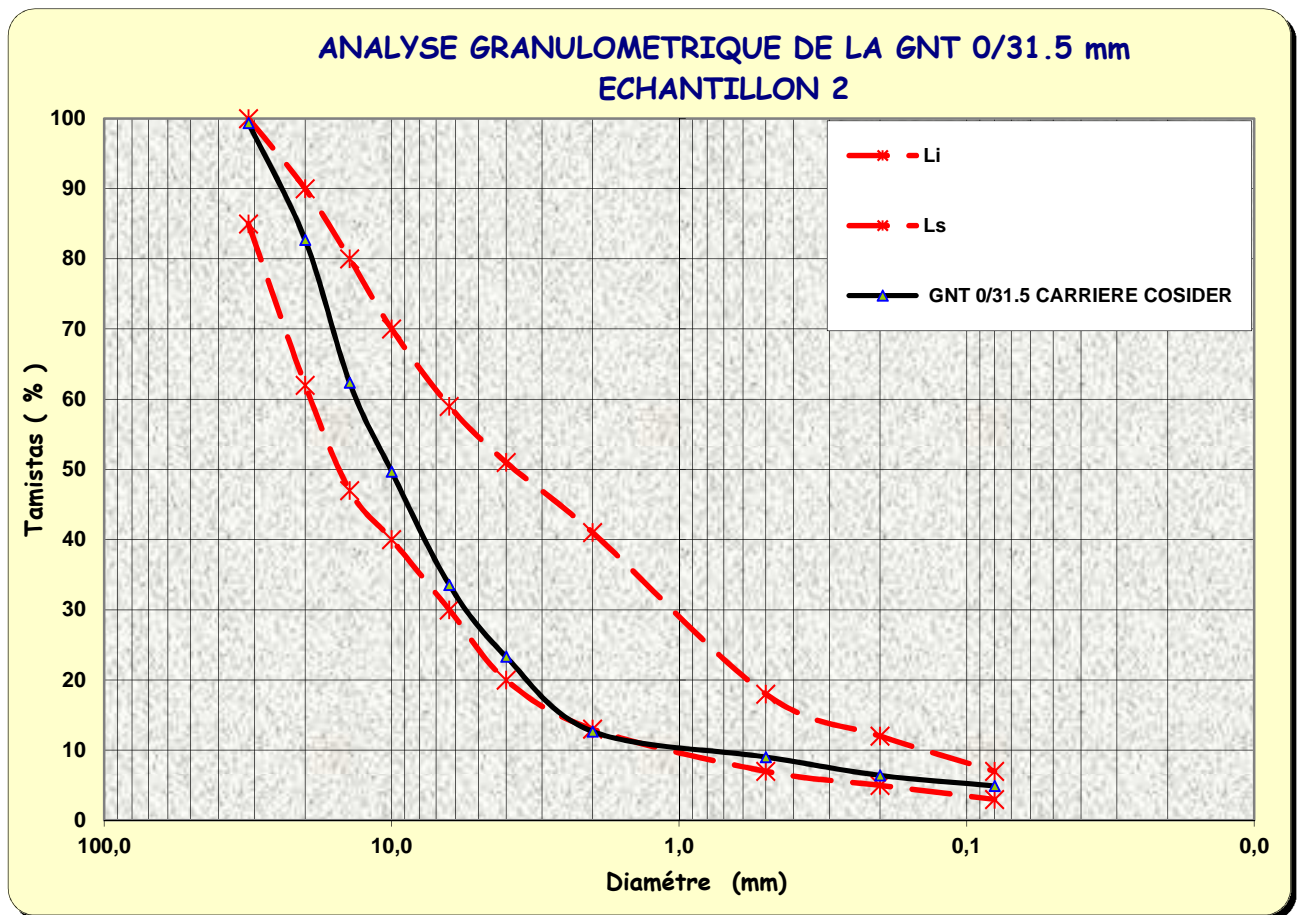


Figure 30 – Courbe granulométrique 02.

1.2.3) Los Angeles et Micro-Deval :

Deux échantillons (6,3/10 mm), pour chaque essai, ont été préparés selon le mode opératoire (chapitre 2) et ensuite testés. Les résultats sont donnés dans le tableau 9:

Tableau 9: Valeurs des essais LA et MDE.

Essai	01	02
MDE (%)	27,2	27
LA (%)	30	36

1.2.4) Teneur en carbonates et teneur en sulfates :

Les résultats des teneurs en carbonates et des teneurs en sulfates sont récapitulés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Résultats des analyses chimiques.

Les Insolubles (%)	CaCO ₃ (%)	Gypses (%)	SO ₄ ²⁻ (%)
14,66	84	0,83	0,47

2) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR L'ARGILE :

2.1) Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation :

Deux essais granulométriques ont été effectués sur l'argile; dont le premier par tamisage et le deuxième par sédimentation. (Voir modes opératoires, chapitre 2)

Les tableaux 5 et 6 (Annexe A) ainsi que la figure 31 montrent les résultats des deux essais.

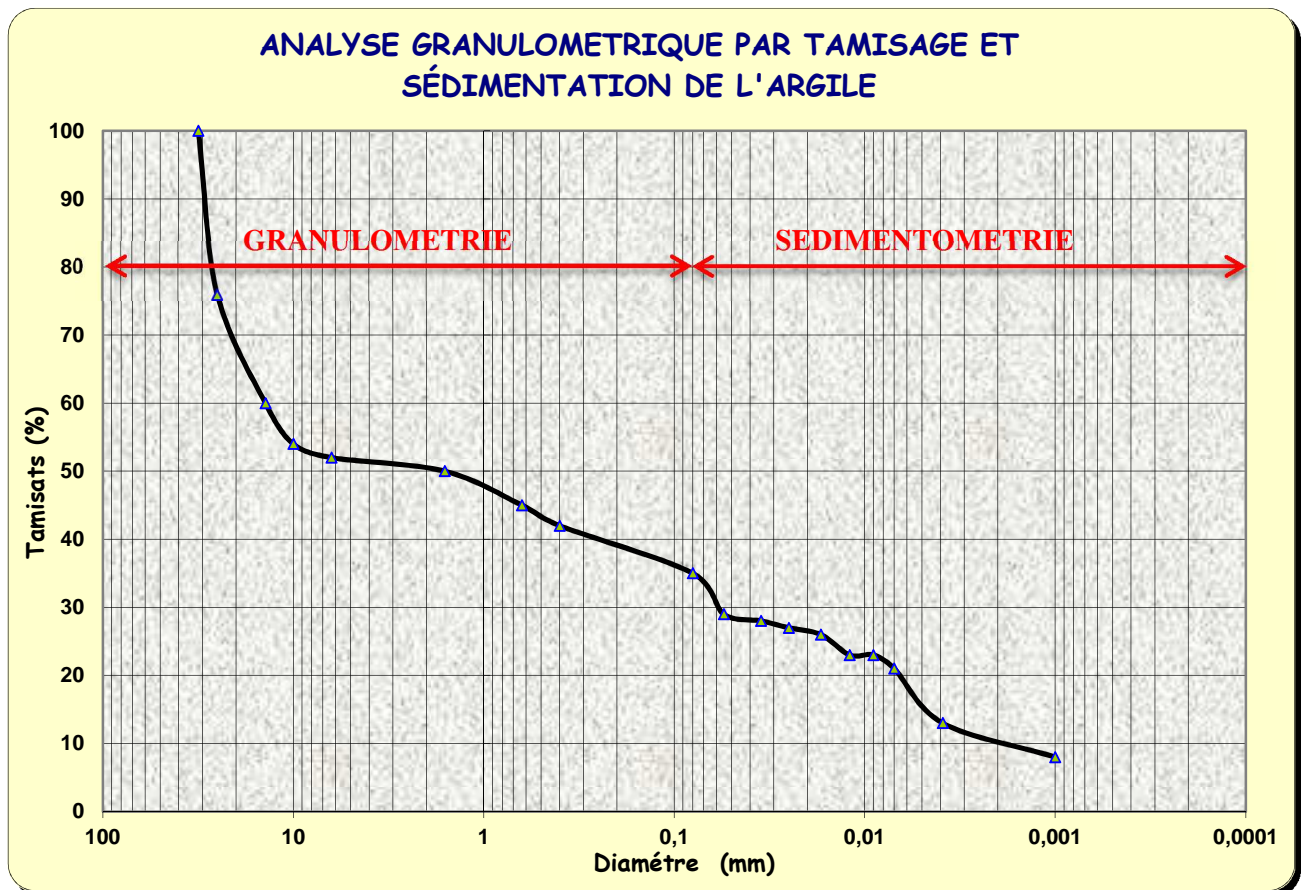


Figure 31 – Courbe granulométrique et sédimentométrique de l'argile.

2.2) Autres essais réalisés sur l'argile :

L'analyse de l'argile utilisée a donné les résultats suivants :

Tableau 11: Résultats des essais réalisés sur l'argile.

Limite d'Atterberg		Teneur en eau (%)	Valeur en bleu de sol (VBS)
WI	61	22	8
WP	29		
IP	32		

II) DISCUSSIONS :

1) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LA GNT :

1.1) Résultats des essais de propretés :

- L'équivalent de sable indique le degré de pollution des éléments sableux des granulats. Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles. A cet égard la GNT 0/31.5 mm de la carrière de Cosidère a une valeur ES égale à 66 % (Tableau 1, Annexe A), cette valeur indique clairement qu'il s'agit d'un sable légèrement impropre. Une chute importante de la valeur de l'ES à 10 % de fines est remarquée quand on a ajouté une quantité de 2% des fines argileuses (ES = 48 %). Les valeurs de l'ES à 10 % de fines ont diminuées graduellement après l'introduction de 4% et 8% d'argile au mélange (valeurs respectives : 45% et 42 %). (Figures 25 et 26)
- D'après les résultats montrés dans la figure 27, on peut noter que la valeur de bleu augmente lorsque le pourcentage de fines argileuses augmente. La quantité d'argiles à donc un rôle à jouer.

En conclusion, les fines argileuses ont une incidence sur les indicateurs de propreté Equivalent de sable à 10 % de fines, Essai au bleu de méthylène).

1.2) Autres essais physiques :

1.2.1) Teneur en eau :

La teneur en eau naturelle ($W_{\text{naturelle}}$) de la GNT est la teneur en eau mesurée immédiatement après le prélèvement en place et qui correspond à la teneur en eau au moment où le prélèvement a été effectué. Le tableau 8 montre des trop faibles teneurs en eau, ces valeurs peuvent être expliquées par le fait que les prélèvements ont été effectués en période sèche.

1.2.2) Analyse granulométrique par tamisage :

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme **NF P 94-056**. Les tamis suivants ont été utilisés : 31,5 mm, 20 mm, 14 mm, 10 mm, 6.3 mm, 4 mm, 2 mm, 0,5 mm, 0,2 mm, 0,080 mm. À noter que les échantillons ont d'abord été séchés à 110°C pour une durée de 24 heures. Les courbes granulométriques obtenues sont illustrées aux figures 29 et 30.

À (Annexe A) sont présentés les résultats des analyses granulométriques sous forme de tableau 3 et la figure (1 et 2) sont également reprises en format agrandi. D'autres caractéristiques telles que le coefficient d'uniformité (C_u) et le coefficient de courbure (C_c) sont montrés au tableau 4. On peut remarquer ce qui suit :

- Les deux courbes granulométriques (figure 29 et 30) et les valeurs du coefficient d'uniformité, coefficient de courbure (tableau 4, Annexe A) indiquent une granularité *continue et étalée* ($C_u > 2$). Les conditions sur C_u et C_c sont satisfaites, on peut dire que

notre matériau est bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière. Les courbes obtenues s'inscrivent parfaitement dans le fuseau de spécification des graves non traitées correspondante; cela est dû à un pourcentage de refus faible au niveau du tamis de maille 20 mm. En effet c'est la forme de la courbe qui est plus importante. Elle conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation et la compacité du matériau. Plus les contacts entre les grains sont nombreux, plus la couche sera stable, plus le matériau sera compact, moins on risquera de voir les déplacements des grains et éviter donc tout risque de tassement.

- Le pourcentage des éléments inférieurs à 80 μm qui est un seuil significatif dans le comportement des matériaux, est satisfaisant. Pour notre GNT le pourcentage des fines particules peut passer d'un pourcentage de **5.15** à **4.89** % (tableau 3, Annexe A). Si ce pourcentage est nul ou insuffisant pour combler les vides entre les gros grains, on va avoir un matériau peu compact. S'il est excessif il y a formation de boue au cours du compactage et donc une augmentation ultérieure des déformations permanentes.

1.2.3) Los Angeles et Micro-Deval :

L'observation des coefficients Los Angeles et Micro-Deval de la fraction (6.3/10) mm de la carrière d'El Euch (tableau 9) nous montre que l'écart entre ces deux coefficients est compris entre 3 et 9. Ces coefficients présentent une faible résistance à l'usure et à la fragmentation.

1.2.5) Teneur en carbonates et teneur en sulfate :

D'après les analyses chimiques (tableau 10), on peut remarquer que la teneur en CaCO_3 obtenu est égale à 84 %, ce qui confirme la nature pétrographique « calcaire » de notre GNT.

La GNT étudié contient un pourcentage de 0.47 d'éléments sulfatés. La question des sulfates se pose essentiellement après traitement des graves non traités avec le ciment. La présence des sulfates dans la GNT a une influence négative sur les processus de durcissement du mélange. (En effet, Les sulfates inhibent la prise)

2) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR L'ARGILE :

L'argile a été prélevée dans le flanc d'un remblai de la route reliant l'aéroport de Sétif à la RN 05. Après élimination des gros éléments et séchage à l'air libre, l'argile est tamisée. Soigneusement homogénéisée, l'argile est placée en sac à une teneur en eau voisine de 3 %. Les caractéristiques physiques de l'argile sont reportées dans le tableau 11. Ce matériau entre dans la catégorie A3 de la classification GTR 2002 (figure 4, Annexe A).

3) COMPARAISON VIS-A-VIS DES SPECIFICATIONS :

L'étude a montré que les fines argileuses avaient une incidence sur les indicateurs de propreté. Il est intéressant de voir si les résultats obtenus satisfont aux valeurs préconisées ou spécifiées.

3.1) Valeurs préconisées ou spécifiées :

Les valeurs préconisées ou spécifiées sont les suivantes :

- ES > 30 (trafic < 25 PL / j en couche de base et fondation),
- ES > 40 (trafic > 25 PL / j en couche de base).

Si l'équivalent de sable est inférieur à ces valeurs, la valeur de bleu doit être inférieure à 2 g pour 100 g de fines.

3.2) Comparaison :

- L'ajout de fines argileuses satisfait l'indicateur de propreté (ES à 10% de fine) quel que soit le dosage pris en compte dans cette étude.
- L'ajout de fines argileuses (illite) ne satisfait plus l'indicateur de propreté (VB).

I) RESULTATS :

Les essais mécaniques suivants ont été effectués :

- Proctor modifié sur les fractions 0/10 mm et 0/14 mm.
- Résistance à la compression simple (Rc).
- Résistance à la traction indirecte (Rtb).

1) ESSAI PROCTOR :

Deux essais Proctor modifié ont été réalisés dont :

- Le premier a été réalisé sur la fraction 0/14 mm, afin de voir l'influence des éléments argileux sur le comportement mécanique de : la grave non traité d'une part (sans traitement), et d'autre part de la grave – ciment (GNT traitée avec 3.5% de ciment). Pour cela, différents dosages en argile (0%, 2%, 4% et 8%) ont été incorporés lors de la réalisation de l'essai.
- Le deuxième a été exécuté sur la fraction 0/10 mm. L'objectif de la réalisation de ce dernier est d'avoir les caractéristiques de l'optimum Proctor modifié afin de les utilisés comme références pour la confection des éprouvettes Rc et Rtb (Chapitre 2).

Les références de compactage des différents matériaux étudiés : la densité sèche γ_d et la teneur en eau W (%) de l'optimum Proctor modifié sur les fractions 0/10 mm et 0/14 mm sont montrés dans les figures (32, 33).les résultats montrés dans le tableau 7,8, 9 et 10 (Annexe B).

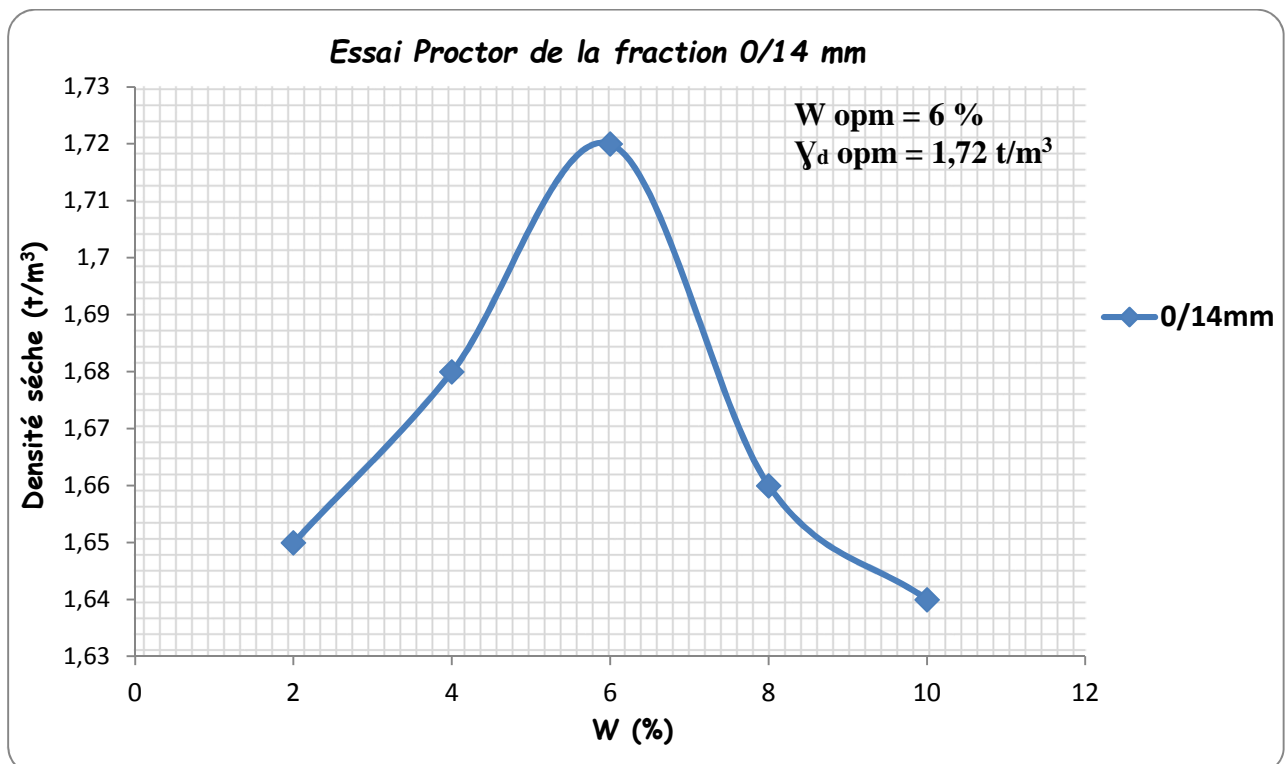


Figure 32 – Courbe Proctor de la fraction 0/14 mm.

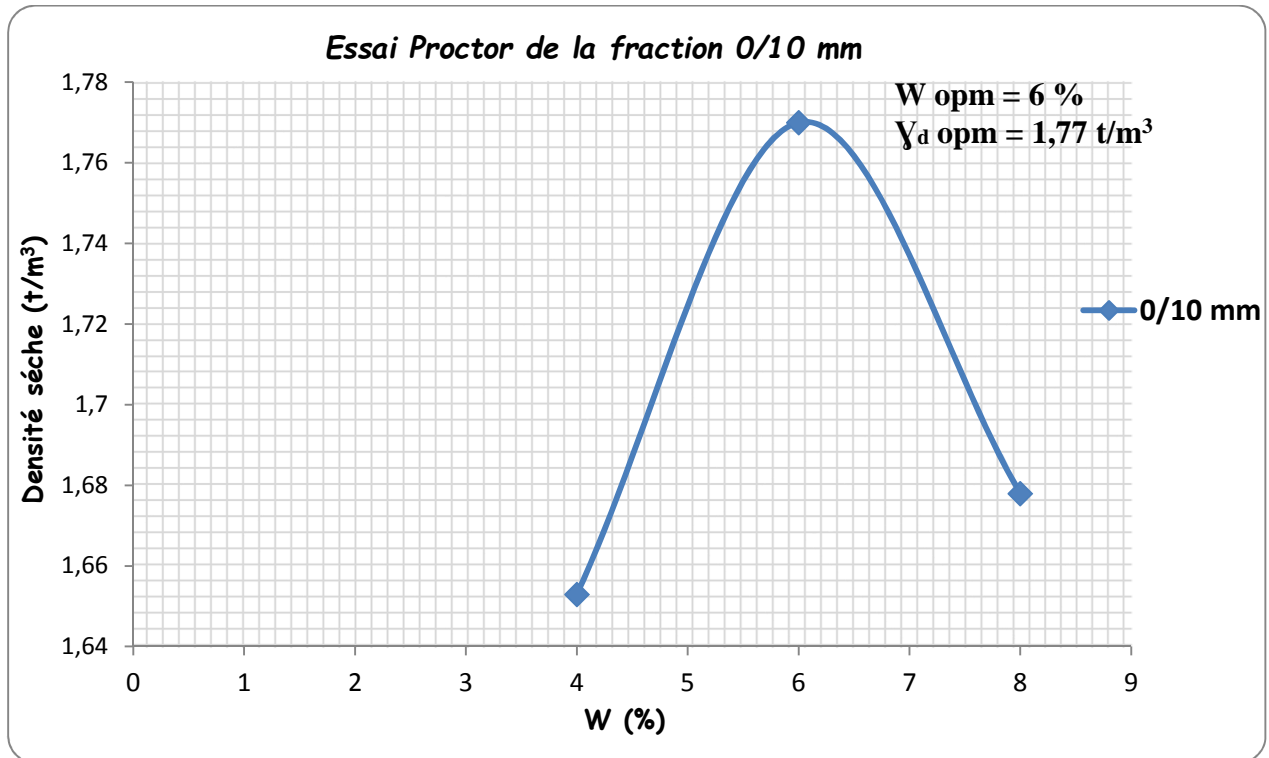


Figure 33 – Courbe Proctor de la fraction 0/10 mm.

Pour apprécier l'influence des fines argileuses sur la valeur de la densité sèche, huit (08) éprouvettes ont été réalisées à l'énergie du Proctor modifié et à la teneur en eau optimum Proctor modifié dont :

- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées selon la formulation suivante : GNT + (0%, 2%, 4% et 8%) d'argile
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées selon la formulation suivante : GNT + 3.5% de ciment + (0%, 2%, 4% et 8%) d'argile

Les résultats sont donnés dans les tableaux 9 et 10 annexe et dans les figures 34 et 35 :

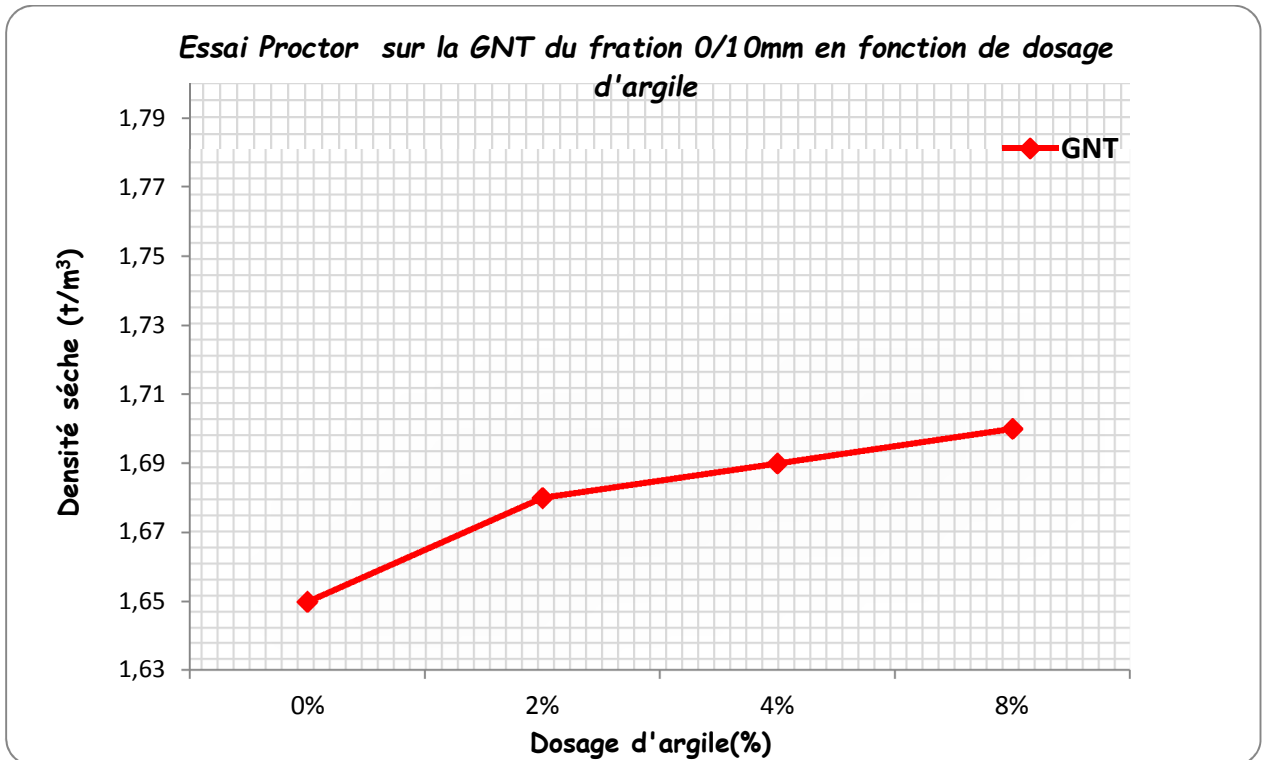


Figure 34 – Influence du pourcentage d'ajout de fines argileuses sur la valeur de la densité sèche à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié (cas de la GNT).

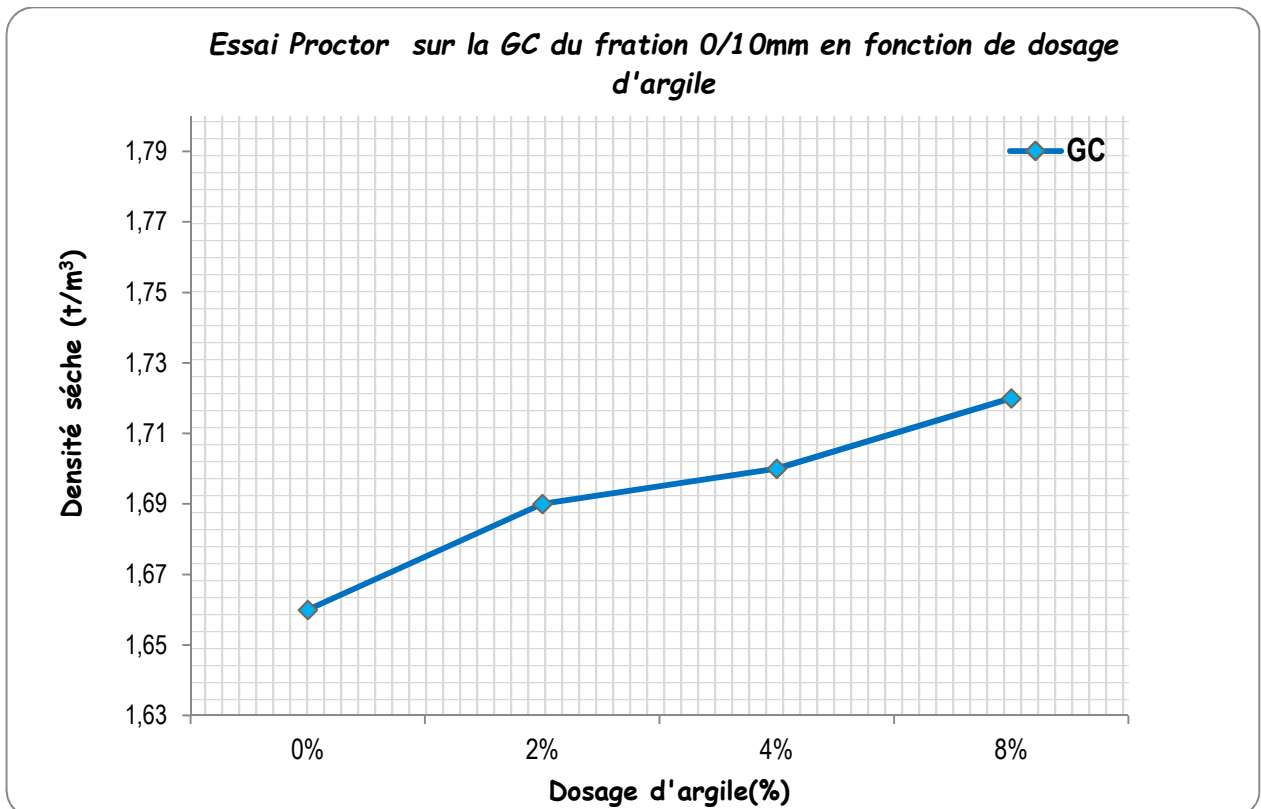


Figure 35 – Influence du pourcentage d'ajout de fines argileuses sur la valeur de la densité sèche à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié (cas de la GC).

2) ESSAIS DE RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (R_c) ET A LA TRACTION INDIRECTE (R_{tb}) :

- Les essais de résistances à la compression simple ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques d'élanement 2 ($H = 10 \text{ cm}$, $\varnothing = 5 \text{ cm}$). Le moule ainsi utilisé est montré dans la photo 35.

L'incidence de l'argile est appréciée pour deux cas :

- Grave non traité :

Les éprouvettes R_c et R_{tb} ont été confectionnés en utilisant la GNT Cosidère d'une fraction 0/10 mm avec l'incorporation de (0%, 2%, 4% et 8%) d'argile pour les durées de conservation suivantes : 03 heures, 07 jours, 14 jours et 28 jours.

- Grave-ciment :

L'étude des caractéristiques mécaniques R_c et R_{tb} a été réalisée pour un dosage en ciment égal à 3.5% ce dosage est le plus couramment utilisé dans le traitement des mélanges et graves traités pour préparer les mélanges, Une étude en laboratoire a été réalisée avec la formule suivante :

- GNT 0/10 mm + (0%, 2%, 4% et 8%) d'argile + 3.5% de ciment

Note :

Le pourcentage d'argile est pris par rapport au poids des granulats secs.

Le dosage du ciment est donné par rapport au poids du mélange : granulats + argile.

- Les essais de résistance à la traction indirecte ont été effectués avec les mêmes modalités et Dans les mêmes conditions que les essais R_c



Photo 35 – Moule utilisé.

Les éprouvettes fabriquées (R_c et R_{tb}) ont été conservées dans des étuis en carton bien scellés à une température de 20°C.



Photo 36 – Conservation des éprouvettes confectionnées.

En ce qui concerne les références de compactage, la confection des éprouvettes pour les essais de résistance à la compression simple et à la traction indirecte se fait en exploitant les valeurs (γ_d OPM, W OPM) de l’essai Proctor modifié réalisé sur la fraction 0/10 mm. (Tableau 12)

Tableau 12: *Références de compactage.*

provenance	Fraction 0/10 mm	
	W OPM (%)	γ_d OPM (t/m ³)
GNT - Cosidère -	06	1,77

Le mode opératoire des deux essais est décrit de manière détaillée dans le deuxième chapitre. Les résultats des essais de compression simple (R_c) réalisés sur la GNT et sur la GC sont montrés comme suit :

1) Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du temps :

a) Cas de la GNT 0/31.5 mm :

Tableau 13 : Résultats des essais de résistance à la compression simple réalisés sur la GNT

% d'agile	R_c (GNT) en MPa			
	3H	7J	14J	28J
0%	0,007	0,009	0,106	0,15
2%	0,029	0,075	0,134	0,18
4%	0,033	0,115	0,182	0,34
8%	0,046	0,117	0,234	0,45

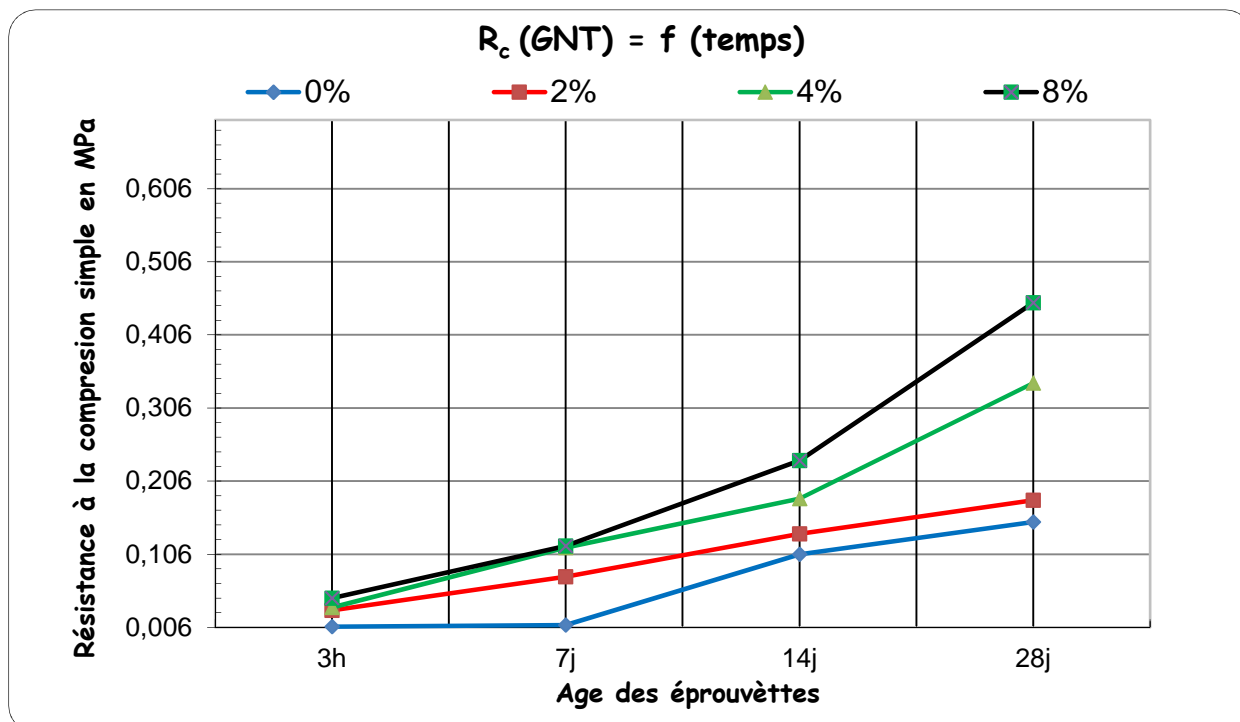


Figure 36 – Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la grave non traitée de Cosidère.

b) Cas de la GC :

Tableau 14: Résultats des essais de résistance à la compression simple réalisés sur la GC.

% d'agile	R_c (GC) en MPa			
	3H	7J	14 J	28J
0%	0,035	0,245	0,338	0,35
2%	0,087	0,247	0,348	0,4
4%	0,099	0,285	0,444	0,51
8%	0,102	0,335	0,6	0,72

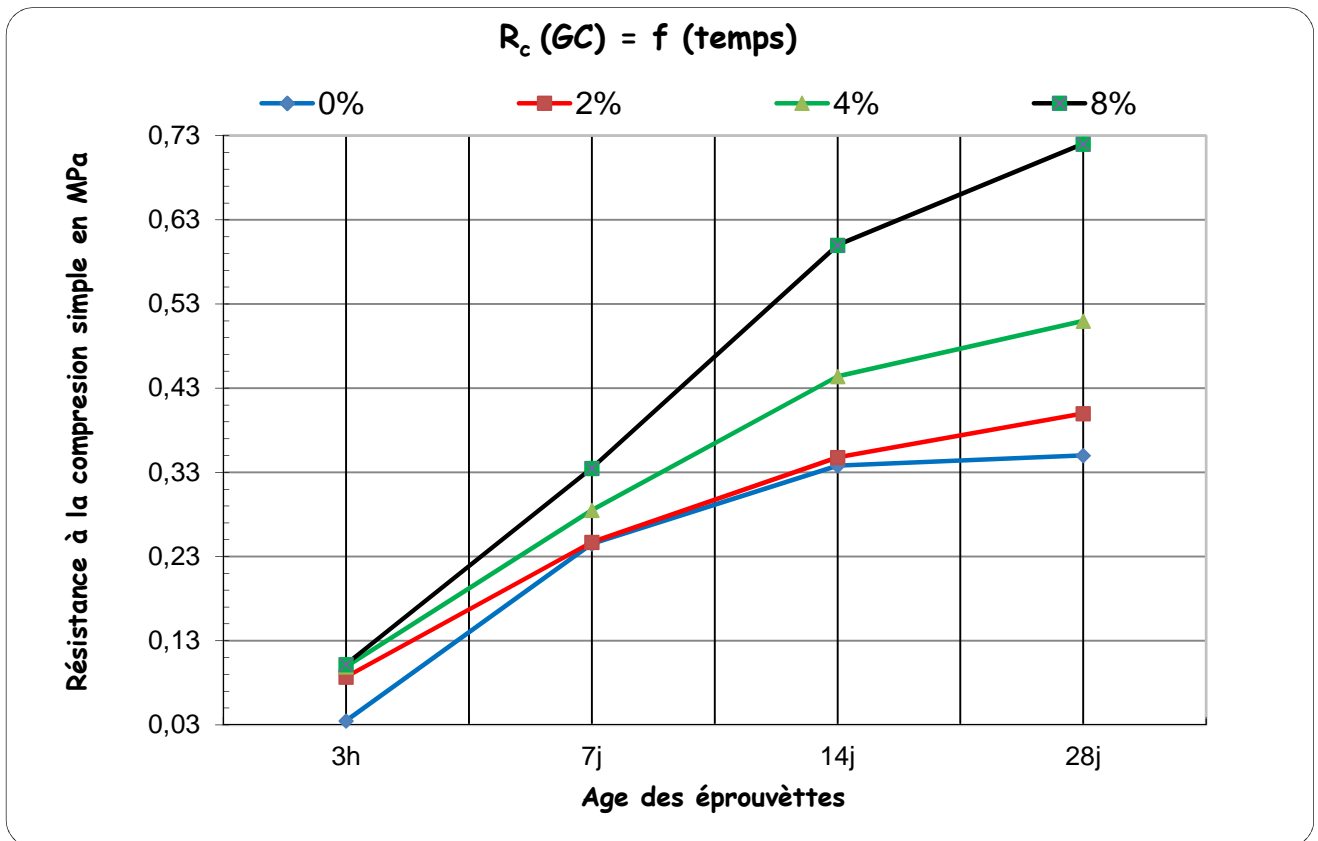


Figure 37 – Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la compression simple de la grave ciment (3.5% de ciment).

2) Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du dosage en argile :

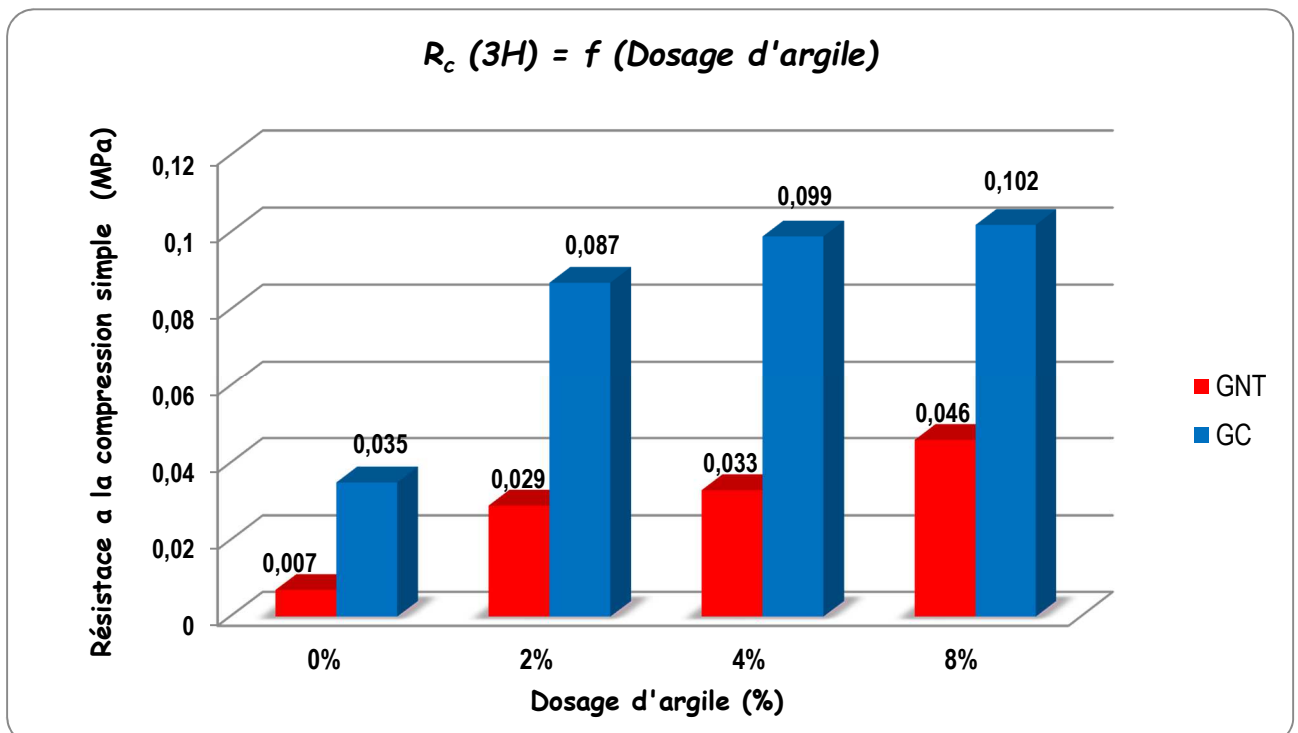


Figure 38 – Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 3 heures.

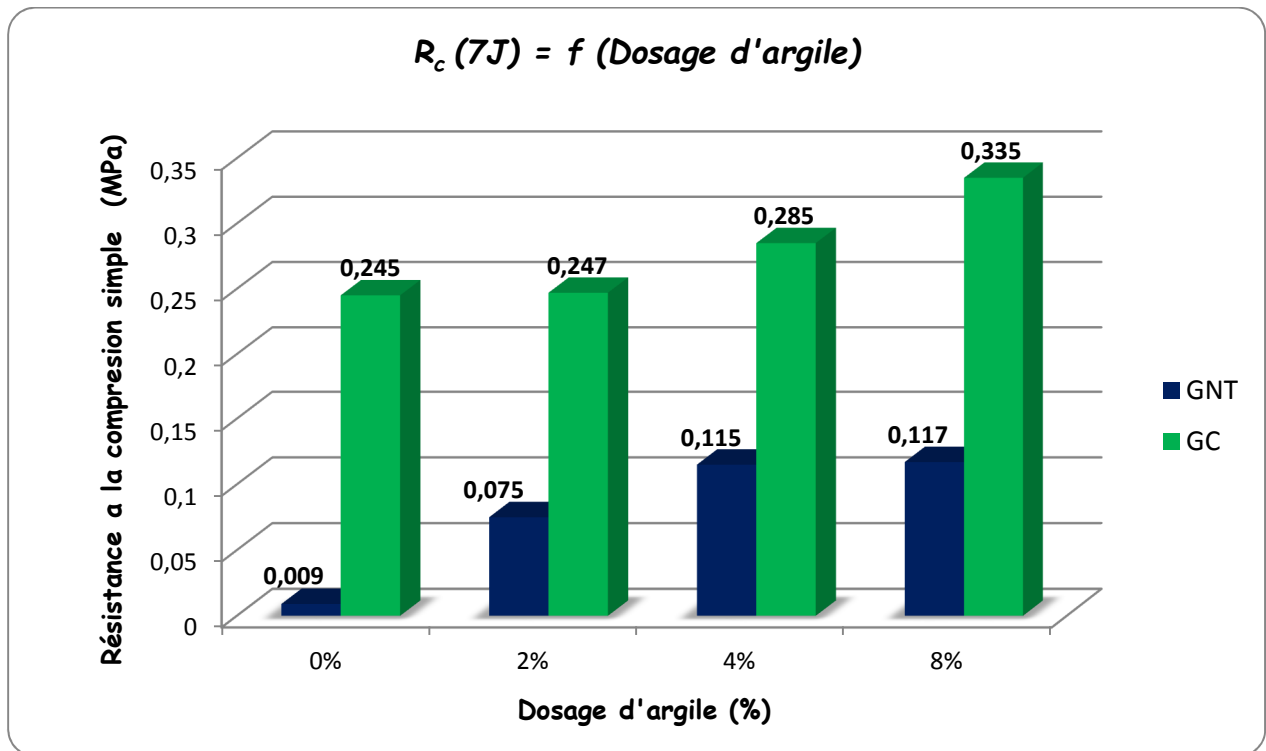


Figure 39 – Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 7 jours.

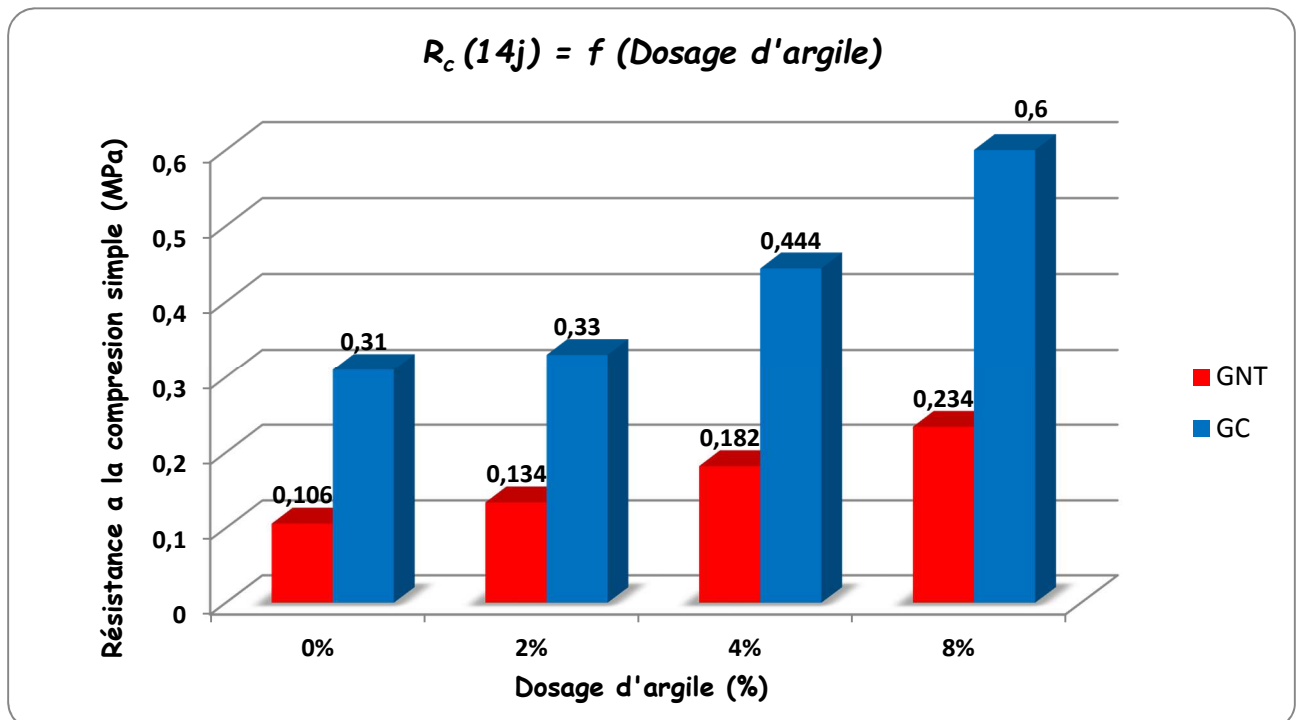


Figure 40 – Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 14 jours.

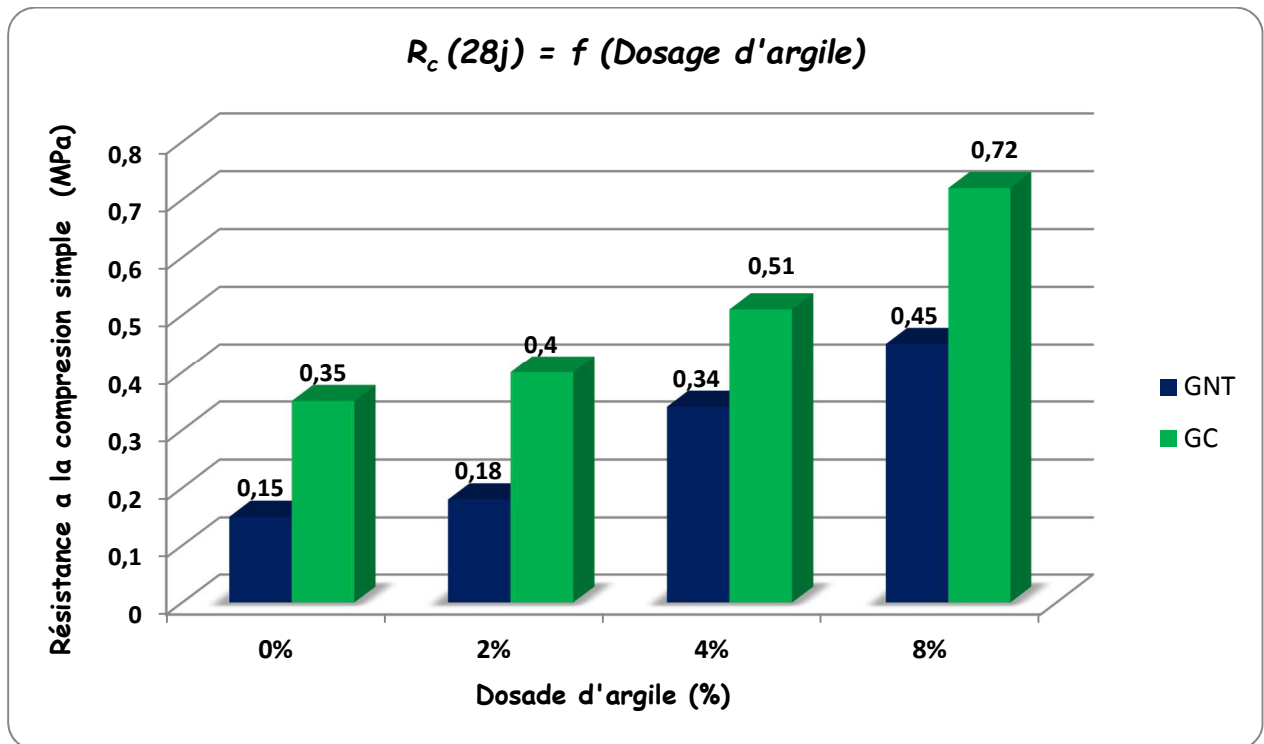


Figure 41 – Histogramme de la résistance à la compression simple de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 28 jours.

3) Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du temps :

a) Cas de la GNT 0/31.5 mm :

Tableau 15 : Résultats des essais de résistance à la traction indirecte réalisés sur la GNT

% d'argile	R_{tb} (GNT) en MPa			
	3H	7J	14J	28J
0%	0,001	0,0022	0,004	0,006
2%	0,004	0,005	0,008	0,011
4%	0,005	0,007	0,01	0,028
8%	0,008	0,01	0,029	0,045

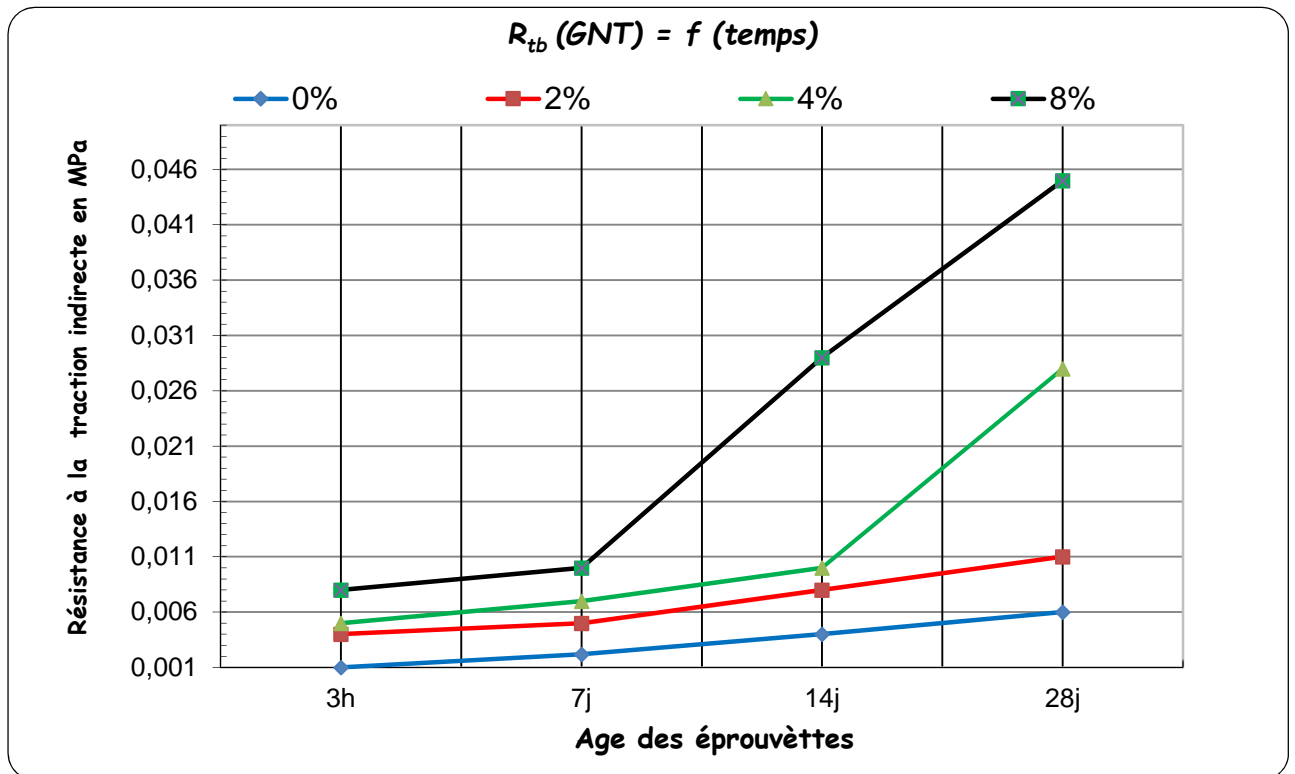


Figure 42 – Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la grave non traité de Cosidère.

b) Cas de la GC :

Tableau 16 : Résultats des essais de résistance à la traction indirecte réalisés sur la GC.

% d'agile	$R_{tb}(GC)$ en MPa			
	3H	7J	14J	28J
0%	0,007	0,01	0,011	0,016
2%	0,012	0,019	0,021	0,027
4%	0,018	0,025	0,028	0,07
8%	0,025	0,033	0,055	0,122

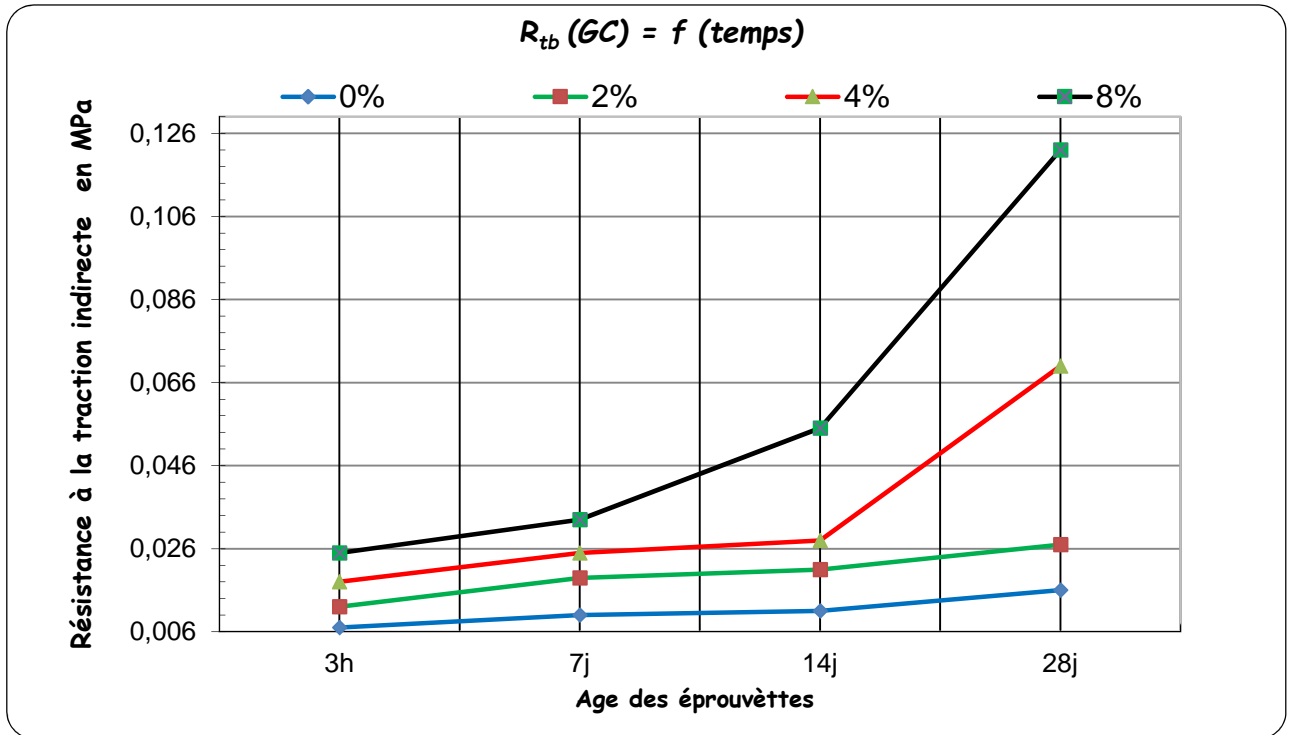


Figure 43 – Influence de la durée de conservation des éprouvettes sur la résistance à la traction indirecte de la grave non traité de Cosidère

4) Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du dosage en argile :

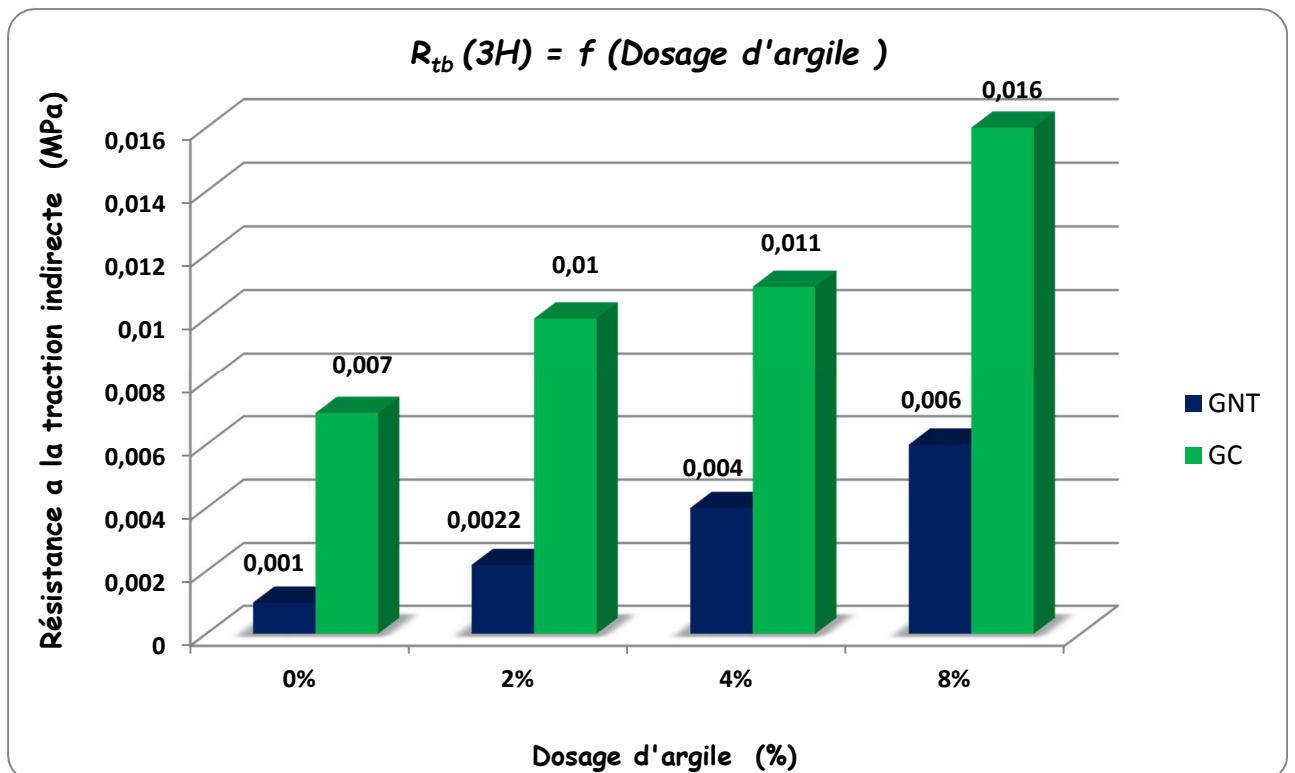


Figure 44 – Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 3 heures.

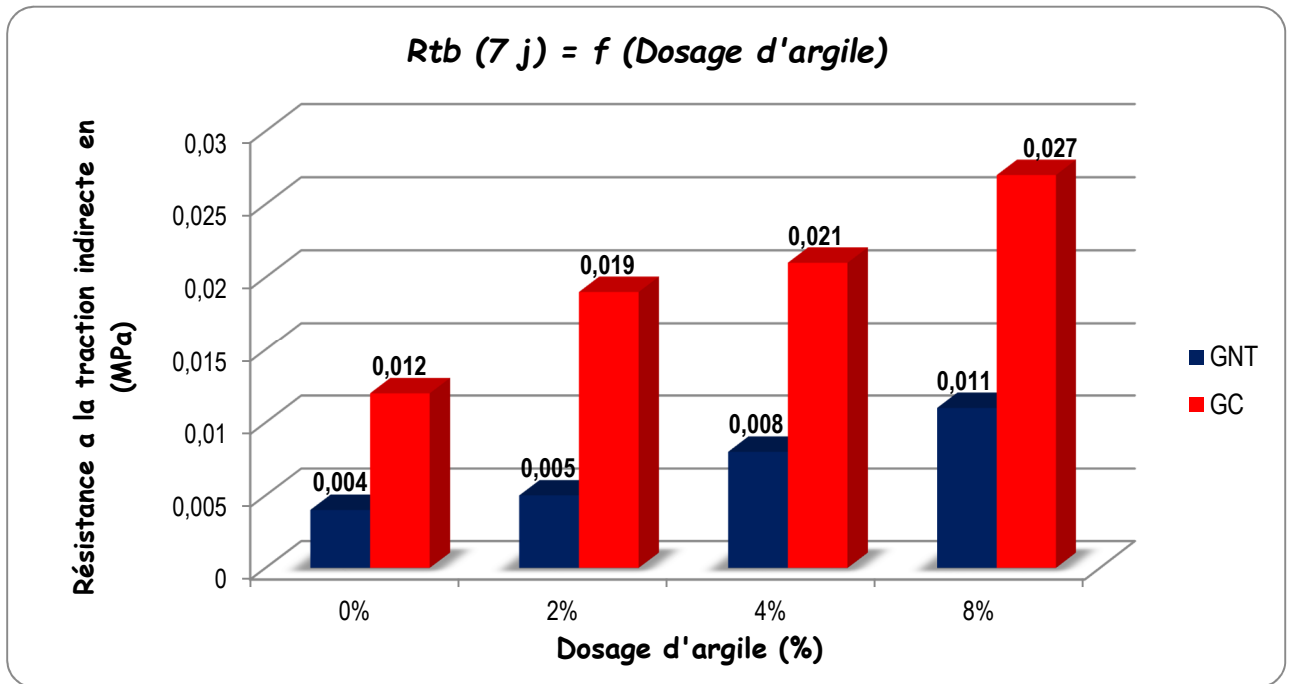


Figure 45 – Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 7 jours.

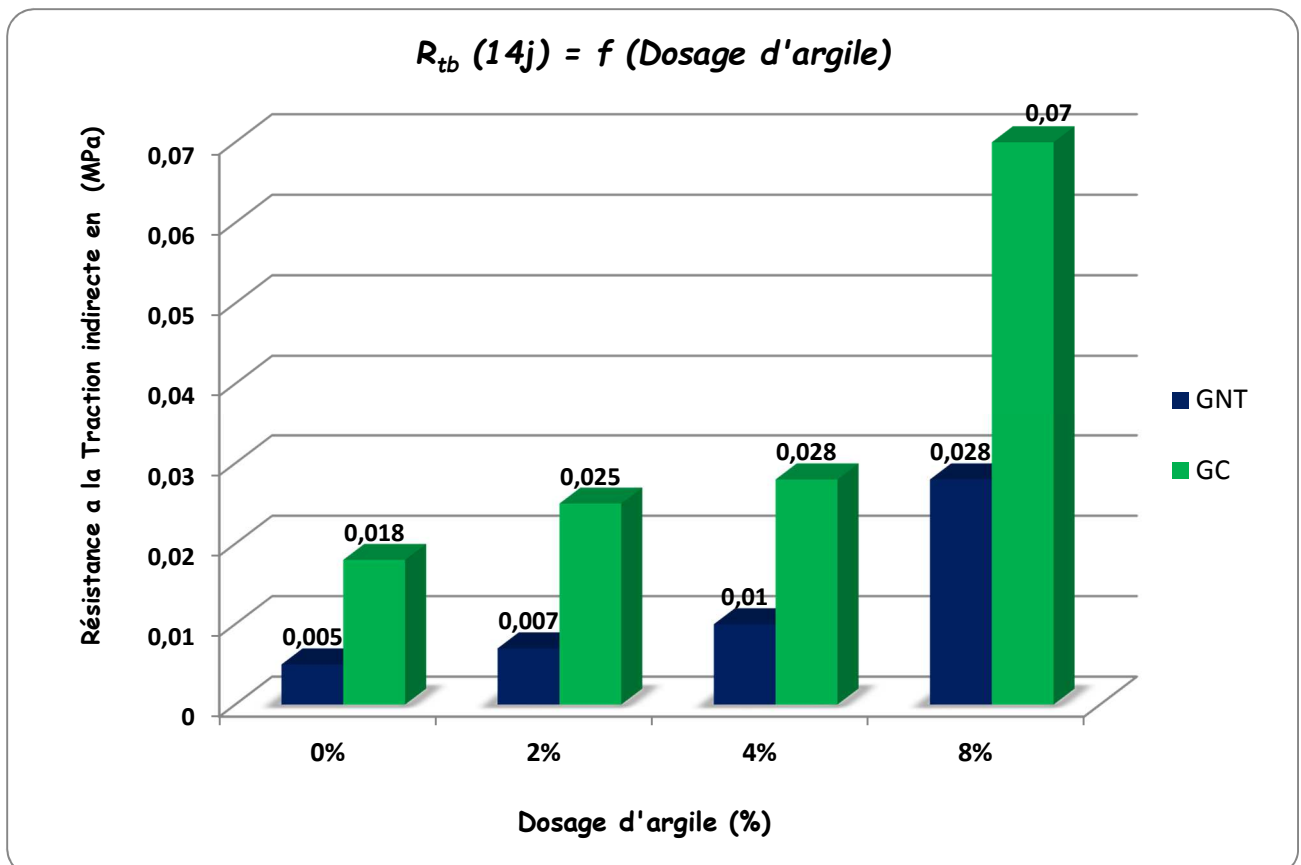


Figure 46 – Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 14 jours.

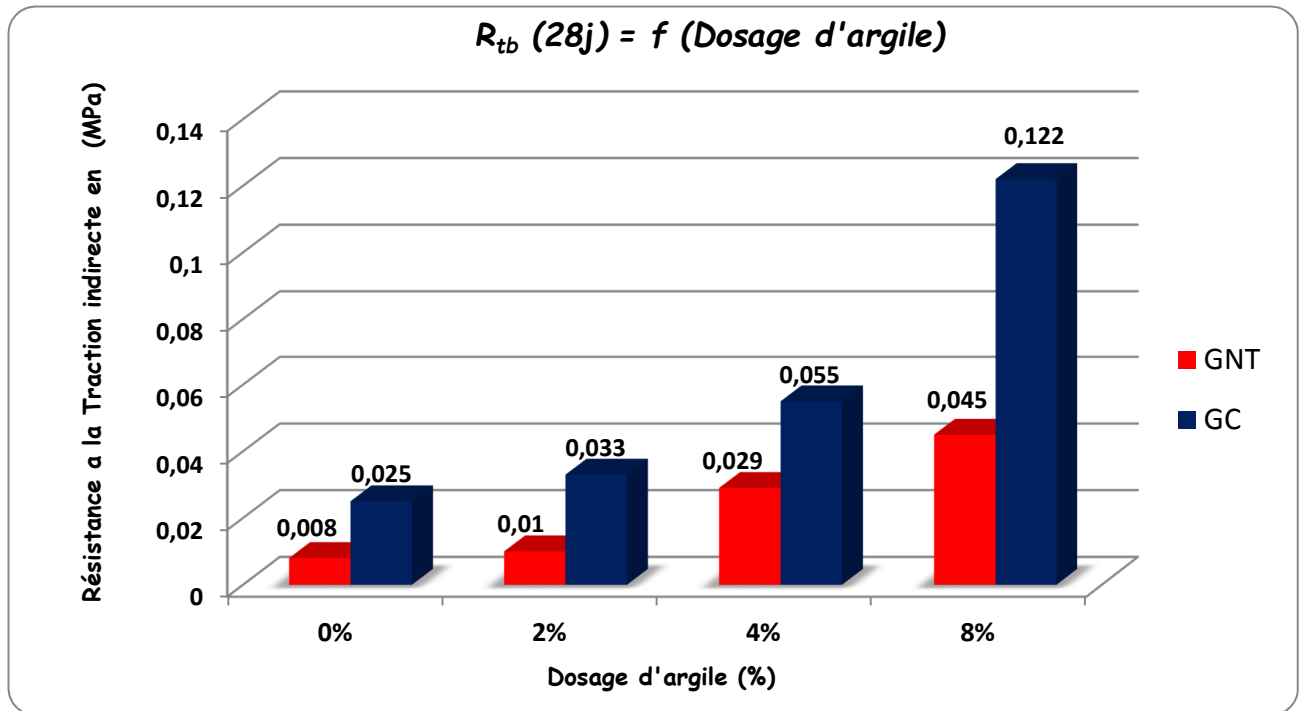


Figure 47 – Histogramme de la résistance à la traction indirecte de la GNT et de la GC en fonction du dosage en argile à 28 jours

3) ESSAI COMPLEMENTAIRES :

• Tenue à l'eau

Une série de huit (08) éprouvettes de dimensions (H = 10 cm, Ø = 5cm) ont été confectionnées avec des graves non traités ainsi qu'avec des graves ciments. L'objectif de cette manipulation est de voir l'influence de l'eau sur le comportement des graves non traités et des graves ciment avant et après l'adjonction de 2%,4% et 8% d'argile :

- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées sans traitement de la GNT + (0%,2%,4% et 8%) d'argile.
- Quatre (04) éprouvettes ont été confectionnées avec traitement de la GNT par 3.5% de ciment + (0%,2%,4% et 8%) d'argile.

Ces éprouvettes ont été séchées pendant 3 h. elles ont été ensuite plongées dans de l'eau. Nous avons, par la suite, enregistré le temps au bout duquel les éprouvettes sont détruites (tableau 17).

Tableau 17 : Comportement des éprouvettes après immersion dans de l'eau.

% d'argile	Eprouvettes fabriquées par la GNT	Eprouvettes fabriquées par la GC
0%	04 Minutes	Garde la forme de l'état initial
2%	02 Minutes	Garde la forme de l'état initial
4%	01 Minute et 30 secondes	Garde la forme de l'état initial
8%	Destruction Instantanée	Garde la forme de l'état initial



Photo 37 – Eprouvettes plongées dans de l'eau.

II) INTERPRETATION DES ESSAIS MECANQUES :

1) ESSAI PROCTOR :

En ce qui concerne les valeurs Proctor (tableaux 7 et 8, Annexe B), les résultats indiquent que la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié pour le cas de la GNT 0/14 mm est égale à 6 %. Pour le cas de la GNT 0/10 mm, cette valeur (W_{OPM}) a évolué d'environ de 7 % ce qui est logique. La montée de W_{OPM} s'explique par le fait que : le premier test se faisait sur la fraction 0/14 mm alors que le deuxième sur la fraction 0/10 mm (renferme le plus d'éléments fins). C'est donc l'élimination de la fraction 10/14 mm qui explique l'écart entre les deux essais.

L'allure des courbes Proctor (figures 32 et 33) constitue un bon indicateur de la sensibilité à l'eau. Par sensibilité, on entend la variation de portance d'un sol pour une variation donnée de la teneur en eau « Δw ».

Pour les essais Proctor, plus le sommet de la courbe est accentué (pointue), plus le matériau est sensible à l'eau, cela veut dire une faible variation de teneur en eau entraîne une baisse importante de la densité sèche γ_d .

Pour la GNT de Cosidère, on remarque qu'elle présente une courbe à sommet pointu, donc sensible à l'eau.

Si l'on se réfère aux figures 34 et 35, les valeurs des densités définissant l'OPM augmentent lorsque le dosage de l'argile croît.

2) ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE (R_c) :

2.1) Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du temps :

a) Cas de la GNT :

On constate d'après la figure 36 :

- *Entre 3h et 7 jours :*

La montée en résistance (R_c) est sensiblement la même pour les trois échantillons mélangés avec 2%, 4% et 8% d'argile. Aucune évolution de la résistance à la compression simple n'a été remarquée pour le cas de la GNT propre (0% d'argile)

- *Entre 7 jours et 14 jours :*

La résistance à la compression simple monte régulièrement pour les quatre échantillons.

- *Entre 14 jours et 28 jours :*

L'évolution de la résistance à la compression simple n'est pas la même : on remarque que la résistance à la compression de la GNT mélangé avec 8% d'argile a évolué rapidement par rapport aux autres échantillons.

De point de vue de R_c de la GNT de Cosidère, on constate qu'elle augmente régulièrement avec la durée de conservation et ce pour les quatre échantillons testés. Cette croissance n'est pas toujours linéaire.

Si on prend comme critère R_c à 28 jours, on constate que le la GNT mélangé avec 8% d'argile présente la plus grande valeur, vient après la GNT mélangé avec 4% d'argile, ensuite la GNT mélangé avec 2% d'argile et finalement la GNT propre.

b) Cas de la GC :

D'après la figure 37, on peut faire les remarques suivantes :

- *Entre 3 h et 14 jours :*

La résistance à la compression simple (R_c) croit linéairement. Cette croissance est sensiblement la même entre 3 h et 7 jours et ce pour les quatre échantillons. Après 7 jours, l'écart des R_c entre les quatre échantillons devient important.

- *Entre 14 jours et 28 jours :*

Comme pour l'intervalle entre 3 h et 14 jours, L'évolution de la résistance à la compression simple est presque la même pour les échantillons mélangés avec 2%, 4% et 8% d'argile où il est remarquable la montée plus ou moins rapide de la résistance à la compression simple de l'échantillon mélangé avec 8% d'argile.

Il est aussi à remarquer l'apparition d'un palier pour le cas de la GC propre (0% d'argile).

c) Rapport Immersion-Compression :

Quatre éprouvettes ont été confectionnées par la grave ciment, conservées pendant 28 jours et plongées dans un bac rempli d'eau pendant 14 jours. Au bout de 14 jours, les éprouvettes ont été écrasées pour avoir la résistance à la compression simple après immersion dans l'eau. (Photo 38).



Photo 38 – Eprouvettes plongées dans un bac d'eau.

Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 18 : Valeurs de rapport immersion – compression.

% d'argile	0%	2%	4%	8%
R_{c28j} (MPa)	0,35	0,4	0,51	0,72
R_{ci28j} (MPa)	0,31	0,30	0,23	0,14
$\frac{R_{ci}}{R_c}$	0,89	0,75	0,45	0,19

L'ajout de fines à une incidence sur la valeur de R_c et de R_{ci} (Figure 48), la valeur R_{ci} décroît en fonction du dosage pour arriver à une valeur de 0,14 pour le cas de l'adjonction de 8% d'argile.

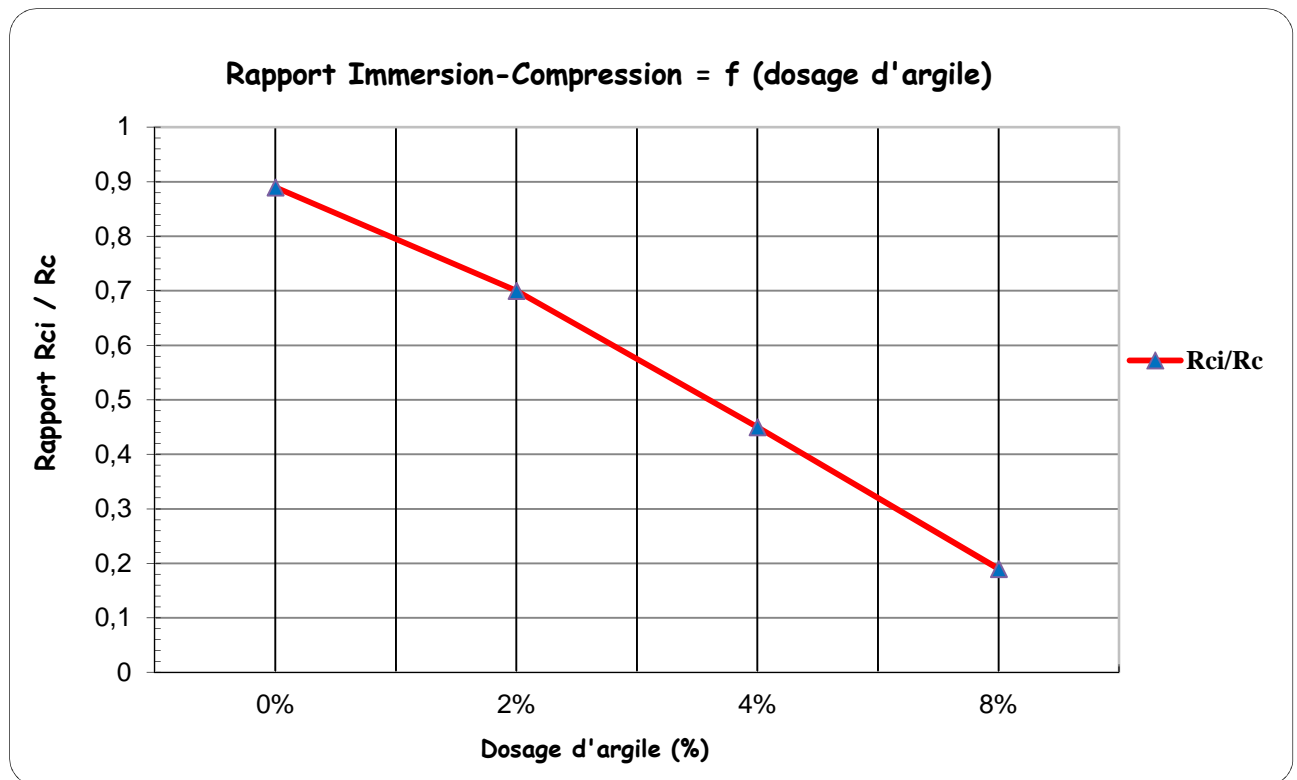


Figure 48 – Evolution de la valeur du rapport $\frac{R_{ci}}{R_c}$ à 28 j, en fonction du pourcentage d'ajout des fines.

d) Comparaison entre Rc GC et Rc GNT:

D'après le tableau 18, on peut faire les constatations suivantes :

- Les valeurs de résistance à la compression simple de la GC sont plus grandes que celles de la GNT.
- L'écart entre les valeurs de la résistance à la compression simple de la GC et la GNT apparait faible (0.028, 0% d'argile) pour une durée de conservation de 3h, puis il devient important pour les durées de : 7 jours, 14 jours et 28 jours.

Cette constatations nous permet de dire que le comportement mécanique de la GC au début du durcissement (3 h) est presque le même que celui de la GNT,

Tableau 19 : L'écart entre les valeurs de la résistance à la compression simple de la GC et la GNT

% d'argile	3h	7j	14j	28j
0%	0,028	0,236	0,232	0,2
2%	0,058	0,172	0,214	0,22
4%	0,066	0,17	0,262	0,17
8%	0,056	0,218	0,366	0,27

2.2) Evaluation de la résistance à la compression simple en fonction du dosage en argile :

D'après les histogrammes (figures 38, 39, 40 et 41), on peut faire les constatations suivantes :

- Contrairement à toutes attentes, on remarque que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du pourcentage d'argile aux différents âges (3h, 7j, 14j et 28j). En effet, l'argile s'infiltré dans les pores de la matrice et augmente la rigidité en formant un nombre important de connections rigides liant les grains de la GNT et de la GC.
- L'évolution en fonction du dosage en argile de la résistance à la compression simple d'une Grave Ciment est plus grande comparativement avec celle d'une Grave non traité.
- Pour le cas de la GNT, la variation de R_c en fonction du dosage se fait graduellement et lentement entre 3 heures et 28 jours, à contrario de l'évolution remarquée pour le cas de la GC où elle se fait rapidement entre les différentes durées de conservation. Ce constat peut être expliqué par l'adjonction du ciment qui à un pouvoir hydraulique grand.

3) ESSAI DE RESISTANCE A LA TRACTION INDIRECTE (R_{tb}) :

3.1) Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du temps :

a) Cas de la GNT :

L'examen de l'évolution des résistances à la traction indirecte des éprouvettes fabriquées par la GNT (figure 42) permet de constater qu'il y a une bonne analogie de cette évolution avec celle des résistances à la compression simple (figure 36).

Des points dispersés sont remarqués dans la figure 42, cette déviation est expliquée par une hétérogénéité due à la confection des éprouvettes.

b) Cas de la GC :

Mêmes remarques que celles de la GNT sont à faire pour le cas de la GC.

3.2) Evaluation de la résistance à la traction indirecte en fonction du dosage en argile :

D'après les histogrammes (figures 44, 45, 46 et 47) on peut faire les mêmes remarques que celles de variation de la résistance à la compression simple (R_c) en fonction du dosage en argile.

Remarque :

Les rapports (R_c / R_{tb}) varient entre 06 et 14 pour toutes les échantillons testés dans cette étude. Ces rapports sont logiques quand on les compare avec les rapports couramment obtenus pour les bétons hydrauliques (rapport égale à 10).

4) ESSAI COMPLEMENTAIRES :

Tenue à l'eau :

D'après les résultats illustrés dans le tableau 19 on peut faire les remarques suivantes :

- L'intérieur des éprouvettes fabriquées par la GNT se détruit au fur et à mesure que l'eau y pénètre. les parois au contact de l'eau se détruisent instantanément. Nous remarquons que l'éprouvette mélangée avec 8% d'argile se détruit immédiatement après l'ajout de l'eau, les autres éprouvettes (0%, 2% et 4%) se détruisent respectivement au bout de quelques minutes. (photo 39).

Ces constats viennent confirmer les résultats des essais physiques : c'est que l'argile a une incidence sur les indicateurs de propriétés.

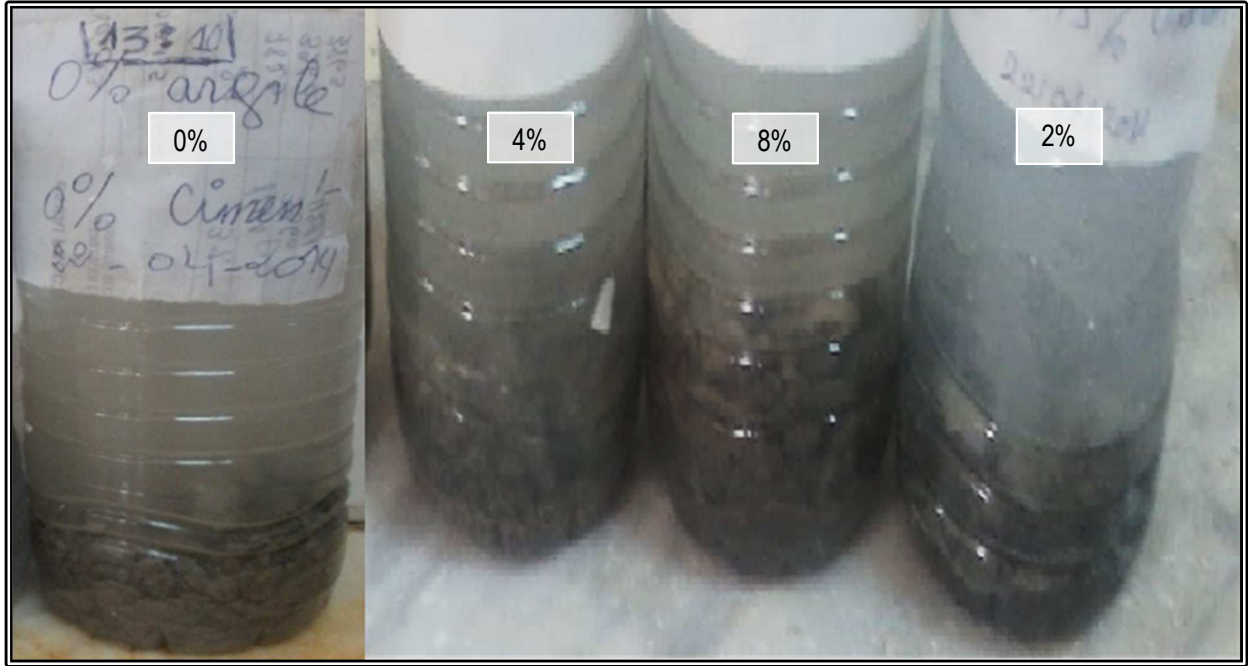


Photo 39 – Destruction instantanée des éprouvettes des graves non traitée.

En général toutes les éprouvettes confectionnées par la grave traitée avec 3.5% de ciment (GC) ont gardé la forme de l'état initial avec une destruction partielle des parois des éprouvettes c-à-d. que l'intérieur des éprouvette reste stable malgré l'immersion total dans l'eau. (Photo 40)



Photo 40 – Stabilité des éprouvettes des graves-ciments dans l'eau.

5) COMPARAISON VIS-A-VIS DES SPECIFICATIONS :

L'étude a montré que les fines argileuses avaient une incidence sur les indicateurs de qualité. Il est intéressant de voir si les résultats obtenus satisfont aux valeurs préconisées ou spécifiées.

5.1) Valeurs préconisées ou spécifiées

En ce qui concerne les graves-ciment, les valeurs préconisées ou spécifiées sont les suivantes :

- Rapport immersion-compression $> 0,75$,
- I.Q.E à 360 j compris entre 20 et 26 avec $R_t 360 j > 1,1$ MPa.

Si on veut comparer les performances mécaniques, les critères retenus par les spécifications Françaises sont R_t à 360 jours et le module sécant $E_t 360$ à 30% de la charge de rupture.

R_t à 360 jours étant un critère que ne pouvait pas être obtenue. Compte tenu au temps alloué à cette étude. Une estimation des valeurs de la résistance à la traction directe à 360 j a été faite à partir des valeurs des résistances à la traction directe à 28 jours.

Dans cette étude on a utilisé la résistance à la traction indirecte (essai brésilien), la résistance à la traction directe (R_t) est obtenue à partir de la résistance à la traction indirecte (R_{tb}) en utilisant la relation suivante : **$R_t = 0.8 R_{tb}$ (D'après NF EN 14227-1)**

Les valeurs de R_t à 28 j de la grave ciment étudié sont calculées à partir de R_{tb} à 28 j et récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 20 : Valeurs de $R_t(28j)$ calculées à partir des valeurs de $R_{tb}(28j)$.

	0%	2%	4%	8%
$R_{tb}(28j)$	0,016	0,027	0,07	0,122
$R_t(28j)$	0,013	0,022	0,06	0,098

D'après le tableau 21, pour une grave-ciment classique de bonne qualité, la valeur de rapport $\frac{R_t 28}{R_t 360} = 0.60$ (1)

Tableau 21 : Performances mécaniques des graves traitées aux liants hydrauliques.

	<i>Age (jours)</i>	$\frac{R_t}{R_t 360}$	$\frac{E}{E 360}$
Grave-laitier granulé ou prébroyé	90	0.70	0.70
Grave-ciment,	28	0.60	0.65
- liants spéciaux,	60	0.65	0.70
- cendres hydrauliques	60	0.60	0.65
Grave-cendres volantes-chaux	90	0.65	0.75
Grave-pouzzolane-chaux	90	0.50	0.50

A partir de la relation (1), on peut facilement calculer $R_t 360 j$. Les valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Valeurs de $R_t 360j$ estimées à partir des valeurs $R_t 28j$.

	0%	2%	4%	8%
$R_t(360j)$	0,021	0,037	0,1	0,163

5.2) Comparaison :

Au travers de ces indicateurs de qualité, on peut voir les points suivants :

- L'ajout de fines argileuses (illite) satisfait le rapport immersion-compression jusqu' à un dosage de 2 % ;
- La GNT traité au ciment de cette étude présente des valeurs R_t à 360 jours très faibles par rapport aux spécifications ($R_t 360 j \geq 1.10$).

Le mémoire est présenté en deux parties distinctes, dans l'une on a présenté l'état de l'art sur les matériaux étudiés, l'autre partie a un caractère purement expérimentale.

Le premier chapitre a été tout d'abord consacré à l'élaboration d'une synthèse bibliographique sur les graves-ciment et sur les argiles ainsi que leurs modes de formation.

Le deuxième chapitre donne, dans un premier temps, un rappel des modes opératoires des principaux essais physiques, chimiques, mécaniques et de portance. Dans un second temps, il précise la localisation des différents sites de prélèvement via leurs coordonnées. Une description géologique des formations existantes dans la carte géologiques au 1/50 000 de la région où se situe la carrière de Cosidère a été brièvement discutée. .

Le troisième chapitre a été consacré aux résultats des différents essais d'identification réalisés sur la GNT et sur l'argile ainsi que leurs interprétations. Les résultats ont montré que les fines argileuses ont une incidence sur les indicateurs de propreté (Equivalent de sable à 10 % de fines, Essai au bleu de méthylène).

Le quatrième chapitre a permis tout d'abord d'exposer la méthode de travail retenue pour la réalisation des différents essais mécaniques. Ensuite, une exposition des résultats et interprétations de tous les essais mécaniques (Proctor, Rc et Rtb) réalisés sur la grave non traitée et sur le grave ciment a été faite. Ces résultats ont permis de démontrer que

- Les valeurs des densités définissant l'OPM augmentent lorsque le dosage de l'argile croit
- L'ajout des fines argileuses a une action positive, aux différents âges (3h, 7j, 14j et 28j), sur le niveau de résistance atteint (Rc et Rtb).

En effet, l'argile s'infiltré dans les pores de la matrice et augmente la rigidité de la structure en formant un nombre important de connections rigides liant les grains de la GNT et de la GC.

- l'évolution des Rc de la GC par rapport aux Rc de la GNT est significative.

L'effet de l'eau sur la résistance, la stabilité et la durabilité de ces matériaux a été également investigué. Nous avons trouvé que seuls les éprouvettes fabriquées par la grave ciment gardent la forme de l'état initial ce qui vient confirmer les résultats des essais physiques.

La comparaison des valeurs atteintes vis-à-vis des valeurs préconisées ou spécifiées pour une grave-ciment a montré que :

L'ajout de fines argileuses (illite) :

- satisfait l'indicateur de propreté (ES à 10% de fine) quel que soit le dosage pris en compte dans cette étude.
- ne satisfait plus l'indicateur de propreté (VB)
- satisfait le rapport immersion-compression jusqu' à un dosage de 2 % ;

- ne satisfait pas la valeur de la résistance à la traction directe à 360 j.

Perspectives :

Ceci n'est qu'une approche expérimentale de laboratoire, qui devra être confirmée par une expérimentation en vraie grandeur c-à-d. construction d'une section de chaussée en grave ciment avec l'ajout des fines argileuses, et suivi de son comportement pour caler le comportement mécanique à long terme avec les résultats que nous avons obtenus d'une part et d'autre part, vérifier la stabilité des couches ainsi que la possibilité d'atteindre sur le chantier la densité prévue afin d'éviter tous problèmes lors de compactage.

1) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LA GNT :

1.1) Résultats des essais de propriétés :

1.1.1) Equivalent de sable à 10 % de fines :

Tableau 1: Résultats de l'ES à 10% de fines.

	% d'argile			
	0%	2%	4%	8%
Visuel (cm)	$h_1 = 19.5$	$h_1 = 19.2$	$h_1 = 17.3$	$h_1 = 22.5$
	$h_2 = 13$	$h_2 = 9.3$	$h_2 = 8$	$h_2 = 9.5$
Piston (cm)	$h_1 = 20$	$h_1 = 18,5$	$h_1 = 17.3$	$h_1 = 21.5$
	$h'_2 = 12$	$h'_2 = 8$	$h'_2 = 7$	$h'_2 = 8$
ES Visuel (%)	66,70	48	45	42
ES Piston (%)	60	43,24	40,46	37,20

1.1.2) Valeur de bleu de méthylène :

Tableau 2 : Valeurs de bleu de méthylène

% d'argile	0%	2%	4%	8%
VBS	4,5	6,86	8,17	10,41

• Cas de 0 % d'argile :

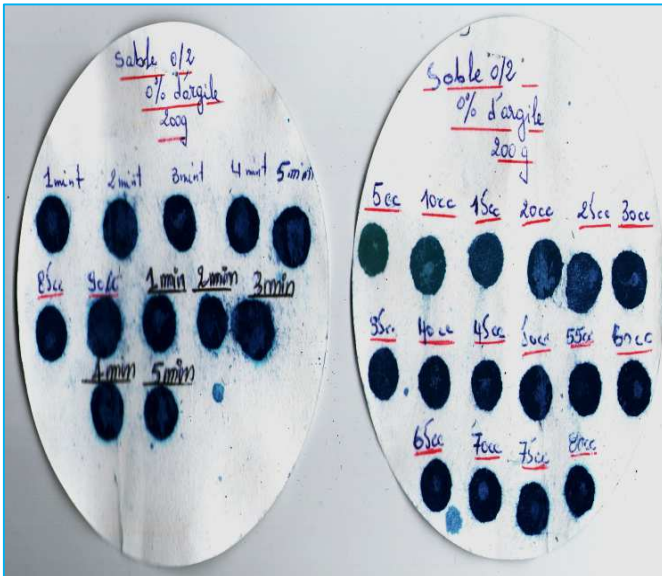


photo 1 – feuille minute de l'essai VB pour un dosage de 0 % d'argile.

• Cas de 2 % d'argile :



photo 2 – feuille minute de l'essai VB pour un dosage de 2 % d'argile.

• Cas de 4 % d'argile :

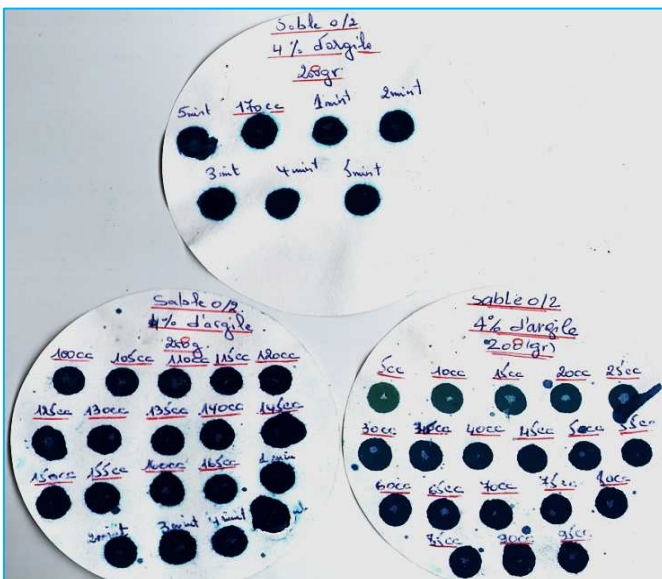


photo 3 – feuille minute de l'essai VB pour un dosage de 4 % d'argile

• Cas de 8 % d'argile :

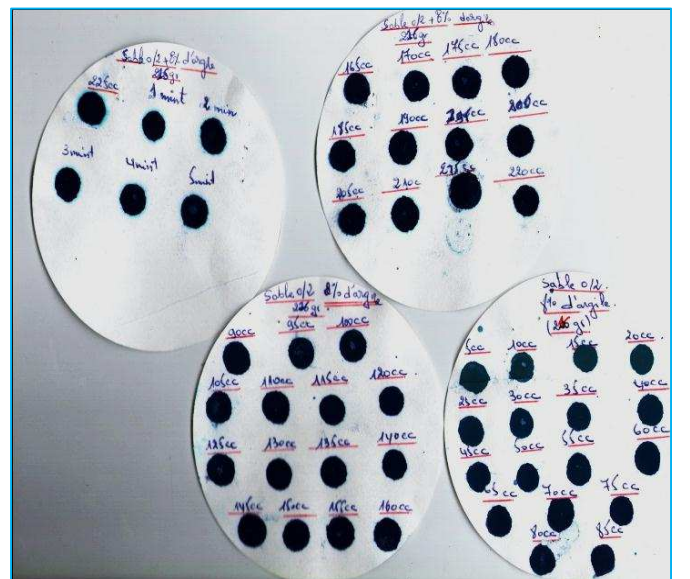


photo 4 – feuille minute de l'essai VB pour un dosage de 8 % d'argile

ANNEXE A

1.2) Résultats des autres essais physiques :

1.2.1) Analyse granulométrique par tamisage pour la GNT :

Tableau 3 : Résultats des deux essais d'analyse granulométrique du GNT.

Analyse granulométrique de la GNT 0/31,5 mm (NF P 94-056)				
La masse total = 4000 gr			Tamisats (%)	
Tamis (mm)	Li	Ls	Essai 01	Essai 02
31,5	85	100	100	99,35
20	62	90	83,93	82,72
14	47	80	63,80	62,36
10	40	70	50,38	49,69
6,3	30	59	34,65	33,53
4	20	51	24,98	23,31
2	13	41	14,33	12,66
0,5	7	18	9,18	9,02
0,2	5	12	7,40	6,39
0,08	3	7	5,15	4,89

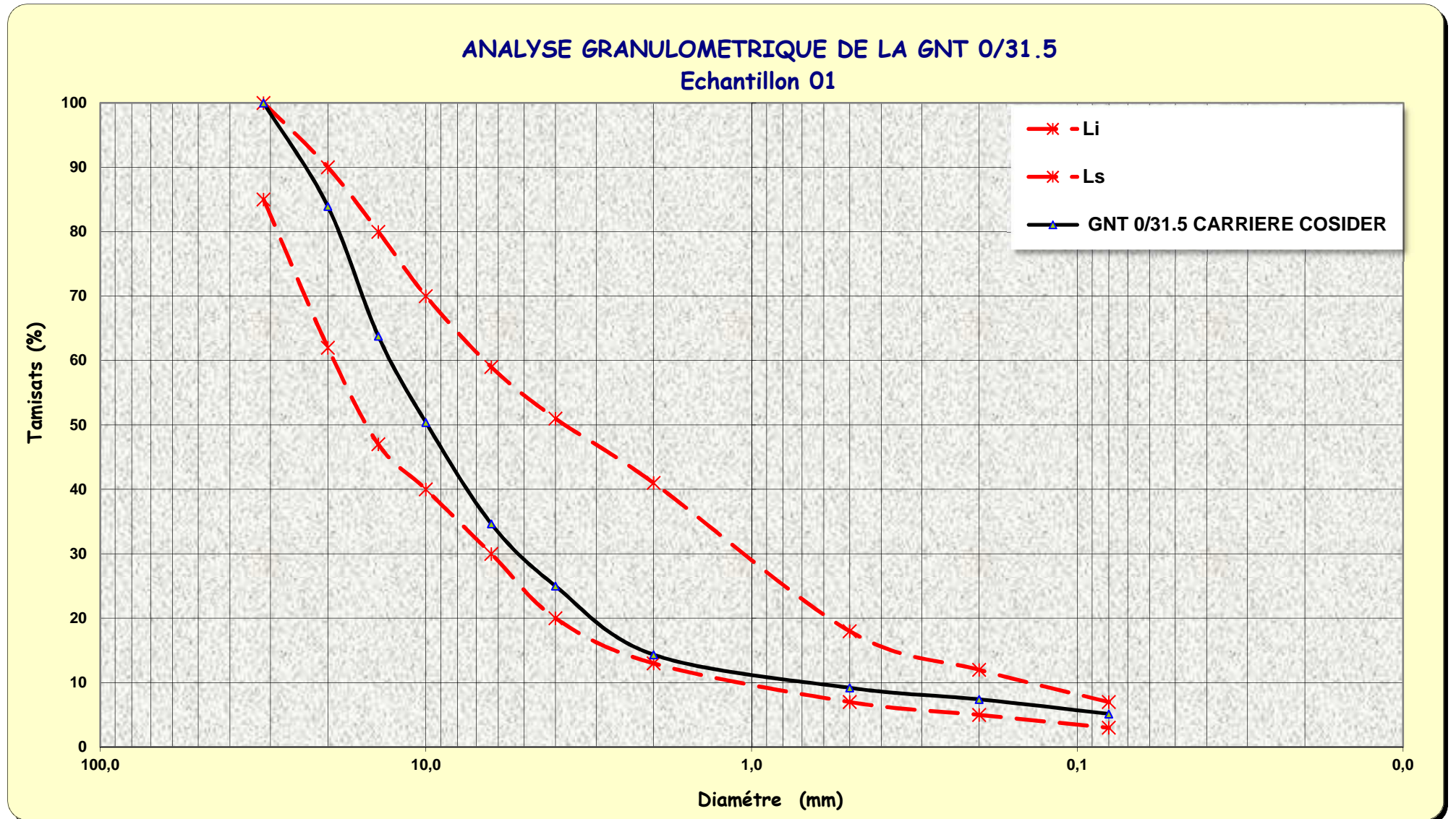


Figure I - Courbe granulométrique 01.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE LA GNT 0/31.5 Echantillon 02

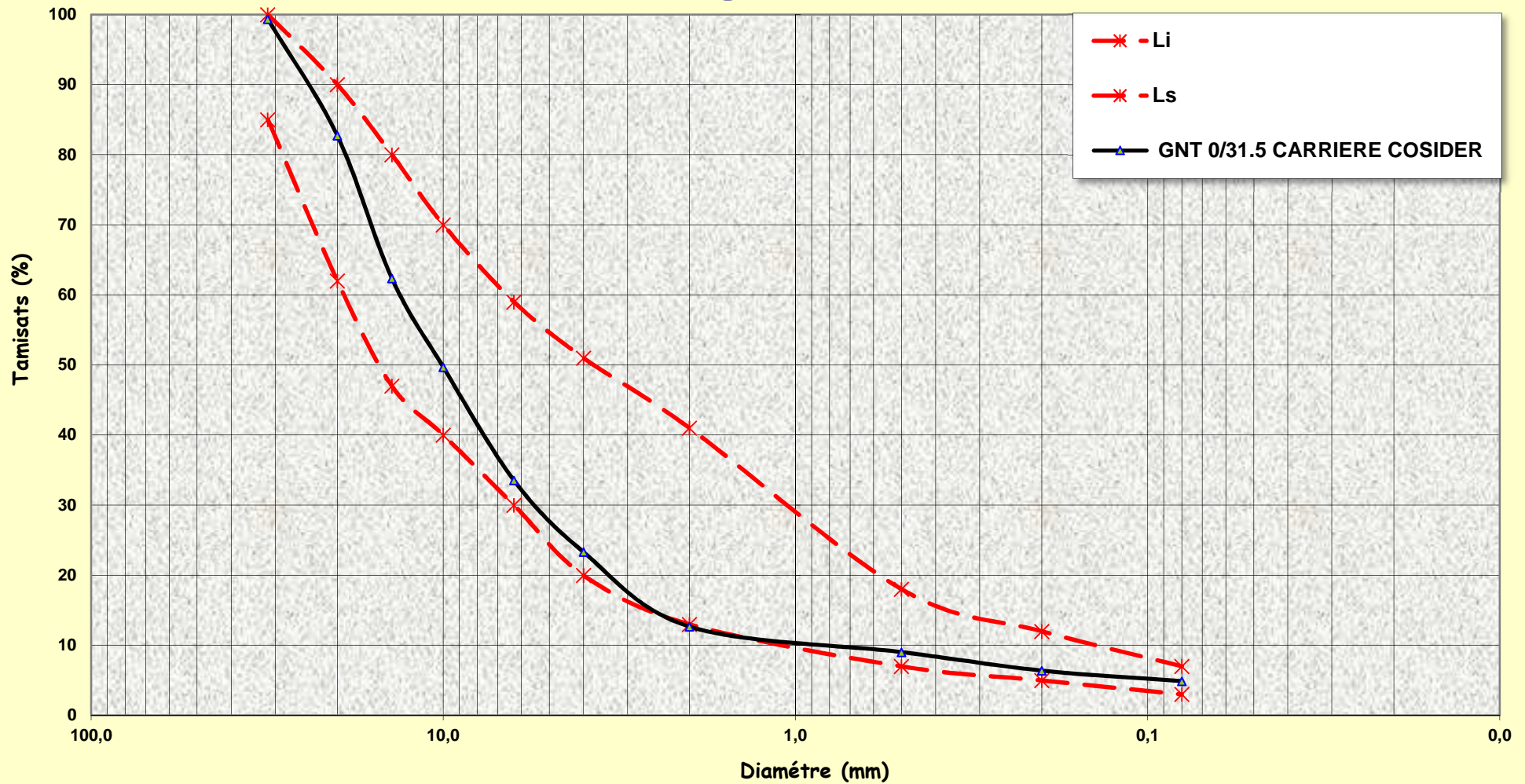


Figure 2 - Courbe granulométrique 02.

ANNEXE A

Tableau 4: Résultats des caractéristiques dimensionnels de la GNT.

Caractéristiques	Echantillon 01	Echantillon 02
Coefficient de courbure (C_c)	1,83	1.98
Coefficient d'uniformité (C_u)	9,74	11,75

2) RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR L'ARGILE :

2.1) Analyse granulométrique par tamisage pour l'argile :

Tableau 5: Résultats d'analyse granulométrique par tamisage de l'argile

Analyse granulométrique d'argile (NF P 94-056)	
Tamis (mm)	Tamisats
31,5	100
25	76
14	60
10	54
6,3	52
1,6	50
0,63	45
0,4	42
0,08	35

ANNEXE A

2.2) Analyse granulométrique par sédimentation pour l'argile :

Tableau 6: Résultats d'analyse granulométrique par sédimentation de l'argile.

Temps	Lecteur au densimètre	3 premières lecture t' = r-1000	T'' (°C)	Diamètres (mm)	Correction de (T'')	R = R mp%	P%
30sec	1022	22	18	0,077	-0,75	85	35
1min	1021,5	21,5	18	0,055	-0,75	83	29
2min	1020,5	20,5	18	0,035	-0,75	79	28
5min	1020	20	18	0,025	-0,75	77	27
10min	1019	19	18	0,017	-0,75	73	26
20min	1017,5	17,5	18	0,012	-0,75	67	23
30min	1017	17	18	0,009	-0,75	65	23
1H	1016	16	18	0,007	-0,75	61	21
4H	1010	10	18	0,0039	-0,75	37	13
24H	1000,5	3	21	0,001	-0,21	19,16	8

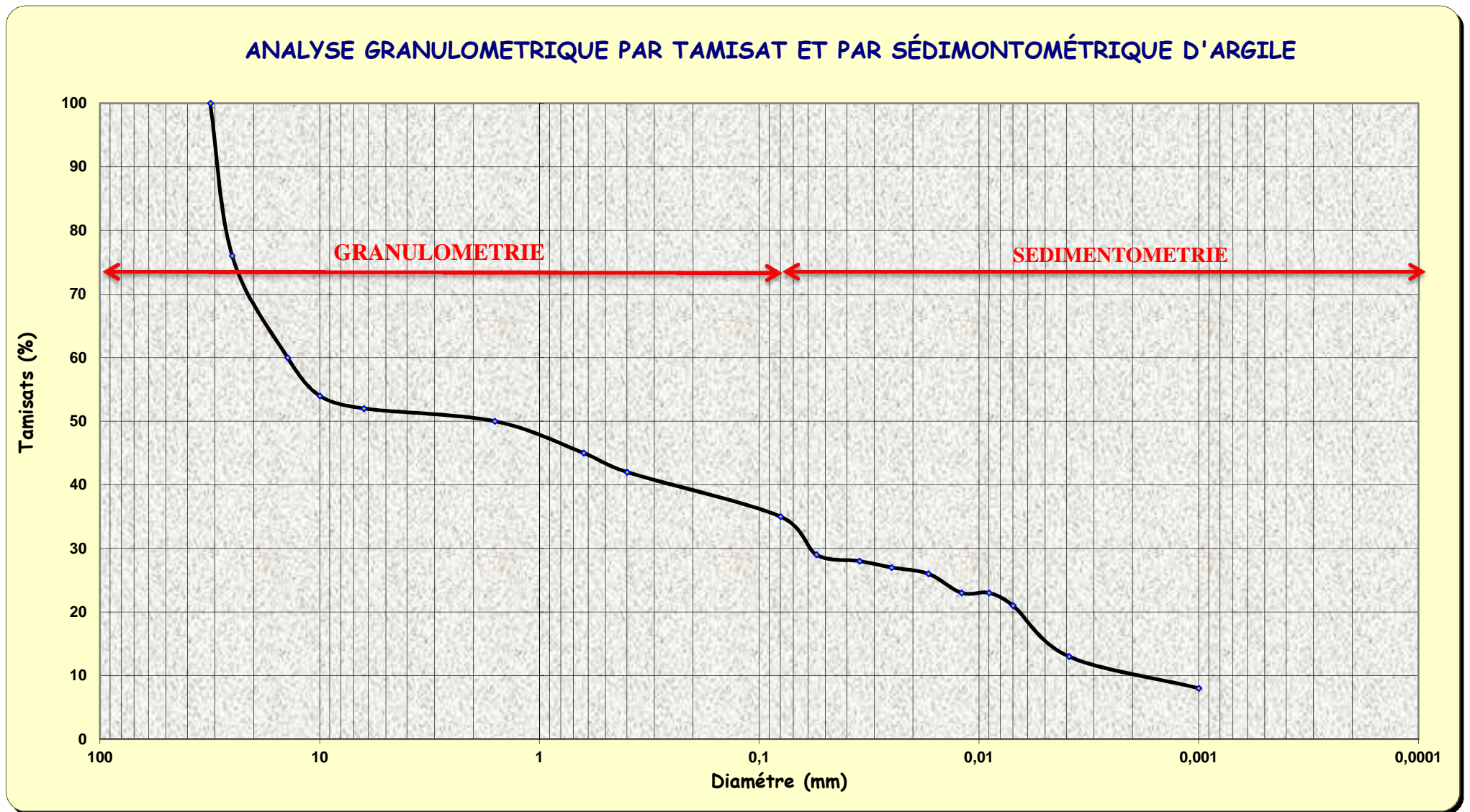


Figure 3 - Courbe granulométrique par tamisage et par sédimentation pour l'argile.

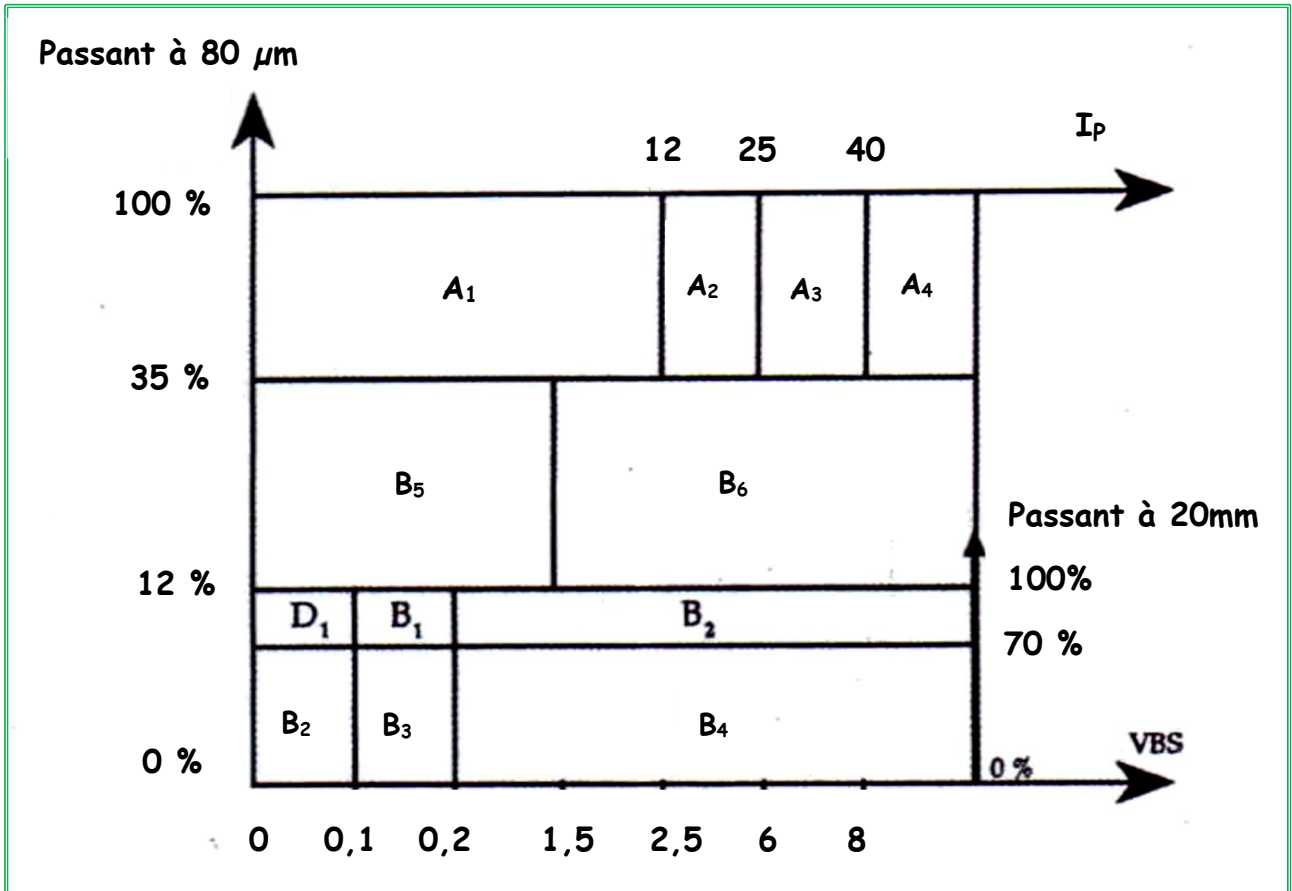


Figure 4 - Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature (D'après GTR-2002)

ANNEXE B

1) Essai Proctor :

Tableau 7: Résultats de l'essai Proctor modifié de la fraction 0/14 mm.

Poids d'eau ajouté à compactage	2%	4%	8%	6%	10%
Poids Totale Humide	8549	15967	16222	16078.5	16108
Poids du Moule	11060				
Poids du sol Humide	4773	4907	5162	5018.5	5122
Poids du sol Sec	4567,07	4632,96	4756,77	4554,034	4523,12
Volume du Moule	2758				
Densité séché (γ_d)	1,65	1,68	1,72	1,66	1,64
Poids totale Humide	1043	1327	828	940	1020
Poids totale Sec	900	1200	700	802	905
Poids de l'eau	30	50	42	63	86,5
Teneur en eau	3,33	4,16	6	7,9	9,6

Tableau 8 : Résultats de l'essai Proctor modifié de la fraction 0/10 mm.

Poids d'eau ajouté à compactage	4%	6%	8%
Poids Totale Humide	15933.5	16407.5	16180
Poids du Moule	11060		
Poids du sol Humide	4873.5	5347.5	5120
Poids du sol Sec	4560,768	4890,528	4628,29
Volume du Moule	2758		
Densité séché (γ_d)	1,653	1,773	1,678
Poids totale Humide	935	1334	1010
Poids totale Sec	801	1201	900
Poids de l'eau	29	91	70
Teneur en eau	3,7	7,5	7,77

ANNEXE B

Tableau 9 : Résultats de l'essai Proctor modifié de la GNT + différents % d'argile.

Poids d'eau ajouté à compactage	6 %			
Le %d'argile	0%	2%	4%	8%
Poids Totale Humide	8549	16089.5	16128	16027
Poids du Moule	11060			
Poids du sol Humide	4773	5029.5	5068	4967
Poids du sol Sec	4567,07	4658,713	4664,562	4579,695
Volume du Moule	2758			
Densité séché	1,65	1,68	1,69	1,7
Poids totale Humide	1043	529	716	436
Poids totale Sec	998	490	659	402
Poids de l'eau	45	39	57	34
Teneur en eau	4,509	7,959	8,649	8,457

Tableau 10 : Résultats de l'essai Proctor modifié de la GC + différents % d'argile.

Poids d'eau ajouté à compactage	6 %			
Le %d'argile	0%	2%	4%	8%
Le %du ciment	3,5			
Poids Totale Humide	16101	16130	16228.5	16145,5
Poids du Moule	11060			
Poids du sol Humide	5041	5070	5168,5	5085,5
Poids du sol Sec	4578,568	4683,732	4755,048	4710,497
Volume du Moule	2758			
Densité séché	1,66	1,69	1,7	1,72
Poids totale Humide	109	105	125	339
Poids totale Sec	99	97	115	314
Poids de l'eau	10	8	10	25
Teneur en eau	10,1	8,247	8,695	7,961

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I) Normes :

NF P 18 – 572	Granulats (Essai d'usure micro-Deval)	Décembre 1990
NF P 18 – 573	Granulats (Essai Los Angeles)	Décembre 1990
NF P 18 – 597	Granulats Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines	Décembre 1990
NF P 94 – 048	Sols (Reconnaissance et essais – détermination de la teneur en carbonate).	Octobre 1996
NF P 94 – 050	Sols : Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des sols - Méthode par étuvage.	Décembre 1990
NF P 94 – 056	Sols : Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.	Mars 1996
NF P 94 – 057	Sols : Reconnaissance et essais – Analyse granulométrique des Sol – Méthode par sédimentation.	Mai 1992
NF P 94 – 068	Sols : Reconnaissance et essais –Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux	Octobre 1998
NF P 94 – 093	Sols Reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai PROCTOR normal - Essai PROCTOR modifié.	Octobre 1999
NF P 98-116	Assises de chaussées (Graves traitées aux liants hydrauliques) Définition — Composition—Classification	Février 2000
NF EN 12390-3	Essai pour béton durci (Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes)	Février 2003
NF EN 12390-6	Essai pour bé ton durci (Partie6: Résistance en traction par fendage d'éprouvettes)	Octobre 2001
NF EN 14227-1	Mélanges traités aux liants hydrauliques, spécifications -partie 1	Février 2005

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

II) Documents :

- [1] **A**badlia.M, « cours théorique sur les ciments », Université de Boumerdès, 2008.
- [2] **B**enaben.j.p, « Identification des argiles polluant les graves-ciment par le bleu de méthylène », Bulletin de liaison de laboratoire des Ponts et chaussées. France, 1989, 11P.
- [3] Bruno Courtois, et al , « le point des connaissances sur les ciments », 1ère édition, Institut nationale de recherche et de sécurité, Paris, 2002.
- [4] **C**laude .T, «Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène Application aux sols, roches et granulats », Bulletin de liaison de laboratoire des Ponts et chaussées. France,1989,159 P.
- [5] CIM Béton, « Terrassements et assises de chaussées, traitement des sols aux liants hydrauliques ». *Collection technique*, Paris, 2009, 151 p.
- [6] **E**slingers and Peaver,« Clay minerals for petroleum geologists and engineers», SEPM Short course, USA, 1988, 22 p.
- [7] **H**oltz.R et al, « Introduction à la géotechnique », presse internationales polytechnique, Canada, 2010, 749P.
- [8] HENIN, et al, « Minéralogie des argiles, 1- Structure et propriétés physico chimiques »,Masson, 1982.
- [9] **G**eorges D, Jean F, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », édition Eyrolles, Paris 1998.
- [10] **L**CPC, « Ciments et chaux dans les assises de chaussées », Document technique, Paris, 1968, 58 p.
- [11] LCPC et SETRA, « Catalogue des structures types des chaussées neuves », Paris, 1998, 22 P.
- [12] LCPC, SETRA, « Réalisation des assises de chaussées en graves traitées aux liants hydrauliques», Ministère des transports, Paris, 1983.
- [13] LCPC et SETRA, « Réalisation des remblais et des couches de forme ». *Guide technique*, 2^{ème} édition, Paris, 2000, fascicule 1 et 2.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[14] LCPC et SETRA, « Traitement des sols à la chaux et/ou liants hydrauliques », *Guide technique* (GTS), Paris, 2000, 240 p.

[15] **M**orel R. « Les sols cultivés ». Lavoisier, Paris, 1996.

[16] **O**ptimisation du broyage des ciments, Séminaire de ZERALDA, juillet 2000.

[17] **P**rimel L, « recherche sur l'évolution des propriétés des matériaux et quelques caractéristiques générales », Paris, 1969.

[18] **R**outes n° 89, « Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », *Documentation technique*, Paris, 2004, 14 p.

[19] **S**ETRA et LCPC, « classification des matériaux utilisable dans la construction des remblais des couches de forme d'infrastructures routière », guide technique, France, septembre 1992.

[20] SETRA et LCPC, « Stockage des granulats – Aires de stockage », guide technique, Paris, mars 1981.

[21] **W**eaver, « Clay, muds, and shale. Developments in sedimentology », Elsevier, 1989, 44 p.

III) Sites web :

[22] [Http://www.infociments.fr/INFOCIM/M1/M1_1_1.html](http://www.infociments.fr/INFOCIM/M1/M1_1_1.html).

[23] www.BETONS VICAT.FR

[24] [Http://fr.wikipedia.org/w/index.php,title=Grave_Granulat.html](http://fr.wikipedia.org/w/index.php,title=Grave_Granulat.html).