

**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
« U.L.P.G.L/GOMA »**



B.P. 368 GOMA
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**ETUDE COMPARATIVE DES PROPRIETES DU BETON
FORMULE A BASE DU SABLE MONT-GOMA ET CELLE
DU BETON FORMULE A BASE DU SABLE SAKE**



Mémoire présenté et défendu en vue
de l'obtention du diplôme de bachelor
en sciences d'ingénierie

Présenté par : **MURHULA BINTU Moïse**

Directeur : Prof. Dr. Ing. AMBOKO

Encadreur : Msc. Ing. Ally ALINABIWE, CT

Année Académique 2022 – 2023

EPIGRAPHE

Le motif le plus important du travail à l'école, à
l'université, dans la vie, est le plaisir de travailler et
d'obtenir, de ce fait, des résultats qui serviront à la
communauté

Albert Einstein

DEDICACES

À

Mes parents MUNGUIKO BINTU Sébastien et
NABINTU Valérie.

MURHULA BINTU Moïse

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail n'est pas le résultat de nos seules propres forces mais plutôt des efforts conjugués de plusieurs personnes à qui nous devons pleines reconnaissances.

Nos profonds remerciements s'adressent tout d'abord à l'Eternel Dieu Tout Puissant qui n'a cessé de faire des merveilles pour nous.

Nos sentiments de profonde gratitude au Professeur Docteur AMBOKO qui a accepté respectueusement de diriger ce travail et au Master Ingénieur Ally ALINABIWE pour son encadrement attentif. Leur influence a été déterminante dans la réalisation de ce travail.

Nos grandes reconnaissances s'en valent aux autorités académiques de l'ULPGL, et plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et des Technologies, Département de Génie Civil pour leurs efforts fournis en nous offrant un environnement propice à l'apprentissage et à la recherche mais aussi pour les ressources précieuses mises à notre disposition, qu'elles trouvent ici leur couronnement.

Que toutes les connaissances qui n'ont pas été citées ne se sentent pas oublier pour leurs apports de tout genre qu'ils ont eu à notre égard, qu'ils trouvent ici l'expression de nos profondes gratitude.

MURHULA BINTU Moïse

SIGLE ET ABBREVIATIONS

AG : analyse granulométrique

C : dosage en ciment

cm : centimètre

cm³ : centimètre cube

E : proportion eau

E/C : rapport eau sur ciment

ES : équivalent de sable

F_{CE} : classe vraie du ciment

f_{c28} : résistance caractéristique du béton à 28 jours

G : proportion gravier

g : gramme

kg : kilogramme

kN : kilo newton

M_f : module de finesse

MPa : méga pascal

N : Newton

S : proportion sable

°C : degré Celsius

ρ : masse volumique

LISTE DES FIGURES

Figure II.1: Echantillonnage par quartage	22
Figure II.2 : Illustration de la hauteur h1 et h2	24
Figure II.3 : Courbe granulométriques de quelques granulats [2]	28
Figure II.4 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée. [2].....	33
Figure III. 1 : Composition granulométrique du sable Mont-Goma	41
Figure III. 2 : Composition granulométrique du sable de SAKE	45
Figure III. 3 : Dosage en divers constituants	57
Figure III. 4 : Histogramme d'affaissement au cône d'Abrahams	57
Figure II. 5 : Résistance en compression des éprouvettes cylindriques de béton de dimensions 16*32 cm.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Différents types de ciments (FESTA & DREUX, 1998). [2]	5
Tableau I.2 : Classification des granulats. [2]	13
Tableau I.3 : Classe du béton suivant l'affaissement au cône d'Abrams. [2]	17
Tableau II. 1 : Interprétation des résultats sur l'ES	24
Tableau II. 2 : Classification des granulats suivant les masses volumiques (Dreux, 1981). [2]	27
Tableau II. 3 : Type des graviers selon le coefficient Los Angeles	30
Tableau II. 4 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax. [22]	32
Tableau II. 5 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax. [22]	34
Tableau II. 6 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment. [22]	35
Tableau II. 7 : Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage. [22]	36
Tableau III. 1 : Masse volumique apparente du sable Mont-Goma	42
Tableau III. 2 : Masse volumique absolue du sable Mont-Goma	43
Tableau III. 3 : Equivalent sable (sable Mont-Goma)	43
Tableau III. 4 : Teneur en eau (sable Mont-Goma)	44
Tableau III. 5 : Masse volumique apparente du sable Saké	46
Tableau III. 6 : Masse volumique absolue du sable Saké	46
Tableau III. 7 : Equivalent sable (sable Saké)	47
Tableau III. 8 : Teneur en eau (sable Saké)	47
Tableau III. 9 : Masse volumique apparente du gravier concassé	48
Tableau III. 10 : Masse volumique absolue du gravier concassé	48
Tableau III. 11 : Coefficient Los Angeles du gravier	49
Tableau III. 12 : Résultat de la masse volumique absolue du ciment	50
Tableau III. 13 : Classe vraie du ciment	50

RESUME

La résistance souhaitée à 28 jours, la consistance compatible à la structure à réaliser ainsi que les conditions de durabilité sont fonction de la qualité des divers constituants et de leurs proportions dans les bétons. Le présent travail présente les résultats de la caractérisation des divers sables disponibles dans la ville de Goma, notamment le sable Mont-Goma et le sable Saké ainsi que les formulations de béton réalisées à partir de ceux-ci. Les bétons d'étude ont été formulés moyennant la méthode de Dreux-Gorisse avec de gravillons concassés de classe 15/25 et le ciment de classe 42,5.

La résistance à 28 jours des bétons confectionnés à partir du sable Mont-Goma et Saké a été de 15,032 MPa et 15,652 MPa. Ces résultats nous ont poussés à conclure que le sable Saké est meilleur à cet effet puisqu'il offre une résistance légèrement supérieure en répondant aussi aux normes habituelles en termes de granulométrie et de propreté.

ABSTRACT

The desired resistance at 28 days, the consistency compatible with the structure to be achieved and the durability conditions depend on the quality of the various constituents and their proportions in concrete. This work presents the results of the characterization of the various sands available in the city of Goma, including Mont-Goma sand and Sake sand, as well as the concrete formulations made from them. The study concretes were formulated using the Dreux-Gorisse method with crushed gravel of class 15/25 and cement of class 42.5.

The 28-day resistance of concrete made from Mont-Goma and Saké sand was 15.032 MPa and 15.652 MPa. These results led us to conclude that Sake sand is better for this purpose since it offers slightly higher resistance also meeting the usual standards in terms of grain size and cleanliness.

SOMMAIRE

EPIGRAPHE	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
SIGLE ET ABBREVIATIONS	iv
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
RESUME.....	vii
ABSTRACT	viii
SOMMAIRE	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre Premier	3
GENERALITES SUR LE BETON.....	3
I.1. UTILITÉ DU BÉTON DANS LE GÉNIE CIVIL	3
I. 2. CONSTITUANTS DU BETON.....	4
I.2.1 LE CIMENT	4
I.2.2. LES GRANULATS	7
1.2.3. LES ADJUVANTS	16
1.2.4. L'EAU.....	16
I.3. PROPRIETES DES BETONS	17
I.3.1. Les propriétés du béton frais	17
I.3.2. Les propriétés du béton durci	18
I.4. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DES BETONS	18
I.4.1. Méthode de Bolomey.....	19
I.4.2. Méthode de Faury	19
I.4.3. Méthode d'Abrams	19

I.4.4. Méthode des Abaques de Dreux Gorisse.....	19
I.5. CONCLUSION PARTIELLE.....	20
Chapitre Deuxième.....	21
MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE.....	21
II.1. LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE	21
II.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX	22
II.2.1. Le ciment.....	22
II.2.2. Les granulats	23
II.3. PHASE DE FORMULATION DU BETON	31
II.3.1. Présentation de la méthode de Dreux-Gorisse	31
II.3.2. Essai sur le béton frais	39
II.3.3. Essai sur le béton durci.....	39
II.4. CONCLUSION PARTIELLE	40
Chapitre Troisième.....	41
PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	41
III.1. RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRANULATS.....	41
III.1.1. SABLE DU MONT-GOMA.....	41
III.1.2. SABLE DE SAKE	45
III.1.3. GRAVIER CONCASSE.....	48
III.2. RESULTATS OBTENUS SUR LES CIMENTS.....	50
III.2.1. Masse volumique absolue	50
III.2.2. La classe vraie.....	50
III. 3. FORMULATION DES BETONS	51
III.3.1. Formulation des bétons par application numérique	51
III.3.2. Dosage en divers éléments.....	57
III.3.3. Ouvrabilité du béton	57

III.3.4. Résistance en compression.....	58
III.4. CONCLUSION PARTIELLE	59
CONCLUSION GENERALE	60
BIBLIOGRAPHIE	61
ANNEXES	i

INTRODUCTION GENERALE

La République Démocratique du Congo, par ses diverses ressources, est considérée comme un pays émergent surtout dans le domaine des constructions des ouvrages tels que les bâtiments, les routes, les ponts, les barrages, etc. Toutes ces constructions, font le plus souvent recours à un matériau qui n'a cessé de marquer l'histoire du monde de la construction. Le matériau n'est rien d'autre que le béton. De nos jours, ce matériau est l'un des plus utilisés au monde. Il est constitué d'un mélange de granulats, de liant, d'eau et éventuellement d'adjuvant.

Le béton doit ses propriétés à ses différents constituants. Les granulats sont en poids les principaux constituants du béton. Les granulats constituent le squelette granulaire de ce matériau composite ; ils lui confèrent donc une bonne partie de sa résistance.

Le ciment, présent dans le béton en une quantité relativement faible, maintient ensemble les autres constituants du béton. Cependant, malgré sa faible proportion, le ciment est le constituant le plus important et le plus coûteux, mais aussi le dosage et la qualité de ce dernier déterminent la résistance du béton. [1]

L'eau, nécessaire à l'hydratation du ciment, facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton

Quant aux adjuvants, ce sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés dans le béton à des doses inférieures ou égales à 5% du poids du ciment améliorent certaines de ses propriétés. [1]

A l'EST de la République Démocratique du Congo en général, et à Goma en particulier, le béton est particulièrement important en raison de la nature volcanique de la région (les éruptions volcanique, tremblement de terre), pouvant causer des dommages importants aux bâtiments et aux infrastructures.

Celui-ci, en raison de ses propriétés, offre une protection contre ces forces naturelles et assure la sécurité des personnes et de leurs biens.

En outre, il s'est avéré que les bétons confectionnés avec l'utilisation des différents sables présents à Goma, notamment le sable Mont-Goma et celui de Saké donneraient des résistances

différentes. A titre illustratif, à Goma, le béton confectionné à partir du sable Mont-Goma est moins apprécié par rapport à celui confectionné à partir du sable de Saké.

De ce qui précède, il y a lieu d'affirmer que la diversité de ces deux sables constitue une contrainte à laquelle la plupart d'ingénieurs de la ville se heurtent en question de choix de ces derniers utilisé dans la confection du béton.

Le présent travail, portant sur une étude comparative des propriétés du béton issu du sable Mont-Goma et celle du béton issu du sable de Saké, a été initié en vue d'apporter une contribution à la résolution de ce problème.

Les objectifs du présent travail sont : premièrement, évaluer la résistance à la compression des échantillons de béton fabriqué à partir du sable Mont-Goma et celui de Saké enfin de déterminer s'il y a une différence significative entre les deux.

Deuxièmement, fournir des recommandations pour l'utilisation de ces sables dans la construction de béton en fonction des résultats de l'étude comparative.

Enfin de parvenir aux résultats escomptés ainsi que les objectifs fixés, il est nécessaire de :

- ❖ Caractériser les granulats devant entrer dans la constitution des éprouvettes ;
- ❖ Formuler un béton par la méthode DREUX GORISSE en utilisant ces deux sables ;
- ❖ Réaliser les éprouvettes en béton selon les différents sables ;
- ❖ Tester ces éprouvettes à la compression

Outre l'introduction et la conclusion générale, le travail s'articule autour de trois chapitres.

Le premier présente les généralités sur le béton, le second chapitre présente les matériels et les méthodes de recherche. Enfin le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leur interprétation.

Chapitre Premier

GENERALITES SUR LE BETON

Avant d'explorer les aspects spécifiques du béton dans ce chapitre, il est essentiel de comprendre ses fondements et ses caractéristiques générales. Cette section fournira une vue d'ensemble approfondie du béton, en examinant ses propriétés, sa composition et son importance dans divers domaines de la construction et de l'ingénierie.

Le béton est un mélange d'un liant et de granulats ; son usage remonte à haute antiquité (3000 à 700 avant J-C), devenu un matériau de construction populaire au XXe siècle, en particulier après la Seconde Guerre mondiale, lorsque la construction de logements abordables est devenue une priorité.

Aujourd'hui, le béton est l'un des matériaux les plus importants dans tous les domaines de la construction. Ceci s'explique par le fait qu'il offre : la possibilité de varier ses propriétés dans de longues limites en utilisant les composants aux qualités correspondantes, et en appliquant des méthodes spéciales de traitement mécanique et physico-chimique ; la facilité de traitement mécanique des mélanges de béton plastique, qui permet de réaliser sans dépense sensible de main d'œuvre, des éléments de construction de longue durée dont les formes et les dimensions sont les plus diverses ; la possibilité de mécanisation totale des travaux de bétonnage, qualité économique du béton parce que 80 à 90% de son volume est composé d'agrégats d'origine locale. Une bonne connaissance des propriétés des matériaux de construction permet de bien les utiliser et de construire des ouvrages solides, durables, et économiques.

I.1. UTILITÉ DU BÉTON DANS LE GÉNIE CIVIL

Le béton à travers ses performances et sa souplesse d'emploi est présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics.

Le béton fait partie du cadre de vie. Il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects. Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux...) aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (business, ateliers,

commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socioculturelles, sportives ou de loisir...).

Le béton structure et participe de manière visible à l'architecture. Le béton n'est plus seulement une « pierre artificielle » mais un matériau adopté aux formes tendues, propres aux ouvrages d'art, au même titre qu'aux réalisations actuelles des architectes.

Le béton permet de franchir des grandes portées à cause de la précontrainte qui a pu améliorer ses performances. Les dernières évolutions techniques concernent la précontrainte extérieure et l'allègement des âmes des tabliers, en particulier par l'utilisation des structures triangulées [2].

Le béton est dans les routes. Supprimant pratiquement toutes les servitudes inhérentes à l'entretien, le béton routier s'est fait sa place dans tous les types de voiries, de l'autoroute, au chemin de vignoble, en passant par les pistes cyclables. Dans les villes, les dalles et les pavés en béton apportent leur esthétique particulière, en harmonie avec le mobilier urbain.

I. 2. CONSTITUANTS DU BETON

Le béton est un mélange de ciment, eau, air, granulats et éventuellement d'adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de $0,5\mu m$ de grains les plus fins du ciment à 25mm de gravillons.

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats avec pour objectif de remplir les vides existants entre les grains et assurer la jonction de ces derniers. La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer la composition granulaire, le dosage des divers constituants.

I.2.1 LE CIMENT

Le ciment est une poudre minérale très fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. Mélangée à l'eau, forme une pâte qui se fige et durcit progressivement avec le temps.

Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium, la proportion de chaux et de silice réactive devant être au moins de 50% de la masse du ciment [3].

Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs, apparence) et de la nature des autres composants (granulométrie des granulats).

I.2.1.1. Dosage en ciment

Le dosage en ciment dépend de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les granulats utilisés etc. le dosage en ciment est déterminé par calcul entre autre la formulation des bétons [2].

I.2.1.2. Dosage en ciment et résistances mécaniques

Le dosage en ciment est une influence directe sur les résistances mécaniques du béton [2]. Toutes autres conditions étant égales par ailleurs, on peut dire que dans une certaine plage, la résistance est sensiblement proportionnelle au dosage en ciment C.

I.2.1.3. Types de ciments

Il existe une grande variété de ciments, définis par leur classe de résistance, teneur en clinker et d'autre constituants.

Le tableau 1 reprend les différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs des constituants qu'il comporte.

Tableau I.1 : Différents types de ciments (FESTA & DREUX, 1998). [2]

Désignation	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur des constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	Ciment portland composé	80 à 94 % 65 à 79 %	0 à 5 % 0 à 5 %
CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	0 à 5 % 0 à 5 % 0 à 5 %

CPZ-CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 95 %	0 à 5 %
CPZ-CEM IV/B		45 à 64 %	0 à 5 %
CLC-CEM	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	0 à 5 %
V/ACLIC-CEM		20 à 39 %	0 à 5 %
V/B			

De même qu'il existe plusieurs sortes de ciments, ceux-ci présentent également des prises différentes.

1.2.1.4. La prise

Le phénomène de prise qui est déclenché par l'hydratation du ciment s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus ou moins important. Le déclenchement de ce phénomène est accéléré par plusieurs facteurs parmi lesquels le type de ciment, la finesse de mouture du ciment, la température ambiante, la présence des matières organiques dans l'eau. L'excès de l'eau de gâchage quant à lui agit comme retardateur de prise [3].

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange a changé de viscosité et se raidit, on dit qu'il fait prise.

D'une façon générale, les temps de prise sont de l'ordre de grandeur allant de 2h30 à 3h30 pour la grande majorité des ciments.

1.2.1.5. Le durcissement

C'est la période qui suit la prise et pendant laquelle se poursuit l'hydratation du ciment. Sa durée se prolonge pendant des mois au cours desquels les résistances mécaniques continuent à augmenter.

1.2.1.5. La finesse de mouture

Elle est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en $(\frac{cm^2}{g})$. Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces

résistances mécaniques à un âge jeune sont grandes, par contre plus le ciment est sensible et plus le retrait est important.

I.2.2. LES GRANULATS

Les granulats sont le constituant de base de la majorité des travaux de Génie Civil. Il est donc important de maîtriser l'ensemble de leurs propriétés (et influences); tant du point de vue de leurs élaborations, que de leurs utilisations (mise en œuvre); et ce, afin de maîtriser le coût tout en respectant les critères de qualité [2].

Les granulats proviennent essentiellement de la désagrégation des roches par érosion ou par concassage. Ils se présentent sous forme de grains de dimensions variables. La dimension de 0,08 mm à 25 mm dans les bétons, les dimensions atteignant et dépassent 10 cm pour les ouvrages tels que les massifs de fondation, les barrages, etc.

Les granulats se différencient par leur nature, leur composition, leur origine, leur forme, leur répartition granulométrique, leur masse volumique (granulats légers, granulats lourds). Outre les granulats naturels, il existe aussi des granulats artificiels (laitiers, argiles expansées etc.).

Les granulats sont des matériaux de qualité et devant être non seulement propres mais aussi avec une granulométrie bien définie. Les granulats utilisés dans le béton doivent permettre le remplissage des moules ou des coffrages ainsi que l'enrobage des armatures.

Les granulats sont regroupés selon les origines. Ainsi on distingue les granulats naturels et les granulats artificiels.

On peut distinguer les granulats naturels et artificiels.

I.2.2.1. Les granulats naturels

Les granulats naturels regorgent les granulats roulés ainsi que les granulats concassés.

a. Les granulats roulés

Les granulats roulés sont issus de dragages en rivière ou d'extraction dans les terrasses alluviales. Ils nécessitent un lavage pour les débarrasser des argiles et d'autres impuretés. Leurs formes sont arrondies et leur nature est calcaire ou silico-calcaire.

Dans certains cas, on procède au concassage ou au broyage des classes excédentaires soit pour fabriquer des catégories déficitaires dans les matériaux, soit pour obtenir des matériaux argileux (pour les revêtements routiers par exemple).

b. Les granulats concassés

Les granulats concassés proviennent des roches de carrière dures et compactes (granites, gneiss, basaltes, porphyres, diorites, pouzzolane, calcaires durs, grès etc.). Les roches décomposables ou qui génèrent des granulats plats sont à éviter dans l'élaboration du béton. Les granulats concassés nécessitent un dépoussiérage pour éliminer les fines particules inférieures à 0,08 mm nuisibles à la résistance des bétons.

I.2.2.2. Les granulats artificiels

Les granulats artificiels proviennent soit des sous-produits industriels, soit des fabrications spéciales en usine, soit des minéraux dont l'emploi est réservé à usage spécial.

a. Granulats de laitier

Le laitier de haut fourneau qui s'est refroidi lentement est proche d'une roche artificielle cristallisée. Il est ensuite traité comme les granulats concassés pour au final générer des granulats de laitier.

b. Granulats légers

Les granulats légers sont généralement les argiles ainsi que les polystyrènes expansés, la vermiculite fabriquée avec certains micas et la perlite issue des laves volcaniques. Ils sont appelés granulats légers à cause de leur masse volumique inférieure à celle des granulats naturels.

I.2.2.3. Le classement des granulats

Dans beaucoup de cas, les granulats roulés ne présentent pas la répartition souhaitable des grains de différentes dimensions pour aboutir à la confection de bétons compacts. Il en est de même pour les granulats concassés, avec une composition granulaire souvent assez éloignée de la composition idéale. En outre, la ségrégation (ségrégation par différence masse) intervient lorsque la plage granulaire est très étendue qui peut engendrer une hétérogénéité préjudiciable

à une bonne composition des bétons. Il est donc nécessaire de séparer les produits bruts en classes.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

- Les fines : 0/D avec $D \leq 0,08\text{mm}$
- Les sables : 0/D avec $D \leq 6,3\text{mm}$
- Les gravillons : d/D avec $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31,5\text{mm}$
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$
- Les graves 0/D avec $6,3\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$

La détermination des valeurs de d et D des classes granulaires d/D se fait en considérant que les granulats correspondant à ces dimensions doivent être présents en proportions suffisantes.

Les granulats à employer dans le béton doivent assurer une résistance mécanique qui peut s'exprimer par des résistances mécaniques à la fragmentation, à l'usure et au polissage. La résistance mécanique des granulats dépend des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Le classement des granulats se fait par criblage. Le sable pauvre en éléments fins de granularité constante (à l'exemple des sables de certains cours d'eau) subit une correction par adjonction d'un sable fin, soit naturels à grains ronds, soit de broyage en proportion convenable dans le but d'obtenir un sable composite de granularité admissible [4].

L'obtention du sable de granularité admissible à partir d'un sable très hétérogène, tantôt pauvre en éléments fins, tantôt excédentaire, sa correction se résume à une coupure interne à une maille judicieusement choisie, comprise généralement entre 0,4 et 0,8mm.

La correction appliquée génère deux sables, un fin et un gros qui, correctement dosés lors de la fabrication du béton, permettent l'obtention d'un sable composite acceptable [4].

I.2.2.4. La forme

Une bonne forme des granulats est essentielle pour éviter des chutes de résistances des bétons par suite du risque d'apparition des plans de glissements potentiels. La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales :

l'épaisseur (E), la grosseur (G) et la longueur (L). Pour différents usages, il est conseillé d'utiliser des granulats les plus isotropes possible. Une forme assez ramassée des granulats est très recommandée pour une utilisation dans le béton [5].

La forme des granulats influence la facilité de mise en œuvre et le compactage du béton et La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment [2].

1.2.2.5. Exigences de granulats

Les granulats doivent être des matériaux de qualité et qui satisfont à deux exigences notamment :

- **La propreté** : importante pour le sable. Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (argile, matières organiques...etc.) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation.
- **La granulométrie** : la nécessité de déterminer la taille maximale des grains. Se présente du fait que les distances entre les plus gros grains laissent des vides plus importants que dans la masse du béton. Les granulats doivent permettre d'une part, de remplir correctement et en totalité le moule ou coffrage et d'autre part d'assurer un enrobage correct des armatures.

1.2.2.6. Granulats utilisés

a) Le gravier

Le gravier est un matériau granulaire composé de fragments de roches naturelles ou artificielles et qui se présentent sous forme de grains de dimensions variables de 5 mm à 25 mm pour les bétons.

b) Le sable

Le sable est un mélange de grain de 0.080 mm à 5 mm non solidaires les uns les autres obtenu soit par destruction naturelle des roches massives (sable naturelles), soit par les broyages ou granulation des laitiers sidérurgiques (sables artificiels) ou par des spéciaux tels que les grains d'argile cuite gonflés [6].

Pour les grains des valeurs supérieures à celles des sables, on parle des graviers ou des gravillons et cailloux. Signalons que l'étude du sable est basée sur la nature des éléments qui le composent, la taille des éléments mais aussi leur forme.

b.1) Origine des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des rochers, suivie par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques ; les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Ils comportent, à des degrés divers une décomposition sur place, des différentes roches, suivie d'un transport fluvial et parfois éolien.

Différents types de sables

- **Sable d'origine naturelle [7]**

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Egalement appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire ». Le sable se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

Un autre type de sable naturel est le sable de carrière, extrait des sablonnières et à la forme angulaire. Le sable de carrière est soit retiré du sol en masse, soit fabriqué à partir de roches extraites en carrière.

Quant au sable de mer, qui provient des roches sous-marines, il est particulièrement chargé en sel. L'utilisation de ce type de sable nécessite un rinçage minutieux et peut-être à l'origine d'éventuelles efflorescences.

Enfin, le sable de feuilles est un sable fin, comportant de nombreux vides d'air qui imposent lors de son utilisation une association avec d'autres sables. Ce sable est récupéré sur les reliefs montagneux.

- **Sable d'origine artificielle [7]**

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé.

b.2. Qualité requise pour un sable naturel ou artificiel [7]

Un sable est jugé de bonne qualité s'il remplit certaines conditions. Tout d'abord, il ne doit pas renfermer plus de 3% d'impuretés (limons, produits industriels nocifs, poussières etc.).

Ensuite, il doit être composé de grains de taille et de dimensions différentes, de manière à remplir les vides laissés entre les divers types de granulats.

b.3. Caractéristiques du sable

La connaissance des diverses propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale dans toute opération de construction ou de réparation, dont le but tout d'abord l'emploi judicieux de ces matériaux, ensuite pour faire un choix répondant à leur destination, et en fin pour que ces matériaux soient malaxés d'une façon correcte afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes [8].

Le sable est un matériau granulaire, utilisé dans la confection du béton pour permettre d'une part de remplir correctement et en totalité le moule ou coffrage ; et d'autre part d'assurer un enrobage correct des armatures. Il se distingue des autres granulats par ses différentes caractéristiques (chimiques, géométriques, physico-chimique, physique et mécanique, éthique...).

b.3.1. Caractéristiques chimiques

i. Réactivités aux alcalis

Dans les conditions défavorables (granulats contenant une fraction significative de silice soluble réactive dans un environnement riche en alcalin) et en présence d'humidité, les phénomènes d'alcali réaction peuvent provoquer un gonflement du béton. Les granulats sont désignés comme étant non réactifs, potentiellement réactifs ou potentiellement réactifs à effet de **pessimisme**.

ii. Teneur en ion chlorures

Les chlorures modifient la cinématique d'hydratation du ciment et provoquent la corrosion des armatures. La teneur en chlorure issue de l'ensemble des constituants de béton est donc limitée.

iii. Teneur en soufre et en sulfates

Les granulats peuvent contenir des faibles quantités de sulfures sous réserve que leur teneur en soufre totale S n'excède pas 0,4% en masse.

La teneur en sulfate (SO_3) doit être inférieure à 0,2%. On la détermine si S est supérieur à 0,08%.

Les sulfures présents dans les granulats peuvent, en s'oxydant, se transformer en sulfates qui risquent de générer des phénomènes de gonflement. Il faut donc limiter la teneur en soufre pour se prémunir de ce phénomène. Les sulfates peuvent perturber la prise et les actions des adjuvants ; d'où la nécessité de limiter leur teneur dans le béton.

b.3.2. Caractéristiques géométriques

Voici quelques-unes des caractéristiques géométriques couramment associés au sable :

i. Classes granulaires

Les granulats sont désignés selon leur classe granulaire d/D (avec d : dimension inférieure et D : dimension supérieure). L'intervalle d/D est appelé classe granulaire. Les classes granulaires sont spécifiées en utilisant des séries de dimensions de tamis (en mm).

Voici une classification couramment utilisée :

Tableau I.2 : Classification des granulats. [2]

Fines 0/D	Où $D \leq 0.080\text{mm}$
Sables 0/D	Où $D \leq 6.3\text{mm}$
Gravillons d/D	Où $d \geq 2\text{mm}$ et $D \leq 31.5\text{mm}$
Cailloux d/D	Où $d \geq 20\text{mm}$ et $D \leq 80\text{mm}$
Graves 0/D	Où $6.3\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$
Ballasts d/D (concassés)	Où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$

ii. Granularité

La granularité fait référence à la répartition des tailles des particules dans un matériau granulaire, comme sable.

Elle représente la distribution dimensionnelle des grains contenus dans un granulat [9]. Elle est déterminée par tamisage (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures 12 décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis.

La proportion de particules retenues par un tamis s'appelle le refus, son complément le passant.

Elle est représentée par une courbe granulométrique représentant les dimensions de tamis en abscisses et en ordonnées les pourcentages de passants cumulés à travers les tamis successifs (en poids de grains).

iii. Forme des gravillons, Coefficient d'aplatissement A

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A) qui est le pourcentage d'élément $G/E > 1,58$ (G : est la plus grande dimension des granulats, E : est l'épaisseur).

Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Plus A est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats.

Il convient de mentionner que l'aplatissement des particules de gravillons peut influencer leurs propriétés et leurs utilisations. Une mauvaise forme a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation.

iv. Module de finesse

Le module de finesse Mf est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Celui-ci est une mesure utilisée pour évaluer la distribution granulométrique des particules de sable dans un échantillon donné.

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse Mf compris entre 2,2 et 2,8 [9] ; celui-ci est d'autant plus petit que le sable est riche en éléments fins. Ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.

Le module de finesse compris entre :

- **1,8 et 2,2** le sable est à majorité de grains fins, le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mis en œuvre au détriment probable de la résistance.
- **2,2 et 2,8** on est en présence d'un sable préférentiel, il est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- **2,8 et 3,2** le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité, maniabilité et avec des risques de ségrégation.
- **Supérieur à 3,2** le sable est à rejeter

b.3.3. Caractéristiques physique et mécaniques

Les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats sont déterminées par des essais visant à reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats.

Elles sont donc spécifiées en fonction de leur emploi.

a. Résistance à la fragmentation des gravillons

La résistance à la fragmentation est déterminée par le coefficient de Los Angeles.

Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

L'essai consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient Los Angeles représente la proportion d'éléments finis produits au cours de l'essai. Plus le coefficient est faible, plus la résistance des gravillons est élevée.

ii. Porosité

Elle représente le rapport du volume des vides contenus dans les grains au volume des grains, exprimé en pourcentage (%). La porosité des granulats courant est en général très faible. Elle est importante dans le cas des granulats légers.

iii. Masse volumique apparente et absolue

La masse volumique absolue du sable est la masse par unité de volume de celui-ci, sans tenir compte des vides le constituant.

La masse volumique apparente du sable est la masse par unité de volume de celui-ci, en tenant compte des vides le constituant.

iv. L'absorption d'eau

L'absorption d'eau (AB) représente la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant.

v. Propreté des granulats

Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Permettant une mise en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux. Car ceux-ci sont susceptibles d'être nuisibles à la qualité du mélange ou de la pâte que l'on veut obtenir à partir du granulat.

1.2.3. LES ADJUVANTS

Sont des produits chimiques ajoutés au mortier en faible quantité, afin de modifier ses propriétés. Ces additifs ont différentes fonctions : diminuer la teneur en eau afin d'augmenter son ouvrabilité, accélérer la prise afin de diminuer le temps de prise du mortier notamment en cas de gel, faire office de retardateurs de prise en cas de températures élevées et/ou d'entraîneurs d'air afin d'augmenter la résistance de l'ouvrage face au gel, d'hydrofuges qui améliorent l'imperméabilité du mortier, de colorants pour réaliser des travaux décoratifs.

1.2.4. L'EAU

Elle est présente dans toutes les propriétés du béton. L'eau a deux fonctions à savoir physique autrement dit permet l'écoulement et le moulage du béton et chimique car constituant un liant pour le ciment et assure l'hydratation du ciment et de le rendre plus malléable.

L'eau doit être potable et ne doit contenir aucunes impuretés. En outre, même si c'est à éviter, il est possible d'utiliser l'eau de mer, mais, dans le cas d'un béton non armé pour éviter les agressions des armatures par le sel. Le dosage de l'eau est à limiter pour éviter d'affecter la résistance du béton ou sa durabilité.

Elle dépend de la quantité de ciment, des granulats ou de la consistance que l'on veut avoir.

Elle est en général comprise entre 140 et 210 $\frac{l}{m^3}$ [2]. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples

connus. Le rapport E/C est un critère important des études de béton, c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité : résistance mécanique à la compression, durabilité.

I.3. PROPRIETES DES BETONS

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler, d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

I.3.1. Les propriétés du béton frais

L'ouvrabilité, qui est une propriété importante du béton à l'état frais. C'est l'indice qui indique l'aptitude à la mise en place du béton dans un moule. L'ouvrabilité se mesure à l'aide du cône d'Abrams. Après démoulage et stabilisation, on mesure l'affaissement et interprété les résultats, et l'utilise selon l'indication du tableau 3 :

Tableau I.3 : Classe du béton suivant l'affaissement au cône d'Abrams. [2]

Affaissement (cm)	Plasticité	Domaine d'utilisation	Mise en œuvre	Tolérance
0 à 4	Ferme (F)	Béton de propreté, fondation non armée, voirie	Puissante	$\pm 1cm$
5 à 9	Plastique (P)	Semelle coffrée, mur de soutènement, planché, dallage, poutre, poteau, voile	Normale	$\pm 2cm$
10 à 15	Très plastique (TP)	fondation coulée en fouille, pieu, voile de faible épaisseur, paroi moulée	faible	$\pm 3cm$
≥ 15	Fluide (F)	Pieu, paroi moulée	léger piquage	$\pm 3cm$

I.3.1.1. Influence de la forme des grains sur la fluidité

Lorsque la surface des grains est arrondie et lisse, la surface totale et le frottement entre eux sont plus petits que si la forme est angulaire et la surface rugueuse. C'est pour cela que le béton frais au gravier et au sable roulé est plus fluide que celui formé de pierres concassées de sable de forme angulaire.

I.3.2. Les propriétés du béton durci

Le béton durci est le résultat de la prise et du durcissement du béton frais. Lorsque le béton est mélangé, il contient de l'eau, du ciment, des granulats (comme du sable et du gravier) et éventuellement des adjuvants. Au fil du temps, le ciment réagit chimiquement avec l'eau, formant des cristaux qui lient les granulats ensemble. C'est ce processus de réaction chimique appelé hydratation qui transforme le béton frais en béton durci.

Le béton durci est solide, durable et capable de supporter des charges importantes.

Ainsi voici quelques propriétés d'un béton durci :

I.3.2.1. La résistance à la compression

La résistance mécanique est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats. Le béton est très résistant à la compression mais très peu en traction. La résistance à la compression du béton dépend de la résistance du ciment, du rapport E/C, de la qualité des agrégats (granulats), du degré de compacité du mélange et des conditions de durcissement.

Le béton durci a une résistance élevée à la compression, ce qui signifie qu'il peut supporter des charges importantes sans se déformer ou se briser.

I.4. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DES BETONS

Lorsqu'il s'agit de formuler du béton, différentes méthodes sont utilisées pour déterminer les proportions appropriées des composants afin d'obtenir les propriétés souhaitées. Ces méthodes peuvent inclure l'utilisation de prescriptions standardisées, des essais de laboratoire approfondis, l'expérience pratique accumulée et des ajustements itératifs basés sur des essais et des évaluations.

I.4.1. Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue [3].

I.4.2. Méthode de Faury

En 1942, J. Faury proposa, comme suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu. Il s'inspirait pour cela d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors, théoriquement, une droite ; cependant, Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$) des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories [3].

I.4.3. Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum [3].

I.4.4. Méthode des Abaques de Dreux Gorisse

Les abaques de Dreux permettent une approche pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués. En général, les données telles que la résistance à la compression du béton comprise entre 20 et 40 MPa à 28 jours ainsi que la maniabilité sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux. Selon les hypothèses de la théorie de Dreux le ciment doit être de classe 42.5 [1].

Cette méthode est une synthèse de ce qui nous est apparu comme le plus valable et le plus intéressant dans les méthodes existantes connues de nous. De plus, elle tient compte des

résultats d'une grande enquête sur les dosages les plus usuels pour divers bétons jugés aujourd'hui satisfaisants. Elle n'a donc pas de bases scientifiques mais bénéficie sans restriction partisane de l'expérience déjà acquise par d'autres dans ce domaine et, de plus, bien entendu, de nos recherches au CEBTP [10].

I.5. CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements du béton, y compris sa composition, ses propriétés essentielles et son rôle crucial dans le domaine de la construction. Nous avons souligné l'importance de comprendre ces éléments fondamentaux tout en se focalisant sur les granulats d'une manière générale et le sable d'une manière particulière pour une utilisation efficace du béton dans divers projets d'ingénieries.

Chapitre Deuxième

MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE

Le présent chapitre présente les matériels et méthodologies employés pour mener à bien l'étude présentée. Ainsi, cette section vise à fournir une compréhension approfondie des instruments, des matériaux et des techniques déployés tout au long de la recherche.

II.1. LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE

On appelle béton, le mélange obtenu en gâchant dans un malaxeur des proportions convenables de ciment, d'eau, de granulats et éventuellement des adjuvants. [11]

Le ciment, utilisé comme liant hydraulique (liant les autres matériaux pour former une structure solide et durable), obtenu par fusion de calcaire et d'argile, le ciment devient une poudre fine qui, une fois mélangée à l'eau, déclenche une réaction chimique indispensable à la solidification du béton.

L'eau, élément crucial dans la construction, agit comme un agent de réaction chimique essentiel lorsqu'elle est mélangée au ciment pour former du béton. Elle provient de différentes sources naturelles.

Les granulats, constitués de différentes tailles de particules solides comme le sable, le gravier sont les éléments essentiels qui confèrent au béton sa résistance et sa durabilité. Ces matériaux sont extraits de carrières ou de dépôts naturels.

II.1.1. ECHANTILLONNAGE

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites des matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer les paramètres caractéristiques de l'ensemble de matériau sur lequel on effectue le prélèvement. L'échantillon prélevé doit être représentatif de l'ensemble.

Ainsi pour une bonne répartition de matériaux de notre échantillon, nous avons opté la méthode de quartage pour la détermination des différents échantillons. Cette méthode consiste à placer l'échantillon dans un bac métallique à bord peu élevé (de préférence), et l'étaler. A l'aide d'une truelle, partager d'abord en deux moitiés (1), ensuite en 4 quarts (2), sensiblement égaux.

Eliminer les fractions A et D, et réunir les fractions opposées B et C : ainsi on a la moitié de l'échantillon primitif.

La figure II.1 présente l'échantillonnage par quartage :

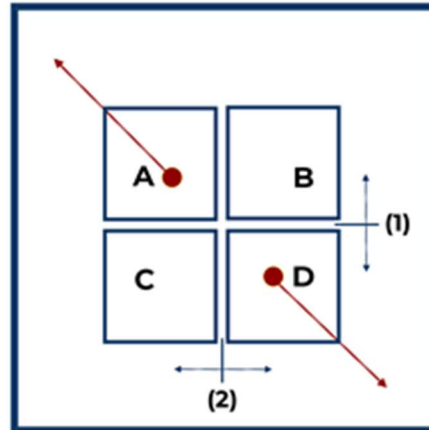


Figure II.1: Echantillonnage par quartage

Si cette quantité (1/2) est encore trop importante, la partager suivant le même processus. D'où un échantillon représentatif égal au $\frac{1}{4}$ de la quantité primitive.

II.2. ESSAIS SUR LES MATERIAUX

Les essais effectués se sont faits sur le béton frais, le béton durci, le ciment ainsi que les granulats.

II.2.1. Le ciment

Le ciment Prime a fait l'objet de l'essai de prélèvement de la masse volumique absolue.

II.2.1.1. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue du ciment est déterminée par un essai normalisé. Le mode opératoire inclut les actions ci-après :

- Introduire la solution dans le pycnomètre jusqu'au premier trait repère, noté $V1 = 0$ ml ;
- Peser le pycnomètre contenant la solution, noté $M1$ en gramme ;
- Introduire une quantité de ciment dans le pycnomètre jusqu'au deuxième trait repère, noté $V2$ en ml ;
- Peser à nouveau le pycnomètre contenant la solution et le ciment, noté $M2$ en gramme.

La masse volumique absolue (g/cm^3) a été évaluée à partir du pycnomètre de Le Chatelier. Le calcul de celui-ci s'est fait par la relation II.1 :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{v_2 - v_1} \quad (\text{II.1})$$

Où : M : La masse sèche du matériau, en (g).

v_2 et v_1 : la lecture sur le pycnomètre de Le Chatelier graduée avant et après l'introduction du ciment, en (ml).

II.2.2. Les granulats

II.2.2.1. L'essai d'équivalent de sable (ES)

Cet essai, utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les particules fines contenus dans le sable des éléments sableux plus grossiers, conformément à la Norme Française XP P 18-597 [12].

La procédure suivie pour parvenir aux résultats d'équivalent de sable a consisté en :

- La préparation de matériaux et matériels ;
- La préparation de la solution lavant dans une bombonne de 5 litres, à 1 ml au-dessus du fond des éprouvettes ;
- Deux éprouvettes (pour une moyenne) qu'on remplit d'eau distillée jusqu'au premier trait de jauge ;
- Verser la quantité de 120g dans l'éprouvette à l'aide d'un entonnoir ;
- On laisse reposer pendant 10 minutes pour éliminer les bulles d'air ;
- Boucher les éprouvettes et les placées sur une machine agitatrice faisant un mouvement rectiligne, horizontal, sinusoïdal de 20 cm d'amplitude à l'aide d'une machine à secouer (90 allers et retours en 30 secondes) ;
- Laver le sable et remplir l'éprouvette de la solution lavant jusqu'au deuxième trait de jauge ;
- Laisser reposer pendant 20 minutes en évitant toute vibration ;
- Mesurer à vue de la hauteur h_1 ainsi que h_2 (h_2 est entachée d'incertitude). Etant donné l'incertitude de la hauteur h_2 ;
- Nous procédons à une mesure à piston pour plus de précision.

Avec :

- La hauteur h_1 = sable propre + éléments fins (La hauteur totale y compris le floculat) en (cm).
- La hauteur h_2 = sable propre (La hauteur du dépôt de sable visible) en (cm).

L'équivalent de sable déduit s'écrit : $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$ (%) (II.2)

La figure II.2 présente une Illustration de la hauteur h_1 , h_2 et les éprouvettes pour la détermination de l'équivalent du sable :

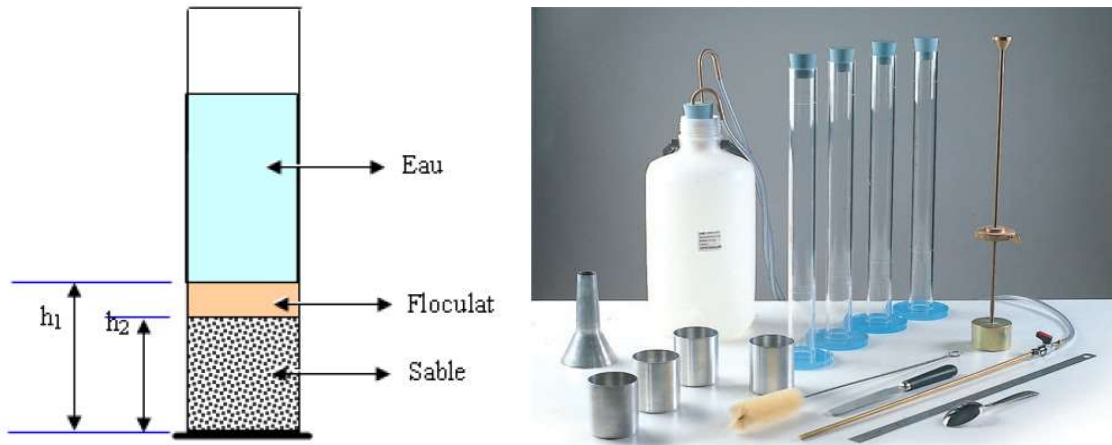


Figure II.2 : Illustration de la hauteur h_1 et h_2

L'interprétation des résultats de l'équivalent de sable s'est faite à partir du tableau II.1.

Tableau II. 1 : Interprétation des résultats sur l'ES

ES à vue	ES au piston	Conclusion
ES<60%	ES<60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour le béton de qualité.
65%≤ES≤75%	65%≤ES≤75%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.

75%≤ES≤85%	70≤%ES≤80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant pour les bétons de haute qualité.
ES>80%	ES>80%	Sables très propres. L'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

II.2.2.2. Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans un échantillon du matériau comparativement au poids du même matériau sec.

Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats.

Elle est donnée par la relation II.3 :

$$W = \frac{(M - M_d)}{M_d} \quad (\text{II. 3})$$

M : Masse de l'échantillon humide

M_d : masse de l'échantillon après dessiccation

II.2.2.3. Analyse Granulométrique

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560 [13], elle a été réalisée par voie sèche. Elle a permis la détermination de la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Elle consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon de masse M et préalablement sécher dans une étuve à 105 ± 5°C est tamisé à travers une série de tamis.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Le refus de chaque tamis sera pesé. Le dernier tamisant est ajouté sur la balance aux refus précédents : On doit retrouver le poids pesé au départ, aux perte près [6].

II.2.2.3.1. Caractéristiques granulométriques

a. Module de finesse (M_f)

Nous arrivons à déterminer également le module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Le module de finesse est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Celui-ci correspond à la somme de pourcentage des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de la série suivante : 00,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5 mm. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons [14].

Correction du module de finesse du sable [15]

Pour une éventuelle correction du module de finesse de sable on utilise la règle d'Abrams : supposons par exemple qu'on dispose d'un sable S_1 de module de finesse trop fort M_{f1} et que l'on désire y ajouter un sable fin S_2 de module de finesse M_{f2} afin d'obtenir un mélange dont le module de finesse M_f , les proportions des deux sables composants devront être trouvés par les formules II.4 et II.5.

$$\text{Proportion du sable } S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} \quad (\text{II. 4})$$

$$\text{Proportion du sable } S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}} \quad (\text{II. 5})$$

b. Masse volumique absolue (ρ_{abs})

La masse volumique absolue a été déterminée selon les normes NF P 18-554 [16] pour les graviers et NF P 18-555 pour les sables [17]. La méthode qui a été utilisée est celle de

l'éprouvette graduée. Elle a consisté à mesurer la masse, par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains en versant une quantité connue de granulat dans une quantité d'eau. La différence de volume rapportée à la masse du matériau a donné la masse volumique absolue.

Le calcul de celui-ci s'est fait par la relation II.6 :

$$\rho_{abs} = \frac{M_S}{v_2 - v_1} \quad (\text{II. 6})$$

Où : M_S : La masse sèche du matériau, en (g).

v_2 et v_1 : la lecture sur l'éprouvette graduée avant et après l'introduction du granulat, en (ml).

Tableau II. 2 : Classification des granulats suivant les masses volumiques (Dreux, 1981).
[2]

Nature des Granulats	Masse volumique
Granulats légers	$M_{V_{abs}} < 2 \frac{t}{m^3}$
Granulats courants	$2 \frac{t}{m^3} < M_{V_{abs}} < 3 \frac{t}{m^3}$
Granulats lourds	$M_{V_{abs}} > 3 \frac{t}{m^3}$

c. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente a été déterminée selon les normes NF P 18-554 [16] pour les graviers et NF P 18-555 [17] pour les sables. L'essai a consisté au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique. Noté par la relation II.7 :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \quad (\text{II. 7})$$

Où :

M est la masse sèche du matériau en g

V est le volume du récipient en ml

d. La courbe granulométrique

La courbe granulométrique est un élément important de la description géotechnique des granulats, notamment des sables. Elle traduit la granularité d'un granulat entre autre comparer les différents sables entre eux.

La figure II.3 présente les classes de courbe granulométrique de granulats

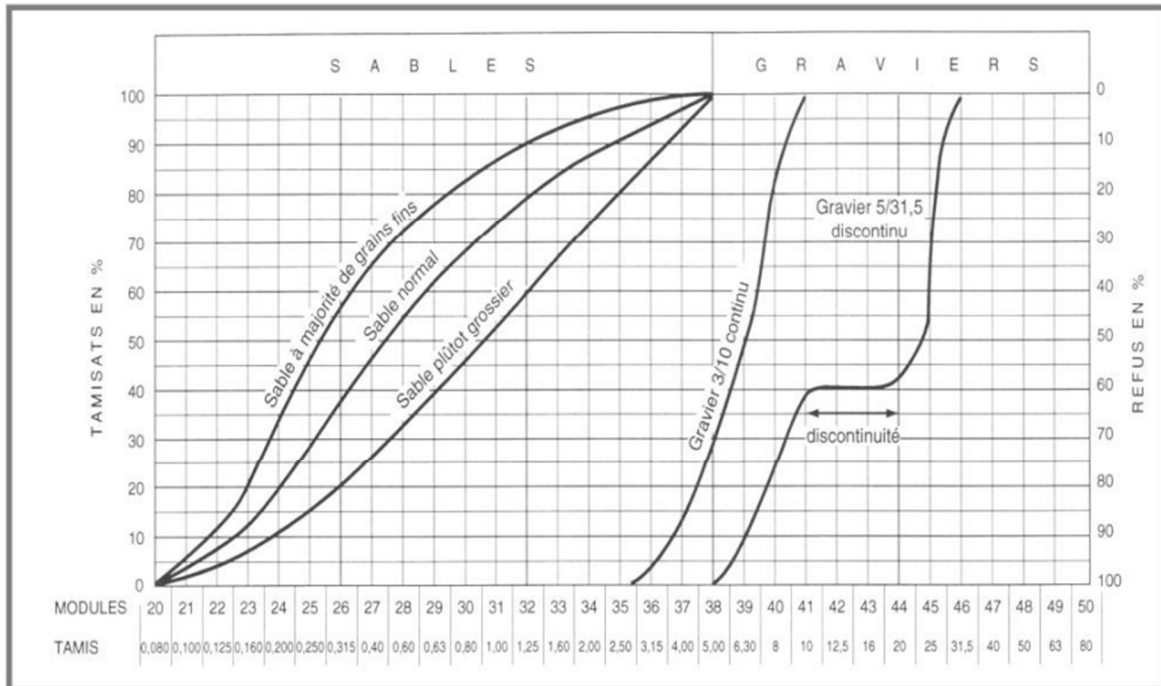


Figure II.3 : Courbe granulométriques de quelques granulats [2]

Elle s'exploite également quantitativement au travers différents paramètres notamment le coefficient d'uniformité, le coefficient de courbure

- **Le coefficient d'uniformité (C_u)** [18]

Appelé encore coefficient de Hazen, caractérise la granulométrie d'un sable. C'est le rapport entre D_{60} et D_{10} qui permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique.

Noté par la relation II.8 :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (\text{II. 8})$$

Avec :

D_{60} : le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée 60%

D_{10} : le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée 10%

- Si $C_u < 2$, la granulométrie est uniforme (ou serrée)
- Si $C_u > 2$, la granulométrie est étalée (ou variée)

▪ **Le coefficient de courbure (C_z) [19]**

Il se classifie les granulats suivant la granulométrie et permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D_{10} et D_{60} . Noté par la relation II.9 :

$$C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (\text{II. 9})$$

Avec D_{30} le diamètre effectif correspondant à l'ordonnée 30%, D_{60} étant le diamètre effectif correspondant à 60% et D_{10} celui correspondant à 10%.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure se situe entre 1 et 3 ainsi que le coefficient d'uniformité C_u est supérieur à 4 pour le gravier et 6 pour le sable, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres. Dans un tel cas, on dit que **la granulométrie est bien graduée**.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure dépasse 3, la courbe granulométrique commence à prendre la forme d'un creux orienté vers le bas ; plus la valeur augmente, plus le creux s'accroît.

Si cette valeur est inférieure à 1, le creux de la courbure s'oriente plutôt vers le haut.

Un coefficient de courbure trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre effectifs D_{10} et D_{60} , **la granulométrie est alors mal graduée**.

On parlera de **granulométrie uniforme** si les grains sont à peu près tous de même taille et de **granulométrie étalée** si toutes les tailles de grains sont représentées.

II.2.2.4. Essai Los Angeles [2]

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets. L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité. Si P est le matériau soumis à l'essai, p le poids des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance combinée à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques s'exprime par la quantité :

$$C_{LA} = \frac{p}{P} \times 100 \quad (II.10)$$

Tableau II. 3 : Type des graviers selon le coefficient Los Angeles

Valeurs du coefficient Los Angeles	Appréciation
$LA \leq 15$	Très bon à bon
$15 < LA \leq 25$	Bon à moyen
$25 < LA \leq 40$	Moyen à faible
$LA > 40$	Médiocre « mauvaise qualité »

Le coefficient de Los Angeles ne doit pas excéder 45 pour les granulats pour béton. Les granulats utilisés dans la construction de chemin de fer doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 15 et 25. Les granulats utilisés dans la construction routière quant à eux, doivent avoir un coefficient de Los Angeles compris entre 25 et 35.

II.3. PHASE DE FORMULATION DU BETON

La formulation du béton permet de déterminer les quantités optimales des constituants du béton (eau, granulats et ciment) qui entrent dans la composition d'un mètre cube (m³) de béton, ainsi que la quantité d'eau à utiliser en fonction de l'axe que possède le granulat [20].

Le choix porté à la méthode de Dreux-Gorisse dans ce travail a été guidé par sa facilité d'emploi, les résistances souhaitées ainsi que la vraie classe du ciment.

II.3.1. Présentation de la méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse a mérité d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutes fois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 kg/m³, elle a été utilisée dans la formulation du béton d'étude [6].

II.3.1.1. Formulation du béton par la méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une composition de béton, mais que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettent d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement [21].

a. Données de base

La dimension maximale des granulats, la résistance souhaitée et la consistance désirée sont les données de base dans la formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse.

En général la méthode exige une résistance en compression f_{c28} à 28 jours et une consistance désirée en fonction de la nature de l'ouvrage (\pm massif ou \pm ferrailé) de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc. elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams.

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jour sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

La résistance en compression a été déterminée par la relation II.10 : [22]

$$\sigma'_{28} = 1,15 \cdot f_{c28} \quad (\text{II. 10})$$

Avec σ'_{28} : Résistance en compression désirée à 28 jours

f_{c28} : Résistance visée en compression à 28 jours

La dimension maximale des granulats est importante dans la composition du béton. En effet, un béton tire du granulat une bonne part de la résistance et plus particulièrement du gros granulat. L'emploi des granulats de qualité et de dimension D suffisante doit rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre.

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey II.11 :

$$\sigma'_{28} = G' \times \sigma'c \times \left(\frac{C}{E} - 0,5\right) \quad (\text{II. 11})$$

Les paramètres sont définis comme suit :

- σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa
- $\sigma'c$ = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa
- C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton
- E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton
- G' = Coefficient granulaire

b. Détermination du rapport C/E

Les valeurs du coefficient granulaire G' supposent que le serrage du béton est effectué dans de bonnes conditions. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de G suivant la qualité et de la dimension maximale des granulats [22].

Tableau II. 4 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}. [22]

Qualité des granulats	Dimension D _{max} des granulats		
	Fins D _{max} <12mm	Moyens 20<D _{max} <31,5mm	Gros D _{max} >50mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Détermination de C

Le dosage en ciment est donc fonction de C/E mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure II.4 permet de déterminer C en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams. [22]

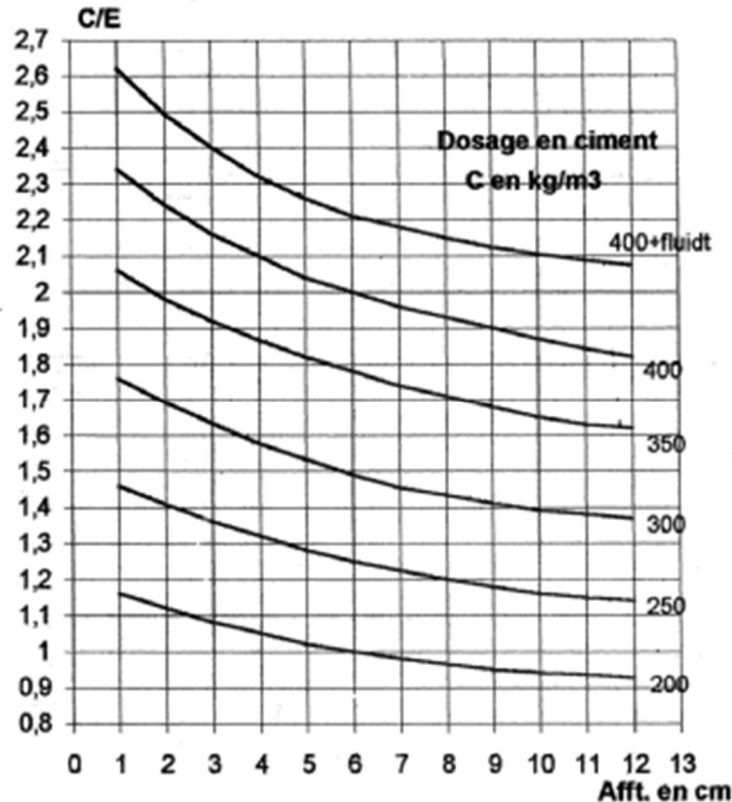


Figure II.4 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée. [2]

Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées. Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de C_{opt} . Au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant. [22]

La norme préconise un dosage minimal en ciment à respecter.

Déterminé par la relation II.12 :

$$C = \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[5]{D_{max}}} \quad [20] \quad (II.12)$$

D_{max} : Dimension du plus granulat en mm.

f_{ck} : classe de résistance du ciment en MPa.

c. Détermination du dosage en eau E

Après avoir fait le choix du dosage en ciment C, on déduit alors le dosage approximatif en eau total à prévoir dans le rapport C/E.

- Correction du dosage en eau totale en fonction de D_{max}

Lorsque la dimension maximale des granulats D_{max} est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections (Tab.7) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé) [22].

Tableau II. 5 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max} . [22]

Dimension maximale des granulats (D_{max} en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+5	+9	+4	0	-4	-8	-12

Par ailleurs, dans la détermination de la quantité en eau pratique in situ, il est impérieux de prendre en considération la quantité en eau qu'apportent les granulats s'ils ne sont pas secs.

d. Détermination du mélange optimal à minimum de vides [22]

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite de référence de Dreux

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse : Si $D_{max} \leq 20$ mm alors $X = \frac{D_{max}}{2}$ (II. 13)

Si $D_{max} > 20$ mm Alors le Module (X) = $\frac{module(D_{max})+38}{2}$ (II. 14)

En ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{(1,25 \times D_{max}) + K'}$ où $K' = K + K_S + K_P$ (II. 15)

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

K est un coefficient donné par le tableau ci-dessous,

Ks et Kp étant des coefficients correctifs définis par :

- Ks (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :
 $K_s = (6 M_{fs} - 15)$ avec M_{fs} le module de finesse du sable. (II. 16)
- Kp (correction supplémentaire si le béton est pompable) : Kp = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Tableau II. 6 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment. [22]

K	Vibration	Faible		Normal		Puissante	
	Granulat	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment (kg/m³)	400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

La droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point Dmax caractéristique des plus gros granulats.

- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

e. Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier).

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton, déterminée par la relation II.17 :

$$V = \gamma - V_c \quad (\text{II. 17})$$

où V_c est le volume de ciment défini par $V_c = \frac{C}{\rho_s(c)}$, (II. 18)

où $\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé et C le dosage en ciment

Tableau II. 7 : Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage.
[22]

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité (γ)						
		D _{max} =5	D _{max} =10	D _{max} =12,5	D _{max} =20	D _{max} =31,5	D _{max} =50	D _{max} =80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820

**ETUDE COMPARATIVE DES PROPRIETES DU BETON FORMULE A BASE DU SABLE MONT-GOMA ET CELLE DU
BETON FORMULE A BASE DU SABLE SAKE**

	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,845	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,850	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,855	0,855

NOTA : Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- Sable roulé et gravier concassé : $c_1-0,01$
- Sable et gravier concassés : $c_1-0,03$
- Granulats légers : $c_2-0,03$
- Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif

suisant : $c_3 = \frac{C-350}{5000}$

Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable ($S\%$) et de gravier ($G\%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_S) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (m_S et m_G) :

$$V_S = V \times S\% \text{ Avec une masse } m_S = V \times S\% \times \rho_S(S) \quad (\text{II. 19})$$

$$V_G = V \times G\% \text{ Avec une masse } m_G = V \times G\% \times \rho_S(G) \quad (\text{II. 20})$$

II.3.1.2. Confection des éprouvettes

La vérification de la qualité d'un béton nécessite de vérifier la résistance à la compression à 28 jours (f_{c28}). Selon la norme NF P 18-423, la mise en place du béton s'effectuera en deux couches. En effet ; le béton sera confectionné en incorporant dans l'ordre, le gravillon, sable et enfin le ciment. Le mélange sera brassé à sec durant approximativement une minute. L'eau sera ensuite ajoutée doucement afin de vérifier visuellement l'ouvrabilité du béton. L'ensemble sera ensuite brassé durant approximativement 2 à 3 minutes [23].

Pour cela, des éprouvettes de bétons seront confectionnées à l'aide de moule en acier et de forme cylindrique de 16cm de diamètre 32cm de hauteur.

En effet, la confection de l'éprouvette désigne :

- Il y a la quantité de béton nécessaire, la façon de remplir et de manipuler l'éprouvette afin de garantir la quantité de l'éprouvette en béton. Cette procédure est décrite dans la norme NF P 18-404 [24].
- Il y a la mise en place du béton dans l'éprouvette par piquage pour reproduire les conditions de mise en place du béton selon l'ouvrabilité désirée. Ces procédures sont décrites dans la norme NF P 18-423 [23].

En effet, l'éprouvette sera remplie selon le nombre de couches nécessaires au piquage du béton et piqué conformément au temps indiqué. La dernière couche est remplie jusqu'au bord de l'éprouvette. En effectuant le piquage, le volume du béton diminue. Cette diminution est compensée en remplissant l'éprouvette au fur et à mesure afin que le niveau du béton soit maintenu jusqu'au bord de l'éprouvette.

II.3.2. Essai sur le béton frais

- Essai d'ouvrabilité du béton

L'ouvrabilité du béton a été évaluée à l'aide du cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451 [25].

L'essai a consisté à introduire le béton frais dans un moule tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $H = 30$ cm) en trois couches, où chacune a subi 25 coups de piquage à l'aide d'une tige de 16 mm de diamètre. L'affaissement correspond à la différence des hauteurs entre le cône et le béton après retrait du cône [26].

Conformément à la norme NF EN 12350-2, le déroulement de l'essai suit les étapes suivantes :

- Le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- Le cône est rempli avec du béton frais en trois couches et chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- Le cône est arasé avec une tige
- Démouler verticalement (sans mouvement de torsion) en 5 à 10 secondes ;
- Mesurer ensuite l'affaissement du béton à 10 mm près.

Après avoir trouvé l'affaissement avec le dosage en eau calculée, on cherche un coefficient en % en fonction de l'eau de gâchage nécessaire. Ensuite on ajoute ce coefficient à la quantité calculée. En fin, on procède à l'exécution étape par étape comme déjà précisée. L'opération se répète autant de fois jusqu'à atteindre l'affaissement désiré.

II.3.3. Essai sur le béton durci

L'essai réalisé sur le béton durci dans cette étude est la mesure de la résistance à la compression.

- Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme BS 1881R partie 116 [27]. La presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5 000 kgf.

Les résultats ont été obtenus par la formule II.21 :

$$R_{cj} = \frac{F}{A} \quad (\text{II. 21})$$

Où :

- **F** est la force qui agit sur l'éprouvette en Newton
- **A** est la section de l'éprouvette en mm²

II.4. CONCLUSION PARTIELLE

Ce deuxième chapitre présente la méthode de formulation de Dreux-Gorisse qui a été utilisée dans la confection des éprouvettes cylindriques de béton 16 * 32 cm, les différents essais qui ont été effectués sur les matériaux (ciments, sable et gravier) ainsi que ceux effectués sur le béton frais et durci.

Chapitre Troisième

PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Ce chapitre présente les résultats des essais auxquels ont été soumis les différents matériaux entrant dans la formulation des bétons ainsi les propriétés des bétons à la fois frais et durci, avec leurs interprétations.

III.1. RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRANULATS

Les essais effectués sur les granulats fournissent des informations cruciales sur leurs caractéristiques physiques, essentielles pour évaluer leur qualité et leur adéquation à une utilisation dans la construction. Dans cette section nous examinerons en détail les résultats obtenus à partir de divers essais, notamment la granulométrie, les masses volumiques, l'équivalent sable, la teneur en eau, los Angeles, permettant ainsi une meilleure compréhension des propriétés des granulats.

III.1.1. SABLE DU MONT-GOMA

III.1.1.1. Répartition granulométrique du sable

L'annexe 1 présente la répartition granulométrique de ce sable.

La *figure III.1* quant à elle présente sa composition granulométrique.

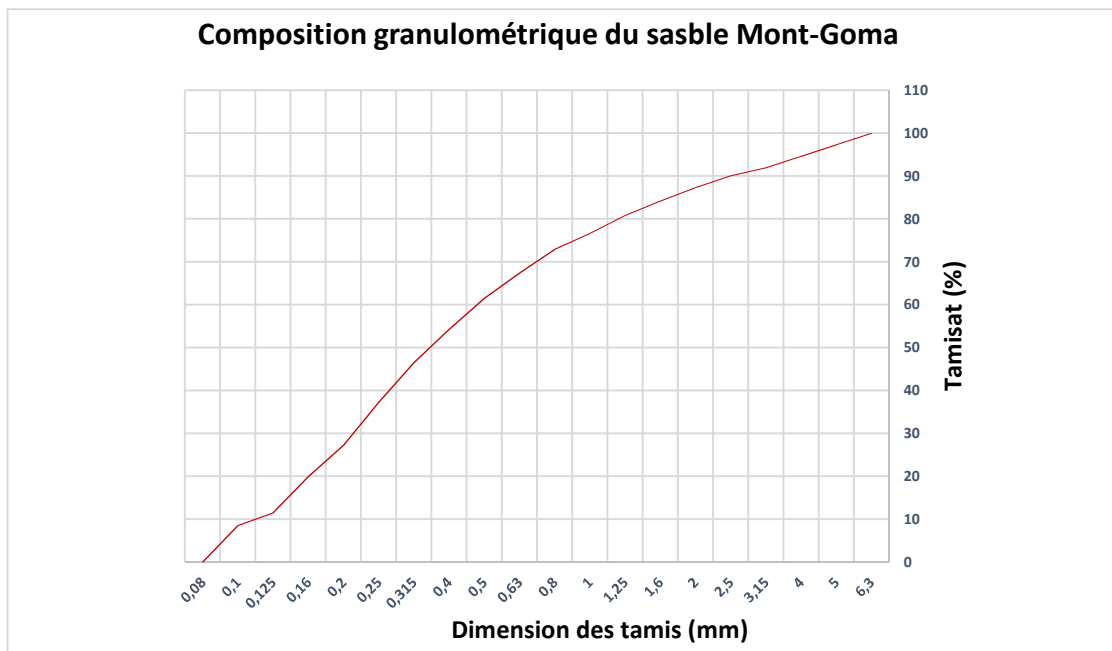


Figure III. 1 : Composition granulométrique du sable Mont-Goma

La figure III.1 Montre une granulométrie étalée ou variée, cela signifie que ce matériau contient une gamme de tailles de particules différentes, car le coefficient d'uniformité est strictement supérieur à 2 ($C_u = 4,69$), le coefficient de courbure ($C_z = 0,99$).

III.1.1.2. Module de finesse

La valeur du module de finesse de ce sable est de **1,97** (valeur comprise entre 1,8 et 2,2) ce qui atteste ainsi que sa granulométrie est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance du béton. Outre, quelques ajustements sont recommandés.

III.1.1.3. Masses volumiques

a. Masse volumique apparente

Tableau III. 1 : Masse volumique apparente du sable Mont-Goma

	Volume (cm ³)	Masse de la tare (g)	Masse de la tare + échantillon (g)	Masse de l'échantillon (g)	Masse volumique (g/cm ³)
1^{er} Echantillon	200	33,54	294,48	260,94	1,3047
2^e Echantillon	200	32,03	294,83	262,8	1,3140
3^e Echantillon	200	32,11	306,63	274,52	1,3726
Moyenne					1,3304

La lecture du *tableau III.1* révèle que la masse volumique apparente du sable Mont-Goma est de **1,3304 g/cm³**

b. Masse volumique absolue

Tableau III. 2 : Masse volumique absolue du sable Mont-Goma

	Masse (g)	Volume 1 (cm³)	Volume 2 (cm³)	Masse volumique (g/cm³)
1^{er} Echantillon	300	500	630	2,3076
2^e Echantillon	300	500	625	2,4
Moyenne				2,3538

La lecture du *tableau III.2* révèle que la masse volumique absolue du sable Mont-Goma est de **2,3538 g/cm³**, ainsi nous avons les granulats courants.

III.1.1.4. Equivalent sable

Le degré de propreté de ce sable a été effectué à partir de l'équivalent sable. Celui-ci a été effectué selon la norme NF EN 933-8 (1999) [2].

Tableau III. 3 : Equivalent sable (sable Mont-Goma)

	Unités	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Hauteur sable propre	Cm	11,3	11,6
Hauteur sable propre au piston	Cm	10,9	11
Hauteur sable propre + floculat	Cm	12,5	12,6
Equivalent de sable à vue	%	90,4	92,06
Equivalent de sable à piston	%	87,2	87,3

La valeur de l'équivalent de sable du sable Mont-Goma étant supérieur à 80 %. Il advient que ce sable est très propre. Contribuant à une meilleure résistance et durabilité du béton, favorisant une meilleure adhérence entre les particules de ciment et de sable. Outre l'absence presque

totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

III.1.1.5. Teneur en eau

L'essai permet la détermination de la quantité d'eau existante dans l'échantillon.

Tableau III. 4 : Teneur en eau (sable Mont-Goma)

	Masse de la tare (g)	Masse de la tare + échantillon humide (g)	Masse de la tare + échantillon séc (g)	Teneur en eau (%)
1^{er} Echantillon	33,54	298,69	294,48	1,6
2^e Echantillon	32,03	301,25	294,83	2,1
3^e Echantillon	32,11	306,89	300,63	2
Moyenne				1,9

La lecture du *tableau III.4* révèle que la teneur en eau du sable Mont-Goma est de **1,9 %**.

Soulignons que nous avons utilisé un sable sec qui avait déjà été passé dans l'étuve.

III.1.2. SABLE DE SAKE

III.1.2.1. Répartition granulométrique du sable

L'annexe 1 présente la répartition granulométrique de ce sable.

La *figure III.2* quant à elle présente sa composition granulométrique.

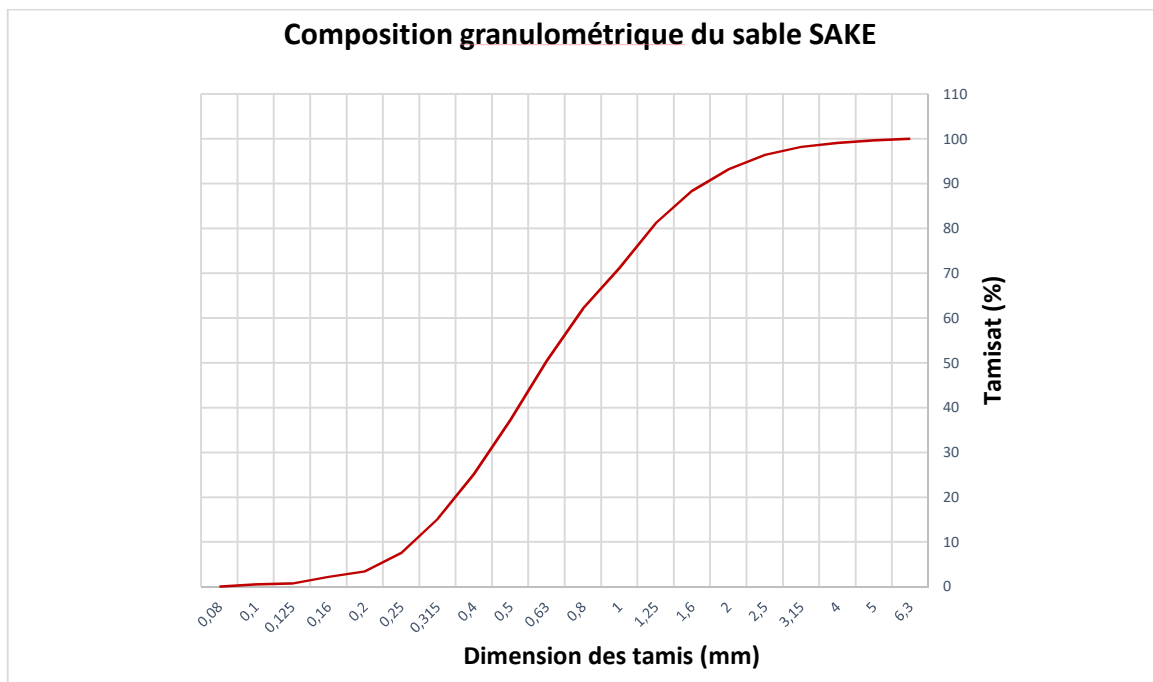


Figure III. 2 : Composition granulométrique du sable de SAKE

La *figure III.2* Montre une granulométrie étalée ou variée. On se réfère à une distribution de tailles de particules qui présente une grande diversité plutôt qu'une distribution concentrée autour d'une taille spécifique, car le coefficient d'uniformité est strictement supérieur à 2 ($C_u = 2,81$), le coefficient de courbure ($C_z = 0,94$).

III.1.2.2. Module de finesse

La valeur du module de finesse de ce sable est de **2,54** (valeur comprise entre 2,2 et 2,8) ce qui atteste ainsi que sa granulométrie convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégations (séparation des particules d'un matériau en fonction de leur taille, masse, densité pendant leur manipulation, le transport ou la mise en place).

III.1.2.3. Masses volumiques

c. Masse volumique apparente

Tableau III. 5 : Masse volumique apparente du sable Saké

	Volume (cm ³)	Masse de la tare (g)	Masse de la tare + échantillon (g)	Masse de l'échantillon (g)	Masse volumique (g/cm ³)
1^{er} Echantillon	200	33,54	298,00	264,46	1,3223
2^e Echantillon	200	32,03	300,62	268,59	1,34295
3^e Echantillon	200	32,11	310,95	278,84	1,3942
Moyenne					1,35315

La lecture du *tableau III.5* révèle que la masse volumique apparente du sable de SAKE est de **1,35315 g/cm³**

d. Masse volumique absolue

Tableau III. 6 : Masse volumique absolue du sable Saké

	Masse (g)	Volume 1 (cm ³)	Volume 2 (cm ³)	Masse volumique (g/cm ³)
1^{er} Echantillon	300	500	620	2,5
2^e Echantillon	300	500	622	2,4590
Moyenne				2,4795

La lecture du *tableau III.6* révèle que la masse volumique absolue du sable de SAKE est de **2,4795 g/cm³**, ainsi nous avons les granulats courants, largement utilisé dans l'industrie de la construction.

III.1.2.4. Equivalent sable

Le degré de propreté de ce sable a été effectué à partir de l'équivalent sable. Celui-ci a été effectué selon la norme NF EN 933-8 (1999) [2].

Tableau III. 7 : Equivalent sable (sable Saké)

	Unités	Eprouvette 1	Eprouvette 2
Hauteur sable propre	Cm	11,3	10,7
Hauteur sable propre au piston	Cm	10,9	10,3
Hauteur sable propre + flocculat	Cm	11,6	11
Equivalent de sable à vue	%	97,41	97,27
Equivalent de sable à piston	%	93,96	93,63

La valeur de l'équivalent de sable du sable de SAKE étant supérieur à 80 %. Il advient que ce sable est très propre. Contribue à améliorer la qualité globale du béton en favorisant sa résistance, sa durabilité et son adhérence. Outre l'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

III.1.2.5. Teneur en eau

L'essai permet la détermination de la quantité d'eau existante dans l'échantillon.

Tableau III. 8 : Teneur en eau (sable Saké)

	Masse de la tare (g)	Masse de la tare + échantillon humide (g)	Masse de la tare + échantillon séc (g)	Teneur en eau (%)
1^{er} Echantillon	33,54	314,53	298,00	5,5
2^e Echantillon	32,03	319,94	300,62	6,4
3^e Echantillon	32,11	330,62	310,95	6,3
Moyenne				6,06

La lecture du *tableau III.8* révèle que la teneur en eau du sable Saké est de **6,06 %**.

Soulignons que nous avons utilisé un sable sec qui avait déjà été passé dans l'étuve.

III.1.3. GRAVIER CONCASSE

III.1.3.1. Répartition granulométrique du gravier

L'annexe 1 présente la répartition granulométrique de ce gravier.

Dans notre démarche opérationnelle nous avons utilisé du gravillon de granulométrie 15/25.

III.1.3.2. Masses volumiques

a. Masse volumique apparente

Tableau III. 9 : Masse volumique apparente du gravier concassé

	Volume du moule (cm ³)	Masse du moule (g)	Masse du moule + échantillon (g)	Masse de l'échantillon (g)	Masse volumique (g/cm ³)
1^{er} Echantillon	2914,31	7292	11048	3756	1,2888
2^e Echantillon	3002,62	7360	11148	3788	1,2615
Moyenne					1,27515

La lecture du *tableau III.9* révèle que la masse volumique apparente du gravier est de **1,27515 g/cm³**

b. Masse volumique absolue

Tableau III. 10 : Masse volumique absolue du gravier concassé

	Masse (g)	Volume 1 (cm ³)	Volume 2 (cm ³)	Masse volumique (g/cm ³)
1^{er} Echantillon	1000	1200	1580	2,6315
2^e Echantillon	1000	1200	1570	2,7027
Moyenne				2,6670

La lecture du *tableau III.10* révèle que la masse volumique absolue du gravier est de **2,6670 g/cm³**, nous avons les granulats courants.

III.1.3.3. Teneur en eau

L'essai permet la détermination de la quantité d'eau existante dans l'échantillon. Soulignons que nous avons utilisé un gravier sec.

III.1.3.4. Los Angeles

Cet essai nous a permis d'évaluer la qualité de celui-ci en le soumettant aux chocs de boules normalisés. Avec une masse de 5 kg de gravier, nous avons utilisé 12 boules pour 500 tours.

Tableau III. 11 : Coefficient Los Angeles du gravier

Masse total de l'échantillon (g)	Masse des éléments inferieurs à 1.6mm (g)	C.L.A (Coefficient Los Angeles) (%)
5000	722,95	14,46

La lecture du *tableau III.11* révèle que la qualité du gravier est jugée très bonne à bonne avec un coefficient Los Angeles égal à **14,4 %** ($CLA \leq 15\%$), le granulat est résistant à la fragmentation par chocs. Cela signifie que les particules de gravier conservent leur intégrité structurelle lorsqu'elles sont soumises à des forces de choc.

III.2. RESULTATS OBTENUS SUR LES CIMENTS

III.2.1. Masse volumique absolue

La masse volumique du ciment obtenu est reprise dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 12 : Résultat de la masse volumique absolue du ciment

Marque du ciment	Masse volumique absolue en g/cm ³
PRIME	2,969

La lecture du *tableau III.12*, le ciment PRIME a une masse volumique de **2,969 g/cm³**

III.2.2. La classe vraie

La classe vraie du ciment obtenu est reprise dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 13 : Classe vraie du ciment

Marque du ciment	Classe vraie en MPa
PRIME	30

La lecture du *tableau III.13*, le ciment PRIME a une classe vraie de **30 MPa**. Cela signifie que celui-ci peut être utilisé dans des applications où une résistance de 30 MPa est requise.

III. 3. FORMULATION DES BETONS

III.3.1. Formulation des bétons par application numérique

Dans cette section, nous examinerons de près le processus de formulation du béton selon la méthode de Dreux-Gorisse.

1. FORMULATION DU BETON (SABLE DU MONT-GOMA)

○ Hypothèses de travail

Caractéristique du béton

Résistance moyenne à 28 jours du béton :..... $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$

Affaissement au cône d'Abrams :..... $A = 6 \text{ cm}$

Vibration normale

Caractéristique du ciment et granulats

Classe des granulats :..... Courante

Classe vraie du ciment :..... $F_{CE} = 30 \text{ MPa}$ (PRIME
CEMENT)

Diamètre du plus gros granulat :..... $D = 25 \text{ mm}$

Coefficient granulaire :..... $G = 0,5$

Masse volumique des granulats :

Gravier :..... $\rho_{sable} = 2,353 \text{ g/cm}^3$

Sable :..... $\rho_{gravier} = 2,667 \text{ g/cm}^3$

Ciment :..... $\rho_{ciment} = 2,969 \text{ g/cm}^3$

○ Détermination du rapport C/E :

$$f_c = G * F_{CE} (C/E - 0,5)$$

$$\text{Soit } f_c = f_{c28} * 1,15 = 1,15 * 20 = 23 \text{ MPa}$$

$$1,15 * 20 = 0,5 * 30 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

$$\frac{C}{E} = 2,03$$

○ **Détermination du dosage en ciment C d'après l'abaque**

Estimation du dosage en ciment

$$\boxed{C = 400 \text{ kg pour } 1 \text{ m}^3 \text{ de béton}}$$

○ **Détermination du dosage en eau**

$$E = \frac{C}{\frac{E}{C}} = \frac{400}{2,03} = 197,04 \text{ kg}$$

○ **Détermination de la composition granulair**

Tracé de la courbe granulométrique de référence

Ordonnée du point A :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p$$

Avec :

✚ D : diamètre du plus gros granulat

✚ K : terme correcteur +0

✚ $K_s = 6 * M_f - 15 = 6 * 1,97 - 15 = - 3,18$ (coefficient correcteur)

✚ K_p : correction si béton doit être pompé = 0

$$Y = 50 - 5 + 0 + 0 - 3,18 = 41,82 \quad \mathbf{Y = 41,82 \%}$$

Abscisse du point A :

$$\text{Comme } D_{\max} = 25 > 20\text{mm} \text{ alors le module } (x) = \left[\frac{\text{Module}(D_{\max})+3}{2} \right] = \frac{45+38}{2} = 41,5$$

$$\text{Le module } (41,5) = 11,25 \text{ mm} \quad \mathbf{X = 11,25}$$

Détermination des proportions de granulats

On en déduit par tracé de la ligne de partage, les pourcentages des granulats en volume absolu

$$\boxed{\text{Gravier} = 63 \% \quad \text{Sable} = 37 \%}$$

○ **Détermination de la composition en volume absolu**

La **compacité g** représente la proportion du volume de matière que contient le matériau ;

$$g = 0,827$$

la correction en fonction du dosage en ciment étant donné que $350 \neq 400$

$$\gamma + \frac{C - 350}{5000} \leftrightarrow \gamma = 0,837$$

Volume absolu de granulats

$V_G = \gamma - \frac{C}{\rho_{ciment}} = 0,837 - \frac{400}{2969} = 0,702 \text{ m}^3$	V_G : volume absolu des granulats en m^3 $V_G = 0,702 \text{ m}^3$
-----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------

Volume de sable

$$V_S = S \% * V_G$$

$$V_S = 37 \% * 0,702 = 0,37 * 0,702 = 0,259 \text{ m}^3$$

Volume de gravillons

$$V_g = G \% * V_G$$

$$V_g = 63 \% * 0,702 = 0,63 * 0,702 = 0,442 \text{ m}^3$$

○ **Détermination de la composition pondérale sèche en kg**

Volume de sable

$$S = V_s * \rho_{sable}$$

$$S = 0,259 * 2353 = 609,427 \text{ kg/m}^3$$

Masse de gravillons

$$G = V_g * \rho_{gravier}$$

$$G = 0,442 * 2667 = 1178,814 \text{ kg/m}^3$$

Total masse du béton : 2 385,281 kg pour 1 m³ de béton

2. FORMULATION DU BETON (SABLE SAKE)

○ Hypothèses de travail

Caractéristique du béton

Résistance moyenne à 28 jours du béton :..... $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$

Affaissement au cône d'Abrams :..... $A = 6 \text{ cm}$

Vibration normale

Caractéristique du ciment et de granulat

Classe des granulats :..... Courante

Classe vraie du ciment :..... $F_{CE} = 30 \text{ MPa}$

Diamètre du plus gros granulat :..... $D = 25 \text{ mm}$

Coefficient granulaire :..... $G = 0,5$

Masse volumique des granulats :

Gravier :..... $\rho_{sable} = 2,479 \text{ g/cm}^3$

Sable :..... $\rho_{gravier} = 2,667 \text{ g/cm}^3$

Ciment :..... $\rho_{ciment} = 2,969 \text{ g/cm}^3$

○ Détermination du rapport C/E :

$$f_c = G * F_{CE} (C/E - 0,5)$$

$$\frac{C}{E} = 2,03$$

$$\text{Soit } f_c = f_{c28} * 1,15 = 1,15 * 20 = 23 \text{ MPa}$$

$$1,15 * 20 = 0,5 * 30 \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

○ Détermination du dosage en ciment C d'après l'abaque

Estimation du dosage en ciment

C= 400 kg pour 1 m³ de béton

○ **Détermination du dosage en eau**

$$E = \frac{C}{\frac{C}{E}} = \frac{400}{2,03} = 197,04 \text{ kg}$$

○ **Détermination de la composition granulaire**

Tracé de la courbe granulométrique de référence

Ordonnée du point A :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p$$

Avec :

✚ D : diamètre du plus gros granulat

✚ K : terme correcteur +0

✚ K_s = 0 (coefficient correcteur)

✚ K_p : correction si béton doit être pompé = 0

$$Y = 50 - 5 + 0 + 0 + 0 = 45 \quad Y = 45 \%$$

Abscisse du point A :

$$\text{Comme } D_{\max} = 25 > 20\text{mm alors le module } (x) = \left[\frac{\text{Module}(D_{\max})+3}{2} \right] = \frac{45+3}{2} = 41,5$$

$$\text{Le module } (41,5) = 11,25 \text{ mm} \quad X = 11,25$$

○ **Détermination des proportions de granulats**

On en déduit par tracé de la ligne de partage, les pourcentages des granulats en volume absolu

Gravier = 64 % Sable = 36 %

○ **Détermination de la composition en volume absolu**

La compacité g représente la proportion du volume de matière que contient le matériau ;

$$g = 0,827$$

la correction en fonction du dosage en ciment étant donné que $350 \neq 333,33$

$$\gamma + \frac{C - 350}{5000} \leftrightarrow \gamma = 0,837$$

Volume absolu de granulats

$V_G = \gamma - \frac{C}{\rho_{ciment}} = 0,837 - \frac{400}{2969} = 0,702 \text{ m}^3$	V_G : volume absolu des granulats en m^3 $V_G = 0,702 \text{ m}^3$
-----------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------

Volume de sable

$$V_S = S \% * V_G$$

$$V_S = 36 \% * 0,702 = 0,36 * 0,702 = 0,252 \text{ m}^3$$

Volume de gravillons

$$V_g = G \% * V_G$$

$$V_g = 64 \% * 0,702 = 0,64 * 0,702 = 0,449 \text{ m}^3$$

- Détermination de la composition pondérale sèche en kg

Volume de sable

$$S = V_s * \rho_{sable}$$

$$S = 0,252 * 2479 = 624,708 \text{ kg/m}^3$$

Masse de gravillons

$$G = V_g * \rho_{gravier}$$

$$G = 0,449 * 2667 = 1197,483 \text{ kg/m}^3$$

Total masse du béton : 2 419,231 kg pour 1 m³ de béton

III.3.2. Dosage en divers éléments

La figure 7 présente les dosages en divers éléments entre autres le sable, le gravier ainsi que l'eau obtenus à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

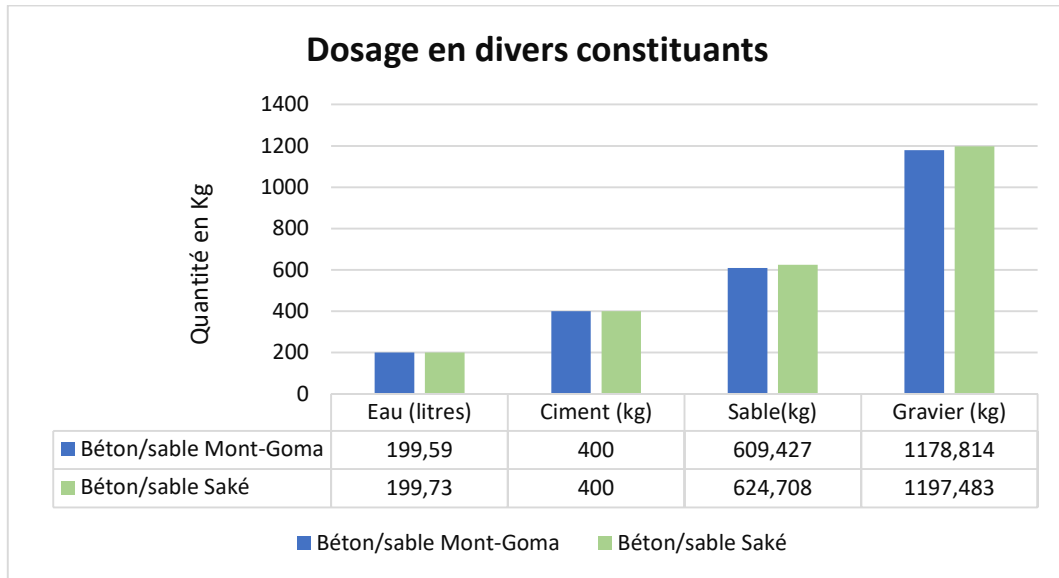


Figure III. 3 : Dosage en divers constituants

La lecture de la figure III.3 prouve qu'au même dosage, la quantité d'eau, du sable et des graviers varie.

III.3.3. Ouvrabilité du béton

La figure 8 présente les différentes valeurs d'affaissement au cône d'Abrams obtenu pour les différents bétons confectionnés.

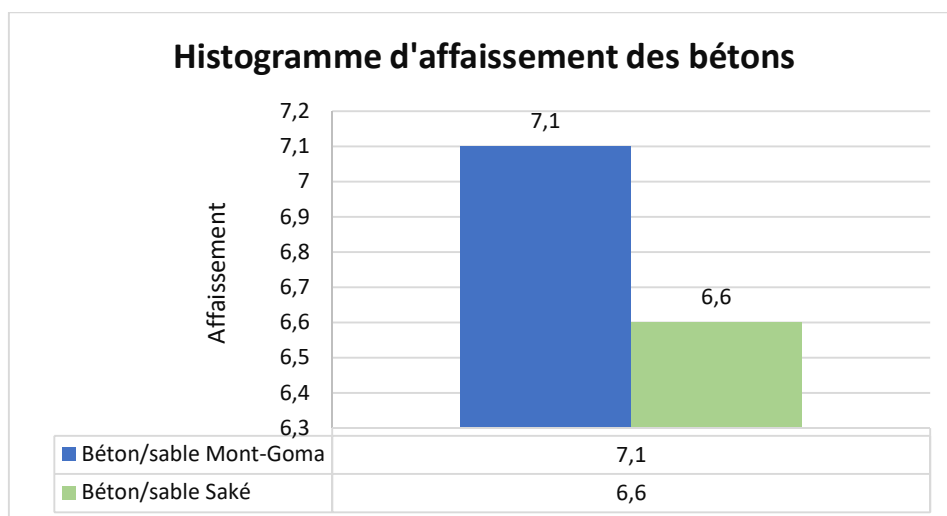


Figure III. 4 : Histogramme d'affaissement au cône d'Abrahams

A partir de la figure III.4 on constate que les bétons formulés aux différents dosages ont un affaissement compris entre 5 et 9 cm et par conséquent sont des bétons plastiques destinés à la construction des semelles coffrées, murs de soutènement, planchers, dallage, poutre, poteau, voile.

Pour obtenir un affaissement de 7,1 cm dans la préparation du béton à base du sable Mont-Goma, il a été nécessaire d'ajouter 56% d'eau par rapport au dosage initial de 4,56 litres, un affaissement de 6,6 cm a été obtenu en ajoutant 59% d'eau par rapport au dosage initial de 4,56 litres pour le sable de Saké.

Mode de vibration

La vibration a été réalisée de manière manuelle en utilisant une tige pour effectuer des piquages ; l'éprouvette a été remplis en 3 couches à raison de 25 coups par couche.

III.3.4. Résistance en compression

Les valeurs de la résistance en compression des éprouvettes des bétons formulés à l'aide de la méthode de Dreux-Gorisse sont présentées dans la figure 9.

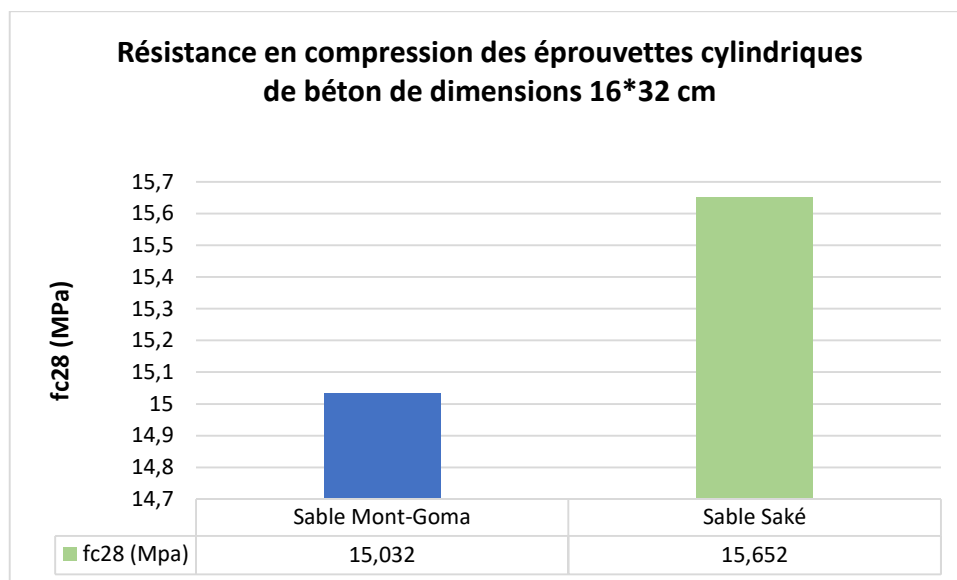


Figure II. 5 : Résistance en compression des éprouvettes cylindriques de béton de dimensions 16*32 cm

La figure III.5 présente les différentes résistances en compression des différents bétons. Nous constatons que le béton issu du sable Saké offre une résistance légèrement supérieure en compression par rapport à celui issu du sable Mont-Goma.

III.4. CONCLUSION PARTIELLE

A partir de ces résultats, il semble que ni le béton issu du sable Mont-Goma ni celui issu du sable Saké n'atteignent la valeur usuelle de 20 MPa. Par conséquent, des ajustements sont nécessaires dans la formulation ou dans le processus de fabrication pour augmenter la résistance des échantillons.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail s'est articulé sur l'étude des bétons à base des différents sables disponibles dans la ville de Goma en vue de leur meilleure utilisation dans la construction de celle-ci. Pour arriver aux résultats escomptés, les différents sables à l'instar le sable Mont-Goma et le sable Saké ont été soumis aux essais de caractérisation physique.

Les éprouvettes cylindriques de béton de dimension 16 * 32 cm ont été confectionnées par la méthode de Dreux-Gorisse, celles-ci ont été écrasées après 28 jours d'immersion dans l'eau. Les résultats obtenus ont révélé que les échantillons de béton issus du sable Mont-Goma et du sable Saké n'ont pas atteint la résistance moyenne requise de 20 MPa, avec des valeurs mesurées de 15,652 MPa et 15,032 MPa respectivement. Il s'en suit que l'utilisation de ces derniers dans la confection des bétons pour éléments porteurs nécessiterait la prise des mesures complémentaires permettant l'amélioration de la résistance des bétons confectionnés.

Cependant, en identifiant les lacunes dans la formulation initiale, des ajustements ont été proposés pour améliorer la résistance du béton. L'un des ajustements clés qui méritent une attention particulière est la granulométrie du sable. Une correction de celui-ci en réduisant la proportion de fines et en augmentant la proportion de grains grossiers.

Parallèlement, l'utilisation judicieuse d'adjuvants tels que les super-plastifiants ou les réducteurs d'eau peuvent aider à optimiser la consistance du mélange tout en réduisant la quantité d'eau nécessaire, ce qui favorise une meilleure compaction et une résistance accrue. De même, l'exploration de ciments spéciaux à haute résistance peut offrir des opportunités supplémentaires pour améliorer les propriétés mécaniques du béton.

Bien que cette étude ait mis en évidence des défis dans l'atteinte des niveaux de résistance requis, elle offre également des perspectives prometteuses pour l'optimisation future de la formulation du béton en explorant ces ajustements.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. W. M. Abdias, Etude comparative des propriétés des bétons formulés à base des granulats concassés et différents ciments de la ville de Goma, Faculté des Sciences et Technologies appliquées, ULPGL, Goma, 2016-2017 ;
- [2] A. Ally, Support de cours de Physique et technologie du béton, cours inédit, Faculté des Sciences et Technologies appliquées, ULPGL, Goma, 2021-2022 ;
- [3] G. D. Jean FESTA, Nouveau guide du béton et de ses constituants, EYROLLES, 8^{ème} Edition, 418p , 1997 ;
- [4] N. F. X. P. 18-540, Granulats-Définitions, conformité, spécifications, indice de classement, P 15-540, 1997, 1997 ;
- [5] R. Maillot, Memento technique des granulats, Paris: P. 166, 2001 ;
- [6] D. K. Misemengo, Travail de fin de cycle, Goma, 2018-2019 ;
- [7] L. Ooreka, Les différents types de sable, 2007 ;
- [8] E. Benaddi, Etude expérimentale/Partie 2/CHAP.3 : Normes, matériaux, mélanges, 2008 ;
- [9] F. Ngapgue, Cours de Mécaniques des sols, Goma, 2019 ;
- [10] D. (G.), Nouveau guide du béton, Eyrolles (1978) ;
- [11] G. Fouad, Cours de matériaux de construction, Faculté de technologie, département de génie civil, université ABOUBEKR BELKAID, 55p ;
- [12] N. 18-597, Granulat-Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10% de fines, 1990 ;
- [13] N. 18-560, Analyse granulométrique pas tamissage, 1990 ;
- [14] S. Kosmatka, Dosage et contrôle des mélanges de béton, 2011 ;

- [15] N. Callaud, Cours de technologie de construction TOME III, les matériaux de construction, ISAVADOGO 2000, 2003 ;
- [16] N. F. P. 18-554, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux, AFNOR, 1990 ;
- [17] N. F. P. 18-555, Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau du sable, , AFNOR, 1990 ;
- [18] F. Ngague, Cours de Mécaique des sols et des Roches, Université libres des Roches, Goma, 2019 ;
- [19] A. Charef, La problématique des granulats au Maroc, Maroc: Mush-Bulton Publishin, 2007 ;
- [20] G. J. FESTA, Nouveau guide du béton, EYROLLES, 1998 ;
- [21] G. FESTA, Nouveau guide du béton et ses constituants, 8eme Edition Eyrolles, 1998.
- [22] A. M. Salah, Formulation_de_Dreux_Gorisse, Université Batna, Algérie ;
- [23] N. 18-423, Confection des Bétons : confection des éprouvettes 16*32 (mise en place par piquetage), 2012 ;
- [24] N. 18-404, Bétons-Essai d'information-Confection et concervation des éprouvettes 16*32, 1981 ;
- [25] N. F. P. 18-451, Béton frais essai d'affaissement au cône, Béton et constituants du béton T2 ciment et chaux, recueil de normes françaises AFNOR, 1990 ;
- [26] N.N.P.18-451, Béton, Essai d'affaissement, 1981 ;
- [27] British Standard, 1881-BS, partie 116, 1983 ;
- [28] N. e. E. 196-3, Méthodes d'essai des ciments, partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité, AFNOR Tome 3, 1995.

ANNEXES

ANNEXE 1 : ESSAI SUR LES GRANULATS

1. Compositions granulométriques du sable Mont-Goma

Taille Maille (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât %
6,3	0	0	0	100
5	67,87	67,87	2,642	97,36
4	68,46	136,33	5,306	94,69
3,15	69,31	205,64	8,0041	92
2,5	47,88	253,52	9,868	90,13
2	70,92	324,44	12,63	87,37
1,6	81,23	405,67	15,79	84,21
1,25	85,27	490,94	19,11	80,89
1	107,97	598,91	23,31	76,69
0,8	96,73	695,64	27,08	72,92
0,63	141,19	836,83	32,57	67,43
0,5	152,29	989,12	38,5	61,5
0,4	186,21	1175,33	45,75	54,25
0,315	199,25	1374,58	53,5	46,5
0,25	236,65	1611,23	62,72	37,28
0,2	257,71	1868,94	72,75	27,25
0,16	188,08	2057,02	80,07	19,93
0,125	215,02	2272,04	88,44	11,56
0,1	78,08	2350,12	91,48	8,525
0,08	219,01	2569,13	100	0

2. Composition granulométriques du gravier concassé 15/25

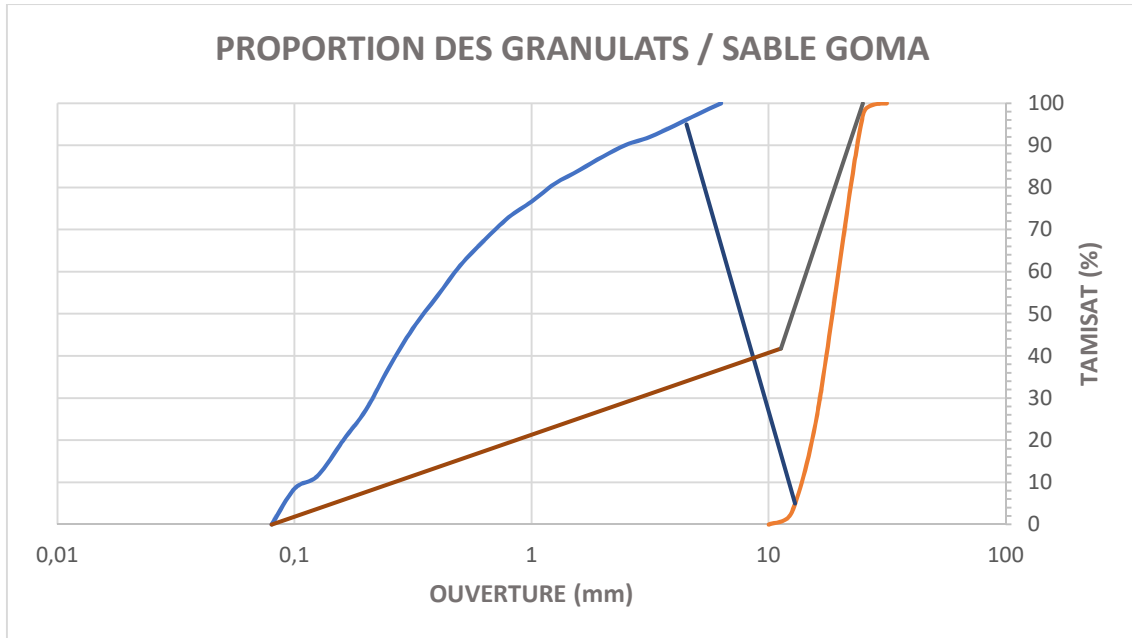
tamis maille (mm)	Refus partiel (kg)	Refus cumulé (kg)	Refus %	Tamisât %
31,5	0	0	0	100
25	0,128	0,128	2,5869038	97,413096
16	3,524	3,652	73,807599	26,192401
12,5	1,15	4,802	97,049313	2,9506871
10	0,146	4,948	100	0

3. Compositions granulométriques du sable SAKE

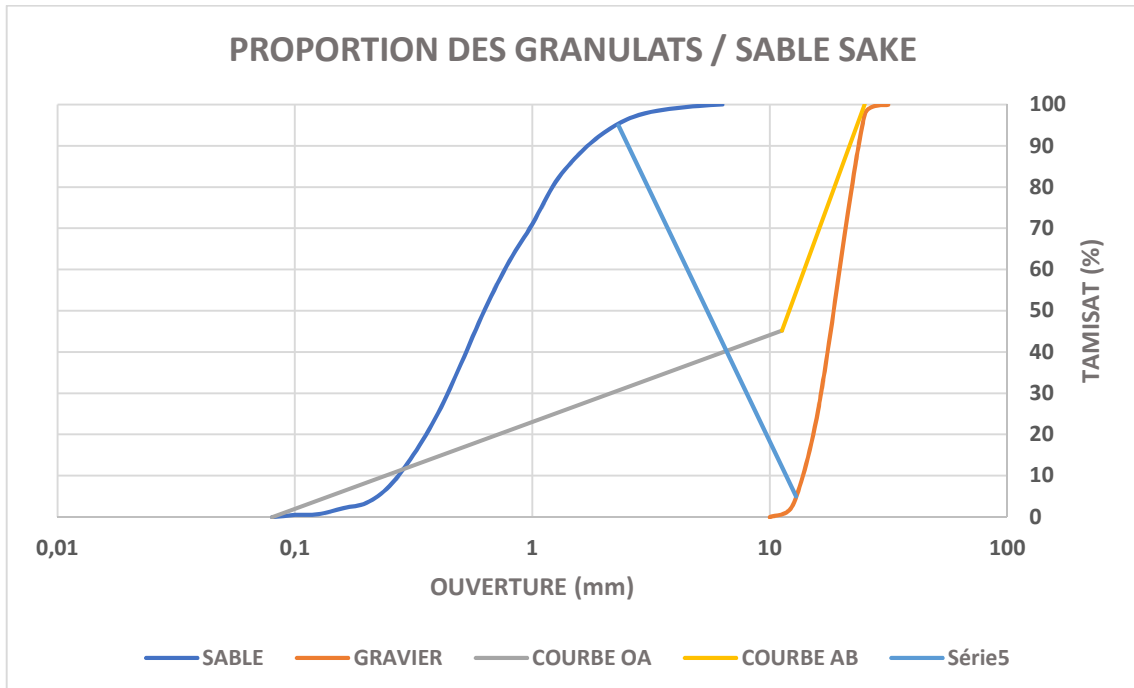
Taille Maille (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé %	Tamisât %
6,3	0	0	0	100
5	9,54	9,54	0,3324	99,668
4	15,87	25,41	0,8854	99,115
3,15	25,62	51,03	1,7782	98,222
2,5	51,96	102,99	3,5888	96,411
2	91,9	194,89	6,7912	93,209
1,6	136,02	330,91	11,531	88,469
1,25	207,76	538,67	18,771	81,229
1	289,18	827,85	28,848	71,152
0,8	258,94	1086,79	37,871	62,129
0,63	336,74	1423,53	49,605	50,395
0,5	377,65	1801,18	62,765	37,235
0,4	344,97	2146,15	74,786	25,214
0,315	288,78	2434,93	84,848	15,152
0,25	217,41	2652,34	92,424	7,5756
0,2	117,48	2769,82	96,518	3,4818
0,16	36,12	2805,94	97,777	2,2232
0,125	42,95	2848,89	99,273	0,7265
0,1	4,79	2853,68	99,44	0,5596
0,08	16,06	2869,74	100	0

ANNEXE 2 : COMPOSITION GRANULAIRE

1. Proportion des granulats / SABLE MONT-GOMA



2. Proportion des granulats / SABLE SAKE



ANNEXE 3 : LA MASSE VOLUMIQUE DU BETON (Etat frais)

CONFECTION DU BETON (SABLE DU MONT-GOMA)				
N°	Masse de la moule (kg)	Masse de la moule + béton (kg)	Volume de la moule (cm ³)	Masse volumique (g/ cm ³)
01	6,184	20,984	7716,864	1,9179
02	6,224	21,202	7716,864	1,9409
03	6,278	20,968	7716,864	1,9036
Moyenne				1,9208
CONFECTION DU BETON (SABLE DE SAKE)				
N°	Masse de la moule	Masse de la moule + béton	Volume de la moule	Masse volumique
01	6,348	20,924	7716,864	1,8888
02	6,246	20,538	7716,864	1,8520
03	6,186	20,618	7716,864	1,8701
Moyenne				1,8703

ANNEXE 4 : LA MASSE VOLUMIQUE DU BETON (Etat durci)

CONFECTION DU BETON (SABLE DU MONT-GOMA)			
N°	Masse de l'éprouvette (kg)	Volume de la moule (cm ³)	Masse volumique (g/ cm ³)
01	14,398	7716,864	1,865
02	14,488	7716,864	1,877
03	14,222	7716,864	1,842
Moyenne			1,861
CONFECTION DU BETON (SABLE DE SAKE)			
N°	Masse de la moule (kg)	Volume de la moule	Masse volumique
01	14,346	7716,864	1,859
02	14,056	7716,864	1,821
03	14,220	7716,864	1,842
Moyenne			1,840

ANNEXE 5 : RESISTANCE EN COMPRESSION DES EPROUVETTES EN MPa

FORMULATION AVEC LE SABLE DU MONT-GOMA				
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
fc28 (MPa)	15,683	12,851	16,564	15,032
FORMULATION AVEC LE SABLE DE SAKE				
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
fc28 (MPa)	16,153	15,483	15,322	15,652