

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
CENTRE DE THIES



GC.0015

Département de Génie Civil

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Sujet :

**CONTRIBUTION A L'ELABORATION D'UNE
METHODE DE FORMULATION DES BETONS DE
COQUILLAGES**

Présenté par : M. Ndongo GUEYE

Directeur : Dr. Ibrahima Khalil CISSE

ANNEE ACADEMIQUE: 2004 - 2005

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Notre défunt professeur, Dr. Amadou SARR

Mes parents

Mes frères et sœurs

La grande famille polytechnicienne

Tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à Allah qui nous a accordé santé et vie, permettez moi d'exprimer toute ma profonde et sincère gratitude à l'endroit de tout ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce rapport.

Parmi eux je veux citer :

- Le professeur Ibrahima K. CISSE du département génie civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès pour avoir accepté d'assurer la direction de ce projet.
- Monsieur Ahmadou Moustapha DIALLO, ingénieur Génie Civil au ministère de la santé, pour sa disponibilité et son assistance permanente ;
- Monsieur Mouhamed D. DIEDHIOU, ingénieur Génie Civil à la SOSETRA ;
- Monsieur Mactar SYLLA, ingénieur Génie Civil et professeur vacataire à l'ESP Thiès ;
- Monsieur Amadou M. DIONGUE, technicien en Génie Civil à MAXIBAT ;
- Madame Adu T. GAYE du laboratoire de chimie de l'ESP Thiès ;
- Monsieur Madiaw GUEYE, technicien en Génie Civil et tous ses collaborateurs notamment Cheikh SARR et Amadou NIANG du laboratoire de géotechnique de l'ESP Thiès.

SOMMAIRE

Ce projet, qui s'inscrit dans le cadre de la valorisation des granulats locaux, avait pour objectif d'élaborer une méthode de formulation des bétons de coquillages. L'étude s'est intéressée aux coquillages de classe 3/8, 8/16 et 16/25 provenant d'une part des cotes marines de la région de Ziguinchor et d'autre part de Nangane dans la région de Kaolack. Elle revêt un intérêt certain en ce sens qu'elle permet, dans certaines circonstances, de pallier les coûts prohibitifs de transport des granulats concassés où l'exploitation est concentrée autour de la région de Thiès. D'autant plus que l'Etat a décidé de lancer un programme de prospection minière devant conduire à terme à la délocalisation des carrières situées dans certaines forêts classées menaçant ainsi les exploitants présents dans ces zones de Thiès.

Après avoir localisé les matériaux généralement utilisés comme granulats à béton, cette étude expose l'ensemble des problèmes liés aux granulats concassés issus des roches massives qui sont extraites des carrières.

Ensuite elle fait un bref aperçu sur le béton et ses constituants avant de parler de l'influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons conduisant ainsi à une étude expérimentale.

Ce chapitre qui est la partie pratique du projet s'articule autour de la caractérisation des matériaux utilisés et des méthodes de composition retenues. Il présente ainsi les caractéristiques des bétons confectionnés d'abord avec la méthode de Dreux puis avec celle proposée.

Une étude économique est ensuite réalisée pour évaluer la compétitivité de ces bétons dans le marché national, tout en proposant des domaines d'application dans le secteur du bâtiment en général.

Des recommandations sont enfin formulées sur les conditions de mise en œuvre d'une part, et d'autre part sur les axes d'orientation pour aboutir à une méthode afin de mieux maîtriser les paramètres.

I.1.1. Composition et analyse chimique.....	28
I.1.2. Autres caractéristiques.....	28
I.2. L'eau de gâchage.....	29
I.3. Le sable.....	29
I.4. Les granulats de coquillages.....	33
I.4.1. Origine et disponibilité.....	33
I.4.2. Caractéristiques chimiques.....	35
I.4.3. Caractéristiques géométriques.....	36
I.4.4. Caractéristiques pondérales.....	38
I.4.5. Caractéristiques physiques.....	39
II. Composition et dosage des mélanges.....	41
II.1. Généralités.....	41
II.2. Application de la méthode de DREUX et GORISSE.....	42
II.2.1. Définition des données retenues.....	42
II.2.2. Notes de calculs.....	43
II.2.3. Caractéristiques mécaniques des bétons confectionnés.....	46
II.2.3.1 Confection et mûrissement des éprouvettes.....	46
II.2.3.2 Présentation et interprétation des résultats d'essais.....	47
II.3. Proposition d'une méthode empirique.....	50
II.3.1. Définition des données retenues.....	50
II.3.2. Présentation et interprétation des résultats d'essais.....	53
CHAPITRE IV : ETUDE ECONOMIQUE ET DOMAINES D'UTILISATION ...	56
I. Etude économique.....	56
II. Domaines d'utilisation.....	57
CONCLUSION & RECOMMANDATIONS	59
REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE	61

LISTES DES TABLEAUX

	Page
II.1 Les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P 15-301)	10
II.2 Spécifications des résistances à la compression des ciments suivant leur classe	11
II.3 Propriétés physiques et chimiques normalisées des ciments courants	11
II.4 Les familles de roches magmatiques	13
II.5 Type de sable selon la valeur de ES	14
II.6 Tableau général montrant les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons	19
II.7 Concentration maximale suggérée dans l'eau de gâchage pour qu'elle soit utilisable (critères chimiques)	20
II.8 Principales actions des impuretés les plus courantes susceptibles d'être rencontrées dans une eau de gâchage	21
II.9 Synoptique d'utilisation des principaux adjuvants	66
II.10 Désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams	23
II.11 Consistance cibles pour différents types d'ouvrage et de mises en place	23
II.12 Récapitulation des principales qualités des bétons en fonction de leur G /S et de leur granularité continue ou discontinue	25
III.1 Composition du ciment de la SOCO CIM	28
III.2 Résultats essais granulométriques sur sable de Kaolack	30
III.3 Résultats Equivalent de sable sur sable de Kaolack	31
III.4 Résultats essais poids spécifique sur sable de Kaolack	31
III.5 Résultats essai granulométrique sur sable de Ziguinchor	31
III.6 Résultats Equivalent de sable sur sable de Ziguinchor	32
III.7 Résultats essais poids spécifique sur sable de Ziguinchor	32
III.8 Composition chimique des coquillages	35
III.9 Résultats essai granulométrique sur coquillages 3/8 de Kaolack	68
III.10 Résultats essai granulométrique sur coquillages 8/16 de Kaolack	68
III.11 Résultats essai granulométrique sur coquillages 16/25 de Ziguinchor	68
III.12 Résultats essai poids spécifique sur coquillages de Kaolack	39
III.13 Résultats essai poids spécifique sur coquillages de Ziguinchor	39
III.14 Valeurs estimées du coefficient granulaire G	44
III.15 Correction en % sur le dosage en eau	44

III.16	Valeurs du coefficient de compacité en fonction de certains paramètres69
III.17	Composition d'un m ³ des bétons avec méthode de Dreux46
III.18	Dimensions des moules en fonction du D des granulats48
III.19	Résistances moyennes en compression avec Dreux49
III.20	Récapitulatif des résultats des essais sur les bétons composés71
III.21	Composition d'un m ³ des bétons avec méthode proposée53
III.22	Résistances moyennes en compression avec méthode proposée54
III.23	Récapitulatif des résultats des essais sur les bétons composés73
III.24	Comparaison des prix des graviers concassés et des coquillages57

LISTE DES FIGURES

	Page
I.1 Carte géologique du Sénégal	63
I.2 Régions de production des granulats concassés	64
III.1 Courbe granulométrique du sable de Kaolack	30
III.2 Courbe granulométrique du sable de Ziguinchor	32
III.3 Coquilles d'arches ou Arcas ("pagnes")	33
III.4 Coquilles d'huîtres ("yoxos")	34
III.5 Coquilles de cymbium ("yët")	34
III.6 Courbe granulométrique classe 3-8	36
III.7 Courbe granulométrique classe 8-16	37
III.8 Courbe granulométrique classe 16-25	37
III.9 Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport E/C	69
III.10 Abaque expérimental C.E.S. donnant une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment	70
III.11 Parements des éprouvettes après démoulage (classe 8/16 et 16/25) avec composition de Dreux	71
III.12 Aperçu des lignes de rupture après écrasement : composition de Dreux	72
III.13 Parements des éprouvettes après démoulage avec méthode proposée	73
III.14 Aperçu des lignes de rupture après écrasement : composition proposée	74
III.15 Coquillages formés de coquilles accouplées deux à deux.	74

INTRODUCTION

Le béton reste et demeurera encore longtemps un matériau privilégié de la construction, surtout avec le couple béton-acier que l'on retrouve avec bonheur dans le béton armé ou le béton précontraint. Après l'eau, il est ainsi l'un des produits les plus utilisés à travers le monde. Au Sénégal, avec l'explosion que connaissent actuellement les secteurs du bâtiment et des travaux publics, la demande en matériaux de construction ne cesse d'augmenter.

Ces matériaux concernent essentiellement les granulats de calcaire, basalte, grès ou latérite qui sont obtenus suite au concassage des roches massives extraites des carrières dont l'essentiel est concentré autour de la région de Thiès. Leurs coûts sont ainsi prohibitifs à cause du transport et des charges d'énergie de concassage. D'autant plus que l'état sénégalais a décidé de suspendre l'octroi et/ou le renouvellement de permis pour l'exploitation de carrières ou de mines dans les 233 zones de conservation des forêts du pays. Menaçant ainsi les exploitants présents dans certaines zones de Thiès, qui assurent plus de 62% de la production, de délocalisation vers les sites de Diack ou du Sénégal oriental. Avec comme conséquence les coûts de transport qui deviendront encore plus chers que le prix du matériau lui-même, surtout dans les régions comme Ziguinchor, Saint Louis, etc. situées à des centaines de Kilomètres des zones exploitées. Cependant la plupart des régions confrontées à ces prix très onéreux liés au transport des matériaux, ont un point en commun à savoir l'immense gisement de coquillage, matériau naturel et peu onéreux, dont elles disposent ce qui suscite alors, des questionnements pour leur utilisation dans le génie civil.

Le choix des granulats pour béton doit, en effet, être un choix technico-économique ; c'est-à-dire il doit permettre de trouver le meilleur compromis : les granulats les moins chers compatibles avec la qualité et la durabilité optimales. C'est ainsi que notre projet, qui s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, s'intéresse à l'étude des bétons de coquillage, qui loin d'égaliser les bétons classiques, proposent une alternative intéressante de matériau de substitution surtout pour les régions confrontées au coût prohibitif du transport. Il s'agira dans cette étude d'établir une formulation permettant de voir dans quels cas, les granulats de coquillages offrent au béton les meilleures caractéristiques de résistance et de durabilité.

Toutefois, la recherche sur l'emploi des granulats locaux autres que les granulats concassés extraits des carrières n'est pas une chose nouvelle. Les recherches développées sur les bétons

de sable réalisées par Dr. Ibrahima Khalil CISSE, professeur à l'ESP centre de Thiès et l'étude sur la caractérisation mécanique et thermophysique des bétons de pierre ponce effectuée par l'ingénieur Mansour Sarr LOPEZ sont quelques unes des nombreuses perspectives entreprises par les chercheurs et ingénieurs du pays. Il convient également de signaler que le béton de coquillage est un matériau ancien, utilisé bien avant les indépendances. Il était tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats concassés qui permettent d'obtenir facilement des niveaux élevés de résistance. Il continue néanmoins d'être utilisé en Mauritanie.

Le premier chapitre traite de la problématique des granulats, graviers essentiellement, au Sénégal tout en parcourant les principaux sites où ils se localisent. Avant d'exposer au chapitre III l'étude expérimentale portant sur l'identification des matériaux utilisés et les dosages et compositions considérés, nous traiterons d'abord au chapitre II des constituants du béton et de l'influence de leurs caractéristiques sur les propriétés de ce dernier. Le chapitre IV quant à lui sera consacré à l'étude économique et aux domaines d'application de ces bétons. La dernière partie est réservée à la conclusion et aux recommandations.

CHAPITRE I : PROBLEMATIQUE DES GRANULATS (GRAVIERS ESSENTIELLEMENT) AU SENEGAL.

Au Sénégal, les granulats utilisés dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics proviennent essentiellement du concassage des roches basaltiques, des calcaires, des grès et des graveleux latéritiques. L'exploitation est assurée par plus de 40 structures attributaires de titres miniers. Les installations de production de granulats concassés varient en fonction de la roche exploitée et de la demande. La granularité des matériaux produits couvre une large gamme : 3/8, 8/16, 16/25 et 25/40. Dans ce chapitre, il est question de faire une localisation des différents matériaux exploités avant d'exposer leur problématique.

I. LOCALISATION DES MATERIAUX

- **Le basalte**

Environ 50% de la production des granulats de basalte sont absorbées par le secteur routier pour la réalisation des enrobés. Avec le décret présidentiel n° 72-662 qui interdit depuis 1972 l'exploitation des granulats dans la région de Dakar, l'essentiel des gisements exploités se localise alors, à Diack et dans le bassin sédimentaire.

- Le basalte de Diack

Il est localisé à 30 Km de Thiès (dans le département de Khombole). Pratiquement toute l'exploitation de matériaux basaltiques au Sénégal est concentrée sur ce site de Diack dont les réserves sont aujourd'hui entamées.

- Dans le bassin sédimentaire

Le gisement de Sène Sérère se situe à 3 Km au nord de Pout et l'indice de basalte de Keur Mamour, Thiéo, Khazabe localisé à 8 Km au Sud-Ouest de Thiès, est peu étudié et se situe en pleine forêt classée.

- Au Sénégal oriental

Dans le socle au Sénégal oriental on note également les dolérites des monts bassarides localisées à l'Ouest de Kédougou.

- **Les calcaires**

Les $\frac{3}{4}$ de la production des granulats calcaires sont destinés à l'industrie du bâtiment, le reste étant consacré aux pierres ornementales ou exploité par la SOCOCIM et les ciments du Sahel pour la fabrication de ciment. Les calcaires se répartissent ainsi :

- Les calcaires du Lutétien Supérieur de Bargny qui affleurent entre Bargny et Rufisque. Le gisement est constitué de bancs de calcaire et de niveaux marneux pouvant atteindre 15 m d'épaisseur. Il est situé sous un recouvrement sablo-argileux brun noirâtre de 0 à 50 cm d'épaisseur.
- Les calcaires du Paléocène qui se localisent à Bandia (gisement constitué d'un horizon supérieur de calcaires coquilliers et d'un horizon inférieur à niveaux siliceux riches en éléments détritiques), à Popenguine-Déyane (gros blocs massifs, très fossilifères et très durs), à Mbour (calcaire massif, coquiller) et à Panthior (gros blocs durs et très karstifiés)
- Les calcaires de la vallée du Ferlo : affleurent à Keur Momar Sarr, à 1 Km au sud de M'Beuleukhé et à Yang-Yang.
- Les calcaires de la vallée du Sénégal qui affleurent à Ouroussogui, Ogo, Kanel et à l'ouest de Thilogne.

- **Les grès**

Ils sont destinés exclusivement à la confection de bétons hydrauliques ; on distingue :

- Le grès du Maestrichtien qui est subaffleurant dans le massif de Ndiass où il est recouvert par des formations latéritiques.
- Le gisement de Paki-Toglou qui se trouve à 50 Km de Dakar, à l'ouest de Paki village, sur la route de Diamniadio Mbour. C'est un grès rosâtre, à ciment siliceux et à grains fins.
- Les grès de Ndoyane, se situent à 1 Km de Ndoyane, vers Toubab-Dialao, mais l'accès y est difficile. Ils sont durs à ciment siliceux, recouverts par des calcaires marneux daniens.
- Le grès quartzique de Balé, à 170 Km de Tambacounda, sur la route Tambacounda-Kidira, fut exploité par la Régie des Chemins de Fer. Actuellement le gisement est attribué à un carrier privé.
- Le grès de Ségou Madina Kouta au Sénégal Oriental.

- **La latérite**

La quasi-totalité des graveleux latéritiques extraits est utilisée dans le domaine routier, seule une faible partie est utilisée par le secteur du bâtiment. La latérite est surtout dans la région de Thiès.

II. PROBLEMATIQUE DES GRANULATS (GRAVIERS)

Presque toutes les carrières exploitées sont concentrées au tour de la région de Thiès (Figure I.2) posant ainsi le problème de couverture du territoire national. Pour les régions comme

Ziguinchor, Saint louis, etc., le problème d'approvisionnement réside en grande partie sur le coût du transport, avec le prix de revient de ce dernier qui double tous les 30 Km rendant ainsi très onéreux le coût du matériau dans ces régions.

De plus, le 23 juillet 2003, le ministre de l'Energie, des Mines et de l'Hydraulique annonçait, lors d'une conférence de presse, le lancement d'un programme de prospection minière devant conduire à terme à la délocalisation des carrières situées dans certaines forêts classées. Il affirmait, en effet, que la forêt ne pouvait gagner d'espace en raison du tourisme et de l'agriculture, que la priorité du gouvernement était donc de privilégier l'environnement dans le peu de forêts qui sont classées [2]. Cette décision menace ainsi les exploitants présents dans les zones de Thiès, Pout, Bandia, Ndiass et Nianing de délocalisation vers les sites de Diack, Bargny ou du Sénégal oriental qui d'après des études réalisées par les géologues ne peuvent satisfaire la demande nationale et celle de la Gambie qui s'approvisionne aussi au Sénégal. En effet, l'ensemble des sites que l'Etat se propose de fermer représente 65% de la production nationale en granulats concassés, le site de Diack 20 à 25% et Bargny quelque 18% [2]. Concernant le site de Diack, les géologues affirment qu'il est en voie d'épuisement et offre une possibilité d'expansion réduite, voire nulle. En effet, c'est un gisement de basalte dont la roche de nature magmatique s'enfonce en profondeur, contrairement aux gisements des zones des forêts classées où la roche de nature sédimentaire s'étale en surface. Ce qui signifie que là où les sites menacés de fermeture couvrent des milliers d'hectares, Diack s'étale sur environ 100 à 120 hectares [2]. Et cette configuration des gisements a un impact direct sur les méthodes et coûts d'extraction. La roche basaltique étant plus dure et plus abrasive, l'équipement y est plus lourd et plus onéreux. La question de la sécurité plus aiguë. Dans la mesure où il faut travailler plus en profondeur, en saison des pluies le travail ne peut se poursuivre sans l'aide de motopompes qui ajoutent encore aux dépenses. Tout cela rend plus cher, en bout de chaîne, le prix du basalte qui entre dans la construction de logement ; y compris les logements sociaux.

Pour Bargny, le calcaire est argileux ce qui donne une mauvaise qualité du béton. Dans aucun des grands travaux de l'Etat, il n'est autorisé à utiliser cette qualité de matériau, pour des raisons de sécurité. Seuls des particuliers prennent le risque de le faire. De plus, avec le projet de ville nouvelle de Diamniadio, cette zone est à éviter.

Les zones de Bakel et de Kédougou qui se trouvent à 800 Km de Dakar, où est concentrée la presque totalité des grands chantiers, offrent une solution qui n'est économiquement pas viable en raison du coût de transport, car quand on travaille sur les pondéraux, le transport coûtera alors plus cher que le matériau.

Ce secteur qui ne connaît, actuellement, pas de problèmes majeurs voit ainsi, son avenir menacé et doit alors, trouver des solutions économiquement viables lui permettant de continuer à assurer une production en quantité et en qualité. La valorisation des granulats locaux dans les régions, loin des carrières exploitées en général, peut ainsi, permettre de réduire les coûts des matériaux et par conséquent des constructions.

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES BETONS DE CIMENT

I. DEFINITIONS

Par définition, le béton est un matériau composite artificiel, constitué de particules minérales inertes cimentées par un liant pour former une masse dense et homogène.

Selon le ciment et leur dosage, il est possible d'obtenir une infinité de bétons aux caractéristiques pouvant varier en fonction de la nature des granulats, de leur mélange, des colorants, des adjuvants, de la mise en œuvre, des traitements ultérieurs.

Cependant, on peut les regrouper en trois grandes catégories suivant leur masse volumique :

- Les bétons légers dont la masse volumique selon les modalités de la norme ASTM, ne dépasse pas 1850 kg/m^3 , utilisés le plus souvent en isolation thermique ;
- Les bétons courants ou de densité normale, que l'on utilise pour de très nombreux ouvrages (fondations, structures, murs, ouvrages industriels, ponts, ...) ont leur masse volumique, déterminée d'après la norme ACNOR, se situant entre 2150 et 2500 kg/m^3 ;
- Les bétons lourds que l'on emploie dans des fonctions de lestage ou de production, aussi bien mécanique pour des chambres fortes que vis-à-vis des rayonnements nucléaires. Leur masse volumique séchée à l'air est supérieure à 2500 kg/m^3 .

Il est à noter que ces valeurs limites de masse volumique ne sont pas rigoureusement figées et varient plus ou moins selon les auteurs.

II. CONSTITUANTS ET PROPRIETES DES BETONS

II.1. Les constituants des bétons

On appelle mortier ou béton les matériaux obtenus en gâchant dans un malaxeur (ou manuellement) des proportions convenables de ciment, d'eau et de granulats avec éventuellement un ou plusieurs adjuvants. C'est d'une part la dimension D du plus gros granulat qui détermine l'appellation : mortier pour $D \leq 4 \text{ mm}$, bétons pour $D \geq 4 \text{ mm}$, et d'autre part le nombre de constituants granulaires : qui est de un pour le mortier et d'au moins deux pour le béton.

Les différents granulats forment le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les adjuvants forment la pâte liante. Lorsqu'il n'y a pas de squelette granulaire, on parle alors de "pâte pure de ciment".

II.1.1. Le liant

Le liant est un élément actif qui, mélangé avec de l'eau ou un autre lubrifiant, peut lier les granulats et donner du mortier ou du béton. Dans le cas courant, le liant utilisé est un liant hydraulique ; c'est-à-dire un produit ayant la propriété de durcir au contact de l'eau et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Il existe essentiellement deux types de liants hydrauliques : le ciment et la chaux hydraulique. Nous nous intéresserons au premier dans cette étude.

• Fabrication et composition du clinker

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. En proportions réduites, il y a également de la magnésie (MgO) et des alcalis (soude NaO et potasse K₂O).

Calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1400 à 1600 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement est le clinker.

Les oxydes se combinent en début de fusion pour former des silicates et aluminates hydrauliques :

- Le silicate tricalcique : 3CaO SiO_2 , que l'on écrit C₃S et qui représente 45 à 65% du clinker,
- Le silicate bicalcique : 2CaO SiO_2 , que l'on écrit C₂S (10 à 30%),
- L'aluminate tricalcique : $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$, que l'on écrit C₃A (5 à 15%),
- L'alumino-ferrite tétracalcique : $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$ que l'on écrit C₄AF (5 à 15%).

Le clinker, auquel on ajoute quelques pourcentages de gypse est ensuite finement broyé (moins de 1/10^e de mm) de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 g/cm³.

• Autres constituants des ciments

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Dans la mesure où ils sont des sous-produits d'autres industries, ils contribuent aussi à en amoindrir le prix de revient. On appelle "constituant principal", un constituant excédant 5% en masse.

Nous pouvons citer entre autres constituants :

- Le laitier granulé de haut fourneau (S) : sous produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques ;
- Les pouzzolanes naturelles (Z) : sont des substances d'origine volcanique ou des roches sédimentaires ayant une composition appropriée. Elles peuvent aussi être des argiles et des schistes activés thermiquement. Les pouzzolanes n'ont pas de propriétés hydrauliques intrinsèques ; mais en présence de la chaux libérée par le clinker au cours de son hydratation, elles forment elles aussi des hydrates stables, semblables à ceux qui sont formés à la suite de l'hydratation du clinker. Les constituants qui, par le même processus que les pouzzolanes, conduisent également à la formation d'hydrates stables sont réputés avoir des propriétés pouzzolaniques.
- Cendres volantes (V ou W) : proviennent du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques alimentées au charbon. On distingue les cendres volantes siliceuses (pouzzolaniques) des cendres volantes calciques (hydrauliques et parfois, pouzzolaniques).
- Les fumées de silice (D) : sont des sous produits de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de $0.1\mu\text{m}$). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface spécifique supérieure à $15\text{ m}^2/\text{g}$. les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques.
- Les fillers (F) : sont des constituants secondaires des ciments, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent jamais excéder 5% en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité par exemple).

•Caractéristiques normalisées des ciments courants

Ces caractéristiques concernent la composition du ciment, les résistances à la compression, les propriétés physiques et les propriétés chimiques.

La composition du ciment donne les proportions des constituants qui entrent dans la définition du type. Elle est déclarée par le fabricant qui s'engage à ne pas faire varier les proportions au-delà d'une fourchette de ± 5 points. Le tableau II.1 ci après donne les différents types de ciments et leur composition ; les valeurs limites écrites en gras sont garanties.

Notation	Clinker (K)	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland			
CPA-CEM I	95 - 100	-	0 - 5
Ciment Portland composé			
CPJ-CEM II/A	80 - 94	6 - 20*	-
CPJ-CEM II/B	65 - 79	21 - 35*	-
(°) Les constituants autres que le clinker sont : <ul style="list-style-type: none"> - Le laitier granulé de haut fourneau (S), les pouzzolanes naturelles (Z), les cendres volantes siliceuses (V), les cendres volantes calciques (W), les schistes calcinés (T), les calcaires (L) ; - les fumées de silice (D), en proportion limitée à 10 % ; - les fillers (F), en proportion limitée à 5% (constituant secondaire compté avec les autres constituants). 			
Ciment de haut fourneau			
CHF-CEM III/A	35 - 64	36 - 65*	0 - 5
CHF-CEM III/B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
CHF-CEM III/C	5 - 19	81 - 95*	0 - 5
* Laitier granulé de haut fourneau (S) uniquement.			
Ciment pouzzolanique			
CPZ-CEM IV/A	65 - 90	10 - 35*	0 - 5
CPZ-CEM IV/B	45 - 64	36 - 55*	0 - 5
* Les constituants autres que le clinker sont : <ul style="list-style-type: none"> - les pouzzolanes naturelles (Z) et les cendres volantes siliceuses (V) ; - les fumées de silice (D), en proportion limitée à 10%. 			
Ciment au laitier et aux cendres			
CLC-CEM V/A	40 - 64	18 - 30*	0 - 5
CLC-CEM V/B	20 - 39	31 - 50*	0 - 5
* Pouzzolanes naturelles (Z) ou cendres volantes siliceuses (V)			
Les valeurs limites garanties sont en caractère gras			

Tableau II.1 : Les cinq types de ciments courants et leur composition (NF P 15-301)

Concernant les résistances à la compression, le contrôle de la production doit respecter les valeurs caractéristiques inférieure (Li) et supérieure (Ls) du tableau II.2 présenté ci-dessous et aucune valeur élémentaire ne peut être inférieure à la limite garantie (Li_G).

Désignation de la classe	Résistance à la compression (MPa)			
	A 2 jours	A 28 jours		
	Li	Li _G	Li	Ls
32.5 et 32.5 R	13.5 *	30	32.5	52.5
42.5	12.5	40	42.5	62.5
42.5 R	20			
52.5	20	50	52.5	-
52.5 R	30			

Li_G est la limite inférieure garantie, c'est-à-dire telle qu'aucune valeur élémentaire ne lui soit inférieure
 * Pour les ciments de classe 32.5 la limite inférieure est garantie à 7 jours (et non à 2 jours comme pour les autres ciments) ; elle vaut 17.5 MPa.

Tableau II.2 : Spécifications des résistances à la compression des ciments suivant leur classe

Les propriétés physiques et chimiques normalisées sont données dans le tableau II.3 avec la référence des normes correspondantes ; toutes les propriétés ne sont pas considérées par tous les ciments et les limites peuvent varier selon la classe et selon le type.

Propriétés	Normes d'essai
Propriétés physiques	
Temps de début de prise	NF EN 196-3
Stabilité	NF EN 196-3
Retrait	NF P 15-433
Propriétés chimiques	
Perte au feu	NF EN 196-2
Résidu insoluble	NF EN 196-2
Teneur en sulfates	NF EN 196-2
Teneur en chlorures	NF EN 196-21
Teneur en oxyde de magnésium	NF EN 196-2
Pouzzolanité (*)	NF EN 196-5
(*) Pour les types CPZ-CEM IV	
On remarque que tous les essais sur les ciments sont maintenant harmonisés au niveau européen (à l'exception de celui du retrait, cette caractéristique n'étant pas retenue par la prénorme européenne ENV 197, partie 1 « ciments courants »).	

Tableau II.3 : Propriétés physiques et chimiques normalisées des ciments courants

II.1.2. Les granulats

Les granulats sont définis par la norme P 18-540 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de base et de roulement des chaussées, des assises et des ballasts de voies ferrées. On distingue :

Les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) ;

Les granulats artificiels, qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

La norme P18-540 qualifie de granulats légers les produits dont la masse volumique réelle est inférieure à 2 t/m^3 . Ce sont essentiellement des argiles, des schistes, des laitiers expansés ou encore des pouzzolanes ; ils sont destinés à la préparation de bétons légers.

Les granulats pour bétons hydrauliques concernés par la norme P 18-541 ont des masses volumiques réelles supérieures ou égales à 2 t/m^3 .

La norme P 18-540 considère les granulats « lourds » au même titre que les granulats courants. Ces granulats lourds sont utilisés dans la fabrication de bétons de protection d'ouvrages maritimes (blocs, tétrapodes) ou de bétons isolants vis-à-vis des radiations ionisantes.

II.1.2.1. Les caractéristiques des roches pour granulats

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives, caractérisées par leur composition minéralogique, leur texture, leur état d'altération, leur porosité. De ces caractéristiques dépendront les propriétés des granulats (résistances mécaniques, absorption d'eau ou porosité, homogénéité, gélivité, altérabilité, réactivité aux alcalins, etc.).

- **Les roches massives**

Elles viennent des profondeurs de l'écorce terrestre où la matière, qualifiée de magma, est soumise à de hautes pressions et à des températures élevées. Elles appartiennent à deux grandes familles :

- A texture grenue, si le magma se refroidit lentement ; ce sont les roches intrusives ou plutoniques (granite, gabbro),
- A texture microgrenue ou microlithique, si le magma s'est refroidi rapidement en s'épanchant à la surface de l'écorce terrestre ; ce sont les roches effusives ou volcaniques (rhyolite, basalte).

Le tableau II.4 suivant donne les principales familles rencontrées.

	Roches grenues	Roches microgrenues
Roches à feldspaths alcalins :		
avec quartz	Granite	Rhyolite
sans quartz	Syénite	Trachyte
Roches à feldspaths calcosodiques :		
avec quartz	Granodiorite	Dacite
sans quartz	{ Diorite Gabbro Diabase Dolérite	Andésite Basalte Ophite

Tableau II. 4 : Les familles de roches magmatiques

- Les roches sédimentaires

Elles représentent environ 75% de la composition de la surface du globe et sont formées à basse température contrairement aux roches magmatiques.

Elles forment une importante famille dont nous retiendrons :

- les grès et grès quartzites (roches détritiques) ;
- les roches carbonatées (roches d'origine chimique et biogène) ;
- les cherts et silex (roches d'origine chimique et biogène).

Les grès et grès quartzites proviennent de la cimentation de sables (quartz dans les quartzites) par de la silice. Leur résistance est essentiellement fonction de leur degré de remplissage des vides entre les grains (porosité).

Les calcaires offrent une grande variété d'origine et de structure certains sont détritiques, d'autres ont une origine chimique ou biochimique. Leur structure varie de l'amas non consolidé de coquilles aux roches cristallines et crypto cristallines compactes [4].

- Les roches métamorphiques

Elles résultent de la transformation de roches magmatiques et/ou sédimentaires sous l'action de la température et des pressions subies pendant leur enfouissement ou au contact de corps chauds. Suivant l'intensité du métamorphisme et l'origine des roches mères, il existe une grande variété de roches. On citera :

- les gneiss (origine : granites, porphyres, diorites, etc., roches sédimentaires schisteuses) sont utilisés comme pierres de taille en maçonnerie ;

- les quartzites (origine : grès quartzite) sont utilisées comme granulats pour béton ou comme empierrement de chaussées en pavage.

- **Autres roches**

- Les latérites : elles peuvent être considérées comme des roches sédimentaires par le fait qu'elles résultent d'une accumulation et d'une cimentation de roches transportées ou existant sur place et qui sont des concrétions ou des grains de quartz altérés. On peut aussi les considérer comme des roches métamorphiques en ce sens qu'elles résultent d'un processus d'altération de roches mères silico-alumineuses en climat tropical favorisant le départ de la silice et des bases solubles et l'enrichissement relatif en oxydes et hydrates non solubles tels qu'hydroxyde de fer et d'alumine. Suivant le degré d'altération et des conditions climatiques, on obtiendra des latérites ferralitiques (en zones humides) ou ferrugineuses (en zones sèches) qui ont des caractéristiques mécaniques différentes [4]. Elles sont utilisées, de manière très timide, comme granulats à béton mais constituent le matériau de base dans le domaine routier.

- Les sables : la terminologie sable est granulométrique et regroupe toutes les roches meubles de dimensions comprises entre 0.02 et 2 mm. Toutefois les sables sont des roches sédimentaires du fait de leur mode de formation. En effet, ce sont des dépôts anciens ou actuels résultant d'un processus d'érosion, d'altération et de sédimentation de roches massives. On distingue les sables éoliens ou des dunes et les sables marins. Le tableau II.5 suivant donne les différents types de sables classés selon leur valeur d'équivalent de sable.

ES à vue	ES piston	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 \leq ES < 85$	$70 \leq ES < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75 : ES à vue = 80).
ES \geq 85	ES \geq 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II.5 : Types de sable selon la valeur de ES

II.1.2.2. Les spécifications normalisées des granulats

La norme P18-541 définit les spécifications de base auxquelles doivent satisfaire tous les granulats destinés à la préparation de bétons hydrauliques.

Elle spécifie dans des annexes normatives des exigences particulières ou complémentaires pour certaines caractéristiques des granulats lorsqu'ils sont les constituants de [5] :

- Bétons d'ouvrages d'art de résistance caractéristique $f_{ck} \geq 36$ MPa et bétons de bâtiment de résistance caractéristique $f_{ck} > 20$ Mpa ;
- Bétons soumis à des environnements agressifs de classe 3 (actions des sels fondants), de classe 4 (environnement maritime), de classe 5 (milieu sulfaté, etc.) ;
- Bétons apparents ou devant subir une mise en peinture à l'état brut de décoffrage.

Pour les bétons non armés, de petits éléments fabriqués en usine, de résistance caractéristique $f_{ck} \leq 16$ Mpa, utilisés à l'intérieur (environnement de classe 1) ou à l'extérieur (classe 2), mais avec une protection par enduit traditionnel conforme aux normes ou par bardage, les critères de conformité requis se limitent à la granularité, à la propreté, aux teneurs en éléments prohibés (en soufre total, en sulfates, en chlores).

II.1.2.3. L'influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons

Les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles des bétons : soit il y a une influence directe sur une propriété particulière du béton, soit il y a une influence sur le rapport E/C nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue, avec toutes les conséquences qui en résultent sur la résistance et la durabilité. Pour réduire les coûts on cherche, autant que possible, à utiliser les granulats disponibles localement ; dans quelques cas, cependant, le choix peut être orienté par le ou les objectifs techniques comme la maniabilité, l'aspect des parements, les résistances, la durabilité.

Certaines de ces propriétés sont présentées dans le tableau II.6 suivant :

<p>Nature minéralogique</p>	<p>Les caractéristiques intrinsèques des granulats en dépendent. On peut, notamment, remarquer que :</p> <ul style="list-style-type: none"> - un granulat calcaire à faible coefficient de dilatation thermique est favorable pour s'opposer à la fissuration de retrait thermique, mais défavorable du point de vue de la tenue dans un milieu agressif acide ; - la présence de clivages dans les minéraux (micas, feldspaths, etc.) accroît les retraits.
<p>GRANULARITE DES SABLES</p> <p>(passant à 0.08mm ≤ 12%)</p> <p>(MF : 1.8 à 3.2)</p>	<p>C'est l'un des termes les plus importants à considérer dans l'établissement d'une formulation de béton, notamment pour les paramètres suivant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - teneur en fines - teneur en éléments fins jugés par le module de finesse - continuité et régularité de la granularité <p>La teneur en fines. Les fines confèrent au béton frais un pouvoir de rétention d'eau qui permet de s'opposer au ressuage et une cohésion qui assure le maintien de l'homogénéité (absence de ségrégation). Leur excès devient défavorable car il accroît la demande en eau, donc le rapport E/C. Leur absence ne permet pas d'obtenir un béton suffisamment compact et réduit les résistances mécaniques.</p> <p>Le module de finesse (MF) permet de juger globalement de la granularité d'un sable : un module de finesse élevé indique un sable grossier, un module faible caractérise un sable fin. Sa valeur dépend surtout de la teneur en grains fins du sable. La norme, tenant compte des caractéristiques des gisements, fixe les limites à 1.8 et 3.2, mais l'optimum qui donnera le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité se situe à 2.5 ± 0.35 environ.</p> <p>Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable (norme P 18-541).</p>

<p>GRANULARITE DES GRAVILLONS</p> <p align="center">d/D</p>	<p>Elle est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer en fonction de critères liés à la mise en œuvre (notamment la densité de ferrailage dans les coffrages). Les spécifications fixent les limites pour le passant au tamis intermédiaire $(d+D)/2$ garantissant une continuité suffisante ne nuisant pas à la maniabilité.</p>
<p>ABSORPTION D'EAU</p> <p align="center">$Ab \leq 5 \%$</p> <p align="center">ou</p> <p align="center">$Ab \leq 2.5 \%$</p>	<p>C'est une mesure des pores accessibles à l'eau. Une valeur élevée est défavorable pour la durabilité des bétons car elle facilite la carbonatation, la pénétration de l'eau et des chlorures, la dégradation par le gel. Elle nuit aussi au maintien de la maniabilité du béton frais, ce qui peut se compenser par un pré mouillage des granulats.</p> <p>Une absorption d'eau (porosité) élevée diminue le module d'élasticité et accroît le fluage. Par contre, une très faible absorption d'eau favorise le ressuage.</p>
<p>RESISTANCE MECANIQUE LOS ANGELES</p> <p align="center">$LA \leq 40$</p> <p align="center">ou</p> <p align="center">$LA \leq 30$</p> <p>Friabilité des sables (alluvionnaires et recyclage)</p> <p align="center">$FS \leq 60$</p> <p align="center">ou</p> <p align="center">$FS \leq 40$</p>	<p>On la mesure, pour les gravillons, par un essai de fragmentation (essai Los Angeles) dont le résultat intervient peu sur les caractéristiques des bétons (sauf pour les bétons à hautes performances). On limite sa valeur pour ne pas risquer d'avoir un mélange dont la granularité pourrait évoluer pendant le malaxage ou le transport en camion toupie, ce qui modifierait les propriétés des bétons.</p> <p>La friabilité des sables est une mesure globale d'homogénéité appliquée aux sables alluvionnaires et aux produits de démolition. Une valeur élevée indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons, surtout des dallages et des chaussées.</p>

<p align="center">COEFFICIENT D'APLATISSEMENT DES GRAVILLONS</p> <p align="center">A ≤ 30 % ou A ≤ 25 % ou A ≤ 20 %</p>	<p>C'est une mesure de la quantité d'éléments plats et allongés qui permet de juger de la forme des grains.</p> <p>Une mauvaise forme nuit à la maniabilité, ce qui risque d'être compensé par un accroissement du dosage en eau, et favorise la ségrégation et l'apparition de défauts d'aspect.</p>
<p align="center">HOMOGENEITE</p> <p align="center">≥ 95 %</p>	<p>C'est une mesure, peu courante, de la teneur en grains légers, de masse volumique inférieure de 400 kg/m³, par rapport à celle de l'échantillon d'un granulats. Ces grains légers sont souvent des éléments altérés, friables, nuisibles quant à l'aspect des parements et à leur durabilité, à la tenue au gel et à la résistance à l'usure des dallages et des chaussées.</p>
<p align="center">IMPURETES PROHIBEES</p> <p align="center">≤ 0.1 %</p>	<p>Il s'agit de débris de végétaux, charbons, grains légers, etc. déterminés par triage manuel sur tamis. Ces éléments nuisent à la durabilité du béton et à l'aspect des parements et surtout des dallages et des chaussées.</p>
<p align="center">ALCALI REACTION</p>	<p>Les granulats doivent être qualifiés vis-à-vis de l'alcali réaction lorsqu'il y a un risque identifié pour l'ouvrage ou l'élément d'ouvrage en béton.</p> <p>Il doit être possible de connaître leur teneur en alcalins actifs afin de pouvoir, éventuellement, établir le bilan des alcalins d'une formulation de béton si l'on se trouve en présence de granulats potentiellement réactifs PR ou non qualifiés.</p>
<p align="center">PROPRETE DES GARNULATS</p>	<p>Pour les fillers (correcteurs granulométriques), le critère retenu est la valeur de bleu à la tache V_{Bta} qui est la quantité, en grammes, de bleu de méthylène adsorbée par cent grammes de fillers. C'est une mesure indirecte de la surface spécifique des fillers qui permet de détecter et de qualifier la pollution par les argiles dont la nocivité dépend de la dimension (toujours très fine) des particules (on obtient des valeurs de V_{Bta} de l'ordre de 30 pour une</p>

	<p>montmorillonite, de 5 pour une illite et de 2 pour une kaolinite).</p> <p>Pour les sables, le dispositif de contrôle est à double détente. On pratique une mesure d'équivalent de sable (essais de floculation des argiles) et, si le résultat n'est pas conforme, un essai de bleu à la tâche (V_{Bta}).</p> <p>Pour les gravillons, les spécifications françaises considèrent le passant à 0.5 mm, dont la mesure est plus aisée et beaucoup plus fiable que le passant à 0.063 mm du projet européen, assorti d'un contrôle de la non nocivité des fines par la vérification de leur V_{Bta}.</p> <p>La pollution des granulats accroît la demande en eau, fait chuter les résistances et plus particulièrement la résistance au jeune âge, augmente les retraits et nuit à la durabilité des bétons.</p>
<p>CHLORURES</p>	<p>Ils modifient la cinétique d'hydratation du liant et favorisent la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Les normes fixent donc les limites de la teneur en chlorures des bétons en différenciant les bétons non armés, armés ou précontraints.</p> <p>Cependant, on peut dire que le risque est nul pour le béton armé si les granulats renferment moins de 0.06% d'ions Cl^-. Dans le cas contraire, la teneur en chlorures doit être prise en compte pour l'établissement du bilan de ces derniers dans la formulation des bétons.</p>

Tableau II.6 : Tableau général montrant les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons [5].

II.1.3. L'eau

Le rôle de l'eau de gâchage est de permettre entre autres, l'hydratation du ciment ; en effet, 25% de sa quantité est destinée à l'hydratation, le reste étant absorbé ou servant pour l'onctuosité, la viscosité et la plasticité. C'est pourquoi, toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et

mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences), la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables. Les critères auxquels doivent répondre l'eau de gâchage sont consignés dans le tableau II.7.

SUBSTANCES	CONCENTRATION (mg/L)
Chlorures (Cl ⁻) :	
- Béton précontraint/coulis	600*
- Béton armé	2000*
- Béton non armé	4500
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	2000
Sucre :	
- Glucose	100
- Saccharose	100
Phosphates (P ₂ O ₅)	100
Nitrates (NO ₃)	500
Zinc (Zn ²⁺)	100
Sulfures (S ²⁻)**	100
Sodium (Na ⁺)*** Potassium (K ⁺)	Au total 1000
* l'eau peut néanmoins être acceptée si la teneur maximale en chlorures (Cl ⁻) du béton est inférieure à 0.2% par Kg de ciment (béton précontraint), 0.4% par kg de ciment (béton armé), 1% par kg de ciment (béton non armé).	
** N'est exigé que pour les bétons et les coulis en contact direct avec les aciers de précontrainte.	
*** N'est exigé qu'en cas de risque de réaction des granulats avec les alcalins (granulats potentiellement réactifs).	

Tableau II.7 : Concentration maximale suggérée dans l'eau de gâchage pour qu'elle soit utilisable (critères chimiques)

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée. La plus disponible au Sénégal est l'eau potable de la SDE mais il peut arriver que l'on utilise les eaux de pompage en provenance des nappes phréatiques, de cours d'eau, ou parfois l'eau de la mer.

Le tableau II.8 rappelle brièvement, les principales impuretés rencontrées dans les eaux, les actions qu'elles sont susceptibles de générer suivant leurs concentrations.

Composants	Types d'action à craindre
Sulfates	<ul style="list-style-type: none"> - En faible proportion : peut modifier la prise et le durcissement du ciment (qui contient une proportion optimale de sulfate de calcium) - En forte proportion : il y a réaction avec le ciment accompagnée de gonflement (trisulfoaluminate de calcium ou ettringite) préjudiciable à la durabilité du béton. - L'ion soufre est également un oxydant puissant qui peut corroder les armatures, notamment les câbles de précontrainte
Chlorures	<ul style="list-style-type: none"> - En faible proportion : accélération de la prise et réaction avec le ciment (chloroaluminate de calcium). - En forte proportion : corrosion des armatures, des câbles de précontrainte et de toutes les pièces métalliques incorporées au béton.
Sels de : Zinc Cuivre Plomb Etain Manganèse	<ul style="list-style-type: none"> - Retardateur de prise - Les chlorures de zinc et de cuivre sont très puissants - Le nitrate de plomb est, en outre, un puissant inhibiteur de durcissement.
Na ⁺ K ⁺	<ul style="list-style-type: none"> - Les sels de sodium et de potassium sont, en général, très solubles et donc très courants dans les eaux. - En forte proportion, ils peuvent être à l'origine de réactions alcalines avec les granulats ou d'efflorescences inesthétiques.
Les huiles	<p>Organiques ou minérales, leur effet peut varier d'un ciment à l'autre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - En très faible proportion, leur effet lubrifiant est plutôt favorable à la réduction de l'eau de gâchage et à l'augmentation des résistances ; - En plus forte proportion, elles réduisent la bonne liaison pâte-granat et font chuter les résistances.
Les sucres	<p>Réagissent avec le ciment pour donner des sels de calcium (saccharate de calcium).</p> <ul style="list-style-type: none"> - En faible quantité : ce sont de puissants retardateurs. - En plus forte proportion : ce sont des inhibiteurs de durcissement.
Les argiles en suspension	<ul style="list-style-type: none"> - En raison de leur structure minéralogique, les argiles augmentent la demande en eau des bétons et, en augmentant le rapport E/C, contribuent à réduire les résistances mécaniques.

Tableau II.8 : Principales actions des impuretés les plus courantes susceptibles d'être rencontrées dans une eau de gâchage

II.1.4. Les adjuvants

Par définition (norme NF P 18-103) un adjuvant est un produit qui, ajouté en petite quantité (moins de 5% de la masse de ciment) au béton, au mortier, ou à la pâte de ciment, lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités soit sur le béton frais soit sur le béton durci. Ainsi on peut en trouver une très large gamme allant des fluidifiants aux hydrofuges en passant par les plastifiants, les accélérateurs et les retardateurs de prise.

Il est à signaler qu'un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique. Ils ne peuvent entraîner une diminution de certaines caractéristiques du béton que dans les limites précisées par la norme. Leur utilisation ne doit pas aussi nuire aux armatures du béton ou aux aciers précontraints.

En raison de leur prix élevé, les adjuvants ne doivent pas faire l'objet d'une utilisation systématique afin de limiter les coûts de constructions.

II.2. Propriétés des bétons

Les facteurs qui sont à prendre en compte dans l'étude de la composition d'un béton sont extrêmement nombreux. La plupart des méthodes de formulation actuelle permettent théoriquement d'en tenir compte. C'est, en pratique, par des essais d'études en laboratoire ; que l'on pourra les tester et aboutir à une formule de composition convenable ; dans la plupart des cas, elle résultera d'un compromis entre diverses formules qui chacune conférerait au béton certaines qualités en même temps que des défauts [6].

II.2.1. Ouvrabilité

L'aptitude du béton frais à bien se mouler dans les coffrages et autour des armatures tout en restant homogène, bref, à bien se mettre en place, est appelée ouvrabilité. L'ouvrabilité n'est pas en réalité une propriété du béton mais une façon commode de nommer l'objectif à atteindre ; cela s'explique par le fait que sa définition fait intervenir, non pas des grandeurs, mais des jugements de valeur comme "bien se mouler" ou "rester homogène" [5]. En pratique on considère qu'un béton est ouvrable s'il a la consistance (ferme, plastique, très plastique ou fluide) requise pour les conditions de mise en œuvre considérée.

De l'ouvrabilité dépendent en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures,

cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité etc., c'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée comme une qualité aussi importante que la résistance [6]

La mesure de la consistance peut s'effectuer avec différents dispositifs dont le plus répandu est le cône d'Abrams. Les tableaux II.10 et II.11 donnent les classes d'affaissement au cône d'Abrams et les valeurs de consistances cibles pour différents types d'ouvrages et de mises en place.

Affaissement (cm)	Désignation de la consistance
0 à 4	Ferme
5 à 9	Plastique
10 à 15	Très plastique
≥ 16	Fluide

Tableau II.10 : Désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams

Type d'ouvrage	Affaissement au cône (cm)
Bétons filés (séparateurs de voies, etc.), mise en place au tapis	3
Mise en place à la pompe	> 7
Poteaux, piles, tabliers, semelles	9
Mise en place à la benne (banches, planchers)	12
Béton de fondation (non vibré), mise en place à la goulotte	> 14
Pieux, parois moulées	> 18
Bétons à hautes performances	> 18

Tableau II.11 : Consistances cibles pour différents types d'ouvrages et de mises en places

II.2.2. Résistance

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle, pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton, mais nous avons insisté, à travers le paragraphe précédent, sur la qualité d'ouvrabilité et son importance pour pouvoir dire que la résistance est aussi une qualité importante ; ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à étudier de pair car elles sont étroitement dépendantes l'une de l'autre et d'autant plus qu'elles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton.

La résistance du béton est influencée par bon nombre de paramètres parmi lesquels nous pouvons citer :

- Le rapport $\frac{E}{C}$

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît en fonction du dosage en eau E et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport $\frac{E}{C}$ comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Celle-ci étant une fonction sensiblement linéaire de la classe vraie du ciment, en choisissant la formule de Bolomey, qui peut s'écrire : $f_{c28} = G \cdot \sigma' \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$, elle pourrait nous faire croire que l'on obtiendrait des bétons de résistance analogue quelque soit le dosage en ciment à condition de maintenir le même rapport $\frac{C}{E}$ en déduisant le dosage en eau E à partir de la valeur choisie pour le dosage en ciment ; il n'en est rien, car en choisissant par exemple un faible dosage en ciment on trouvera un dosage en eau faible, et d'autant plus que la valeur de $\frac{C}{E}$ sera plus grande, et l'on obtiendra alors à coup sûr un béton beaucoup trop sec (et vice versa). Le dosage en ciment est donc fonction de $\frac{C}{E}$ mais en même temps du dosage en eau nécessaire pour obtenir une plasticité et une ouvrabilité convenables. On peut ainsi exprimer le principe selon lequel : à plasticité équivalente le dosage en ciment doit être d'autant plus élevé que le rapport $\frac{C}{E}$ est grand [6].

- Le rapport $\frac{G}{S}$

Le rapport $\frac{G}{S}$ correspond au rapport des volumes absolus qui correspondent aux poids si G et S ont même poids spécifique. L'influence de la composition granulaire du béton est

relativement faible, tant en ce qui concerne les proportions relatives de sable et de gravier (rapport G/S) que la continuité ou discontinuité de la courbe granulométrique [6]. Les appréciations concernant cette influence sur les différentes qualités des bétons sont résumées dans le tableau II.12 : il y apparaît en effet que pour des rapports de $G/S \leq 2$ (valeurs les plus courantes) l'influence du rapport G/S est relativement faible, tandis que la résistance augmente plus sensiblement pour des valeurs plus élevées de G/S surtout pour les bétons fermes ; mais pour des raisons d'ouvrabilité il ne convient pas de dépasser $G/S = 2$ à 2.2 pour les bétons courants sauf à prendre des précautions particulières à la mise en œuvre [6].

Il en résulte que le facteur G/S n'est pas particulièrement prépondérant. Par contre, la granularité du sable définie par exemple par son module de finesse est un facteur très important.

Caractéristiques	Appréciations concernant les bétons	
	à G/S élevé par rapport à ceux à G/S faible	à granularité discontinue par rapport à ceux à granularité continue
Ouvrabilité	un peu moins bonne surtout pour $G/S > 2.2$	moins bonne surtout pour $G/S > 2.2$
Résistance en compression	meilleure, surtout pour $G/S \geq 2.2$	très légèrement supérieure
Résistance en traction	sans corrélation apparente	très légèrement supérieure
Module d'élasticité	sans corrélation très nette sauf pour le module statique un peu plus élevé en fonction de G/S	un peu plus élevé
Vitesse du son	sans corrélation très nette	légèrement supérieure
Indice sclérométrique	Un peu supérieure	très légèrement supérieure
Retrait	sans corrélation très nette	Moins élevé surtout si $G/S > 2.2$
Compacité, densité	Légèrement plus élevée pour $G/S > 2.2$	Un peu plus élevée

Tableau II.12 : Récapitulation des principales qualités des bétons en fonction de leur G/S et de leur granularité continue ou discontinue

- L'adhérence mortier gravier

Une part importante de la résistance (surtout en traction) est fonction de la plus ou moins bonne adhérence du mortier sur la surface des graviers. Cette qualité peut même être plus importante que la résistance et la dureté du gravier lui-même.

Des études ont montré que malgré la qualité de dureté du basalte bien supérieure à celle de la latérite, la résistance en compression à 28 jours était nettement plus élevée avec la latérite pour un même degré de propreté des granulats et un même dosage [7].

II.2.3. Retrait et fluage

Le retrait est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement. Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une époque où le béton très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurerait facilement sous l'effet du retrait.

Le fluage est un phénomène de déformation différée sous charge fixe indéfiniment appliquée.

Le retrait et le fluage ont principalement leur origine dans la pâte de ciment. En général, ces phénomènes sont pris en considération pour les bétons de génie civil contenant 350 à 400 kg de ciment par mètre cube.

II.2.4. Coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique du béton dépend principalement de celui des granulats (sable gravillon) qui occupent environ 70% de son volume. Or, ce dernier peut varier de 6.10^{-6} (granulats calcaires) à 13.10^{-6} (granulats siliceux) [5].

II.2.5. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton dépend fortement de la valeur du module d'élasticité des granulats, qui occupent environ les 2/3 du volume. En choisissant les granulats, on peut donc faire varier significativement la valeur du module d'élasticité du béton à résistance à la compression constante : la réduire, par exemple, en utilisant des granulats légers [8].

Nous avons ainsi exposé à travers ce chapitre les différentes catégories de bétons classées suivant leur masse volumique tout en précisant que ces valeurs ne sont pas rigoureusement figées et varient plus ou moins selon les auteurs. En outre, nous avons défini les différents

constituants entrant dans la composition du béton et les caractéristiques auxquelles ils doivent répondre. L'emploi de granulats présentant de bonnes caractéristiques permettra l'obtention de bétons de qualité, satisfaisant les critères de maniabilité, d'aspect des parements, de résistances et de durabilité et présentant une bonne constance des caractéristiques.

CHAPITRE III : ETUDE EXPERIMENTALE

La formulation d'un béton comporte deux volets : le choix des constituants, tout d'abord, la détermination de leurs proportions, ensuite. Mais avant de passer à la composition des bétons, nous allons d'abord nous intéresser aux caractéristiques des différents constituants employés.

I. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

Il est évident que les propriétés des bétons durcis et frais dépendent, en grande partie, des caractéristiques des matériaux entrant dans leur composition. Ainsi, nous traiterons des caractéristiques des matériaux utilisés à savoir le ciment, le sable, l'eau et les graviers de coquillages dont nous préciserons les origines et les disponibilités. Toutefois, il est à noter que les bétons étudiés sont conçus sans apport d'adjuvants ou d'additions minérales.

I.1. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment ordinaire, normal de type CEM II/A-32.5 R.

I.1.1. Composition et analyse chimique

Le ciment fourni par la SOCOCIM ou les ciments du Sahel est un liant hydraulique constitué de 75% de calcaire, de 20% d'argile et de 5% de gypse. L'analyse chimique de la matière fournie par la SOCOCIM donne la composition consignée dans le tableau suivant :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perte au feu	TOTAL
18.01	3.51	2.87	59.7	24.3	3.18	9.57	99.2
Ce ciment contient 1.47% de chaux libre							

Tableau III.1 : Composition du ciment de la SOCOCIM (pourcentage massique) [9].

I.1.2. Autres caractéristiques du ciment

Concernant les autres caractéristiques, les résultats obtenus sont [9]

- Consistance normale : 28.6% ;
- Prise initiale : 220 mn ;
- Prise finale : 340 mn ;

- Résistance en compression à 7 jours : 24.9 MPa ;
- Résistance en compression à 28 jours : 38.5 MPa ;
- Finesse de mouture : 4164 cm²/g

I.2. L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour cette étude est celle de la Sénégalaise Des Eaux (SDE). C'est une eau potable, exempte de toutes impuretés pouvant altérer la qualité du béton. Elle convient donc, parfaitement pour la confection de ce dernier.

I.3. Les sables

Nous avons associé à chaque coquillage le sable disponible dans la région d'origine. Ainsi, deux sables de dunes provenant respectivement des régions de Ziguinchor et de Kaolack ont été utilisés.

Le premier a servi à la confection des bétons avec les coquillages de classe 16/25. C'est un sable dont les caractéristiques ne respectent pas les spécifications normalisées des granulats pour béton. Il est, en effet, trop fin avec un module de finesse de 1.02, ce qui donnerait une bonne maniabilité du béton mais au détriment de la résistance. En outre, il a un équivalent de sable de 25.5 au piston et de 28.5 à vue, ce qui correspond (tableau II.6) à un sable argileux proscrit pour un béton de qualité car pouvant entraîner des risques de retrait ou de gonflement. Ce sable, quoique, de mauvaise qualité reste le plus utilisé dans cette région car y étant le plus disponible. Nous l'utiliserons donc dans ce projet pour tenir compte des réalités locales et éventuellement pour un béton plus compétitif.

Le sable de Kaolack quant à lui est utilisé pour la confection des bétons avec les coquillages de classes 3/8 et 8/16. C'est un sable de dunes avec un module de finesse de 1.63 qui reste inférieur à la valeur minimale assurant un bon compromis entre la résistance et la maniabilité. On aura donc une bonne maniabilité du béton mais avec des conséquences sur la résistance de celui-ci. Son équivalent de sable est de 67 au piston et de 75 à vue, ce qui correspond, d'après le tableau II.6, à un sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante dont le retrait n'est pas particulièrement craint. Ainsi le sable de Kaolack présente de meilleures caractéristiques que celui de Ziguinchor.

Les poids spécifiques de ces sables de Ziguinchor et de Kaolack sont de 2.62 et 2.61 respectivement ; ce qui est sensiblement le même, car étant tous deux d'origine sédimentaire. Les résultats des essais ainsi que les courbes granulométriques sont présentés aux tableaux ci-dessous.

Tamis	Refus partiels	Refus cum	% Refus	% Passant	Module de finesse
3,15	0	0	0,00	100,00	1,63
2,5	0,13	0,13	0,01	99,99	
2	0,2	0,33	0,02	99,98	
1,25	15,2	15,53	1,04	98,96	
0,8	25,4	40,93	2,73	97,27	
0,5	89,25	130,18	8,68	91,32	
0,315	847,42	977,6	65,17	34,83	
0,2	287,56	1265,16	84,34	15,66	
0,125	179,09	1444,25	96,28	3,72	
0,08	27,88	1472,13	98,14	1,86	

Tableau III.2 : Résultats essais granulométriques sur sable de Kaolack.

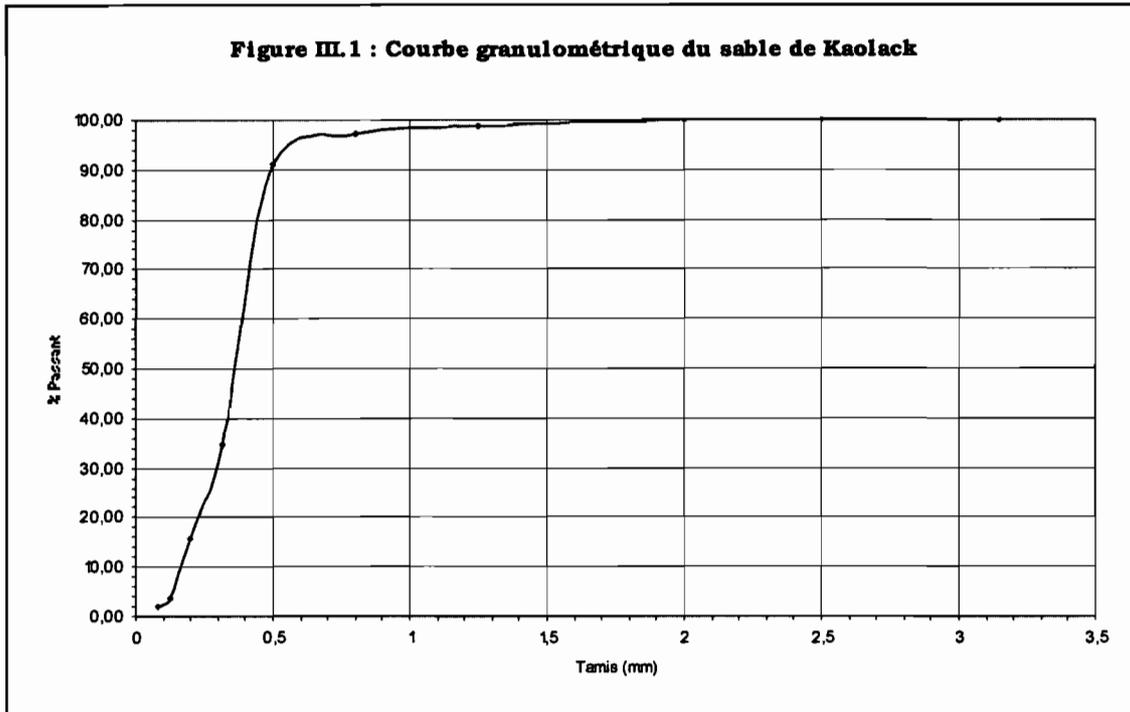


Figure III.1 : Courbe granulométrique sable de Kaolack

Hauteur de flocculat		10,9	11,5
Hauteur du sédiment au piston		7,6	7,3
Hauteur du sédiment a vue		8,5	8,3
Equivalent de sable sur prise	PISTON	69,72	63,48
	A VUE	77,98	72,17
Equivalent de sable sur échantillon	PISTON	66,60	
	A VUE	75,08	

Tableau III.3 : Résultats équivalent de sable sur sable de Kaolack

ESSAI	1	2	3
Pycnomètre seul	84,66	106,72	107,47
Pycnomètre +liquide	331,14	354,13	354,67
Pycnomètre+matériau	109,69	132,57	133
Pycnomètre +mat+liquide	346,95	370,03	370,15
température (°C)	28	28	28
Volume Spécifique	0,996252	0,996252	0,996252
Poids spécifique	2,70	2,59	2,53
	2,61		

Tableau III.4 : Résultats essais poids spécifique sur sable de Kaolack

Tamis	Refus partiels	Refus cumul	% Refus	% Passant	
6,3	0	0	0	100,00	M.F. = 1,02
5	0,75	0,75	0,05	99,95	
4	0,18	0,93	0,06	99,94	
2,5	0,73	1,66	0,11	99,89	
1,8	10,75	12,41	0,83	99,17	
1,25	10,35	22,76	1,52	98,48	
0,8	54,78	77,54	5,17	94,83	
0,5	59,26	136,8	9,12	90,88	
0,315	290,28	427,08	28,47	71,53	
0,2	414,96	842,04	56,14	43,86	
0,125	312,22	1154,26	76,95	23,05	
0,08	107,62	1261,88	84,13	15,87	

Tableau III.5 : Résultats essai granulométrique sur sable de Ziguinchor.

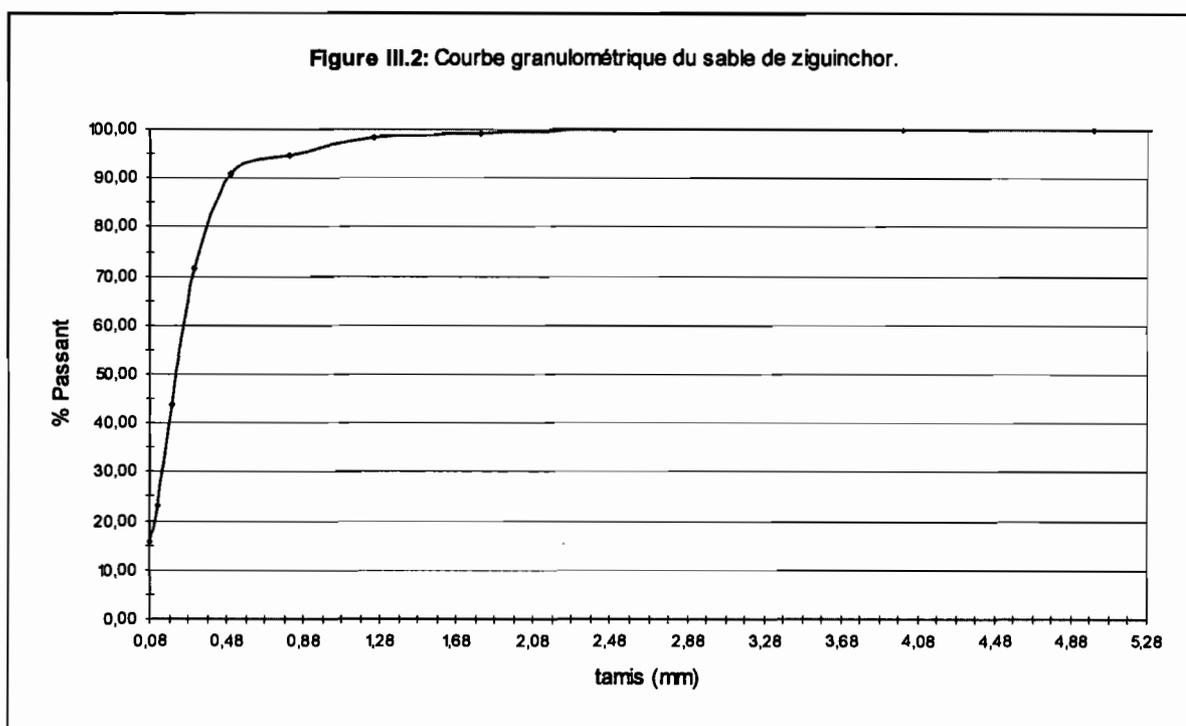


Figure III.2 : Courbe granulométrique sable de ziguinchor.

Hauteur du Flocculat h1 (cm)		34,2	31,8
Hauteur de sédiment au piston h2 (cm)		8,3	8,5
Hauteur de sédiment a vue h'2 (cm)		9,1	9,68
Equivalent de sable sur prise	PISTON	24,27	26,73
	A VUE	26,61	30,44
Equivalent de sable sur échantillon	PISTON	25,50	
	A VUE	28,52	

Tableau III.6 : Résultats équivalent de sable sur sable de Ziguinchor.

ESSAI	1	2	3
Pycnomètre seul	83,83	106,72	107,47
Pycnomètre+liquide	331,47	354,28	355,15
Pycnomètre+matériau	108,83	131,68	132,42
Pycnomètre+mat+liquide	347,24	369,55	370,49
température (°C)	28	28	28
Volume spécifique	0,996252	0,996252	0,996252
Poids spécifique	2,70	2,57	2,59
	2,62		

Tableau III.7 : Résultats essais poids spécifique sur sable de Ziguinchor

I.4. Les granulats de coquillages

I.4.1. Origine et disponibilité

Le coquillage n'est rien d'autre que l'enveloppe protectrice des mollusques (marins, lagunaires ou terrestres) fabriquée à partir de leur propre production de calcaire. Ceux-ci se présentent en deux grandes familles :

- Les escargots de mer dont la coquille a l'aspect d'un petit tuyau enroulé en spirale.
- Les bivalves qui, comme leur nom l'indique, sont des mollusques dont la coquille est dotée de deux valves.

La dynamique de l'évolution géomorphologique de la basse vallée du Sénégal au Quaternaire est marquée par des phases de transgressions et de régressions marines. La dernière grande transgression, celle du Nouatchottien, a mis en place un biotope favorable à la profusion des mollusques coquillés que les populations de cette époque exploitaient pour leur alimentation. Les amas coquilliers sont ainsi des accumulations d'importance variable de coquilles de mollusques marins, lagunaires ou terrestres. Ils peuvent être des dépôts naturels mais également artificiels.

Les principaux dépôts artificiels de coquillages se rencontrent en Basse Casamance : Kagnout, Boukote, Ouolof, Itou, Nioumoune, Abémé, et dans l'estuaire du Sine et du Saloum : à 8 Km au Sud, Sud Ouest de Foundiougne, à Joal et au sud de Fadial (de 2 à 5 Km) où ils peuvent former de véritables petites collines atteignant 10 m de hauteur. Il en existe également dans la région de Saint Louis à Ndiaoudoune en particulier. [9]

Généralement, les coquillages rencontrés au Sénégal sont des coquilles d'arches ou Arcas (« pagnes »), d'huîtres (« yoxos ») ou de cymbium (« yët ») [10]. Les photos de ces différents types de coquilles sont montrées aux figures III.3 à III.5 suivantes.

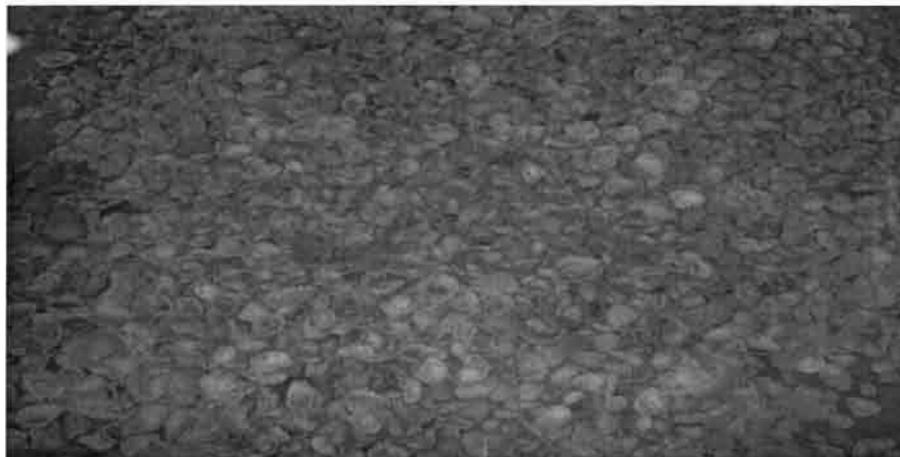


Figure III.3 : Coquilles d'arches ou Arcas ("pagnes")

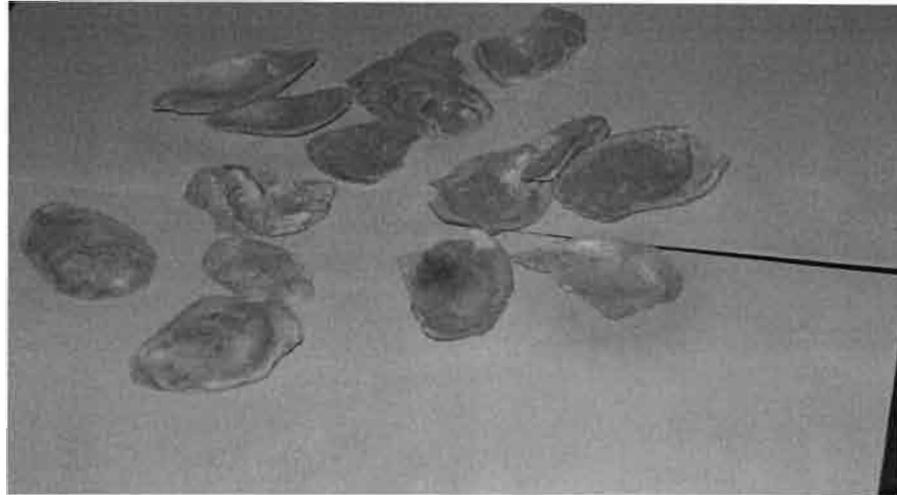


Figure III.4 : Coquilles d'huîtres ("yoxos")

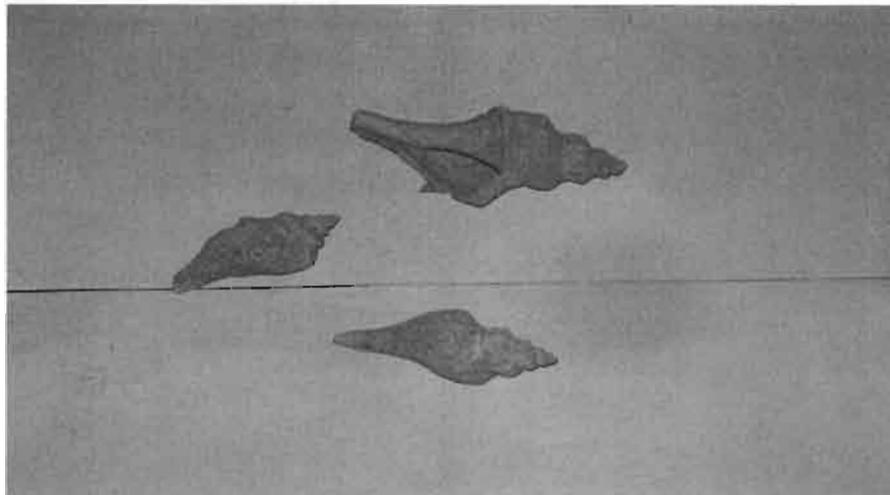


Figure III.5 : Coquilles de cymbium ("yët")

Les coquilles d'arches sont utilisées comme granulats pour béton ou pour la production de la chaux. Elles sont les plus courantes et les plus populaires et sont même utilisées dans la sous région (en Mauritanie surtout) en tant que matériau routier pour les couches de fondation et de base. Leur utilisation, dans le domaine du génie civil, est ancienne et remonte d'avant les indépendances.

Les coquilles de cymbium sont, elles, utilisées comme éléments décoratifs ou comme cendriers dans certains cas.

Quant aux coquilles des huîtres, elles sont surtout utilisées comme produit d'alimentation pour la volaille et ne peuvent être utilisés comme granulats en raison de leur friabilité. Elles sont également utilisées pour la production de la chaux.

I.4. Les granulats de coquillages

I.4.1. Origine et disponibilité

Le coquillage n'est rien d'autre que l'enveloppe protectrice des mollusques (marins, lagunaires ou terrestres) fabriquée à partir de leur propre production de calcaire. Ceux-ci se présentent en deux grandes familles :

- Les escargots de mer dont la coquille a l'aspect d'un petit tuyau enroulé en spirale.
- Les bivalves qui, comme leur nom l'indique, sont des mollusques dont la coquille est dotée de deux valves.

La dynamique de l'évolution géomorphologique de la basse vallée du Sénégal au Quaternaire est marquée par des phases de transgressions et de régressions marines. La dernière grande transgression, celle du Nouatchottien, a mis en place un biotope favorable à la profusion des mollusques coquillés que les populations de cette époque exploitaient pour leur alimentation. Les amas coquilliers sont ainsi des accumulations d'importance variable de coquilles de mollusques marins, lagunaires ou terrestres. Ils peuvent être des dépôts naturels mais également artificiels.

Les principaux dépôts artificiels de coquillages se rencontrent en Basse Casamance : Kagnout, Boukote, Ouolof, Itou, Nioumoune, Abémé, et dans l'estuaire du Sine et du Saloum : à 8 Km au Sud, Sud Ouest de Foundiougne, à Joal et au sud de Fadiol (de 2 à 5 Km) où ils peuvent former de véritables petites collines atteignant 10 m de hauteur. Il en existe également dans la région de Saint Louis à Ndiaoudoune en particulier. [9]

Généralement, les coquillages rencontrés au Sénégal sont des coquilles d'arches ou Arcas (« pagnes »), d'huîtres (« yoxos ») ou de cymbium (« yët ») [10]. Les photos de ces différents types de coquilles sont montrées aux figures III.3 à III.5 suivantes.



Figure III.3 : Coquilles d'arches ou Arcas ("pagnes")



Figure III.4 : Coquilles d'huîtres ("yoxos")

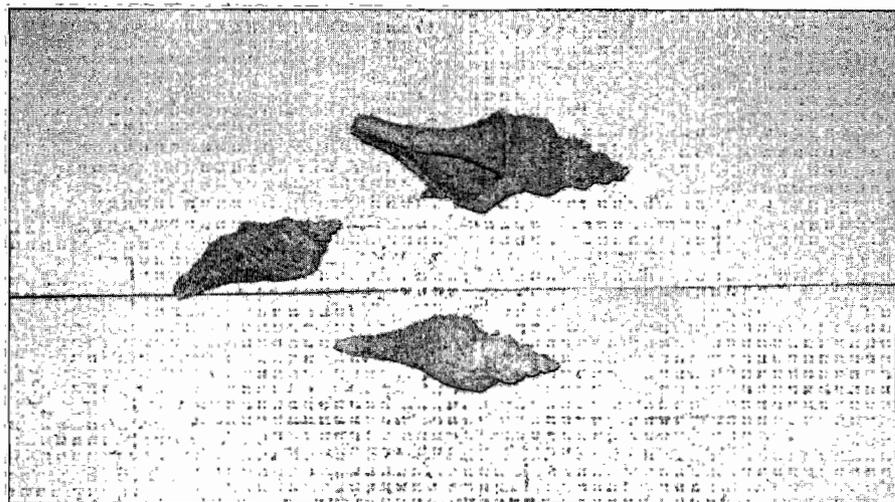


Figure III.5 : Coquilles de cymbium ("yët")

Les coquilles d'arches sont utilisées comme granulats pour béton ou pour la production de la chaux. Elles sont les plus courantes et les plus populaires et sont même utilisées dans la sous région (en Mauritanie surtout) en tant que matériau routier pour les couches de fondation et de base. Leur utilisation, dans le domaine du génie civil, est ancienne et remonte d'avant les indépendances.

Les coquilles de cymbium sont, elles, utilisées comme éléments décoratifs ou comme cendriers dans certains cas.

Quant aux coquilles des huîtres, elles sont surtout utilisées comme produit d'alimentation pour la volaille et ne peuvent être utilisés comme granulats en raison de leur friabilité. Elles sont également utilisées pour la production de la chaux.

Pour ce projet, nous avons utilisé des coquilles d'arches, dont une partie provient des côtes marines de la région de Ziguinchor (classe 16/25) et l'autre partie de Nanghane dans la région de Kaolack (classes 3/8 et 8/16).

I.4.2. Caractéristiques chimiques

Les granulats doivent présenter une grande stabilité chimique vis-à-vis des alcalins afin de ne pas réagir de façon dangereuse avec le ciment. Ces réactions étant dues principalement à un taux élevé de silice amorphe, donc il n'y a pas de risque avec les coquillages car ils sont composés essentiellement de calcaire. L'un des problèmes majeurs avancé souvent par les entrepreneurs et qui fait que les coquillages restent encore très impopulaires dans le domaine du bâtiment est le risque d'une teneur élevée en chlorures en raison de ses origines marines. En effet, ces ions modifient la cinétique du liant et favorisent aussi la corrosion des armatures ou des câbles de précontrainte. Mais les normes fixent des limites de la teneur en chlorures selon le type de béton (non armé, armé ou précontraint) tel qu'il est montré au tableau II.7. Le tableau III.8 ci-dessous, qui donne la composition chimique des coquillages, montre bien que la teneur en chlorures de ceux-ci est relativement faible pour altérer le béton ou corroder les armatures, mais peuvent néanmoins accélérer la prise dans certains cas.

Compositions	Coquillages de Ziguinchor	Coquillages de Kaolack
Chaux	55.95	56.09
Chlorures	0.23	0.108
Fer	0.07	0.06
Oxydes de titanes	0.02	0.02
Aluminium	0.1	0.06
Sodium	0.14	0.14
Oxyde de soufre	0.05	0.05
Manganèse	0	0
Oxyde de potassium	Traces	Traces
Oxyde de magnésium	Traces	Traces
Silice	Traces	Traces

Tableau III.8 : Composition chimique des coquillages (% massique)

I.4.3. Caractéristiques géométriques

- Formes et textures des granulats

Ces deux caractéristiques ont une influence directe sur la maniabilité du béton frais d'une part, mais aussi et surtout sur la résistance du béton durci d'autre part. Nous avons montré qu'elle détermine la qualité de la liaison liant-granat qui, si elle n'est pas bonne constitue une zone de rupture privilégiée face aux sollicitations.

Les granulats de coquillage étudiés proviennent des côtes marines ou fluviales, ils ne sont ni concassés ni roulés et ont une forme recroquevillée ce qui fait toute leur particularité comparés aux granulats classiques (courants).

- Granulométrie

La courbe granulométrique traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires dans le matériau. La granulométrie du matériau influe sur le dosage, l'ouvrabilité, le retrait et le coût du béton. Les trois classes granulaires étudiées dans ce projet sont les classes 3/8, 8/16 et 16/25.

La granulométrie des coquillages a été étudiée conformément à la norme NF P 18-560. Les courbes granulométriques sont présentées ci après.

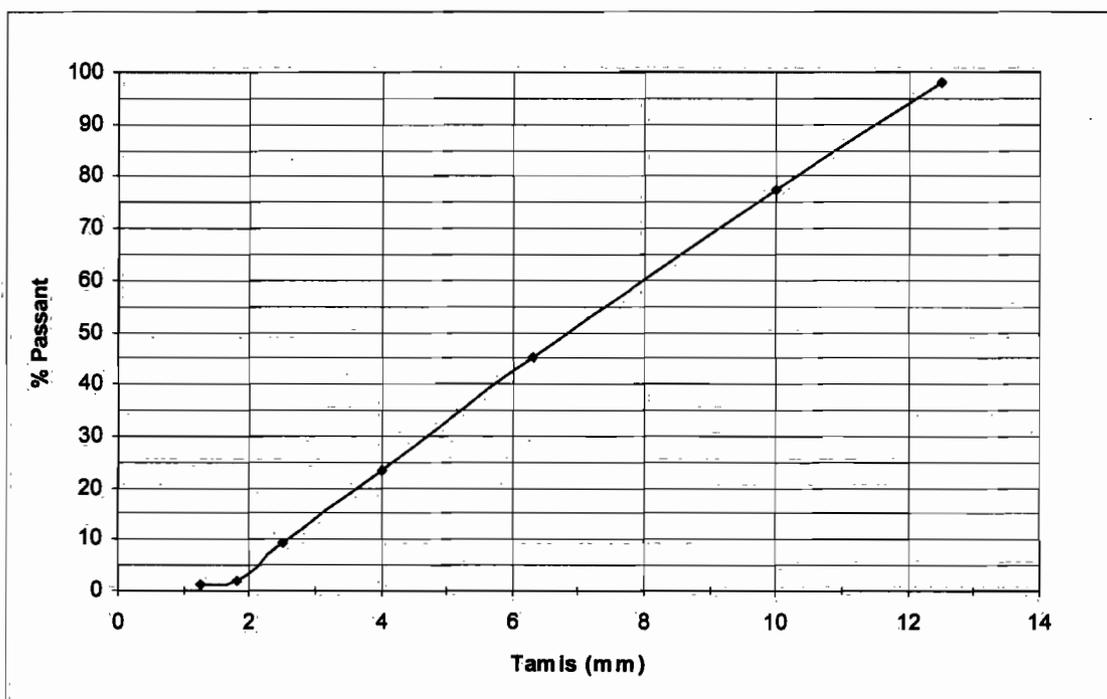


Figure III.6 : Courbe granulométrique classe 3-8

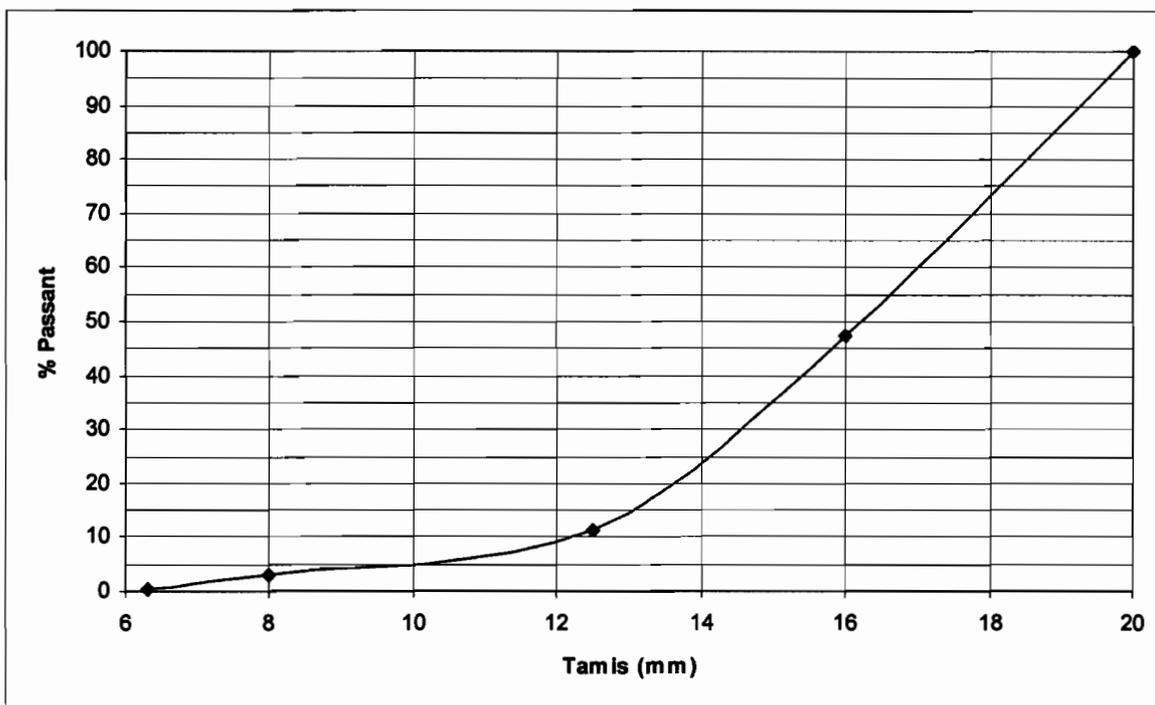


Figure III.7 : Courbe granulométrique classe 8-16

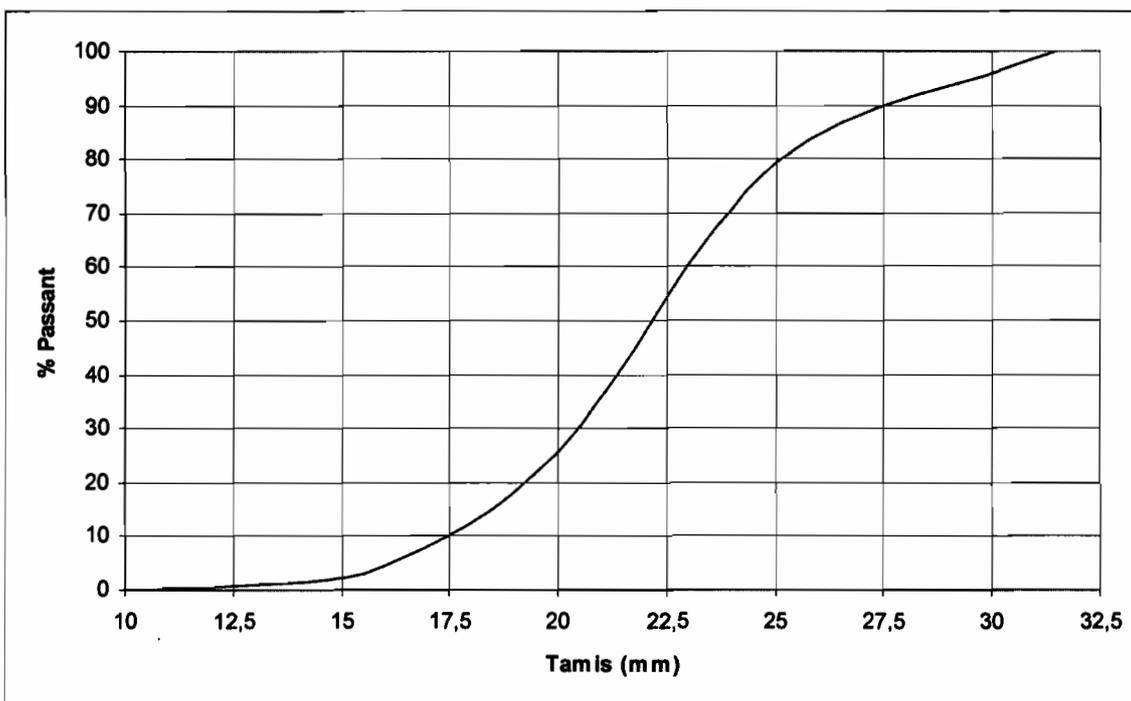


Figure III.8 : Courbe granulométrique classe 16-25.

I.4.4. Caractéristiques pondérales

Ces caractéristiques se regroupent en deux sous ensembles que constituent la masse volumique et la densité.

- Masse volumique en vrac

C'est la masse du granulat sec occupant l'unité de volume ; elle dépend de la classe granulaire étudiée. Ainsi elle ne tient pas compte des vides inter granulaires, c'est donc une masse volumique apparente calculée par la formule suivante :

$$\rho_v = \frac{M_t - M}{V}$$

Où : M_t = masse totale (moule + matériau) ; M = masse du moule = tare

V = volume du moule.

Ainsi nous avons :

$$\rho_v = 1094 \text{ kg/m}^3 \text{ pour la classe 3/8}$$

$$\rho_v = 801 \text{ kg/m}^3 \text{ pour la classe 8/16}$$

$$\rho_v = 815 \text{ kg/m}^3 \text{ pour la classe 16/25}$$

Il convient de noter que la densité apparente des grains décroît quand le calibre augmente (pour le même échantillon), ce qui est normal car le volume des vides inter-granulaire augmente avec la taille des grains. Mais les coquillages de Kaolack diffèrent de ceux de Ziguinchor qui ont, une masse volumique plus élevée pour une même classe. Ces valeurs montrent que les vides inter-granulaires au niveau des coquillages sont très importants.

- Poids spécifique

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains ; elle est ainsi indépendante de la classe granulaire. Ce paramètre permet, lorsqu'on élabore une composition de bétons, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Le poids spécifique est obtenu par la formule suivante :

$$\gamma_s = \frac{(P_3 - P_1)d}{P_3 + P_2 - P_1 - P_4}$$

Avec : P_1 = poids pycnomètre seul + bouchon

P_2 = poids pycnomètre rempli d'eau + bouchon

P_3 = poids pycnomètre rempli de matériau + bouchon

P_4 = poids pycnomètre rempli de matériau + eau + bouchon

d = densité en eau fonction de la température

Les résultats des essais sont présentés ci-dessous.

ESSAI	1	2	3
Pycnomètre seul	734	724	721
Pycno + liquide	1598	1580	1610
Pycno + matériau	1725	1721	1713
Pycno + mat + liquide	2212	2200	2228
température (°C)	28	28	28
Volume spécifique	0,996252	0,996252	0,996252
Poids spécifique	2,62	2,63	2,64
	2,63		

Tableau III.12 : Résultats essai poids spécifique coquillages de Kaolack

ESSAI	1	2	3
Pycnomètre seul	738	724	721
Pycno + liquide	1596	1590	1583
Pycno + matériau	1725	1721	1713
Pycno + mat + liquide	2210	2213	2202
température (°C)	28	28	28
Volume spécifique	0,996252	0,996252	0,996252
Poids spécifique	2,64	2,66	2,65
	2,65		

Tableau III.13 : Résultats essai poids spécifique coquillages de Ziguinchor

I.4.5. Caractéristiques physiques

- Porosité

La porosité représente le pourcentage de vides contenu dans un matériau. Pour une même nature de granulats, la résistance mécanique est une fonction décroissante de la porosité. Les vides au niveau des coquillages sont constitués des trous de la coquille en plus des vides intergranulaires, mais si ces trous sont bien remplis avec du mortier (dans le cas des bétons) les coquillages se comporteraient alors comme les granulats classiques (courants). La résistance du béton dépend essentiellement du remplissage des ces coquilles car un mauvais remplissage aura pour conséquence la présence de vides et le béton sera alors poreux. Ici, cette porosité ne

caractérise pas une absorptivité du matériau, comme c'est le cas avec les granulats légers, mais renseigne plutôt sur les vides intergranulaires et sur la forme des coquilles.

Elle est calculée par la formule suivante :

$$n = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\gamma_h}{\gamma_s} = 1 - c \quad \text{où } c \text{ est la compacité}$$

Avec : V_v = volume des vides, V_t = volume total
 γ_h = densité apparente et γ_s = densité absolue

Ainsi nous obtenons :

$$n = 1 - \frac{1094}{2680} = 59.2\% \text{ pour la classe 3/8}$$

$$n = 1 - \frac{801}{2680} = 70\% \text{ pour la classe 8/16}$$

$$n = 1 - \frac{815}{2650} = 69.2\% \text{ pour la classe 16/25}$$

Nous remarquons que les granulats de coquillage sont alors, très poreux, mais cette porosité n'est pas intrinsèque mais plutôt externe.

- Dureté

Le seul essai de mesure de résistance mécanique exécuté est celui de Los Angeles qui permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des granulats et d'en apprécier ainsi la dureté. L'essai est exécuté conformément à la norme NF P 18-573. Nous avons trouvé pour les granulats de coquillage de Kaolack et de Ziguinchor des valeurs de L.A égales à 48% et 44% respectivement. Ce qui place ces coquillages, du point de vue dureté selon L.A, après le basalte (14%), le calcaire (29%), le grès (35%) mais avant la latérite (62%) [7].

- Propreté des granulats

Elle désigne essentiellement la teneur en fines argileuses, dont la valeur limite acceptable est comprise entre 2 et 5% selon le type de béton.

La propreté peut avoir des incidences sur l'adhérence entre le mortier et les granulats. En effet, une variation de la propreté des granulats, par interruption momentanée de lavage par exemple, peut s'accompagner d'une diminution de la résistance de l'ordre de 10 à 15% [5]. Les granulats destinés à la fabrication de béton doivent être rigoureusement propres ou tout au moins dépourvus de gangues ou pellicules superficielles pouvant nuire à l'adhérence. Les granulats de coquillages ont été utilisés à l'état naturel donc, sans lavage préalable afin qu'ils restent compétitifs dans le cas où le béton confectionné présenterait des propriétés intéressantes. D'autant plus qu'ils présentent à l'état naturel, sous leur aspect physique, une

propreté satisfaisante. Il convient de noter que les coquillages provenant de Ziguinchor contiennent parfois des coquilles d'huîtres, ce qui peut affecter la résistance du béton en raison de la friabilité de ces derniers. Quant à la propreté chimique, ce qu'il faudrait craindre c'est la présence de sel due au voisinage du milieu marin mais nous avons déjà montré au niveau des caractéristiques chimiques que le taux de chlorures est relativement faible alors qu'il est toléré jusqu'à 15 ou 30g/L suivant la classe du béton.

II. COMPOSITION ET DOSAGE DES MELANGES

II.1. Généralités

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage en cause. Cette composition doit être la plus économique possible tout en procurant au béton une bonne maniabilité avec des caractéristiques mécaniques satisfaisantes (résistance, durabilité, apparence).

Depuis que l'on fabrique des bétons, les ingénieurs et chercheurs se sont efforcés d'élaborer des théories, d'effectuer des recherches et essais et d'en déduire des méthodes de composition pour la fabrication de ces bétons. Ces méthodes sont aujourd'hui très nombreuses, mais aucune d'elles ne fait l'unanimité. Parmi ces méthodes nous pouvons citer :

- La méthode d'Abrams : c'est une règle de mélange basée 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 soient, en principe, réduits au minimum.

- La méthode de FAURY : elle est inspirée d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen. La loi de graduation qui en découle est une loi fonction de $\sqrt[3]{d}$; c'est pourquoi FAURY adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[3]{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite.

- La méthode de VALLETTE : l'auteur a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant, un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par "dosage des bétons à minimum de sable" ou "dosage des bétons à granularité discontinue". On calcule les dosages de sable et de ciment devant donner

en principe le mortier plein à minimum de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur sur la "convenance" du béton ; il doit donc être un praticien connaisseur en la matière. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment).

- La méthode de DREUX : l'auteur s'est servi de manière très judicieuse de ce qui est utile dans les méthodes de Faury, de Bolomey, de Vallette, de Joisel, d'Abrams, etc. Elle repose essentiellement sur l'examen statistique d'un très grand nombre de formules de composition. De cette étude statistique ont été tirés, à travers ces formules de composition diverse issues de tous les horizons de la fabrication du béton, des constantes, des similitudes de forme de courbes granulaires de béton, des fuseaux préférentiels, des tendances communes, etc. Cette méthode permet, à partir de données de bases essentielles, d'aboutir approximativement, mais rapidement, aux compositions qui ressortent en moyenne de l'examen statistique des bétons les plus couramment utilisés dans la pratique.

La diversité de ces méthodes et les nombreux paramètres à choisir en fonction de divers autres différemment appréciés a pour conséquence de faire varier à l'infini les compositions utilisées. La méthode de DREUX qui est la plus connue et la plus utilisée en Afrique sera alors utilisée pour la formulation des bétons de coquillages avant la proposition d'une méthode empirique plus appropriée.

II.2. Application de la méthode de DREUX

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantiers et ayant donné satisfaction.

II.2.1. Définition des données retenues

Notre but est de définir les quantités des différents composants à malaxer, pour se procurer un béton répondant non seulement aux exigences du maître d'œuvre (résistance en général) mais également à la durabilité qu'un maître d'ouvrage est en droit d'attendre.

Nous voulons ainsi réaliser un béton ayant :

- Une résistance moyenne désirée à 28 jours, dans les conditions habituelles, fixée à 20 MPa ; en effet les bâtiments courants sont, en général, dimensionnés sur la base d'une résistance tournant autour de 20 à 25 MPa. Cette dernière étant en général choisie dans le cas

des granulats courants (calcaires, basalte, latérites, etc.) qui sont plus résistantes avec des formes plus favorables, dues au concassage, que les granulats de coquillages. C'est pourquoi nous nous fixons cette valeur de 20 MPa qui est assez satisfaisante dans certains cas de dimensionnement.

- Une ouvrabilité que l'on caractérise par un affaissement au cône d'Abrams fixé dans un intervalle de 5 à 10 cm, ce qui correspond à un béton plastique d'après le tableau II.10. Le béton sera mis en place à l'aide d'une vibration normale.

Pour ce béton nous disposons :

- d'un ciment CEM II/ A-32.5 R de "classe vraie" égale à 38.5 MPa et de masse volumique $\gamma_c = 3.1 \text{ kg/L}$;
- d'un sable de dunes en provenance de Ziguinchor de masse volumique $\gamma_s = 2.62 \text{ kg/L}$;
- d'un sable de dunes provenant de la région de Kaolack de masse volumique égale à 2.61 kg/L.

La formulation est faite sur les coquillages de classe 3/8, 8/16 et 16/25 dont les origines et les caractéristiques sont précisées plus haut.

II.2.2. Notes de calculs

- Dosage en ciment C

Le dosage en ciment doit être supérieur à la valeur minimale imposée qui est donnée par la formule suivante :

$$C_{\min} = \frac{250 + 10f_{ck}}{\sqrt[3]{D}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Avec f_{ck} = classe de résistance du béton (en MPa) et D en mm

Ce qui donne un dosage en ciment minimal égal à 297, 258 et 236 kg/m³ pour D égale à 8, 16 et 25 mm respectivement.

Dans le cadre de cette étude, puisque nous visons un béton de structure, le dosage en ciment le plus couramment utilisé est de 350 kg/m³, c'est la valeur qui sera alors retenue comme première approximation.

- Détermination du rapport $\frac{C}{E}$

Ce rapport peut être déterminé en utilisant la formule de BOLOMEY qui demande, cependant, la connaissance du coefficient granulaire G du granulat.

Formule de Bolomey :

$$f_{c28} = \sigma' G \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \text{avec : } \sigma' \text{ la résistance du ciment à 28j} = 38.5 \text{ MPa}$$

Le choix de G pour les coquillages ne peut donc être qu'arbitraire car le tableau III.14 qui donne la valeur de G concerne des granulats roulés et siliceux.

Nature pétrographique des granulats	D (mm)		
	10 à 16	20 à 25	30 à 40
Siliceux, légèrement altérés	0.45	0.50	0.55
Siliceux, roulés	0.50	0.55	0.60
Calcaires, durs	0.55	0.60	0.65

Tableau III.14 : Valeurs estimées du coefficient granulaire G

Face à cette situation, nous utiliserons alors, la figure III.9 de l'annexe III qui permet d'évaluer approximativement le rapport $\frac{C}{E}$ connaissant le dosage en ciment C et l'affaissement A.

Ainsi pour A = 6cm avec C = 350 kg/m³ → $\frac{C}{E} = 1.8$

- Dosage en eau E

Connaissant les valeurs de C et du rapport $\frac{C}{E}$, nous pouvons donc déduire le dosage en eau E.

$$E = \frac{350}{1.8} = 195 \text{ litres}$$

D (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur E (%)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Tableau III.15 : Correction en % sur le dosage en eau

Les corrections sur E pour D≠25 indiquées au tableau III.15 donnent :

E = 195(1+12%) ≈ 230 litres pour D = 8 mm

E = 195(1+4%) ≈ 205 litres pour D = 16 mm

Aussi le dosage en ciment doit être modifié afin de conserver le même rapport $\frac{C}{E}$. Nous avons ainsi :

$$C = 230 \times 1.8 \approx 400 \text{ kg/m}^3 \quad \text{pour D} = 8 \text{ mm}$$

$$C = 205 \times 1.8 \approx 375 \text{ kg/m}^3 \quad \text{pour } D = 16 \text{ mm}$$

Après correction, les nouveaux dosages seront alors :

$$\text{Pour la classe 3-8} \quad \rightarrow \quad C = 400 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 230 \text{ litres}$$

$$\text{Pour la classe 8-16} \quad \rightarrow \quad C = 375 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 205 \text{ litres}$$

$$\text{Pour la classe 16-25} \quad \rightarrow \quad C = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 195 \text{ litres}$$

- Détermination du rapport G/S

L'abaque expérimental C.E.S., donne une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment ; cet abaque est représenté sur la figure III.10.

Considérant les valeurs de C trouvé plus haut, nous obtenons :

$$G/S = 1.7 \text{ pour } D = 25 \text{ mm} ;$$

$$G/S = 1.5 \text{ pour } D = 16 \text{ mm} ;$$

$$G/S = 1.2 \text{ pour } D = 8 \text{ mm (cette valeur a été approximée car l'abaque concerne les D compris entre 10 et 100 mm).}$$

- Détermination de la compacité

Nous adoptons pour ce béton plastique ($A=6\text{cm}$) une mise en place à l'aide d'une vibration normale. Le tableau III.16 en annexe donne alors les compacités suivantes :

$$D = 8 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \gamma = 0.800$$

$$D = 16 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \gamma = 0.815$$

$$D = 25 \text{ mm} \quad \rightarrow \quad \gamma = 0.825$$

Les corrections à apporter sur γ pour $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ et les types de granulats (roulés ou concassés) seront négligées car influent de manière insignifiante sur la compacité.

- Dosage en coquillage et en sable

- Classe 3-8

Les volumes des constituants solides, pour 1 m^3 de béton.

$$\text{Volume total absolu} = 1000 \times \gamma = 800 \text{ litres}$$

$$\text{Volume total de ciment} = \frac{400}{3.1} = 129 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des granulats} = 800 - 129 = 671 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu du sable} = \frac{671}{2.2} = 305 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des coquillages} = 671 - 305 = 366 \text{ litres}$$

Ainsi en dosage pondéral on aura :

$$P_{\text{sable}} = 305 \times 2.61 = 796 \text{ kg}$$

$$P_{\text{Gravier}} = 366 \times 2.63 = 966 \text{ kg.}$$

Les quantités des constituants pour 1 m³ de béton sont alors les suivantes :

$$\text{Ciment} = 400 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 230 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 796 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 966 \text{ kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2392 kg/m³.

- Classe 8-16

De la même manière nous obtenons, pour 1 m³ de béton, les dosages des composants suivants :

$$\text{Ciment} = 375 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 205 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 715 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 1088 \text{ kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2383 kg/m³.

- Classe 16-25

Les dosages pour 1 m³ de béton sont les suivants

$$\text{Ciment} = 350 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 195 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 692 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 1187 \text{ kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2424 kg/m³.

Nous remarquons à travers ces calculs que les bétons de coquillages ont des masses volumiques théoriques qui rentrent dans la gamme des bétons normaux.

Classe granulaire	Ciment (kg)	Eau (L)	Sable (kg)	Gravier (kg)	Masse totale (kg)
3/8	400	230	796	966	2392
8/16	375	205	715	1088	2400
16/25	350	195	692	1187	2424

Tableau III.17 : Composition d'un m³ des bétons de coquillages pour chaque classe

II.2.3. Caractéristiques mécaniques des bétons confectionnés

II.2.3.1 Confection et mûrissement des éprouvettes

Une fois les quantités des différents constituants déterminées, on procède à la confection des bétons. Dans la mesure où les quantités de matériaux nécessaires pour remplir les éprouvettes d'essais sont relativement peu importantes, les gâchées sont effectuées manuellement. Ce qui réduit du coup, les pertes d'eau ou de matériaux occasionnées par la bétonnière.

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques dont les moules, qui sont les plus fréquemment utilisées, ont des caractéristiques définies par la norme NF P 18-400. Leurs dimensions sont indiquées au tableau III.18 ; elles doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Ainsi, pour les classes 3/8 et 8/16 ce sont les moules de 11 x 22 qui ont été utilisées et les moules de 16 x 32 pour la classe 16/25. La mise en place a lieu par piquage à 25 coups sur 3 couches.

Format	Dimensions (mm)		Section (cm ²) par un plan		D (mm) des granulats
	Diamètre d	Hauteur h	orthogonal	diamétral	
Cylindre 11 x 22	112.8	220	100	248	≤ 16
Cylindre 16 x 32	159.6	320	320	200	≤ 40
Cylindre 25 x 50	252.5	500	500	500	≤ 80

Tableau III.18 : Dimensions des moules en fonction du D des granulats

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et sont conservées dans l'eau pour un mûrissement pendant 7 et 28 jours.

II.2.3.2 Présentation et interprétation des résultats

- Consistance

Les affaissements mesurés au cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451, sur les classes 3/8, 8/16 et 16/25 ont donné respectivement 7cm, 4cm et 4cm. Hormis celle de la première classe, ces valeurs ne s'inscrivent pas dans l'intervalle établi par DREUX pour les bétons plastiques et sont différentes de la valeur visée qui est de 6 cm. Ceci s'explique par le fait que la quantité de mortier pour ces deux mélanges (8/16 et 16/25) ne permettait pas de remplir les trous des coquilles et de jouer le rôle de liant devant assurer un bon enrobage des

coquillages. Ainsi l'absence de mortier, qui devrait assurer un bon écoulement de ces derniers, constitue le défaut de plasticité de ces bétons confectionnés. La méthode de Dreux, conçue pour des granulats roulés, siliceux avec des formes pleines, ne prend en compte que le volume de liant nécessaire pour un enrobage des granulats. Ce qui n'est pas le cas des coquillages. Pour la classe 3/8 l'affaissement (7cm) reste bien conforme aux hypothèses et s'inscrit dans l'intervalle de Dreux pour les bétons plastiques. En effet, les granulats de cette classe n'ont pas cette forme recroquevillée très marquée et se composent essentiellement de fragments de coquillages.

- Masse volumique

Elle est obtenue par le rapport de la masse de l'éprouvette sortie de l'eau et séchée, sur son volume. Les masses volumiques moyennes sont de 2015, 1955 et 2052 kg/m³ pour les classes 3/8, 8/16 et 16/25 respectivement. Ces valeurs diffèrent de celles théoriques qui s'inscrivaient entièrement dans la gamme des bétons normaux (2150 et 2500 kg/m³). Ces faibles valeurs s'expliquent par le fait que les bétons confectionnés sont très poreux car les rôles de remplissage et d'enrobage ne sont pas bien assurés par le mortier. Il peut sembler paradoxal que le plus petit granulats donne une masse volumique plus grande mais cela est dû au fait que dans sa composition, le mortier servait juste à enrober les granulats, qui sont en grande partie constitués de fragments de coquillages, ce qui procure à ce béton une meilleure compacité contrairement aux deux autres cas. Ces masses volumiques restent néanmoins faibles, ce qui montre encore toute la particularité des granulats étudiés.

- Résistances en compression

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, 11x22 pour les classes 3/8 et 8/16 et 16x32 pour la classe 16/25, mûries à 7 et à 28 jours conformément aux normes CAN3-A23-2 M₇₇. L'appareil d'essai est, en effet, une presse hydraulique conforme aux exigences de la norme ASTM E4.

Un surfacage au soufre mélangé avec 40% de sable est effectué sur une couche de 1 à 2 mm afin de réduire l'excentricité des éprouvettes.

L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

$$\sigma_c = \frac{4 \times F_c}{\pi \times D^2}$$

Où F_c = charge de rupture et D = diamètre de l'éprouvette

Le tableau suivant présente les valeurs moyennes de contrainte obtenues en compression à 7 et à 28 jours.

Classe granul.	3/8		8/16		16/25	
Age en jours	7	28	7	28	7	28
σ_c en MPa	11.22	24.20	5.52	10.17	6.71	10.75

Tableau III.19 : Résistances moyennes en compression avec Dreux.

Les résistances obtenues à 28 jours, pour les classes 8/16 et 16/25, sont très faibles et restent très inférieures à la valeur moyenne de 20 MPa visée à 28 jours . Par contre, la classe 3/8 présente une bonne résistance à 7 et à 28 jours. Ce qui montre une fois de plus le rôle essentiel de la compacité pour une bonne résistance. En effet, nous avons déjà expliqué que les bétons confectionnés avec les classes 8/16 et 16/25 présentaient beaucoup de vides dus à un défaut d'enrobage et de remplissage des coquillages par le mortier contrairement à celui de la classe 3/8.

L'observation des lignes de rupture a révélé que ces dernières passaient, de manière préférentielle, par la liaison liant-coquillages, comme c'est montré à la figure III.12 de l'annexe III. L'adhérence liant-granat est, en effet, fortement liée à la texture des granulats mais également au bon enrobage de ces derniers car sans enrobage on ne peut parler d'adhérence. Or la méthode de Dreux, conçue pour des granulats roulés et siliceux, ne peut donc assurer ce rôle d'enrobage des granulats de coquillage. Car pour cette méthode, le mortier obtenu devait seulement servir à enrober les granulats (de forme pleine), alors que les coquillages sont en général de forme recroquevillée. C'est pourquoi, après le mélange des différents constituants, nous avons constaté que le liant ne remplissait même pas tous les trous des coquilles et ne pouvait ainsi jouer ce rôle d'enrobage. Le béton était donc très poreux, alors qu'on sait que la formulation d'un béton repose essentiellement sur le principe de la porosité minimale et de la compacité maximale car plus un béton est compact et plus il est résistant.

Pour la classe 3/8 par contre, ces zones de rupture s'expliquent par la forme un peu aplatie de ces coquillages car constitués de fragments, cependant les résistances obtenues restent très satisfaisantes comparées à la valeur visée.

Se pose alors la question à savoir quelles seraient les caractéristiques des bétons avec les classes 8/16 et 16/25 pour un rapport G/S optimal.

Ainsi nous avons essayé, à travers la méthode proposée ci-dessous, de déterminer le rapport G/S optimal ; c'est-à-dire le rapport qui permet d'assurer ce rôle d'enrobage et de remplissage tout en procurant au béton les meilleures caractéristiques de résistance pour des dosages en ciment et en eau fixés.

II.3. Proposition d'une méthode empirique

Les méthodes de formulations en général et celle de Dreux en particulier ont été établies pour des granulats siliceux et roulés même si elles apportent parfois des corrections suivant la forme, la nature ou la texture du granulat. En outre, cette méthode, qui repose sur le principe de la porosité minimale et de la compacité maximale, ne tient en compte que le volume de mortier nécessaire pour assurer un bon enrobage des granulats du béton, supposés avoir une forme pleine. Contrairement aux granulats courants que nous connaissons, les coquillages sont particuliers, en ce sens qu'ils ne sont ni roulés ni concassés et qu'ils ont, en outre, une forme recroquevillée, c'est pourquoi l'utilisation des méthodes existantes pour leur formulation pose un certain nombre de problèmes. Nous avons pu constater, à travers les compositions réalisées avec la méthode de Dreux que le problème majeur résidait sur le rapport G/S car il ne permettait pas d'avoir le mortier nécessaire pour assurer un remplissage et un enrobage des granulats de coquillages. Il faudrait alors une méthode qui, en plus du volume de mortier nécessaire pour bien enrober les coquillages, tiendrait aussi compte des trous des coquilles à remplir afin d'avoir une bonne compacité.

Notre objectif n'est pas d'établir une méthode originale ou révolutionnaire mais simplement de proposer une solution à la méthode de Dreux appliquée plus haut. Il s'agit donc de déterminer le rapport G/S optimal pour un dosage en ciment et un rapport E/C fixés.

Il faut signaler que cette méthode n'est expérimentée que sur les classes 8/16 et 16/25 car les résistances obtenues sur la classe 3/8 avec la méthode de Dreux étaient assez satisfaisantes comparées aux objectifs visés. L'inapplicabilité de cette méthode, était donc notée sur les deux autres classes où les résistances obtenues étaient très faibles.

II.3.1. Définition des données retenues

1. Données de base

- Dimension des granulats : les granulats étant choisis à l'avance donc leur dimensions sont déjà fixées. Nous travaillons sur les mêmes classes 8/16 et 16/25.

- Consistance désirée : on la caractérisera par l'affaissement moyen au cône d'Abrams. Comme nous cherchons un béton plastique, donc elle doit être comprise entre 5 et 10 cm pour une mise en place avec vibration normale.

- Résistance désirée : elle est définie par la résistance en compression sur cylindre à 28 jours, qui déterminera suivant les résultats obtenus les domaines d'utilisation de chacune des classes.

2. Dosage en ciment

Pour la détermination du dosage en ciment nous nous sommes basés, en partie, sur la formule de Caquot qui donne le volume optimal de fines, V , dans un béton conduisant à la porosité minimale. $V (\text{L/m}^3 \text{ béton}) = 220/D^{0.2}$ où D (mm) est le diamètre du plus gros granulat.

Ce qui donne de manière approximative, pour un m^3 de béton, les dosages suivants :

$$C = \frac{220}{25^{0.2}} \times 3.1 = 350 \text{ kg} \quad \text{pour la classe 16/25 ;}$$

$$C = \frac{220}{16^{0.2}} \times 3.1 = 400 \text{ kg} \quad \text{pour la classe 8/16.}$$

3. Dosage en eau

Nous avons déjà vu que l'eau est, dans la composition du béton, le facteur qu'il convient de régler avec le plus de minutie. Ainsi nous avons fixé un rapport de $\frac{E}{C} = 0.6$ (équivalent à $\frac{C}{E} = 1.67$) car étant en général la valeur recommandée dans les zones sahéliennes [4]. Ainsi pour 1 m^3 de béton le dosage en eau est de :

$$E = 210 \text{ L pour la classe 16/25 ;}$$

$$E = 240 \text{ L pour la classe 8/16.}$$

4. Dosage des granulats

L'objectif de cette étude étant de déterminer les proportions optimales des granulats (sable et coquillages) à mélanger, nous allons donc prendre différentes valeurs de G/S pour composer les mélanges. Les dosages en ciment et en eau étant connus (fixés) nous pouvons déterminer alors, le volume absolu des granulats pour 1 m^3 de béton.

- Pour la classe 16/25

$$C = 350/3.1 = 113 \text{ L}$$

$$E = 210 \text{ L}$$

$$S + G = 1000 - 113 - 210 = 677 \text{ L}$$

Pour $G/S = 1.1$, on a alors :

$$S = \frac{677}{2.1} = 323 \text{ L} = 323 \times 2.62 = 846.26 \text{ kg}$$

$$G = 677 - 323 = 356 \text{ L} = 356 \times 2.65 = 943.40 \text{ kg}$$

Ainsi, pour des valeurs de G/S variant de 1.1 à 0.8 nous avons les proportions suivantes en poids :

G/S	1.1	1	0.9	0.8
Sable (kg)	846.26	889.49	936.39	987.74
Graviers (kg)	943.40	899.68	852.24	800.30

- Pour la classe 8/16

$$C = 400/3.1 = 129 \text{ L}$$

$$E = 240 \text{ L}$$

$$S + G = 1000 - 129 - 240 = 631 \text{ L}$$

Pour G/S = 1.3, on a alors :

$$S = \frac{631}{2.3} = 275 \text{ L} = 275 \times 2.61 = 717.75 \text{ kg}$$

$$G = 633 - 275 = 358 \text{ L} = 358 \times 2.64 = 945.12 \text{ kg}$$

Ainsi, pour des valeurs de G/S variant de 1.3 à 0.9 nous avons les proportions suivantes en poids :

G/S	1.3	1.2	1.1	1	0.9
Sable (kg)	717.75	751.68	786.92	826.07	869.13
Graviers (kg)	945.12	908.16	875.16	835.56	792.00

Il convient de préciser que nous avons retenu ces rapports de G/S suite à plusieurs mélanges et en dehors de ces rapports les affaissements étaient soit trop faibles (inférieurs à 5) soit un peu élevés (supérieur à 7). Les masses volumiques théoriques sont, en moyenne, 2300 et 2350 kg/m³ pour les classes 8/16 et 16/25 respectivement. Valeurs qui sont proches de celles obtenues avec Dreux. Les compositions des bétons sont présentées au tableau III.21 ci après.

CLASSE	G/S	Ciment kg	Eau L	Sable kg	Coquillages kg	Masse vol théo Kg/m ³
8/16	09	400	240	869.13	792.00	2301
	1			826.07	835.56	2302
	1.1			786.92	875.16	2302
	1.2			751.68	908.16	2300
	1.3			717.75	945.12	2303
16/25	0.8	350	210	846.26	943.40	2350
	0.9			889.49	899.68	2349
	1			839.39	852.24	2252
	1.1			987.74	800.30	2348

Tableau III.21 : Composition d'un m³ de bétons de coquillage

II.3.2. Présentation et interprétation des résultats d'essais

- Consistance

Les affaissements mesurés au cône d'Abrams comme précédemment se situent entre 5 et 7 cm pour la classe 8/16 et entre 5 et 6 cm pour la classe 16/25. Ces valeurs s'inscrivent entièrement dans le domaine de variation établi pour les bétons plastiques (tableau II.10). Avec les rapports G/S retenus pour la composition des bétons, le rôle de remplissage et d'enrobage des coquillages a été bien assuré par le mortier. Les résultats obtenus montrent bien que l'affaissement est fonction de G/S et qu'ils évoluent en sens inverse. Ainsi les bétons obtenus ne présentent aucune difficulté de mise en œuvre pour les structures courantes du bâtiment (poteau, poutre, dalle...)

- Masse volumique

Elle a été obtenue de la même manière que précédemment. La mesure a été effectuée sur trois éprouvettes pour chaque composition ce qui a permis de dégager une valeur moyenne. Les résultats sont consignés au tableau III.23 de l'annexe III. Contrairement à la méthode précédente, la masse volumique évolue dans le même sens que la taille des grains, cependant les valeurs trouvées restent inférieures à celles théoriques surtout pour la classe 8/16. Les valeurs optimales de 2100 et 2322 kg/m³ pour les classes 8/16 et 16/25 respectivement, ont été obtenues pour un rapport de G/S = 1.1 dans les deux cas. Les bétons obtenus avec D = 16 mm sont alors des bétons légers contrairement à ceux avec D= 25 mm dont la masse

volumique (2300 kg/m^3 en moyenne) s'inscrit parfaitement dans la gamme des bétons courants. Ce qui montre que les coquillages de Ziguinchor et de Kaolack sont différents car l'un donne des bétons légers alors que l'autre quand à lui donne des bétons courants.

- Résistances en compression

Les essais sont effectués sur les éprouvettes 11 x 22 et 16 x 32 mûries à 7 et à 28 jours conformément à la norme CAN3-A23-2 M₇₇ comme précédemment et les résultats sont présentés au tableau III.22 suivant.

CLASSE GRANULAIRE	Rapport G/S	Résistances en compression (MPa)	
		7 jours	28 jours
8/16	0.9	10.87	21.19
	1	15.50	23.50
	1.1	14.94	20.62
	1.2	14.66	21.71
	1.3	11.05	19.92
16/25	0.8	10.35	12.90
	0.9	8.85	14.42
	1	6.28	11.32
	1.1	9.52	13.05

Tableau III.22 : Résistances moyennes en compression des bétons composés

Ces valeurs restent nettement supérieures à celles obtenues avec Dreux, mais varient très sensiblement dans la gamme de rapports G/S choisis. En outre, suivant le rapport G/S la résistance augmente sensiblement entre 7 et 28 jours car 50 à 70 % de la résistance du béton est atteinte dès le septième jour. Compte tenu des objectifs visés (20MPa à 28 jours), nous pouvons dire que les résistances obtenues avec la classe 8/16 sont assez satisfaisantes avec une valeur optimale de 23.5 MPa. Cette dernière est obtenue pour G/S = 1 avec une masse volumique de 2098 kg/m^3 qui est sensiblement égale à la valeur optimale (2100 kg/m^3) et un affaissement au cône de 6 cm. La classe 16/25 quant à elle, offre des résistances faibles même si elles restent supérieures aux valeurs obtenues avec Dreux. La résistance optimale de 14.42

MPa, pour cette classe, est obtenue pour $G/S = 0.9$ avec une masse volumique de 2303 kg/m^3 et un affaissement au cône de 6 cm. Cette faible valeur s'explique par le fait que le sable utilisé est argileux entraînant ainsi une demande en eau plus importante avec comme conséquence une chute de la résistance. Les hypothèses (C et C/E) ne sont donc pas appropriées pour ce cas.

L'observation des lignes de rupture a révélé, comme précédemment, qu'elles passaient de manière préférentielle par la liaison liant-granulat de coquillages. En effet la texture lisse des coquillages ne favorise pas une très bonne adhérence avec le liant mais la liaison reste néanmoins satisfaisante compte tenu des résultats obtenus (classe 8/16). Il convient de noter que les valeurs de L.A requises pour les bétons de bâtiment ($L.A \leq 40\%$ pour béton de classe C) devraient être prises avec réserve, car malgré leur dureté médiocre ($L.A = 44\%$) les coquillages offrent de bonnes résistances du béton.

L'étude expérimentale a montré que la méthode de formulation de Dreux ne peut s'appliquer au béton de coquillages à cause de la forme particulière de ces derniers. Les bétons confectionnés étaient alors très poreux et se caractérisaient par un défaut de plasticité et des résistances très faibles. Ce qui montre que la forme des granulats est un critère important pour les méthodes classiques en général et celle de Dreux en particulier.

Quand à la méthode proposée, les rapports G/S optimaux sont de 1 pour la classe 8/16 et 0.9 pour le 16/25, alors que Dreux, lui recommande de ne pas dépasser 2. En outre, les résistances obtenues surtout avec le sable de Ziguinchor montre toute l'importance des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton (chapitre II).

Les masses volumiques obtenues montrent que les coquillages peuvent varier suivant leur provenance et que certains peuvent donner des bétons légers et d'autres des bétons courants.

CHAPITRE IV : ETUDE ECONOMIQUE ET DOMAINES D'UTILISATION

Il s'agit, dans cette partie, de donner une estimation du coût des bétons confectionnés mais aussi de proposer des domaines d'utilisation dans le secteur du bâtiment au vu des résultats expérimentaux obtenus précédemment.

I. ETUDE ECONOMIQUE

Les coquillages ne font pas l'objet d'une exploitation industrielle au Sénégal et sont ainsi vendus de manière informelle par des exploitants artisanaux. Nous nous limiterons donc à une estimation quantitative qui nous permettra de voir les rapports avec les bétons existants.

Comparés aux bétons courants, la différence des constituants réside dans les granulats. Ainsi c'est donc la comparaison des coûts des granulats qui sera déterminante.

Les granulats concassés utilisés dans ces zones proviennent en général des carrières exploitées de Sindia, Bandia, etc. qui sont les plus proches. Dans la région de Ziguinchor, il arrive que la latérite soit utilisée comme granulats à béton en raison du prix très onéreux des autres graviers dû au coût de transport. Comme nous l'avons vu au paragraphe traitant de sa disponibilité, les gisements de coquillages sont très abondants dans l'aire sénégalaise particulièrement le long du littoral atlantique, au niveau des embouchures et des estuaires des cours d'eau. Le problème de disponibilité ne se pose donc pas. Compte tenu du prix des granulats qui évoluent en fonction des distances de transport, nous allons donc faire une étude comparative pour chacune des régions :

- Région de Kaolack

Dans cette région, les granulats concassés des carrières de la région de Thiès sont les plus utilisés. En s'intéressant au prix on a les coquillages qui coûtent 2000 F/m³, tandis que les concassés de calcaire coûtent 10500 F/m³. En rapportant ces prix au camion de 8 m³, nous obtenons alors 16000 F et 84000 F pour les granulats de coquillages et de calcaires respectivement. Ainsi sur chaque camion de 8 m³, on réalise théoriquement une économie de 68000 F en utilisant les granulats de coquillages à la place des concassés de calcaire. D'autant plus que le problème d'approvisionnement ne se poserait pas car l'exploitation est locale et est assurée par des piroguiers.

- Région de Ziguinchor

La tendance actuelle dans cette région, est l'utilisation de la latérite comme granulat à béton, car elle est exploitée localement ce qui fait qu'elle coûte moins chère que les autres granulats

concassés provenant en général des carrières exploitées de Thiès. Ainsi, les granulats de coquillages seront comparés aux graves latéritiques en terme de prix afin de voir celui qui est le plus compétitif économiquement. Le prix du camion de 8 m³ tourne autour de 32000 F pour les premiers et 55000 F pour les derniers. L'économie réalisée sur un camion est donc de 23000 F, cette valeur serait beaucoup plus grande si on comparait les coquillages aux autres granulats concassés (calcaire, basalte, grès...), en raison des coûts induits par leur transport.

Région	Granulat considéré	Prix du camion de 8 m ³	Economie réalisée
KAOLACK	Graviers concassés	84000	68000
	Coquillages	16000	
ZIGUINCHOR	Graviers concassés	55000	23000
	Coquillages	32000	

Tableau III.24 : Tableau comparatif des prix des graviers concassés et des coquillages

L'utilisation des granulats des coquillages permet ainsi de réaliser des économies très intéressantes, surtout en Kaolack avec comme avantage la réduction des coûts de constructions, surtout dans le cas des logements sociaux. Cependant il est à prévoir les coûts qu'induirait le criblage car les coquillages sont en général vendus en vrac, contrairement aux graviers courants, en raison de l'exploitation artisanale dont ils font l'objet.

II. DOMAINES D'UTILISATION

Les caractéristiques mécaniques obtenues à travers cette étude expérimentale avec les classes 3/8 (24.20 MPa) et 8/16 (23.50 MPa) placent ces bétons de coquillages dans la gamme des bétons de structure. Ils peuvent ainsi, être utilisés à tous les niveaux du bâtiment allant du béton de propreté au plancher, en passant par les semelles, les poteaux et les poutres. Les bétons avec la classe 3/8 peuvent également être utilisés pour fabriquer des agglos, surtout dans le cas des structures avec murs porteurs. De plus leur masse volumique faible (2015 kg/m³ avec le 3/8 et 2098 kg/m³ avec le 8/16) comparée aux bétons courants (2500 kg/m³ en général), constitue un avantage certain car elle permettrait de réduire les charges permanentes de structure et par conséquent les efforts dans les armatures ce qui se traduira par une diminution des sections d'aciers.

Quant aux bétons composés avec la classe 16/25, les résistances obtenues sont faibles (14.42 MPa) ce qui n'exclut cependant pas leur utilisation dans le bâtiment. En effet, ils peuvent être utilisés comme béton de propreté, ou pour les linteaux, auvents, acrotères, ou encore pour toute autre partie ne participant pas à la structure porteuse du bâtiment.

Ainsi, compte tenu de son coût peu onéreux et de ses domaines d'utilisation, le béton de coquillages présente un avantage certain et mérite d'être exploité afin de réduire les coûts de constructions.

CONCLUSION & RECOMMANDATIONS

Cette étude avait pour objectif de contribuer à l'élaboration d'une méthode de formulation des bétons de coquillages pour leur utilisation dans le secteur du bâtiment. Elle a été expérimentée sur les coquillages de Ziguinchor et ceux de Kaolack, pour les classes 3/8, 8/16 et 16/25. Pour ce faire nous avons d'abord utilisé la méthode de Dreux afin de voir les limites de celle-ci par une caractérisation mécanique des éprouvettes confectionnées, partant des résultats obtenus, nous avons proposé une composition visant à déterminer le rapport G/S procurant les meilleures caractéristiques des bétons étudiés.

Nous avons pu voir, à travers les résultats obtenus, que la méthode de Dreux n'était pas applicable aux bétons de coquillages en raison de la forme recroquevillée de ces derniers, à moins que ces granulats de coquillage soient constitués de fragments comme cela a été le cas avec la classe 3/8 étudiée. Avec la méthode proposée, les rapports G/S, pour lesquels les caractéristiques du béton étaient assez intéressantes, étaient très faibles comparés aux méthodes expérimentales classiques, dû au fait que ces dernières ne prennent en compte que la quantité de mortier nécessaire pour assurer l'enrobage des granulats. Nous avons aussi remarqué que la résistance et la masse volumique évoluaient dans le même sens confirmant ainsi cette liaison très étroite qui existe entre la compacité et la résistance du béton. Les masses volumiques obtenues avec les classes 3/8 et 8/16 restent néanmoins faibles et placent ainsi les bétons composés avec ces coquillages de Kaolack dans la gamme des bétons légers, par contre la classe 16/25 quand à elle donne un béton courant. Le sable de Ziguinchor, sable argileux, a conduit aux mauvaises caractéristiques mécaniques obtenues sur les bétons avec la classe 16/25 où les résistances à 7 et 28 jours sont très faibles. Pour les autres classes, ces résistances sont assez satisfaisantes et dépassent même les 20 MPa à 28 jours.

Ainsi, compte tenu de leurs caractéristiques mécaniques et de leur coût assez faible comparé aux granulats courants, les bétons de coquillages peuvent se substituer de façon avantageuse aux bétons classiques dans bien des cas comme nous l'avons montré dans les domaines d'utilisation proposés plus haut. D'autant plus que leur masse volumique assez intéressante confère à la structure plus de légèreté.

Enfin, nous pensons que cette étude ne constitue qu'une partie de l'édifice et gagnerait à être poursuivie afin d'aboutir à une méthode prenant en compte tous les paramètres devant intervenir dans la composition d'un béton de coquillages. Ainsi nous énonçons ci-après quelques recommandations concernant les conditions de mise en œuvre mais également des axes pour approfondir cette étude

- Bien malaxer le béton pour un bon remplissage et un enrobage des coquillages ;
- éviter les coquillages ayant des formes présentées à la figure III.15 de l'annexe pour une meilleure compacité du béton ;
- étudier les caractéristiques thermiques des bétons composés avec les coquillages de Kaolack ;
- chercher le rapport E/C optimal pour un G/S considéré ;
- étudier les caractéristiques du béton en associant les coquillages de Ziguinchor à un autre sable ayant de bonnes caractéristiques ;
- étudier le cas des bétons ternaires en associant aux coquillages un autre granulat courant (calcaire par exemple) ;
- faire une composition sur le matériau extrait brut sans criblage.

REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIE

- [1] Direction des Mines et de la Géologie : Ressources minières : fiches techniques, 1-3.
- [2] Sud Quotidien : Journal du 23 juillet 2003, Dakar.
- [3] DUPAIN R., LANCHON R. et SAINT-ARROMAN J.C., 2000, Granulats, sols, ciments et bétons, CASTELLA Ed. Paris, 2000.
- [4] CISSE I. K., Cours de technologie du béton, ESP 2004.
- [5] BARON J. et OLIVIER J. P., 1999, Les bétons : bases et données pour leur formulation, EYROLLES Ed. Paris, 1999.
- [6] DREUX Georges, 1986, Nouveau guide du béton, Cinquième édition, EYROLLES Ed. Paris, 1986.
- [7] AHOUANSON S. G., 1993, Etude comparative des bétons à base de granulats usuels en pays tropicaux, PFE, ENSUT 1993.
- [8] ARNOULD M. et VIRLOGEUX M., 1986, Granulats et bétons légers, Presses de l'ENPC Ed. Paris 1986.
- [9] LOPEZ M. S., 2001, Caractérisation mécanique et thermophysique de bétons de pierre ponce, PFE, ESP 2001.
- [10] Ministère, Notes explicatives de la carte géotechnique du Sénégal.
- [11] MENDY Raymond, 1987, Les amas coquilliers de la région du delta du fleuve, rapport de maîtrise en Géographie, UCAD 1987.

ANNEXE I

GEOLOGIE DU SENEGAL ET LOCALISATION DES CARRIERES EXPLOITEES

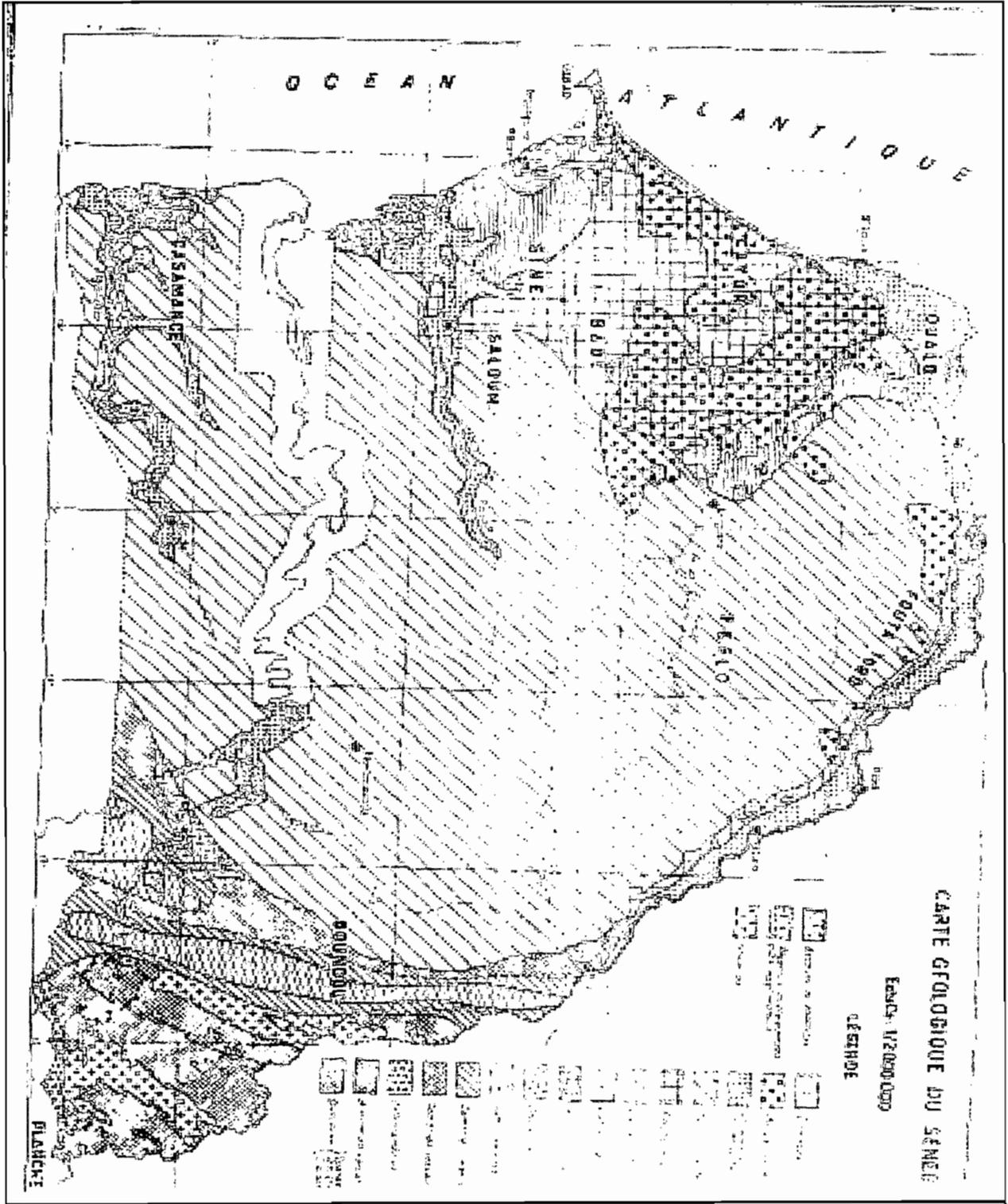


Figure I.1 : Carte géologique du Sénégal

ANNEXE II

CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DU BETON

ADJUVANTS	UTILISATION
Fluidifiants	Nécessité d'une bonne ouvrabilité. Préfabrication. Bétons à hautes résistances.
Plastifiants	Transport pneumatique du béton (béton pompé, ciment gun...) Béton coulé sous l'eau (déblavage diminué). Béton maigre : blocs manufacturés. Béton routier. Sables manquant de fines. Béton très ferrailé. Injection (coulis et mortiers).
Accélérateurs	Décoffrage rapide. Temps froid – préfabrication. Travaux d'étanchement, cachetage, travaux à la mer (entre deux marées) Réparations rapides, pistes d'aérodromes, routes. Scellements.
Retardateurs	Temps chaud. Injection à grande profondeur (élévation de température). Voile d'étanchéité. Transport de béton sur longue distance. Reprise de bétonnage – Confection de béton avec granulats apparents (parements lavés). Parois moulées dans le sol.
Entraîneurs d'air antigélifs	Routes, barrages, ponts, travaux maritimes. Ouvrages exposés au gel, à l'action des eaux agressives.
Hydrofuges	Mortiers d'enduit – Enduits et chapes étanches pour cuvelage – Citernes – Réservoirs – Piscines – Galeries – Tunnels – travaux souterrains (murs de cave, fondation) et maritimes. Toitures, terrasse – Mortiers de joints (maçonnerie).

Tableau II.9 : Synoptique d'utilisation des principaux adjuvants

ANNEXE III

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES ET RESULTATS DES ESSAIS

Classe	Tamis	Refus	Refus cum	% Refus	% Passant
3 - 8	12,5	36,51	36,51	1,83	98,17
	10	415,42	451,93	22,60	77,40
	6,3	649,03	1100,96	55,05	44,95
	4	433,27	1534,23	76,71	23,29
	2,5	280,04	1814,27	90,71	9,29
	1,8	147,45	1961,72	98,09	1,91
	1,25	13,06	1974,78	98,74	1,26

Tableau III.8 : Résultats essai granulométrique sur coquillages 3/8

Classe	Tamis	Refus	Refus cum	% Refus	% Passant
8 - 16	20	0	0	0	100
	16	2,632	2,632	52,64	47,36
	12,5	1,803	4,435	88,7	11,3
	10	0,25	4,685	93,7	6,3
	8	0,17	4,855	97,1	2,9
	6,3	0,13	4,985	99,7	0,3

Tableau III.9 : Résultats essai granulométrique sur coquillages 8/16.

Classe	Tamis	Refus	Refus cum	% Refus	% Passant
16 - 25	31,5	0	0	0,00	100,00
	25	1038	1038	20,76	79,24
	20	2679	3717	74,34	25,66
	16	1065	4782	95,64	4,36
	12,5	185	4967	99,34	0,66
	10	26	4993	99,86	0,14

Tableau III.11 : Résultats essai granulométrique sur coquillages 16/25.

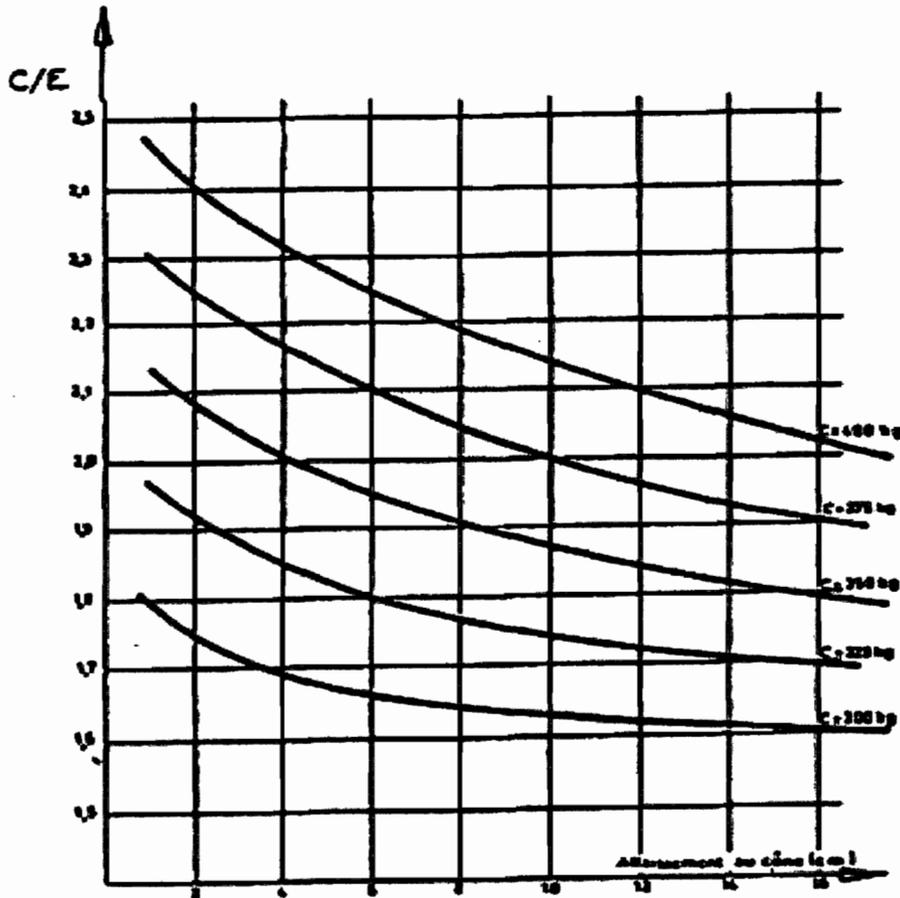


Figure III.9 : Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport E/C

Consistance	Serrage	Coefficient de compacité γ						
		D = 5	D = 10	D = 16	D = 25	D = 40	D = 63	D = 100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	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	0.840	0.845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

Tableau III.16 : Valeurs du coefficient de compacité en fonction de certains paramètres.

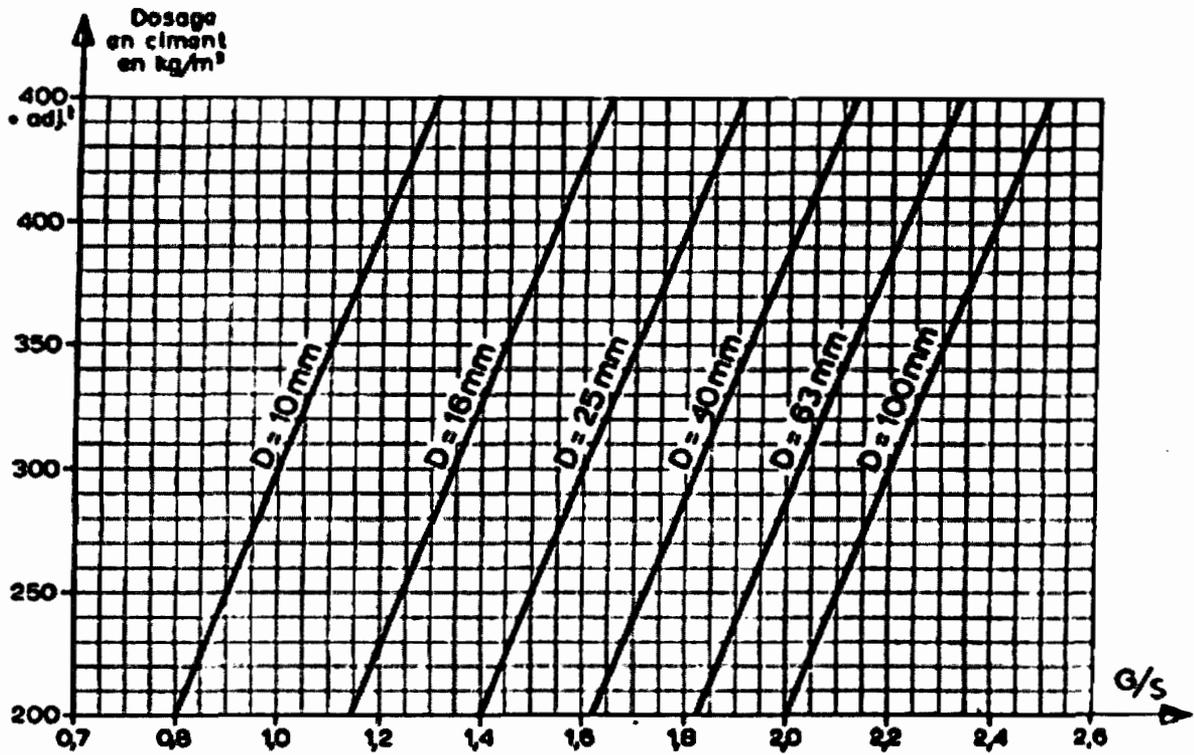


Figure III.10 : Abaque expérimental C.E.S. donnant une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment.



Figure III.11 : Parement des éprouvettes après démoulage (classe 8/16 et 16/25) : composition de Dreux

CLASSE GRANULAIRE	Affaissement au cône (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	Résistances en compression (MPa)	
			7 jours	28 jours
3/8	7	2015	11.22	24.20
8/16	4	1955	5.52	10.17
16/25	4	2052	6.71	10.70

Tableau III.20 : Récapitulatif des résultats des essais sur les bétons composés avec Dreux.

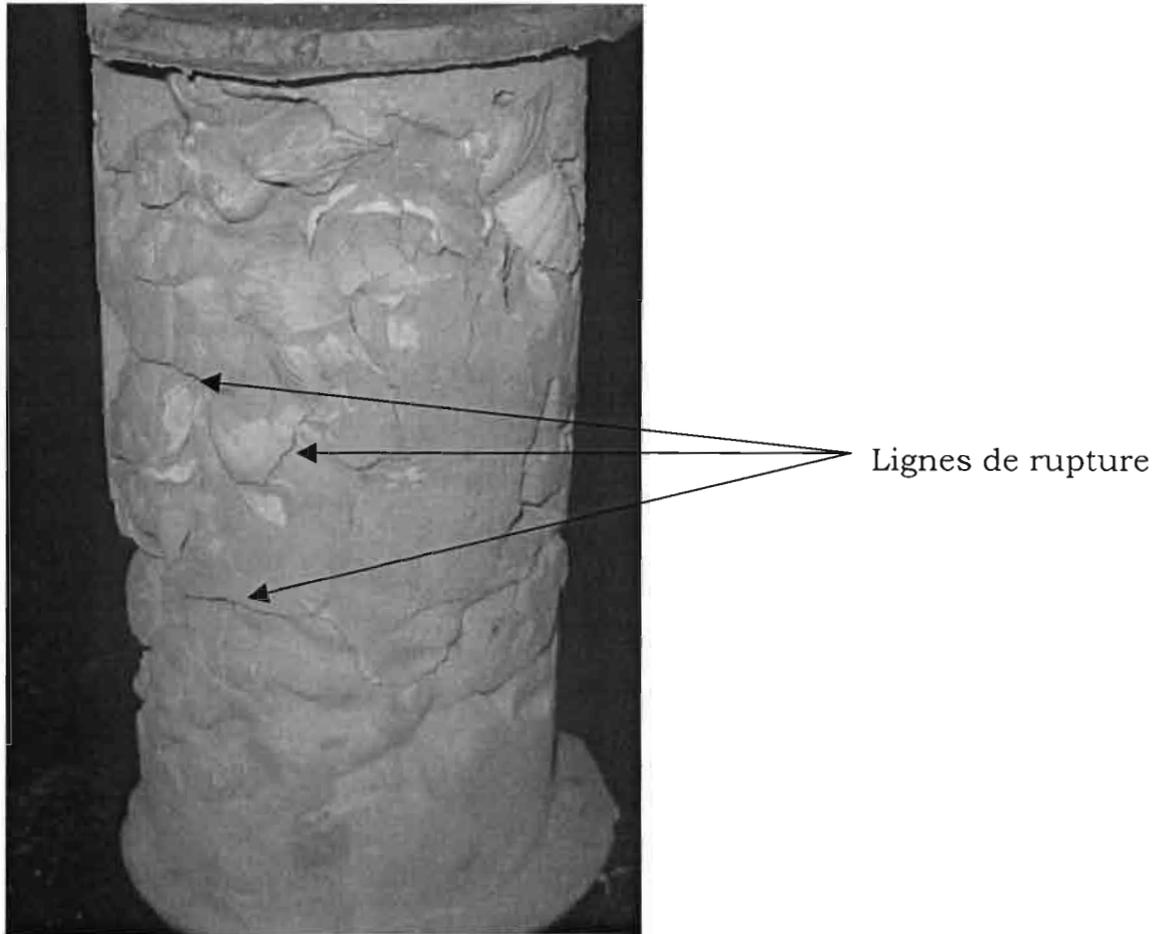


Figure III.12 : Aperçu des lignes de rupture après écrasement de l'éprouvette à la presse



Figure III.13 : Parement des éprouvettes après démoulage avec composition proposée

CLASSE GRANULAIRE	Rapport G/S	Affaissement au cône (cm)	Masse volumique (kg/m ³)	Résistances en compression (MPa)	
				7 jours	28 jours
8/16	0.9	7	2017	10.87	21.19
	1	6	2098	15.50	23.50
	1.1	5	2099	14.94	20.62
	1.2	5	2079	14.66	21.71
	1.3	5	2055	11.05	19.92
16/25	0.8	6	2259	10.35	12.90
	0.9	6	2303	8.85	14.42
	1	5	2271	6.28	11.32
	1.1	5	2322	9.52	13.05

Tableau III.23 : Récapitulatif des résultats des essais sur les bétons avec méthode proposée.



Figure III.14 : Aperçu des lignes de rupture après écrasement à la presse

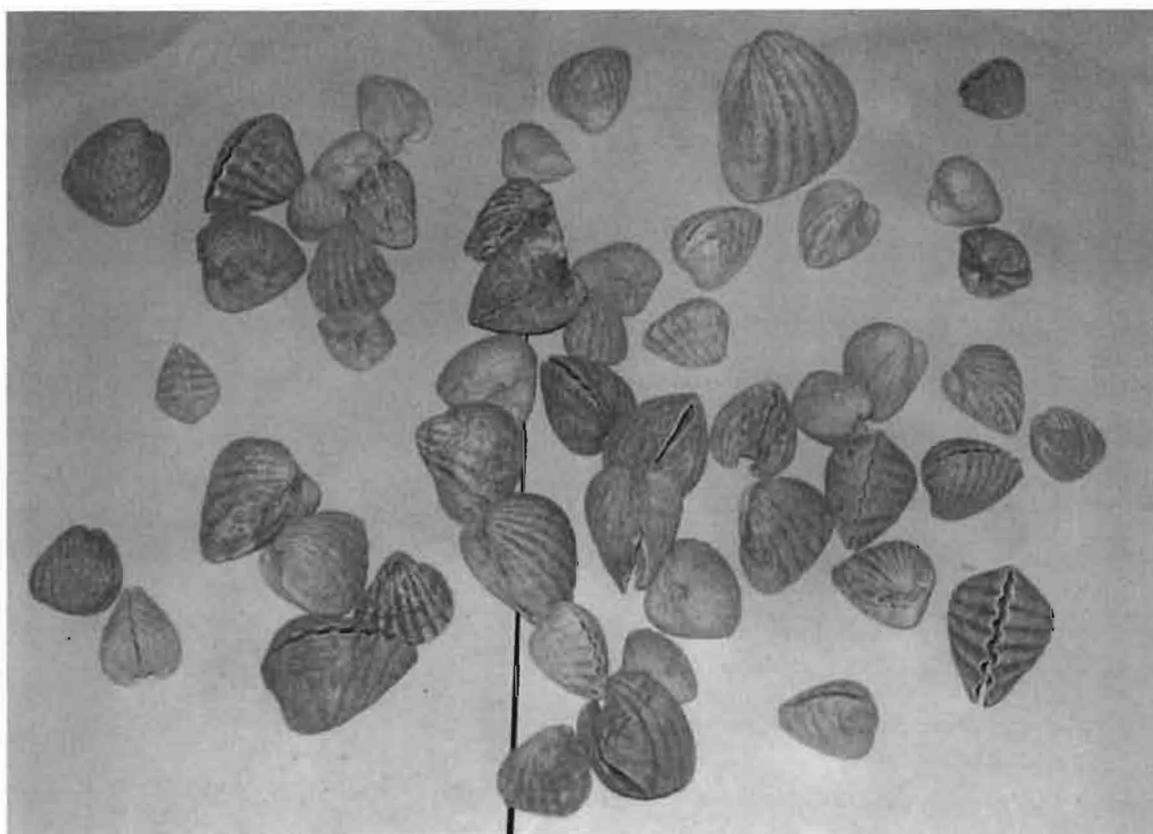


Figure III.15 : Coquillages formés de coquilles accouplées deux à deux.