

SOMMAIRE

Liste des abreviations

- 1- Liste des notations
- 2- Liste des unités

Introduction

Partie 1 : Partie bibliographique

- I- GENERALITE SUR LES REVETEMENTS
- II- PAVES
- III- PAVES AUTOBLOQUANTS
- IV- BETON
- V- PROCESSUS DE PRODUCTION DES PAVES
- VI- NORMES DES PAVES AUTOBLOCANTS

Partie 2 : Partie pratique

- I- MATIERES PREMIERES
- II- MATERIELS UTILISE
- III- DOSAGE DE CHAQUE ESSAIS
- IV- PROCESSUS DE L'ESSAI
- V- RESULTATS DES ESSAIS
- VI- INTERPRETATION DES RESULTATS

Partie 3 : Discussions

- I- PARAMETRES DE QUALITE DE LA PRODUCTION DES PAVES AUTOBLOQUANTS
- II- REMARQUES ET CONSTATATION

Conclusion

Reference bibliographique

Table de matiere

Resumer

LISTE DES ABREVIATIONS

1- LISTE DES NOTATIONS

C : ciment

S : sable

G : granulat

E : eau

E/C : rapport eau/ ciment

CaO : chaux

Fe₂O₃ : oxyde de fer

CEM I : Ciments Portland

CEM II / A ou B : Ciments Portland composés

CEM III / A, B ou C : Ciments de haut fourneau

CEM IV / A ou B : Ciments pouzzolaniques

CEM V/ A ou B : Ciments composés

CPA : Ciment Portland Artificiel

CHF : Ciment de haut fourneau

CEM II/A ou B-P : Ciment Portland à la pouzzolane

CEM II/A ou B-V : Ciment Portland aux cendres volantes

CEM II/A ou B-W : Ciment Portland aux cendres volantes

CEM II/A ou B-T Ciment Portland au schiste calciné

CEM II/A ou B-M : Ciment Portland composé

CEM II/A ou B-L : Ciment Portland au calcaire

CEM II/A ou B-LL : Ciment Portland au calcaire

CEM II/A ou B-Q : Ciment Portland à la pouzzolane

CEM II/A ou B-D : Ciment Portland à la fumée de silice

CEM II/A ou B-S : Ciment Portland au laitier

CLC : Ciment au laitier et aux cendres

CPZ : Ciment pouzzolanique

CLK : Ciment de laitier au clinker

CPJ : Ciment Portland Composé

CNRIT : Centre Nationale de Recherche et Industriel et Technologique

m_s : masse de sable

d_{app} : densité apparente

m_c : masse de ciment

V : volume

d_{abs} : densité absolue

c : coefficient volumétrique

P : poids

ES : Equivalent de Sable

h : hauteur

G/S : Gravier /Sable

γ : masse spécifique

\varnothing : diamètre

fig. : figure

UE : Union Européenne

EN : Européenne Norme

NM : Normes Malagasy

NF : Normes Français

N : Normale

R : Résistance

PM : Prise Mer

BNM : Bureau des Normes de Madagascar

SO₃ : oxyde de soufre

SSB : Surface Spécifique de Blaine

2- LISTE DES UNITES

l : litre

Kg : kilogramme

m³ : mètre cube

cm² : centimètre carré

Π : Pi

cm : centimètre

mm : millimètre

g : gramme

°C : degré Celsius

h : heure

min: minute

MPa : méga pascal

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Norme ASTM C 150 - Spécifications pour les ciments Portland

Tableau 02 : Norme ASTM C 595 - Spécifications pour les ciments composés

Tableau 03 : Classes de résistance selon la norme NF EN 197-1

Tableau 04 : Les principaux types de ciments courants de la norme NF EN 197-1

Tableau 05 : Correspondance entre anciennes et nouvelles désignations des ciments

Tableau 06 : Evolution des normes sur les ciments à Madagascar

Tableau 07 : Exigences normatives chimiques pour les ciments courants

Tableau 8 : Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons

Tableau 9 : Dosage en ciment-sable-gravier

Tableau 10 : Dosage ciment-sable-gravier-eau pour un volume de ciment

Tableau 11 : Dosage chaux-ciment

Tableau 12 : Processus de production des pavés autoblocants

Tableau 13 : Norme française NFP 98-303

Tableau 14 : dosage 250

Tableau 15 : dosage 300

Tableau 16 : dosage 350

Tableau 17 : place du mortier dans la moule pour chaque essai

INTRODUCTION

Dans le monde, la société insiste tout le temps à la conviction qui considère la qualité la plus importante, et les clients comme les rois. L'amélioration du cadre de vie et son intégration à l'environnement se sont traduites, pour les sols urbains ou domestiques, par une évolution aussi bien esthétique que fonctionnelle. Le sol n'est plus seulement une surface banalisée sur laquelle on marche ou on roule, c'est aujourd'hui un espace qui doit être beau par son aspect et sa couleur, tout en assurant durabilité et sécurité. Le béton coulé en place, le dallage et le pavage constituent des solutions idéales à ce sujet.

Le pavage est le procédé le plus couramment employé pour réaliser une terrasse de plain-pied en extérieur. Pour aménager une cour, une allée, un contour de piscine ou encore une terrasse, on peut choisir les pavés en béton, en pierre ou le pavé décoratif : pavé lumineux, en verre, en gazon ou en bois, etc. Les pavés de pierre présentent une difficulté de pose : leur forme irrégulière implique une mise en œuvre spécifique nécessaire pour qu'ils restent en place. Outre, le pavé moulé, dit "autobloquant", facilite ces travaux, et permet de réaliser des décors divers par sa variété de forme. Le pavé autobloquant est un pavé généralement en béton qui s'adapte à toutes les configurations et situations, dont la forme particulière ou les dimensions, permettent un emboîtement des éléments les uns dans les autres.

Cette étude est consacrée dans la technologie de production de ce matériau. Ici on va essayer de fabriquer un pavé autobloquant et de connaître ces paramètres de qualité de fabrication. Pour cette enquête, notre plan va se dérouler comme suit : en premier lieu la généralité et la méthode bibliographique de production du pavé autobloquant, la deuxième et la méthode pratique, et enfin la discussion.

PARTIE 1 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I- GENERALITE SUR LES REVETEMENTS [1]

L'homme n'a pas cessé d'améliorer son environnement dans le but de vivre convenablement. Il commence par se soucier de son logement pour sa protection, puis de son entourage pour ses déplacements.

Cependant, au cours de ses activités, heurte à son ennemi numéro un qui est la poussière. Vient ensuite la boue qui provoque le glissement. L'idée de revêtir le sol est alors venue à son esprit, non seulement en vue de résoudre le problème de poussière, mais de plus en plus, dans le but de résister aux différentes efforts que le sol doit subir (charge provenant des piétons, des chevaux, des bœufs, des carrosses, des bicyclettes, des automobiles, etc).

Les premiers revêtements meilleurs datent de 312 avant Jésus Christ, ces sont des œuvres des ROMAINS. L'Egypte, vers 2600ans avant Jésus Christ avait déjà des revêtements en pierre qui servaient notamment aux transports des matériaux nécessaires à la construction des pyramides. Mais de tous les peuples de l'antiquité, ce sont les romains qui firent les meilleurs revêtements. Ils sont appelés vulgairement « VOIES ROMAINES ».

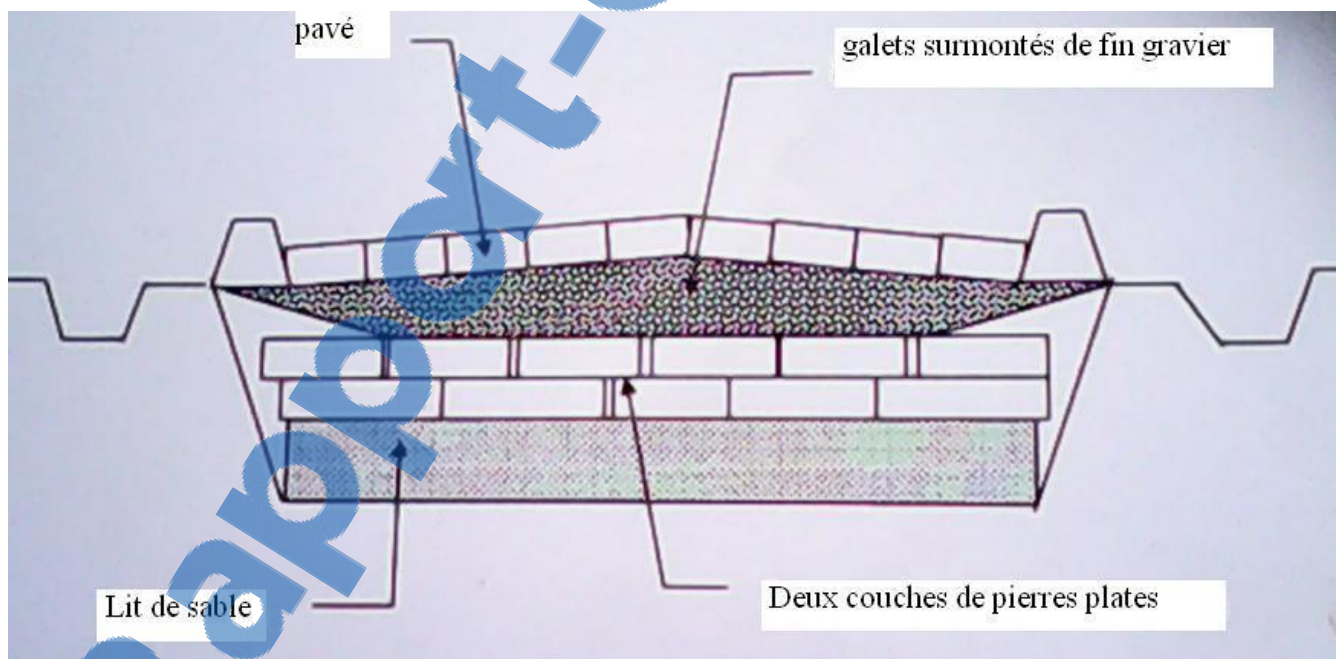


Fig. 01 coupe transversale du Voie romaine

I.1-CLASSEMENT DES REVETEMENTS

Actuellement, on peut rencontrer plusieurs types de revêtements à destinations variées : dallage en pierre naturelle (trottoir), chape de ciment (écurie), carreaux céramiques (laboratoire), caoutchouc (bâtiments hospitaliers), goudron (route), etc...

Leur classement peut s'effectuer de plusieurs façons :

a) Du point de vue épaisseur

Il est divisé en deux catégories :

- Revêtement épais : brique, chape de ciment, dallage en pierre naturelle ;
- Revêtement mince : parquets mosaïques, revêtement plastique, caoutchouc.

b) Du point de vue matériaux constitutifs

Comme tout matériau de construction, on peut trouver quelque type de matériau constitutif de revêtement :

- Pierre ;
- Céramique ;
- Bois ;
- Plastique.

c) Du point de vue forme ou mode de pose

Un revêtement peut être classé à partir de sa forme ou de sa mode de pose c'est-à-dire sa constitution externe.

- Dalles ;
- Pavés ;
- Carreaux ;
- Monolithe ;
- Coulés.

d) Du point de vue de leur rigidité

Chaque revêtement a ses caractéristiques principal ce qui le différencie aux autres. Donc on peut les classés par ces caractéristiques, l'un le plus connue de ces caractéristiques est la rigidité. On peut classer les revêtements suivant leur rigidité.

- Rigide : béton de ciment ;
- Souple : goudron.

e) **Du point de vue aspect général**

Au point de vue aspect général, on peut classer deux types de revêtement :

- Continu : revêtement à base de liants hydrocarbonés (goudron, bitume) ;
- Discontinu : dalles, pavés.

f) **Du point de vue destination**

On peut citer :

- Pour bâtiments (plancher) : carreaux céramiques, chape de ciment ;
- Spéciaux ou d'usage à caractère industriel (atelier, hangar, quai, cours, laboratoire,...) ;
- Routiers (circulation de véhicules, circulation des piétons).

I.2- LES REVETEMENTS ROUTIERS

Dans tous les cas, ces sont les revêtements routiers qui occupent une place importante parmi tous les revêtements.

Ces revêtements :

- Gage du confort et sécurité des usagers ;
- Garantissent la circulation des véhicules les plus légers au plus lourds ;
- Permettent la liaison, la communication et échanges entre les deux lieux ;
- Assurent l'évacuation des produits locaux.

Ils ont donc un impact non négligeable sur la vie économique d'un pays ou d'une ville en particulier.

Les principaux revêtements utilisés en technique routière actuellement sont les suivants :

- Empierrement ordinaire ;
- Route stabilisée ;
- Macadam-mortier ;

- Tapis superficiels de protection à base liants hydrocarbonés (goudron, asphalte, bitume, cut-back) ;
- Matériaux agglomérés ;
- Pavage en pierre, en bois.

Ils doivent :

- Permettre pour le trafic, une circulation facile et sûre, et voir des possibilités d'aménagements ultérieurs, en fonction de l'évolution économique et démographique ;
- Résister aux efforts transmis par les roues ou bandages des véhicules, sans usure ou déformation sensibles ;
- Etre d'un entretien commode ;
- Nécessiter pour leur construction et leur entretien, des dépenses raisonnables et de toute façon, en rapport avec les ressources dont dispose la collectivité qui prend en charge.

Pour avoir un bon revêtement routier : confort, longue durée de vie, économique,..., il faudra veiller aux points suivants :

- La qualité du revêtement superficiel lui-même ;
- La qualité des sous couches du revêtement.

L'usage des liants hydrocarbonés est actuellement très répandu en raison de nombreux avantages qu'il présente, par exemple :

- Imperméabilité de la couche superficielle ;
- Suppression de la boue et de la poussière.

Cependant, il présente aussi de nombreux inconvénients. Des défauts et des maladies peuvent se manifester, par exemple, le désenrobage qui est le décollement de la pellicule de liant enveloppant les matériaux enrobés sous l'effet de la circulation et surtout de l'eau qui s'insère entre la surface des grains du matériau et le liant, lorsque l'adhésivité est insuffisante.

II- LES PAVES [1] [2]

Nous avons vu que, parmi les revêtements routiers, ces sont les pavés sont les plus excellents du point de vue longévité.

Aussi, dans le cas de MADAGASCAR, la solution de pavage est la meilleure pour notre situation actuelle.

Définition :

Un **pavé** est un bloc en pierre ou en béton utilisé pour le revêtement de la chaussée. De nos jours, il est utilisé essentiellement pour des voies piétonnières ou rarement empruntées, dans des secteurs historiques ou pour de courts segments de routes.

Les pavés sont utilisés dans le domaine de la construction pour le revêtement de sols ou de chaussées par pavage. Les revêtements de chaussée en pavés ont connu un regain en Europe au cours des dernières décennies avec le développement des voies piétonnes dans les centres villes. Ils en avaient été souvent chassés et remplacés par du macadam (le terme macadam est impropre car ce type de revêtement de sol ne contient ni bitume ni goudron. Il faut plutôt parler d'enrobé ou de béton bitumineux), notamment en France, pour trois raisons principales :

- le bruit de roulement ;
- l'inconfort pour les piétons, cyclistes et véhicules ;
- parce que les pavés ont souvent servi, en particulier à Paris, pour construire des barricades pendant les périodes troublées.

Le pavage non maçonné présente l'avantage (lorsque le risque de pollution est limité) de rendre la route plus perméable à l'eau, les pluies engorgeant moins les réseaux d'égout et contribuant moins aux inondations (et donc aux sécheresses, car alimentant la nappe superficielle).

Des tronçons de routes pavées ont été conservés pour la course cycliste Paris-Roubaix dont ils sont le symbole et l'une des difficultés principales.

II.1- LES DIFFERENTS TYPES DE PAVES

Les différents types de pavés sont :

- Pavés en bois ;
- Pavés en briques et autre matériaux ;
- Pavés en pierre ;
- Les pavés mécaniques en béton.

II.1.1- Pavés en bois

Il a été très en faveur dans certaines grandes villes (Paris, Londres) et progressivement abandonné en raison de l'insuffisance de rugosité qu'il présente pendant les temps pluvieux, ainsi que le coût élevé du premier établissement et de l'entretien.

II.1.2- Pavés en briques

Il est constitué par des briques spéciales, soient dures, soient semi-plastiques.

II.1.3- Pavés en pierre

Ils constituent le plus souvent les rues des villes, utilisés dans les voies de circulation lourdes et intenses. Les pavés utilisés sont taillés à partir des roches dures (granit, basalte, porphyre, quartz), dont on contrôle au laboratoire leurs caractéristiques principales (densité, porosité, usure, résistance à l'écrasement et au choc).

II.1.4- Les pavés mécaniques en béton

Moulés et de forme régulière, ils se posent généralement sur du sable, mais aussi sur de la criblure de pierre couramment appelée poussière de pierre. Le fait qu'ils s'encastrent parfaitement les uns dans les autres rend inutile le jointoiement au mortier. Il est en revanche nécessaire de préparer avec soin le terrain où l'on va les poser. Le terrain doit être décaissé, c'est-à-dire qu'on doit enlever l'épaisseur nécessaire pour les pavés eux-mêmes, le matériau permettant un nivelage adéquat du pavé (sable ou criblure) ainsi que la fondation pour les régions où les risques de gel viendraient surélever les pavés par un manque de drainage et ainsi mettre en cause la qualité des travaux finis. En fonction de la nature du terrain, il peut s'avérer utile de poser au préalable un géotextile (film).

II.2- CARACTERISTIQUES DES PAVES

Puisque les pavés de pierre sont actuellement les plus souvent utilisés, on n'indique ici que les caractéristiques de ceux-ci.

Selon les Normes françaises : P. 98-301 et P. 98—401 éditées par AFNOR.

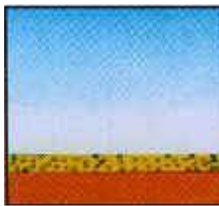
A titre d'exemple ces caractéristiques devront :

- Densité $> 2,5 \text{ t/m}^3$;
- Porosité $< 1,5$;
- La résistance à la compression $> 3000 \text{ kgf/cm}^2$.

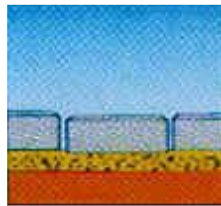
II.3- POSE DES PAVES [3]

Avant de commencer l'ouvrage de recouvrement de sol, il convient de connaître la résistance du sous-sol sur lequel sera disposé le pavage. Dans tous les cas, la base destinée à recevoir le pavage sera préalablement aplanie, présentant une surface absolument lisse. Si une pente, un dévers... est prévu, il sera indispensable de niveler soigneusement et de profiler selon la pente qu'on désire donner au dallage.

La pose des pavés s'opère généralement en commençant par placer les boutisses et les pavés destinés à limiter le pavage, suivant les alignements et pentes déterminées. Les pavés sont ensuite posés par rangées de largeur uniforme, sur un lit de sable de 10 à 15 cm d'épaisseur et damé, avec apport d'eau jusqu'à stabilité. Les joints à surface sont aussi serrés que possible. Les sables sont jetés dans les joints au moyen du balai et de l'arrosage en pleine eau.



Surface préparée



Pose des Pavés



Remplissage des joints



Balayage



Arrosage

Fig. 02 : processus de la pose pavée

Remarques :

Pour les zones piétonnières ou faiblement circulées, les charges sont faibles et ne nécessite qu'une structure légère pour supporter les pavés.

Lorsque le terrain de support est de bonne qualité et insensible à l'eau, il suffit, après terrassement, de le compacter et de poser les pavés sur un lit de sable de 3 à 4cm d'épaisseur.

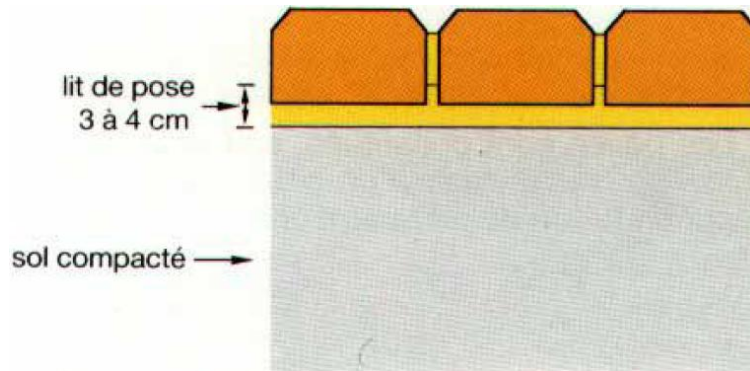


Fig. 03 : vue de profil d'un revêtement en pavé d'un terrain de support de bonne qualité

Lorsque le terrain présente des caractéristiques de portance insuffisante (limon, argiles-plastique), on réalise une couche de fondation en graves naturel ou en grave-ciment de 8 à 10 cm pour les voies piétonnes, d'environ 15 lorsque la voie peut être empruntée par des véhicules. Les pavés sont ensuite posés, comme précédemment, sur un lit de sable de 3 à 4 cm.

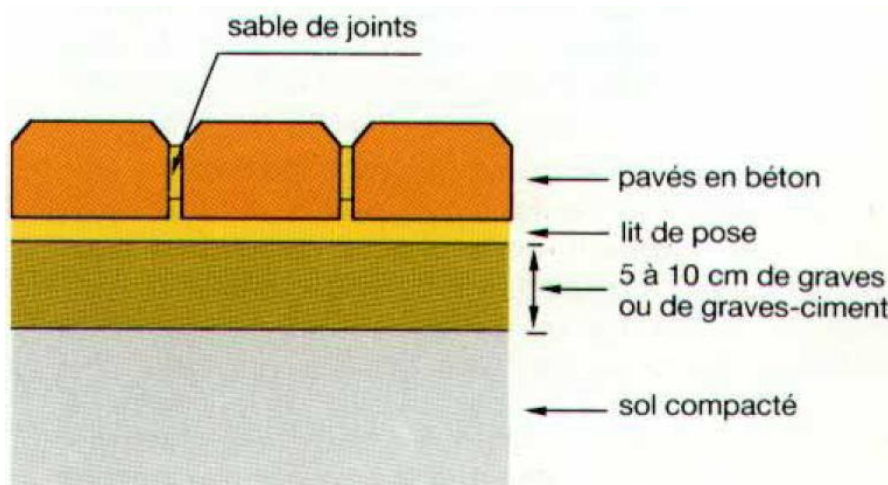


Fig. 04 : revêtement en pavé d'un terrain qui présente des caractéristiques de portance insuffisante

II.4- ENTRETIEN

L'entretien des pavés se ramène à des simples opérations :

- De ressoufflage : qui consiste à lever au moyen de pinces les pavés enfoncés qu'il faut remonter, et à regarnir les joints par du sable ;
- De repiquage : qui a pour objet la réparation des trous et des flaches (déformation d'un ensemble de pavés) ;
- De remplacement des pavés défectueux.

II.5- INCONVENIENTS ET AVANTAGES

a) Inconvénients :

Malgré la longévité appréciée des pavés, ils peuvent subir les dégradations notables suivantes :

- Enfoncement d'un ou plusieurs pavés ;
- Arrachement des éléments ;
- Flache ou déformation d'un ensemble de pavés ;
- Cassure des joints ;
- Usure de la face de roulement.

Ils peuvent devenir un projectile à certaines occasions et aggravant le bruit de la circulation générale. Ces sont les raisons pour lesquelles, les chaussées circulées en pavés de pierre disparaissent progressivement.

b) Avantage :

Néanmoins, les pavés présentent beaucoup d'avantages. Outre leur longévité, ils ont l'avantage d'être très solides et facilement changeable. Avec différentes tailles et variétés de pierre, on peut obtenir des pavés de pierre à multiples dessin et dispositions architecturales.

C'est alors qu'est apparue une nouvelle génération de pavés utilisant le béton comme matériau constitutif. Pavés qui allient esthétique et durabilité.

III- PAVES AUTOBLOQUANTS [4] [5]

1- Définition :

Ils sont de forme telle qu'après mise en place, il y ait liaison horizontale, dans une ou plusieurs directions entre les éléments du dallage ainsi constitué.

Pour éviter les bris de pavés, leur épaisseur doit être fonction des charges supportées.

Ainsi :

- les pavés de 6 cm sont conçus pour les voies peu chargées : trottoirs, parking, cours urbains ;
- les pavés de 8 ou 10 cm sont les trafics lourds et intenses : rues, aménagement des carrefours, zone portuaire ;
- les pavés de 12 et 13 cm sont réservés uniquement pour les sollicitations très élevées.

2- Pose des pavés

L'entretien du pavé ne doit se faire directement sur la couche d'assise. Il faut donc prendre le soin d'y mettre d'abord du sable de l'ordre de 3 cm d'épaisseur qui doit être uniforme quel que soit la destination du pavé.

Les pavés doivent être à joints les plus serrées possibles pour éviter les trépidations. On doit répandre sur les pavés posés du sable fin (de granulométrie 0/2 de préférence) et de balayer pour le faire pénétrer dans les joints.

Pour terminer une pose suivant la largeur de chaussée, il y a lieu d'utiliser des demi-pavés ou des pavés en Té. Aussi, on a besoin de rive contre la résistance aux efforts horizontaux (bordures de trottoirs posées sur fondation en béton).

3- Entretien

L'entretien de n'importe quelle chaussée est destiné à remédier les dégradations due au trafic et aux effets climatiques, donc à éviter la détérioration de celle-ci.

Comme pour toute chaussée, on doit effectuer le balayement, l'engazonnement et le curage des fossés et des ouvrages de drainage.

Pour les pavés, les entretiens possibles sont :

- le ressoufflage de sable pour les pavés enfoncés ;
- le remplacement des pavés écrasés ou fissurés ;
- le rechargement des joints ;
- la remise à niveau des parties abaissées dues à l'affaissement.

4- Variété de modèles de pavés autobloquants [6]

a) pavés classiques

Ils sont non autobloquants et présentent le plus souvent leurs côtés opposés plans et parallèles, de forme polygonale (carrés, rectangulaire, hexagonaux).

b) pavés autobloquant à emboîtement

Ils sont de forme qu'après mise en place, il y ait liaison horizontale, dans une ou plusieurs directions, entre les éléments du dallage ainsi constitués.

Les pavés autobloquants à emboîtement qui se déclinent en :

- pavés autobloquants unidirectionnels ;
- pavés autobloquants multidirectionnels.

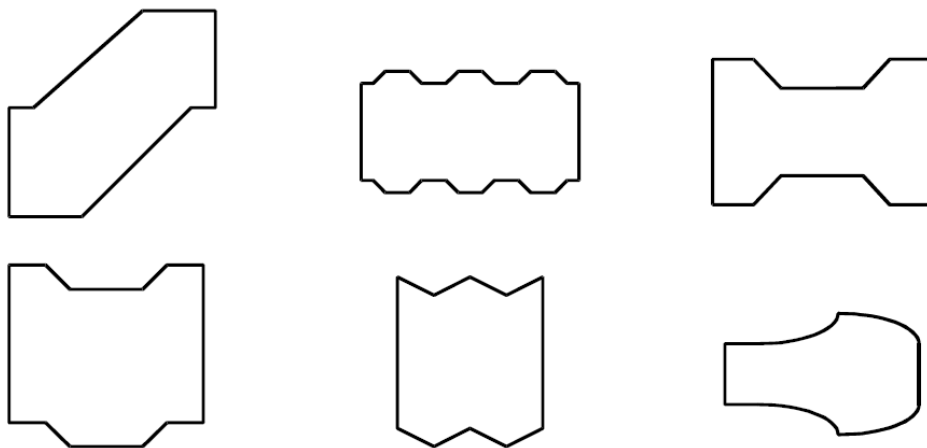


Fig. 05 : Pavés autobloquants unidirectionnels

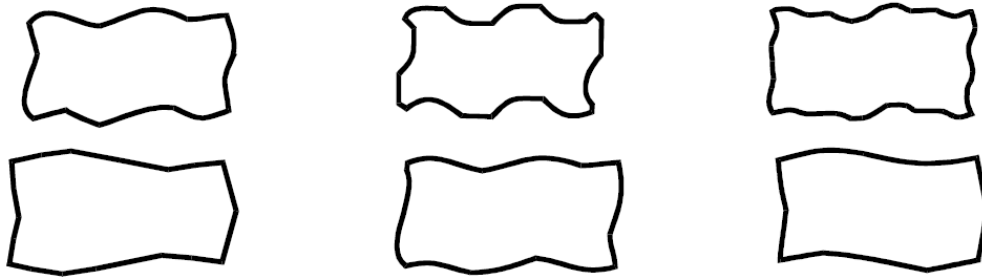


Fig. 06 : Pavés autobloquants multidirectionnels

c) Pavés autobloquants à emboîtement et épaulement

Ils sont de forme telle qu'après mise en place, il y ait liaison horizontale et verticale entre les éléments ainsi constitués.

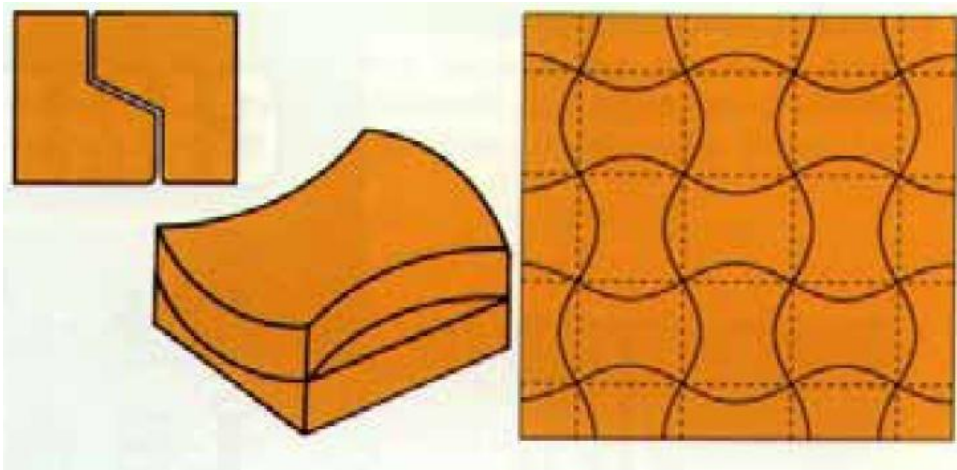


Fig. 07 : Pavés autobloquants à emboîtement et épaulement

IV- LE BETON [1] [7]

Les pavés de béton couvrent un domaine d'appréciation de plus en plus vaste. A ce jour, chaque année, plus de, Cinq millions de mètre carré de chaussées en pavés de béton sont réalisés en France. Ce phénomène s'explique par des qualités inhérentes à ce produit au niveau de sa constitution et de sa mise en œuvre.

A- DEFINITION ET CONSTITUTION

Le béton est le matériau le plus important parmi ceux dont dispose l'ingénieur des travaux publics. Il résulte du mélange intime d'un liant (généralement du ciment), d'eau et de granulats. Il supporte les efforts considérables de compression sans se déformer ni se fissurer.

1- LE LIANT :

Le liant joue un rôle important dans la fabrication du béton : celui de lier les autres constituants entre eux. Pratiquement, il peut être défini quatre types de liant :

- Ciment naturel (Portland) ;
- Ciment artificiel (Portland et laitier) ;
- Ciment spécial ;
- Chaux.

Les ciments sont des poudres fines, obtenus par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres forment avec l'eau une pâte capable par "hydratation" de faire prise et de durcir progressivement (plus ou moins rapidement), d'où le nom de liant hydraulique par opposition avec les liants aériens (à base de chaux grasse) qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air.

1.1- Normalisation des différentes catégories de ciment: [7]

Plusieurs normes sont utilisées pour la normalisation des ciments. Ces normes peuvent être propres à un pays ou adoptées par un ensemble de pays. Les pays membres de l'Union Européenne (UE), par exemple, utilisent la même norme EN 197-1 dans le domaine des ciments.

Les normes de référence des ciments courants sont les normes américaines ASTM C 150 et C 595 et la norme européenne EN 197-1 publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1.

A Madagascar une nouvelle norme qui concerne les ciments, publiée par le Bureau des Normes Malagasy sous la référence NM 031, vient d'être créée. Cette norme NM 031 s'appuie sur la norme européenne EN 197-1.

1.1.1- Les normes ASTM

Les normes ASTM sont les plus utilisées pour le commerce du clinker et du ciment. Elles font une distinction entre les ciments Portland et les ciments composés.

a) Les ciments Portland

Les ciments Portland reposent principalement sur la norme « ASTM C 150 : Specification for Portland Cement », associée à différentes méthodes et spécifications de mesures.

Tableau 01 : Norme ASTM C 150 - Spécifications pour les ciments Portland

Type I	Usage général
Type II	Chaleur d'hydratation et résistance aux sulfates modérées
Type III	Résistance initiale élevée
Type IV	Faible chaleur d'hydratation
Type V	Résistance aux sulfates élevée
A	Avec entraîneur d'air
LA	Faible teneur en alcalis

La norme ASTM C 150 ne tolère que des additions de sulfate de calcium et des agents entraîneurs d'air dans les ciments. D'autres additifs peuvent être utilisés à condition de rencontrer, en cas d'addition, les spécifications de la norme ASTM C 465 qui fixe les écarts de propriétés des ciments admissibles :

- le besoin en eau pour la consistance normale ne doit pas être augmenté de plus de 1 % ;
- le temps de début de prise, mesuré selon la méthode Vicat, ne doit pas varier (diminuer ou augmenter) de plus de 1 heure ou de 50 % ;

- l'expansion en autoclave ne peut pas augmenter de plus de 0,1 % ;
- la résistance à la compression ne peut pas diminuer de plus de 5 %.

b) Les ciments hydrauliques composés

La norme américaine ASTM C 595 autorise l'utilisation de pouzzolane et de laitier dans les ciments composés à condition de satisfaire les spécifications de l'activité pouzzolanique. Notamment, la résistance à la compression du ciment composé doit atteindre au moins 75 % celle du ciment Portland de référence.

Tous ces types de ciment peuvent être conditionnés pour répondre à d'autres critères :

- résistance modérée aux sulfates ;
- avec entraîneur d'air ;
- chaleur d'hydratation modérée.

Tableau 02 : Norme ASTM C 595 - Spécifications pour les ciments composés

Type	Composition
Type S	Ciment au laitier avec un minimum de 70 % de laitier
Type IS	Ciment de haut fourneau avec 25 à 70 % de laitier
Type I (SM)	Ciment Portland au laitier contenant moins de 25 % de laitier
Type P	Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40 % de pouzzolane
Type IP	Ciment à la pouzzolane avec 15 à 40 % de pouzzolane, mais avec un développement de résistance plus fort que le type P
Type I (PM)	Ciment Portland à la pouzzolane contenant moins de 15 % de pouzzolane

1.1.2- la norme européenne EN 197-1

La norme européenne EN 197-1 est publiée par l'AFNOR sous la référence NF EN 197-1 « Ciment – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants ».

a) Classes de résistance

Un mode de classification des ciments le plus utilisé est la classification suivant les résistances mécaniques, et plus exactement la résistance à la compression simple.

Selon la norme NF EN 197-1, les ciments sont répartis en trois classes : 32,5, 42,5 et 52,5, définies par la valeur minimale garantie de la résistance normale du ciment à 28 jours. La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression simple mesurée à 28 jours sur mortier normal conformément à la norme NF EN 196-1 et exprimée en MPa.

Tableau 03 : Classes de résistance selon la norme NF EN 197-1

Classes de résistance			
Désignation de la classe	Résistance à la compression [MPa]		
	à 2 jours	à 28 jours	
	Limite inférieure	Limite inférieure	Limite supérieure
32,5 N	-	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	≥ 10		
42,5 N	≥ 10	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	≥ 20		
52,5 N	≥ 20	$\geq 52,5$	-
52,5 R	≥ 30		

- Sous classe N : Normale
- Sous classe R : Résistance au jeune âge élevée

Remarque :

1°- Pour l'ancienne norme NF P 15 301 jusqu'en 1994, les classes de résistance étaient définies par la valeur moyenne de la résistance normale du ciment à 28 jours en MPa.

2°- L'ancienne classe 35 n'a plus de correspondance dans la nouvelle norme.

3°- 45 et 45 R \rightarrow 32,5 N et 32,5 R

55 et 55 R \rightarrow 42,5 N et 42,5 R

HP et HPR \rightarrow 52,5 N et 52,5 R

4° Pour les liants dont la résistance normale moyenne est inférieure à 35 MPa, la classe de résistance est définie par sa valeur exprimée en bar.

b) Les ciments de la norme NF EN 197-1 : Ciments courants

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types principaux selon la nature des constituants.

Tableau 04 : Les principaux types de ciments courants de la norme NF EN 197-1

Type	Désignation
<ul style="list-style-type: none"> • Ciments Portland • Ciments Portland composés • Ciments de haut fourneau • Ciments pouzzolaniques • Ciments composés 	CEM I CEM II / A ou B CEM III / A, B ou C CEM IV / A ou B CEM V/ A ou B

Signification des lettres :

A, B ou C pour indiquer l'importance de la proportion des constituants

A titre indicatif, nous donnons ci-après le tableau de correspondance entre anciennes et nouvelles désignations des ciments courants.

Tableau 05 : Correspondance entre anciennes et nouvelles désignations des ciments

<i>Jusqu'en 1994 NF P 15 301</i>		<i>A partir de 2001 NF EN 197-1</i>	
Ciment Portland Artificiel	CPA	Ciment Portland	CEM I
Ciment Portland Composé	CPJ	Ciment Portland au laitier	CEM II/A ou B-S
		Ciment Portland à la fumée de silice	CEM II/A ou B-D
		Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A ou B-P
			CEM II/A ou B-Q
		Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A ou B-V
			CEM II/A ou B-W
		Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A ou B-T
Ciment de haut fourneau	CHF	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A ou B-L
			CEM II/A ou B-LL
Ciment de laitier au clinker	CLK	Ciment Portland composé	CEM II/A ou B-M
Ciment pouzzolanique	CPZ	Ciment de haut fourneau	CEM III/A, B ou C
Ciment au laitier et aux cendres	CLC	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A ou B
		Ciment composé	CEM V/A ou B

Signification des lettres :

- *A, B ou C pour indiquer l'importance de la proportion des constituants*
- *M pour signaler qu'on a au moins 2 constituants principaux*
- *Désignation des constituants principaux :*
 - *S : Laitier de haut fourneau - D : Fumée de silice - P : Pouzzolane naturelle*
 - *Q : Pouzzolane naturelle calcinée - V : Cendres volantes siliceuses*
 - *W : Cendres volantes calciques - T : Schiste calciné*
 - *L : Calcaire - LL : Calcaire*

c) Caractéristiques complémentaires normalisées

Pour certains types d'ouvrages, des exigences relatives aux caractéristiques des ciments peuvent être requises ; elles font l'objet de normes spécifiques.

i. Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15 317

Les ciments n'ont pas tous la même résistance aux attaques chimiques liées à l'environnement marin ; l'emploi de ciments présentant de bonnes caractéristiques de résistance à ces agressions est donc nécessaire.

Ces ciments sont signalés par la mention PM (Prise Mer) dans la cartouche de marquage. Ils présentent des teneurs limitées en aluminat tricalcique C3A ce qui leur permettent de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates en présence d'ion chlorures, au cours de la prise et ultérieurement.

ii. Ciments à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15 318

Ces ciments sont des produits dont les caractéristiques sont complémentaires de celles des ciments courants de la norme NF EN 197-1. Ils sont signalés par la mention CP sur leur emballage. Ils trouvent leurs principales applications dans les ouvrages de masse et certains ouvrages en béton précontraint.

iii. Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15 319

Les eaux séléniteuses constituent un milieu particulièrement agressif, qui nécessite l'emploi de ciments spécifiques. Ces ciments présentent également des teneurs limitées en aluminat tricalcique. Ils comportent la mention ES sur leur emballage.

iv. ***Ciments pour usage en milieu tropical (UT) NF P 15 302***

Ce sont des ciments de la norme NF EN 197-1 mais avec des caractéristiques complémentaires qui les rendent aptes aux usages en milieu tropical. Ils sont signalés par la mention UT sur leur emballage.

Exceptionnellement, une classe de résistance 22,5 est définie pour ces ciments.

Remarques : Certains certificateurs nationaux ont défini :

- les ciments à teneur limitée en alcalis;
- les ciments à faible chaleur d'hydratation.

1.1.3- les normes MALAGASY pour les ciments

Elaborées sous la direction du bureau des normes de Madagascar BNM en janvier 2010, les normes malagasy pour les ciments comportent les rubriques suivantes :

- NM 031-1 : Ciments à usages courants ;
- NM 031-2 : Evaluation de la conformité ;
- NM 032-1 : Liants à maçonner ;
- NM 032-2 : Ciments pour travaux près bord de mer ;
- NM 032-3 : Ciments à usage tropical.

a) Evolution des normes régissant les ciments à Madagascar

A Madagascar, les normes en vigueur et utilisées par les laboratoires de contrôle sont celles publiées par le BNM.

Le tableau suivant décrit l'évolution des normes sur les ciments à Madagascar.

Tableau 06 : Evolution des normes sur les ciments à Madagascar

	Jusqu'en 1985	1985-1994	1994-2001	2001-2005	2005-2007	2007-2009	2010
Normes appliquées	NF P 15 301 de 1973	NF P 15 301 de 1985	NF P 15 301 de 1994	NF EN 197-1	NM 031	NM 031	NM 031-1
					NM NF P 15 302	NM NF P 15 302	NM 032-2
					NM NF P 15 317	NM NF P 15 317	NM 032-3
Appellations des types de ciments	CPA	CPA	CPA – CEM I			CEM I	CEM I
	CPJ	CPJ	CPJ – CEM II			CEM II	CEM II
						CEM III	CEM III
						CEM IV	CEM IV
						CEM V	CEM V
Classes de résistance	225	35	22,5			22,5	22,5
	325	45	32,5			32,5	32,5
	425	55	42,5			42,5	42,5

b) Les ciments à usages courants de la norme NM 031-1

Les ciments de la norme NM 031-1 sont définis comme ciments courants à l'instar des autres ciments plus spécifiques, dans la composition, la fabrication et/ou l'utilisation. Les différents types de ciments courants proviennent de la quantité de clinker ainsi que des autres constituants principaux selon leur nature et leur proportion dans le ciment.

La norme NM 031-1 s'appuie sur la norme européenne NF EN 197-1.

- Le tableau 08 donne les exigences normatives chimiques des ciments courants;
- Le tableau 09, la désignation des différents types de ciments courants et leur composition, selon la norme NM 031-1.

Tableau 07 : Exigences normatives chimiques pour les ciments courants

Propriétés	Référence de l'essai	Type de ciment	Classe de résistance	Exigences (a)
Perte au feu	EN 196-2	CEM I	Toutes classes	$\leq 5,0 \%$
		CEM III		
Résidu insoluble	EN 196-2 (b)	CEM I	Toutes classes	$\leq 5,0 \%$
		CEM III		
Sulfate (SO_3)	EN 196-2	CEM I CEM II (c) CEM IV CEM V	32,5 N	$\leq 3,5 \%$
			32,5 R	
			42,5 N	
			42,5 R	$\leq 4,0 \%$
			52,5 N	
			52,5 R	
		CEM III (d)	Toutes classes	
Chlorure	EN 196-21	Tous types (e)	Toutes classes	$\leq 0,10 \%$ (f)
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	Toutes classes	Satisfait à l'essai

(a) Les exigences sont données en pourcentage (%) du ciment produit fini.

(b) Détermination des résidus insolubles dans l'acide chlorhydrique et le carbonate de sodium

(c) Le ciment de type CEM II/B-T peut contenir un maximum de 4,5% de SO_3 quelle que soit la classe de résistance

(d) Le ciment de type CEM III/C peut contenir un maximum de 4,5% de SO_3

(e) Le ciment de type CEM III peut contenir plus de 0,10% de chlorure mais, dans ce cas, la teneur maximale en chlorure doit figurer sur l'emballage et/ou le bon de livraison

(f) Pour des applications ou précontrainte, les ciments peuvent être produits selon une exigence plus basse. Dans ce cas, la valeur de 0,10% doit être remplacée par cette valeur plus basse qui doit être mentionnée sur le bon de livraison

Les ciments à usage tropical de la classe de résistance 22,5 doivent satisfaire aux spécifications chimiques données pour les ciments de la classe 32,5 de la norme NM 031-1.

1.2- CARACTERISTIQUES [7]

1.2.1- Caractéristiques physiques

a- Couleur

Elle varie avec la composition chimique des matières premières (particulièrement la teneur en oxydes de fer) et la nature des combustibles. Généralement elle est grise à cause des cendres des combustibles solides, mais il existe toute une gamme de coloris, et particulièrement

les ciments blancs obtenus par l'utilisation de matières premières très pures et de combustibles fluides.

b- Finesse de mouture (NF EN 196-6)

Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. La notion la plus utilisée est la surface spécifique de Blaine notée SSB.

Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette grandeur est généralement comprise entre 2500 et 5000 cm^2/g

c- Densités

➤ *Masse volumique apparente*

Appelée aussi « poids au litre » du ciment, elle représente la masse de la poudre par unité de volume (vides entre les éléments inclus).

Elle est de l'ordre de 1000 Kg/m^3 en moyenne pour un ciment courant.

La densité apparente est la masse volumique apparente rapportée à celle de l'eau ($d = 1$).

➤ *Masse volumique absolue ou masse spécifique*

Elle représente la masse totale de tous les grains de solides contenus dans une unité de volume (vides entre les éléments exclus).

Elle varie de 2900 à 3150 Kg/m^3 , suivant le type de ciment. Un ciment de faible masse spécifique ($\gamma < 2900 \text{ Kg}/\text{m}^3$) indique une forte concentration en produits d'addition ou une mauvaise cuisson pour son clinker.

La densité absolue est la masse spécifique rapportée à celle de l'eau ($d_{\text{abs}} = 3,1$).

d- Expansion (NF EN 196-3)

C'est un phénomène qui se passe au cours de la prise et le durcissement du ciment par une augmentation de volume due à un excès de sulfates, de chaux libre ou de magnésie.

Il permet de s'assurer de la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas dépasser 10mm sur pâte pure pour tous les ciments courants.

e- Retrait (NF P 15 433)

C'est une diminution de volume pendant le durcissement qui est due à un départ d'une partie de l'eau de gâchage par évaporation. La mesure est effectuée sur éprouvette prismatique de «mortier normal » 4 x 4 x 16 cm.

f- Eau de consistance normale (NF EN 196-1)

Elle caractérise la quantité d'eau utile pour obtenir une « consistance normale » pour un « mortier normal ».

1.2.2- Caractéristiques mécaniques

Elles définissent la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante, pour les ciments, est la résistance à la compression simple. Quelque fois il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure.

Conformément à la norme NF EN 196-1, la classe de résistance d'un ciment est définie par la valeur minimale garantie de la résistance à la compression du mortier normal à 28 jours et exprimée en MPa.

La classe vraie d'un ciment, notée FCE, est sa résistance moyenne effective mesurée expérimentalement (avant utilisation d'un nouveau lot).

1.2.3- Hydratation, prise et durcissement

a- Hydratation:

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables, s'hydratent ; il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydrates stables.

La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter pour le gâchage correct du ciment est supérieure à la quantité strictement nécessaire aux seules réactions chimiques ; on doit en effet, distinguer :

- L'eau d'hydratation (ou de cristallisation) fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et nécessaire à leur structure cristalline ; elle est en général de l'ordre de 25 à 30% du poids du ciment.
- L'eau absorbée qui pénètre plus ou moins, à l'intérieur des granulats selon leur degré de porosité.

- L'eau libre qui s'élimine plus ou moins par séchage. Elle n'est nécessaire que pour obtenir la viscosité, la plasticité et l'onctuosité indispensable au gâchage et à la mise en place correcte du béton.

b- La prise

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

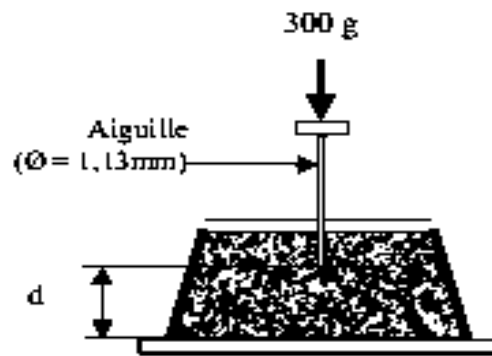


Fig. 08: Détermination du temps de début de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui, dans la pratique, se mesure au moyen de l'aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance ($d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) du fond de l'anneau de 40 mm de hauteur remplie de pâte pure de ciment.

De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

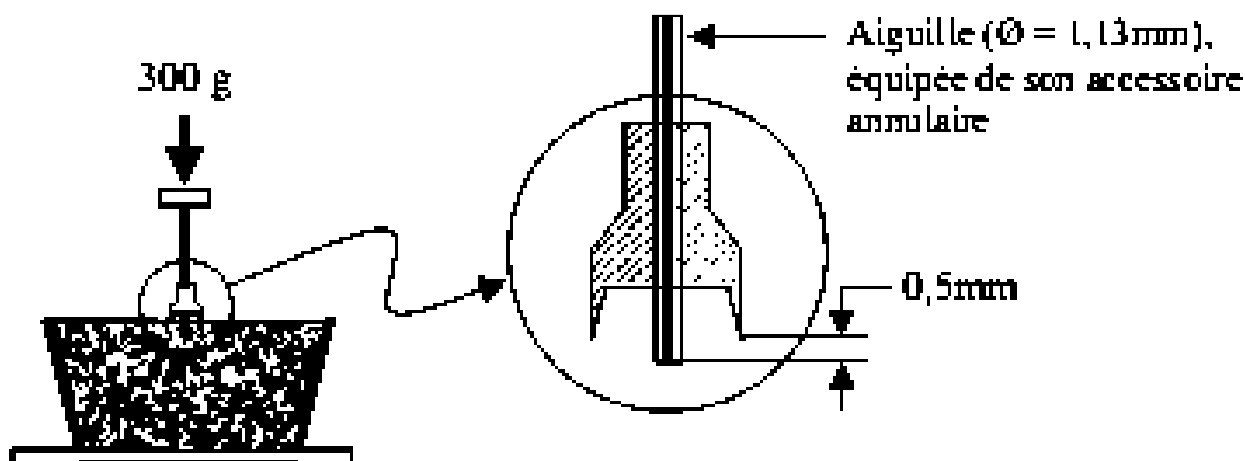


Fig. 09: Détermination du temps de fin de prise

Le phénomène de prise du ciment est lié à de nombreux paramètres tels:

- ✓ la nature du ciment, la finesse de mouture du ciment; plus son broyage a été poussé, plus le temps de prise est court ;
- ✓ la température; alors qu'à zéro degré la prise est stoppée, plus la température ambiante est élevée plus la prise est rapide, pour un ciment donné le début de prise sera de 18 heures à 2 °C, de 5 heures à 10 °C, de 3h 30 à 20 °C et de 30 min à 35 °C ;
- ✓ la présence de matières organiques dans l'eau ou dans l'un des autres constituants du béton qui ralentit la prise ;
- ✓ l'excès d'eau de gâchage qui a, entre autres inconvénients, une action retardatrice sur la prise.

En fonction de leur classe de résistance, les normes spécifient un temps de prise minimum qui est, à la température de 20 °C, de: 1 h 30 pour les ciments de classes 32,5. 1 h pour les ciments des classes 42,5 et 52,5.

La fin de la prise correspond au moment où la pâte est devenue rigide ; elle ne peut se définir avec précision.

Les temps de début de prise peuvent varier de quelques minutes (ciment à prise rapide) à plusieurs heures (ciment à prise lente). Il est à noter que pratiquement tous les ciments ont des temps de prise largement supérieurs à ces valeurs minimales, l'ordre de grandeur étant de 2 h 30 à 3 h pour la majorité des ciments.

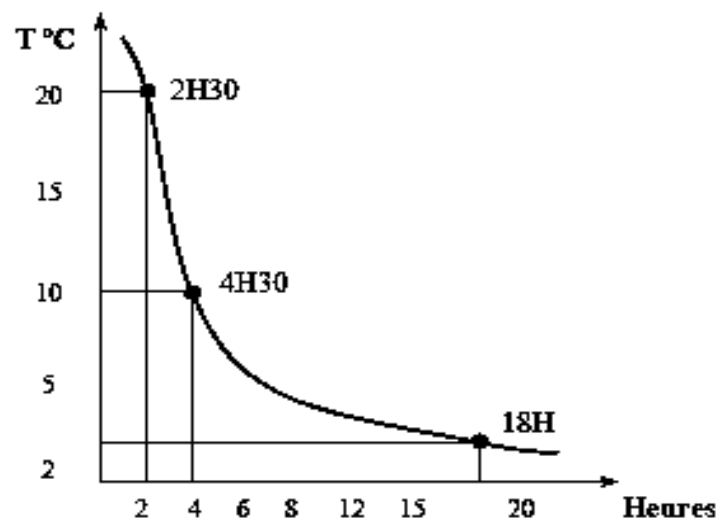


Fig. 10: Evolution de la température en fonction du temps de prise

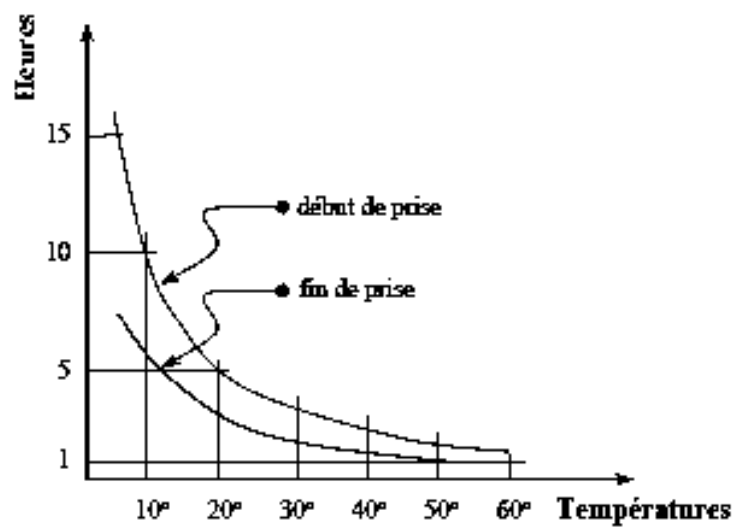


Fig. 11: Influence de la température sur la prise des ciments

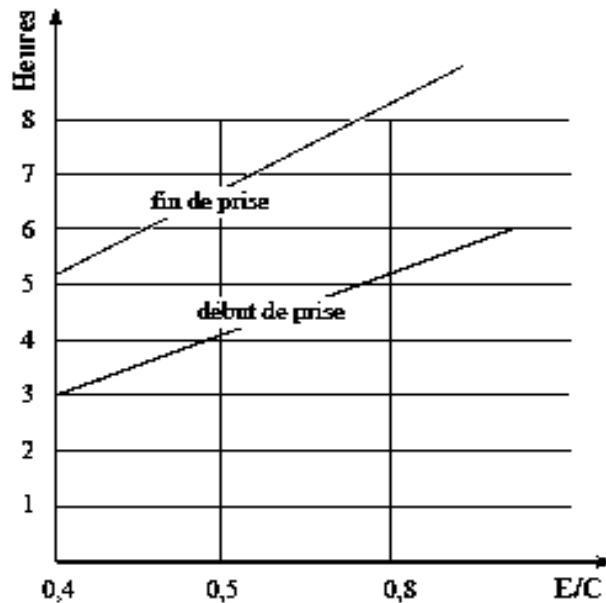


Fig. 12 : Influence de l'E/C sur le temps de prise

c- Le durcissement

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est le période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue que la prise. Pour les ciments à durcissement rapide, on obtient après quelque jours la presque totalité de résistance, mais pour d'autres ciments, le durcissement se poursuit pendant des mois.

D'une façon générale, la chaleur accélère la prise et le durcissement mais la dessiccation est défavorable car elle peut empêcher l'hydratation complète du ciment. Le durcissement dans l'eau ou en atmosphère saturée est en général favorable. Le froid agit en sens inverse et peut même stopper complètement la prise.

d- Evolution physico-chimique de la pâte de ciment:

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium C3S et C2S, la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains

de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés.

L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau.

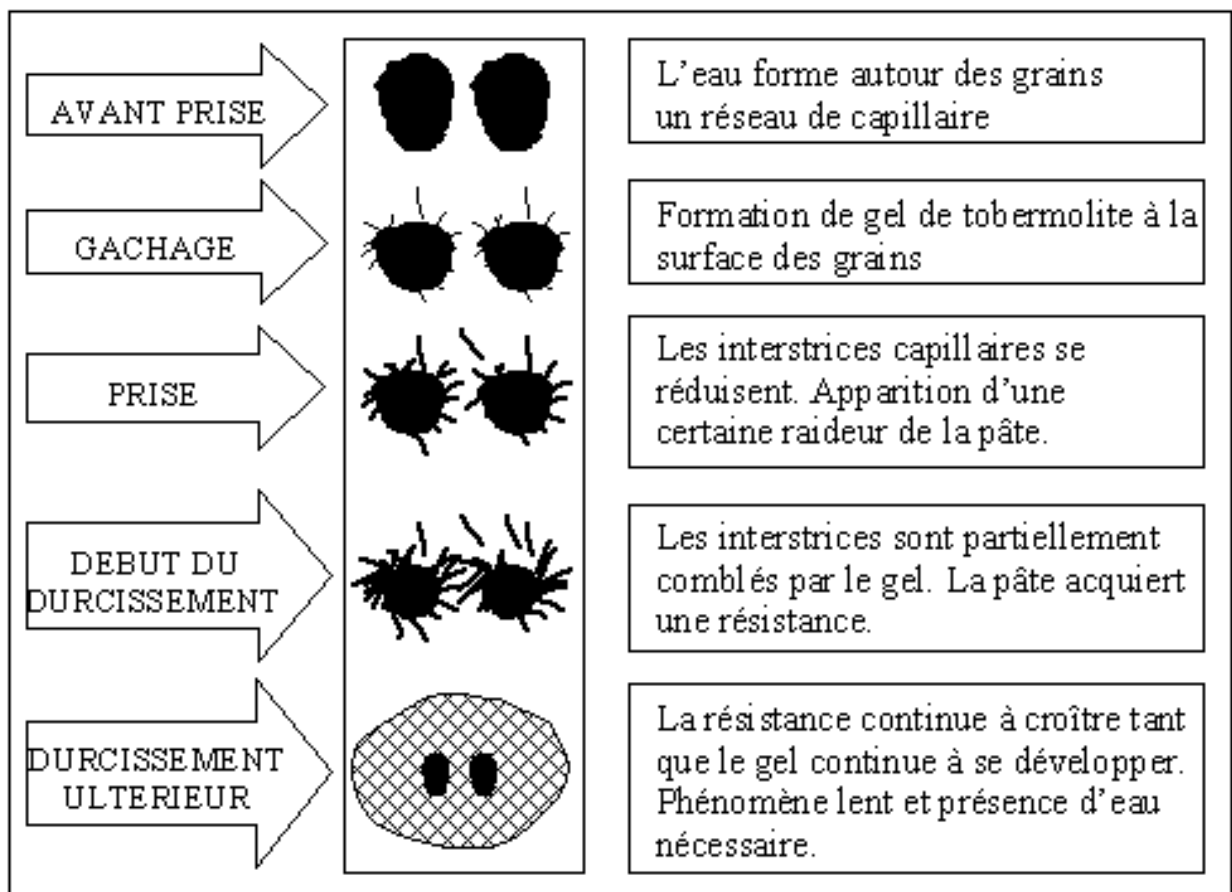


Fig. 13 : L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment

Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands.

2- LES GRANULATS : [8] [1]

On appelle « granulats » les matériaux inertes : sables, graviers ou cailloux, qui entre dans la composition des bétons (en tant qu'ossature). Ces matériaux sont quelque fois appelés « agrégats », mais cette appellation est en principe abandonnée.

a) Classes granulaires :

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs, déterminés par criblage sur des tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètre.

On appelle « tamisat » la partie de granulats qui est passée à travers le tamis et « refus », la partie qui est restée sur le tamis.

Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits à D, pour les plus grands.

Les dimensions recommandées pour la définition des classes granulaires par tamisage sont les suivantes (en mm) :

- pour les sables : 0,08-0,16-0,315-0,63-1,25-2,50 et 5 mm ;
- pour les graviers : 6,3-10-16-20-25-31,5-40-63 et 80 mm.

b) Formes granulats :

On appelle « coefficient volumétrique » d'un grain, le rapport entre le volume v du grain considéré et la sphère circonscrite de diamètre d , d étant la plus grande dimension du grain.

$$c = \frac{v}{\frac{\pi d^3}{6}}$$

Un coefficient à un granulat plat, éclat ou aiguille.

Un coefficient élevé correspond à un granulat dit « cubique » ou « arrondi ». Le coefficient volumétrique d'un cube est 0,37 ; celui d'une bille est évidemment 1 ; et les granulats concassés avec plats et aiguilles 0,12.

c) Propreté :

Les impuretés telles que charbon, gypse, mica, bouts de bois, feuilles mortes, etc, sont absolument proscrites dans les granulats béton de qualité.

Le pourcentage de vase, limon, argile et matières susceptible d'être éliminées par le lavage et décantations successives, ne doit pas excéder 1,5 à 5%.

Pour les graviers, il convient d'éviter surtout la présence de gangue argileuse ou de poussières, ce qui risque de compromettre l'adhérence du mortier sur les graviers.

L'essai de propreté est très simple ; on prend dans un récipient une certaine quantité de matériau, non lavé par la pluie, on le dessèche et on le pèse ; soit $P_1=2525\text{g}$ par exemple ; puis, on le lave avec une grande quantité d'eau, dans le même récipient (en frottant les cailloux les uns contre les autres), les impuretés sont éliminées par trop plein d'eau, on arrête lorsque l'eau reste claire, on égoutte, on dessèche à nouveau et on trouve par exemple $P_2=2480\text{g}$, la masse de l'impureté est donc :

$$P = P_1 - P_2 = 2525 - 2480 = 45 \text{ g}$$

Soit un pourcentage de, $P/P_2 = 45 / 2480 = 0,018 = 1,8\%$.

Pour les sables, la propreté peut se contrôler comme pour les graviers mais de préférence par l'essai dit « Equivalent de Sable » (ES).

On agite une certaine quantité de sable dans une solution lavante, puis on laisse reposer ; la hauteur du dépôt visible étant h_2 et h_1 celle de la hauteur initiale, l'équivalent de sable est :

$$\text{ES} = 100 \frac{h_2}{h_1}$$

d) Nature et qualité :

La nature du matériau est caractérisée par la roche ou le produit constituant les grains : basalte, porphyre, quartzite, silex, calcaire, silico-calcaire, gneiss, etc...

Le granulat peut être un produit obtenu par criblage (type roulé à grains plus ou moins arrondis) ou un produit de concassage (type concassé à plus ou moins anguleux).

La quantité peut être déterminée par des essais d'écrasement et d'usure mais la dureté n'est pas la seule quantité ; la plus ou moins bonne adhérence de la pâte de ciment sur les faces des granulats est un facteur important de la résistance (à la traction, tout particulièrement).

e) Equivalent de sable

L'équivalent de sable est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou grave. Il indique la teneur en élément fin, d'origine essentiellement argileuse, végétal ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur. On parle d' « essais d'équivalent de sable piston » ou, plus simplement, d' « essai d'équivalent de sable ».

Lorsque l'on frotte des granulats non lavés dans la main (du sable ou de gravillon), on peut constater des traces de poussière sur les doigts. Il s'agit de particule argileuse de petite dimension. Celles-ci sont susceptibles d'être nuisible à la qualité du mélange ou de la pâte que l'on veut obtenir à partir du granulat, comme du béton ou du mélange bitumineux. D'autres particules peuvent également avoir ce même effet néfaste, comme des scories, du charbon, des particules de bois, des feuilles mortes ou des fragments de racines.

Dans le domaine du béton, ces particules perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.

La propreté des sables est évalué par deux essais complémentaires : l'équivalent de sable (codé SE, sur le plan européen). Tant que l'équivalent de sable donne de bons résultats ($SE > 60$) le sable est propre. Si le résultat est mauvais, cela peut être dû au piégeage accidentel des fines inertes (calcite, quartz) dans le floculant ou à la présence d'un excès d'argile. Pour le savoir on effectue alors, et seulement si le résultat du SE est mauvais, un essai dit au bleu basé sur l'absorption de bleu de méthylène qui ne se fixe que sur les argiles.

Tableau 8 : Préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons

SE	Nature et qualité du sable
$SE < 60$	Sable argileux - risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour de bétons de bon qualité
$60 \leq SE < 70$	Sable légèrement argileux-de propreté admissible pour le béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement le retrait

$70 \leq SE < 80$	Sable propre – à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$SE > 80$	Sable très propre – l'absence presque totale de fine argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation de dosage en eau.

En ce qui concerne le béton routier, qu'il s'agisse d'un béton balayé, strié, imprimé, désactivé ou bouchardé, la préconisation est : $SE > 60$.

3- L'EAU DE GACHAGE :

- Les eaux potables conviennent évidemment ;
- Les eaux de rinçage de bétonnière sont habituellement utilisables. Il en est de même pour les eaux de ruissellement ;
- Les eaux usées et eaux de vannes contenant des détergents ne conviennent pas.

B- FACTEURS D'ETUDES DES BETONS [1]

Les facteurs qui sont à prendre en compte de l'étude de la composition d'un béton sont extrêmement nombreux. Il s'en suit qu'une formule de béton ne peut guère prétendre être la meilleure et la seule valable parce que, calculée en toute rigueur à partir d'une théorie ; l'essentiel est que cette formule donne un béton qui présente au mieux les propriétés désirées et satisfasse aux essais de convenance pour tel ouvrage sur tel chantier, avec ses matériaux et son matériel et dans les conditions pratique de l'exécution.

1- Dimensions des granulats

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire de granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement, du gros granulat. D'où la nécessité des granulats de qualité et de dimension maximale, celle-devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre.

La pâte de ciment intervient comme une sorte de « colle » entre les différents grains du granulat, le dosage en ciment devra être d'autant plus élevé que les grains seront plus fins.

On pourrait dire qu'un béton de cailloux $D = 60\text{mm}$ dosé à 350kg de ciment a un dosage relativement plus riche qu'au mortier à 500kg de ciment.

2- Ouvrabilité (qualité première)

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton. Elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage. De l'ouvrabilité dépend en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence, parements de belle apparence, étanchéité.

Un dosage en eau suffisant est un facteur d'ouvrabilité mais il ne faut jouer qu'avec discernement car son augmentation entraîne une baisse des qualités intrinsèques du béton : résistance, retrait, porosité, imperméabilité,... C'est pourquoi, le dosage en eau est un problème

délicat dans la fabrication du béton, non seulement, par ses conséquences en opposition sur l'ouvrabilité sur résistance mais également, par la difficulté de le contrôler à la fabrication.

C- FACTEURS DE RESISTANCE DES BETONS [1]

La résistance a été longtemps considérée comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule. Ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs, à étudier de pair car elles sont étroitement, dépendantes l'une de l'autre.

Les différents facteurs ayant une influence sur la résistance et sur lesquels on pourra jouer ou compter pour l'amélioration de cette qualité sont :

- **Influence de la qualité du ciment**

Une des caractéristiques essentielles de la qualité d'un ciment était sa « classe de résistance »

- **Influence du dosage en ciment et du dosage en eau**

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît en fonction du dosage en eau, c'est pourquoi, on a tendance à prendre en compte le rapport C/E (dans la pratique, on utilise aussi le rapport E/C) comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. C/E peut varier de 1,25 à 2,5 (respectivement E/C peut varier de 0,4 à 0,8). Il est prévu un coefficient K qui est censé contenir beaucoup de paramètres : nature et classe du ciment, qualité des granulats (nature minéralogique, adhérence, forme propre), granulométrie du mélange, module de finesse de sables, intensité et procédé de compactage. On ne peut donc prétendre expliciter numériquement ce coefficient autrement que par des essais préalable prenant en compte ces paramètres dans les conditions réelles et particulières au béton étudié.

- **Influence de granularité**

Il ne faut perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité et dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre.

Pour des raisons d'ouvrabilité, il ne convient pas de dépasser $G/S = \text{Gravier} / \text{Sable} = 2,0$ à 2,2.

Pour le sable, la granularité définie par son module de finesse est un facteur très important.

La tendance actuelle est de ne pas dépasser, en général, des valeurs G/S de 1,5 à 1,6 ; c'est un léger sacrifice de la résistance au profit de l'ouvrabilité.

D- DOSAGE DU BETON : [1]

Pour 1 m³ de béton :

Dosage 350 : 350 kg de ciment (7 sac de 50 kg)

- 420 l (590 kg environ) de sable : 0 à 5 mm ;
- 820 l (1 100 kg environ) de gravier : 5 à 15 mm dont 1/3, 5 à 10 mm et 2/3, 10 à 15 mm.

Dosage 250 : pour 1 m³ de béton :

- 1 volume de liant (1 V) ;
- 2 volumes de sable (2 V) ;
- 4 volumes de gravier (4 V).

Tableau 9 : Dosage en ciment-sable-gravier

DOSAGE		250			300			350	
	C	S	G	C	S	G	C	S	G
Poids sur l'abaque (kg)	250	630	1.250	300	610	1.210	350	590	1.175
Multiplication par 1,08 coefficient de correction	250	680,4	1.350	300	658,8	1.306,8	350	632,7	1.269
En volume (l)	233,6	537,7	885,4	280,4	518,7	854,1	324,1	501,7	829,4
Dosage pratique rapporté à l'unité de volume	1	2,3	3,8	1	1,8	3,0	1	1,5	2,5

Tableau 10 : Dosage ciment-sable-gravier-eau pour un volume de ciment

DOSAGE (kg /m ²)	C	S	G	E/C
250	1	2,3	3,8	0,3 à 0,5
300	1	1,8	3	0,3 à 0,5
350	1	1,5	2,5	0,3 à 0,5

d app ciment = 1,07 (C)

d app sable = 1,27 (S)

poids spécifique = 2,64 g /cm³

d app gravier = 1,53 (G)

poids spécifique = 2,8 g/cm³

Tableau 11 : Dosage chaux-ciment

TYPE	CHAUX	CIMENT	TOTAL
A	½	1/2	1
B	1/3	2/3	1
C	¼	3/4	1

V- PROCESSUS DE PRODUCTION DES PAVES AUTOBLOCANTS [1]

Tableau 12 : Processus de production des pavés autoblocants

<div>MATIERES PREMIERES</div> <div>PHASES</div>	CIMENT	SABLE	GRAVIER	EAU
1. APPROVISIONNEMENT	<div>ACHAT</div>	<div>ACHAT OU EXTRACTION</div>	<div>ACHAT OU EXTRACTION</div>	<div>ACHAT OU PUISAGE</div>
2. PREPARATION DES MATIERES PREMIERES	<div>DOSAGE</div>	<div>TAMISAGE</div> <div>DOSAGE</div>	<div>CRIBLAGE</div> <div>DOSAGE</div>	<div>DOSAGE</div>
3. PREPARATION DU BETON	<div>MELANGEAGE</div> <div>GACHAGE</div> <div>MALAXAGE</div>			
4. FABRICATION	<div>MOULAGE</div> <div>VIBRATION</div> <div>DEMOULAGE</div> <div>SECHAGE</div>			
5. TRAITEMENT	<div>MATURATION</div> <div>STOCKAGE</div>			

VI- NORMES DES PAVES AUTOBLOCANTS [1]

La norme française NFP 98-303 n'exige que quelques essais destinés à être mesurés :

- Les tolérances dimensionnelles ;
- Le coefficient d'absorption d'eau ;
- La contrainte de traction par fendage ;
- La contrainte de résistance à l'abrasion (usure).

Tableau 13 : Norme française NFP 98-303

ESSAIS	NORME
Contrainte à la compression	150 à 400 Bars
Absorption d'eau (en %)	5,4 à 5,7 %
Contrainte à la traction par fendage (Mpa)	3,2 à 4
Résistance à l'abrasion ou usure (en mm)	<25 mm
Epaisseur (en mm)	± 3 mm
Autres dimension (en mm) (L et l)	± 2 mm

PARTIE 2 : PARTIE PRATIQUE

Après avoir vue la partie bibliographique, passons maintenant à la partie pratique qui renferme le travail personnel. Il comprend les matières premières, les matériels, les dosages utilisés, les résultats et ces interprétations.

I- MATIERES PREMIERE

Nous avons fait les essais de fabrication dans le laboratoire du CNRIT. Les matières premières utilisées sont :

- Sable de rivière d'Ambohimambola :



Fig. 14 : Sable de rivière d'Ambohimambola

- Ciment LUCKY CEM II/ A 42,5N :



Fig. 15 : Ciment LUCKY CEM II/ A 42,5N

- Graviers de diamètres 5/10 et 5/15 :



Fig. 16 : Graviers de granularités 5/10 et 5/15

- L'eau du JIRAMA ;
- Des colorants en oxyde métallique de couleur rouge et jaune :



Fig. 17 : colorants en oxyde métallique de couleur jaune

II- MATERIELS UTILISE

Dans cette pratique, les matériels que nous avons utilisés sont :

- Tourelle : utilisée pour obtenir une surface lisse. Il nous aide aussi pendant la malaxage du mélange.



Fig. 18 : Tourelle

- Table vibrant : utilisé pour éliminer les vides dans le mélange.



Fig. 19 : Table vibrant

- Moule en forme hexagonal : c'est celui qui donne la forme du pavé obtenue. Ici, on obtient une forme hexagonale.

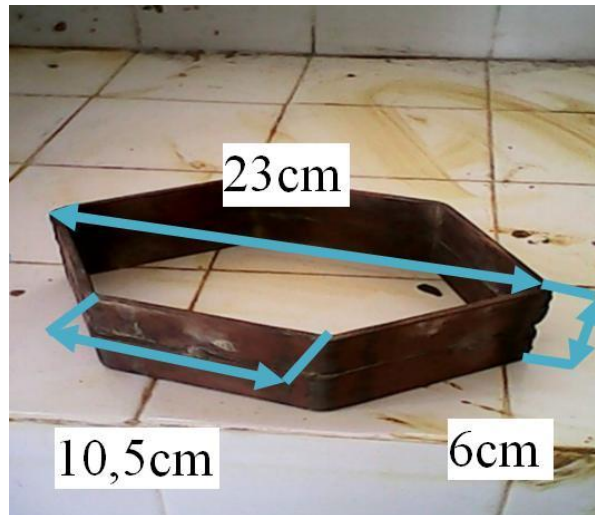


Fig. 20 : Moule en forme hexagonal

- Une pelle : utilisée pour transporter le mélange vers la moule.



Fig. 21 : pelle

- Une taloche : utilisé pendant le démoulage, il assure le transport du système raglan-moule-mélange de la table vibrante vers le terrain de séchage. Il est utilisé aussi pour talocher le mélange pendant la période de vibration.



Fig. 22 : taloche

- Un bassin : c'est dans un bassin qu'on a mis les pavés après sa prise pour poursuivre son durcissement.



Fig. 23 : bassin

- Un bécher gradué : utilisé pendant le dosage des matières. Ses graduations nous aident de doser chaque volume utilisé.



Fig. 24 : bécher gradué

III- DOSAGE DE CHAQUE ESSAIS

Pendant la pratique, nous avons utilisés le dosage volumique.

1- Dosage 250

Le tableau suivant montre pour une éprouvette de capacité 1L le dosage volumique de 1m^3 de béton à 250kg de ciment.

Tableau 14 : dosage 250

Essais Nº	Ciment	Sable	Gravier		Chaux	E/C	colorant
			5/10	5/15			
1 ₁	0,5	1,15	3,8	-	-	0,6	sans
1 ₂	0,5	1,15	-	3,8	-	0,7	sans

2- Dosage 300

Le dosage de 1m^3 de béton à 300kg de ciment est illustré par le tableau ci-dessous pour une éprouvette de capacité 1L.

Tableau 15 : dosage 300

Essais Nº	Ciment	Sable	Gravier		Chaux	E/C	colorant
			5/10	5/15			
2	0,5	0,9	1	0,5	-	0,65	jaune

3- Dosage 350

Pour le dosage de béton à 350kg de ciment par mètre cube, le dosage utilisé est donné par le tableau ci-après pour une éprouvette de capacité 1L.

Tableau 16 : dosage 350

Essais Nº	Ciment	Sable	Gravier		Chaux	E/C	colorant
			5/10	5/15			
3	0,5	0,75	1	0,25	-	0,6	rouge
4 ₁	0,5	1,5	2	0,5	0,5	0,75	rouge
4 ₂	0,5	1,5	0,5	2	0,5	0,75	jaune
5 ₁	0,75	1,5	1	1,5	0,25	0,65	rouge
5 ₂	0,75	1,5	1,5	1	0,25	0,65	un peu de rouge

IV- PROCESSUS DE L'ESSAI

Dans chaque essai, la première étape à faire est de doser les ingrédients. Tous les ingrédients sont dosés dans un bécher gradué avant le mélangeage pour faire le dosage. Cette apparence permet de doser le volume du mélange. Après cette mesure de volume, le liant (ciment ou ciment plus chaux parfaitement mêlé) est versé sur une paillasse et mélangé avec le sable jusqu'à l'obtention d'une couleur uniforme. Puis le mélange est combiné avec les gravillons. Le gravillon de petite taille est le premier à mélangé quand il ya deux granulométrie différentes.

Si le mélange est parfaitement homogène, on passe à l'opération d'hydratation ou gâchage d'eau. L'eau est arrosée sur le mélange et on fait le malaxage jusqu'à ce que l'humidité du mélange soit uniforme.

Dès que le malaxage soit fait, on prépare la moule et le table vibrante. Sur la table vibrante, on pose une interface et sur cette interface est posée la moule. On alimente la table vibrante et l'aide d'une pelle, on verse le mélange dans la moule. La partie supérieure est talochée par une tourelle.

Après quelque temps de vibration (environ une minute), on fait le démoulage : on tire l'ensemble interface-moule-mélange par l'interface vers la face plane d'une taloche et on le transporte vers un terrain de séchage. Sur la taloche, l'ensemble moule- interface-mélange est tiré par l'interface vers le terrain de séchage. Ensuite, on tire la moule vers le haut pour le séparé avec le produit finie.

Enfin de l'opération, les pavés sont menés dans un bassin pour poursuivre son période de durcissement après quelque temps de prise.

Remarque :

- Pour l'obtenir une face lisse et coloré, on prépare un mortier coloré par de l'oxyde métallique. Le dosage volumique de ce mortier que nous avons utilisé est :
 - Ciment = 1 ;
 - Sable = 1 ;
 - $\frac{E}{C} = 0.75$;
 - Le dosage du colorant est facultatif et selon la couleur qu'on veut obtenir.
- Pour un essai, on peut choisir où on pose le mortier, c'est-à-dire dans la partie supérieure ou inférieure du moule. L'épaisseur de ce mortier est environ 0,7cm.

Voici un tableau qui illustre le choix du place de ce mortier pendant notre essai.

Tableau 17 : place du mortier dans la moule pour chaque essai

Essais Mortier	Nº 1 ₁	Nº 1 ₂	Nº 2	Nº 3	Nº 4 ₁	Nº 4 ₂	Nº 5 ₁	Nº 5 ₂
Partie supérieur	sans	Avec	avec	avec	sans	avec	avec	sans
Partie inférieure	sans	Sans	sans	sans	avec	sans	sans	avec

V- RESULTATS DES ESSAIS

Essai №1₁



Fig. 25 : Images et interprétations de l'Essai №1₁

Essai №1₂



Fig. 26 : Images et interprétations de l'Essai №1₂

Essai №2



Fig. 27 : Images et interprétations de l'Essai №2

Essai №3

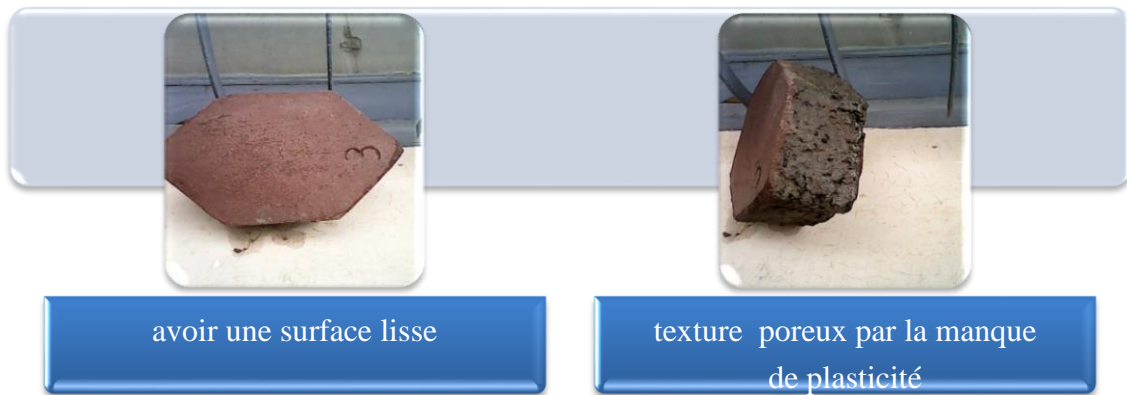


Fig. 28 : Images et interprétations de l'Essai №3

Essai №4₁



Fig. 29 : Images et interprétations de l'Essai №4₁

Essai №4₂



Fig. 30 : Images et interprétations de l'Essai №4₂

Essai №5₁

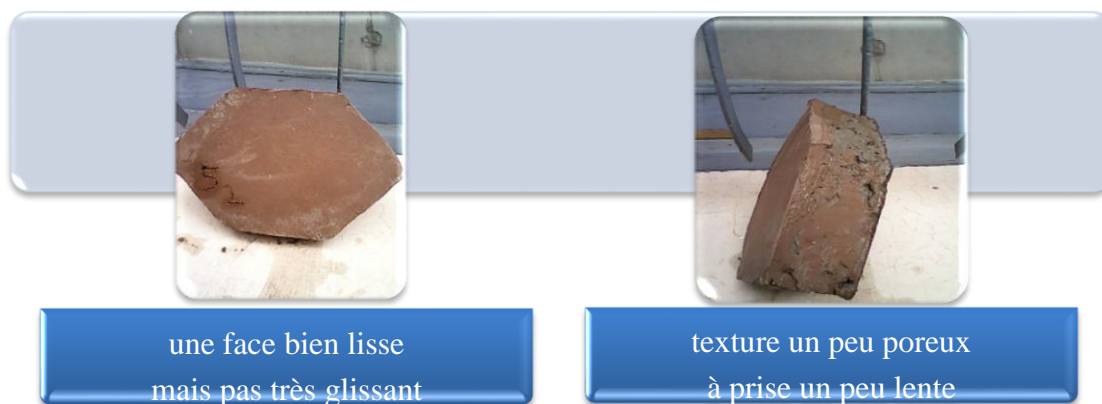


Fig. 31 : Images et interprétations de l'Essai №5₁

Essai №5₂



Fig. 32 : Images et interprétations de l'Essai №5₂

VI- INTERPRETATION DES RESULTATS

Pendant l'essai de fabrication de pavé autobloquant, on a constaté quelques facteurs et quelques paramètres :

- Pendant la fabrication, il faut respecter le dosage en eau. La plasticité du mélange donne une grande influence à la porosité et à la qualité du pavé. Si l'eau d'hydratation est insuffisante, le produit obtenu est poreux et fragile, par contre si la teneur en eau est élevée, les particules du liant risquent d'être éliminées lors de la vibration par évacuation d'eau. De plus, le maçonnage d'un mélange très plastique nécessite plus de temps et plus de main d'œuvre.
- On a constaté aussi que la méthode de mortier en partie supérieur de la moule pendant le chargement du mélange dans la moule demande plus de main d'œuvre et de plus temps perdue parce que pour obtenir une face lisse, il faut le talocher bien par une tourelle. Par contre la méthode de mortier dans la partie inférieur de la moule ne demande pas beaucoup de maçonnage et on peut l'améliorer par le choix du terrain de séchage.
- Durant l'essai, on a vu que les dosages de béton qui utilisent de la chaux comme liant demandent beaucoup d'eau d'hydratation, mais pendant la période de vibration, il y évacuation aussi beaucoup d'eau. Ils sont donc un peu plus difficiles que les autres dosages car ils demandent plus de précision dans la phase de dosage. Encore pour ces dosages, ils demandent aussi plus de temps de prise que les autres dosages.
- Dans le secteur de composition, la granulométrie du granulat influe dans à la qualité du produit obtenue. Si on a une composition qui a une forte teneur en élément de granulométrie très grande, on obtient un pavé poreux. Par contre, si la granulométrie des graviers est petite on obtient un pavé qui ne peut pas supporter du trafic intense.

PARTIE 3 : DISCUSSION

I- PARAMETRES DE QUALITE DE LA PRODUCTION DES PAVES AUTOBLOQUANTS

Pour obtenir du bon résultat, plusieurs paramètres de qualités doivent respecter. Pendant chaque phase et opération, ces règles confères à au produit un meilleur rendement.

1- APPROVISIONNEMENT

Pendant cette phase, presque toutes les règles sont concentrées dans la pureté et la qualité des matières premières. L'approvisionnement est la première opération de la fabrication du pavé autobloquant. Il se fait par achat ou extraction et dépend du fond et du lieu de travail pour chaque cas.

Quand on achète du ciment, il faut vérifier la qualité parce qu'il est la matière de base de notre matériau. Le choix de la marque est très indispensable car aujourd'hui des plusieurs fausse produits sont rependue dans tout la marché. Pour cette matière première, son âge ne doit pas dépassé de deux (2) ans. Dans notre étude, la classe de résistance de ciment conseillée est le CEM I 32,5 à CEM I 42,5. Le ciment aussi doit être à l'abri de l'humidité, c'est-à-dire il est conseillé de vérifier la mode d'ensachage et du stockage du ciment.

Le sable est l'un des constituants principaux du béton. La nature et la pureté du sable peut modifier la qualité du produits fini. Sa nature et son origine peut être sable de dune ou sable de rivière ou sable de carrière. Il est important et nécessaire l'absence des matières organiques, des argiles, des micas, de sel, de sulfate dans le sable. Sa granulométrie étalé est de 0/5mm. Pour une production de pavé autobloquant, la disponibilité et l'accessibilité (position du gisement) peut être un problème. Si la quantité est limitée, alors la production aussi est limitée. Si le gisement est loin, le coût de la production s'élève. Mais chacun a son choix parce qu'on peut acheter le sable au lieu de faire une extraction.

Comme le sable, le gravier aussi est l'un des constituants principaux du béton. Sa nature et origine peut être du calcaire dure, granite, ou basalte. Sa granulométrie est de 5/15mm et le coefficient de forme est plus ou moins arrondie. Comme le sable aussi, la disponibilité et l'accessibilité est peut être un problème. Il peut obtenir par achat ou par extraction.

L'eau de gâchage est la quatrième matière première d'un béton. Afin d'obtenir un meilleur résultat, il faut que l'eau soit potable et a une faible teneur en sel, sulfate, argile,...

2- PREPARATION DES MATIERES PREMIERES

Après l'approvisionnement, les matières premières doivent être préparées avant de transformer en béton. La section de préparation se divise en deux parties :

- Tamisage et criblage ;
- Dosage et mélangeage.

Le tamisage est destiné au sable. L'ouverture du tamis est de 5mm. Il est un avantage si on a une plus grande capacité de production comme par exemple le trommel.

Pour le criblage des graviers, l'ouverture du tamis est de 5mm/10mm/15mm. Le degré de siccité et l'étanchéité est indispensable pour la production.

Pendant le dosage et mélangeage, il faut mettre les matières premières dans un gabarit mesurable (poids ou volume) à fin de respecter la proportion du dosage. L'ordre du mélangeage est : le sable et le ciment sont les premiers à mélanger jusqu'à l'obtention d'une uniformité de couleur, puis avec le gravier.

3- PREPARATION DU BETON

Dès que les matières premières sont prêtes, la préparation du béton commence. Cette phase comprend le gâchage d'eau et le malaxage du mélange. Pour le gâchage, il faut respecter la quantité d'eau à ajouter et l'uniformité de l'humidité. Le malaxage est fait pour obtenir une homogénéité du mortier et il dure de 2 à 3mn environ pour les bétonnières.

4- FABRICATION

La fabrication est l'opération à effectuer après la préparation du béton. Ici le béton est mis en forme pour obtenir des pavés en béton.

La forme du produit obtenue dépend de la forme du moule. L'état du moule devait être donc vérifier. C'est-à-dire sa géométrie, sa régularité et sa dimension doivent être exacte. La nature du moule est le TNP (Tôle Plane Noire) et son épaisseur est environ 2 à 3mm.

Comme le moule, la table vibrante ou pervibrateur assure une tâche importante à la fabrication du pavé en béton. Il offre au produit une meilleure tenue mécanique grâce sa vibration. La fréquence de la vibration varie de 3000 à 6000 périodes/mn. Plus la vibration est efficace, plus la fréquence est élevée.

La vitesse du moulage et la productivité dépend l'aptitude de l'ouvrier. Il est aussi fonction du temps de vibration. Le démoulage doit être vertical.

Après le démoulage, c'est le moment de séchage. Le séchage doit être fait à l'abri du rayonnement solaire et du vent. Il demande du temps, d'aire (planéité, surface) et de la capacité de réception.

5- TRAITEMENT

Quand les pavés sont sèches, l'opération n'est pas finie, il reste en encore le traitement qui est la finition de la production. Il comprend la maturation et le stockage. La durée de la maturation est fonction du ciment utilisé. Il faut attendre cette durée de maturation. Pendant cette période, les pavés sont maintenus dans l'eau ou arroser plusieurs fois.

II- REMARQUES ET CONSTATATION [5]

- Les poids des pavés et sa densité apparente ne varient pas tellement ;
- La contrainte de compression est élevée si le dosage en ciment est élevé de 250 à 350 ;
- Une des qualités exigées pour les bétons : résistance à la compression est de 150 à 400 Bars ;
- La contrainte de traction par fendage est largement élevée pour le dosage 350 ;
- La contrainte de compression et par fendage augmente quand le béton vieillit ;
- La résistance à l'abrasion est d'autant plus excellente que l'âge du béton augmente.

On peut dégager les points suivants :

La qualité du pavé croît quand

- Le dosage en liant augmente ;
- Le béton vieillit ou est mûré.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail est d'identifier les paramètres qui influent sur les propriétés techniques, ainsi que faire des essais de fabrication des pavés autobloquant en béton.

Nous avons déterminés les paramètres les plus importants pour obtenir des pavés autobloquants en béton de bonne qualité, ces paramètres sont :

- Le dosage en ciment
- La teneur en eau

Pendant notre essai, la variation de ces paramètres nous permis de comprendre, de familiariser, de maîtriser le processus de production des pavés autobloquants en béton et en plus nous a conduit de dégager les paramètres de qualité qui influent sur notre produit fini.

Par conséquent on peut améliorer la qualité ainsi que la productivité actuelle des artisans. On peut aussi mener des études à la forme de ce matériau pour être plus en plus bloquant et pour donner un aspect très esthétique.

A Madagascar, le pavé autobloquant donne une meilleure solution pour la dégradation de la route. Ici le problème est toujours l'abondance de pluies. Or, une route revêtue par du pavé autobloquant résiste à toute humidité car ce matériau est fabriqué par un liant hydraulique, c'est-à-dire il peut durcir sous l'eau.

BIBLIOGRAPHIE

[1] CNRIT (Août 2012), Aide-Mémoire sur la Technologie de Production de Pavé Autobloquant, 24 pages.

[2] GHOMARI Fouad, (2012), Le Béton dans le Sol Piétonnier, 28 pages.

[3] BRIDE Michel, (2012), Recouvrement de Sols avec les PAVÉS Ordinaires, 6 pages.

[4] <http://www.wikipédia.com/recherche:pavé.php>

[5] Boulevard Edgard Quinet, (2011), Guide des Matériaux de Revêtement, 10 pages.

[6] CERIB, (2004), Les Pavés de Voirie en Béton (NF EN 1338), 4 pages.

[7] Pr. RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, Cours ciments du Semestre 5 en Science de l'ingénierie des matériaux, année scolaire 2013-2014.

[8] Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy, Cours mécanique du sol du Semestre 5 en Science de l'ingénierie des matériaux, année scolaire 2013-2014.

[9] BEAUCHAMP Jacques (2005) « Les Argiles » Université de Picardie Jules Verne

Document : MGC / CNRIT

[10] BUREAU DES NORMES DE MADAGASCAR (2005) « Norme malagasy »

Document : MGC / CNRIT

[11] CORDI géopolymère (1980) « La brique géopolymère L.T.GS »

Document : MGC / CNRIT

[12] FAURY (J.), (1958), Le béton (influence de ses constituants inertes, règle adopter pour sa composition, sa confection et sa transport sur les chantiers).- préf. de A. CAQUOT.- Paris, Dunode, 197 pages.

[13] GIASSEN Philippe, JAOUICH (2008) “Les minéraux des sols “

Document : MGC / CNRIT

[14] HACKSPILL Louis (1958) “Chimie Minérale” (Euclide : Introduction aux études Scientifiques) tome premier

Presses universitaires de France 108, Boulevard Saint Germain, Paris.

[15] HACKSPILL Louis (1958) “Chimie Minérale” (Euclide : Introduction aux études Scientifiques) tome second

Presses universitaires de France 108, Boulevard Saint Germain, Paris.

[16] http://www.wikipédia.com/recherche:pavé_autobloquant.php

[17] REBUT (P), (1962), Guide pratique de la vibration des bétons.- Paris, Revue des matériaux de construction « ciment béton », 418 pages.

[18] ROBINSON (J.R), (1964), Cours béton Précontraint.- préf. de L .GRELOT. 3^e ed.- Paris, Dunod, 148 pages.

TABLE DE MATIERE

<u>REMERCIEMENTS</u>	i
<u>SOMMAIRE</u>	ii
<u>LISTE DES ABREVIATIONS</u>	iii
<u>LISTE DES FIGURES</u>	vi
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	viii
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>PARTIE 1 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	2
I- GENERELITE SUR LES REVETEMENTS	2
I.1- Classement des revêtements	3
a) Du point de vue épaisseur	3
b) Du point de vue matériaux constitutifs	3
c) Du point de vue forme ou mode de pose	3
d) Du point de vue de leur rigidité	3
e) Du point de vue aspect général	4
f) Du point de vue destination	4
I.2- Les revêtements routiers	4
II- <u>LES PAVES</u>	6
II.1- Les différents types de Pavés	7
II.1.1- Pavés en bois	7
II.1.2- Pavés en briques	7
II.1.3- Pavés en pierre	7
II.1.4- Les pavés mécaniques en béton	7
II.2- Caractéristique des Pavés	8
II.3- Pose des Pavés	8
II.4- Entretien	10
II.5- Inconvénients et avantages	10
a) Inconvénients	10

b) Avantages	10
III- <u>PAVES AUTOBLOQUANTS</u>	11
5- Définition	11
6- Pose des pavés	11
7- Entretien	11
8- Variété de modèles de pavés autobloquants	12
d) pavés classiques	12
e) pavés autobloquant à emboitement	12
f) Pavés autobloquants à emboitement et épaulement	13
IV- <u>LE BETON</u>	14
D- DEFINITION ET CONSTITUTION	14
1- LE LIANT	14
1.1- Normalisation des différentes catégories de ciment	14
1.1.1- Les normes ASTM	15
c) Les ciments Portland	15
d) Les ciments hydrauliques composés	16
1.1.2- la norme européenne EN 197-1	16
a) Classes de résistance	16
b) Les ciments de la norme NF EN 197-1 : Ciments courants	17
c) Caractéristiques complémentaires normalisées	19
v. Ciments pour travaux à la mer (PM) NF P 15 317	19
vi. Ciments à teneur en sulfures limitée (CP) NF P 15 318	19
vii. Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (ES) XP P 15 319	19
viii. Ciments pour usage en milieu tropical (UT) NF P 15 302	20
1.1.3- Les normes MALAGASY pour les ciments	20
a) Evolution des normes régissant les ciments à Madagascar	20
b) Les ciments à usages courants de la norme NM 031-1	21
1.2- Caractéristiques	22
1.2.1- Caractéristiques physiques	22
a- Couleur	22
b- Finesse de mouture (NF EN 196-6)	23
c- Densités	23

d- Expansion (NF EN 196-3)	23
e- Retrait (NF P 15 433)	23
f- Eau de consistance normale (NF EN 196-1)	24
1.2.2- Caractéristiques mécaniques	24
1.2.3- Hydratation, prise et durcissement	24
a- Hydratation	24
b- La prise	25
c- Le durcissement	27
d- Evolution physico-chimique de la pâte de ciment	28
2- LES GRANULATS	29
a- Classes granulaires	29
b- Formes granulats	30
c- Propreté	30
d- Nature et qualité	31
e- Equivalent de sable	31
3- L'EAU DE GACHAGE	33
E- FACTEURS D'ETUDES DES BETONS	32
1- Dimensions des granulats	33
2- Ouvrabilité	33
F- FACTEURS DE RESISTANCE DES BETONS	34
G- DOSAGE DU BETON	35
V- PROCESSUS DE PRODUCTION DES PAVES	37
VI- NORMES DES PAVES AUTOBLOCANTS	38
<u>PARTIE 2 : PARTIE PRATIQUE</u>	39
VII- MATIERES PREMIER	39
VIII- MATERIELS UTILISE	40
IX- DOSAGE DE CHAQUE ESSAIS	43
1- Dosage 250	43
2- Dosage 300	43
3- Dosage 350	44
X- PROCESSUS DE L'ESSAI	44

XI- RESULTATS DES ESSAIS	46
XII- INTERPRETATION DES RESULTATS	49
<u>PARTIE 3 : DISCUSSIONS</u>	50
III- PARAMETRES DE QUALITE DE LA PRODUCTION DES PAVES AUTOBLOQUANTS	50
1- APPROVISIONNEMENT	50
2- PREPARATION DES MATIERES PREMIERES	51
3- PREPARATION DU BETON	51
4- FABRICATION	51
5- TRAITEMENT	52
IV- REMARQUES ET CONSTATATION	52
<u>CONCLUSION</u>	54

Titre: “ESSAI DE FABRICATION DE PAVE AUTOBLOQUANT”

Présenté et soutenu par : ANDRIAMASIARIMANANA Mandahery Tsiky Jean Berthin

Adresse de l’auteur : Avaratsena Mandiavato Miarinarivo Itasy

Tél : +26132 97 711 30, +26133 87 209 82

Email : mandahery001@gmail.com



Nombre de pages: 55

Nombre de figures: 32

Nombre de tableaux: 17

RESUME

Le sujet de ce travail est de faire un essai de fabrication de pavé autobloquant. Dans cette étude, le but c’est de comprendre, d’apprendre comment faire un pavé en béton, et de déterminer ces paramètres de qualité de production.

Les pavés autoblocants sont des pavés en béton. Les matières premières nécessaires et indispensables utilisées pour l’élaboration et à l’essai de la production des pavés autoblocants sont : le liant (ciment ou ciment plus chaux), le sable, les graviers et l’eau. Les matériels utilisés sont : la moule, une table vibrant, un bécher gradué, une taloche, un bassin de stockage, une tourelle et un gabarit de dosage.

L’étude bibliographique résume l’état des connaissances relatives sur la technologie de production des pavés autoblocants.

Les études expérimentales rassemblent les résultats expérimentaux obtenus sur les différents essais de fabrication pour chaque type de dosage. La connaissance pratique a mis en évidence les avantages et inconvénients de ce type de revêtement ;

Le paramètre de qualité, apporte un éclairage sur la faisabilité de notre essai en montrant l’existence d’une fenêtre d’opportunité à saisir.

ABSTRACT

The subject of this work is to make a test of self-locking paving. In this study, the goal is to understand, learn how to make a concrete pavement, and determine these quality-of-production parameters. The self-blocking pavers are concrete pavers. The necessary and indispensable raw materials used for the production and testing of the production of self-locking paving are: binder (cement or cement plus lime), sand, gravel and water. The materials used are: the mold, a vibrating table, a graduated beaker, a trowel, a storage tank, a turret and a dosage jig.

The bibliography review summarizes the state of knowledge on the production technology of autobloc paving.

The experimental studies gathered the experimental results obtained on the different manufacturing tests for each type of essay. Practical knowledge has highlighted the advantages and disadvantages of this type of coating;

The quality parameter, sheds light on the feasibility of our trial by showing the existence of opportunity to grasp.

Mots clés : ciment, béton, pavé autobloquant