

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

ABREVIATIONS ET SIGLES

INTRODUCTION GENERALE

PARITE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I: GENERALITES SUR LE BETON

Chapitre II: METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON SELON DREUX-GORISSE

Chapitre III: LA VIBRATION DES BETONS

PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE: FABRICATION DES PAVES EN BETON

Chapitre IV: MODIFICATIONS APORTEES A LA PRESSE PVR 2012

Chapitre V: METHODE DE CARACTERISATION DES COMPOSANTS DU BETON

Chapitre VI: FORMULATION DE LA COMPOSITION DES PAVES

Chapitre VII: PROCEDE DE FABRICATION DES PAVES

Chapitre VIII: RESULTATS DES ESSAIS ET INTERPRETATIONS

Chapitre IX: EVALUATION DU COUT DE FABRICATION DE LA PRESSE

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Notation des cimentiers	7
Tableau 2 : Tolérances en impuretés de l'eau de gâchage	16
Tableau 3 : Consistance selon les valeurs de l'affaissement du béton	20
Tableau 4: Les six classes d'étalement ou de consistance	21
Tableau 5: Classe des bétons selon leurs résistances à la compression.....	27
Tableau 6: Classe de consistance des bétons.....	28
Tableau 7: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône	30
Tableau 8: Dimension maximale du granulat.....	31
Tableau 9: Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G).	31
Tableau 10: Correction du dosage en eau selon le diamètre maximale D du mélange granulaire.	33
Tableau 11: Valeurs de K.....	34
Tableau 12 : Coefficient de compacité r.....	36
Tableau 13: Caractéristiques des vibrateurs pneumatiques.....	41
Tableau 14: Caractéristiques des vibrateurs électriques.....	42
Tableau 15: caractéristiques des vibrateurs mécaniques	43
Tableau 16: Caractéristiques du vibrateur externe pneumatique.....	44
Tableau 17: Caractéristiques des vibrateurs électriques.....	45
Tableau 18: Caractéristiques des compacteurs	47
Tableau 19: Dimensions nominales des tamis (en mm)	65
Tableau 20 : Relations entre modules et diamètres des tamis et passoires]	66
Tableau 21: Exemple de calcul des pourcentages de « tamisât »	68
Tableau 22: Résultat d'une analyse granulométrique.....	70
Tableau 23 : Les modules AFNOR correspondant aux tamis de la série normalisé	71
Tableau 24 : Caractéristiques physiques du gravillon	80
Tableau 25 : Résultat de l'analyse granulométrique du gravillon	81
Tableau 26 : caractéristiques physiques du sable	82
Tableau 27 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable.....	82
Tableau 28 : Caractéristiques physiques du ciment.....	84
Tableau 29 : Coordonnées des points O,A et B.....	86
Tableau 30 : Dosage 1 de six pavés de béton	89
Tableau 31 : Dosage 2 de six pavés de béton	89
Tableau 32 : Photo de deux échantillons vibrés et non vibrés.....	95
Tableau 33 : Rc à 7 jours des pavés dosés à 1,50 litre d'eau.	96
Tableau 34 : Rc à 7 jours des pavés dosés à 1,71 litre d'eau.	97
Tableau 35 : Récapitulation des résultats des Rc à 7 jours.	99
Tableau 36 : Valeurs des R _C des pavés à 7, 14 et 28 jours d'âge	101
Tableau 37 : Estimation du prix de revient de la réalisation de la presse PVR 2012	105
Tableau 38 : Dénominations et symboles des ciments	F
Tableau 39 : les 27 produits de la famille des ciments courants de la norme NM 031-1	H

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Granulats roulés de rivières	11
Figure 2: Coefficient volumétrique	13
Figure 3 : Le filler	13
Figure 4 : Le sable	14
Figure 5 : Les graviers concassés	15
Figure 6 : Les cailloux concassés	15
Figure 7 : Les cailloux roulés	15
Figure 8: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	19
Figure 9 : Mesure d'étalement par flow-test	21
Figure 10 : Evolution des résistances à la compression dans le temps.....	23
Figure 11 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).....	32
Figure 12: Principe de la détermination graphique des pourcentages en volume des granulats	35
Figure 13: Béton frais.....	39
Figure 14: Vibration du béton (désaérer et serrer le béton).....	39
Figure 15: Bon remplissage du moule après vibration	40
Figure 16: vibreur interne pneumatique	41
Figure 17: Utilisation du vibreur électrique sur le chantier	42
Figure 18: vibreur mécanique.....	43
Figure 19: vibreur externe pneumatique.....	44
Figure 20: utilisation de la règle vibrante sur le chantier	46
Figure 21: Utilisation du compacteur sur le chantier	46
Figure 22: Photo d'une presse vibrante de type A650.....	48
Figure 23: Mise en œuvre à éviter pour une vibration interne	49
Figure 24: Espacement entre deux points de vibration.....	50
Figure 25: Pénétration du vibreur	51
Figure 26: fenêtre en ouverture centrale.....	51
Figure 27 : Réserve pour porte.....	52
Figure 28 : vibration incorrecte	53
Figure 29: bon intervalle de vibration	53
Figure 30 : Dessin d'ensemble de la PVR 2012.....	58
Figure 31 : PVR avant (a) et après (b) modification	62
Figure 32: Tamis à mailles carrées.....	64
Figure 33: Série de tamis.....	67
Figure 34 : Exemple d'une courbe granulométrique	70
Figure 35: Méthode de l'éprouvette graduée.....	72
Figure 36: Méthode des deux mains.....	73
Figure 37: Dimensions du matériel (Norme NF P 08 501)	77
Figure 38: Essai d'Équivalence de Sable	77
Figure 39 : Courbe granulométrique du gravillon	81
Figure 40 : Analyse granulométrique du sable.....	83

LISTE DES FIGURES

Figure 41 : Détermination de proportion des granulats	87
Figure 42 : Procédés de confection des pavés	90
Figure 43 : Influence de la vibration sur la structure des pavés	92
Figure 44 : Mécanisme de compactage	92
Figure 45 : Evolution des R_{c7} en fonction de la vibration et de	96
Figure 46 : Evolution des R_{c7} en fonction de la vibration et de la force de compactage à dosage en eau $E_2 = 1,71$ litre.....	98
Figure 47 : Récapitulation de l'évolution de R_c à 7 jours	99
Figure 48 : Evolution des R_c dans le temps à dosage en eau $E_1 = 1,50$ litre.....	102
Figure 49 : Evolution des R_c dans le temps à dosage en eau $E_2 = 1,71$ litre.....	103
Figure 50 : Evolution des résistances à la compression dans le temps.....	D

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Presse vibrante PVR 2012 version améliorée	59
Photo 2 : Ancien (a) et nouveau (b) levier d’abattage.....	60
Photo 3 : Ancien (a) et nouveau (b) moule.....	61
Photo 4 : Couvercle du moule	61
Photo 5 : L’ancien (a), le nouveau contre-moule (b); et le moule (c)	62
Photo 6: Compactage avec la PVR 2012.....	91
Photo 7 : Les pavés séchés	94

ABREVIATIONS ET SIGLES

AFNOR : Association Française de Normalisation

EN : Norme Européenne

NF : Norme Française

NM : Norme malagasy

PVR : Presse Vibrante Riantsoa

Rc : Résistance à la compression à 28 jours d'âge

Rc_j : résistance à la compression à j jour en [MPa]

Fc: force de compactage en [N]

A : Affaissement au cône d'Abrams

C : Dosage en ciment (en kg/m³)

D_{max} : Dimension maximal des granulats

E: Dosage en eau

ES : Equivalent de sable

ESV : Equivalent de sable à vue

Fce : Classe vraie du ciment

G : Coefficient granulaire

G: Dosage en gravier

Y: Masse volumique absolue

LA : Los Angeles

MPa: MegaPascal

µm: Micromètre

R_{b28} : Résistance nominale à la compression à 28 jours

R_c : Résistance à la compression

R_t : Résistance à la traction

S : Dosage en sable

r : Coefficient de compacité

ρ : Masse volumique apparente

L : largeur

l :longueur

h : hauteur

INTRODUCTION GENERALE

Depuis toujours, l'homme n'a cessé de chercher des moyens pour améliorer leurs habitations et les infrastructures nécessaires pour son bien-être. Sous-entendu, on parle des matériaux de construction, qui sont déjà très évolués de nos jours.

Parmi ces matériaux de construction, le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Sa forte résistance en compression, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects lui permettent de tenir sa place.

Au cours des dernières décennies, de façon à améliorer l'ouvrabilité et les performances mécaniques, la formulation des bétons a évolué significativement avec l'utilisation croissante d'ajouts tels que des agents réducteurs d'eau, des retardateurs de prise, des ciments avec addition.

Cependant, le facteur le plus intéressant qui permet de faire pénétrer le béton dans des moules ferraillés est l'utilisation des moyens de serrage puissant: la vibration.

La vibration met artificiellement en mouvement les éléments du béton (ciment, eau, granulats). Elle assure le bon remplissage des coffrages et des moules, le serrage du béton et sa désaération en favorisant l'imbrication des granulats et en expulsant les bulles d'air.

Certes, il est évident que la vibration facilite la mise en œuvre des bétons tant sur les chantiers que dans la fabrication des divers produits en béton. Mais qu'en est-il de la résistance à la compression et du dosage en eau? Nous allons essayer de répondre à cette question en réalisant quelques essais à trois facteurs variables : la vibration, le compactage et le dosage en eau.

Cela nous a conduits à donner le thème à cet ouvrage : « *Utilisation de la presse vibrante PVR 2012 pour le compactage des pavés en béton.* »

Pour se faire, nous allons élaborer le plan de ce présent livre comme suit :

Une première partie consacrée entièrement à l'étude bibliographique sur le béton et la vibration. Puis une deuxième partie, qui est la partie expérimentale, dans laquelle on trouve, la confection des pavés et les résultats des essais. Cette deuxième partie se termine par l'évaluation du coût de fabrication de la presse vibrante.

PARITE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I: **GENERALITES SUR LE BETON [1] [2] [3] [4] [5]**

I-1 Introduction

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, facile à mouler et résistant.

D'une manière générale, on considère le béton comme un matériau doté d'une durabilité exceptionnelle.

Sur ce, le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Sa forte résistance en compression, sa résistance au feu, son isolation phonique, son aptitude au vieillissement, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les couleurs et les aspects lui permettent de tenir sa place.

Les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux,...), les constructions liées à des activités professionnelles (usines, ateliers,...) et les travaux publics (ponts, routes, barrages,...) témoignent de la diversité de ses domaines d'utilisation.

I-2 Définition

Le béton est un matériau de construction composite fabriqué à partir de plusieurs constituants :

- un liant (généralement le ciment) ;
- des granulats gros et fin (cailloux, gravier, sable) ;
- eau ;
- et éventuellement des adjuvants et des additions minérales (servant à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci).

Les granulats constituent le squelette granulaire du mortier ou du béton. Le ciment, l'eau et les autres additions forment la pâte liante. Lorsqu'il ne renferme pas de squelette

granulaire, on parle de « pâte de ciment ». La pâte permet au béton d'enrober les granulats, elle joue le rôle de lubrifiant et de colle. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains.

L'eau assure l'hydratation de la poudre de ciment et la facilitation de la mise en œuvre (ouvrabilité).

Quand on associe de l'acier au béton frais, on obtient le béton armé, un matériau de construction courant. Les différents constituants du béton doivent former un ensemble cohérent, armé ou non.

Grâce aux recherches, nos connaissances sur la technologie du béton se sont considérablement accrues depuis une trentaine d'années. On sait bien actuellement quelles sont les règles principales de composition d'un bon béton, qui consistent à trouver les meilleures proportions des différents constituants en fonction des caractéristiques de l'ouvrage à confectionner.

I-3 Les différents constituants du béton

Le béton est un matériau formé par le mélange de ciment, de granulats et d'eau, éventuellement, complété par des adjuvants et des additifs.

Ce mélange qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est facile à mouler ; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon sa formulation, sa mise en œuvre et ses traitements de surface, ses performances et son aspect peuvent considérablement varier.

I-3-1 Le ciment

Le ciment joue le rôle de « liant hydraulique » dans les bétons. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation du mélange, sa cohésion en un corps solide. La plupart des ciments conviennent aux emplois les plus usuels ; néanmoins certains sont mieux adaptés que d'autres à des emplois spécifiques.

I-3-1-1 Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement broyé qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Les produits, dénominations et symboles, de ciments sont montrés dans l'annexe 04.

I-3-1-2 Notation des cimentiers

Pour faciliter l'écriture, les cimentiers ont conventionnellement adopté une notation qu'on peut voir dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Notation des cimentiers

	Formule complète	Formule abrégée	Appellation courante
Eau	H ₂ O	H	Eau
Trioxyde de soufre	SO ₃	\bar{S}	Trioxyde de soufre
Dioxyde de carbone	CO ₂	\bar{C}	Dioxyde de carbone
Constituants chimiques	CaO	C	Chaux
	SiO ₂	S	Silice
	Al ₂ O ₃	A	Alumine
	Fe ₂ O ₃	F	Oxyde de fer
	Na ₂ O, K ₂ O	N, K	Alcalis
	MgO	M	Magnésie ou periclase
	CaSO ₄	$\bar{C}\bar{S}$	Sulfate de calcium (anhydride)
	CaSO ₄ , 2H ₂ O	$\bar{C}\bar{S}H_2$	Sulfate de calcium (gypse)
Constituants hydrauliques	3CaO, Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminate tricalcique
	4CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique
	3CaO, SiO ₂	C ₃ S	Silicate tricalcique
	2CaO, SiO ₂	C ₂ S	Silicate bicalcique
	CaOlibre	CaO _{libre}	Chaux libre
Constituants hydratés	3CaO, 2SiO ₂ , 3 H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃	Silicate de calcium hydraté (tobermorite)
	4CaO, Al ₂ O ₃ , 13H ₂ O	C ₄ AH ₁₃	Aluminate de calcium hydraté
	3CaO, Al ₂ O ₃ , 6H ₂ O	C ₃ AH ₆	
	3CaO, Al ₂ O ₃ , 3CaSO ₄ , 31 H ₂ O	C ₃ AC \bar{S} ₃ H ₃₁	Sulfoaluminate de calcium hydraté (ettringite)
	Ca(OH) ₂	CH	Chaux hydratée

Source [1]

I-3-1-3 **Les constituants du ciment**

On distingue deux familles de constituants du ciment selon ses proportions : les constituants principaux et les constituants secondaires.

Les constituants sont dits principaux lorsqu'ils sont en proportion élevée supérieure à 5%, et dits secondaires lorsque la proportion est inférieure ou égale à 5%.

A ces deux familles de constituants sont ajoutés généralement des régulateurs de prise.

I-3-1-3-1 Le constituant principal du ciment : Le clinker :

Le clinker est un produit obtenu par la cuisson jusqu'à fusion partielle (réaction de clinkerisation) d'un mélange dosé et homogénéisé des matières contenant les quatre oxydes CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 , généralement on utilise un mélange de calcaire (qui apporte la chaux) et d'argile naturelle (source des autres oxydes).

Les oxydes cités ci-dessus se retrouvent dans le clinker sous forme de silicate et aluminates de calcium anhydres, dont les principaux sont :

- C_3S : silicate tricalcique appelé Alite 45 à 65% ;
- C_2S : silicate bicalcique appelé Belite 10 à 30% ;
- C_3A : aluminates tricalciques appelés cémites 5 à 15% ;
- C_4AF : aluminoferrite tétracalcique 5 à 15%.

I-3-1-3-2 Les autres constituants principaux :

Ils sont ajoutés au clinker avec une proportion supérieure à 5% et notifiés par des lettres significatives :

- Laitier de haut fourneaux (S) : C'est un sous-produit de la sidérurgie du Fer. Il est obtenu par refroidissement rapide de la scorie provenant de la fusion de minerais de Fer dans un haut fourneau.
- Pouzzolanes naturelles (P et Q) : Ce sont des produits contenant essentiellement de Silice, d'Alumine et d'oxyde de Fer présentant, soit naturellement soit après calcination, des propriétés pouzzolaniques. Ces pouzzolanes sont essentiellement des produits d'origine volcanique. P signifie Pouzzolanes naturelles à l'état brut et Q à l'état calciné

- Cendres volantes (V, W) : Ces sont des particules pulvérulentes récupérées dans les gaz émis par les chaudières de centrales thermiques qui fonctionnent aux charbons pulvérisés. Ils peuvent être d'origine silicoalumineuse ou calcique. Dans le premier cas ils présentent des propriétés pouzzolanniques, dans le deuxième des propriétés hydrauliques. V et W désignent la nature de la cendre volante, V : calcique (CaO) et W : siliceux (SiO₂)
- Schistes calcinés (T) : Ce sont des produits obtenus par la calcination d'un type d'argile bien défini (le schiste). Ces produits sont utilisés pour être utilisés dans la fabrication de ciment. Ils contiennent déjà certaines phases de clinker principalement C₂S, CA (aluminate monocalcique) et même de la solidre et de la sulfate de calcium finement broyés. Ils montrent de très fortes propriétés hydrauliques et propriétés pouzzolanniques.
- Calcaires (L) : Ce sont de produits obtenus par broyage très fins des roches naturelles présentant une très forte teneur en CaCO₃ (carbonate de calcium) supérieure ou égale à 75%. Ils sont ajoutés au ciment en tant que fine, c'est-à dire qu'ils permettent d'améliorer la maniabilité de la pâte de ciment, mais ne présente ni des propriétés hydrauliques ni pouzzolanniques.
- Fumée de silice (D) : Ce sont des particules très fines (environ 1micrometre) présentant une très forte teneur en silice amorphe (non cristallisée). Ce sont des sous-produits de l'industrie de fabrication de Silicium et d'alliage Ferrosilicium.
- Autres produits artificiels : D'autres produits artificiellement fabriqués peuvent être ajoutés au clinker. Ces produits sont généralement obtenus par calcination de produits naturels. La calcination leur confère (comme le schiste calciné) des propriétés pouzzolanniques très marquées. On peut citer par exemple les latérites calcinées, le metalcaolin (kaolin calciné), les cendres de balle de riz, la bauxite calcinée...

I-3-1-3-3 *Les constituants secondaires :*

Ce sont des matériaux minéraux naturels ou des sous-produits d'autres usines de fabrication d'autres produits ou encore des constituants décrits comme constituants principaux autres que le clinker mais avec des teneurs n'excédant pas les 5%.

Les sulfates de calcium :

Ils sont ajoutés dans le ciment pour régulariser la prise (ce sont des régulateurs de prise). On utilise le Gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou l'Anhydre(CaSO_4), à raison de 4 à 5%

Les autres additifs :

Ce sont des produits autres que le sulfate de calcium, qui peuvent être de natures minérales ou organiques, qui sont utilisés pour améliorer la fabrication du ciment ou certaines propriétés de ciment. Dans tous les cas la proportion n'excède pas 1% et même pour les additifs de nature organique la totalité ne doit pas dépasser 0,5%.

I-3-2 *Les granulats*

I-3-2-1 Généralités sur les granulats :

Le mot « granulat » a remplacé depuis peu celui d' « agrégat ». Il désigne des matières grenues, soient roulées et déposées par les cours d'eau, soient concassées en carrière. Les granulats sont constitués par des grains des grosseurs diverses que sont les sables, les graviers et les cailloux et qui sont utilisés pour la confection du béton et du mortier.

On appelle souvent les granulats des « inertes », désignation qui signifie que les granulats ne réagissent pas chimiquement en présence de la pâte de ciment.

En effet, leur grosseur, leur forme et leur propriété ont une grande influence sur la qualité des bétons et des mortiers. Les granulats servent aussi de ballast ou matériaux de fondations pour les chaussées, les aéroports et les voies ferrées.

Outre l'intérêt économique évident de l'emploi des granulats qui résulte du remplacement de pâte de ciment à égalité de volume, leur présence diminue les effets de l'échauffement et du retrait du ciment.

Les granulats n'ont pas une forme et un volume définis, mais ils sont classés par catégorie appelée « granulat élémentaire d/D » (les lettres d et D signifient respectivement le plus petit et le plus grand diamètre de granulats contenus dans l'échantillon). Les dimensions des granulats sont fixées par la norme NF P 18 304. On distingue les granulats aux formes arrondies des granulats de concassage.



Figure 1: Granulats roulés de rivières

I-3-2-2 **Critères de choix des granulats :**

Pour obtenir des meilleures performances dans la fabrication du béton, deux choix primordiaux sont à considérer :

I-3-2-2-1 La composition chimique :

Les granulats sont en général constitués par du calcaire ou de la silice, parfois par un mélange des deux. On a longtemps donné préférence aux granulats siliceux, mais les granulats calcaires sont également très convenables pourvu que le calcaire constituant soit dur.

I-3-2-2-2 La forme :

Les granulats de rivière ou provenant d'alluvions ont des formes arrondies qui leur permettent de glisser facilement les uns sur les autres et par conséquent de réserver entre eux le vide minimum.

Les granulats de concassage ont des formes anguleuses qui favorisent les coincements et la production des vides plus importants.

La forme des granulats a une grande importance pour l'ouvrabilité des bétons. Ils doivent en principe être arrondis. Les formes anguleuses, les plats et les aiguilles sont difficiles à malaxer et à mettre en œuvre.

1-3-2-2-3 Le coefficient volumétrique :

Le coefficient volumétrique d'un grain est le rapport entre son volume et la sphère dont le diamètre est sa plus grande dimension, ainsi ce coefficient doit être faible pour les plaques et les aiguilles.

On appelle « plus grande dimension d'un grain » la plus grande distance N , séparant deux plans tangents au grain. C'est, en général, le diamètre de la plus petite sphère circonscrite au grain.

Le « coefficient volumétrique v d'un grain » est le rapport du volume v du grain au volume V tel que :

$$V = \pi \cdot \frac{N^3}{6}$$

Donc :

$$v = \frac{6v}{\pi N^3}$$

Avec :

V : volume de la sphère

v : volume du grain

N : la plus grande dimension du grain

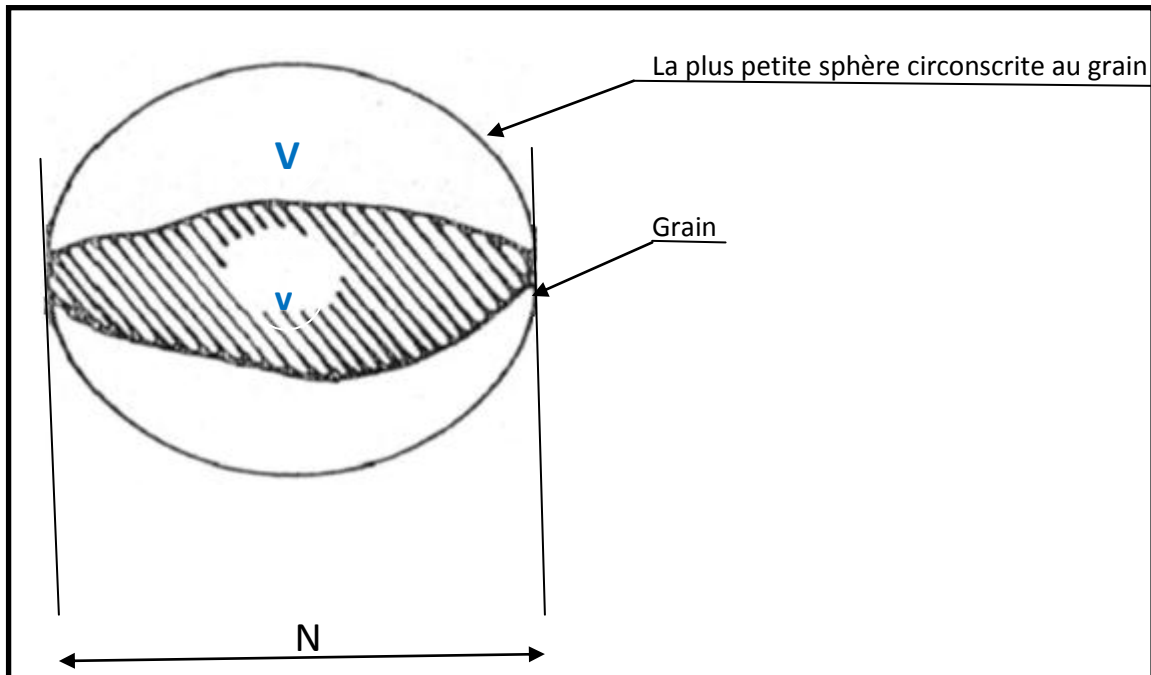


Figure 2: Coefficient volumétrique

I-3-2-3 Classement des granulats

On peut avoir des différentes catégories de granulats selon leurs dimensions.

I-3-2-3-1 *Les fillers et les sables:*

a- Le Filler :

Les fillers sont des grains minéraux de dimension inférieure à 2 mm, et dont 70 % sont inférieurs à 0,063 mm. Les fillers sont utilisés comme correcteurs de sables (qu'il s'agisse d'utiliser ces sables dans des bétons hydrauliques, des bétons bitumineux, des graves routières ou en amendement de sols). Ces fillers doivent donc faire l'objet d'un dosage précis et d'un mélange efficace. C'est pourquoi il est très recommandé que ces mélanges soient faits dans des installations ou avec des matériels spécifiques.



Figure 3 : Le filler

b- Le sable :

Les sables sont utilisés comme constituants de bétons hydrauliques, de bétons bitumineux, de graves routières, de remblais ou d'enfouissement de réseaux divers. Pour la plupart de ces utilisations, ils doivent être mélangés dans des proportions bien déterminées avec des gravillons, parfois des fillers, et doivent donc faire l'objet d'un dosage précis et d'un mélange efficace. Il est donc aussi recommandé de faire ces mélanges dans des installations spécifiques (centrales à béton, centrales d'enrobés, centrales de grave).

Les sables comprennent tous les éléments refusés au tamis de 80 μm et passent à travers le tamis de 5 mm.

Les sables sont subdivisés en :

- sables fins dont les diamètres des grains variant de 80 μm à 316 μm ;
- sables moyens dont les diamètres des grains variant de 316 μm à 1,25mm ;
- sables gros dont les diamètres des grains variant de 1,25mm à 5mm



Figure 4 : Le sable

I-3-2-3-2 Les graviers ou gravillons :

Les graviers sont les éléments passant au travers des trous ronds des passoirs de 25 mm de diamètre. On distingue :

- ***les petits graviers*** dont les diamètres des grains variant de 5 mm à 10 mm ;
- ***les graviers moyens*** dont les diamètres des grains variant de 10 mm à 16 mm ;
- ***les gros graviers*** dont les diamètres des grains variant de 16 mm à 25 mm.



Figure 5 : Les graviers concassés

I-3-2-3-3 Les cailloux :

Les cailloux sont les éléments qui passent entre les passoirs de 25 mm à 100 mm.

On distingue :

- les petits cailloux dont les diamètres des grains variant de 25 mm à 40 mm ;
- les cailloux moyens dont les diamètres des grains variant de 40 mm à 63 mm ;
- les gros cailloux dont les diamètres des grains variant de 63 mm à 100 mm.



Figure 7 : Les cailloux roulés



Figure 6 : Les cailloux concassés

I-3-3 L'eau de gâchage

Le gâchage du béton est une phase cruciale. En théorie il faut gâcher un béton pendant plus de 10 minutes en bétonnière pour assurer la bonne répartition des différents composants et lui donner une cohésion parfaite.

I-3-3-1 **Importance de l'eau de gâchage**

Dans la confection des bétons, les rôles joués par l'eau sont :

- permettre la réalisation de pâte de ciment ;
- mouiller la surface des granulats pour que la pâte de ciment puisse y adhérer ;
- favoriser la maniabilité du béton en remplissant plus ou moins les vides entre les constituants.

Les eaux naturelles ne sont pratiquement jamais pures. Il faut seulement que les corps qu'elles contiennent soient en quantités suffisamment faibles pour ne pas créer de désordres dans la construction.

La norme NF P 18 303 indique les tolérances en ce qui concerne les matières en suspension et les sels dissous dans l'eau de gâchage.

Tableau 2 : Tolérances en impuretés de l'eau de gâchage

Nature du béton	Tolérances en gramme par litre	
	Matières en suspension	Sels dissous
A : résistance mécanique élevée (ouvrage en béton armé)	2	15
B : faible perméabilité (Barrages, réservoirs...)	2	15
C : résistance mécanique faible (Fondations, blocages...)	5	30

Source [4]

Il faut se rappeler qu'au chantier, la composition de béton donné par le laboratoire est définie à partir d'éléments secs. Or il n'y a pratiquement pas de granulats secs sur le chantier, particulièrement le sable.

Pour cela il faut toujours déterminer la teneur en eau des granulats. L'influence de la quantité d'eau s'exerce dans *deux sens absolument contradictoires*. D'une part, il est indispensable de mettre une quantité d'eau suffisante pour que la maniabilité corresponde au travail à exécuter. D'autre part, la résistance mécanique du béton varie dans le même sens que la valeur du rapport C/E de la masse de ciment à celle de l'eau pour une même quantité de béton. On résout parfois (partiellement) ce problème en employant des adjuvants.

I-3-3-2 **Exemple de technique de gâchage**

Autant dire qu'un gâchage manuel, comme cela se fait généralement sur le terrain, est loin de permettre une homogénéité parfaite.

Pour obtenir une homogénéité satisfaisante du béton ou du mortier gâché à la main, la technique des trois tas donne d'assez bons résultats:

- 1) on ajoute les différents ingrédients sans l'eau sur le tas central ;
- 2) on déplace le tas à petites pelletées en formant un second tas à côté, et le plus haut possible;
- 3) on ramène le second tas à la place du premier pour former ainsi un troisième tas;
- 4) il faut mouiller l'ensemble du mélange en une seule fois et gâcher le béton en continu en attendant son utilisation.

La technique qui consiste à mouiller une partie seulement du béton entraîne une mauvaise répartition du ciment dans le mélange sable-gravier : l'eau entraînant le ciment vers le bas et laisse les agrégats (sable plus gravier) du haut sans liant.

Remouiller un béton qui a séché quelque peu est à déconseiller. Le ciment déjà mouillé a commencé sa réaction chimique. Il a séché et s'est durci. Mais par manque d'eau il reste friable. Rajouter de l'eau ne va pas permettre que le ciment récupère la dureté qu'il a déjà perdue, la réaction chimique a déjà eu lieu.

I-3-4 ***Les adjuvants :***

Ce sont des produits chimiques incorporés à faibles doses (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de leurs propriétés.

Différents adjuvants peuvent être utilisés pour améliorer les caractéristiques du béton. L'incorporation se fait soit avant, soit pendant le mélange, ou bien encore au cours d'une opération supplémentaire de malaxage.

Selon l'effet recherché, on peut distinguer, trois grandes familles d'adjuvants :

I-3-4-1 Les adjuvants modificateurs de prise et de durcissement

Ces sont des produits chimiques solubles dans l'eau et qui modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution.

On distingue les accélérateurs et les retardateurs.

I-3-4-1-1 Les accélérateurs de prise et de durcissement

Ces produits agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment : cela entraîne un déclenchement plus rapide du phénomène de prise et s'accompagne d'un dégagement de chaleur plus important.

I-3-4-1-2 Les retardateurs de prise

Ils agissent chimiquement en retardant plus ou moins longtemps l'hydratation et le début de prise du ciment. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre 1 heure et 3 jours.

I-3-4-2 Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

I-3-4-2-1 Les entraîneurs d'air

Ils ont pour fonction d'entraîner la formation dans le béton et du mortier des microbulles d'air uniforme reparti de diamètre moyen inférieur à 100µm. Les entraîneurs d'air sont en générale des corps tensionactifs à base de résine de synthèse.

I-3-4-2-2 Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale d'en diminuer l'absorption capillaire. Ils sont en général à base de stéarates solubles qui, en contact avec la chaux du ciment, forment des cristaux de stéarate de calcium insolubles qui viennent obstruer le réseau capillaire du béton.

I-4 Propriétés et caractéristiques du béton

Pour optimiser l'utilisation du béton, il faut bien connaître ses caractéristiques à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

I-4-1 *Propriété du béton à l'état frais*

La propriété essentielle du béton à l'état frais est son ouvrabilité qui est caractérisé par sa consistance. Les méthodes les plus utilisés pour évaluer la consistance du béton sont : l'affaissement au cône d'Abrams et l'étalement à la table de secousse.

I-4-1-1 **Affaissement au cône d'Abrams (slump-test)**

Cet essai consiste à remplir du béton un moule tronc conique sans fond, de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure, qui est décrit dans la norme NF P 18-451. Il permet de mesurer l'affaissement A qui est relié à la consistance du béton.

C'est un simple essai qu'on peut voir selon le schéma suivant.

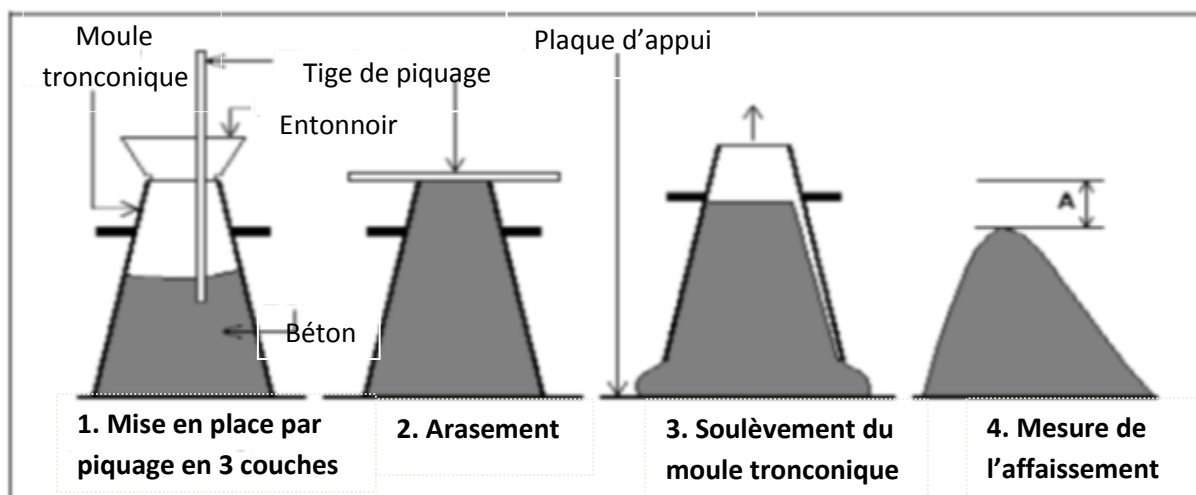


Figure 8 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

On peut voir dans le tableau suivant la consistance du béton selon la valeur de l'affaissement A.

Tableau 3 : Consistance selon les valeurs de l'affaissement du béton

A [cm]	Consistance	Symbole
0-4	ferme	F
5-9	plastique	P
10-15	Très plastique	TP
≥16	Fluide ou coulée	C ou Fl

Source [7]

I-4-1-2 **Étalement à la table de secousse (Flow test)**

Cet essai est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du béton à s'étaler par écoulement selon la norme NF EN 12350-5.

Cet essai consiste à remplir du béton un moule tronc conique (le même que pour l'essai d'affaissement) sur une table à chocs comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical.

Ce cône de béton est soumis à son propre poids et à une série de secousses. Plus l'étalement est grand et plus le béton est réputé fluide. Le moule tronconique placé au centre du plateau carré est rempli par 2 couches de béton, compacté par 10 coups de pilon. Après arasement le moule est retiré verticalement. Puis le plateau est soulevé de 40 mm jusqu'à la butée et relâché immédiatement 15 fois de suite en 15 secondes.

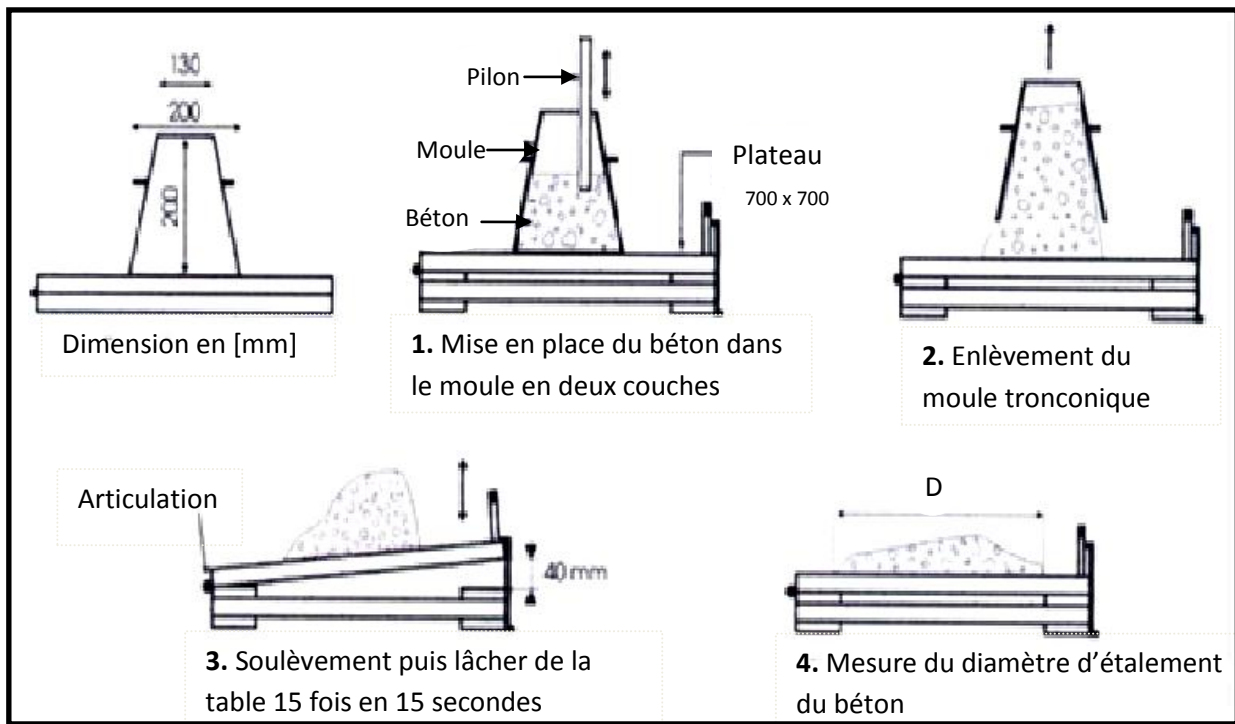


Figure 9 : Mesure d'étalement par flow-test

On peut lire dans le tableau suivant la consistance du béton selon la valeur de l'étalement D.

Tableau 4: Les six classes d'étalement ou de consistance

Classes	Etalements D [mm]
F1	<340
F2	350 à 410
F3	420 à 480
F4	490 à 550
F5	560 à 620
F6	>630

I-4-2 *Propriétés des bétons durcis*

I-4-2-1 **Résistance mécanique**

Pour caractériser les qualités et les performances mécaniques des bétons, on définit la résistance à la compression et la résistance à la traction.

I-4-2-1-1 *Résistance à la compression*

La résistance à la compression est une donnée importante pour un matériau puisque c'est elle, entre autre, qui définit les capacités mécaniques d'une structure. Il existe plusieurs formules pour la détermination de la résistance à la compression, telles que les formules de Féret, de Bolomey et celle de Dreux-Gorisse.

a) **Résistance à la compression à j jours**

La résistance d'une éprouvette de béton est définie à (j) jours, à partir de la charge (F_r) conduisant à sa rupture, tel que :

$$R_{cj} = \frac{F_r}{A}$$

Avec : R_{cj} : résistance à la compression à j jour en [MPa]

A : surface de contact de la force pressante en [mm²]

F_r : force de compactage en [N]

b) **Relation entre R_{cj} à j jours et R_{c28} [6]**

On considère que la résistance du béton évolue dans le temps très rapidement à court terme (entre 0 et 7 j), puis ralentie (de 7 à 28 j) pour tendre vers une asymptote horizontale à partir de 60 jours. Pour la référence en temps de 28 jours prise dans les calculs, on considère que le béton a atteint, à cet âge, 90% de sa résistance à long terme.

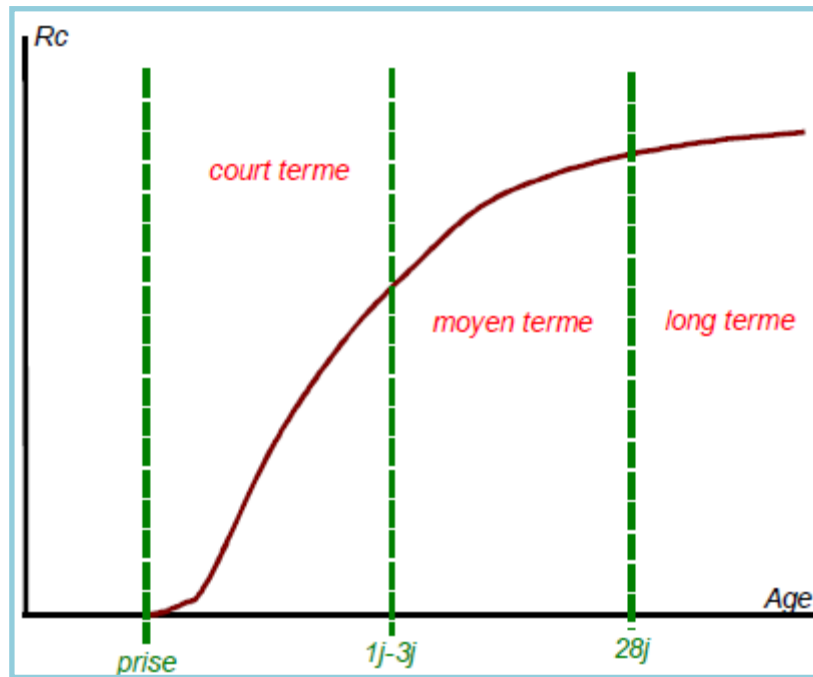


Figure 10 : Evolution des résistances à la compression dans le temps

L'article A 2.1.11 du BAEL 91 donne les formules suivantes afin d'estimer les résistances du béton en fonction du temps :

➤ Pour $j \leq 28$

- Si $R_{c28} \leq 40 \text{ Mpa}$ alors $R_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} \times R_{c28}$
- Si $60 \text{ MPa} \geq R_{c28} > 40 \text{ MPa}$ alors $R_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95j} \times R_{c28}$

➤ Pour $28 < j \leq 60$ on adopte la première formule

➤ Pour $j > 60$ on a : $R_{cj} = 1,10 \times R_{c28}$

I-4-2-1-2 Résistance en traction

Tous les bétons sont nettement moins performants en traction qu'en compression.

c) Résistance en traction par flexion

Les essais s'effectuent sur des éprouvettes prismatiques généralement de dimensions $a \times a \times 4a \text{ cm}^3$. La norme européenne préconise $a = 15 \text{ cm}$.

L'éprouvette repose sur deux appuis distants de $3a \text{ cm}$. La charge peut être appliquée au milieu de l'éprouvette. On peut aussi appliquer deux charges concentrées symétriques dont les points d'application sont distants de $a \text{ cm}$.

d) Résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction d'éprouvette cylindrique de diamètre \varnothing environ 15 cm et d'élancement 2. Donc : $H = 2\varnothing = 30 \text{ cm}$.

e) Essai de traction par fendage ou essai Brésilien

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux d'une presse.

Si P est la charge de compression maximale exprimée en $[N]$ produisant l'éclatement du cylindre, la résistance en traction R_{tj} sera :

$$R_{tj} = \frac{2P}{\pi DL}$$

j : âge du béton au moment de l'essai en jours

D : diamètre de l'éprouvette $[mm]$

L : hauteur de l'éprouvette en $[mm]$

I-4-2-2 Les autres propriétés du béton durci

I-4-2-2-1 *Le retrait*

C'est la diminution de longueur ou de volume d'un élément de béton après durcissement au cours du temps.

Le retrait est évalué à partir de la relation : $\frac{\Delta l}{L}$

$\Delta l = L - L'$, la variation de longueur.

L : longueur initiale de l'élément

L' : longueur finale

Généralement, le retrait est exprimé à 3/1000 ou (3‰) de L dans les calculs de structure.

I-4-2-2-2 *La dilatation*

C'est le phénomène d'augmentation de dimension par augmentation de la température. Le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 10-5 pour une variation de $\pm 20^\circ\text{C}$. On obtient une variation de longueur $\Delta L = \pm 2 \text{ ‰}$ de L.

I-4-2-2-3 *Le fluage*

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau visco-élastique. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage. Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans. Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%.

Estimation de la déformation de fluage: $\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰}$ longueur. Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

I-4-2-2-4 *Le module d'élasticité*

Le module d'élasticité ε se définit par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\text{Contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courants, on admet $E_{ij} = 11000 R_{bj}^{1/3}$

E_{ij} : Module de déformation longitudinale instantanée du béton à j jours

j : Age du béton en jours

R_{bj} : Résistance en compression du béton à j jours

On estime E_{vj} , le module d'élasticité différé du béton à j jours par la valeur suivant :

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} E_{ij}$$

I-5 Classification des bétons

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

Il existe différentes manières de classer les bétons entre eux et quelques fois ces différentes classifications sont utilisés ensembles pour définir un béton.

I-5-1 *Suivant la masse volumique*

En général, le béton peut être classé en trois groupes (norme NF EN 206-1), selon sa masse volumique ρ :

- béton léger, $800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$;
- béton courant, $2000 \leq \rho \leq 2600 \text{ kg/m}^3$;
- béton lourd, $\rho > 2600 \text{ kg/m}^3$.

I-5-2 *Suivant la nature du liant*

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- béton de ciment ;
- béton silicate (chaux) ;
- béton de gypse (gypse) ;
- béton asphalte (béton au bitume).

I-5-3 *Suivant la nature du plus gros granulat utilisé*

On distingue :

- béton de sable ;
- béton de mignonette (micro-béton) ;
- béton de gravillon ou gravier ;
- béton de cailloux ou de pierres concassés (gros béton) ;
- béton cyclopéen (béton de moellons ou de galets).

I-5-4 *Classe de résistance*

La norme EN 206-1 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression.

Selon leur résistance à la compression à 28 jours, on peut citer quatre classes de béton qu'on trouve dans le tableau suivant.

Tableau 5: Classe des bétons selon leurs résistances à la compression

Classe	Rc à 28 jours [Mpa]
Béton ordinaire	16 – 40
Béton à haute performance	45 – 60
Béton à très haute performance	65 – 100
Béton à ultra haute performance	>110

Source [7]

I-5-5 *Classe de consistance*

La norme NF 206 1 définit pour les bétons à l'état frais cinq classes de consistances, la consistance étant évalué par la valeur de l'affaissement au cône d'ABRAMS exprimée en millimètre.

Tableau 6: Classe de consistance des bétons

Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement [mm]	10 – 40	50 – 90	100 – 150	160 - 210	≥ 220
Consistance	Ferme	Moyennement plastique	Plastique	Très plastique	Fluide

Source [7]

I-6 Conclusion

Ce chapitre porte sur la définition générale d'un béton, on a montré qu'il peut être classé suivant la masse volumique, suivant la nature du liant, suivant la nature du plus gros granulats, suivant la classe de résistance et suivant la classe de consistance. Ces caractéristiques à l'état frais ainsi qu'à l'état durci sont importantes pour la confection.

Chapitre II: **METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON SELON DREUX-GORISSE [7]**

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 partie d'ouvrage en cause.

En général, il n'existe pas de méthode de composition du béton qui soit universellement reconnue comme étant la meilleur. La composition du béton est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigence généralement contradictoire.

De nombreuse méthode de composition ont été élaborée entre autre : la méthode de Valette, Faury, Bolomey, Abrams, Joisel, Dreux-Gorisse et la méthode Baron. Quel que soit la méthode de composition utilisée, la composition déterminée en laboratoire doit être contrôlée et adaptée ultérieurement aux conditions réelles du chantier.

Nous avons adopté la méthode composition du béton selon DREUX-GORISSE dans cet ouvrage.

II-1 Données de bases

Pour pouvoir formuler le béton, il faut connaître quelques données de bases qui sont décrites ci-dessus.

II-1-1 Nature de l'ouvrage

La connaissance de la nature de l'ouvrage est nécessaire : ouvrage massif ou au contraire élancé et de faible épaisseur, faiblement ou très ferraillé. Il sera nécessaire de connaître l'épaisseur minimale et les dispositions des armatures dans les zones les plus ferraillées : distance minimale entre elles et couvertures par rapport au coffrage.

II-1-2 Résistance souhaité

On demandera en général, une résistance nominale à la compression à 28 jours R_{b28} et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique, il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours : $R_b = R_{b28} + 15\%$ ou $R_b = 1,15.R_{b28}$.

II-1-3 *Ouvrabilité désirée*

Elle est fonction de la nature de l'ouvrage (plus ou moins massifs ou plus ou moins ferrailé), de la difficulté du bétonnage, des moyens de serrage, etc... Elle peut se définir en général par la plasticité désirée mesurée par affaissement au cône comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 7: Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône ou au test d'ouvrabilité C.E.S

Plasticité	Serrage	Affaissement A [cm]	Nombre de chocs test C.E.S
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	>60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	< 10

Source [7]

II-1-4 *Dimension maximale des granulats :*

La dimension maximale des granulats (Dmax) est choisie suivant les spécificités de l'ouvrage à bâtir. Le tableau suivant montre les règles à suivre. En général ces valeurs sont valables pour une granularité continue, tandis que pour une granularité discontinue, ces valeurs devront être diminuées de 20% environ.

Tableau 8: Dimension maximale du granulat.

Caractéristiques de la pièce à béton	Dimension D des granulats	
	Roulés	Concassés
e : espacement entre armatures horizontales	$D \leq e$	$D \leq 0.9 e$
c : couverture entre armatures et coffrages	$D \leq 0.8 c$	$D \leq 0.7 c$
r : rayon moyen des mailles de ferrailage	$D \leq 1.85 r$	$D \leq 1.65 r$
r' : rayon moyen du moule (volume à remplir de béton par rapport à la surface totale des parois et armatures).	$D \leq 1.2 r'$	$D \leq r'$
hm : épaisseur minimale	$D \leq 0.25 hm$	

Source [7]

II-2 Calcul du dosage

II-2-1 Dosage en ciment

On commencera par évaluer approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée : $R_b = G.FCE \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$.

Avec :

R_b : Résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,

FCE : Classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,

C : Dosage en ciment (en kg/m³),

E : Dosage en eau totale sur matériau secs (en litre),

G : Coefficient granulaire.

Tableau 9: Valeurs approximatives du coefficient granulaire (G). [7]

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins ($D \leq 16 \text{ mm}$)	Moyen ($20 \leq D \leq 40 \text{ mm}$)	Gros ($D \geq 50 \text{ mm}$)
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Le dosage en ciment est en fonction de C/E, mais également du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la figure suivante permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée au problème.

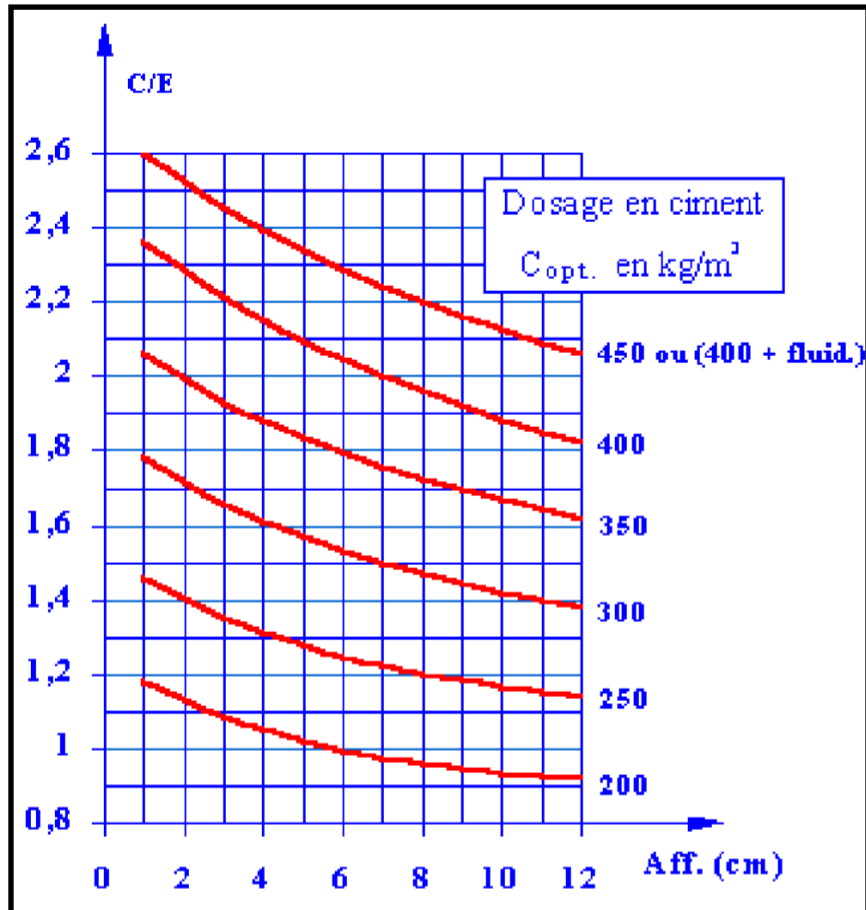


Figure 11 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).

II-2-2 *Dosage en eau*

Connaissant le dosage en ciment C et la valeur du rapport C/E, on peut en tirer une valeur approximative du dosage en eau E.

II-2-3 *Correction du dosage en eau en fonction de D_{max}*

Les données précédentes sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ $D = 25$ mm (dimension la plus courante). Si

l'on a $D < 25$ mm, la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité équivalente, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice- versa.

Tableau 10: Correction du dosage en eau selon le diamètre maximale D du mélange granulaire. [7]

D (mm)	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
Correction (%)	+9	+6	+4	+2	0	-2	-4	-6

II-2-4 Dosage en granulats

II-2-4-1 Dosage en pourcentage (en volume absolu) des granulats

L'étude des mélanges granulaires a montré que quel que soit le mélange en sable et en gravier, la granularité du mélange obtenu peut être représentée et approchée par deux segments de droite. Cette courbe simplifiée est une modélisation de la courbe réelle.

II-2-4-1-1 Courbe de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique, on trace la courbe granulaire de référence OAB.

- Le point d'origine O est fixé à 0% de tamisât sur le plus petit tamis, 0,080 mm. Ce point est repéré par ses coordonnées : O [0,080 ; 0] ou en module tamis 0 [20 ; 0]

- De même, l'extrémité B se situe sur le tamis, D du gravier, avec 100% de tamisât.

- Point de brisure A à pour coordonnées :

En abscisse XA :

$$XA = D/2 \text{ si } D \leq 25 \text{ mm ;}$$

XA est située au milieu du segment limité par le module 38 (5mm) et le module correspond à D si $D > 25$ mm ;

En ordonnée YA :

$$YA = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Avec :

K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage, de la forme des granulats (roulés ou concassés) et également de module de finesse du sable.

Tableau 11: Valeurs de K.

Vibration		Faible		normale		Puissante	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment en [kg/m ³]	400+fluidif	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

Source [7]

- K_s : Terme correcteur (si le module de finesse du sable est différent de 2,5)
 $K_s = 6M_f - 15$
- K_p : Terme correcteur (si le béton est pompable), $5 < x < 10$

II-2-4-1-2 Détermination des proportions des granulats : ligne de partage

Une méthode graphique appelée la ligne de partage permet de déterminer les proportions de graviers et de sable.

La ligne de partage joint le point d'ordonnée 95% de la courbe granulaire de plus petit granulat au point d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat. Le point d'intersection entre cette ligne et la courbe théorique du mélange optimum indique les proportions en pourcentage de volume absolu de sable et de gravier.

Ces proportions sont lues sur le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection. Ce pourcentage indique la proportion de sable, le complément donne la proportion du gravier.

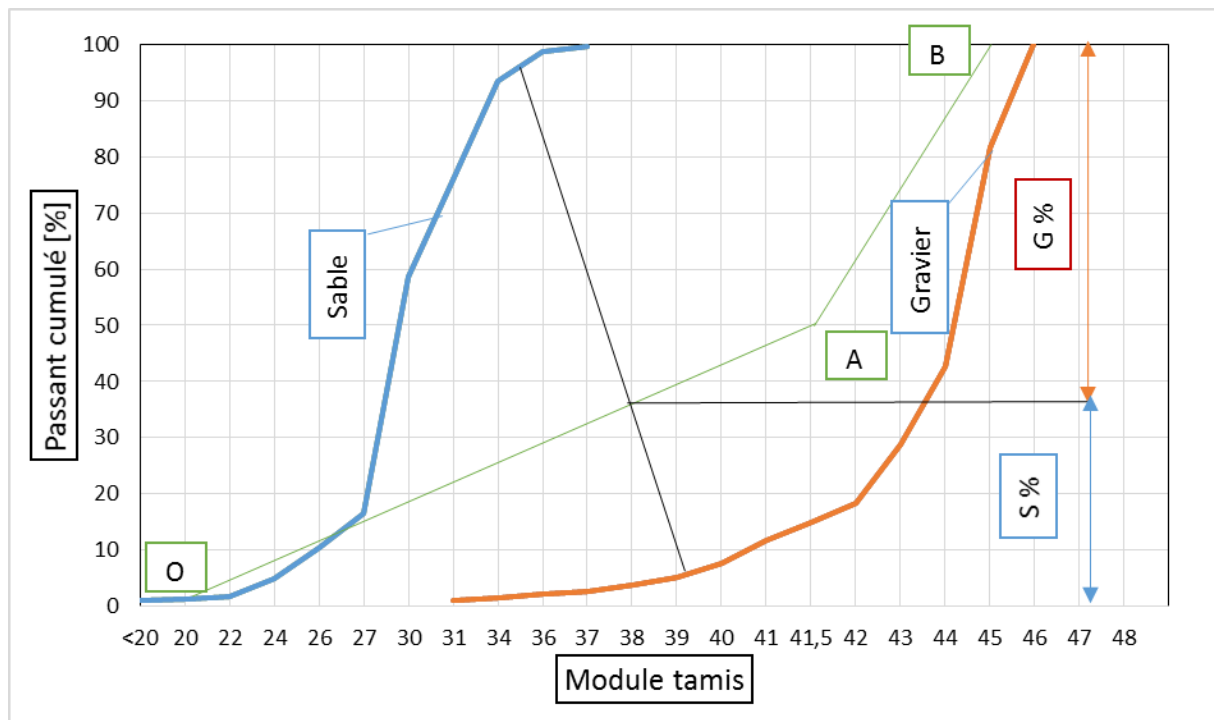


Figure 12: Principe de la détermination graphique des pourcentages en volume des granulats

II-2-4-2 Dosage en masse des granulats

II-2-4-2-1 *Coefficient de compacité*

La meilleure compacité est obtenue en vérifiant les proportions du mélange granulaire. Mais indépendamment de cela, elle dépend également du diamètre D des granulats, des conditions de vibration du béton et de sa plasticité. On choisira une valeur approximative de r dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Coefficient de compacité γ .

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité						
		D=5	D=10	D=16	D=25	D=40	D=63	D=100
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	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

Source [7]

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

- Sable roulé et gravier concassé = - 0.01 ;
- Sable et gravier concassés = - 0.03

II-2-4-2-2 Dosage en masse

La compacité du béton représente le volume de matière solide (ciment et granulats). Si nous considérons le m³ de béton (soit 1000 litres), on a :

$$V_{\text{solides}} = \gamma \cdot 1000$$

$$V_{\text{solides}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}}$$

$$V_{\text{granulats}} = \gamma \cdot 1000 - V_{\text{ciment}}$$

Soient, γ_c , γ_s et γ_g respectivement les masses spécifiques du ciment, du sable et du gravier, s et g les pourcentages en volume absolu de chacun des granulats lues sur la courbe de référence on a :

$$\text{Sable} = (\gamma 1000 - \gamma_c)s \cdot \gamma_s \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$\text{Gravier} = (\gamma 1000 - \gamma_c)g \cdot \gamma_g \quad [\text{kg/m}^3]$$

Chapitre III: **LA VIBRATION DES BETONS [8] [9] [10] [11] [12]**

III-1 Introduction

La vibration appliquée au béton frais a été développée dans les années 1920. Elle avait pour but la mise en œuvre des premiers éléments en béton armé. Jusqu'alors, les bétons étaient damés manuellement, à l'aide d'une barre métallique, pendant plusieurs dizaines de secondes jusqu'à obtention d'un léger ressuage en surface. La vibration a permis une liquéfaction suffisante de ces matériaux fermes pour assurer le remplissage des coffrages et de soulager la pénibilité du travail des ouvriers.

De nos jours, la fonction de la vibration a évolué. En effet, la fluidité du béton doit être suffisante pour remplir en partie un coffrage, la vibration améliore l'enrobage des armatures, augmente la compacité et diminue la quantité de bulles d'air du matériau en place.

Au cours des dernières décennies, de façon à améliorer la fluidité et les performances mécaniques, la formulation des bétons a évolué significativement avec l'utilisation croissante d'ajouts tels que des agents réducteurs d'eau, des retardateurs de prise, des ciments avec addition.

III-2 Objectifs de la vibration

Le béton frais est un mélange de ciment, d'eau, de sable, de gravillons, d'adjuvants et de bulles d'air.

En raison des forces capillaires et des forces de frottement entre les granulats, le béton ne peut, sans effet mécanique, occuper la place des vides d'air.

Cela peut être obtenu par le compactage mais principalement par la "VIBRATION".

La vibration met artificiellement en mouvement les éléments du béton (ciment, eau, granulats). Elle assure le bon remplissage des coffrages et des moules, le serrage du béton et sa désaération en favorisant l'imbrication des granulats et en expulsant les bulles d'air.

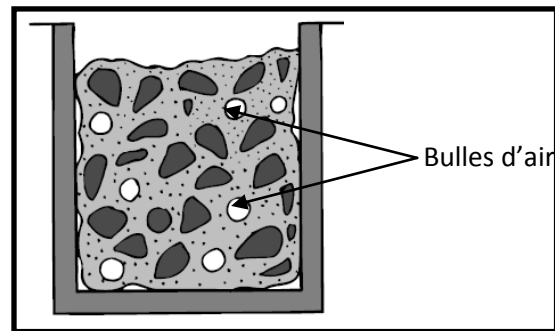


Figure 13: Béton frais

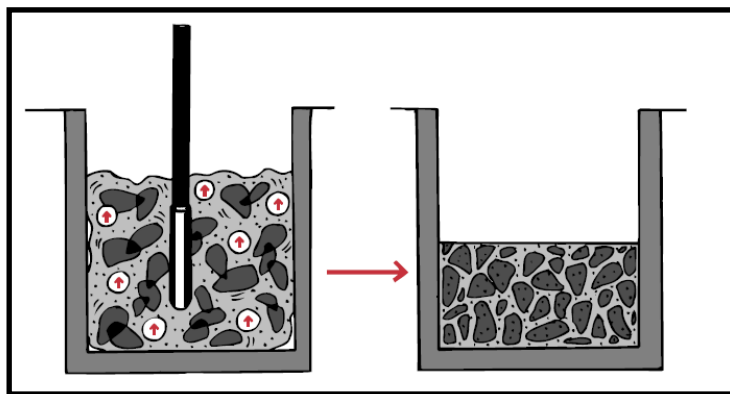


Figure 14: Vibration du béton (désaérer et serrer le béton)

III-3 Propriétés du béton vibré [13]

La vibration apporte au béton plusieurs propriétés, qui sont :

III-3-1 Amélioration de l'ouvrabilité

Au moment de la vibration le béton se comporte comme une pâte assurant un parfait remplissage du moule et un bon enrobage des armatures.

III-3-2 Qualité des parements

Grâce à la vibration, l'homogénéité du béton est assurée sans bulles d'air ou nids de cailloux.

Il faut néanmoins souligner qu'outre les paramètres de la vibration, le rapport E/C (eau/ciment), les adjuvants, la qualité du coffrage, l'agent de démoulage (cire, huile...), les conditions de mise en œuvre participent à la qualité des parements du béton.

III-3-3 Performance du béton

Les résistances mécaniques du béton augmentent avec sa compacité ; il en est de même pour sa durabilité.

En résumé, de l'utilisation de la vibration résulte un béton de qualité :

- mise en œuvre facilitée ;
- résistance accrue ;
- béton durable ;
- bel aspect des parements.

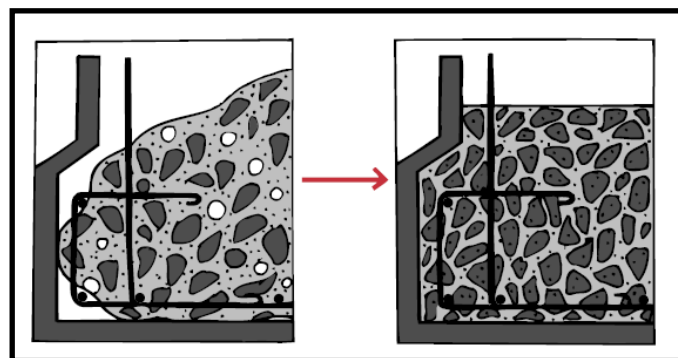


Figure 15: Bon remplissage du moule après vibration

III-4 Le matériel de vibration

III-4-1 Les vibrateurs internes ou aiguilles vibrantes

III-4-1-1 Vibrateurs internes pneumatiques

L'excentrique situé dans le corps vibrant (cylindre) est entraîné par un flux d'air comprimé.



Figure 16: vibreur interne pneumatique

Tableau 13: Caractéristiques des vibrateurs pneumatiques

Diamètre	(mm)	25 à 150
Fréquence	(cycles/ mn)	15 000 à 20 000
Force centrifuge	(N)	1 000 à 20 000
Pression d'alimentation d'air	(bar)	5 à 6
Consommation d'air	(l/mn)	500 à 2 000
Masse de l'aiguille	(kg)	0,5 à 10
Masse du vibreur complet	(kg)	2 à 14

Source [13]

III-4-1-2 Vibrateurs électriques à moteur incorporé

Dans le corps vibrant (l'aiguille), l'excentrique est soit directement monté sur le rotor du moteur électrique, soit en prise directe avec lui.

Un convertisseur de fréquence et de tension ramène le courant du réseau de 220/380 volts 50 Hz à 42 volts (tension de sécurité) 200 Hz donnant une fréquence de vibration de l'ordre de 12 000 cycles/mn.

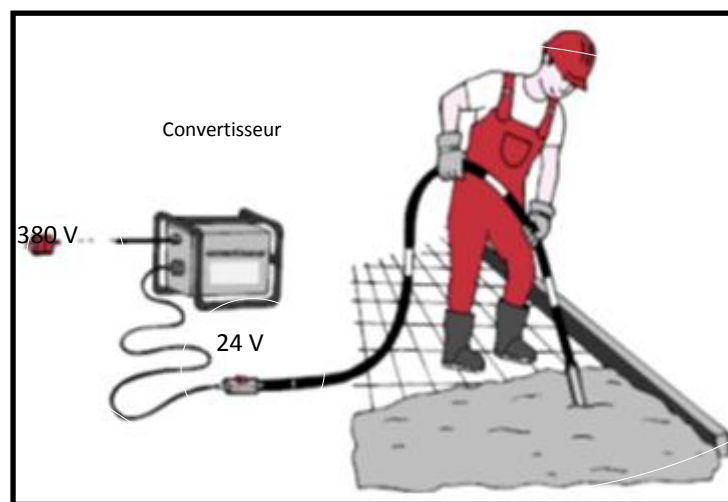


Figure 17: Utilisation du vibreur électrique sur le chantier

Tableau 14: Caractéristiques des vibrateurs électriques

Diamètre	(mm)	45 à 90
Fréquence (cycles/mn)		12 000
Force centrifuge	(N)	1 000 à 15 000
Tension d'alimentation du vibreur	(V)	42
Fréquence d'alimentation du vibreur	(Hz)	150 ou 200
Masse	(kg)	12 à 30

Source [13]

III-4-1-3 Vibrateurs mécaniques

L'excentrique est entraîné par un flexible actionné par un moteur essence, diésel ou électrique.

Le flexible est logé dans une gaine semi-rigide.

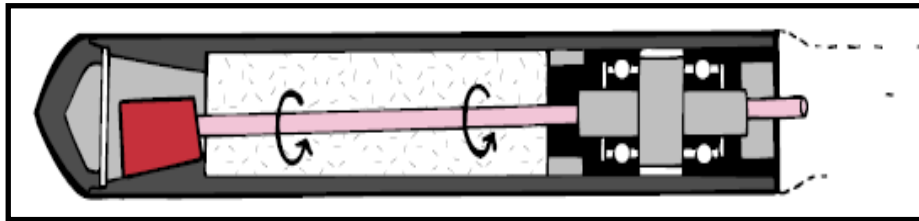


Figure 18: vibreur mécanique

Tableau 15: caractéristiques des vibrateurs mécaniques

Diamètre	(mm)	25 à 70
Fréquence	(cycles/mn)	12 000 à 18 000
Force centrifuge	(N)	1 000 à 50 000
Masse	(kg)	12 à 30
Moteur essence, diésel ou électrique		
• Puissance	(kW)	2 à 3
• Vitesse	(tours/mn)	2 850
Longueur flexible	(m)	4 à 6

Source [13]

III-4-2 Les vibrateurs externes

III-4-2-1 Vibrateurs pneumatiques

La masse excentrée est entraînée en rotation par la pression de l'air comprimé.

L'alimentation est assurée par un compresseur mobile ou par un réseau urbain ou industriel d'air comprimé.

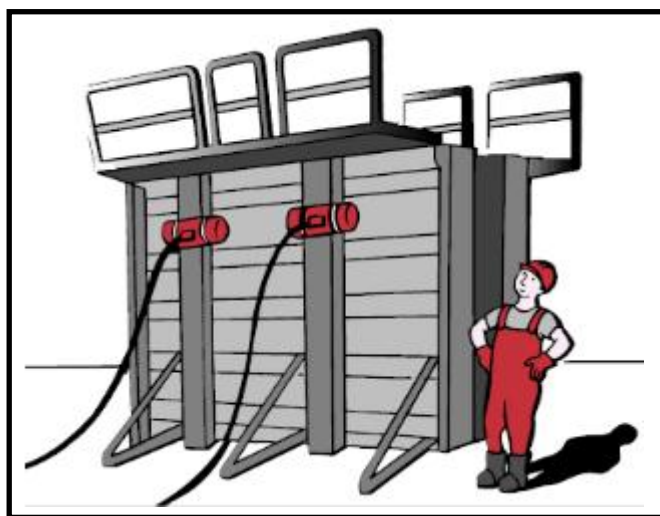


Figure 19: vibrateur externe pneumatique

Tableau 16: Caractéristiques du vibrateur externe pneumatique

Moment d'excentricité	(cm.kg)	0,5 à 3
Pression d'air nominale	(bar)	6
Fréquence	(Hz)	9 000 à 15 000
Force centrifuge	(N)	5 000 à 60 000
Consommation d'air	(l/mn)	800 à 2 000
Masse	(kg)	6 à 17

Source [13]

III-4-2-2 Vibrateurs électriques

Les masses excentrées sont montées sur les extrémités du rotor du moteur électrique.

L'alimentation est assurée soit directement par le courant de réseau, soit par un convertisseur de fréquence et de tension ramenant le courant de réseau de 220/380 volts 50 Hz à 42 volts et 150 Hz ou 200 Hz, soit par un variateur de fréquence.

Tableau 17: Caractéristiques des vibrateurs électriques

Puissance	(W)	125 à 7 000
Force centrifuge	(N)	1 000 à 65 000
Tension d'alimentation sans convertisseur	(V)	230/400
Fréquence	(Hz)	50
Tension avec convertisseur	(V)	42
Fréquence avec convertisseur	(Hz)	150 ou 200
Fréquence avec variateur de fréquence	(Hz)	0 à 200

III-4-3 *Les vibrateurs de surface*

III-4-3-1 Règles vibrantes

Le corps de la règle est constitué par 2 profilés, ou un tube associé à un profilé, sur lesquels sont fixées les poignées de manutention et les attaches de traction.

L'ensemble est renforcé par un système de fixation et de répartition de la vibration sur lequel est montée la source d'énergie de vibration.

Elle peut être :

- thermique,
- pneumatique,
- électrique.

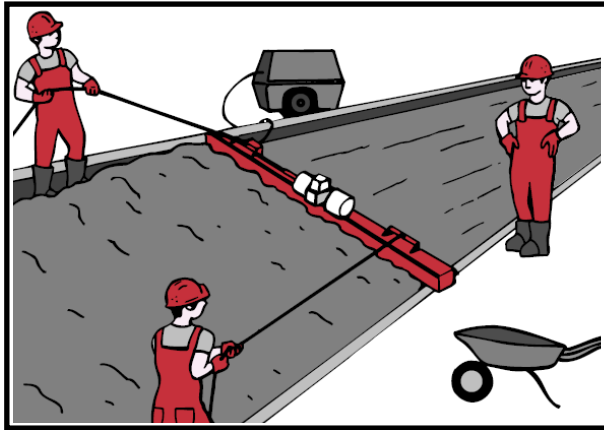


Figure 20: utilisation de la règle vibrante sur le chantier

III-4-3-2 **Compacteurs**

Il s'agit d'appareils destinés aux travaux de serrage du béton des radiers, dallages industriels, voirie, etc.

Le plus souvent ce sont des plaques vibrantes.



Figure 21: Utilisation du compacteur sur le chantier

Tableau 18: Caractéristiques des compacteurs

Dimension de la plaque (L x l) (mm)	400 x 600 à 700 x 1 000
Poids en ordre de marche (masse) (kg)	100 à 700
Surface de compactage (m²/h)	300 à 1 000
Vitesse d'avancement <i>valeur maximale</i> (m/mn)	10 à 20
Position maximum d'inclinaison du moteur en marche continue (degré)	20 à 25
Fréquences (t/mn) (Hz)	3 000 à 6 000
Force centrifuge <i>valeur maximale</i> (kN)	30 à 80
Source d'énergie	Moteur Diésel
Cylindrée (cm³)	300 à 1 000
Puissance maximale (kW)	4 à 15

Source [13]

III-5 Rappel sur la presse vibrante [14] [15]

Une presse vibrante est essentiellement composée d'une presse et d'une table vibrante qui lui transmet la vibration.

La table vibrante est un outil vibrant rationnellement élaborée. Comme son nom l'indique, elle est une table équipée d'un système vibrant ayant une amplitude de vibration variable ou non selon les mécanismes adoptés par les constructeurs.

L'exemple courant où l'on rencontre l'utilisation d'une presse vibrante dans l'élaboration des matériaux de construction est la fabrication de parpaing. En effet, pour faciliter le compactage des parpaings, on leur soumet une vibration, en les compactant (sous le choc) en même temps.



Figure 22: Photo d'une presse vibrante de type A650

III-6 MISE EN ŒUVRE DE LA VIBRATION DU BETON

III-6-1 *Vibration interne*

III-6-1-1 Règles usuelles générales

- Immerger **rapidement** le vibreur au cœur de la masse du béton.
- Remonter lentement et régulièrement le vibreur (le trou dans le béton frais doit se refermer lors du retrait du vibreur).
- Remonter d'autant plus lentement le vibreur que le béton est plus ferme.
- Ne jamais mettre en contact direct le vibreur ni avec les armatures (risques de ségrégation), ni avec le coffrage (risques de ségrégation, bullages, traces...).
- Arrêter le vibreur dès son retrait du béton pour ne pas le faire travailler à vide (risques de détérioration des parties mécaniques paliers et d'échauffement pour les vibreurs internes électriques).
- Ne jamais utiliser le vibreur pour déplacer le béton (risques de ségrégation).

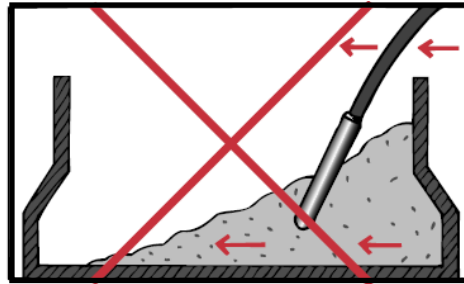


Figure 23: Mise en œuvre à éviter pour une vibration interne

- Le choix du vibreur est fonction de sa puissance (selon nature du béton) et de son diamètre (selon dimensions des ouvrages et densité des armatures).
- Dans le cas d'armatures très rapprochées, prévoir des puits de vibration permettant le passage du vibreur, ou utiliser la vibration externe.
- Pour éviter d'abîmer les coffrages, les vibreurs internes seront équipés d'un embout (ou chape de fermeture) avec revêtement caoutchouc.
- Arrêter la vibration dès que :
 - le béton ne se tasse plus ;
 - le dégagement des bulles d'air cesse (un excès de vibration peut conduire à un recyclage de l'air, d'où un nouveau bullage et éventuellement une ségrégation) ;
 - la laitance commence à apparaître en surface, celle-ci devient brillante ;
 - le bruit émis par le vibreur se stabilise.
- Pour le choix du diamètre de l'aiguille vibrante on utilisera une règle simple :

$$\text{Diamètre d'action (en cm)} = \text{Diamètre du vibreur (en mm)}$$

Exemple. : Ø vibreur = 50 mm

⇒ Ø d'action = ~ 50 cm

III-6-1-2 Vibration d'éléments verticaux

III-6-1-2-1 *Façade ou refend*

L'espacement entre deux points de vibration (e) est déterminé par une règle pratique simple :

$$e \sim 1,7 \times \text{rayon d'action du vibreur}$$

Par exemple pour un vibreur de $\varnothing 50$ mm (rayon d'action 25 cm), l'espacement des points de vibration sera de $25 \times 1,7 = 42,5$ cm arrondi à 50 cm pour les vibreurs puissants.

Le chiffre **1,7** est un coefficient obtenu par la pratique avec un vibreur de bonnes performances et un béton classique.

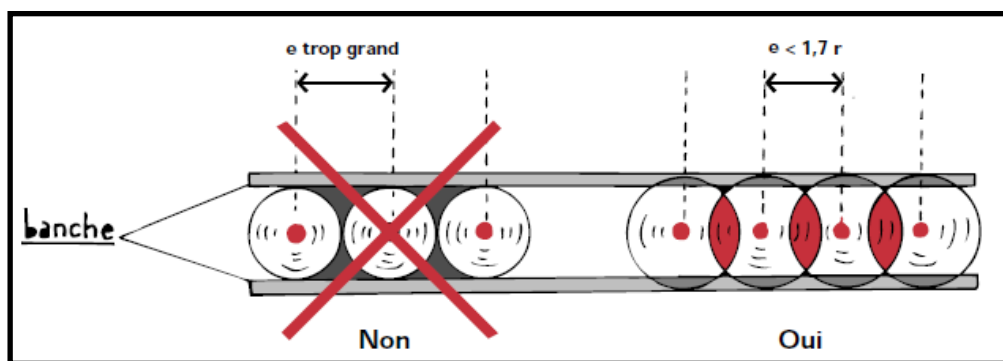


Figure 24: Espacement entre deux points de vibration

- La vibration se fait par couche de 50 à 60 cm de hauteur de béton.
- La pénétration du vibreur dans la couche précédemment coulée doit être d'environ 10 à 15cm.

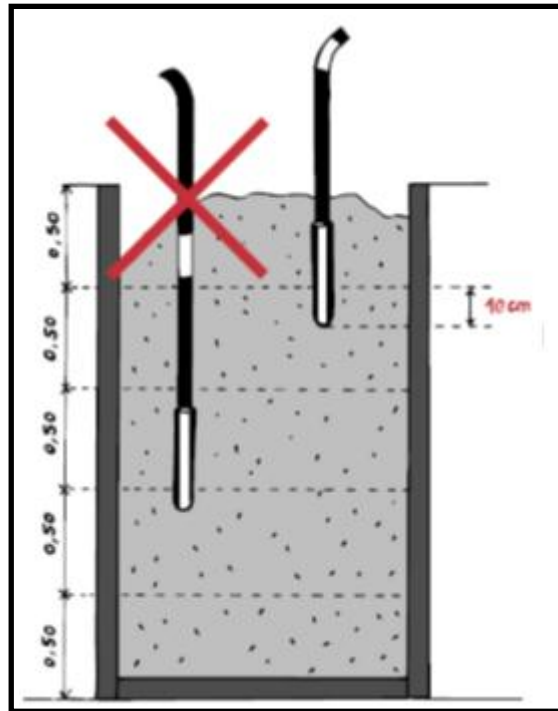


Figure 25: Pénétration du vibreur

- Il doit y avoir recouvrement entre les zones d'action du béton vibré de façon à ne laisser aucun espace non vibré.

III-6-1-2-2 Béton banché

a) Fenêtre en ouverture centrale

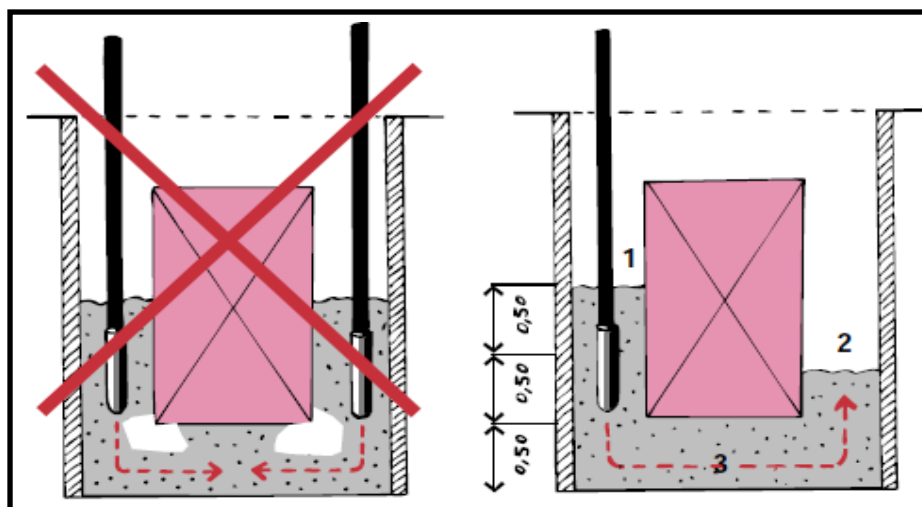


Figure 26: fenêtre en ouverture centrale

Dans le cas de réservation telle qu'une ouverture de fenêtre par exemple, on vibrera par couche de 50 cm d'un seul côté (1) jusqu'à l'apparition du béton de l'autre côté (2), s'assurant ainsi que la partie inférieure (3) est bien remplie.

Si le béton est coulé des 2 côtés, il y a risque en partie inférieure (3) de création de poche d'air.

b) Réservation pour porte ou ouverture pleine

Vibration d'un voile comportant une porte en réservation. Dans le cas de réservation d'une porte, le béton n'a pas à remplir de cavité en partie basse ; on coulera et on vibrera comme indiqué précédemment mais régulièrement de chaque côté.

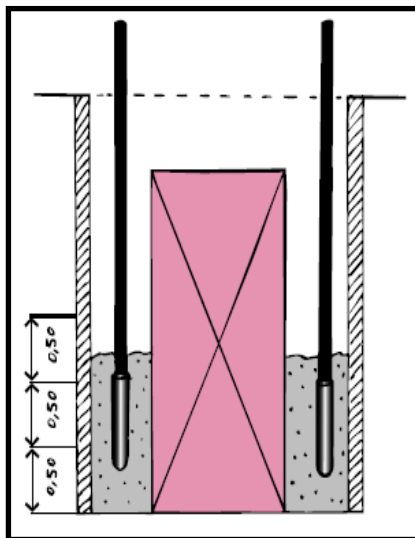


Figure 27 : Réservation pour porte

c) Poteaux et piles

On peut appliquer les critères précédents entre autres pour les épaisseurs de couche et la reprise de bétonnage sur une épaisseur de 0,10 à 0,15 cm de la couche inférieure.

Lorsque le ferrailage est très serré, prévoir un puits pour le passage du vibreur de puissance convenable, ou envisager la vibration externe.

III-6-1-3 Vibration d'éléments horizontaux : planchers, dalles, radiers

Conseils d'utilisation :

- L'épaisseur de l'élément à vibrer peut être inférieure ou sensiblement égale à la longueur du corps vibrant du vibreur interne. La solution consiste à plonger celui-ci **en position inclinée** sans pour autant dépasser une inclinaison de l'ordre de 45° .

Dans le cas d'éléments de faible épaisseur, utiliser des vibreurs à corps vibrant court qui à puissance identique présentent un diamètre plus fort que celui des vibreurs courants.

- Le ou les vibreurs doivent passer aisément entre les mailles.

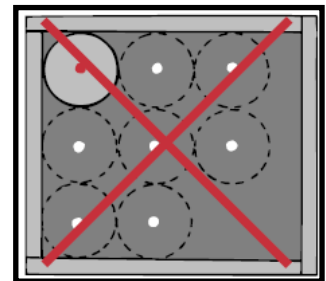


Figure 28 : vibration incorrecte

- Les intervalles entre points d'immersion du ou des vibreurs se calculent comme dans le cas de la vibration des éléments verticaux.

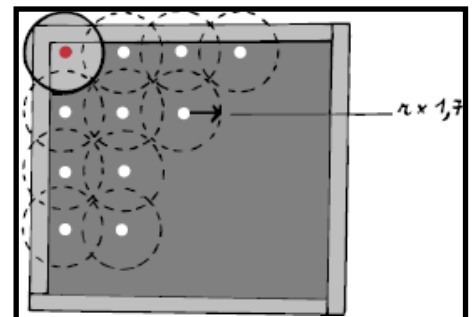


Figure 29: bon intervalle de vibration

- Les zones d'action du vibreur doivent s'entrecroiser.
- La pratique qui consiste à traîner l'aiguille à l'horizontale est à proscrire (elle est génératrice de ressuage et de microfissuration).

Sur le chantier, comme en préfabrication, béton mal vibré = performances insuffisantes

III-6-2 *Vibration externe*

III-6-2-1 **Règles usuelles générales**

Il s'agit essentiellement de règles de bon sens :

- La vibration externe est principalement utilisée en préfabrication en usines, en installation foraine, ou avec les grandes banches de chantier.
- Dans des cas bien précis, la vibration externe peut-être utilement conseillée pour des travaux courants sur chantiers habituellement équipés de vibrateurs internes, en particulier lorsque l'ouvrage comporte des armatures très serrées ou des bétons très secs, ou encore lorsque l'automatisation sur le chantier est développée.

Conseils d'utilisation :

- Placer l'axe du vibreur perpendiculaire au raidisseur supportant le système de fixation (berceau, plaque d'embase, etc.).
- Orienter le sens de rotation du vibreur vers le coffrage
- Harmoniser les vibrations de l'ensemble des vibrateurs (vitesse de rotation, fréquence, force centrifuge).

En vibration externe, le serrage du béton est plus homogène qu'en vibration interne. Durée de vibration et pénibilité sont réduites.

III-6-3 *Vibration de surface*

III-6-3-1 **Règles vibrantes**

Ce matériel sert essentiellement à "dresser" la surface de l'ouvrage ; les règles vibrantes sont bien adaptées aux travaux de dallage ou de voirie.

Elles ont une action de serrage du béton réduite à quelques centimètres d'épaisseur et, dans la plupart des cas, nécessitent une prévibration du béton à l'aide de vibrateurs internes.

Conseils d'utilisation :

- Placer les guides de niveau.
- Tirer la règle régulièrement et, si le béton s'amasse devant, le retirer ou l'épandre.

III-6-3-2 **Compacteurs vibrants**

Utilisation très peu courante en bâtiment si ce n'est pour le serrage du béton de certains dallages, sols industriels, ou pour la stabilisation des remblais avant la pose du plancher ou du dallage (pavillon individuel, sous-sol d'immeuble).

Se conformer aux prescriptions du constructeur.

PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE: FABRICATION DES PAVES EN BETON

Chapitre IV: **MODIFICATIONS APPORTEES A LA PRESSE PVR 2012****IV-1 Présentation de la PVR 2012**

C'est une presse vibrante conçue pour le compactage d'éprouvettes de béton, de latérite stabilisée etc.

On a déjà fait une expérience préliminaire avec cette presse sur des éprouvettes de latérite stabilisée. Mais dans cet ouvrage, elle va nous servir à compacter des pavés en béton.

Des modifications ont été nécessaires pour l'utilisation de la presse pour la confection des pavés.

IV-1-1 Dessin d'ensemble de la PVR 2012

La photo suivante montre le dessin d'ensemble de la PVR 2012.

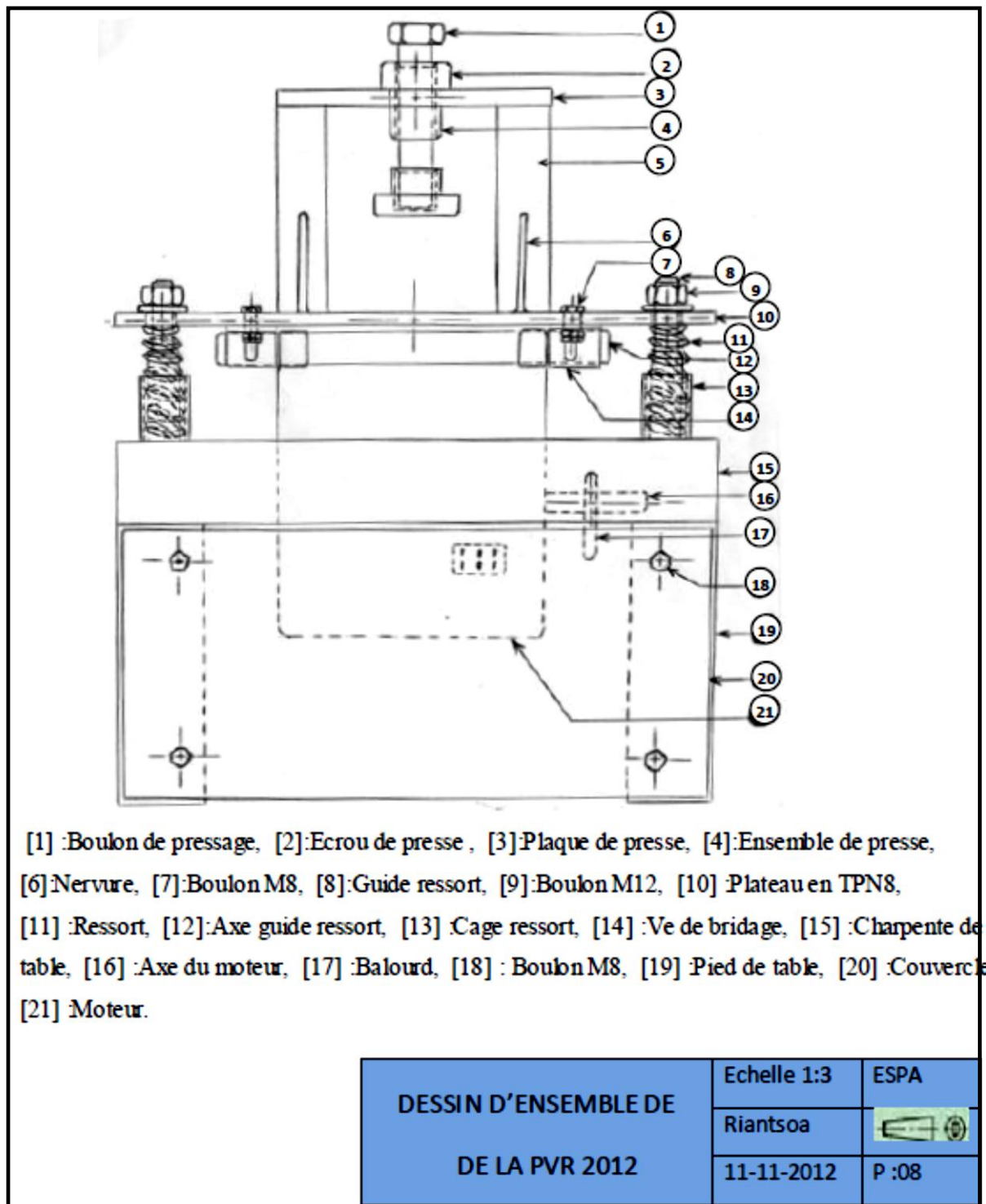


Figure 30 : Dessin d'ensemble de la PVR 2012

IV-1-2 *Spécifications de la presse PVR 2012*

C'est une presse vibrante conçue pour le compactage d'éprouvettes de béton, de latérite stabilisée dont les spécifications sont les suivantes :

➤ Nom : **PVR 2012**

Avec : **PVR** : Presse Vibrante Riantsoa / **2012** : année de conception

- Application : compactage d'éprouvettes de béton, de latérite stabilisée....à l'échelle laboratoire ;
- Dimension appareil : 352mm x 285mm x 525mm (L x l x h)
- Dimension plateau : 352mm x 285mm (L x l)
- Poids : 25kg
- Consommation : 1,5 Cheval (1.472W) ; Alimentation : 220V/50 Hz ;
- Fréquence : 3.000 mouvements/ min ;
- Amplitude de vibration variable



Photo 1: Presse vibrante PVR 2012 version améliorée

IV-1-3 *Fonctionnement :*

La mise en marche de l'appareil est très facile, elle se fait en trois mouvements **T.E.L.**:

1. Mettre l'appareil sous **Tension** : brancher la prise à une alimentation de 220V/50Hz ;
2. **Enclencher** l'interrupteur **E** : presser sur le bouton **E** ;
3. **Lancer** le moteur en appuyant (environ 2s) sur le bouton poussoir **L**.

Appuyer sur l'interrupteur pour arrêter le moteur.

IV-2 Quelques modifications apportée à la presse PVR 2012

IV-2-1 *Levier pour abattage*

Pour avoir un plus grand taux de compactage, on a changé le levier d'abattage de sorte à avoir un plus fort appui.

Voici les photos de l'ancien et du nouveau levier pour abattage.

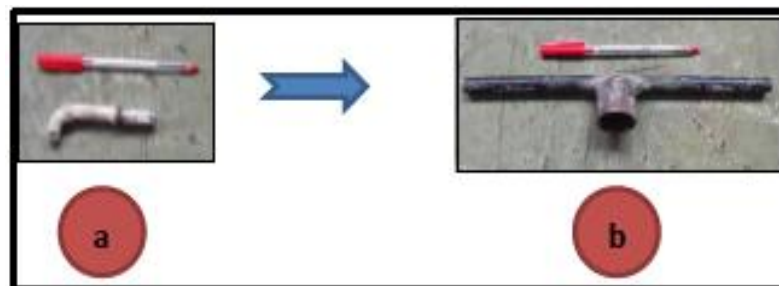


Photo 2 : Ancien (a) et nouveau (b) levier d'abattage

IV-2-2 Moule de la presse

De même, on utilise un moule de dimension « 90 mm x 180 mm x 100 mm » pour la confection de nos pavés.

Voici les photos de l'ancien et du nouveau moule.

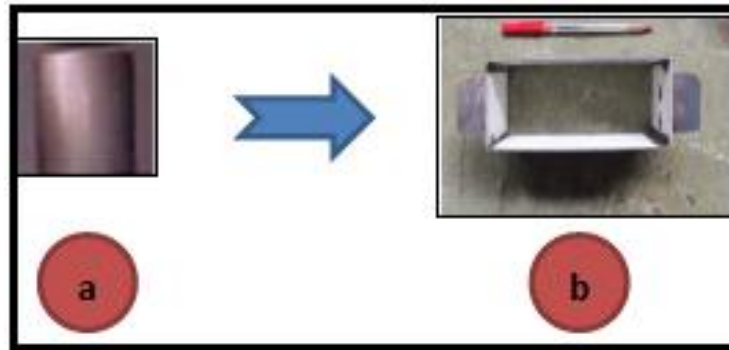


Photo 3 : Ancien (a) et nouveau (b) moule

IV-2-3 Le couvercle et le contre-moule

IV-2-3-1 Couvercle

Le couvercle est l'effecteur venant appliquer l'effort de compactage sur la surface supérieure du pavé. De plus, il assure le démoulage du produit compacté en le poussant vers le bas jusqu'à sa sortie par la partie inférieure du moule.

Afin de pouvoir réduire au minimum les effets du frottement de contact vis-couvercle ; le vis sans fin presse le couvercle, en son centre, dans un trou non taraudé et de diamètre plus grand que celui du vis. Et même, on a huilé ce trou pour le rendre plus glissant.

Voici la photo du couvercle :



Photo 4 : Couvercle du moule

IV-2-3-2 Contre-moule

C'est la plaque qui se met au fond du moule pour empêcher le contact direct du produit avec la table, et sert aussi à éviter la chute du pavé lors de son transport jusqu' à l'endroit de démoulage comme nous le montre la photo suivante.

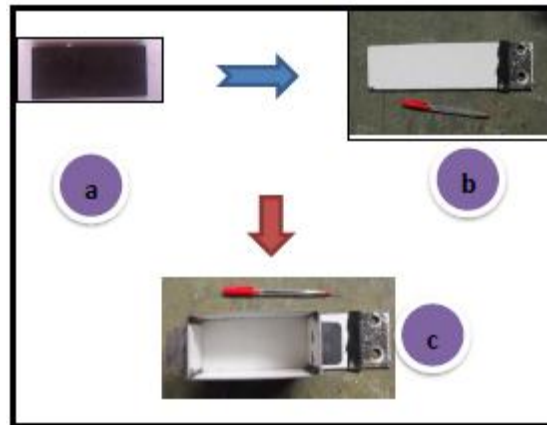


Photo 5 : L'ancien (a), le nouveau contre-moule (b); et le moule (c)

Voici les photos de la PVR avant et après modification :

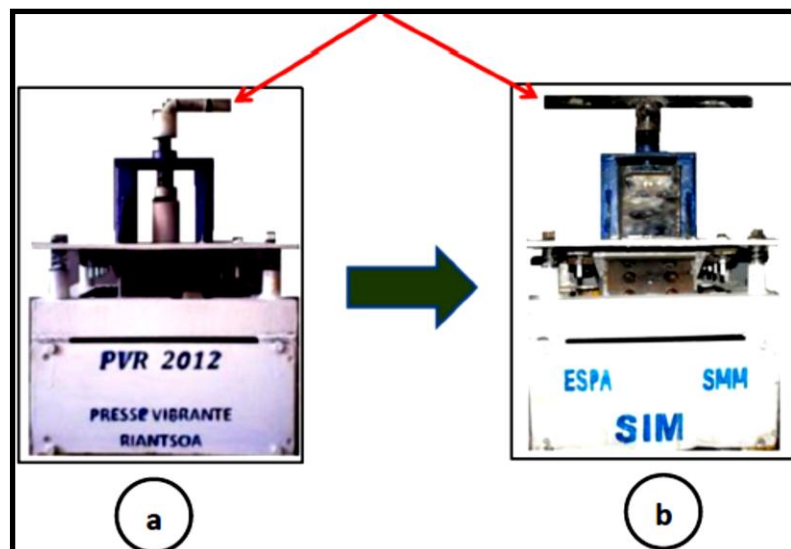


Figure 31 : PVR avant (a) et après (b) modification

Chapitre V: **METHODE DE CARACTERISATION DES COMPOSANTS DU BETON [16]**

Avant d'utiliser les matériaux composants le béton, il faudrait connaître leurs caractéristiques, surtout les caractéristiques physiques, pour adapter une bonne formulation. Les méthodes de détermination de ces principales caractéristiques sont décrites ci-après :

V-1 Étude granulométrique :

V-1-1 Analyse granulométrique :

Pour des nombreux travaux de construction et pour l'exécution de nombreux essais, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques des matériaux utilisés. Ces caractéristiques sont les dimensions, la forme, la masse volumique, la porosité et la teneur en impuretés de l'échantillon qui a été prélevé.

L'analyse granulométrique est la première de ces recherches : elle caractérise les granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent, et les pourcentages des grains de chaque grosseur.

Il faut éviter la confusion fréquente entre :

- **la granulométrie** : qui est une science pour la détermination des dimensions des grains ; et
- **la granularité** : qui détermine la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

V-1-1-1 Préparation de l'échantillon à analyser :

Les essais que l'on fait au laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de granulats appelées « échantillon ». Mais il faut que les résultats obtenus représentent réellement les caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement, c'est-à-dire qu'il faut que l'échantillon soit représentatif.

Il faut sécher partiellement un échantillon trop mouillé. Mais une température trop excessive pourrait modifier la nature physique ou chimique du granulat étudié. Le mieux c'est de le sécher à l'air, mais c'est trop long ! Et si l'on fait chauffer l'échantillon, il est nécessaire

de maintenir la température à 60 °C si le corps contient de l'argile ou à 103 °C pour un corps non argileux.

V-1-1-2 **Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique :**

Ce sont les *tamis* dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée de trous carrés.

Les *passoires*, dans lesquels une tôle perforée de trous circulaires ne sont plus admises depuis 1973. Mais dans la pratique, ces passoires existeront encore pendant des nombreuses années, il est donc nécessaire de connaître leurs caractéristiques essentielles.



Figure 32: Tamis à mailles carrées

V-1-1-3 **Dimensions nominales des tamis :**

C'est la longueur D_t du côté du carré formé par les trous. Les valeurs normalisées de ces dimensions forment une série géométrique de termes de raison $\sqrt[10]{10} \approx 1,259$.

Chaque terme est donc égal au précédent multiplié par $\sqrt[10]{10}$: c'est la série R 10 des « nombres normaux » ou Nombres de Renard.

La plus petite valeur est 80 μm ; au-dessous, les dimensions correspondent aux fillers auxquels l'analyse granulométrique ne s'applique pas.

Ces dimensions nominales sont résumées dans le tableau suivant (en millimètres) :

Tableau 19: Dimensions nominales des tamis (en mm)

0,080	0,100	0,125	0,160	0,200	0,250	0,315	0,40	0,50	0,63
0,80	1,00	1,25	1,60	2,00	2,50	3,15	4,00	5,00	6,3
8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63
80									

Remarque :

- les nombres de 10 en 10 sont composés de mêmes chiffres car $(\sqrt[10]{10})^{10} = 10$;
- les nombres doublent de 3 en 3, car $(\sqrt[10]{10})^3 \approx 2$.

*** Cas des passoires :**

Les passoires sont caractérisées par les diamètres de leurs trous. Le diamètre D_p d'une passoire est relié à celui D_t d'un tamis par la relation :

$$D_p = (\sqrt[10]{10}) \cdot D_t.$$

Les dimensions nominales sont les mêmes que celles de la liste précédente mais allant de 0,5 mm à 100 mm pour la passoire.

Ainsi, les tamis et les passoires se correspondent, mais avec un décalage d'un rang.

Exemple : le tamis de 5 mm correspond à la passoire de 6,3mm.

*** Les modules :**

Dans la norme AFNOR, on utilise des numéros d'ordres appelés « modules ». Par définition, le module est égal :

$$\text{Mod} (d [\text{mm}]) = 31 + 10 \log d$$

Nous allons résumer dans le tableau suivant les relations entre les modules, les diamètres (en mm) des passoires et des tamis.

Tableau 20 : Relations entre modules et diamètres des tamis et passoires [17]

Classe granulaire	Module	Tamis	Passoires
Sables fins	20	0,08	0,1
	21	0,1	0,125
	22	0,125	0,16
	23	0,16	0,2
	24	0,2	0,25
Sables moyens	25	0,25	0,315
	26	0,315	0,4
	27	0,4	0,5
	28	0,5	0,63
	29	0,63	0,8
	30	0,8	1
Sables gros	31	1	1,25
	32	1,25	1,6
	33	1,6	2
	34	2	2,5
	35	2,5	3,15
	36	3,15	4
	37	4	5
Graviers	38	5	6,3
	39	6,3	8
	40	8	10
	41	10	12,5
	42	12,5	16
Cailloux	43	16	20
	44	20	25
	45	25	31,5
	46	31,5	40
	47	40	50
	48	50	63
	49	63	80
	50	80	100
	51	100	126
Moellon	52	126	160

Les chiffres en *rouges* et en *italiques* indiquent soient des tamis virtuels (les tamis n'existent que jusqu'à 5 mm), soient des passoires virtuelles (les passoires n'existent qu'à partir de 0,5 mm inclus).

V-1-1-4 Processus de l'analyse granulométrique :

Dans la pratique, les quantités de l'échantillon à utiliser pour chaque type de granulats sont :

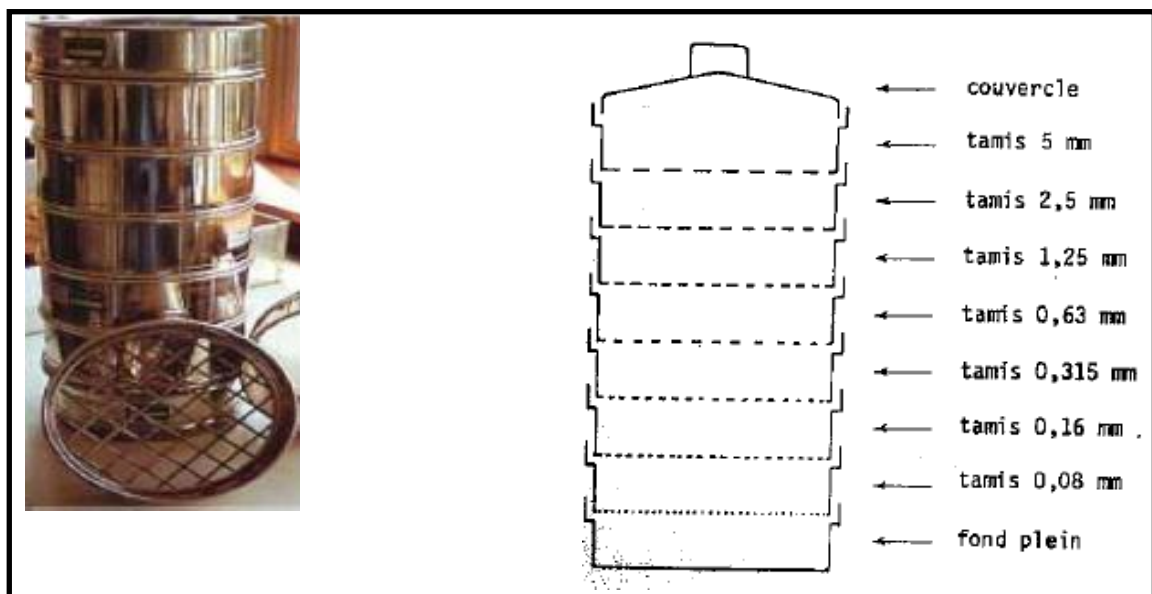
- 2 000 g pour le sable
- 10 000 g pour le gravillon
- 20 000g pour le caillou

Le but de l'analyse est de déterminer, pour chaque tamis, le pourcentage P de « tamisât » (ce qui passe au travers du tamis). Pour cela, il suffit de peser le « refus » (ce qui reste sur le tamis) sur chacun d'eux.

Les différentes étapes du processus sont les suivantes :

1° - on utilisera une série de tamis emboîtés les uns sur les autres et de dimensions croissantes du bas vers le haut. Le dernier récipient en dessous est à fond plein pour recueillir les éléments fins. Au-dessus on met un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.

Voici un exemple de disposition pour une série de tamis utilisée dans l'analyse granulométrique :



a - Vue d'ensemble

b - Coupe schématique

Figure 33: Série de tamis

2° - on verse le granulat sur le tamis supérieur, et on met le couvercle. On fait fonctionner l'agitateur, ou bien, on imprime une série de secousses sur l'ensemble si on n'a pas d'agitateur. Le but est de répartir ce granulat sur les différents tamis.

3° - on complétera la répartition en agitant le tamis supérieur seul, avec son contenu au-dessus d'un plateau propre.

4° - le refus sera pesé, et le tamisât versé sur le tamis suivant avec ceux qui s'y trouve déjà.

5° - on opère de la même façon pour le 2ème tamis, le nouveau refus est placé sur la balance, avec le premier, puis, le nouveau tamisât est versé sur le 3ème tamis.

On pèse donc *les refus cumulés* (c'est le principe des refus cumulés)

6° - on fait de même jusqu'au dernier tamis.

7° - après le calcul, voici un exemple de présentation:

Tableau 21: Exemple de calcul des pourcentages de « tamisât »

Tamis (en mm)	Refus cumulés		Tamisat T (en %)
	Poids (en grammes)	Pourcentage (%)	
5	41	2	98
2,5	203	10	90
1,25	697	35	65
0,63	1402	70	30
0,315	1798	90	10
0,16	1957	98	2
0,080	1982	99	1
Fines	1999	100	0

Source [11]

V-1-2 Courbe granulométrique :

La courbe granulométrique d'un granulat s'obtient expérimentalement à partir d'un échantillon aussi *représentatif* que possible de l'ensemble de matériau, en pesant successivement les portions séparées à l'aide de tamis ou de passoires.

Pour cela, on porte :

- *en ordonnées* : le pourcentage cumulé des tamisâts, de 0 à 100 %;
- *en abscisses* : les diamètres des tamis ou des passoires (en mm).

Les graduations des abscisses varient suivant les méthodes de formulations utilisées (exemple : pour la formulation de Bolomey, les graduations sont proportionnelles à D ; mais pour celle de Faury, elles sont proportionnelles à $5 D$).

L'AFNOR indique de graduer l'axe des ordonnées linéairement et celui des abscisses à l'aide d'une échelle logarithmique, ce qui se justifie pour les raisons suivantes :

1° - les dimensions des tamis ou des passoires forment une suite de nombres en progression géométrique. Ainsi les points figuratifs des tamis ou des passoires se trouvent uniformément répartis sur l'axe des abscisses, ce qui facilite la graduation de l'axe.

2° - l'emploi de l'échelle logarithmique a pour effet d'élargir les écarts entre les points représentatifs des petits tamis ou passoires auxquelles correspondent les grains fins dont l'influence sur la qualité du béton est la plus grande.

3° - ce mode de graduation consiste à graduer linéairement l'axe des abscisses en fonction des modules des tamis.

Pratiquement, on porte sur l'axe des ordonnées les pourcentages des volumes absolus des grains passant à travers les tamis ou les passoires. Pour cela, on utilise directement les résultats de l'analyse car on peut confondre, pour un granulat provenant d'une même roche, les % en poids donnés directement par l'analyse avec les % en volume absolu.

A titre d'exemple, nous donnons dans la *figure 13* la courbe granulométrique d'un granulat, après une analyse granulométrique dont le résultat est présenté dans le tableau suivant.

Tableau 22: Résultat d'une analyse granulométrique

PASSANT CUMULES EN [%]	d [mm]	Mod
100	8	40
99	4	37
90	2	34
80	1	31
62	0,5	28
37	0,25	25
15	0,125	22
2	0,063	19

Source [7]

Pour cet exemple de résultat d'analyse granulométrique dans le tableau ci-dessus, voici sa courbe granulométrique.

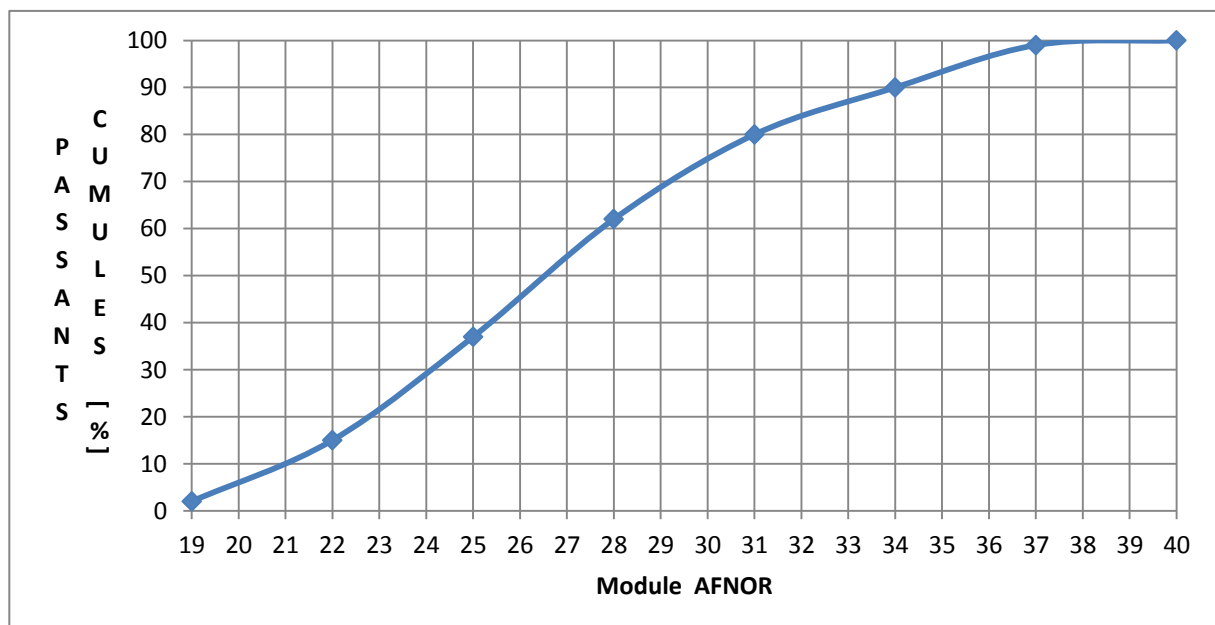


Figure 34 : Exemple d'une courbe granulométrique



V-1-3 *Module de finesse*

C'est une grandeur qui permet d'évaluer la finesse d'un corps sous forme de poudre ou de granulat.

Le module de finesse M_f est égale à la somme des refus sur les tamis de la série normalisé (en module) divisé par 100 et exprimé en [%].

Tableau 23 : Les modules AFNOR correspondant aux tamis de la série normalisé

Module AFNOR	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
Tamis [mm]	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	20	40	80

Source [16]

Le module de finesse est une grandeur très importante en particulier pour les sables. Les sables qui se prêtent le mieux à la fabrication d'un bon béton doivent avoir un module de finesse compris entre 2,2 et 2,8.

Au-dessous de ces valeurs, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins tandis qu'au-dessus, les éléments grossiers dominent.

Lorsque le module de finesse n'appartient pas à l'intervalle 2,2 et 2,8, il convient de « corriger » le sable par un autre sable.

V-2 Propriétés physiques des granulats :

V-2-1 La masse volumique absolue γ (ou poids spécifique) du granulat :

C'est la masse de l'unité de volume absolu du corps, c'est-à-dire de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte du volume du vide.

Le principe repose sur la détermination du volume absolu occupé par une certaine masse de granulat en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction du granulat. On utilise l'eau comme liquide de mesure car elle ne réagit pas avec le granulat. On utilise la différence de pesées par la méthode de l'éprouvette graduée.

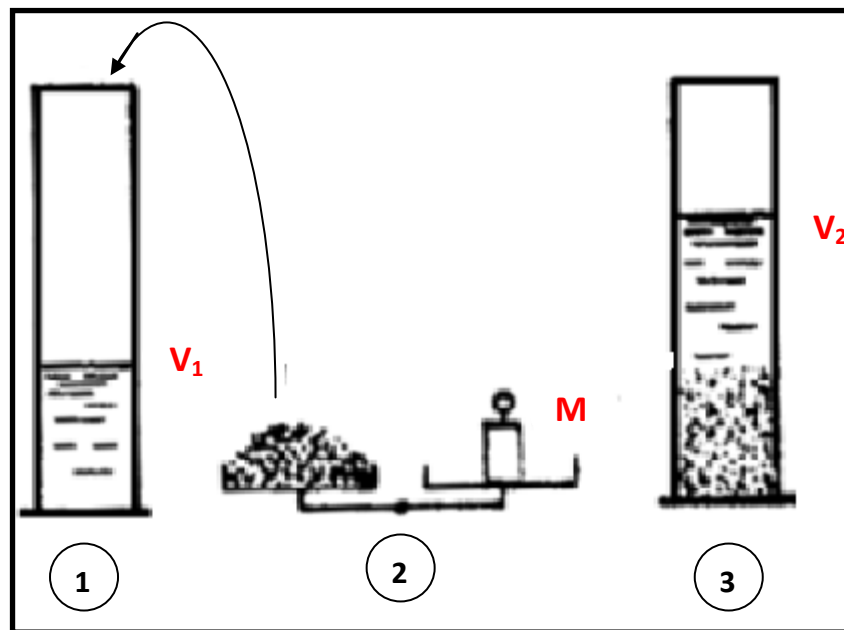


Figure 35: Méthode de l'éprouvette graduée

Principe :

C'est la méthode la plus simple, le principe est le suivant :

- Mettre dans l'éprouvette graduée un volume V_1 d'eau;
- Peser une masse M du granulat (de l'ordre de 300 g), et l'introduire dans l'éprouvette. Bien éliminer les bulles d'air ;
- Lire le nouveau volume V_2 ;
- Le volume absolu est $V = V_2 - V_1$ et la masse volumique est :

$$\gamma = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

En général γ varie de 2500 kg.m⁻³ à 2600 kg. m⁻³

V-2-2 Masse volumique apparente ρ du granulat :

C'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris le vide entre les grains de constituants (volume apparent).

La méthode de détermination la plus simple est celle des deux mains formant un entonnoir. Mais la plus grande difficulté est la très grande influence du tassement, donc du mode de remplissage de la mesure.

Les conditions de tassement doivent pouvoir :

- être réalisées avec un matériel aussi simple que possible ;
- procurer des résultats très voisins à des expérimentateurs différents. Il est donc recommandé de faire plusieurs essais et de prendre la moyenne des résultats.

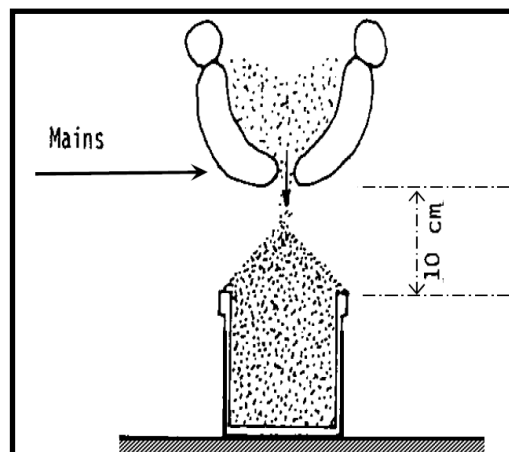


Figure 36: Méthode des deux mains

Principe :

- 1° - Prendre le sable (par exemple) dans les deux mains formant un entonnoir (Fig.36).
- 2° - Placer ces deux mains à 10 cm environ au-dessus d'une mesure d'un litre, et laisser tomber ce sable, ni trop vite, ni trop lentement.

3° - Verser ainsi le corps, toujours au centre de la mesure, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.

4° - Araser à la règle.

5° - Peser le contenu.

La masse volumique apparente est :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

m : masse de l'échantillon ;

V: volume total y compris le vide

En général, la masse volumique apparente ρ est comprise entre 1400 kg.m^{-3} et 1600 kg.m^{-3} . Les modes de mesure des masses volumiques (absolues et apparentes) sont indiquées par les normes NF P 18 554 et NF P 18 555.

V-2-3 Teneur en eau ω des granulats :

Par définition, la teneur en eau d'un granulat, notée ω (%), est égale au pourcentage (en masse) d'eau par rapport au matériau.

Sécher complètement le granulat en utilisant la méthode dite « de la poêle à frire » :

- on pèse l'échantillon humide ; soit M_h sa masse ;
- puis on l'arrose d'alcool à brûler (1/2 litre pour 2 kg de sable par exemple), et on le brûle ;
- on pèse l'échantillon sec ; soit M_s sa masse.

La teneur en eau est donc :

$$\omega (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

V-2-4 Porosités *P* et impuretés :

L'AFNOR prévoit l'établissement d'une distinction entre trois types de granulats :

- **le type de mélange (A)** utilisé pour un béton de résistances mécaniques relativement élevées par rapport aux autres caractéristiques (exemple : béton armé employé pour la construction des ossatures résistantes des ouvrages) ;
- **le type de mélange (B)** utilisé pour un béton dont la perméabilité doit être aussi faible que possible (exemples : bétons des réservoirs, bétons devant résister à l'agression de certains eaux).
- **Le type de mélange (C)** correspondant à un béton pour lequel les valeurs de ses résistances et de son imperméabilité sont relativement faibles (exemples : béton de remplissage, gros béton de massif de fondations soumis à des faibles fatigues)

Porosités :

On appelle « porosité » **P** (%) d'un granulat le volume total des vides V_{vide} contenus dans l'unité de volume $V_{matière}$ de matière :

$$P(\%) = \frac{V_{vide}}{V_{matière}} \cdot 100$$

Les limites extrêmes de porosité admissible dépendent de la destination du béton.

L'AFNOR fixe les maxima suivants :

- 5 % pour les granulats du type (A), qui doivent être maintenus à l'abri de l'eau ;
- 3 % pour les granulats du type (B), qui doivent être en contact avec l'eau.
- 10 % pour les granulats du type (C).

Impuretés :

Les granulats ne doivent pas contenir d'impuretés nuisibles aux propriétés essentielles du béton ou susceptibles d'altérer les armatures. Les impuretés dont l'inclusion dans le matériau est refusée sont :

- les impuretés *interdites* : les résidus du charbon (mâchefer, coke, cendre,...), les scories, l'argile en morceau.

- Les impuretés *tolérées* : les éléments très fins ou solubles, les matières organiques, les sulfates (exemple : le gypse) et les sulfures (exemple : les pyrites). En effet, les sulfures et les sulfates peuvent donner lieu à la décomposition du ciment si le béton est humide.

La norme de l'AFNOR limite le poids d'anhydride sulfurique (SO_3) aux valeurs suivantes :

- $1,2 \text{ g.dm}^{-3}$ de béton pour les granulats du type (A) et (B) ;
- $1,5 \text{ g.dm}^{-3}$ de béton pour les granulats de type (C).

Cette même norme prescrit que les sulfates et les sulfures doivent être en grains mesurant moins de $0,5 \text{ cm}^{-3}$ et régulièrement répartis dans la masse.

V-2-5 *Équivalent de Sable :*

L'Équivalent de Sable est une *valeur numérique* qui caractérise l'importance de la présence d'éléments fins dans un sable.

Il est nécessaire de déterminer l'Équivalence de Sable pour les raisons suivantes :

- il faut plus d'eau pour mouiller des éléments fins que pour des gros éléments. Or la résistance mécanique d'un béton varie dans le même sens que le rapport C/E des quantités de ciment et d'eau. Donc un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de C/E, et on obtient un *béton de moindre résistance* ;
- l'eau de gâchage mise en plus s'évaporerait au cours du durcissement : on obtient un *béton poreux* (moins résistant). Il y a aussi un retrait plus important : risque de *fissure du béton* ;
- les éléments fins et l'eau formeront une boue qui gênera *l'adhérence* du liant : on obtient un béton de *mauvaise résistance mécanique*.

Le matériel utilisé pour la détermination expérimentale de l'Équivalent de Sable est précisé par la Norme NF P 08 501.

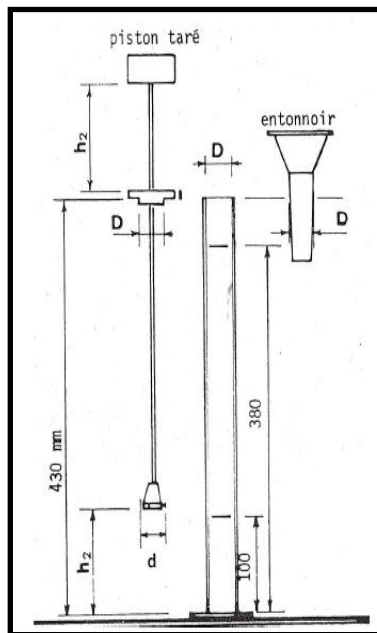


Figure 37: Dimensions du matériel (Norme NF P 08 501)

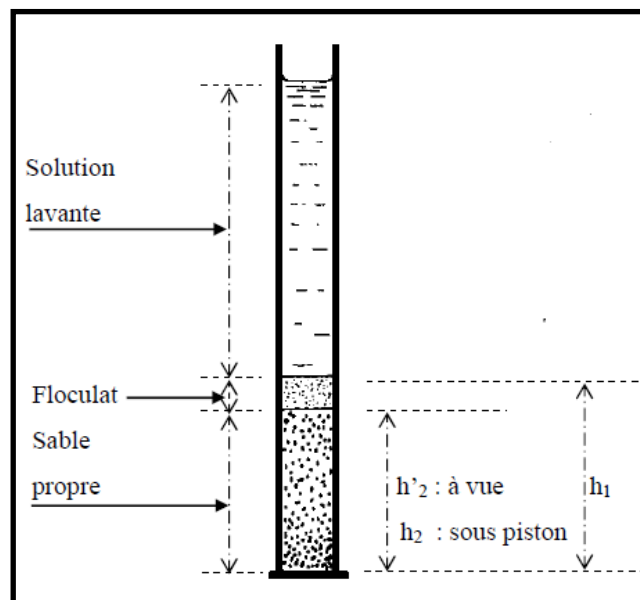


Figure 38: Essai d'Équivalence de Sable

L'essai est fait sur un sable qui traverse un tamis de 5 mm. On mesure :

- la hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- la hauteur h_2 : sable propre seulement.

On distingue : l'Équivalence de Sable Visuel (ESV) mesuré « à vue », et l'Équivalence de Sable proprement dit (ES) mesuré « sous piston ».

$$(ES) = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

et

$$(ESV) = \frac{h'_2}{h_1} \cdot 100$$

Les valeurs numériques pour (ES) et (ESV) :

- pour *une argile pure*, $ES = ESV = 0$.
- pour *un sable parfaitement propre*, on a $h_1 = h'_2$; donc $ESV = 100$; mais ES ne peut pas être égal à 100. Dans la pratique, on ne dépasse pas 94 à 95.
- Si $ES \geq 80$, on a des bons granulats.
- Si $80 > ES \geq 70$, on a des granulats à n'utiliser qu'exceptionnellement, et à condition d'utiliser un ciment Portland.
- Si $ES < 70$, il faut laver les granulats pour éliminer les éléments fins.
- Monsieur DREUX, Directeur du Centre d'Essai des Structures de St-Rémy-les-Chevreuse a obtenu une plage de valeur de ES, en 1963, pour avoir un béton de résistances mécaniques maximales : **$75 \leq ES \leq 85$** .

V-3 Propriétés mécanique des granulats

V-3-1 Essais Deval et Microdeval

Ce sont des essais dont le principe est de reproduire des phénomènes d'usure dans un cylindre en rotation. La dureté Deval ou Microdeval est mesuré en fin d'essai par le pourcentage de passant au tamis de 1,6 mm d'ouverture.

V-3-2 *Essai Los Angeles (LA)*

Le but de cet essai est de déterminer la résistance au choc par fragmentation et à l'usure des granulats. Le coefficient LA est mesuré à partir du passant au tamis de 1,6 mm exprimé en pourcentage en masse.

Une roche ne peut être classée comme granulat que si $LA < 45$ et $MDE < 40$.

Chapitre VI: **FORMULATION DE LA COMPOSITION DES PAVES**

On utilise la méthode de formulation de Dreux-Gorisse pour la composition de nos bétons.

On emploiera les mêmes matériaux et un même dosage C en ciment pour chaque formulation. Les paramètres variables seront :

- La consistance : en variant la quantité d'eau de gâchage,
- Le serrage : en modifiant la valeur du taux de compactage, et
- La vibration : en appliquant ou pas une vibration.

VI-1 Caractéristiques des matières premières

Pour la confection de nos pavés, on a utilisé des gravillons concassés, du sable de rivière, du ciment CEM I et de l'eau.

VI-1-1 Les granulats

VI-1-1-1 Le gravillon

VI-1-1-1-1 *Caractéristiques physiques*

Voici le tableau montrant les caractéristiques physiques du gravillon.

Tableau 24 : Caractéristiques physiques du gravillon

Type	Concassés
Masse volumique spécifique γ_g [kg/m ³]	2 655
Masse volumique apparente ρ_g [kg/m ³]	1 291
Classe réel d/D	6,3/15

VI-1-1-2 Analyse granulométrique

Le tableau suivant représente les résultats de l'analyse granulométrique du gravillon.

Tableau 25 : Résultat de l'analyse granulométrique du gravillon

d [mm]	Module	Passants cumulés [%]
4	37	0
5	38	1
6,3	39	2
8	40	15
10	41	48
12,5	42	82
16	43	100

VI-1-1-3 Courbe granulométrique

A partir des résultats de l'analyse granulométrique du gravillon du tableau 25 ci-dessus, on peut tracer sa courbe granulométrique comme suit.

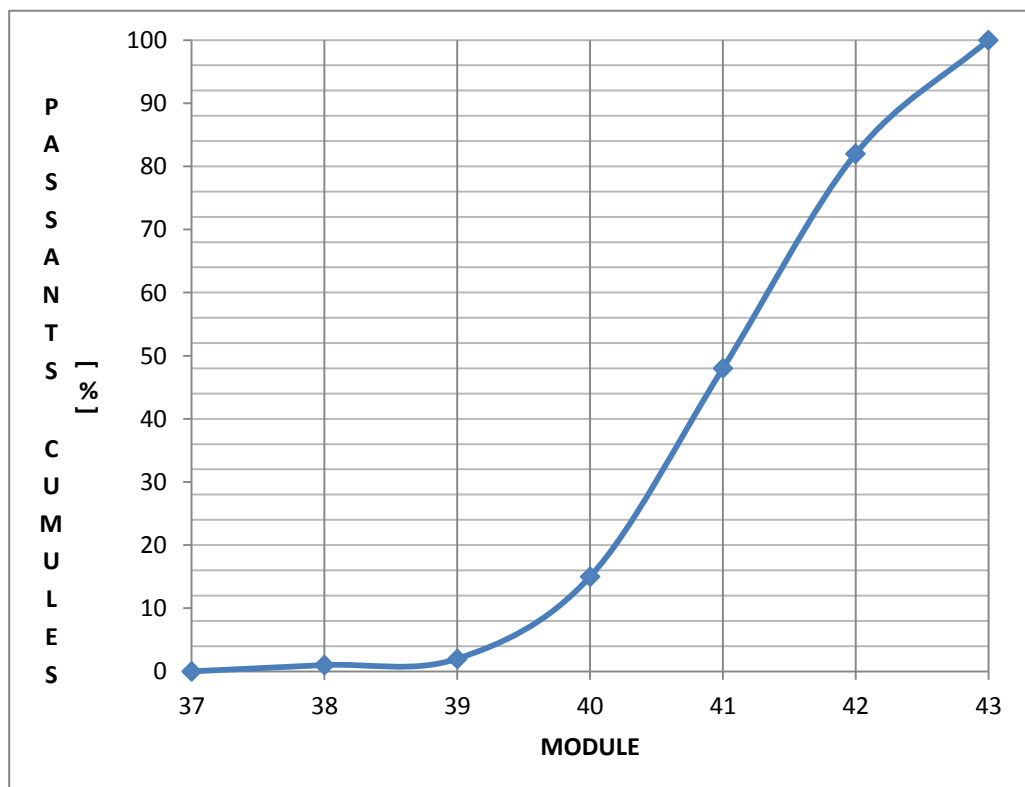


Figure 39 : Courbe granulométrique du gravillon

VI-1-1-2 **Le sable**VI-1-1-2-1 *Caractéristiques physiques*

Voici le tableau montrant les caractéristiques physiques du sable.

Tableau 26 : caractéristiques physiques du sable

Type	Roulé
Masse volumique spécifique γ_s [kg/m ³]	2 430
Masse volumique apparente ρ_s [kg/m ³]	1 390
Classe réel 0/D	0/5

VI-1-1-2-1 *Analyse granulométrique*

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 27 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable

d [mm]	Module	Passants cumulés [%]
0,08	20	1
0,125	22	2
0,2	24	4
0,315	26	8
0,5	28	14
1	31	58
2	34	93
3,15	36	97
4	37	98
5	38	100

VI-1-1-2-2 Courbe granulométrique

Selon son analyse granulométrique, la courbe granulométrique du sable est comme suit :

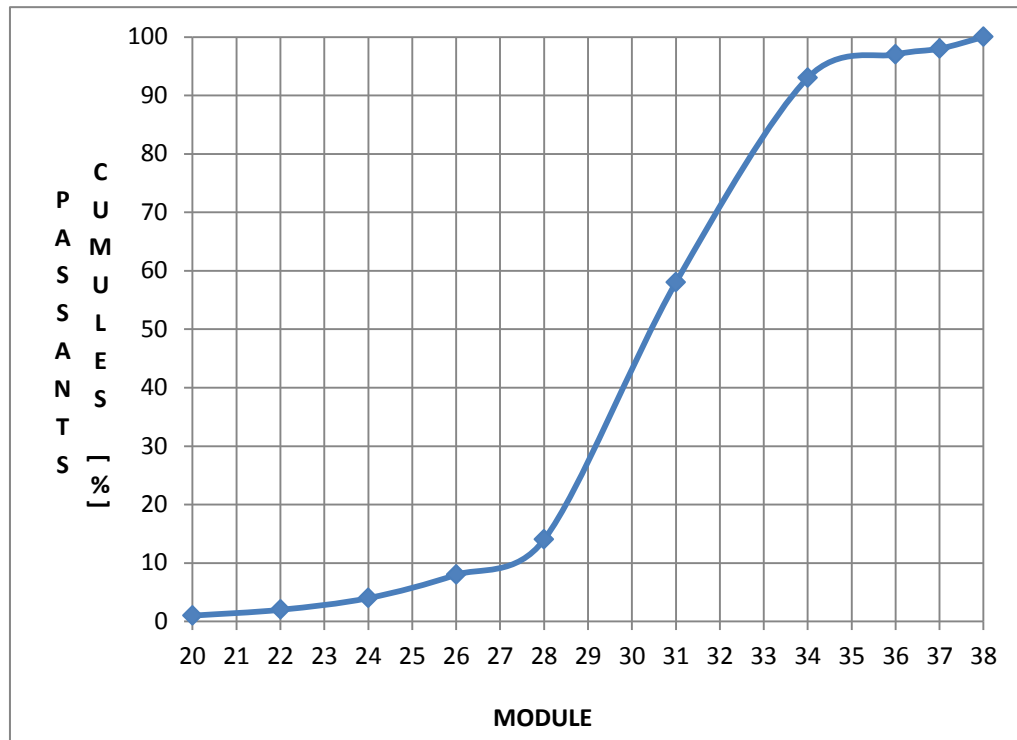


Figure 40 : Analyse granulométrique du sable

VI-1-1-2-3 Module de finesse du sable

Le module de finesse de notre sable est donc :

$$M_f = \frac{96 + 92 + 70 + 30 + 3}{100} = 2,94$$

Le sable utilisé est plutôt grossier et devrait être corrigé.

VI-1-2 *Ciment*

Le tableau suivant présente les caractéristiques physiques du ciment.

Tableau 28 : Caractéristiques physiques du ciment

Type	CEM I Lafarge
Masse volumique spécifique γ_c [kg/m ³]	3 140
Masse volumique apparente ρ_c [kg/m ³]	1 010
Classe vraie du ciment F_{ce} [Mpa]	45,1
Début de prise [mn]	232
Fin de prise [mn]	296

VI-2 Données de base

VI-2-1 *Nature de l'ouvrage*

Notre béton est surtout destiné pour la fabrication de pavés. Le diamètre de nos plus gros granulats est de 12.5mm ; donc nos pavés sont de nature béton de gravillon ou gravier.

VI-2-2 *Résistance souhaitée*

On prendra comme résistance nominale à la compression à 28 jours (ou résistance désirée) **$R_{b28} = 25\text{Mpa}$** .

VI-2-3 *Ouvrabilité désirée*

Elle peut être évaluée par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams et des moyens de serrage.

VI-2-3-1 Affaissement au cône d'Abrams

Pour le calcul, on prendra **$A=0$** qui est classé comme consistance très ferme.

VI-2-3-2 Vibration par la PVR

Dans nos essais, soit on applique une vibration sur le pavé, soit non. Donc nous avons comme valeurs de vibration en pourcentage **0** et **100**.

VI-2-3-3 Compactage

Nous appliquerons sur le béton frais lors du moulage, une force de compactage parmi les trois valeurs suivant : $P = 56,4$ [daN] ou $P = 112,9$ [daN] ou $P = 225,8$ [daN].

L'obtention de ces valeurs est décrite dans l'**annexe 01**.

VI-3 Formulation par calcul

VI-3-1 *Dimension maximale des granulats*

D'après l'analyse granulométrique de notre granulat, on a un diamètre maximal qui est égale à $D_{\max} = 12.5\text{mm}$.

VI-3-2 *Dosage en ciment et en eau*

La résistance visée est R_b :

$$R_b = G \cdot F_{CE} \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Soit

$$\frac{C}{E} = \frac{R_b}{G F_{CE}} + 0,5 \quad \text{or} \quad R_b = 1,15 \quad R_{b28} = 1,15 (25) = 28,75$$

Avec :

$$F_{CE} = 45,1\text{MPa et}$$

$G = 0,45$ pour ce granulat de qualité courante et $D = 12,5$ mm.

$$\text{Ce qui donne } \frac{C}{E} = 1,92$$

D'après l'abaque de DREUX, le dosage en ciment est de : $C = 310$ [kg/m³] pour

$$C/E = 1,92 \text{ et } A = 0.$$

Le dosage en eau est : $E' = 162$ litres ; mais il faut le corriger à +6% car on a $D_{\max} = 12,5\text{mm}$

Ainsi la vraie valeur de E sera : **E = 171 litre**

VI-3-3 *Dosage en granulat*

VI-3-3-1 Dosage en pourcentage des granulats(en volume absolu)

VI-3-3-1-1 *Courbe de référence*

- Point **O(20,0)**
- Point **B(42,100)**
- Point A (X_A ; Y_A)

$D_{\max} < 25\text{mm}$ donc : $X_A = 12,5/2 = 6,25$ ou module $X_A = 39$

$$Y_A = 50 - \sqrt{12,5} + K + K_s$$

On a un gravier concassé, $C = 310 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ et $A=0\text{cm}$, on a alors : $K = 4$.

Et

$$K_s = 6M_f - 15 = 6(2,91) - 15 = 2,46$$

D'où : $Y_A = 50 - \sqrt{12,5} + 4 - 3 = 52,9$

- Point **A (39 ; 53)**

Le tableau suivant présente les coordonnées des point O,A et B.

Tableau 29 : Coordonnées des points O,A et B

POINT	COURBE DE REFERENCE		
	X en [mm]	X en [module]	Y
O	0,08	20	0
A	6,25	39	53
B	12,5	42	100

VI-3-3-1-2 Détermination des proportions des granulats : ligne de partage

D'après les méthodes de Dreux décrit dans la partie bibliographique, on peut tracer la ligne de partage comme la figure la montre.

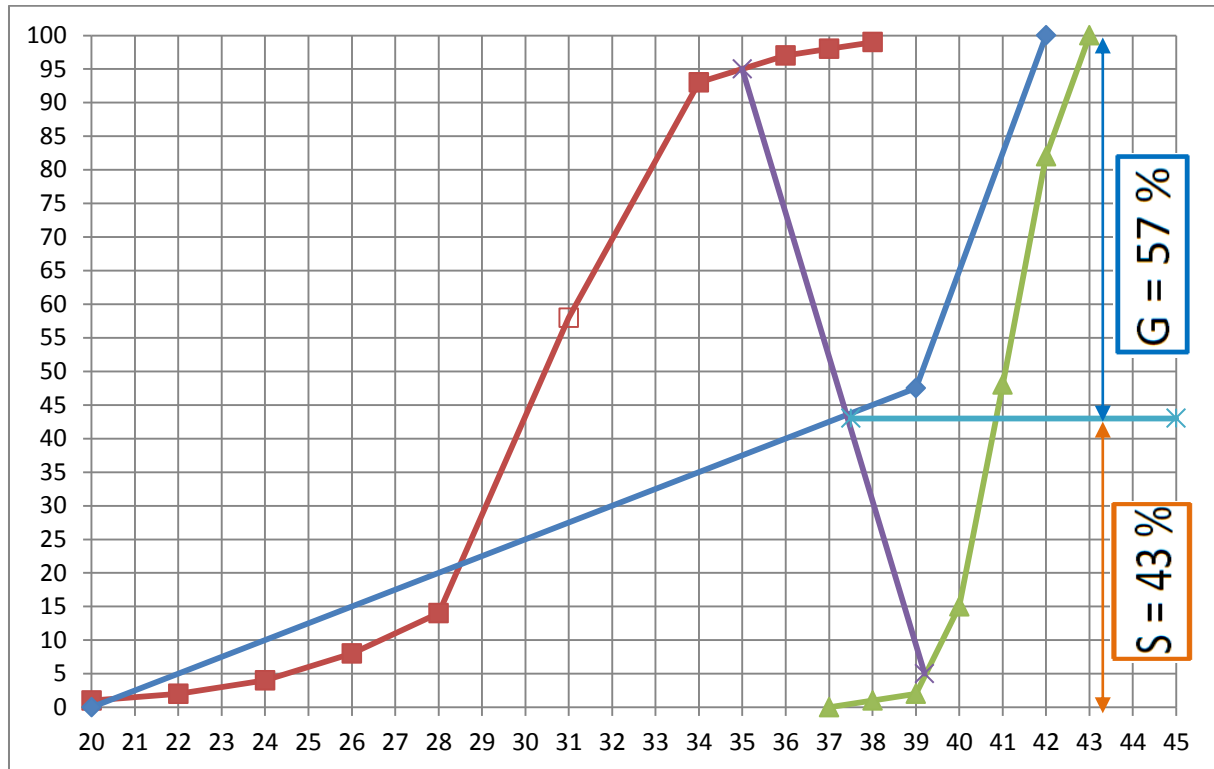


Figure 41 : Détermination de proportion des granulats

D'après la figure, on a les dosages en granulats, tels que :

- $s = 43\%$
- $g = 57\%$

VI-3-3-2 Dosage en masse des granulats

VI-3-3-2-1 Coefficient de compacité

Pour garder un même dosage en granulats pour les pavés, prenons une valeur moyenne de $r' = 0,812$ pour tous nos essais mais il convient d'apporter une correction pour le sable roulé et gravier concassé. Le coefficient de compacité sera alors :

$$r = 0,812 - 0,01 = 0,802.$$

VI-3-3-2-2 Volume des granulats

La compacité du béton représente le volume de matière solide (ciment et granulats).

Si nous considérons le m^3 de béton (soit 1000 litres), on a :

$$V_{\text{solides}} = 1000$$

$$V_{\text{solides}} = V_{\text{ciment}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}}$$

$$V_{\text{granulats}} = 1000 - V_{\text{ciment}}$$

Donc :
$$V_{\text{ciment}} = \frac{C}{\gamma_c} = \frac{310}{3,14} = 98,7$$

$$\underline{V_{\text{ciment}} = 99 \text{ litre}}$$

Puis :

$$V_{\text{sabler}} = s (1000 - V_c) = 0,43 (1000 - 99) = 302,4$$

$$\underline{V_{\text{sable}} = 302 \text{ litre}}$$

Et :

$$V_{\text{gravier}} = g (1000 - V_c) = 0,57 (1000 - 99) = 400,9$$

$$\underline{V_{\text{gravier}} = 401 \text{ litre}}$$

VI-3-3-2-3 Dosage en masse pour 1m^3 de béton

A partir de volume, les masses des granulats sont donc :

- $C = 310 \text{ kg}$
- $E = 171 \text{ kg}$
- $G = \gamma_g \cdot V_G = 1063 \text{ kg}$
- $S = \gamma_s \cdot V_S = 735 \text{ kg}$

VI-3-3-2-4 Dosage en masse pour un volume du moule de la PVR

Le volume de notre moule est :

$$V_{\text{moule}} = 18 \times 9 \times 10 = 1620 \text{ cm}^3$$

On confectionne les pavés selon deux consistances différentes. Or on a douze (12) essais au total, donc deux lots de consistances différentes comprenant six (6) pavés chacun.

Volume pour six pavés (de même consistance) :

$$V = 6 \times 1620 = 9720 \text{ cm}^3 = 9,720 \text{ litre}$$

Prenons : $V = 10 \text{ litre}$

d) Dosage 1 : consistance C₁

Après calcul (à partir du pourcentage en volume dans 1m^3), voici notre dosage en masse pour six pavés.

Tableau 30 : Dosage 1 de six pavés de béton

Composant	Ciment	Eau	Gravier	Sable
Masse [kg]	3,10	1,71	10,63	7,34

e) Dosage 2 : consistance C₂

On garde les mêmes dosages, mais on a seulement changé le volume de l'eau pour avoir une consistance différente.

Tableau 31 : Dosage 2 de six pavés de béton

Composant	Ciment	Eau	Gravier	Sable
Masse [kg]	3,10	1,50	10,63	7,34

Par expérimentation, on constate que les deux dosages ont un même affaissement au cône d'abrams $A = 0$.

Chapitre VII: **PROCEDE DE FABRICATION DES PAVES****VII-1 Organigramme de la fabrication**

Nous avons suivi l'organigramme suivant pour confectionner nos pavés.

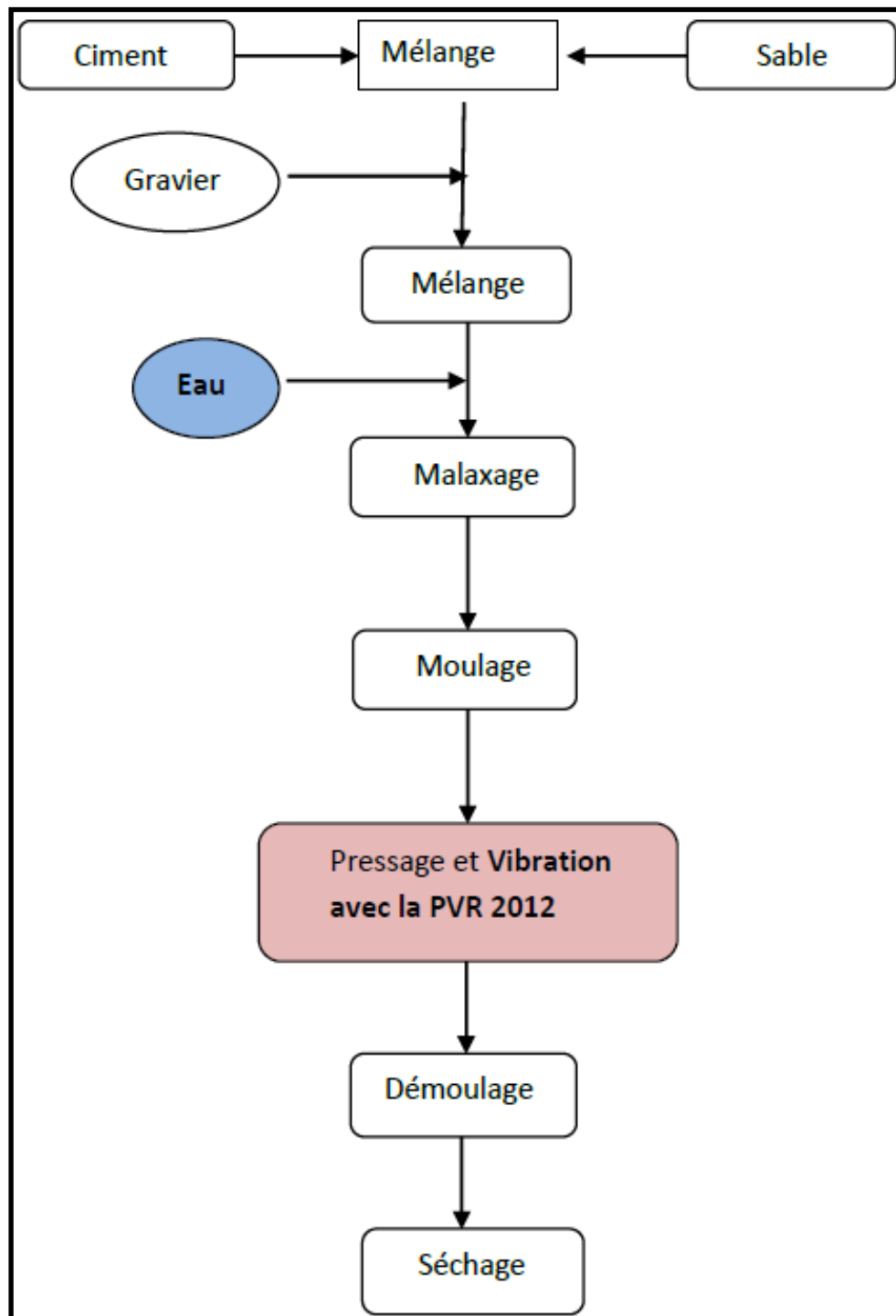


Figure 42 : Procédés de confection des pavés

VII-2 Fabrication des pavés :

VII-2-1 Dosage :

On utilise le dosage en poids ou dosage pondéral. Plus les quantités sont faibles, plus la balance devra être précise. Il faut s'assurer de la fiabilité de l'opération, ainsi que de son efficacité.

VII-2-2 Malaxage :

Après avoir effectué le dosage et réalisé le mélange, on passe au malaxage des matières premières. Le malaxage à sec a pour but d'homogénéiser le mélange, et on ajoute progressivement l'eau de gâchage.

VII-2-3 Moulage :

Le moulage consiste en une mise en forme de l'échantillon voulu, il s'agit de couler dans le moule la pâte ainsi dosée et malaxée.

Pour éviter le collage à la paroi du moule, on utilise de l'huile. Presque toutes les huiles sont susceptibles d'être employées. La notre est de l'huile de moteur d'automobiles.

VII-2-4 Pressage et vibration :

La photo suivante montre la PVR pendant le compactage et la vibration des pavés.



Photo 6: Compactage avec la PVR 2012

VII-2-4-1 Processus de compactage

On procède comme suit :

- Mettre le mélange dans le moule ;
- Lancer le moteur (seulement pour les pressages avec vibration) et presser à la fois (pour les pavés pressés) jusqu'à l'obtention de la hauteur voulue (vérification avec le jauge d'un pied à coulisse) ;
- Arrêter le moteur.

VII-2-4-1-1 *Elimination des bulles d'air et réarrangement des grains pendant la vibration :*

Pendant la vibration, les bulles d'air remontent vers la surface, et les pavés deviennent plus homogènes par un réarrangement des grains pour former une structure plus compacte.

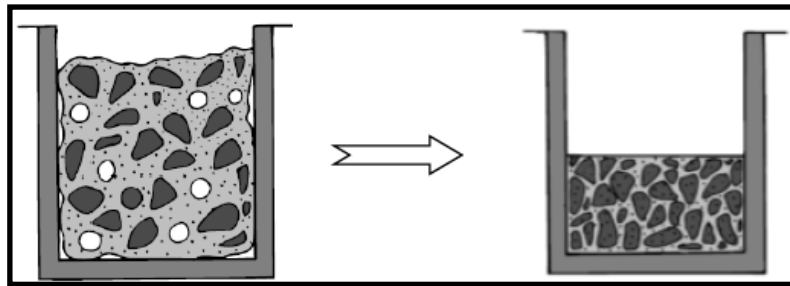


Figure 43 : Influence de la vibration sur la structure des pavés

VII-2-4-1-2 *Serrage du béton lors du pressage :*

Par action de pressage par la PVR, le béton devient encore plus compact comme le montre la figure suivante :

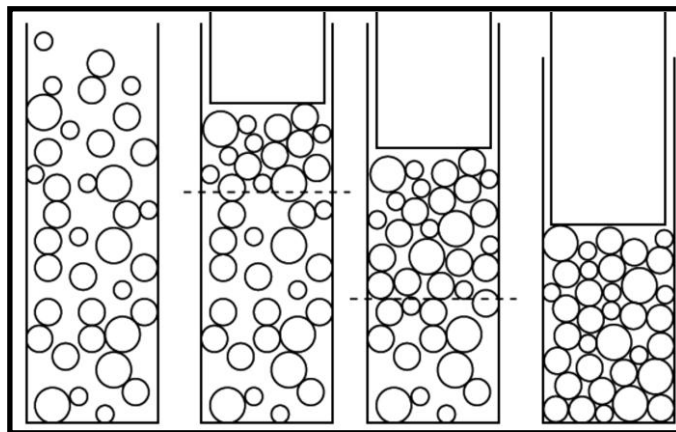


Figure 44 : Mécanisme de compactage

Cette action est cependant fortement influencée par le taux d'eau de gâchage du mélange.

VII-2-5 *Démoulage*

On démoule le pavé immédiatement après compactage. Le démoulage est réalisé par poussée des produits sous le moule.

VII-2-6 *Séchage :*

Le temps de séchage de nos pavés est de 7 jours. On peut évaluer approximativement les valeurs de résistance à la compression à 28 jours par la formule décrite dans *l'annexe 2*.

Chapitre VIII: **RESULTATS DES ESSAIS ET INTERPRETATIONS**

Le but de notre expérience est d'essayer de déterminer la variation de la résistance à la compression R_c des pavés quand on modifie le dosage en eau, la vibration et la force de compactage.

Les trois paramètres variables ont les valeurs suivantes :

- Dosage en eau:
 - $E_1 = 1,50$ [litre] et
 - $E_2 = 1,71$ [litre]
- Force de compactage :
 - $F_{c1} = 56,4$ [daN],
 - $F_{c2} = 112,9$ [daN] et
 - $F_{c3} = 225,8$ [daN] ;
- Vibration :
 - $V_1 = 0$ [%] et
 - $V_2 = 100$ [%]

Nous confectionnerons six pavés de dosage en eau $E_1 = 1,5$ [litre] et six autres de dosage $E_2 = 1,7$ [litre]. Ce qui correspond à douze essais de détermination de la résistance à la compression.







Photo 7 : Les pavés séchés

VIII-1 Photo de comparaison des pavés

Les photos suivantes comparent l'aspect physique, par observation à l'œil nu de quatre pavés. On peut déjà y voir les différences d'état de surface des pavés vibrés et non vibrés.

Tableau 32 : Photo de deux échantillons vibrés et non vibrés

ECHANTILLON	VU DE FACE	VU DE DESSUS
PAVES NON VIBRES		
PAVES VIBRES		

VIII-2 Influence du dosage en eau

Les essais désignés par des numéros de couleur noir sont ceux qui correspondent à un dosage en eau de $E_1 = 1,50$ [litre]

Et les essais désignés par des numéros de couleur rouge sont ceux qui correspondent à un dosage en eau de $E_2 = 1,71$ [litre]

VIII-2-1 Dosage en eau constant $E_1 = 1,50$ litre

En gardant le dosage en eau constant, et en variant la force de compactage et la vibration, on a les valeurs des R_c présentés dans le tableau suivant.

Tableau 33 : R_c à 7 jours des pavés dosés à 1,50 litre d'eau.

Essai N°	Vibration [%]	Force de compactage [kN]	Résistance R_{c7} [MPa]
01	0	56,4	10,2
03	0	112,9	14,2
05	0	225,8	16,7
07	100	56,4	16,7
09	100	112,9	18,5
11	100	225,8	18,2

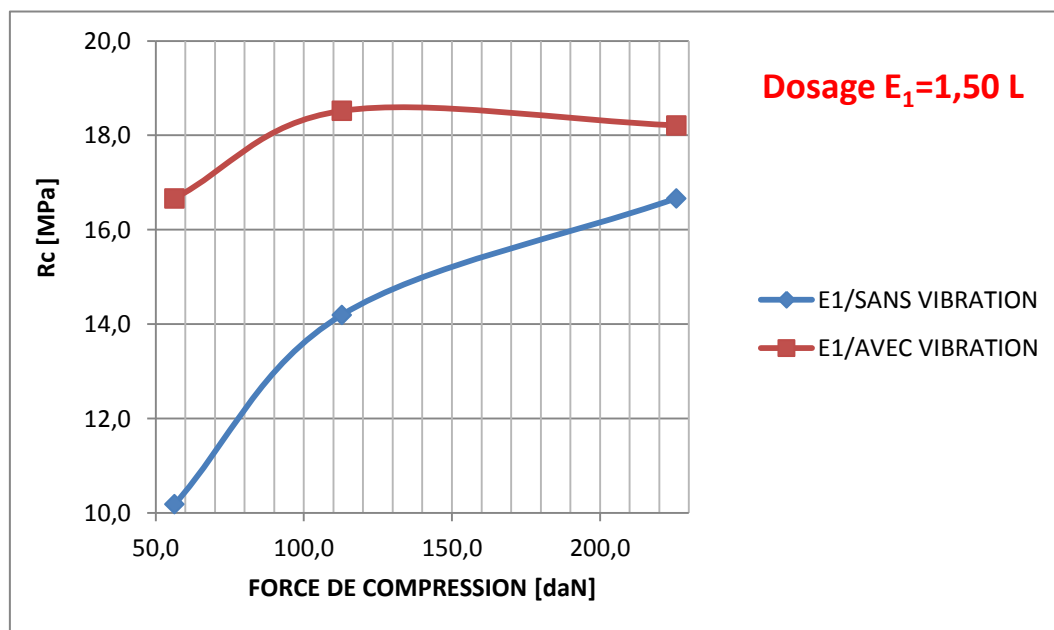


Figure 45 : Evolution des R_{c7} en fonction de la vibration et de la force de compactage à dosage en eau $E_1 = 1,50$ litre

VIII-2-1-1 **Constatation 1 : « Influence de la vibration »**

Pour un même dosage en eau $E_1 = 1,50$ litre, les résistances à la compression des pavés vibrés sont supérieures à celles des pavés non vibrés. Cela s'observe pour les trois valeurs 56,4 [MPa], 112,9 [MPa] et 225,5 [MPa] de la force de compactage.

L'écart entre les R_{c7} des pavés vibrés et non vibrés est de l'ordre de 4,12 [MPa] en moyenne. Cette différence de résistances à la compression des briquettes est constatée sur les deux courbes de la *figure 44*.

VIII-2-1-1-1 **Constatation 2 : « Influence de la force de compactage »**

Pour une même vibration, et un dosage en eau de $E_1=1,50$ [litre], en multipliant (ou en divisant) deux fois la valeur de la force de compactage, la résistance R_c augmente (ou diminue) de 3,2[MPa] en moyenne.

Pour le dosage en eau $E_1 = 1,50$ [litre], la valeur de la résistance R_c varie dans le même sens que la valeur de la force de compactage, en présentant un maximum pour la valeur de 112,9 [daN].

VIII-2-2 **Dosage en eau constant $E_2 = 1,71$ litre**

On garde toujours le dosage en eau constante mais de valeur $E_2 = 1,71$ litre. Les valeurs de la force de compactage et de la vibration restent variables.

Tableau 34 : R_c à 7 jours des pavés dosés à 1,71 litre d'eau.

Essai N°	Vibration [%]	Force de compactage [daN]	Résistance R_{c7} [MPa]
02	0	56,4	16,7
04	0	112,9	15,4
06	0	225,8	11,5
08	100	56,4	18,5
10	100	112,9	17,9
12	100	225,8	16,7

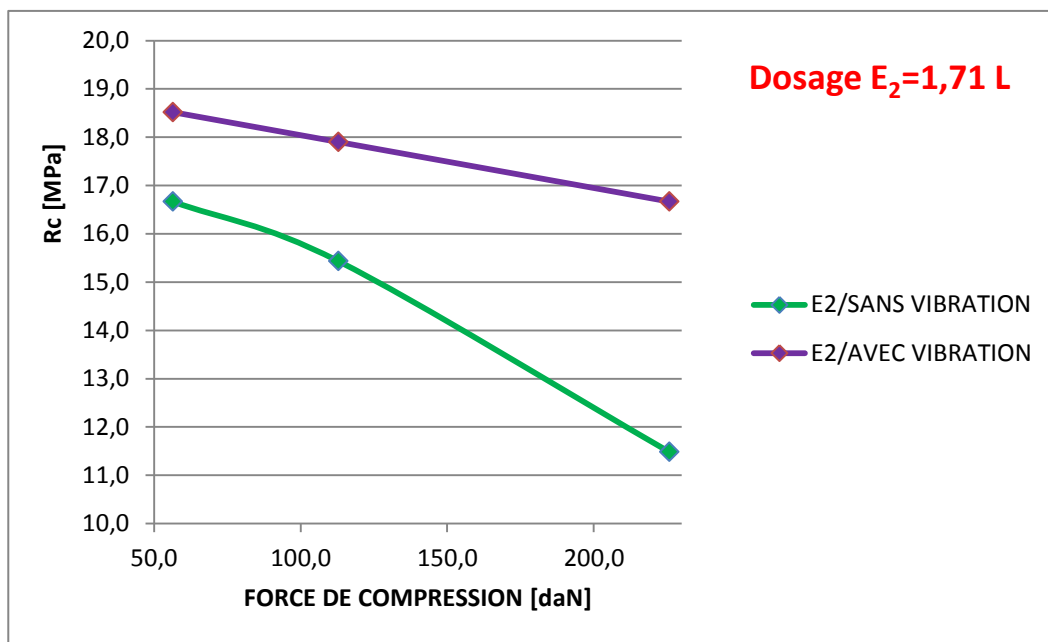


Figure 46 : Evolution des R_{c7} en fonction de la vibration et de la force de compactage à dosage en eau $E_2 = 1,71$ litre

VIII-2-2-1 **Constatation 3 : « Influence de la vibration »**

D'après la *figure 45*, on constate qu'à dosage $E_2 = 1,71$ [litre] constant, les valeurs R_c des pavés vibrés surpassent celles des pavés non vibrés de l'ordre de 3,17 [MPa] en moyenne pour une même force de compactage. Mais la résistance diminue, d'une manière presque linéaire, lorsqu'on augmente la force de compactage.

VIII-2-2-2 **Constatation 4 : « Influence de la force de compactage »**

Pour une même vibration, et un dosage en eau de $E_2=1,71$ [litre], en multipliant deux fois la valeur de la force de compactage, la résistance R_c diminue de 1,8[Mpa] en moyenne.

Pour le dosage en eau $E_2 = 1,71$ [litre], la valeur de la résistance R_c varie dans le sens contraire que la valeur de la force de compactage. C'est à dire, l'application de la force de compactage sur les pavés dosés à 1,71[litre] fait diminuer la résistance R_c .

VIII-2-3 Récapitulation

En regroupant les résultats dans un même tableau et en les illustrant dans une même figure, on a les résultats suivant.

Tableau 35 : Récapitulation des résultats des Rc à 7 jours.

Essai N°	Dosage en eau [litre]	Vibration [%]	Force de compactage [daN]	Résistance Rc7 [MPa]
01	1,50	0	56,4	10,2
02	1,71	0	56,4	16,7
03	1,50	0	112,9	14,2
04	1,71	0	112,9	15,4
05	1,50	0	225,8	16,7
06	1,71	0	225,8	11,5
07	1,50	100	56,4	16,7
08	1,71	100	56,4	18,5
09	1,50	100	112,9	18,5
10	1,71	100	112,9	17,9
11	1,50	100	225,8	18,2
12	1,71	100	225,8	16,7

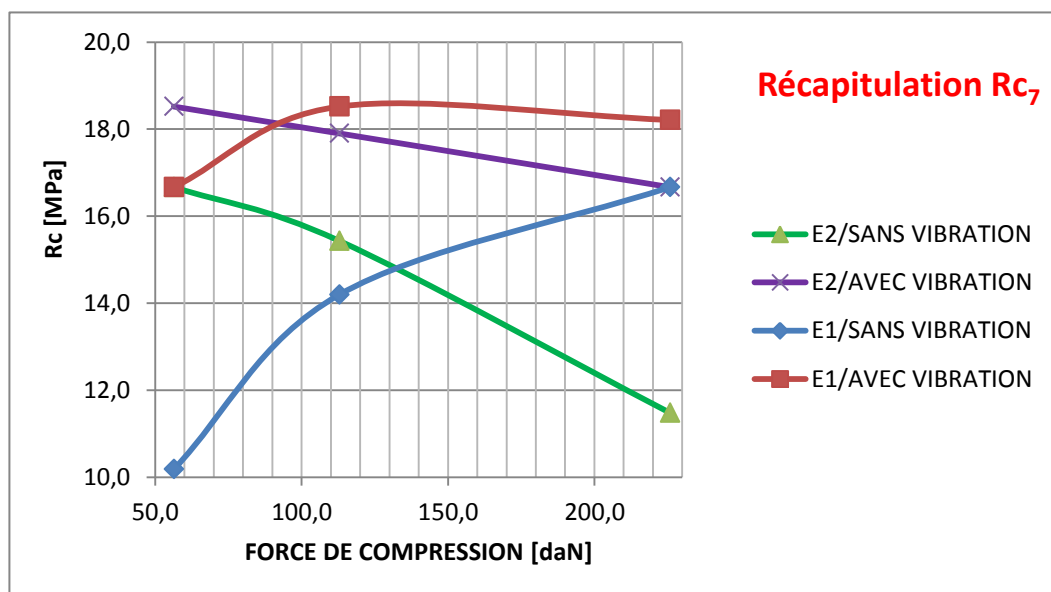


Figure 47 : Récapitulation de l'évolution de Rc à 7 jours

VIII-2-4 *Interprétation sur l'influence des trois paramètres variables*

VIII-2-4-1 **Influence de la vibration**

- Pour une même force de compactage et pour le même dosage en eau, le pavé vibré est plus performant que celui non vibré. Ceci s'explique par l'action de la vibration sur l'obtention d'une structure plus compacte par réarrangement des grains de granulats.
- Pour $E_1 = 1,50$ litre, la vibration provoque une valeur maximale de la résistance pour une valeur bien déterminée de la force de compactage. Tandis que pour $E_2 = 1,71$ litre, la vibration couplée au compactage fait diminuer la résistance au fur et à mesure que la force de compactage augmente.
- Ceci nous permet de dire qu'il existe une valeur de taux d'eau de gâchage au-delà duquel la structure du béton ne peut plus être rendue plus compacte.

VIII-2-4-2 **Influence du compactage**

- Avec ou sans vibration, le compactage améliore la résistance du pavé à condition qu'on respecte certaine règle.
- Comme pour le cas des Blocs de Terres Compressés (BTC), on travaille en compression statique du béton. Il existe une teneur en eau optimale qu'on ne doit pas dépasser. En effet, l'eau est un élément incompressible et donc le compactage est inopérant sur un matériau qui contient trop d'eau.
- Pour une teneur en eau acceptable, proche de l'optimum, il existe une valeur optimale de la force de compactage qui conduit à une compacité maximale, donc à une résistance à la compression du béton durci maximale.
- Ce phénomène lié à un surdosage en eau est accentué par le couplage du compactage à la vibration :

✚ Si le taux d'eau de gâchage est acceptable, on obtient le maximum de résistance avec le maximum de taux de compactage, tant qu'on n'a pas dépassé l'optimum.

✚ Si le matériau contient trop d'eau, la vibration accentue l'influence de l'effet négatif d'une trop forte énergie de compactage.

VIII-3 Evolution des Rc dans le temps

Les valeurs des Rc des pavés à 7, 14 et 28 jours d'âge sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 36 : Valeurs des Rc des pavés à 7, 14 et 28 jours d'âge

Essai N°	Dosage en eau [litre]	Vibration [%]	Compression [daN]	Rc7 [MPa]	Rc14 [MPa]	Rc28 [MPa]
01	1,50	0	56,4	10,2	13,1	15,4
02	1,71	0	56,4	16,7	21,5	25,2
03	1,50	0	112,9	14,2	18,3	21,4
04	1,71	0	112,9	15,4	19,9	23,3
05	1,50	0	225,8	16,7	21,5	25,2
06	1,71	0	225,8	11,5	14,8	17,3
07	1,50	100	56,4	16,7	21,5	25,2
08	1,71	100	56,4	18,5	23,9	28,0
09	1,50	100	112,9	18,5	23,9	28,0
10	1,71	100	112,9	17,9	23,1	27,0
11	1,50	100	225,8	18,2	23,5	27,5
12	1,71	100	225,8	16,7	21,5	25,2

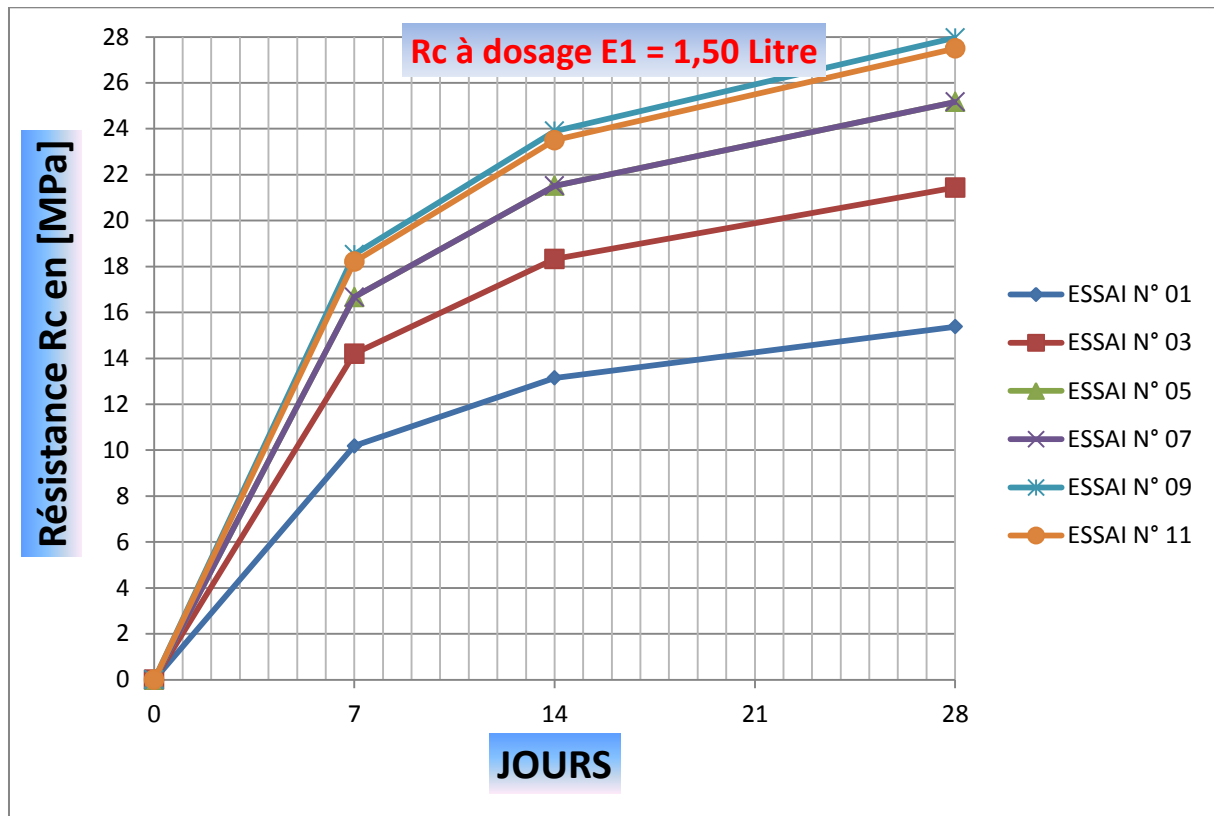
VIII-3-1 Evolution des R_c dans le temps pour $E_1 = 1,50$ litre

Figure 48 : Evolution des R_c dans le temps à dosage en eau $E_1 = 1,50$ litre

INTERPRETATION

Pour les six essais de dosage en eau $E_1 = 1,50$ [litre], les courbes des R_c présentent à peu près une même allure en ce qui concerne leur évolution dans le temps.

On ne peut apercevoir que cinq courbes sur la figure car les courbes de l'essai N° 05 et celle de l'essai N° 07 sont superposées. Cela vient du fait qu'ils ont les mêmes valeurs de résistance R_c en fonction du temps.

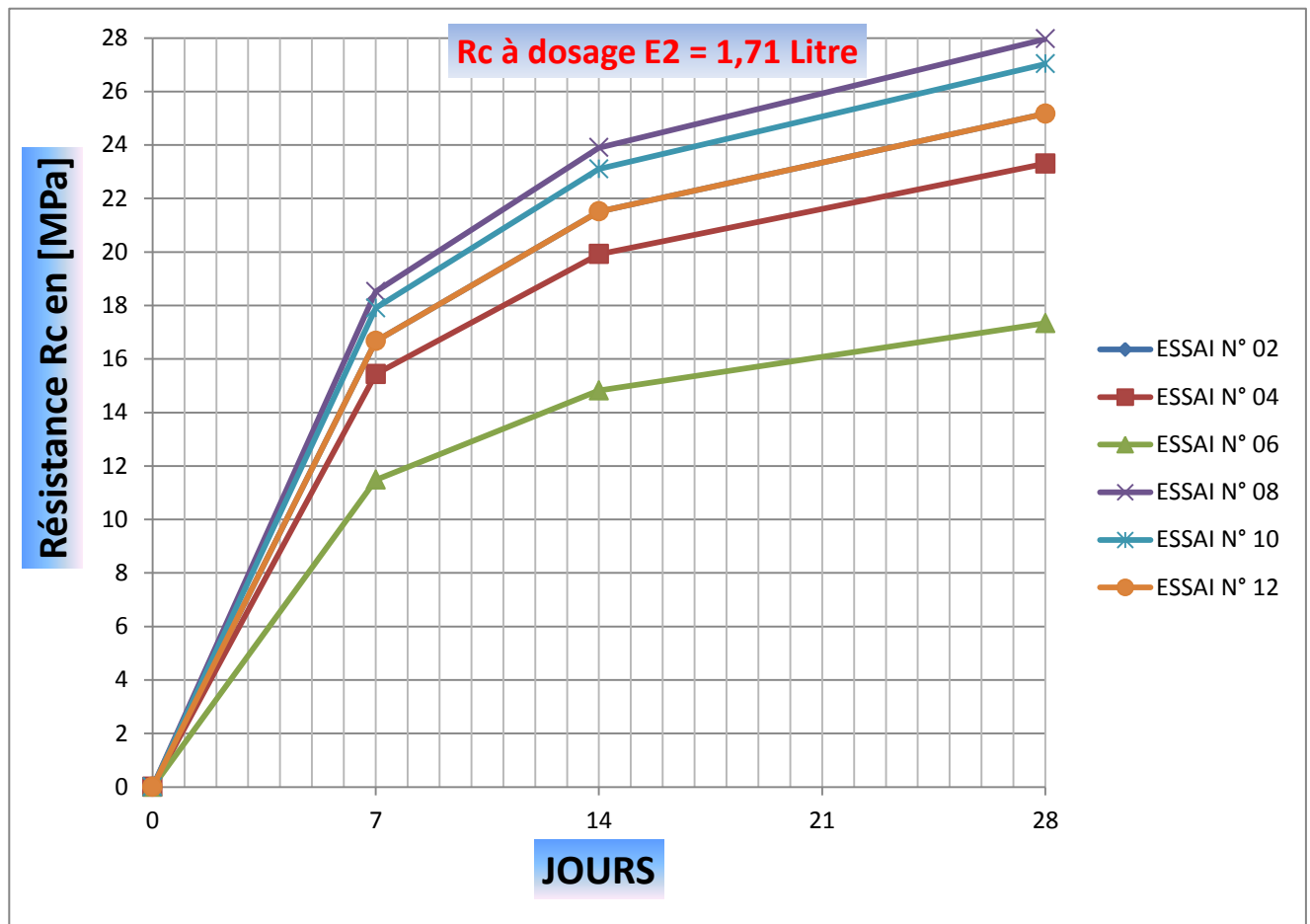
VIII-3-2 Evolution des Rc dans le temps pour $E_2 = 1,71$ litre

Figure 49 : Evolution des Rc dans le temps à dosage en eau $E_2 = 1,71$ litre

INTERPRETATION

Pour les six essais de dosage en eau $E_2 = 1,71$ [litre], les courbes des Rc présentent aussi à peu près une même allure en ce qui concerne leur évolution dans le temps.

Et de même, on ne peut apercevoir que cinq courbes sur la figure car les courbes de l'essai N° 02 et celle de l'essai N° 12 sont superposées.

VIII-4 Conclusion

L'utilisation de la presse vibrante PVR 2012 permet d'obtenir des pavés de très bonnes qualités (aspect et performances mécaniques) à condition que le mélange utilisé soit bien dosé :

- Dosage en ciment et des granulats par une méthode de formulation adéquate,
- Dosage en eau proche du dosage optimal, que l'on devrait déterminer expérimentalement avant la confection d'un lot de pavés.

Chapitre IX: **EVALUATION DU COUT DE FABRICATION DE LA PRESSE****I-1 Evaluation du coût de la presse**

Rappelons par le tableau suivant le coût des matériels et des mains d'œuvre pour la réalisation de la presse PVR 2012.

Tableau 37 : Estimation du prix de revient de la réalisation de la presse PVR 2012

Désignations	Dimensions	Nombre	PRIX [fmg]	PRIX [Ar]
Moteur monophasé 1,5 Cheval	170mm x 250mm	01	500.000	100.000
TPN de 8 mm d'épaisseur en Aciers	285mm x 352mm	01	100.000	20.000
TPN de 10 mm d'épaisseur en Aciers	55mm x 155mm	01	30.000	6.000
TPN de 4 mm d'épaisseur en Aciers	150mm x 30mm	04	10.000	2.000
Tôle de 0,8mm	400mm x 800mm	01	55.000	11.000
Cornière à ailes égales de 50 en Acier	2.500mm de long	01	100.000	20.000
Rond d'acier Ø 30	450mm de long	01	62.500	12.500
Rond d'acier Ø 20	250mm de long	02	70.000	14.000
Fer en U en Acier	1.500mm de long	01	47.500	9.500
Tube sans soudure de Ø _i 23	200mm de long	01	20.000	4.000
Boulon à tête hexagonal M8	20mm de long	16	32.000	6.400
Boulon à tête hexagonal M8	50mm de long	08	16.000	3.200
Ecrou M12	Ø = M12	08	8.000	1.600
Ecrou M8	Ø = M8	08	4.000	8.000
Boulon à tête hexagonal M20	80mm de long	01	10.000	2.000
Ressort de Ø _i 16	100mm de long	04	30.000	6.000
Electrode enrobés G 48 du type SAFER	Ø 3,15	10	20.000	4.000
Electrode enrobés G 48 du type SAFER	Ø 2,15	04	4.000	800
Peinture à l'huile de couleur blanche	200g	01	15.000	3.000
Peinture à l'huile de couleur bleu	200g	01	15.000	3.000
White spirit	500ml	01	10.000	2.000
Pinceau	150mm de long	01	5.000	1.000
Tube en PVC Ø 50	1.200mm	01	22.500	4.500
Condensateur	20µF	01	40.000	8.000
Interrupteur	standard	01	4.000	800
Bouton poussoir	-	01	3.000	600
Prise mâle	standard	01	3.500	700
Prise femelle	standard	01	3.500	700
VGv à 03 fils	02m	01	8.000	1.600
VGv à 02 fils	03m	01	9.000	1.800
Dominos	-	02 paires	3.000	600
Main d'œuvre total (en moyenne)	-	-	650.000	130.000
COÛT TOTAL DE FABRICATION			1.910.500	382.100

Source : Auteur

On estime que le coût total de la réalisation de la presse PVR 2012 est alors de **382.100Ar**.

I-2 Autres dépenses lors de la réalisation des pavés

Le manque de matériels dans le laboratoire entraine une dépense en plus pour les expérimentateurs. Cela vient du fait qu'ils sont obligés d'en acheter pour mener à bien les essais. Ces matériels manquant sont surtout des appareils de mesure et de mise en œuvre comme : balance de précision, éprouvette graduée, cuvettes et autres.

CONCLUSION GENERALE

A partir de diverses bibliographies, on peut dire que la vibration a une bonne influence sur le serrage du béton. Bonne influence car en appliquant la vibration, on obtient un béton de bonne qualité, c'est-à-dire : mise en œuvre facilitée, résistance accrue, béton durable ; et bel aspect des parements.

Influence de la vibration

Par nos essais de confection des pavés en béton avec la PVR 2012, on a pu constater que les pavés vibrés ont une meilleure résistance à la compression que ceux non vibrés. Une interprétation qui ne fait que confirmer la nécessité de la vibration dans le domaine de la mise en œuvre du béton.

Influence de l'eau de gâchage

Pour $E_1 = 1,50$ litre, la vibration provoque une valeur maximale de la résistance pour une valeur bien déterminée de la force de compactage.

Tandis que pour $E_2 = 1,71$ litre, la vibration couplée au compactage fait diminuer la résistance au fur et à mesure que la force de compactage augmente. En effet, l'eau est un élément incompressible et donc le compactage est inopérant sur un matériau qui contient trop d'eau.

Ceci nous permet de dire qu'il existe une valeur de taux d'eau de gâchage au-delà duquel la structure du béton ne peut plus être rendue plus compacte.

Influence de la force de compactage

Avec ou sans vibration, le compactage améliore la résistance du pavé à condition qu'on respecte certaine règle sur le taux d'eau de gâchage :

- ✚ Si le taux d'eau de gâchage est acceptable, on obtient le maximum de résistance avec le maximum de taux de compactage, tant qu'on n'a pas dépassé l'optimum.
- ✚ Si le matériau contient trop d'eau, la vibration accentue l'influence de l'effet négatif d'une trop forte énergie de compactage.

Dans tous nos essais, on a eu recours à l'utilisation de presse vibrante PVR 2012 pour la confection de nos pavés. Et le démoulage de nos pavés se fait immédiatement après le compactage. N'empêche beaucoup sont les améliorations qui devront être faites sur la presse vibrante PVR 2012 pour que son utilisation soit adéquate, comme : l'ajout d'un manomètre, minuterie et divers commande plus sophistiqués qui pourrait faire un autre sujet de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

[1] : RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely : « Contribution à l'étude d'élaboration de ciment à haute résistance à Madagascar. Action sur le mélange cru » ; Thèse de Doctorat d'état, es sciences physiques 2005.

[2] : RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely : « Liants minéraux : ciments » ; Cours 3^e année SIM 2009.

[3] : La fabrication du ciment : <http://www.ciments-calcia.fr>

[4] : Dreux G, Festa J, 1995, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Huitième édition, Eyrolles.

[5] : FIFINY Anna Carole : « Contribution à l'étude de valorisation des cendres volantes d'une centrale thermique de Toamasina comme fine d'ajout minéral dans les bétons hautes performances » ; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur Matériau ; ESPA 2012.

[6] : F.Gabrisiak – Matériaux - les Bétons – Chapitre 4

[7] RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely, « Béton et mortiers », Cours de quatrième année Science et Ingénierie des Matériaux – ESPA – 2010.

[8] : Guide pratique : « Concevoir et mettre en œuvre des bétons durable » ; une publication de Holcim (Belgique) ; Materials & Applications Center (Holcim Western Europe), 1^{ère} édition 2007

- [9] : Dr. Ir. P. Boeraeve - Cours de Béton armé : « Composition du béton », impression 2010.
- [10] : Zile-Marie Durosier Richard Bonneville : « Le ciment, les mortiers et les bétons », Mai 1998 : <http://www.interaide.org/pratiques>
- [11] : Collection technique CIMBETON : « l'essentiel » ; centre d'information sur les ciments et ses applications ; édition 2005.
- [12] : RAKOTOLAHY Riantsoa Nasandratra : « Conception et réalisation d'une presse vibrante PVR 2012 pour le laboratoire de matériaux à Vontovorona » ; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur Matériau ; ESPA 2011.
- [13] : CIMBETON : « La vibration des bétons », Collection Technique CimBéton, 1998
- [14] : Stéphane PATTOFATTO : « Comportement dynamique du béton frais : application au procédé de fabrication des parpaings » ; Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Université Paris 6, soutenu le 23 Novembre 2004.
- [15] : Guillaume Grampeix , Nicolas Roussel, Jérôme Dupoirier : « Influence de la vibration lors de la mise en œuvre du béton ».
- [16] : ANDRIAMPARANY Flavien Razafiarison : « Informatisation de la formulation du béton inspiré de la formule de Faury » ; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Étude Approfondie en Sciences des Matériaux ; ESPA 2005.

[17]: RANDRIAMIHOATRARIVO Haja Emilien: «Conception et réalisation d'une presse manuelle à briques stabilisées par émulsion polymère ; application de la mise en valeurs des rejets de chromites de la société KRAOMA » ; mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur Matériau ; ESPA 2010.

ANNEXE

Annexe 01 : Calcul de la force de compactage [17]

Par définition, la force de compactage en fonction de la densité de la matière à comprimer est :

$$dP = w \, dh$$

Avec

dP : pression partielle pendant un certains déplacement [daN]

dh : hauteur partielle de la course de la presse [cm]

w : la densité de la matière.

Donc, lorsque la hauteur du pavé est atteinte , on aura :

$$P = w (h_i - h_f) = w \, \Delta h \quad (1)$$

Avec :

P = la pression obtenue pendant Δh en [bar]

h_i : la dénivellation au point mort haut [cm]

h_f : la dénivellation au point mort bas [cm]

w : densité du béton frais

Nous retenons aussi la formule courante de la pression qui lie le coexistant entre la force et la surface :

$$P = F / S \quad (2)$$

Avec

P : la pression en [bar]

F : la force de compactage en [daN]

S : la section du moule en [cm²].

Les relations (1) et (2) nous permettent d'écrire la formule :

$$F = w \times \Delta h \times S$$

Application numérique:

- $w = 2$ (densité du béton)
- $\Delta h_1 = 10 - 9,2 = 0,8\text{cm}$ $\Delta h_2 = 10 - 9,6 = 0,4\text{cm}$ $\Delta h_3 = 10 - 9,8 = 0,2\text{cm}$

$$S = 8,4 \times 168 = 141,12 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Donc : $F_1 = 2 \times 0,8 \times 141,12 = 225,8 \text{ daN}$

$$F_2 = 2 \times 0,4 \times 141,12 = 112,9 \text{ daN}$$

$$F_3 = 2 \times 0,2 \times 141,12 = 56,4 \text{ daN}$$

Annexe 02 : Expression de R_c en fonction du temps

On considère que la résistance du béton évolue dans le temps très rapidement à court terme (entre 0 et 7 j), puis ralentie (de 7 à 28 j) pour tendre vers une asymptote horizontale à partir de 60 jours. Pour la référence en temps de 28 jours prise dans les calculs, on considère que le béton a atteint, à cet âge, 90% de sa résistance à long terme.

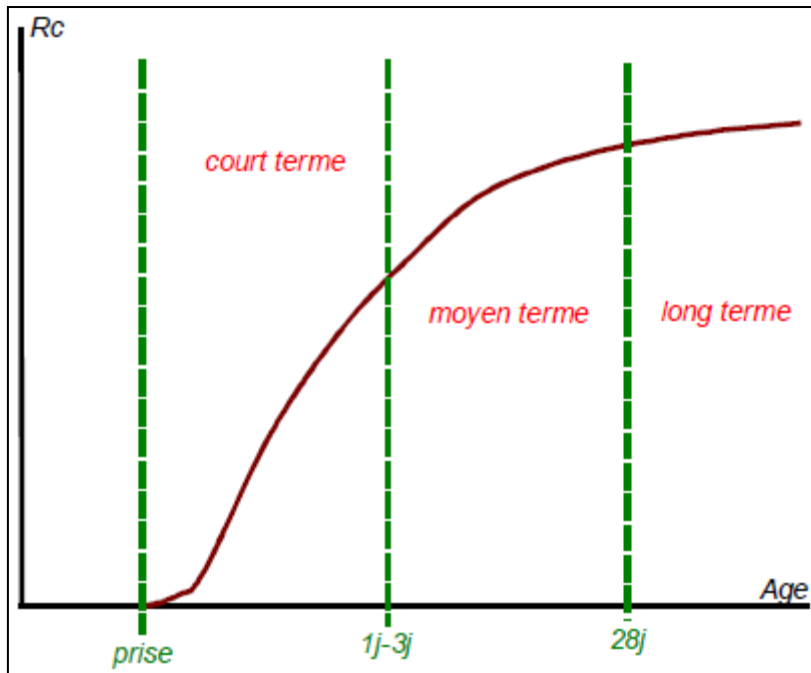


Figure 50 : Evolution des résistances à la compression dans le temps

L'article A 2.1.11 du BAEL 91 donne les formules suivantes afin d'estimer les résistances du béton en fonction du temps :

on a $j \leq 28$

- Et $R_{c28} \leq 40 \text{ Mpa}$ alors

$$R_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83j} \times R_{c28}$$

Avec : R_{cj} : résistance à la compression à j jour en [MPa]

j : jour d'âge du béton à l'écrasement

R_{c28} : résistance à la compression à 28 jours [MPa]



ANNEXE 03 : Formule de la résistance Rc

Après séchage, on effectue les tests de la résistance à la compression à l'aide de la machine TESTWELL. La valeur de la résistance Rc correspondant à l'écrasement est obtenue par un simple calcul à partir de la valeur lue sur le cadran de la machine.

Les forces de compression Fc lues sur le cadran de la machine Testwell sont exprimées en [daN].

Les valeurs des Rc exprimées en [MPa] ou [N/mm²] sont déduites de la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{S}$$

Avec : Rc : Résistance à la compression

Fc : force de compactage en [N]

S : surface de contact de la force pressante en [mm²]

Annexe 04 : Compléments concernant les ciments

Tableau 38 : Dénominations et symboles des ciments

Depuis 1994 NF P 15-301		A partir de 2010 NM 031-1	
Dénomination	Symbole	Dénomination	Symbole
Ciment Portland <i>Artificiel</i>	CPA–CEM I	Ciment Portland <i>Artificiel</i>	CEM I
Ciment Portland composé	CPJ–CEM II/A ;B	Ciment Portland au <i>laitier</i>	CEM II/A ; B – S
		Ciment Portland à la <i>fumée de silice</i>	CEM II/A ; B – D
		Ciment Portland à la <i>Pouzzolane</i>	CEM II/A ; B – P
			CEM II/A ; B – Q
		Ciment Portland aux <i>cendres volantes</i>	CEM II/A ; B – V
			CEM II /A ; B – W
		Ciment Portland au <i>calciné</i>	CEM II/A ; B – T
		Ciment Portland au <i>calcaire</i>	CEM II/A ; B – L
			CEM II/A ; B – LL
		Ciment Portland <i>composé</i>	CEM II/A ; B – M
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A ;B	Ciment de haut fourneau	CEM III/A ; B ; C
	CLK-CEM III /A ; B		
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A ; B	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A;B
Ciment au laitier et aux <i>cendres</i>	CLC-CEM V/A ; B	Ciment composé	CEM V/A ; B

Signification des lettres :

- Quantité des constituants principaux (autres que le clinker) suivant la norme NM 031 – 1

Classe de composition :

- A : de 6 à 20 %
- B : de 21 à 35%
- C : laitier de 81 à 95%

- La lettre M nous dicte la présence d'au moins deux constituants principaux dans le ciment

Exemple : CEM II/B - M (P-LL) ajout mélange de pouzzolane et de calcaire

- Les symboles veulent dire:
 - 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 ou LL : calcaire

Tableau 39: les 27 produits de la famille des ciments courants de la norme NM 031-1

Principaux types	Notation des 27 produits (types de ciment courant)		Composition (pourcentage en masse) ^{a)}										Constituants secondaires
			Constituants principaux										
			Clinker	Laitier de haut fourneau	Fumée de silices	Pouzzolanes		Cendres volantes		Schiste calcinée			
						Naturelle	Naturelle calcinée	Siliceuse	Calcique				
			K	S	D ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Ciment portland à la fumée de silice	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 -10	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
	Ciment Portland à la pouzzolane	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	0 - 5
		CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	0 - 5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5
		CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5
		CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 -20	0 - 5
		CEM II/B-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland composé	CEM II/A-M	80 - 94	← 6 - 20 →									0 - 5
		CEM II/B-M	65 - 79	← 21 - 35 →									0 - 5
CEM III	Ciment de haut fourneau	CEM III/A	35 - 64	35 - 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5
CEM IV	Ciment pouzzolanique	CEM IV/A	65 - 89	-	← 11 - 35 →				-	-	-	0 - 5	
		CEM IV/B	45 - 64	-	← 36 - 55 →				-	-	-	0 - 5	
CEM V	Ciment Composé	CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	← 18 - 30 →		-	-	-	-	0 - 5	
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50	-	← 31 - 50 →		-	-	-	-	0 - 5	

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE.....	III
LISTE DES TABLEAUX	IV
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES PHOTOS.....	VII
ABREVIATIONS ET SIGLES	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
PARITE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
Chapitre I: GENERALITES SUR LE BETON	5
I-1 Introduction	5
I-2 Définition	5
I-3 Les différents constituants du béton	6
I-3-1 Le ciment.....	6
I-3-1-1 Définition du ciment	7
I-3-1-2 Notation des cimentiers	7
I-3-1-3 Les constituants du ciment	8
I-3-2 Les granulats	10
I-3-2-1 Généralités sur les granulats :	10
I-3-2-2 Critères de choix des granulats :	11
I-3-2-3 Classement des granulats.....	13
I-3-3 L'eau de gâchage	15
I-3-3-1 Importance de l'eau de gâchage	16
I-3-3-2 Exemple de technique de gâchage.....	17
I-3-4 Les adjuvants :.....	17
I-3-4-1 Les adjuvants modificateurs de prise et de durcissement	18
I-3-4-2 Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton	18
I-4 Propriétés et caractéristiques du béton	19
I-4-1 Propriété du béton à l'état frais.....	19
I-4-1-1 Affaissement au cône d'Abrams (slump-test)	19
I-4-1-2 Étalement à la table de secousse (Flow test)	20
I-4-2 Propriétés des bétons durcis	22
I-4-2-1 Résistance mécanique.....	22
I-4-2-2 Les autres propriétés du béton durci	25
I-5 Classification des bétons	26
I-5-1 Suivant la masse volumique.....	26
I-5-2 Suivant la nature du liant.....	26
I-5-3 Suivant la nature du plus gros granulat utilisé.....	27
I-5-4 Classe de résistance	27

I-5-5	Classe de consistance.....	27
I-6	Conclusion	28
Chapitre II: METHODE DE CALCUL DE LA COMPOSITION DU BETON SELON DREUX-GORISSE....		29
II-1	Données de bases	29
II-1-1	Nature de l'ouvrage	29
II-1-2	Résistance souhaité	29
II-1-3	Ouvrabilité désirée.....	30
II-1-4	Dimension maximale des granulats :	30
II-2	Calcul du dosage.....	31
II-2-1	Dosage en ciment	31
II-2-2	Dosage en eau.....	32
II-2-3	Correction du dosage en eau en fonction de Dmax.....	32
II-2-4	Dosage en granulats.....	33
II-2-4-1	Dosage en pourcentage (en volume absolu) des granulats	33
II-2-4-2	Dosage en masse des granulats	35
Chapitre III: LA VIBRATION DES BETONS.....		38
III-1	Introduction	38
III-2	Objectifs de la vibration	38
III-3	Propriétés du béton vibré	39
III-3-1	Amélioration de l'ouvrabilité.....	39
III-3-2	Qualité des parements	40
III-3-3	Performance du béton	40
III-4	Le matériel de vibration	41
III-4-1	Les vibreurs internes ou aiguilles vibrantes	41
III-4-1-1	Vibreurs internes pneumatiques	41
III-4-1-2	Vibreurs électriques à moteur incorporé.....	42
III-4-1-3	Vibreurs mécaniques	43
III-4-2	Les vibreurs externes	44
III-4-2-1	Vibreurs pneumatiques.....	44
III-4-2-2	Vibreurs électriques	45
III-4-3	Les vibreurs de surface.....	45
III-4-3-1	Règles vibrantes	45
III-4-3-2	Compacteurs	46
III-5	Rappel sur la presse vibrante	47
III-6	MISE EN ŒUVRE DE LA VIBRATION DU BETON	48
III-6-1	Vibration interne	48
III-6-1-1	Règles usuelles générales.....	48
III-6-1-2	Vibration d'éléments verticaux	50
III-6-1-3	Vibration d'éléments horizontaux : planchers, dalles, radiers.....	53
III-6-2	Vibration externe.....	54
III-6-2-1	Règles usuelles générales.....	54
III-6-3	Vibration de surface	54
III-6-3-1	Règles vibrantes	54
III-6-3-2	Compacteurs vibrants	55
PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE: FABRICATION DES PAVES EN BETON.....		56
Chapitre IV: MODIFICATIONS APPORTEES A LA PRESSE PVR 2012		57
IV-1	Présentation de la PVR 2012	57

Table des matières

IV-1-1	Dessin d'ensemble de la PVR 2012.....	58
IV-1-2	Spécifications de la presse PVR 2012	59
IV-1-3	Fonctionnement :	60
IV-2	Quelques modifications apportée à la presse PVR 2012	60
IV-2-1	Levier pour abattage	60
IV-2-2	Moule de la presse	61
IV-2-3	Le couvercle et le contre-moule.....	61
IV-2-3-1	Couvercle.....	61
IV-2-3-2	Contre-moule	62
Chapitre V:	METHODE DE CARACTERISATION DES COMPOSANTS DU BETON	63
V-1	Étude granulométrique :	63
V-1-1	Analyse granulométrique :.....	63
V-1-1-1	Préparation de l'échantillon à analyser :.....	63
V-1-1-2	Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique :.....	64
V-1-1-3	Dimensions nominales des tamis :	64
V-1-1-4	Processus de l'analyse granulométrique :.....	67
V-1-2	Courbe granulométrique :	69
V-1-3	Module de finesse.....	71
V-2	Propriétés physiques des granulats :.....	72
V-2-1	La masse volumique absolue γ (ou poids spécifique) du granulat :.....	72
V-2-2	Masse volumique apparente ρ du granulat :.....	73
V-2-3	Teneur en eau ω des granulats :	74
V-2-4	Porosités P et impuretés :.....	75
V-2-5	Équivalence de Sable :	76
V-3	Propriétés mécanique des granulats.....	78
V-3-1	Essais Deval et Microdeval.....	78
V-3-2	Essai Los Angeles (LA)	79
Chapitre VI:	FORMULATION DE LA COMPOSITION DES PAVES.....	80
VI-1	Caractéristiques des matières premières.....	80
VI-1-1	Les granulats.....	80
VI-1-1-1	Le gravillon	80
VI-1-1-2	Le sable.....	82
VI-1-2	Ciment	84
VI-2	Données de base	84
VI-2-1	Nature de l'ouvrage.....	84
VI-2-2	Résistance souhaitée	84
VI-2-3	Ouvrabilité désirée	84
VI-2-3-1	Affaissement au cône d'Abrams	84
VI-2-3-2	Vibration par la PVR	84
VI-2-3-3	Compactage	85
VI-3	Formulation par calcul.....	85
VI-3-1	Dimension maximale des granulats.....	85
VI-3-2	Dosage en ciment et en eau	85
VI-3-3	Dosage en granulat.....	86
VI-3-3-1	Dosage en pourcentage des granulats(en volume absolu)	86
VI-3-3-2	Dosage en masse des granulats	87
Chapitre VII:	PROCEDE DE FABRICATION DES PAVES.....	90
VII-1	Organigramme de la fabrication	90

Table des matières

VII-2	Fabrication des pavés :	91
VII-2-1	Dosage :	91
VII-2-2	Malaxage :	91
VII-2-3	Moulage :	91
VII-2-4	Pressage et vibration :	91
VII-2-4-1	Processus de compactage	92
VII-2-5	Démoulage	93
VII-2-6	Séchage :	93
Chapitre VIII: RESULTATS DES ESSAIS ET INTERPRETATIONS		94
VIII-1	Photo de comparaison des pavés.....	95
VIII-2	Influence du dosage en eau	95
VIII-2-1	Dosage en eau constant $E_1 = 1,50$ litre	96
VIII-2-1-1	Constatation 1 : « Influence de la vibration »	97
VIII-2-2	Dosage en eau constant $E_2 = 1,71$ litre	97
VIII-2-2-1	Constatation 3 : « Influence de la vibration »	98
VIII-2-2-2	Constatation 4 : « Influence de la force de compactage »	98
VIII-2-3	Récapitulation.....	99
VIII-2-4	Interprétation sur l'influence des trois paramètres variables	100
VIII-2-4-1	Influence de la vibration.....	100
VIII-2-4-2	Influence du compactage	100
VIII-3	Evolution des Rc dans le temps	101
VIII-3-1	Evolution des Rc dans le temps pour $E_1 = 1,50$ litre	102
VIII-3-2	Evolution des Rc dans le temps pour $E_2 = 1,71$ litre	103
VIII-4	Conclusion	104
Chapitre IX: EVALUATION DU COUT DE FABRICATION DE LA PRESSE.....		105
I-1	Evaluation du coût de la presse.....	105
I-2	Autres dépenses lors de la réalisation des pavés	106
CONCLUSION GENERALE		107
BIBLIOGRAPHIE.....		110
ANNEXE.....		A
TABLE DES MATIERES		I
RESUME		

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

Département Science des Matériaux et Métallurgie

Nom : RAKOTOLAHY

Prénoms : Riantsoa Nasandatra

Adresse: Lot IVM 48 Ambodivona Ankadifotsy – 101 Antananarivo

Tél: 033 13 843 87

E-mail : armelpoly@gmail.com

Nombre de pages: 113

Nombre de tableaux : 38

Nombre de figures : 49

Nombre de photos : 07

RESUME

Cet ouvrage est une suite de la recherche faite sur le compactage et vibration de latérite à l'aide d'une presse conçue et réalisée dans ce but. Dans ce livre-ci, on a remplacé la latérite par du béton. C'est pourquoi on a choisi le thème de ce mémoire : « Utilisation de la presse vibrante PVR 2012 pour le compactage de pavés en béton »

Comme dans le cas de la latérite, les pavés vibrés ont une résistance à la compression plus grande que ceux qui ne sont pas vibrés. Il en est de même pour la force de compactage. Mais pour le dosage en eau, il y a une condition en ce qui concerne son influence sur la résistance à la compression des pavés.

Mots clés: Béton, Compactage, Vibration, Presse Vibrante.

ABSTRACT

This work is a continuation of research made on the compaction and vibration of laterite with a press conceived and achieved in this goal. In this book, one replaced the laterite by the concrete. It is why one chose the theme of this memory: "Use of the vibrant press PVR 2012 for the compaction of pavements made of concrete."

As in the case of the laterite, the pavements vibrated have a resistance to the bigger compression than those that are not vibrated. It is some in the same way for the strength of compression. But for in water, there is a condition with regard to his influence on the resistance to the compression of the pavements.

Key words: Concrete, Compaction, Vibration, Vibrant Press.

Under the direction of: M. RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely