



HAL
open science

Vibration des bétons

Guillaume Grampeix

► **To cite this version:**

Guillaume Grampeix. Vibration des bétons. Autre. Université Paris-Est, 2013. Français. NNT : 2013PEST1179 . tel-00975153

HAL Id: tel-00975153

<https://theses.hal.science/tel-00975153>

Submitted on 8 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris-Est
Spécialité : Génie Civil

Par

Guillaume Grampeix

Ecole Doctorale : SCIENCES, INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

Vibration des Bétons

Thèse soutenue le 12 décembre 2013 devant le jury composé de :

Geert De Schutter	<i>Rapporteur</i>
Christophe Lanos	<i>Rapporteur</i>
Jean-Michel Torrenti	<i>Examineur</i>
Jérôme Dupoirier	<i>Examineur</i>
François Cussigh	<i>Examineur</i>
Thierry Sedran	<i>Examineur</i>
Nicolas Roussel	<i>Directeur de thèse</i>

Si le résultat d'un calcul n'est pas conforme à ce que vous indique votre bon sens, recommencez-le, c'est probablement lui qui est faux !

Robert L'Hermite.

A Louise et Maëlle.

Résumé

Dans le domaine de la construction, le béton constitue le matériau le plus consommé. Malgré l'arrivée sur le marché de bétons fluides tels que les bétons auto-plaçant, les bétons ordinaires représentent encore aujourd'hui plus de 90% des matériaux employés sur chantier. Afin de finaliser le remplissage des coffrages et d'atteindre les performances attendues, ces bétons sont vibrés ponctuellement à l'aide d'une aiguille vibrante. Les recommandations techniques utilisées actuellement concernant la vibration se basent sur des études réalisées au cours de la première moitié du siècle dernier. Dans ce travail, nous choisissons de les revisiter à la lumière des progrès récents dans le domaine de la rhéologie et de la rhéométrie des matériaux cimentaires.

Dans une première partie, nous identifions des caractéristiques mécaniques représentatives des matériels de vibration disponibles. Puis, nous identifions les plages de fluidité et de consistance sur lesquelles une vibration du matériau est indispensable. Nous développons ensuite un modèle analytique simple permettant de prédire le diamètre d'action d'un vibreur et nous le comparons à nos résultats expérimentaux. Nous mettons en évidence le rôle limitant de la viscosité des bétons dans le cas de bétons à faibles rapports massiques eau/ciment. Enfin, nous quantifions une valeur de temps minimal de vibration nécessaire au compactage du matériau ainsi qu'une valeur de temps minimal de vibration nécessaire à l'amélioration de la qualité du parement.

Mots clés : Béton ; Fluide à seuil ; Rhéologie ; Vibration ; Viscosité

Abstract

In the field of construction, concrete is the most used material. In order to facilitate the casting process, concretes are liquefied punctually following the successive insertion of an internal vibrating poker. Despite the introduction of very fluid to self-compacting concrete, ordinary concrete represents more than 90% of the mix-design used on building sites. However, international recommendations are based on studies carried out during the first half of last century. Thus, we choose to investigate these recommendations in order to incorporate the current progress on the rheology of cementitious materials.

From a study of the literature, we establish the relationship between the mechanical properties of vibrating poker and the fresh behavior of concrete. Then, in chapter two, we determine, for which consistency, the vibration is really needed. Thereafter, we develop a simple analytical model to predict the diameter of action of internal poker and we compare two configurations of casting. Finally, we propose a minimum time of vibration required for compaction of the material and a maximum time to ensure a surface quality.

Keywords : Concrete ; Rheology ; Vibration ; Viscosity ; Yield stress fluid ;

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier vivement et sincèrement mon directeur de thèse, Nicolas Roussel. Il m'a beaucoup appris durant ces trois années. Ses approches scientifiques et ses réflexions ont fortement contribué à la réussite de mes travaux de recherche. Je lui suis fortement redevable. Nos nombreux échanges ont réussi à élaborer une approche critique sur mes propres productions. Cette expérience humaine, tant professionnelle que personnelle, m'a permis de mieux concevoir ma future vie professionnelle. Merci Nicolas.

Je remercie Jean-Michel Torrenti de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider mon jury de thèse. Je remercie également Geert de Schutter et Christophe Lanos pour avoir été rapporteur de ce manuscrit. Je les remercie pour leurs remarques et leurs critiques tant sur le fond du manuscrit que durant la soutenance. Je remercie Jérôme Dupoirier, François Cussigh et Thierry Sedran pour avoir contribué à juger mes travaux.

Je remercie l'entreprise EIFFAGE Construction pour son apport financier qui a permis de mettre en place ce travail de recherche. Je remercie mes encadrants industriels, Sandrine Chanut, Jérôme Dupoirier et Michel Guerinet pour les nombreux échanges et leur soutien pendant ces trois années. Je remercie Karen Carteron, Ninon Decorne et leurs collègues pour leur apport durant ces années.

Je remercie les collaborations mises en place par la Fédération Nationale des Travaux Publics et la Fédération Française du Bâtiment. Leurs soutiens, tant financier que scientifique, ont fortement contribué à l'élaboration de ce manuscrit. Je remercie tous les membres du comité technique qui ont suivi mes travaux : Sabine Darson, Sandrine Chanut, Jérôme Dupoirier, Michel Guerinet, François Cussigh, Lionel Linger, Philippe Gegout, Philippe Fonollosa, François Gaudin, Wilfried Pillard, Philippe Gotteland, Kaïs Mehiri, Sylvain Dehaut, Benjamin Daubilly, Didier Valem et Nicolas Roussel.

Je remercie la collaboration des entreprises Atlas Copco et Waker Neuson pour la mise à disposition de matériels vibrants. Je remercie respectivement Jean-Remy Chasse et Patrice BOFFO.

Je remercie tous les chantiers sur lesquels j'ai pu effectuer mes essais à l'échelle 1. Je remercie Brice RICHARD, Xavier GOMMIER et leurs équipes pour la réalisation des cages d'armatures sur le site Logements à Clichy, chantier EIFFAGE CONSTRUCTION. Je remercie Guillaume PONSAN, Agnieszka HYRA et leurs équipes sur le site de la Tour Majunga à Puteaux, chantier EIFFAGE CONSTRUCTION. Je remercie Sarah SAOUS et ses équipes sur le site Rosa Parks à Paris, chantier EIFFAGE TP. Je remercie Baptiste GOULAS, Matthieu BLIN et leurs équipes sur le site du Coruscant II à Saint-Denis, chantier PETIT, groupe VINCI. Je remercie Patrice PASQUIER, Thomas AUBIN et leurs équipes sur le site de recouvrement des voies SNCF à Paris, chantier EIFFAGE TP.

Je remercie Jean-Luc Clément pour ne jamais oublier qu'une thèse s'effectue en trois ans.

Je remercie Hugues Delahousse pour les nombreuses photos de mes échantillons et nos conversations.

Je remercie tous les membres passés et présent de l'équipe FM²D de m'avoir accueilli parmi eux.

Je remercie Claude, Fabrice, Patrick, Guillaume, Jean-Louis et Mickaël pour leur bonne humeur et leur sympathie. Je remercie Jeanne et Pauline pour leur soutien administratif. Je remercie Jean-François, pour sa joie de vivre permanente, son aide et sa disponibilité. Je remercie Ingrid, Jean-Daniel, Jérôme et Patrick pour l'aide à la réalisation de mes essais à l'échelle béton avec les quelques 10 m³ de matériaux fabriqués en laboratoire.

Je remercie mes collègues de bureau, Hela, Aurélie, Julie, Sandrine, Jennifer, Rim, Mickaël, Sylvain et Antoine de m'avoir tant apporté humainement pour cette première expérience professionnelle.

Je remercie Julie et Pauline pour avoir supporté mes humeurs.

Je remercie Sylvain pour nos franches camaraderies durant toute la période de rédaction.

Je remercie Patrick et Thibaud pour nos séances de footing.

Je remercie aussi mes collègues et amis enseignants du département Génie Civil de l'IUT de Marne-la-Vallée. Merci vivement à Gilles pour m'avoir permis d'effectuer mes premières armes d'enseignant et mes derniers travaux de recherches. Ainsi, je remercie Virginie, Isabelle, Chantal, Bénédicte, Anne, Christophe, Gilles, Stéphane et Thierry.

Je tiens aussi à remercier Sébastien sans qui cette aventure n'aurait pas été possible.

Un très grand merci envers mes parents, mon frère, ma belle-sœur et toute ma famille. Enfin, mes pensées se tournent vers Louise pour être toujours restée à mes côtés, de me procurer énormément de bonheur et de nous avoir apporté Mäelle... Merci Lou.

Table des notations

a	Amplitude totale de l'aiguille
a_0	Amplitude de l'onde vibration contre l'aiguille vibrante
A_i	Aire du défaut d'indice i
A_R	Amplitude de l'onde de vibration au rayon r
c	Célérité du son
d_b	Diamètre du balourd
D	Diamètre d'action
D'	Diamètre d'action corrigé
D_0	Diamètre de l'aiguille vibrante
D_A	Diamètre moyen des bulles d'air sans vibration
D_{EFF}	Diamètre d'action efficace
D_G	Diamètre d'une particule mise en agitation
D_M	Diamètre moyen des défauts
D_i	Diamètre du défaut d'indice i
e	Distance entre le centre de gravité du balourd et celui de l'aiguille vibrante
E/C	Ratio massique Eau/Ciment
f	Fréquence
F	Effort d'arrachement
F_C	Force centrifuge
F_{C1}	Force centrifuge 1
F_{C2}	Force centrifuge 2
F_{NV}	Effort d'arrachement sans vibration
F_N	Effort d'arrachement avec vibration
g	Accélération gravitationnelle terrestre

h_0	Hauteur de la LCPC Box
h_b	Hauteur du balourd
H_0	Hauteur initiale du cône d'Abrams
H_v	Hauteur vibrée
k	Coefficient de fit
l_0	Largeur de la LCPC Box
L	Longueur caractéristique de l'écoulement
L_E	Distance d'enrobage
m_b	Masse du balourd
m_v	Masse vibrée
m_T	Masse totale du corps vibrant
n	Indice d'écoulement du fluide
n_d	Nombre total de défauts
p	Épaisseur de la couche vibrée
P_D	Puissance dissipée
P_M	Puissance active
P_S	Porosité de surface
q	Épaisseur de pénétration du vibreur
r	Distance au vibreur
r_E	Rayon d'une éprouvette 16/32
R	Rayon de la galette
R_0	Rayon de l'aiguille vibrante
S	Affaissement au cône d'Abrams
S_V	Surface totale des défauts
S_T	Surface de l'échantillon
t	Durée totale d'application de la vibration
t_{\min}	Durée minimale d'application du pervibrateur
T	Temps de vibration
T_{C1}	Temps caractéristique de compaction
T_{C2}	Temps caractéristique de remontée des bulles
T_A	Durée d'affaissement

v_a	Vitesse de remonté du vibreur
v_{ac}	Vitesse de l'onde de compression à l'interface vibré/non vibré
v_r	Vitesse de l'onde de cisaillement
v_{rc}	Vitesse de l'onde de compression
V_V	Volume vibrée
w	Enveloppe extérieure d'une aiguille vibrante
β	Coefficient réducteur du diamètre d'action
ϕ	Fraction volumique solide
ϕ_m	Fraction volumique d'empilement maximal
γ_c	Déformation critique
$\dot{\gamma}$	Gradient de vitesse
$\dot{\gamma}(D)$	Gradient de vitesse en fonction de la distance, D , au vibreur
ρ	Masse volumique
ρ_b	Masse volumique du béton
ρ_c	Masse volumique du ciment
ρ_E	Masse volumique de l'eau
τ	Contrainte de cisaillement
τ_0	Contrainte seuil
τ_{max}	Contrainte maximale
μ_P	Viscosité plastique
Ω	Volume de l'échantillon
λ	Coefficient d'amortissement du béton
Δ_S	Déplacement relatif

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 Pervibration des bétons – définition des objectifs de l'étude 7

1.1	Le matériel de vibration	8
1.1.1	Vibration interne ou vibration externe	8
1.1.2	Fonctionnement d'une aiguille vibrante	9
1.1.3	Types d'aiguilles	10
1.1.3.1	Vibreux mécanique	10
1.1.3.2	Vibreux pneumatique	11
1.1.3.3	Vibreux électrique.....	11
1.1.3.4	Vibreux électronique.....	12
1.2	Le matériau béton : usage et formulation	13
1.2.1	Usage	13
1.2.2	Formulations.....	14
1.3	Ouvrabilité et rhéologie.....	16
1.3.1	Lois de comportement	17
1.3.2	Ordres de grandeur des paramètres rhéométriques.....	18
1.3.3	Transition entre comportement visqueux et frictionnel.....	20
1.3.4	Mesures du seuil	21
1.3.4.1	Test au Mini-cône.....	21
1.3.4.2	Affaissement au cône d'Abrams	22
1.3.4.3	LCPC Box	23
1.3.5	Mesure de la viscosité	23

1.4	Contexte environnemental et sociétal : conséquences sur formulation et fluidité.....	25
1.5	Effets de la vibration sur le matériau : vibration et fluidité.....	26
1.5.1	L'utilisation de la vibration	26
1.5.1.1	Rappel historique.....	26
1.5.1.2	État de sous-vibration	27
1.5.1.3	État de sur-vibration	28
1.5.1.4	État de « bonne » vibration.....	28
1.5.2	Vibration interne et seuil d'écoulement	28
1.5.2.1	La vibration et la fluidité	28
1.5.3	Distance d'application entre les vibreurs	30
1.5.4	Durée d'applications de la pervibration	32
1.5.5	Phénomène(s) perturbateur(s)	33
1.6	Méthodologie retenue pour l'étude.....	34
1.7	Références du chapitre	37

Chapitre 2 Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?.. 43

2.1	Choix des matériaux et matériels d'études.....	46
2.1.1	Paramètres de formulation.....	46
2.1.2	Formulations expérimentales.....	47
2.1.3	Matériels.....	49
2.2	Résultats expérimentaux des propriétés traditionnelles.....	50
2.2.1	Protocole général.....	50
2.2.2	Effets de la vibration sur la masse volumique.....	51
2.2.2.1	Masse volumique globale.....	51
2.2.2.2	Masse volumique périphérique et à cœur.....	52
2.2.3	Effets de la vibration sur les résistances mécaniques	54
2.2.3.1	Complément du protocole expérimental	54
2.2.3.2	Résistance en compression simple	55
2.2.3.3	Résistance en traction simple	55

2.2.4	Analyse des études traditionnelles – Influence sur le remplissage.....	56
2.3	Effets de la vibration sur l’aspect de parement.....	58
2.3.1	Présentation macroscopique	59
2.3.2	Développement d’un outil d’analyse d’image.....	60
2.3.3	Protocole expérimental.....	61
2.3.4	Résultats expérimentaux.....	62
2.3.5	Analyse de l’aspect de parement	64
2.4	Évolution de l’adhérence acier/béton.....	65
2.4.1	Présentation générale.....	65
2.4.2	Essai d’adhérence.....	66
2.4.2.1	Description	66
2.4.2.2	Résultats théoriques.....	66
2.4.3	Protocole expérimental.....	67
2.4.3.1	Matériaux et matériels	67
2.4.3.2	Configurations d’étude	68
2.4.3.3	Préparation des échantillons.....	69
2.4.4	Résultats expérimentaux.....	69
2.5	Analyse.....	71
2.6	Conclusions du chapitre	73
2.7	Références du chapitre	76

Chapitre 3 Caractérisations rhéologiques des matériaux 79

3.1	Mesures rhéométriques.....	81
3.1.1	Étude des pâtes de ciment.....	81
3.1.2	Études des bétons	84
3.1.3	Matériaux.....	85
3.1.4	Résultats	87
3.2	Mesure pratique de la viscosité des bétons.....	88
3.2.1	A partir de la table à choc.....	88

3.2.2	A partir du cône renversé	91
3.3	Conclusions du chapitre	92
3.4	Références du chapitre	93

Chapitre 4 Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ? 95

4.1	Comportement mécanique.....	98
4.1.1	Relation amplitude – diamètre.....	98
4.1.2	Relation diamètre théorique-diamètre	99
4.1.3	Relation force centrifuge - diamètre.....	100
4.1.4	Les recommandations traditionnelles	103
4.2	Prédiction du rayon d'action	104
4.2.1	Modélisation mécanique.....	104
4.2.2	Description du montage expérimental.....	106
4.2.2.1	Matériels.....	106
4.2.2.2	Calibration des caractéristiques des aiguilles	108
4.2.3	Protocole expérimental.....	111
4.3	Résultats	112
4.3.1	Lien avec les recommandations traditionnelles.....	112
4.3.2	Pâtes de ciment et bétons ordinaires.....	114
4.3.3	Les bétons visqueux et fortement visqueux.....	116
4.4	Analyses	117
4.4.1	Validation et comparaison du modèle mécanique.....	117
4.4.2	Singularité des bétons visqueux	121
4.4.2.1	Migration locale du matériau.....	121
4.4.3	Effet de la puissance des aiguilles vibrantes	124
4.4.3.1	Puissance dissipative du matériau vibré.....	124
4.4.3.2	Puissance active du vibreur	125
4.4.3.3	Relation entre les puissances	126
4.4.4	Perspective d'évolution	127

4.5	Application du rayon d'action pour des éléments verticaux	129
4.5.1	Étude en laboratoire.....	129
4.5.2	Matériaux et matériels	130
4.5.2.1	Essais en laboratoire	130
4.5.2.2	Essais in situ	131
4.5.3	Protocole.....	131
4.5.4	Résultats expérimentaux et analyse.....	132
4.5.4.1	Résultats expérimentaux.....	132
4.5.4.2	Analyse.....	132
4.5.5	Étude <i>in situ</i> des poutres à l'échelle 1	133
4.5.5.1	Présentation des essais.....	133
4.5.5.2	Résultats	134
4.5.5.3	Analyse.....	135
4.6	Conclusions du chapitre	136
4.7	Références du chapitre	138

Chapitre 5 Quelle est la durée idéale de vibration d'un béton ? 139

5.1	Influence de la durée de vibration	141
5.1.1	Approche dimensionnelle.....	141
5.1.1.1	Temps caractéristique de compaction	142
5.1.1.2	Temps caractéristique de remontée des bulles	142
5.1.2	Description du montage expérimental.....	143
5.1.2.1	Matériels et matériaux	143
5.1.2.2	Protocole expérimental.....	143
5.1.3	Résultats expérimentaux.....	144
5.1.3.1	Temps de remplissage	144
5.1.3.2	Temps de remontée des bulles d'air	144
5.1.3.3	Essais in situ	145
5.2	Étude de l'apparition de la ségrégation	147

5.2.1	Matériels et matériaux	147
5.2.2	Protocole expérimental.....	147
5.2.2.1	Remplissage des coffrages	147
5.2.2.2	Mesure de la répartition spatiale des granulats.....	148
5.2.3	Résultats expérimentaux.....	149
5.2.3.1	Essais en laboratoire	149
5.3	Conclusions du chapitre	150
5.4	Références du chapitre	151
	Conclusion générale	153

Introduction générale

Le béton à l'état frais a un aspect de pierre liquide. Les granulats qui le composent sont portés par une pâte visqueuse qui s'écoule sous l'action d'un effort. Sa fabrication nécessite des ressources naturelles fortement disponibles, réparties sur l'ensemble de la planète et peu coûteuses. De plus, sa maniabilité aisée assure l'obtention d'éléments de formes complexes et nécessite une main d'œuvre peu qualifiée. Enfin, à l'état durci, le béton fournit des résistances mécaniques importantes et permet la réalisation d'ouvrages imposants comme les grands viaducs ou les immenses gratte-ciel construits au début du XXI^{ème} siècle. Ainsi, tous ses avantages lui confèrent le statut de matériau le plus consommé dans le monde.

Parallèlement, le processus de fabrication du béton produit des émissions importantes de CO₂. Le contexte environnemental et sociétal actuel met en évidence le besoin de réduire, par un facteur quatre, la production de gaz à effet de serre d'ici 2050. Afin d'atteindre cet objectif, les recherches actuelles ont soulevé plusieurs leviers technologiques. La source principale des émissions de CO₂ au sein du béton provient du ciment. Ainsi, les bétons actuels connaissent des adaptations majeures de leur formulation modifiant fortement leur comportement à l'état frais.

Les recommandations nationales et internationales de mise en œuvre du béton proposent l'application d'une vibration, interne ou externe, pour le mettre en œuvre. D'un point de vue macroscopique, elle liquéfie localement le matériau, favorise son écoulement à travers les armatures métalliques et aide son compactage. Traditionnellement, au sein des chantiers de construction, la vibration interne par aiguille vibrante, aussi nommé pervibration, constitue la technique la plus utilisée. Cependant, les travaux de recherches, à l'origine des règles de bonnes pratiques actuelles, furent établis au début de la seconde moitié du siècle précédent et ne peuvent tenir compte des évolutions récentes du comportement des bétons à l'état frais. En effet, plusieurs cas sont apparus récemment *in situ* montrant les limites d'application des recommandations traditionnelles.

Bien que les connaissances sur la rhéologie des matériaux cimentaires ont fortement progressé ces vingt dernières années, l'arrivée sur les marchés des bétons fluides à auto-plaçant a aussi freiné tout effort de recherche sur la vibration pendant cette période. Les nouvelles connaissances dont nous disposons actuellement sur la rhéologie, les interactions entre particules et la simulation des écoulements nous permettent aujourd'hui de revenir sur ce sujet de façon à en obtenir une meilleure compréhension.

Dans ce contexte, nous choisissons de revisiter les recommandations actuelles sur la vibration des bétons. Ainsi, à partir de la littérature actuelle existante et des évolutions récentes des formulations de béton, nous cherchons à apporter des éléments de réponses aux trois questions suivantes :

- 1) Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?
- 2) Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ?
- 3) Quelle est la durée idéale de vibration d'un béton ?

Tout d'abord, nous présenterons dans le premier chapitre, les connaissances existantes sur la technologie des matériels vibrants ainsi que leurs actions sur le comportement rhéologique des bétons. Nous montrons que l'application d'une pervibration doit assurer une répartition spatiale homogène des particules du béton afin d'assurer un matériau de qualité. Pour y parvenir, nous identifions deux paramètres principaux à l'origine de notre démarche scientifique. Le premier correspond à la distance d'espacement entre les points d'application du vibreur. Le second constitue la durée idéale de vibration. Enfin, nous établirons la nécessité de mesurer le seuil et la viscosité des matériaux cimentaires.

Dans le chapitre suivant, nous tenterons de répondre à notre **première question**. Nous choisissons d'étudier les propriétés macroscopiques à l'état durci de bétons de consistances variées en fonction du mode de vibration appliquée. Ainsi, nous comparerons deux états de vibration. Le premier suit les recommandations traditionnelles de mise en œuvre tandis que le second correspond à une absence totale de vibration. Nous comparerons nos résultats avec une analyse dimensionnelle simple afin de caractériser un critère permettant de répondre à la question : « Quand est-il nécessaire de vibrer un béton ? ».

Dans le chapitre 3, nous présenterons les formulations des matériaux cimentaires utilisés pour nos essais. Nous fournirons les protocoles de mesures rhéologiques et identifierons la difficulté d'obtenir la viscosité des bétons à partir d'un essai simple, peu coûteux et facilement réalisable *in situ*.

Dans le chapitre 4, nous tenterons de répondre à **notre deuxième question** en mesurant empiriquement le diamètre d'action d'une aiguille vibrante plongée dans des matériaux cimentaire de

consistances variées. Nous comparerons nos résultats avec un modèle analytique simple prenant en compte les caractéristiques mécaniques du vibreur et les propriétés rhéologiques des matériaux. Nous validerons notre approche avec une configuration de vibration horizontale similaire à la mise en œuvre de plancher de bâtiment. En revanche, avec une configuration verticale, semblable à la mise en œuvre de voile ou de poutre, nous mettrons en évidence une transmission ou une réverbération de la vibration par les faces coffrantes.

Enfin, dans le chapitre 5, nous tenterons de répondre à **notre troisième question** à partir de vidéos de remplissage des coffrages composés d'une paroi transparente, nous mesurerons deux temps caractéristiques. Le premier correspond à la durée de remplissage des coffrages et le second à la durée de remontée des bulles d'air en surface. Nous comparerons nos résultats avec une approche dimensionnelle simple. Enfin, pour les formulations testées, nous mettrons en évidence que malgré des durées de vibrations de plusieurs dizaines de secondes, nous ne mesurons pas l'apparition d'une ségrégation sur nos échantillons.

Chapitre 1

Pervibration des bétons – définition des objectifs de l'étude

Chapitre 1

Pervibration des bétons – définition des objectifs de l'étude

Pour comprendre les différents phénomènes en action lors de la mise en œuvre du béton, nous proposons de décrire à titre introductif le comportement mécanique d'une aiguille vibrante (1) plongée dans ce matériau (2). Nous représentons sur la Figure 1.1 l'enchaînement chronologique des phénomènes mis en évidence à partir de simples observations visuelles.

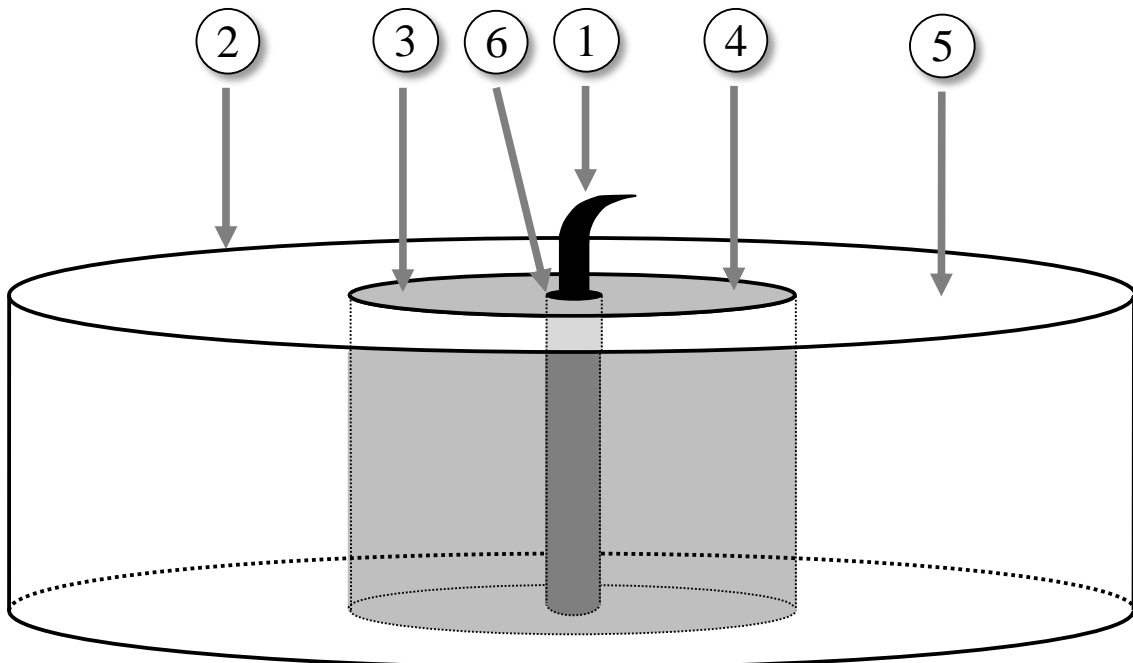


Figure 1.1. Observations visuelles de l'utilisation d'une aiguille vibrante plongée dans un matériau cimentaire.

Tout d'abord, à proximité du vibreur, nous observons presque instantanément une liquéfaction du béton. Après quelques secondes de vibration, la rugosité de surface du matériau se lisse, traduisant une

chute des composants les plus lourds et les plus grossiers au fond du moule, conjointement associée à une remontée d'éléments moins lourds et plus fins (3). De plus, en augmentant la durée d'application de la vibration, de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes, des bulles d'air apparaissent en quantité importante au niveau de la surface libre (4). Parallèlement, à une distance suffisamment loin de l'aiguille vibrante, nous n'observons aucune modification de rugosité de surface ni de remontée de bulles (5). Ainsi, il semble exister une zone d'action du matériel. Finalement, contre la paroi du vibreur, de nombreuses particules fines de tailles millimétriques sont projetées dans l'air (6).

Cette expérience simple montre que la vibration des bétons est un processus complexe. A partir de la littérature, nous proposons dans ce chapitre d'étudier successivement l'ensemble des points listés de façon à préciser la question que nous souhaitons traiter dans ce manuscrit.

1.1 Le matériel de vibration

Dans le cas d'une utilisation *in situ*, la pervibration ou vibration interne est le mécanisme de vibration le plus fréquemment utilisé tandis qu'au sein des usines de préfabrication d'éléments en béton ou en béton armé, la vibration externe est le mode de vibration privilégié.

1.1.1 Vibration interne ou vibration externe

Pour mettre en œuvre le béton, la technique la plus couramment utilisée sur les chantiers de construction est la pervibration [1,2]. Celle-ci consiste en l'enfoncement répétitif d'une aiguille vibrante dans le matériau frais. La Figure 1.2 présente l'utilisation d'un vibreur sur un chantier de construction. La pénétration successive du vibreur génère intrinsèquement une vibration hétérogène dans le matériau. Enfin, elle sollicite le savoir-faire d'un ou plusieurs compagnons durant toute l'étape de remplissage des coffrages.

Dans le cas d'une préfabrication en usine, la vibration externe est le mode de mise en œuvre préférentiel [1]. Deux modes de vibration existent. Le premier correspond à une sollicitation verticale homogène avec l'utilisation de table vibrante sous toute la surface de l'élément à vibrer. La seconde se compose de moteurs électriques fixés sur les parois coffrantes. Les vibreurs, fixés à intervalles réguliers contre les parois des moules, génèrent une vibration homogène sur toute la surface d'application. De plus, cette technique permet la mise en place d'une programmation centralisée et nécessite une main d'œuvre peu nombreuse pendant la phase de remplissage. En revanche, une adaptation sur chantier présente de nombreuses difficultés (manutention délicate, gestion des réseaux électriques...) limitant son déploiement à la préfabrication. La Figure 1.3 présente deux exemples de vibrations externes par fixation de moteurs sur les parois coffrantes.



Figure 1.2. Exemple d'une vibration interne d'un élément horizontal (dalle de plancher).

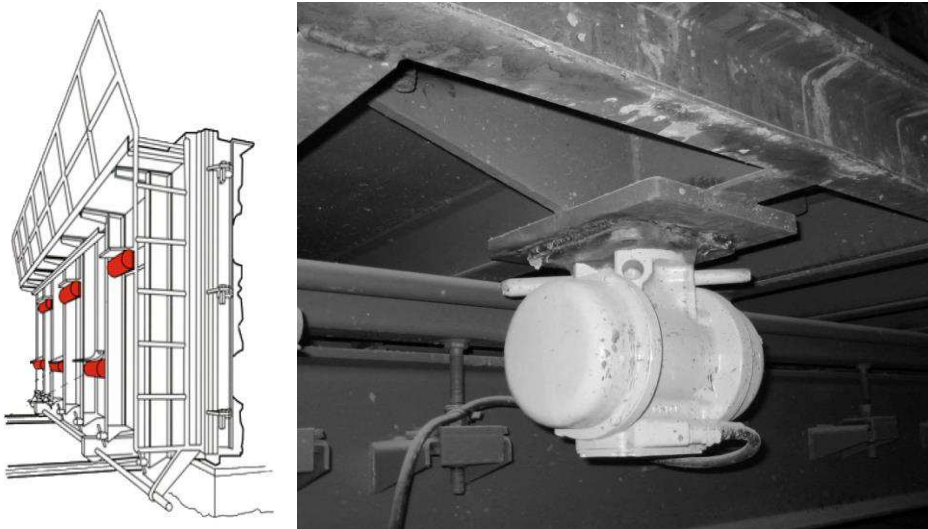


Figure 1.3. Exemples de moteurs vibrants fixés sur des coffrages. Vibration externe d'éléments verticaux (gauche) [3] et d'éléments horizontaux (droite). [1].

Notre étude a pour objectif d'interpréter les phénomènes mis en jeu pendant la vibration des bétons sur les chantiers de construction. Par conséquent, nos travaux se focaliseront sur la pervibration des matériaux avec des configurations semblables à celles rencontrées *in situ*.

1.1.2 Fonctionnement d'une aiguille vibrante

Nous représentons sur la Figure 1.4, une coupe intérieure d'une aiguille vibrante traditionnelle de chantier. Le bâti vibrant comprend une partie mobile, constituée d'une masse tournante appelée balourd, et d'une partie fixe correspondant à l'enveloppe extérieure.

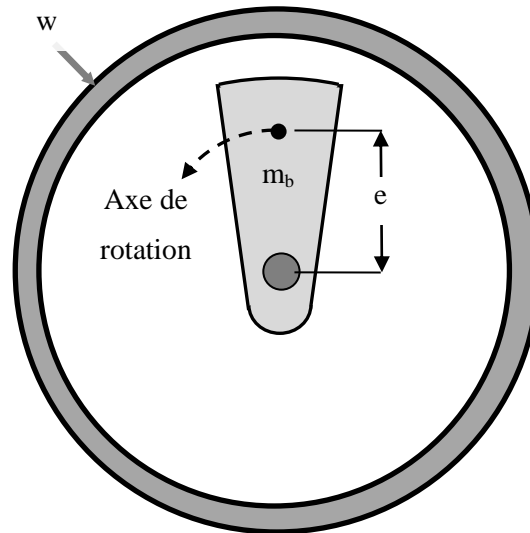


Figure 1.4. Coupe intérieure d'une aiguille vibrante.

Soit :

w : enveloppe extérieure fixe,

m_b : la masse tournante ou balourd,

e : la distance entre le centre de gravité du balourd et celui de l'aiguille vibrante.

Bien qu'il existe plusieurs types d'aiguilles vibrantes, cette représentation correspond à un fonctionnement généralisable à tous les vibreurs internes.

1.1.3 Types d'aiguilles

1.1.3.1 Vibreur mécanique

Historiquement, les vibreurs mécaniques sont les premiers matériels vibrants disponibles dans le commerce. Ils sont alimentés et reliés à un moteur thermique individuel, ce qui constitue leur inconvénient majeur. De plus, leur vitesse de rotation a tendance à diminuer avec l'augmentation du diamètre. Leur utilisation est de moins en moins fréquente sur les chantiers de construction. En fonction des constructeurs, leur diamètre varie entre 25 et 75 mm avec une amplitude comprise entre 0,3 et 2,4 mm et une fréquence évoluant entre 150 et 210 Hz. (Cf. Annexe 1.1).



Figure 1.5. Aiguille vibrante mécanique [3].

1.1.3.2 Vibreur pneumatique

Les vibreurs pneumatiques sont très répandus. Ils nécessitent un raccordement avec un générateur d'air comprimé. Celui-ci peut accueillir plusieurs aiguilles simultanément. Ils présentent des diamètres dont la taille peut atteindre 1,5 fois la dimension des plus gros vibreurs des autres catégories. Ces dimensions importantes leur confèrent, dans la pratique, un rôle particulier pour une utilisation au sein des constructions de barrages hydrauliques, les volumes à vibrer étant nettement plus important qu'une poutre de bâtiment. Cependant, cette catégorie de pervibrateur délivre un niveau de bruit compris entre 85 et 100 dB(A) tandis que celui des vibreurs électriques est inférieur à 85 dB(A). Il faut noter que d'après l'Institut national de recherche et de sécurité, l'audition est considérée en danger lorsqu'un niveau de bruit dépasse 80 dB durant une journée de travail [4]. Enfin, en fonction des constructeurs, le diamètre de ces aiguilles varie entre 25 et 155 mm avec une amplitude comprise entre 0,5 et 2,6 mm et une fréquence évoluant entre 170 et 400 Hz. (Cf. Annexe 1.1).



Figure 1.6. Aiguille vibrante pneumatique [3].

1.1.3.3 Vibreur électrique

Les vibreurs électriques constituent une gamme très utilisée de matériel sur les chantiers de construction. Ils sont connectés électriquement à un mini compresseur qui transforme une puissance

mécanique en une puissance électrique d'alimentation des aiguilles vibrantes. Ces moteurs peuvent constituer la source d'alimentation de plusieurs matériels en parallèle. Ils assurent une fréquence de fonctionnement fixe de 200 Hz. Enfin, en fonction des constructeurs, le diamètre de ces aiguilles varie entre 28 et 80 mm avec une amplitude comprise entre 0,9 et 5,0 mm. (Cf. Annexe 1.1).



Figure 1.7. Aiguille vibrante électrique (gauche). Convertisseur électrique transportable (droite) [3].

1.1.3.4 Vibreur électronique

Une variante des précédents vibreurs consiste à remplacer le mini compresseur par un circuit électronique qui assure les transformations électriques nécessaires au fonctionnement du vibreur. Ils présentent l'avantage de pouvoir se connecter directement sur des courants faibles traditionnels (50 Hz, 220 V). Cette spécificité permet un gain de location de matériel et une diminution de la puissance électrique des installations de chantier. Leurs caractéristiques de vibration sont similaires à celles des vibreurs électriques. (Cf. Annexe 1.1).



Figure 1.8. Aiguille vibrante électronique [5].

Par conséquent, en fonction des constructeurs et du type de vibreur, les caractéristiques de ces matériels présentent de nombreuses variations. Néanmoins, parmi l'ensemble des paramètres présentés, une grandeur semble peu varier. En effet, la fréquence de rotation du balourd se situe aux alentours de 200 Hz à quelques exceptions près. D'un point de vue général, l'amplitude des aiguilles

vibrantes varie entre 0,3 mm et 5,0 mm pour des diamètres compris entre 25 mm et 155 mm. Nous étudions plus en détails au sein du Chapitre 3 l'influence de ces dimensions sur l'efficacité des aiguilles vibrantes.

Enfin, il est important de garder à l'esprit que l'ensemble des caractéristiques mécaniques des aiguilles vibrantes (fréquence, amplitude, ...) résumées dans les paragraphes précédents sont uniquement valables pour un fonctionnement dans l'air. En effet, les constructeurs ne garantissent pas ces données lorsque les vibreurs sont plongés dans des matériaux cimentaires.

1.2 Le matériau béton : usage et formulation

1.2.1 Usage

Le béton répond à de nombreux besoins tels qu'une maniabilité aisée, une disponibilité importante sur l'ensemble de la planète et des résistances mécaniques élevées pouvant atteindre jusqu'à 200 MPa en compression simple [6]. De plus, la Figure 1.9 montre que son coût est relativement faible par rapport aux autres matériaux de la construction et des produits de consommation de la vie courante [7] Ainsi, l'ensemble de ces avantages lui confère le statut de matériau le plus utilisé dans le monde avec une consommation mondiale supérieure à 20 milliards de tonnes par an [8]. Afin d'obtenir les caractéristiques précédentes, il a fallu plus d'un siècle et demi d'évolution.

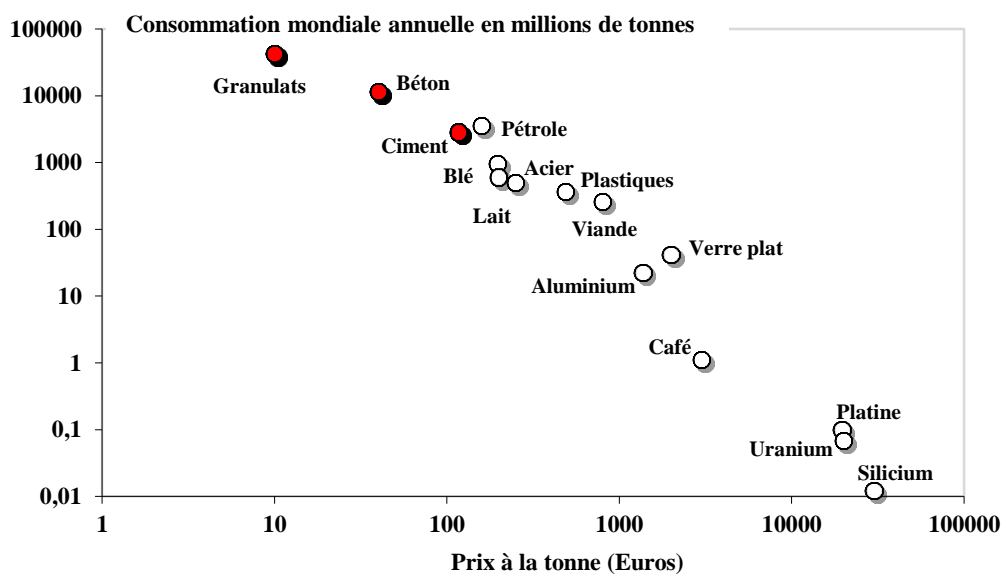


Figure 1.9. Consommation mondiale annuelle des matériaux en fonction de leur prix à la tonne. [7]

Le béton est un matériau composite dont la dimension des particules s'étale sur près de 7 décades allant de quelques nanomètres pour le rayon de giration des polymères composant les adjuvants, à plusieurs centimètres pour les graviers.

1.2.2 Formulations

Un béton est formulé classiquement à partir d'un squelette granulaire composé de sables et de graviers et d'un liant hydraulique, obtenu par un mélange de ciment et d'eau, appelé pâte de ciment. Les différentes proportions volumiques de ces constituants sont présentées dans le tableau suivant :

Constituant	Air (%)	Eau (%)	Ciment (%)	Granulats (%)
Proportion volumique (%)	1 – 6	14 – 22	7 – 14	60 – 78

Tableau 1.1. Proportions volumiques traditionnelles des constituants d'un béton ordinaire.

Ces différents composants confèrent au matériau ses propriétés d'écoulement à l'état frais ainsi que ses caractéristiques à l'état durci. En effet, suivant les proportions retenues, ces dernières varient fortement. Deux paramètres de premier ordre dictent le comportement du béton. Le premier est lié à la qualité de la pâte de ciment qui conditionne la résistance à travers le rapport massique Eau/Ciment, (E/C). Lorsqu'il est élevé, le béton sera fluide facilitant sa mise en œuvre, mais la résistance mécanique en compression sera affaiblie. Si, le ratio E/C est bas, le béton aura une consistance très ferme et sa résistance sera élevée. Cependant, sa faible maniabilité entraînera une augmentation importante de la pénibilité du travail sur le chantier.

Le second paramètre correspond à la compacité du squelette granulaire, qu'il est possible de relier au premier ordre au rapport massique Graviers/Sable, noté G/S. Plus le squelette est compact, plus le volume de pâte de ciment nécessaire pour combler les vides entre les grains sera faible. D'un point de vue pratique, il est préférable d'obtenir une quantité de pâte de ciment la plus basse possible car le ciment constitue le composé le plus onéreux d'un béton.

D'un point de vue pratique, pour quantifier la fluidité d'un béton, le test le plus courant est l'essai au cône d'Abrams. Dans le cas des bétons ordinaires [9], cet essai consiste à remplir un cône de matériau frais et de mesurer la hauteur d'affaissement de l'échantillon lorsque le cône est soulevé. Pour des bétons beaucoup plus fluides tels que les Bétons Auto-Plaçant [10], la fluidité du matériau est décrite par le diamètre de l'échantillon après étalement. Les normes NF EN 206-1 [11] et NF EN 206-9 [12], respectivement pour les bétons ordinaires et les BAP, indiquent des classes de consistance en fonction des résultats de ces essais (Cf Tableau 1.2).

Classe	Affaissement (mm)	Classe	Étalement (mm)
S1	0 à 40	SF1	550 à 650
S2	50 à 90	SF2	660 à 750
S3	100 à 150	SF3	760 à 850
S4	160 à 210		
S5	> 220		

Tableau 1.2. Classe de consistance des bétons ordinaires (gauche). Classe d'étalement des BAP (droite).

Un des avantages principaux du béton est sa résistance en compression simple, notée F_{c28} et mesurée 28 jours après sa fabrication. Les progrès scientifiques des 50 dernières années ont permis de créer des bétons dont les résistances mécaniques varient fortement. La classification suivante est communément admise :

Classe de béton	F_{c28} (MPa)	Domaines d'utilisation (exemple)
Béton ordinaire, BO	20 à 50	Bâtiment d'habitation ou de bureau
Béton à haute performance, BHP	50 à 100	Immeuble de grande hauteur, pont
Béton à très haute performance, BTHP	100 à 150	Ouvrage d'art
Béton ultra haute performance BUHP	> 150	Emplois spécifiques

Tableau 1.3. Classification des bétons en fonction de leur résistance et domaine d'emploi associé.

Le tableau précédent propose des domaines d'emploi, non exhaustifs, du béton en fonction de ses propriétés mécaniques. L'emploi des bétons à ultra haute performance n'est pas aussi répandu que les autres classes car ce type de matériau est pour le moment majoritairement préfabriqué en usine et nécessite des exigences particulières. Deux réalisations phares de ce matériau sont la passerelle piétonne du Pont du Diable [13] et la couverture de la barrière de péage du Viaduc de Millau [14].

Afin d'obtenir des bétons à haute et ultra haute performance, la formulation classique présentée précédemment dans le Tableau 1.1 nécessite plusieurs aménagements. Le but est d'obtenir un matériau avec une porosité minimale. En effet, plus un béton est compact et plus sa résistance en compression simple sera importante. Pour y parvenir, deux orientations principales d'améliorations coexistent : améliorer le squelette granulaire et/ou la qualité de la matrice cimentaire. La première consiste en l'incorporation de particules fines dont la granulométrie doit permettre une augmentation de la compacité du squelette granulaire et ainsi améliorer la résistance mécanique [15]. En effet, la Loi de Caquot [16] relie la compacité d'un mélange à l'étendue granulaire à partir de l'équation. Classiquement, les éléments fins utilisés dans les formulations des BHP et BTHP correspondent à des fillers, des cendres volantes ou des fumées de silices dont ces dernières ont aussi un rôle important sur

la réaction d'hydratation du ciment [17,18]. Enfin, pour étudier l'influence de l'arrangement granulaire, il est possible de se référer aux nombreuses études réalisées par De Larrard [19].

Du point de vue des résistances mécaniques, pour améliorer l'efficacité de la pâte de ciment, il est nécessaire de formuler des bétons avec un ratio Eau/Ciment le plus petit possible couplé à un volume de pâte de ciment minimal. En effet, le but recherché est identique à celui présenté préalablement avec la compacité du squelette granulaire. Pour estimer la compacité des pâtes de ciment, nous étudions la fraction volumique solide, notée ϕ , de ces matériaux. Par définition, la fraction volumique solide d'une suspension quelconque correspond au ratio du volume total des éléments divisé par le volume total de la suspension. Dans le cas des pâtes de ciment, nous relierons ϕ avec le ratio E/C tel que :

$$\phi = \left(1 + \frac{E}{C} \times \frac{\rho_C}{\rho_E}\right)^{-1} \quad (1.1.)$$

Avec :

ϕ : la fraction volumique solide, (-).

ρ_C : la masse volumique du ciment, (kg.m⁻³).

ρ_E : la masse volumique de l'eau, (kg.m⁻³)

Par conséquent, pour des pâtes de ciment avec un ratio E/C proche de 0,3, la fraction volumique de ces suspensions est environ égale à 52% et se rapproche de l'empilement théorique maximal granulaire de sphère de taille identique égal à 64%. En effet, il est possible d'approximer les poudres de ciment à des particules de même diamètre proche de 10 μm [20]. Ainsi, les systèmes fortement concentrés que constituent les pâtes de ciment à faible ratio E/C possèdent des consistances très fermes. Afin d'assurer une fluidité adéquate de ces matériaux, le recours à une adjuvantation massive à partir de polymères organiques appelés plastifiants ou superplastifiants est nécessaire [21,22,23,24].

Notre étude sur la vibration des bétons se limitera exclusivement au béton ordinaire et au béton à haute performance car ces deux matériaux correspondent aux familles des matériaux les plus répandues sur les chantiers de construction.

1.3 Ouvrabilité et rhéologie

La rhéologie est par définition l'étude de l'écoulement des corps sous l'effet des contraintes qui leur sont appliquées. L'application de cette science est assez récente dans le domaine de la construction mais elle est très développée dans de nombreuses industries telles que l'agroalimentaire ou celle des cosmétiques. Dans les sections suivantes, nous nous focalisons essentiellement sur le comportement des matériaux cimentaires.

1.3.1 Lois de comportement

Le comportement à l'état frais des bétons est souvent représenté comme un fluide à seuil visqueux à partir d'un modèle de Bingham. En effet, ces matériaux sont capables de supporter une contrainte minimale, τ_0 , sans se déformer, puis, dès que celle-ci est dépassée, le matériau s'écoule plus ou moins rapidement en fonction de sa viscosité, cf. Figure 1.10 et Figure 1.11. Une première tentative d'étude fût proposée par L'Hermitte [25]. Les travaux de Tattersal et Banfill [26] et de De Larrard et Hu [27] ont concrétisé cette modélisation. La représentation la plus classique décrit la contrainte d'écoulement du matériau τ en fonction de la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ appliquée telle que :

$$\dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_0 \quad (1.2.)$$

$$\dot{\gamma} \neq 0, \tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1.3.)$$

Avec :

τ : la contrainte du matériau, (Pa).

τ_0 : la contrainte seuil du matériau, (Pa).

μ_p : la viscosité plastique, (Pa.s).

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse, (s^{-1}).

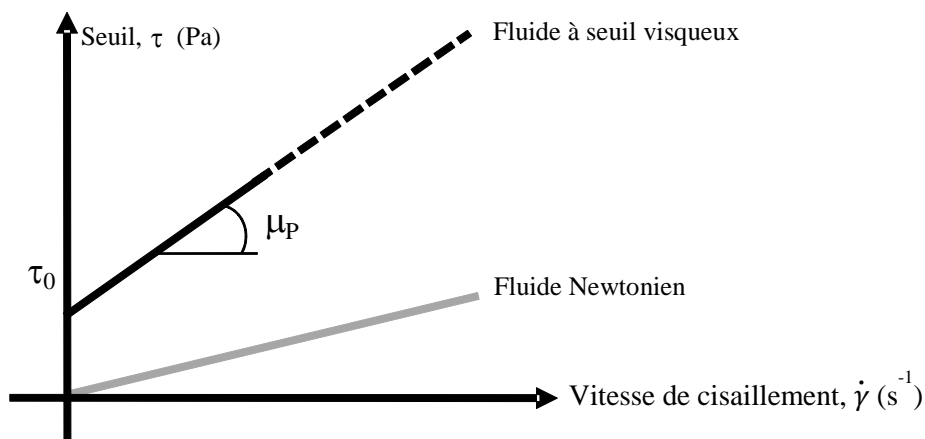


Figure 1.10. Évolution de la contrainte en fonction du cisaillement.

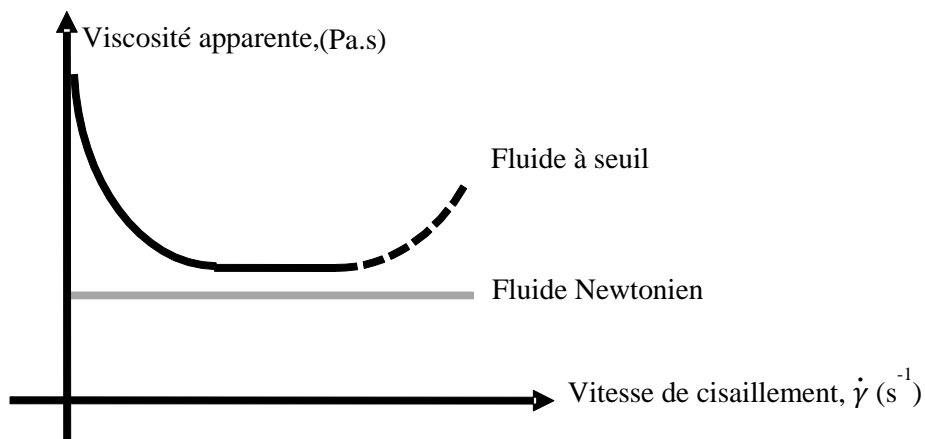


Figure 1.11. Évolution de la viscosité en fonction du cisaillement.

D'un point de vue pratique, le seuil d'un béton correspond à son aptitude à remplir correctement un coffrage tandis que sa viscosité peut-être associée à la vitesse de remplissage du moule une fois l'écoulement établi [28].

En fonction des formulations des bétons, deux autres comportements rhéologiques peuvent apparaître : un aspect rhéo-épaississant ou rhéo-fluidifiant. Le premier signifie que la contrainte nécessaire pour maintenir le matériau en écoulement augmente plus rapidement que la vitesse de cisaillement, cf. Figure 1.12. D'un point de vue physique, cela est associé à l'énergie cinétique qui devient non négligeable [29]. Le second signifie un comportement opposé, *i.e.* la contrainte augmente plus lentement que la vitesse de cisaillement. D'un point de vue pratique, plus le matériau est cisailé et plus il s'écoule facilement. Pour la communauté du Génie Civil, un béton rhéo-épaississant est rare tandis qu'un comportement rhéo-fluidifiant est très fréquent [30,31].

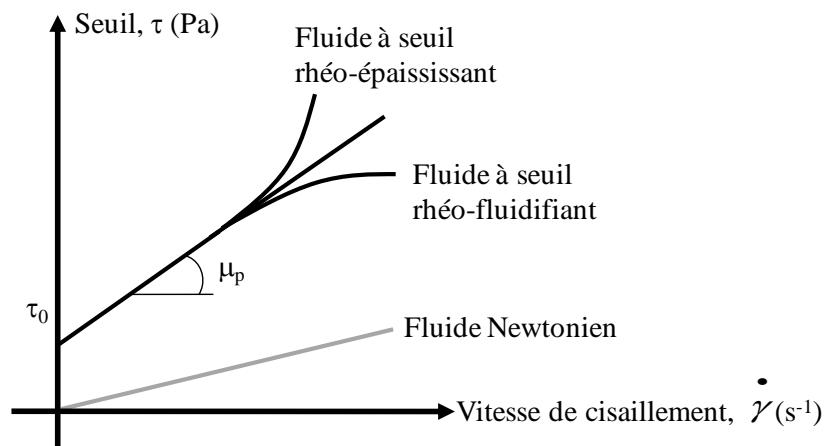


Figure 1.12. Fluides à seuil rhéo-épaississant et rhéo-fluidifiant.

Les comportements rhéo-épaississant et rhéo-fluidifiant sont souvent représentés par des modèles analytiques à partir d'une loi puissance dont la plus connue est celle d'Herschel-Bulkley et [32] :

$$\dot{\gamma} = 0, \tau < \tau_0 \quad (1.4.)$$

$$\dot{\gamma} \neq 0, \tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1.5.)$$

Avec :

n : indice d'écoulement du fluide, (-). $n > 0$

$n < 1$ pour un comportement rhéo-fluidifiant.

$n > 1$ pour un comportement rhéo-épaississant.

1.3.2 Ordres de grandeur des paramètres rhéométriques

Plusieurs outils existent pour déterminer les paramètres rhéologiques tels que τ_0 et μ_p . Le plus classique correspond à l'utilisation d'un rhéomètre couplé à un système de mesure de type géométrie Vane, cf Figure 1.13. Au niveau de l'entrefer (distance entre les ailettes et la paroi de la cuve cylindrique), le matériau est cisailé en fonction d'une vitesse ou d'un déplacement imposé. Pour ne

pas localiser des contraintes lors de la mise en place de l'écoulement, il est nécessaire que l'entrefer soit suffisamment grand devant la taille des particules.

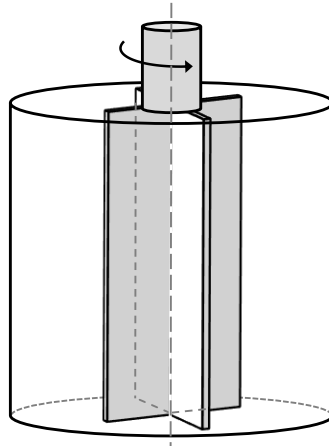


Figure 1.13. Géométrie Vane.

Parallèlement, les pâtes de ciment constituent des systèmes d'études simples. D'un point de vue rhéologique, elles correspondent à des suspensions concentrées. Les particules de ciment sont considérées comme des inclusions rigides colloïdales plongées au sein d'un fluide interstitiel représenté par l'eau.

Une estimation de la viscosité de ces matériaux se calcule classiquement à partir de la formule de Krieger-Dougherty [33]. Quand la fraction volumique des particules tend vers la fraction volumique d'empilement maximal, $\phi \rightarrow \phi_m$, la viscosité du mélange diverge brutalement :

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2,5\phi_m} \quad (1.6.)$$

Avec :

ϕ_m : la fraction volumique d'empilement maximal.

Au niveau des ordres de grandeur [23], une pâte de ciment possède un seuil de l'ordre de quelques Pascals à quelques dizaines de Pascals avec une viscosité de l'ordre de quelques dixièmes de Pascals Seconde à quelques Pascals Seconde. De même, un mortier possède un seuil de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de Pascals et une viscosité de l'ordre de quelques dizaines de Pascals Seconde, cf. Tableau 1.4.

Comme pour les pâtes de ciment, les bétons possèdent des rhéomètres adaptés aux dimensions spécifiques de ces composants. A cet effet, de nombreux matériels développés par la communauté scientifique sont disponibles dans le commerce. Leur conception et leur utilisation sont variables. L'American Concrete Institute, ACI, fournit un rapport complet sur l'ensemble des rhéomètres mis au point durant ces trente dernières années [34]. Actuellement, les matériels les plus développés [35]

sont, par ordre alphabétique : BML [36,37], BTRHEOM [38,39], CEMAGREF-IMG [40], IBB [41] et TWO-POINT [42,43].

Deux campagnes d'essais internationales menées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC et à Master Builders, MB [44,45] ont permis de caractériser en parallèle ces matériels avec des gâchées identiques de matériaux de consistances variées. Ces travaux montrent que tous ces rhéomètres proposent des tendances équivalentes sur la prédiction globale des propriétés rhéologiques des bétons testés, mais ils ne fournissent pas une valeur absolue identique des paramètres rhéologiques. Par conséquent, ces matériels subissent un déploiement limité sur les chantiers à cause de leurs résultats difficilement interprétables, conjugué à un coût prohibitif et peu adapté à une utilisation *in situ*.

D'un point de vue ordre de grandeur, la contrainte seuil d'un béton ordinaire est de l'ordre de quelques milliers de Pascals [19,46,23] avec une viscosité de l'ordre de plusieurs dizaines de Pascals Seconde. De même pour un béton haute performance, la contrainte seuil est de l'ordre de quelques centaines de Pascals avec une viscosité de l'ordre de quelques centaines de Pascals Seconde [19,47]. (Cf. Tableau 1.4). En effet, à partir d'essais avec le BTRHEOM, Hu [38,23] montre que l'augmentation massive du dosage en superplastifiant des BHP va souvent de pair avec un accroissement de la viscosité par rapport à celle des bétons ordinaires.

Paramètres rhéologiques	Pâte de ciment	Mortier	BO	BHP
Contrainte seuil, τ_0 (Pa)	1 – 50	50 – 500	1000 – 3000	500 – 900
Viscosité, μ_p (Pa.s)	0,1 – 5	5 – 20	50 – 100	100 – 400

Tableau 1.4. Ordres de grandeurs des paramètres rhéologiques des pâtes de ciment, des mortiers, des bétons ordinaires et des bétons à ultra haute performance.

1.3.3 Transition entre comportement visqueux et frictionnel

Pour caractériser la rhéologie du matériau béton, nous proposons la même séparation bi-phasique que celle présentée préalablement pour l'étude des pâtes de ciment. Dans cette configuration, les granulats (sable et graviers) correspondent à des particules rigides plongées dans un fluide composé par la matrice cimentaire. A partir de cette approche, Yammine *et al* [48] montre qu'il existe deux régimes d'écoulement pour le matériau béton. Le premier s'établit pour un ratio ϕ/ϕ_m inférieur à une valeur critique. Dans ce régime, le seuil du béton est dicté principalement par celui de la pâte de ciment et les contacts frictionnels entre les grains sont négligeables. Nous avons un matériau dont le comportement est principalement issu de la composante visqueuse de la matrice cimentaire. Le second régime d'écoulement démarre pour un ratio ϕ/ϕ_m supérieur à la même valeur critique. Alors, la contribution frictionnelle augmente fortement et les contacts directs entre granulats dominent majoritairement l'évolution de la contrainte seuil du matériau.

A partir de cette conception bi-phasique, Roussel [49] trace l'évolution du seuil relatif, *i.e.* « le seuil du béton divisé par le seuil de la pâte » en fonction de la fraction volumique solide relative *i.e.* « la fraction volumique solide du squelette divisée par la fraction volumique d'empilement maximale », cf Figure 1.14. Cette figure confirme que le seuil d'un béton est proportionnel au volume du squelette granulaire ou celui de la matrice cimentaire fixés.

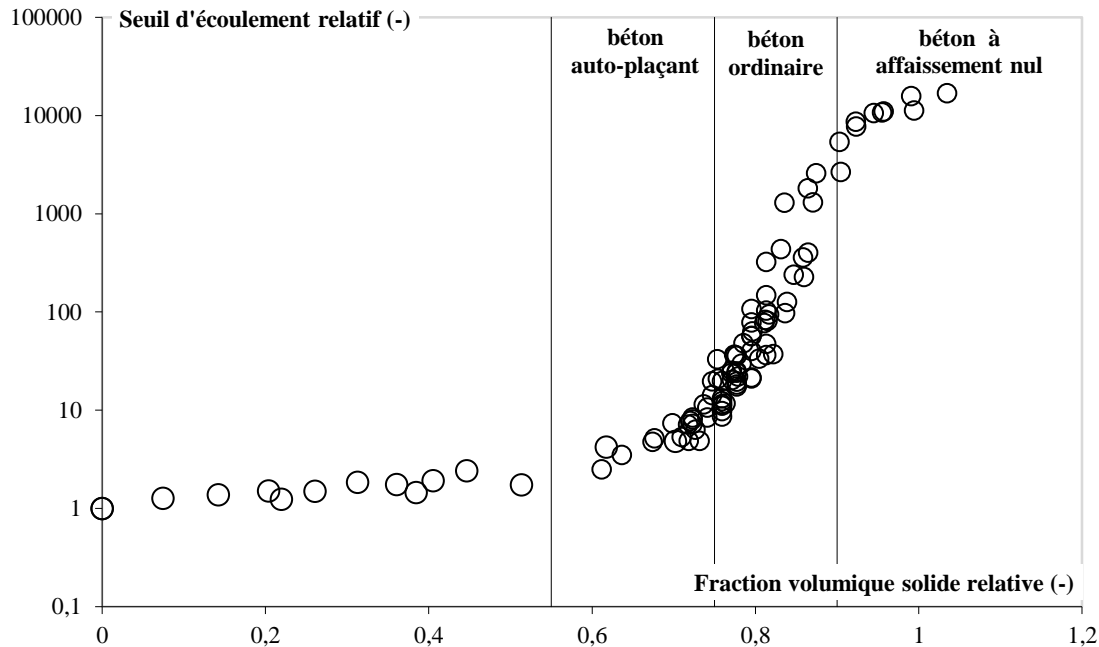


Figure 1.14. « Seuil d'écoulement relatif (*i.e.* le seuil du béton divisé par le seuil de la pâte) en fonction de la fraction volumique solide relative du squelette (*i.e.* la fraction volumique solide du squelette divisée par la fraction volumique d'empilement maximale » [49].

Bien que les sections précédentes décrivent les capacités de mesure des propriétés rhéologiques des pâtes de ciment ou des bétons, celles-ci nécessitent l'acquisition de matériels onéreux dont l'utilisation nécessite un savoir faire important. Ainsi, la prochaine section décrit des essais simples, rapides et peu coûteux afin de caractériser la fluidité d'un matériau cimentaire.

1.3.4 Mesures du seuil

1.3.4.1 Test au Mini-cône

Roussel et Coussot [50] proposent une analyse de l'essai d'affaissement/étalement de pâte de ciment à partir d'un mini-cône de dimensions suivantes :

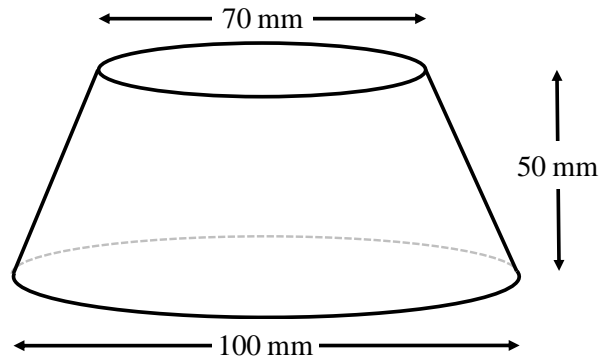


Figure 1.15. Dimensions du mini-cône test.

Leur analyse mécanique propose deux configurations d'états finaux du matériau une fois que le cône est soulevé verticalement.

La première configuration correspond à un régime d'affaissement avec un cylindre de matériau dont la hauteur est fortement supérieure au rayon, $H \gg R$. Pour cet état, ils montrent que la contrainte seuil du matériau s'obtient à partir de l'affaissement, tel que :

$$\tau_0 = \frac{\rho g(H_0 - S)}{\sqrt{3}} \quad (1.7.)$$

Avec :

H_0 : la hauteur initiale du cône, (m).

S : la hauteur d'affaissement, (m).

ρ : la masse volumique du matériau, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

g : l'accélération gravitationnelle terrestre, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

La seconde configuration correspond à un régime d'étalement avec un cylindre de matériau dont la hauteur est très inférieure au rayon, $H \ll R$. Pour cet état, ils montrent que la contrainte seuil du matériau s'obtient à partir du rayon final de la « galette » formée, tel que :

$$\tau_0 = \frac{225\rho g\Omega^2}{128\pi^2 R^5} \quad (1.8.)$$

Avec :

Ω : le volume de l'échantillon, (m^3).

R : le rayon de la galette, (m^3).

Parallèlement, ils montrent que, dans le cas des pâtes de ciment, les effets inertiels sont négligeables.

1.3.4.2 Affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement/étalement au cône d'Abrams constitue le test le plus fréquemment pratiqué sur les chantiers de construction.

Dans ce contexte, pour obtenir le seuil en fonction de l'affaissement du matériau, Roussel *et al* [51] proposent une démarche scientifique équivalente à celle présentée dans la section précédente. A partir

de l'essai au cône d'Abrams et pour un régime d'affaissement, la contrainte seuil du matériau se déduit de la hauteur de chute de celui-ci. Dans cette configuration, les effets inertiels et d'adhérence à la paroi sont négligeables. Ainsi pour un affaissement compris entre 5 et 25 cm, l'équation de Roussel et Coussot [50], obtenue à partir de simulations numériques, permet le calcul du seuil du matériau testé.

$$\tau_0 = (25,5 - S) \cdot \frac{\rho}{17,6} \quad (1.9.)$$

Avec :

ρ : la masse volumique du béton, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

S : l'affaissement mesuré, (m).

1.3.4.3 LCPC Box

Dans le cas des BAP, les travaux de Roussel [52] montrent que l'essai classique d'étalement au cône d'Abrams [12] ne permet pas de mesurer le seuil du matériau car l'épaisseur finale de l'échantillon est du même ordre de grandeur que la dimension des plus gros granulats. Ainsi, il propose une variante simple : la LCPC Box [52]. Une boîte de dimensions 1200/200/150 mm (longueur/largeur/hauteur) est remplie avec 6 L de béton frais déversés suivant un protocole précis au niveau d'une de ses extrémités, cf Figure 1.16. Le seuil du béton est obtenu à partir de la mesure de la longueur d'arrêt du matériau dans la boîte tel que :

$$\tau_0 = \frac{2h_0 + l_0}{4\rho g l_0 \cdot \left[L - \ln \left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_0} \right) \right]} \quad (1.10.)$$

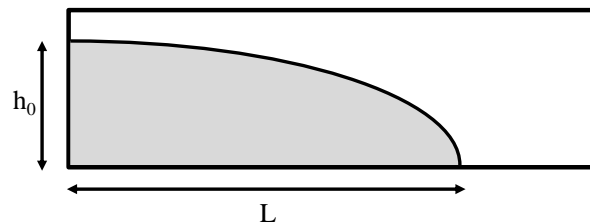
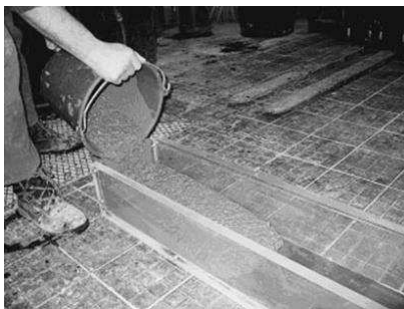


Figure 1.16. LCPC Box. Photo issue de [52] (gauche). Schéma de principe de l'arrêt de l'écoulement (droite).

Avec :

l_0 : la largeur de la boîte, 200 mm.

h_0 : la hauteur de la boîte, 150 mm.

1.3.5 Mesure de la viscosité

Actuellement, la mesure de la viscosité d'une pâte de ciment ne soulève pas de difficulté majeure. Cependant, dans le cas des bétons, cette opération est plus délicate. Une première possibilité consiste à employer un rhéomètre, mais nous avons évoqué précédemment que cette solution n'est pas encore totalement opérationnelle.

Par ailleurs, De Larrard et Ferraris [53,54] proposent de quantifier la viscosité des bétons à l'état frais, à partir d'un essai au cône d'Abrams modifié. Ils considèrent que pour un affaissement final identique entre deux bétons, la durée nécessaire pour y parvenir est simplement liée à la viscosité du matériau. L'essai se compose d'un cône d'affaissement traditionnel avec une tige métallique fixée en son centre. Un disque rigide est positionné au niveau de la surface supérieure du béton et glisse verticalement le long de la tige avec l'affaissement du matériau. Un système de frein bloque le disque lorsqu'il atteint une chute de 100 mm. Une mesure de la durée d'affaissement du disque détermine la viscosité de l'échantillon à partir d'une des formules suivantes :

$$S < 200 \text{ mm} , \mu_P = 1,08 \cdot 10^{-3} \rho T_A (S - 175) \quad (1.11.)$$

$$200 \text{ mm} < S < 260 \text{ mm} , \mu_P = 25 \cdot 10^{-3} \rho T_A \quad (1.12.)$$

Avec :

S : l'affaissement obtenu au cône d'Abrams, (mm).

ρ : la masse volumique, ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

T_A : durée pour un affaissement de 100 mm, (s).

Évidemment, cet essai est uniquement valable pour des matériaux dont l'affaissement est supérieur à 100 mm, mais les bétons de consistance plus ferme ne sont pas concernés par une utilisation structurelle sur chantier. Cet essai présente l'avantage d'une utilisation simple et d'un coût relativement faible. En revanche, leurs résultats montrent que pour des viscosités inférieures à 100 Pa.s avec des bétons de classe de consistance S5 ($S > 220$ mm), le disque termine sa chute pour des durées très courtes de l'ordre de 1 seconde comme indiqué sur la Figure 1.17 ci-dessous. Par conséquent, leurs travaux constituent une base intéressante d'étude, mais les très faibles durées d'affaissement pour des bétons de viscosité standard montrent une limite d'utilisation pratique de leur essai.

Ainsi, à ce jour, il ne semble pas exister une mesure simple et efficace de la viscosité d'un béton.

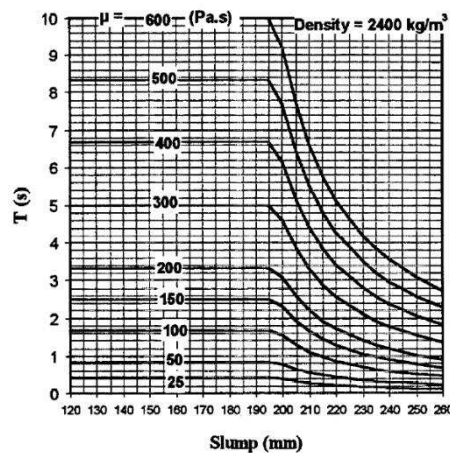


Figure 1.17. Durée d'affaissement au cône d'Abrams modifié en fonction de l'affaissement et de la viscosité. Figure issue de [54].

Dans le paragraphe suivant, nous présentons le contexte environnemental actuel en lien avec le développement durable et ses connexions sur la formulation du matériau béton.

1.4 Contexte environnemental et sociétal : conséquences sur formulation et fluidité

Actuellement, le développement durable est un concept bien connu dont les bases sont issues du rapport Brundland [55]. Le réchauffement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre a pour origine principale les émissions de CO₂ produit par les activités industrielles de l'Homme. Ainsi, de nombreux pays ; dont la France par la loi 2005-781 [56] soutiennent la mise en place d'une diminution de moitié des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 par rapport aux émissions des années 90 et d'une diminution par 4 d'ici 2050. Dans ce contexte, le domaine de la construction est source de près de 10% [57] de ces émissions dont 85 % [58] sont à la charge de la production du ciment.

Afin d'atteindre les objectifs précédents, Habert *et al* [59,60] montrent l'existence de deux leviers. Le premier consiste en l'utilisation croissante de ciment recomposé [61] à partir d'additions minérales telles que les fumées de silices, les cendres volantes, laitiers de haut fourneau ou les fillers. Le second levier proposé cherche à dimensionner les structures en béton armé avec des résistances en compression supérieures à celles utilisées actuellement et ainsi obtenir des sections plus fines des éléments porteurs.

Parallèlement, l'utilisation des granulats recyclés, issus de la déconstruction des structures, diminue l'impact énergétique des bétons [62]. En effet, en stockant ces matériaux à l'air libre pendant plusieurs mois, ceux-ci captent du CO₂ en se carbonatant. Cependant, des verrous technologiques doivent être levés pour améliorer la fabrication de béton à partir de ces granulats.

Enfin, ces propositions ont toutes pour conséquence de modifier intrinsèquement le comportement d'écoulement des matériaux cimentaires à l'état frais et nécessite l'utilisation d'adjuvants de plus en plus performants. D'un point de vue environnemental, Hermida *et al* [63] indiquent que l'utilisation des superplastifiants constitue un progrès scientifique permettant la fabrication des bétons de consistances fluides à partir de ciment fortement substitué en clinker. Cependant, il a été constaté que ces « nouvelles » formulations ont tendance à augmenter fortement l'aspect visqueux de ces matériaux [64] et entraînent des difficultés lors de la mise en œuvre et de la vibration *in situ*.

1.5 Effets de la vibration sur le matériau : vibration et fluidité

D'un point de vue global, l'application d'une vibration interne ou externe permet au béton de se compacter, de se désaérer et d'assurer une liaison intime entre les armatures métalliques et le matériau. Il est communément admis qu'une « bonne » résistance mécanique provient d'une vibration de qualité lors de la mise en œuvre du béton à l'état frais. L'American Concrete Institute a publié un document très complet sur le comportement du béton soumis à une vibration [65].

1.5.1 L'utilisation de la vibration

1.5.1.1 Rappel historique

Les premières constructions en béton datant du tout début du siècle dernier étaient dénuées d'armatures. En effet, l'emploi du béton armé comme matériau de construction débute à partir des années 1900. Auparavant, le béton devait simplement remplir un coffrage sans s'écouler à travers des aciers. Afin d'obtenir des résistances suffisantes de l'ordre d'une vingtaine de MPa, les bétons dépourvus d'armatures avaient une consistance très ferme de l'ordre de 1 à 5 cm d'affaissement au cône d'Abrams [66,67,68]. Les techniques de mise en œuvre associées consistaient en un pilonnage manuel du béton à l'aide de tiges métalliques jusqu'à obtenir un léger ressuage [68]. La pénibilité de cette technique consistait, pour l'ouvrier, son principal défaut.

L'emploi du matériau composite béton armé a mené à une évolution technologique pour remplir correctement les coffrages. Le problème à résoudre est alors le suivant : « trouver un procédé de mise en œuvre permettant de remplir de béton sec, compact et serré jusqu'à transpiration, les volumes libres des moules ferrailés et d'enrober parfaitement les armatures, quelque soit leur densité, sans les déplacer de leur position initiale »[68].

Tout d'abord, pour y parvenir, la première solution adoptée fut d'augmenter la quantité d'eau de gâchage afin de rendre le béton plus fluide pour qu'il remplisse un coffrage et circule entre les armatures sans aide mécanique extérieure. Cette idée, bien que pratique, a entraîné une diminution de la résistance en compression, jusqu'ici point fort du matériau.

Deuxièmement, pour fluidifier un béton « de consistance de terre humide », Powers [69] démontre que la vibration semble être le processus le mieux adapté. Cette solution technique permet de formuler des bétons avec une quantité d'eau raisonnable pour fluidifier convenablement le matériau et sans détériorer sa résistance mécanique.

Par la suite, pour vibrer convenablement les pièces en béton armé, les recherches s'orientent sur l'utilisation des tables vibrantes qui sont des machines robustes consommant peu d'énergie pour des

masses vibrées allant de 400 kg à 2 000 kg. En plus, elles réduisent le coût de la main d'œuvre et permettent une vibration homogène [70,71]. Cependant, bien que cette solution corresponde au cahier des charges, son utilisation est difficile sur les chantiers.

Enfin, jusqu'en 1940, le béton n'est pas ou très peu vibré car cette technique est mal connue des entrepreneurs qui n'y retrouvent pas de gain économique, même au contraire un surcoût : matériels et main d'œuvre supplémentaires. En revanche, la communauté scientifique (Caquot, Makchéeff...) y voit un gain de performance : « *C'est la vibration du béton qui aurait permis de réaliser les hangars « Caquot » (1931) ayant les auvents en porte-à-faux de 25 mètres, ainsi que d'autres constructions en béton armé d'une hardiesse similaire* » [68].

A partir des observations précédentes, nous pouvons définir qu'une vibration de qualité doit assurer un béton de composition homogène. Par conséquent, à partir de propriétés physiques macroscopiques, nous qualifions l'efficacité de la vibration en trois catégories : un état de sous-vibration, un état de sur-vibration et un état de « bonne » vibration.

1.5.1.2 État de sous-vibration

La première configuration apparaît si le béton n'est pas vibré suffisamment longtemps. La principale conséquence de cet état correspond à des hétérogénéités locales au sein du matériau. Ainsi, des voûtes granulaires et/ou des cavités s'établissent et augmentent la porosité du matériau. Ce constat a pour conséquence une diminution de la résistance mécanique en compression simple et une atténuation de l'adhérence acier/béton. Le recours à des essais destructifs est nécessaire pour quantifier l'évolution de ces paramètres. En revanche, des signes extérieurs tels qu'une quantité de bullage excessive sur les parements ou la présence de soufflure (trou de taille centimétrique formé par un blocage granulaire) constituent des marqueurs d'une vibration trop courte ou trop faible. (Cf. Figure 1.18). En fonction des « dégâts » identifiés et de la classe d'exposition [11] de l'élément, un simple ragréage de surface suffira pour diminuer les défauts visuels constatés ou bien la pièce en béton armé devra être recommencée.



Figure 1.18. Exemples d'une sous-vibration à partir de défauts de parement.

1.5.1.3 État de sur-vibration

La seconde configuration, l'état de sur-vibration, est opposée à la situation précédente. Celle-ci apparaît avec une application trop prononcée de la vibration. D'un point de vue pratique, les particules soumises uniquement à leur poids propre ont tendance à sédimenter au fond du coffrage. Une superposition de couche de granulats des plus lourds au plus légers s'empile jusqu'à obtenir en surface une remontée d'eau en excès. Ce phénomène se traduit par un film brillant très distinctif dénommé ressuage. (Cf Figure 1.18). De même que la situation précédente, en fonction des « dégâts » identifiés la destruction de l'élément en béton est envisageable.



Figure 1.19. Exemples de remontées d'eau en surface.

1.5.1.4 État de « bonne » vibration

Enfin, la troisième configuration est la plus courante. En effet, une « bonne » vibration supprime les défauts de remplissage des coffrages et assure une homogénéité globale du matériau, gage d'obtention de propriétés mécaniques de qualité. Visuellement, les parements présentent une quantité de bullage modérée et de dimensions millimétriques.

1.5.2 Vibration interne et seuil d'écoulement

1.5.2.1 La vibration et la fluidité

De nombreuses études montrent que l'application d'une vibration permet l'utilisation de bétons de consistance ferme et d'assurer des résistances mécaniques adéquates [68,69,71,72,73]. Les différents auteurs comparent des formulations de consistances variées et mesurent la résistance mécanique en compression simple en fonction de la mise en œuvre appliquée. En effet, la vibration assure une facilité de mise en œuvre à l'état frais sans détériorer les propriétés mécaniques à l'état durci du matériau. En revanche, ces bétons ont généralement des affaissements très faibles, inférieurs ou égaux à 5 cm. Par conséquent, il semble intéressant d'étudier si l'application d'une vibration aux bétons fluides des années 2000, génère les mêmes gains que sur ceux obtenus avec les matériaux du siècle précédent.

De plus, la plupart des théories scientifiques sur l'écoulement du béton soumis à une vibration, proposées au cours de la première moitié du XX^{ème} siècle assimile le béton à un sol. En effet, les travaux de L'Hermite [74], Mary [67] et Clair [75] montrent que, sous l'application d'une vibration le béton s'écoule si l'énergie apportée au matériau supprime la cohésion (frottement) interne entre les agrégats. Ainsi, les approches analytiques qui découlent de ces travaux se rapprochent fortement des connaissances géotechniques et traitent des matériaux granulaires.

D'un point de vue rhéologique la vibration interne est présentée comme déstructurant la matrice cimentaire. Sa contrainte seuil tend alors vers zéro. A l'échelle macroscopique, le béton se liquéfie et s'écoule plus facilement. En effet, les travaux de L'Hermite [74], Banfill [76] et Hu [38] montrent que, sous vibration, le seuil du béton est quasiment nul, cf. Figure 1.20. En revanche, la viscosité plastique du matériau ne semble pas être affectée [38,76,77].

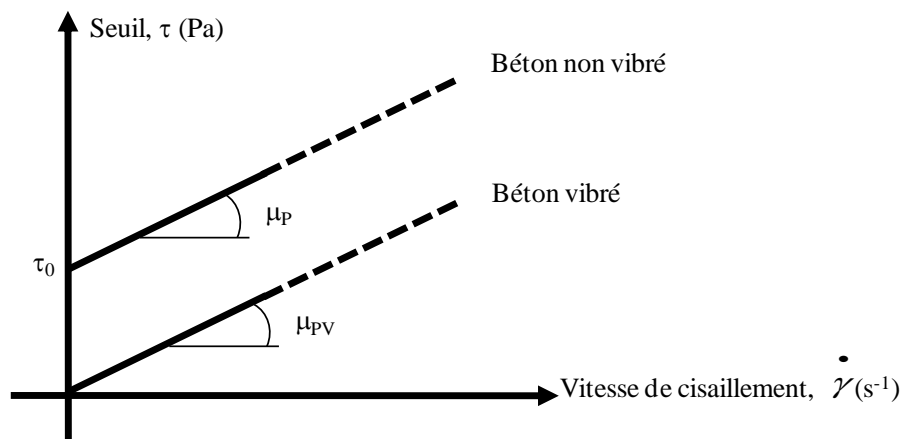


Figure 1.20. Comparaison du comportement rhéologique du béton avec et sans vibration [38,74,76].

Enfin, l'étude de la pervibration [74,78,79] sur les bétons de type granulaire suggère que celle-ci devrait être appliquée avec deux fréquences. Une première à basse fréquence pour influencer le comportement des éléments les plus grossiers et une seconde à haute fréquence pour déplacer les éléments les plus fins. L'Hermite [74] repris par Geoffroy [80] propose l'équation suivante pour déterminer le diamètre des grains sollicités en fonction de la fréquence d'application du vibreur :

$$D_G = \frac{14 \cdot 10^6}{3600 \cdot f^2} \quad (1.13.)$$

Avec :

D_G : le diamètre de la particule mise en agitation, (m).

f : la fréquence, (Hz).

1.5.3 Distance d'application entre les vibreurs

L'utilisation d'une table vibrante sollicite l'ensemble de l'élément en cours de coulage. Il s'agit d'une vibration homogène. A contrario, une aiguille vibrante possède un rayon d'action lié à ses caractéristiques mécaniques et qui dépend aussi des propriétés du matériau vibré.

Pour estimer l'efficacité des vibreurs, Dessoiff [81] propose la formule suivante :

$$a_R = a_0 \sqrt{\frac{R_0}{r} \exp\left[-\frac{\lambda}{2}(r - R_0)\right]} \quad (1.14.)$$

Avec :

a_R : l'amplitude de l'onde de vibration au rayon r , (m).

a_0 : l'amplitude de l'onde de vibration contre l'aiguille vibrante, (m).

R_0 : le rayon de l'aiguille vibrante, (m).

λ : le coefficient d'amortissement du béton.

r : la distance au vibreur, (m).

Cependant, pour établir la relation précédente, il considère le matériau comme un solide doté d'un coefficient d'amortissement des ondes de vibration. Pour des bétons confectionnés dans la première moitié du siècle précédent, λ est classiquement compris entre 0,04 et 0,08. Or, pour ces bétons, nous avons montré que les contacts frictionnels de type granulaire constituent la principale origine de l'écoulement du matériau tandis que le comportement rhéologique des bétons actuels est davantage dicté par celui de la matrice cimentaire. De plus, pour établir la formule précédente, Dessoiff considère le béton comme un sol de consistance humide et non comme un fluide à seuil visqueux. Par conséquent, son approche analytique semble mal adaptée aux matériaux actuels. Ce constat est aussi réalisé récemment (en 2011) par Banfill [82].

De plus, Geoffray [80] propose une estimation de la zone liquéfiée par un pervibrateur plongé dans un matériau cimentaire. Il indique que le diamètre d'action est égal à 10 fois le diamètre de l'aiguille vibrante, cf (1.15.). Forssblad [73] obtient aussi ce résultat et montre que cette relation est valide pour une fréquence de rotation égale à 200 Hz qui est la fréquence standard des pervibrateurs.

$$D = 10 \cdot D_0 \quad (1.15.)$$

En revanche, Geoffray ne fournit aucune précision sur les études à l'origine de l'équation précédente ni les classes de consistances des bétons pour lesquelles cette relation s'applique. Or, Dutron (en 1944) [71] puis Banfill [82] montrent que la zone d'efficacité des vibreurs augmente avec la fluidité initiale du matériau. Néanmoins, le résultat précédent propose une formule simple d'utilisation et semble s'accorder avec la pratique *in situ*. A cet égard, les recommandations traditionnelles françaises [1,2] utilisent ce facteur 10. De plus, Legrand [85] met en évidence la nécessité d'une amplitude minimum

des vibreurs pour vaincre le frottement interne des grains et l'existence d'une amplitude maximale pour éviter une projection de particules au niveau de la surface libre. Cependant, Tattersall *et al* [31] montrent que le paramètre majeur gouvernant l'efficacité du vibreur est la vitesse de rotation de l'aiguille. Ainsi, pour une amplitude fixée, une augmentation de la fréquence accroît le rayon d'action du vibreur.

Par ailleurs, Banfill [82] propose une formule pour prédire le rayon d'action des pervibrateurs. Celle-ci est obtenue à partir de la résolution complexe des équations de Bessel [83]. Elle nécessite la modélisation du gradient de vitesse non linéaire lié aux des ondes de vibration en fonction de la distance au vibreur.

$$D = D_0 \sqrt{\frac{\tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}(D)}{\tau_0}} \quad (1.16.)$$

Cependant, nous explorons plus en détails cette expression analytique dans le Chapitre 3.

De plus, d'après les données issues de Geoffray [80], nous traçons sur la Figure 1.21 le diamètre minimum d'une aiguille vibrante en fonction de l'épaisseur de la pièce en béton à couler. Il apparaît que le diamètre du vibreur augmente proportionnellement avec l'épaisseur de l'élément en béton.

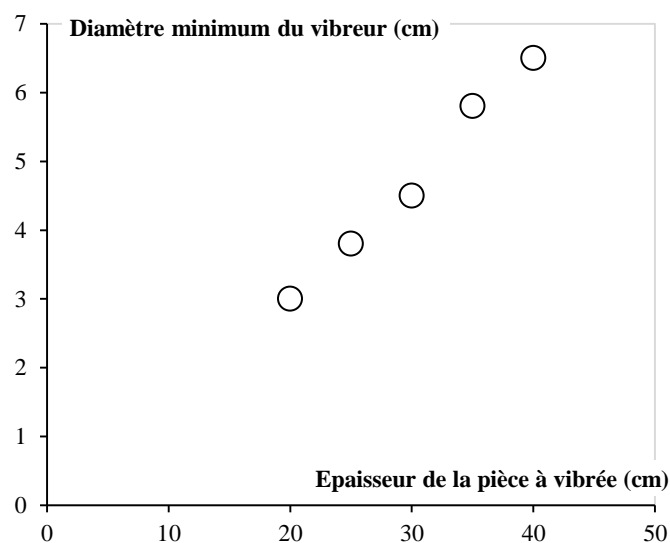


Figure 1.21. Diamètre minimum du vibreur en fonction de l'épaisseur de la pièce à couler. Données issues de [80]

A partir du résultat de la formule $D=10D_0$, nous calculons le ratio adimensionné entre le diamètre d'action théorique et l'épaisseur de la pièce. Celui-ci est compris entre 1,50 et 1,66. Ce résultat est en accord avec une recommandation de mise en œuvre préconisée par l'École Française du Béton [1] qui stipule que :

$$D \geq 1,4. b \quad (1.17.)$$

Avec :

b : largeur de la pièce vibrée (voile).

1.5.4 Durée d'applications de la pervibration

Connaissant la distance entre les points d'application des vibreurs, le second paramètre pour assurer une mise en œuvre de qualité est la durée d'application de la vibration. Cependant, d'un point de vue pratique, il est difficile de mesurer le temps nécessaire pour vibrer un volume de matériau. Dans les sections précédentes, nous avons montré que les défauts générés par une sous-vibration ou une sur-vibration sont plus facilement identifiables que celui d'une vibration sans défaut.

Toutefois, Dutron [71] montre que la consistance à l'état frais du béton conditionne la durée d'application du vibreur. En effet, en l'absence de vibration, une fluidité élevée assure une compacité du matériau plus importante qu'une consistance plus ferme. Ainsi, le volume des vides initiaux à remplir pour compacter le matériau est plus faible. Donc la durée d'application de la vibration doit être plus petite pour des bétons fluides que pour des bétons plastiques.

En première approximation, Popovics [78] propose une relation analytique pour estimer la durée nécessaire d'application de la pervibration en fonction de l'épaisseur de la couche de matériau vibré et de la vitesse de remontée du vibreur tel que :

$$t_{\min} = \frac{2(p + q)}{v_a} \quad (1.18.)$$

Avec :

t_{\min} : durée d'application minimale du pervibrateur, (s).

p : l'épaisseur de la couche vibrée, (cm). Classiquement, p est compris entre 30 et 45 cm.

q : l'épaisseur de pénétration du vibreur dans la couche sous jacente pour assurer une homogénéité au matériau, (cm).

v_a : la vitesse de remontée du vibreur, (cm/s). Généralement, elle est environ égale à 7,5 cm/s [78].

A partir de la formule précédente, la durée d'application d'un pervibrateur varie entre 10 et 15s. Cependant, celle-ci est constante quelque soit la consistance du matériau ce qui est en désaccord avec les précédents constats.

Enfin, les recommandations traditionnelles [1,2] proposent les durées suivantes :

Consistance du béton	Temps d'application de la pervibration
Ferme	60 s
Plastique	20 s
Fluide	5 s

Tableau 1.5. Durée d'application de la vibration par couche de béton. Recommandations issues de [1,2].

1.5.5 Phénomène(s) perturbateur(s)

Bien que la pervibration permette une mise en œuvre aisée du béton, quelques singularités apparaissent en fonction de la consistance du matériau et des caractéristiques vibratoires du matériel.

A partir d'essais en laboratoire avec une aiguille vibrante dont la vitesse de rotation est à 200 Hz, nous observons conjointement la formation de bulles d'air contre la surface du vibreur et la projection de particules fines à partir de la surface du matériel. Cette singularité se prononce préférentiellement pour des pâtes de ciment. (Cf. Figure 1.22).

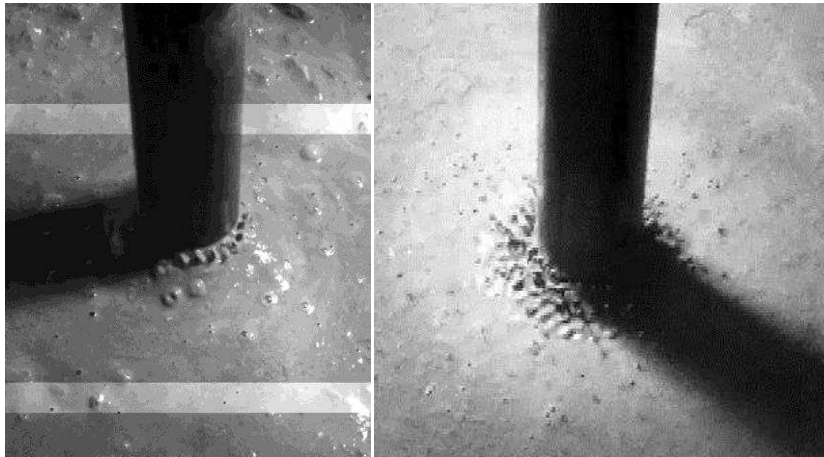


Figure 1.22. Exemples de projection de turbulences observées lors de la vibration de matériaux cimentaires. Béton ordinaire (gauche). Pâte de ciment (droite).

Enfin, une autre singularité est apparue récemment sur les chantiers de construction. L'utilisation d'une aiguille vibrante traditionnelle plongée au sein des bétons à forte viscosité a mis en évidence la présence d'un trou non rebouché suite à son l'extraction du matériau (cf. Figure 1.23). Bien qu'à ce jour, ce phénomène ne soit pas traité dans la littérature, nous suggérons qu'*a priori* celui il a pour origine l'accroissement de la viscosité des bétons. En effet, l'augmentation de la viscosité semble être l'unique paramètre différent entre la mise en œuvre d'un béton standard et d'un béton visqueux.



Figure 1.24. Trou non rebouché laissé après extraction d'une aiguille vibrante dans un matériau cimentaire.

1.6 Méthodologie retenue pour l'étude

Afin d'identifier l'ensemble des phénomènes mis en jeu lors de la vibration des matériaux cimentaires, nous proposons de séparer le matériau en trois phases : la pâte de ciment composée d'eau et de ciment, puis les granulats correspondant au sable et graviers, et enfin l'air regroupant l'air entraîné et les cavités. (Cf. Figure 1.25). En effet, nous pouvons supposer que chacune de ces phases soit directement ou indirectement impactée par l'application d'une pervibration.

Par exemple, dans le cas d'une durée trop courte de vibration, nous obtiendrons une répartition spatiale hétérogène des composants du béton, impactant la formation de cavités et la création d'une porosité locale élevée. Ainsi les propriétés mécaniques de résistance en compression et en traction simple devraient diminuer fortement.

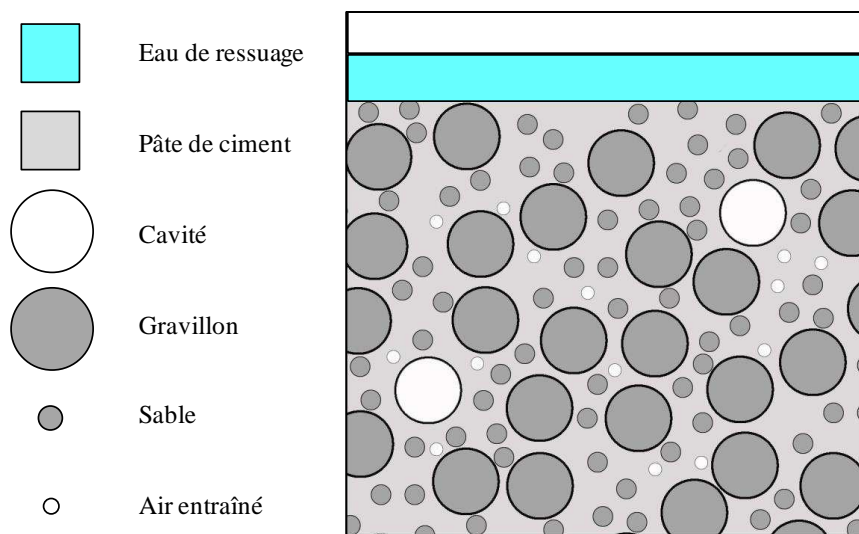


Figure 1.25. Décomposition multiphasiques du béton.

De plus, nous avons mis en évidence qu'un système de vibration interne se caractérise mécaniquement par une fréquence et une amplitude ainsi qu'une durée d'application. Par ailleurs, dans les paragraphes précédents, nous avons établi un récapitulatif des matériels vibrants utilisés couramment dans la pratique. Bien que la gamme des produits disponibles soit large, le but recherché est toujours d'aider le matériau à remplir entièrement un coffrage et à se compacter au maximum. Cependant, la littérature existante ne permet pas d'établir l'influence de ces paramètres sur le comportement du matériau lorsqu'ils sont étudiés séparément ou avec une combinaison de plusieurs d'entre eux. Actuellement, à défaut de pouvoir caractériser une bonne vibration, il est possible d'en apprécier une mauvaise comme l'indiquent Makchéeff [68] et Hover [84].

Parallèlement, le contexte sociétal et environnemental de ce début du XXI^{ème} siècle entraîne une diminution des émissions de CO₂. Ceci a pour conséquence directe des évolutions importantes sur les formulations des bétons pouvant dicter leur comportement à l'état frais et à l'état durci avec une diminution du ratio E/C et une augmentation de la viscosité. Par ailleurs, nous avons montré que les

principales études scientifiques sur les bénéfices d'une vibration ont été effectuées au cours de la première moitié du siècle précédent. Or, ces bétons du siècle dernier ont un comportement rhéologique éloigné des bétons actuels. Par conséquent, il semble nécessaire d'être à même de redéfinir les propriétés synonymes d'une vibration de qualité à partir d'essais simples.

A partir de ces cadres scientifiques, de la littérature existante et des évolutions actuelles des formulations de béton, nous chercherons à apporter des éléments de réponse aux trois questions suivantes (cf. Figure 1.26) :

- 1) Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?
- 2) Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ?
- 3) Quelle est la durée idéale de vibration d'un béton ?

Pour répondre à la **première question**, nous étudierons dans le prochain chapitre les propriétés à l'état durci de bétons employés couramment sur les chantiers de construction en fonction de systèmes vibrants variés. A partir de ces résultats et des études disponibles dans la littérature, nous pourrons définir des nouveaux paramètres d'identification de la vibration.

Afin de pouvoir répondre à la deuxième et à la troisième question, nous développerons les formulations des matériaux cimentaires élaborées pour nos essais ainsi que les protocoles expérimentaux caractérisant leur comportement.

Pour répondre à la **deuxième question**, nous nous focaliserons dans le chapitre 4 sur l'étude d'une vibration interne d'éléments horizontaux en béton armé. Cette étude permettra de modéliser simplement le diamètre d'action des aiguilles vibrantes en fonction de leurs caractéristiques mécaniques et des propriétés rhéologiques du matériau. Une campagne d'essais de mesure du diamètre d'action à partir de vibreurs à fréquence variable et de matériaux de consistances variées permettra de confronter notre démarche analytique. Enfin, nous terminerons notre approche par la réalisation de poutres de grandes dimensions proche de celle fabriquées in situ. Nous pourrons mettre en évidence l'influence de la rigidité des coffrages et de la réverbération ou de la transmission des ondes de vibration par les parois.

Pour répondre à **notre troisième question**, nous compléterons notre étude développée dans le chapitre 5 par la réalisation de vidéos numériques sur l'évolution du parement derrière un coffrage transparent pour des bétons de consistances variées.

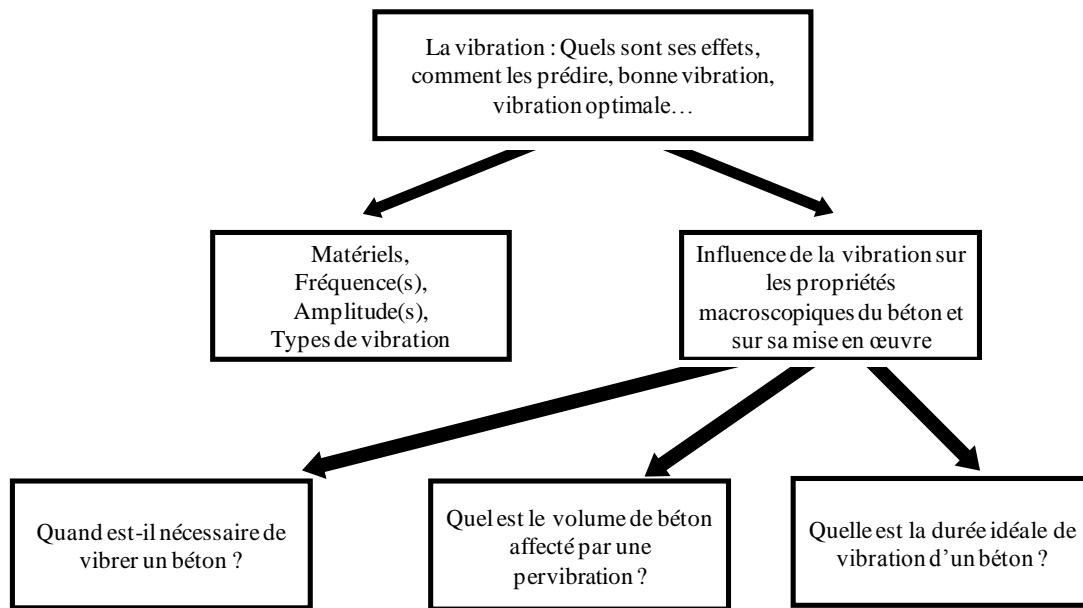


Figure 1.26. Approche d'étude retenue.

1.7 Références du chapitre

- [1] Ecole Française du Béton. (2007) La vibration du béton. [Online]. <http://www.efbeton.com/index.php/site/publications/bibliographie>
- [2] CimBéton, *La vibration des bétons*, Collection Technique CimBéton ed., 1998.
- [3] Atlas Copco. (2012) Concrete Vibration Equipment. [Online]. <http://www.podshop.se/atlascopco/>
- [4] INRS. (2013) Petit à petit, le bruit rend sourd. [Online]. <http://www.inrs.fr/accueil/risques/phenomene-physique/bruit.html>
- [5] Wackerneuson. La technique du béton de Wacker Neuson. [Online]. <http://www.wackerneuson.fr>
- [6] J.Nicolas, "Bétons Extrêmes," *Les Cahiers Techniques du Bâtiment*, no. 288, pp. 32-49, Mai 2009.
- [7] Nicolas Roussel, "Analyse des impacts environnementaux des constructions en béton," in *Conférence CIMbéton*, 2004.
- [8] P. Acker. (2009) LERM. [Online]. http://www.lerm.fr/lerm/Newsletter/Newsletter10/lerm_Newsletter10_lafarge.html
- [9] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-2 Essai pour béton frais - Essai d'affaissement.*, 1999.
- [10] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-8 Essai pour béton frais. Partie 8 Béton Auto-Plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.*, 2010.
- [11] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 206-1 Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.*, 2004.
- [12] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 206-9 Béton. Règles complémentaires pour le BAP.*, 2010.
- [13] Lafarge. (2013) Ductal. [Online]. <http://www.ductal-lafarge.fr/wps/portal/ductal/fr/2-Structural>
- [14] Eiffage. (2013) BSI Eiffage. [Online]. <http://www.bsieiffage.com/cms/site/bsi/accueil/realisations>
- [15] A.F. Stock, D.J. Hannant, and R.I.T. Williams, "The Effect of Aggregate Concentration upon the Strength and Modulus of Elasticity of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, no. 109, pp. 225-234, 1979.
- [16] A Caquot, "Le rôle des matériaux inertes dans le béton," *mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France*, pp. 562-582, 1937.
- [17] P.K. Mehta and O.E. GjØrv, "Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica-fume," *Cement and Concrete Research*, vol. 12, no. 5, pp. 587-595, 1982.
- [18] V. M. Malhotra, V. S. Ramachandra, R. F. Feldman, and P. C. Aitcin, *Condensed Silica Fume in Concrete.*: CRC Press, 1987.
- [19] F. De Larrard, *Concrete Mixture-Proportioning - A Scientific Approach*, Concrete Technology

- Series ed. London: E & FN SPON, 1999.
- [20] R.J. Flatt and P. Bowen, "Yodel: a yield stress model for suspensions," *Journal of the American Ceramic Society*, no. 89, pp. 1244-1256, 2007.
- [21] T. Tsubakimoto, M. Hosoido, and H. Tahara, *Copolymer and method for manufacture thereof*: US Patent 4471100, 1984.
- [22] N Spiratos, M Pagé, N P Mailvaganam, V M Malhotra, and C Jolicoeur, "Superplasticizers for Concrete," in *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc.*, Ottawa, 2003.
- [23] N. Roussel, A. Lemaître, R.J. Flatt, and P. Coussot, "Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 77-84, 2010.
- [24] R.J. Flatt, "Superplasticizers and the rheology of concrete," in *Understanding the rheology of concrete*: Woodhead Publishing, 2012, ch. 7, pp. 144-208.
- [25] R. L'Hermite, *Idées actuelles sur la technologie du béton*, Institut technique du bâtiment et des travaux publics ed., 1955.
- [26] G.H. Tattersall and P.G.F. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, Ed. London, 1983.
- [27] F. De Larrard and C. Hu, "The rheology of fresh high-performance concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 26, no. 2, pp. 283-294, 1996.
- [28] N. Roussel, "Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes," *Materials and Structures*, vol. 40, pp. 1001-10012, 2007.
- [29] R.J. Hoffman, "Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions," *Journal of Rheology*, vol. 42, pp. 111-123, 1998.
- [30] F. De Larrard, C.F. Ferraris, and T. Sedran, "Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material," *Materials and Structures*, vol. 31, pp. 494-498, 1998.
- [31] P.H. Tattersall and P.H. Baker, "The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete," *Magazine of Concrete research*, vol. 40, pp. 79-89, 1988.
- [32] P. Coussot, *Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials*, John Wiley & Sons ed. New York, 2005.
- [33] I.M. Krieger and T.J. Dougherty, "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres," *Journal of Rheology*, vol. 3, pp. 137-152, 1959.
- [34] "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete," American Concrete Institute (ACI), 238.1R-08, 2008.
- [35] C.F. Ferraris and N.S. Martys, "Concrete rheometers," in *Understanding the rheology of concrete*: Woodhead Publishing, 2012, ch. 3, pp. 63-82.
- [36] O.H. Wallevik and O.E. GjØrv, "Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh

- concrete," in *Proc. Int. Conf. on 'Properties of Fresh Concrete', RILEM*, London, October 1990, pp. 213-224.
- [37] O.H. Wallevik and O.E. Gjrv, "Modification of the two-point workability apparatus," *Magazine of Concrete Research*, vol. 42, no. 152, pp. 135-142, 1990.
- [38] C. Hu, "Rheologie des bétons fluides," *Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spcialits Structures et Matériaux*, p. 205, 1995.
- [39] C. Hu. et al., "Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete," *Materials and Structures*, vol. 29, no. 10, pp. 620-631, 1996.
- [40] P. Coussot, "Rheologie des boues et laves torrentielles — Etudes de dispersions et suspensions concentrées," *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et Etudes du CEMAGRE*, p. 418, 1993.
- [41] D. Beaupr, "Rheology of High Performance Shotcrete," *PhD Thesis University of British Columbia, Canada*, 194.
- [42] G.H. Tattersall, "The rationale of a two-point workability test," *Magazine of Concrete Research*, vol. 25, no. 84, pp. 169-172, 1973.
- [43] G.H. Tattersall and S.J. Bloomer, "Further development of the two-point test for workability and extension of its range," *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, no. 109, pp. 202-210, 1979.
- [44] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of concrete rheometers: Comparison of concrete rheometers (Nantes, France) in October, 2000," The National Institute of Standards and Technology Interragency Report (NISTIR), 6819, 2001.
- [45] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB (Cleveland, OH, USA) in May 2003," The National Institute of Standards and Technology Interragency Report (NISTIR), 7154, 2004.
- [46] N. Roussel, "Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results," *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 501-509, 2006.
- [47] F. Mahmoodzadeh and S.E. Chidiac, "Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 49, pp. 1-9, 2013.
- [48] J. Yamine, M. Chaouche, M. Guerint, M. Moranville, and R. Roussel, "From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 890-896, 2008.
- [49] N. Roussel, *Ecoulement et Mise en Oeuvre des Bétons*, LCPC ed., 2008.
- [50] N. Roussel and P. Coussot, "'Fifty-cent rheometer' for yield stress measurements: From slump to spreading flow," *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 705-718, 2005.

- [51] N. Roussel, C. Stefani, and R. Le Roy, "From mini cone test to Abrams cone test: measurement of cement based materials yield stress using tests," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 817-822, 2005.
- [52] N. Roussel, "The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC," *Materials and Structures*, vol. 40, pp. 889-896, 2007.
- [53] F. De Larrard and C.F. Ferraris, "Rhéologie du béton frais remanié. III L'essai au cône d'Abrams modifié," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 215, no. 4178, pp. 53-60, 1998.
- [54] C.H. Ferraris and F. De Larrard, "Testing and modelling of fresh concrete rheology," The National Institute of Standards and Technology Interragency Report (NISTIR), 6094, 1998.
- [55] Brundland, "Our Common Future," World Commission on Environmental and Development, Annex to General Assembly document A/42/427, 1987.
- [56] "LOI n°2005-781 du 13 Juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique," France, Journal Officiel vol. 163, 2005.
- [57] P. Capros, N. Kouvaritakis, and L. Mantzos, "Economic evaluation of sectoral emission reduction objectives for climate change: top-down analysis of greenhouse gas emission possibilities in the E.U.," Contribution to a Study for DG Environment, European commission 2001.
- [58] L. Parrott, "Cement, Concrete and Sustainability," Tech. rep., British Cement Association, A Report on the Progress of the UK Cement and Concrete Industry Towards Sustainability 2002.
- [59] G. Habert and N. Roussel, "Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives," *Cement and Concrete Composite*, vol. 31, no. 6, pp. 397-402, July 2009.
- [60] G. Habert, C. Billard, P. Rossi, C. Chen, and N. Roussel, "Cement Production technology improvement compared to factor 4 objectives," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 820-826, 2010.
- [61] ECOserve. (2004) Cluster 2: Production and application of blended cements. http://www.eco-serve.net/publish/cat_index_16.shtml.
- [62] M. Thiery, P. Dangla, P. Belin, G. Habert, and N. Roussel, "Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: A laboratory study on model materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 46, pp. 50-65, 2013.
- [63] G Hermida, M Moranville, and R Flatt, "The role of paste volume on concrete performance," in *Proceedings 10th ACI Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues ; ACI SP-261*, Seville, 2009, pp. 201-214.
- [64] J. HOT, "Influence des polymères de type superplastifiants et agents entraîneurs d'air sur la viscosité macroscopique des matériaux cimentaires," IFSTTAR, Thèse 2013.
- [65] ACI, "ACI 309.1R-08: Report on Behavior of Fresh Concrete During Vibration," 2010.

- [66] D.A. Abrams, "Effect on vibration, jiggling and pressure on fresh concrete," *American Concrete Institute, Journal Proceedings*, vol. 15, no. 6, pp. 63-85, 1919.
- [67] M. Mary, *Etude de la vibration du béton*, Annales des Ponts et Chaussées ed., 1936, vol. 1-4.
- [68] Th. Makchéeff, *Manuel du béton vibré*, Encyclopédie Industrielle et Commerciale ed., Eyrolles, Ed. Paris, 1939.
- [69] T. C. Powers, "Vibrated concrete," *American Concrete Institute*, vol. 29, no. /, pp. 373-381, 1933.
- [70] J. Dupy, "Un excellent appareil vibreur "La table vibrante"," *Revue des matériaux de construction et de travaux publics*, pp. 458-459, 1930.
- [71] R. Dutron, *Vibration du béton et du béton armé*, Annales des Travaux Publics de Belgique ed., GOEMAERE, Ed., 1944.
- [72] R. Dutronc, "Bétons vibrés et bétons damés," *Revue des matériaux de construction et de travaux publics*, no. 32, pp. 255-258, 1937.
- [73] L. Forssblad, "Investigation of Internal Vibration of Concrete," *Civil Engineering and Building Construction Series Acta Polytechnica Scandinavica*, vol. 29, p. 32, 1965.
- [74] R. L'Hermite, "Essai de théorie sur la vibration du béton," *Travaux*, vol. 122, pp. 199-207, 1944.
- [75] M.N. Clair, "The use of vibration in manufacture of concrete products," *American Concrete Institute*, vol. 29, pp. 383-390, 1933.
- [76] P.F.G. Banfill, Xu Yongmo, and P.L.J. Domone, "Relationship between the rheology of unvibrated fresh concrete and its flow under vibration in a vertical pipe apparatus," *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, pp. 181-190, 1999.
- [77] R. Gourves and B. Proust, "Influence des éléments fins sur la rhéologie du béton frais vibré," in *RILEM Colloque International sur les matériaux granulaire*, Budapest, 9-12 Octobre 1978, pp. 135-144.
- [78] S. Popovics, "A review of the concrete consolidation by vibraton," *Matériaux et Constructions*, vol. 6, no. 36, pp. 453-463, 1973.
- [79] J. Kolek, "Research on the vibration of fresh concrete," in *Conference on Vibrations-Compaction Techniques*, Budapest, 1963.
- [80] J-M. Geoffray, "Béton Hydraulique - Mise en Oeuvre," *Les Techniques de l'Ingénieur*, C 2229, 2008.
- [81] M. Dessoiff, "Sur l'étude de la pervibration du béton," *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 5, pp. 681-688, 1937.
- [82] P.F.G. Banfill, M.A.O.M. Teixeira, and R.J.M. Craik, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941, 2011.

- [83] S.S. Chen, M.W. Wambsganss, and J.A. Jendrzejczyk, "Added Mass and Damping of a Vibrating Rod in Confined Viscous Fluids," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, pp. 325–329, 1976.
- [84] K. C. Hover, "Vibration tune-up," *Concrete International*, vol. 23, no. 09, pp. 30-35, 2001.
- [85] C. Legrand, A. Lassalle "Evolution du comportement rhéologique d'une pâte de ciment fraîche suivant la distance à une source vibrante," *Matériaux et Construction*, vol. 13, no. 74, pp. 115-124 1980.

Chapitre 2

**Dans quelles conditions est-il
nécessaire de vibrer un
béton ?**

Chapitre 2

Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?

Dans le chapitre précédent, nous avons montré la difficulté d'identifier les effets bénéfiques d'une vibration de qualité. Une étude de la littérature a mis en évidence que l'application d'une pervibration à l'état frais assure un compactage maximal du matériau afin d'obtenir les résistances mécaniques attendues. Cependant, les formulations des bétons de ces travaux s'éloignent fortement de celles employées actuellement sur les chantiers de construction.

Le béton coulé en place avec l'application d'une pervibration, constitue le mode de mise en œuvre majoritaire par rapport à l'assemblage d'éléments préfabriqués. D'un point de vue macroscopique, nous savons que la vibration augmente la fluidité des matériaux cimentaires. En revanche, une mesure expérimentale ou une prédiction analytique précise de l'évolution du comportement sous vibration d'un béton à l'état frais reste difficile. Par conséquent, dans ce chapitre, nous choisissons de nous focaliser sur les propriétés des bétons à l'état durci plutôt qu'à l'état frais.

Nous visons dans ce chapitre à identifier les conditions dans lesquelles la vibration permet d'améliorer les propriétés à l'état durci.

Afin de mettre en évidence l'influence d'une vibration interne, nos études comparent deux modes de mise en œuvre. Le premier correspond à un état de référence avec l'application d'une pervibration suivant les recommandations traditionnelles, tandis que pour le second nos échantillons sont fabriqués sans vibration. En effet, pour cette dernière configuration, le matériau est simplement déversé manuellement durant l'étape de remplissage des moules nécessaires à nos essais présentés dans les prochaines sections. Ces échantillons subissent uniquement un talochage de surface très « doux » pour obtenir un échantillon exploitable en fonction de l'essai à réaliser.

Nous développons parallèlement trois axes d'études. Premièrement, afin de retrouver les conclusions de la littérature du XX^{ième} siècle, nous nous focalisons sur l'évolution des résistances mécaniques en compression et traction simple. Puis, dans un second temps, nous définissons un critère de porosité de surface pour caractériser l'aspect de parements des bétons. Enfin, nous étudions la qualité de l'interface acier/béton à partir d'essais mécaniques d'arrachement de barres d'acier. Ainsi, ces trois familles d'essais se focalisent toutes sur une interface présente au sein du matériau.

2.1 Choix des matériaux et matériels d'études

Cette section présente le choix des matériaux et leur répartition pour établir les formulations de nos bétons d'études.

2.1.1 Paramètres de formulation

D'un point de vue rhéologique, les bétons fermes de classe de consistance S1 et S2 sont généralement formulés avec un squelette granulaire important par rapport au volume de la pâte de ciment. De plus, nous avons montré dans le chapitre précédent qu'en fonction de la quantité des agrégats, les contacts frictionnels dominent l'écoulement du matériau [1]. Bien que ces consistances de béton ne soient pas utilisées pour remplir des coffrages *in situ*, la rhéologie de ces matériaux se rapproche davantage des bétons de la 1^{ière} moitié du siècle précédent ceux ayant une fluidité plus importante (> S3). Par conséquent, pour évaluer les effets de la vibration sur les propriétés à l'état durci des bétons, nous avons établi six formulations s'étalant d'une classe de consistance S1 à une consistance très fluide de type BAP. Ainsi, nous parcourons une gamme de matériaux représentant les bétons du siècle dernier et ceux de notre époque.

Par ailleurs, nous séparons nos bétons en deux parties : une phase liquide composée du mélange eau plus ciment et une phase solide constituée du squelette granulaire. Deux options existent pour dicter l'affaissement de nos matériaux. La première consiste à accroître la fluidité de la matrice cimentaire en augmentant le ratio massique Eau/Ciment (E/C) ou le dosage en superplastifiant. La seconde correspond à modifier le volume de la pâte de ciment par rapport à celui du squelette granulaire. Il est important de garder à l'esprit que pour cette description, les termes « eau » et « ciment » sont employés d'un point de vue rhéologique afin de formuler une pâte de ciment. Ainsi, il s'agit de l'eau uniquement disponible pour le ciment. De plus, nous ne distinguons pas à ce stade la composition du liant. Par conséquent, la masse de ciment correspond à la masse totale de poudre sèche incorporée dans le mélange « eau+ciment ».

Pour nos formulations nous avons choisi la deuxième option, *i.e.* maintenir une fluidité constante de la matrice cimentaire en conservant le même ratio E/C avec un pourcentage identique de superplastifiant. Seules les variations volumiques de la pâte de ciment (ou du volume total du squelette granulaire)

conditionnent la consistance du matériau. Nous traçons sur la Figure 2.1 l'évolution de l'affaissement de nos bétons d'études en fonction du volume de la pâte de ciment.

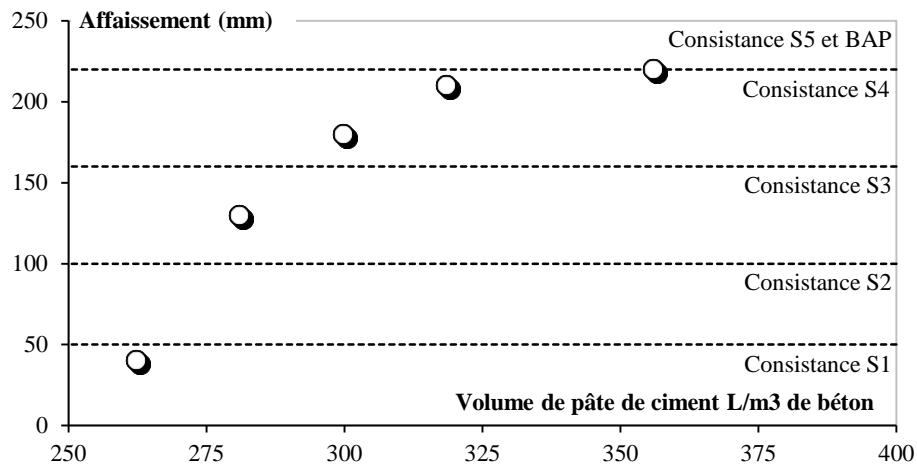


Figure 2.1. Volume de la pâte de ciment en fonction de l'affaissement des bétons à l'état frais. Les classes de consistance définies par la norme NF EN 206-1 sont rappelées.

Nos formulations sont ainsi représentatives des bornes imposées par les normes NF EN 206-1 [2] et NF EN 206-9 [3]. Elles sont toutes représentatives des chantiers de construction mis à part la consistance S1. La mise en œuvre des bétons de cette consistance reste délicate car elle présente un étalement très limité sous l'unique effet de la gravité. Son application est réservée aux éléments non armés comme par exemple les bétons de propreté bien qu'une aide extérieure soit requise pour l'étaler.

De plus, nous utilisons des granulats de Seine semi-concassés originaires de Bernière dont les fiches techniques de produit (FTP) sont disponibles en Annexe 2.1 et Annexe 2.2. Par ailleurs, comme présenté dans le chapitre 1, le recours à des adjuvants réducteur d'eau assure une fluidité suffisante avec une faible quantité de pâte ciment. Ainsi, toutes nos formulations contiennent un plastifiant, Plastiment HP de Sika. Sa fiche technique est disponible dans l'Annexe 2.3. Enfin, afin de se rapprocher du contexte environnemental et sociétal présenté préalablement [4], nous avons choisi l'utilisation d'un ciment recomposé à base de laitier de haut fourneau. Il s'agit d'un ciment Calcia, originaire de Gargenville, dénommé : CEM III/A 52.5 L-LH CE PM-ES-CP1 NF, cf Annexe 2.4.

2.1.2 Formulations expérimentales

Nos formulations sont dénommées S1, S3, S4, S4+(-1-), S4+(-2-) et BAP. Elles sont directement associées à la consistance du matériau mesurée à partir de l'essai d'affaissement pour les bétons S1 à S4+ [5] ou de l'essai d'étalement pour le BAP [6]. Les bétons S4+(-1-) et S4+(-2-) sont spécialement développés pour se rapprocher des formulations des fondations profondes qui ne sont pas vibrées. En effet, celles-ci contiennent une quantité de ciment élevée par rapport aux autres. (Cf Tableau 2.1).

Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?

De plus, la méthode de fabrication des bétons développée au sein de l'IFSTTAR consiste à utiliser des granulats secs. Ainsi, tous nos granulats sont préalablement séchés avant utilisation. Cette étape est réalisée à l'aide d'un système de séchage composé d'un tapis roulant couplé à des lampes chauffantes. Par conséquent, le terme « Eau » au sein du ratio E/C disponible dans le Tableau 2.1 correspond à l'eau totale ajoutée pour la fabrication des bétons. Néanmoins, l'industrie du béton favorise l'utilisation de la notion d'eau efficace, *i.e.*, la quantité d'eau réellement disponible au sein du matériau pour conserver sa rhéologie. Les granulats disponibles pour nos formulations possèdent un coefficient d'absorption égal à 1,21% pour le sable et à 2,31% pour le gravier (cf. Annexe 2.1 et Annexe 2.2). Comme nos granulats sont supposés complètement secs après leur étape en étuve, nous devons prendre en compte leur absorption naturelle dans la quantité d'eau à ajouter lors de la fabrication des bétons. Nous indiquons dans le Tableau 2.1 la quantité d'eau efficace pour chaque formulation testées.

Enfin, comme indiqué précédemment, nos bétons sont formulés avec un ratio massique EauTotaleCiment (E/C) constant et égal à 0,60 soit un ratio massique EauEfficace/Ciment égal à 0,58. De même, le ratio Gravier/Sable (G/S) est constant et égal à 1,22.

Classe de consistance	S1	S3	S4	S4+ (-1-)	S4+ (-2-)	BAP
Sable 0/4mm (kg.m ⁻³)	796	775	755	737	696	695
Gravier 6,3/20mm (kg.m ⁻³)	973	948	923	901	851	849
Quantité de ciment (kg.m ⁻³)	280	300	320	340	380	380
Plastiment HP (% en masse de ciment)	0,41	0,41	0,41	0,41	0,06	0,85
Eau efficace (L)	161,1	172,1	184,5	196,0	219,5	218,4
EauTotale/Ciment (-)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
EauEfficace/Ciment	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,57
Gravier/Sable (-)	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Essai d'affaissement (A) (mm) ¹	40	130	180	210	220	650
Essai d'étalement (E) (mm)	(A)	(A)	(A)	(A)	(A)	(E)

Tableau 2.1. Formulations des bétons.

Le protocole de fabrication de nos bétons est le même pour toutes nos gâchées. Les particules sèches sont pesées puis introduites dans un malaxeur SKAKO-COUVROT dans l'ordre suivant : graviers, sable puis ciment. L'ensemble est malaxé pendant 1 minute et 30 secondes. Le plastifiant étant sous

¹Il s'agit des valeurs obtenues fréquemment lors des essais d'affaissement ou d'étalement

forme liquide, 30% est mélangé avec l'eau qui est déversée dans le malaxeur et l'ensemble est agité pendant 2 minutes et 30 secondes. Enfin, le reste de l'adjuvant est directement ajouté dans la cuve et le malaxage se prolonge durant 1 minute et 30 secondes. Dès que la fabrication est terminée et avant le démarrage de chaque essai, nous vérifions la consistance du matériau frais avec un test d'affaissement au cône d'Abrams [5] pour les bétons S1 à S4+(-2-) ou avec un test d'étalement pour le BAP [6]. Ces valeurs sont rappelées dans le Tableau 2.1.

2.1.3 Matériels

Classiquement, le coulage des éléments structuraux en béton sur les chantiers de construction s'effectue à partir d'une benne à béton sur laquelle se fixe une goulotte de déversement. Celle-ci possède une souplesse suffisante pour distribuer le matériau tout au long du coffrage. (Cf Figure 2.2). De plus, la présence des armatures métalliques forme des obstacles durant la chute du béton. Elles assurent alors une trajectoire aléatoire du matériau tout au long de son parcours. Afin de se rapprocher des configurations de coulages traditionnels *in situ*, il semble nécessaire d'établir un mode de remplissage de nos échantillons proche de celui présenté ci-dessus.



Figure 2.2. Exemples de coulages traditionnels sur un chantier de construction.

Ainsi, nous avons mis au point un élément support, appelé foisonneur, adaptable sur la partie supérieure de nos moules. Celui-ci possède les mêmes dimensions qu'une éprouvette 16/32. Il est parcouru diamétralement par quatre barres d'acier haute adhérence de 20 mm de diamètre (HA20) qui forment une étoile dans le plan de la Figure 2.3 (gauche). Chacune des armatures se situe à égale distance les unes des autres. Un cône métallique inversé, fixé au niveau de la partie inférieure de l'élément, assure une connexion aisée entre le foisonneur et le dessus du moule d'une éprouvette

16/32. Ce matériel assure une hauteur de chute minimale aux matériaux employés lors de la confection de nos échantillons. Nous appliquons cette méthode de coulage pour l'ensemble de nos essais.

Enfin, la capacité volumique maximale de fabrication d'une gâchée en laboratoire conditionne les dimensions de nos échantillons. Ceux-ci sont de tailles réduites par rapport aux coffrages des chantiers de construction. Par conséquent, nous utilisons une aiguille vibrante adaptée. Celle-ci possède des caractéristiques traditionnelles, *i.e.* un diamètre de 25 mm avec une fréquence de rotation égale à 200 Hz combinée à une amplitude, dans l'air, d'environ 1 mm.

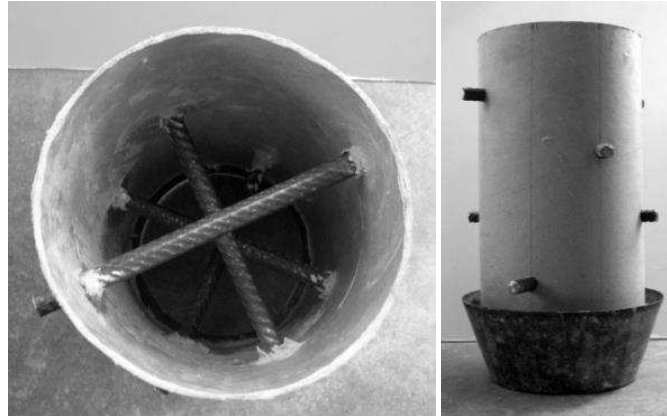


Figure 2.3. Foisonneur, vue de dessus (gauche). Foisonneur, vue de face (droite).

Dans les prochains paragraphes, nous présentons nos trois axes d'étude afin d'identifier des critères évoluant significativement avec l'utilisation d'une vibration. Ainsi, en fonction de la configuration des dimensions du coffrage, nous pourrions définir ou redéfinir les bases d'application d'une vibration de qualité.

2.2 Résultats expérimentaux des propriétés traditionnelles

2.2.1 Protocole général

Parallèlement au procédé de remplissage décrit ci-dessus, nous réalisons une mise en œuvre de nos échantillons en lien avec les exigences de la norme NF P 18-422 [7]. Les éprouvettes sont remplies en deux couches de même hauteur. La durée de la vibration dépend de la consistance du matériau [7]. (Cf. Tableau 2.2). Celle-ci est appliquée avec notre matériel standard de laboratoire.

Affaissement (cm)	1	5	9	>10
Durée de vibration par couche (s)	27	19	14	12

Tableau 2.2. Durée de vibration par couche d'éprouvette 16/32 en fonction de l'affaissement du béton. Données valables pour des granulats semi-concassés [7].

De plus, au risque de favoriser l'apparition de la ségrégation et de détériorer les propriétés à l'état durci des bétons auto-plaçant, ces matériaux ne doivent pas être vibrés lors de leur mise en œuvre [8]. En revanche, pour nos essais, nous avons choisi quand même d'appliquer une vibration interne.

2.2.2 Effets de la vibration sur la masse volumique

2.2.2.1 Masse volumique globale

Nous traçons sur la Figure 2.4 l'évolution de la masse volumique apparente d'éprouvette 16/32 en fonction de la classe de consistance des bétons. Nous comparons deux modes de mise en œuvre : le premier avec utilisation d'une aiguille vibrante et le second sans vibration.

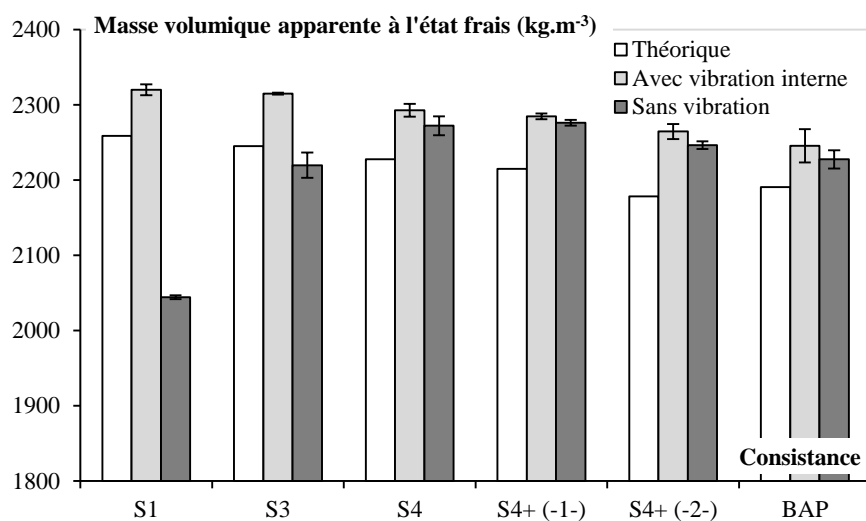


Figure 2.4. Masses volumiques apparentes des éprouvettes 16/32 en fonction de la mise en œuvre à l'état frais.

Chacun de nos échantillons sont pesés à l'état frais. Leurs dimensions sont supposées parfaitement identiques à celles des moules, soit un diamètre égal à 16 cm et une longueur de 32 cm. Ainsi, nous pouvons calculer la masse volumique apparente des éprouvettes 16/32 à l'état frais. Chaque valeur correspond à une moyenne obtenue à partir de trois échantillons. Les barres d'erreurs sont calculées à partir de l'écart type expérimental. A partir d'un niveau de confiance de la valeur moyenne choisi égal à 95% [9], nous estimons analytiquement l'écart à cette valeur moyenne telle que uniquement 5% des résultats soient en dehors de cet intervalle.

Enfin, nous comparons nos mesures à l'état frais avec une valeur théorique de la masse volumique. Celle-ci est calculée à partir des proportions volumiques de chaque constituant des formulations fournies dans le tableau en début de chapitre et d'une estimation sur la quantité de l'air contenue dans une gâchée de béton égale à 2%. Nous comparons cette hypothèse avec un essai de mesure de l'air occlus suivant la norme NF EN 12350-7 [10] comme indiqué dans le Tableau 2.3.

Consistance	S1	S3	S4	S4+ (-1-)	S4+ (-2-)	BAP
Air occlus (%)	1,8	1,9	1,7	1,4	0,9	1,7

Tableau 2.3. Mesures d'air occlus pour les formulations des bétons présentées dans le tableau 2.1.

D'après les résultats de la Figure 2.4, la vibration n'a peu d'effet sur la masse volumique apparente des bétons contrairement à ce qu'il était possible d'anticiper. En effet, pour les éprouvettes 16/32 fabriquées avec des bétons de classe de consistance S1 à S3, nos résultats montrent une diminution de la masse volumique s'étalant entre 12% à 5% lorsqu'elles ne sont pas vibrées suivant les recommandations traditionnelles. Cependant, pour les bétons les plus fluides, la masse volumique des échantillons est similaire quelque soit le mode de mise en œuvre. En effet, l'absence d'une pervibration ne semble pas diminuer la densité de ces bétons.

De plus, pour le BAP avec une mise en œuvre traditionnelle, *i.e.*, sans vibration, nos résultats montrent que la masse volumique apparente correspond à celle prédite théoriquement. Ainsi, nous retrouvons les conclusions émises ci-dessus. En revanche, l'utilisation d'une pervibration ne semble pas affecter nos échantillons car leur masse volumique est similaire à celle des éprouvettes non vibrées.

Néanmoins, cet essai fournit uniquement une mesure globale de la masse volumique des éprouvettes. Il ne permet pas de mettre en évidence une hétérogénéité locale au sein du matériau. Par conséquent, nous avons décidé d'étudier séparément la densité à cœur et la densité périphérique de nos échantillons.

2.2.2.2 Masse volumique périphérique et à cœur

A partir d'un carottage, nous étudions indépendamment la masse volumique périphérique et celle à cœur de nos éprouvettes 16/32. Nous obtenons la masse volumique de chacun des éléments à partir de la pesée et de la mesure des dimensions. Afin de ne pas détruire nos échantillons pendant la phase de sciage, nous effectuons cette étude 28 jours après le coulage des échantillons. De plus, les données disponibles dans le tableau des formulations des bétons ne permettent pas de prédire la porosité à l'état durci du matériau après la période d'hydratation. Ainsi, pour cette étude, nous ne comparons pas nos résultats avec une masse volumique théorique comme effectué précédemment. La figure ci-dessous présente les dimensions des deux éléments isolés.

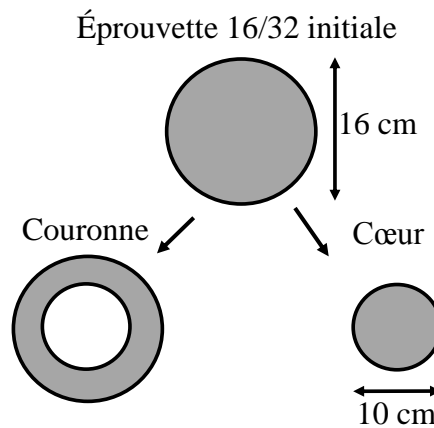


Figure 2.5. Carottage des éprouvettes 16/32 pour les mesures des masses volumiques périphérique et à cœur.

Nous traçons sur la Figure 2.6 la masse volumique de la couronne en fonction de la classe de consistance du matériau. Nous comparons deux modes de mise en œuvre : le premier avec utilisation d'une aiguille vibrante et le second sans vibration. Nos résultats montrent une tendance similaire de l'effet de la vibration sur la masse volumique périphérique et sur la masse volumique globale. Elle est cependant plus marquée. En effet, en absence d'une vibration interne, la densité de la couronne diminue par rapport à celle obtenue avec l'utilisation d'un pervibrateur. Cette chute de la masse volumique est respectivement égale à 12% et 7% pour les bétons de consistance S1 et S3. Par contre, la densité de la couronne, pour des bétons de fluidité plus importante, ne semble pas être affectée par une absence de vibration. De même, notre formulation de BAP non vibrée montre une masse volumique périphérique identique à celles des autres classes de consistance. Cependant, l'application d'une pervibration du BAP ne semble pas détériorer sa densité.

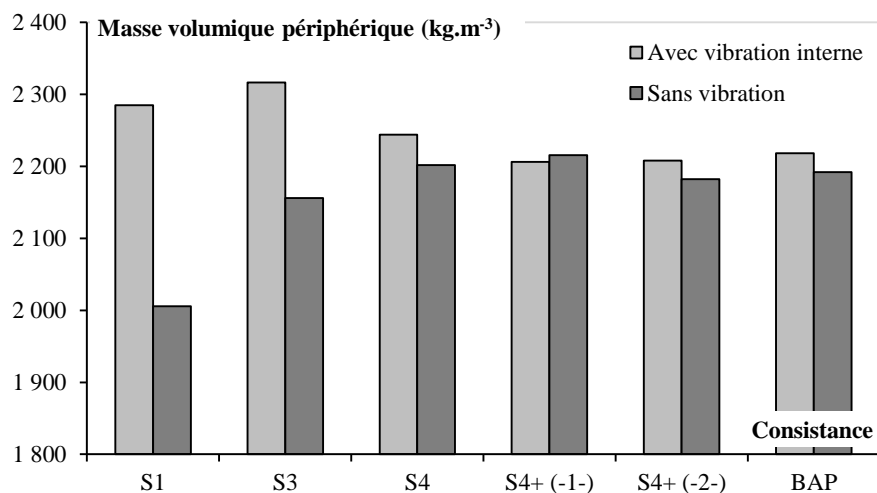


Figure 2.6. Masses volumiques de la couronne des éprouvettes 16/32 en fonction de la classe de consistance du matériau et de l'application de la vibration à l'état frais.

Nous traçons sur la Figure 2.7 la masse volumique à cœur en fonction de la classe de consistance du matériau. Comme précédemment, nous comparons les deux modes de mise en œuvre. Quelque soit la

consistance, nos résultats montrent que la densité à cœur des échantillons non vibrés varient de moins de 0,6 % autour d'une valeur moyenne égale à $2\,254\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Seule la masse volumique à cœur du béton de consistance S1 est très légèrement augmentée avec l'application de la vibration. Par conséquent, contrairement aux deux études précédentes, ces résultats suggèrent que le cœur des échantillons ne semble pas être affecté par le processus de pervibration.

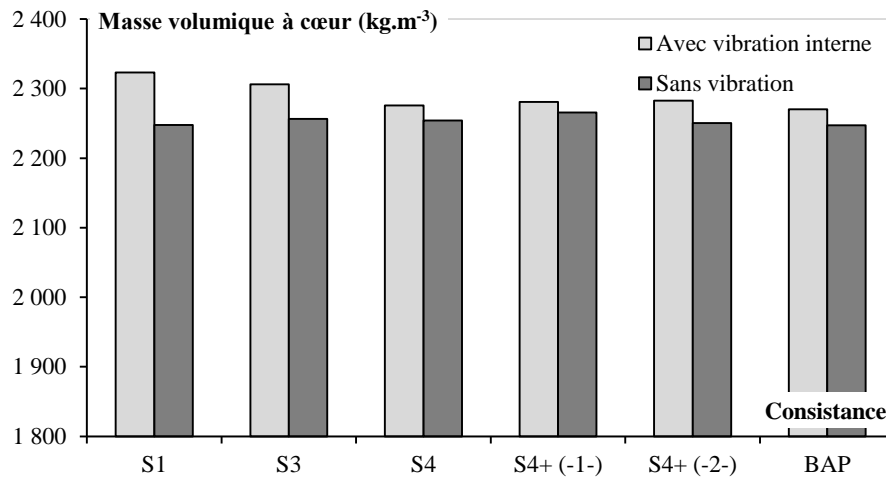


Figure 2.7. Masses volumiques à cœur des éprouvettes 16/32 en fonction de la classe de consistance du matériau et de l'application de la vibration à l'état frais.

Ces premiers résultats montrent que la détection des conséquences d'une absence de vibration est limitée. En effet, uniquement pour des bétons de consistance S1 à S3, une absence de vibration favorise un mauvais remplissage des éprouvettes 16/32. De plus, ce constat apparaît préférentiellement au niveau de la périphérie de l'échantillon. En revanche, les classes de consistances S1 et S2 sont peu représentatives des formulations des bétons utilisés dans la pratique. Classiquement, les bétons ont une consistance minimale de type S3 pour la construction des bâtiments et une consistance minimale de type S4 pour les ouvrages des travaux publics.

2.2.3 Effets de la vibration sur les résistances mécaniques

2.2.3.1 Complément du protocole expérimental

Après 28 jours de conservation à température ambiante, nous déterminons les résistances en compression et traction simple sur des éprouvettes cylindriques 16/32 en accord avec les normes NF EN 12390-3 [11] et NF EN 12390-6 [12]. Pour les essais en compression simple, chaque face des cylindres subissent un traitement de surface à l'aide d'une rectifieuse pour se prémunir d'éventuels défauts pouvant perturber nos résultats. Nous utilisons une presse hydraulique de chez Mohr & Federhaff Losenhausen (MFL) ayant une capacité maximale de 5 000 kN en compression simple. Le paramétrage d'asservissement du vérin arrête la compression de l'échantillon dès que la résistance maximale est atteinte. Après chaque essai, nous vérifions les faciès de rupture des éprouvettes en fonction de la norme NF EN 12390-3 [11].

2.2.3.2 Résistance en compression simple

Nous traçons sur la Figure 2.8 la résistance mécanique en compression simple des éprouvettes 16/32 en fonction de la classe de consistance du béton. Nous comparons les deux modes de mise en œuvre. Les valeurs des résistances mécaniques correspondent à la moyenne d'au minimum trois essais. Enfin, comme pour l'étude de la masse volumique globale, nous estimons des barres d'erreur pour un niveau de confiance de 95 % à partir des écart-types expérimentaux.

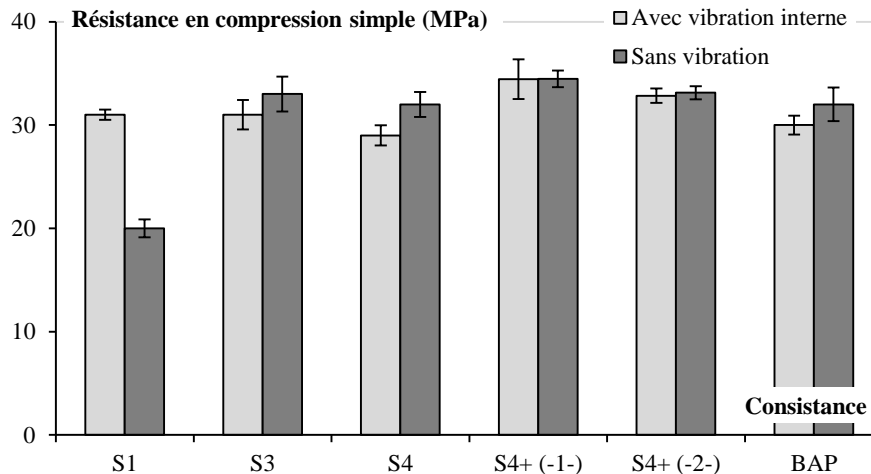


Figure 2.8. Résistances mécaniques en compression simple sur éprouvettes cylindriques 16/32 à 28 jours en fonction de la classe de consistance du matériau et de l'application de la vibration à l'état frais.

Nos résultats montrent que la résistance mécanique en compression simple diminue considérablement uniquement pour le béton de consistance S1 en configuration non vibrée. En revanche, pour toutes les autres formulations testées, aucune ne présente la réduction attendue [13,14] de la résistance malgré une absence de vibration à l'état frais.

Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que les formulations des bétons issues de [13,14] diffèrent fortement par rapport à celles employés actuellement. Comme présenté en début du chapitre, uniquement, les bétons de consistance S1 voire S2 tendent à se rapprocher des bétons du siècle précédent. Par conséquent, ces résultats ne sont pas en désaccord avec ceux obtenus dans la littérature.

Cependant, l'idée communément admise selon laquelle une absence de vibration détériore les résistances mécaniques s'avère s'éloigner de nos résultats. En effet, ils suggèrent que les essais traditionnels de résistances mécaniques en compression simple ne semblent pas appropriés pour apprécier l'efficacité de la vibration au cours de la mise en œuvre des échantillons. Néanmoins, nous notons que l'application d'une vibration permet pour la majorité de nos mesures de diminuer la dispersion des résultats.

2.2.3.3 Résistance en traction simple

Nous traçons sur la Figure 2.9 la résistance mécanique en traction simple des éprouvettes 16/32 en fonction de la classe de consistance du béton.

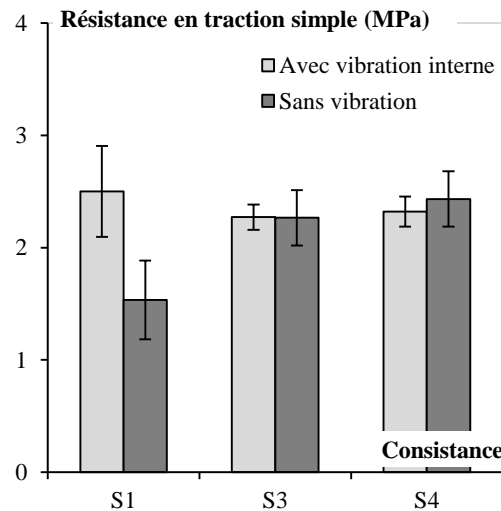


Figure 2.9. Résistances mécaniques en traction simple sur éprouvettes cylindriques 16/32 à 28 jours en fonction de la classe de consistance du matériau et de l'application de la vibration à l'état frais.

Ces résultats montrent les mêmes tendances que celles mises en évidence avec les essais de résistances en compression simple. En effet, uniquement la classe de consistance S1 en configuration non vibrée présente une diminution de la résistance mécanique en traction simple. Cependant, l'application de la vibration diminue la dispersion des mesures. Nous précisons que nous n'avons pas effectué des essais de fendage pour les formulations S4+(-1-), S4+(-2-) et BAP. Nous supposons que ces bétons présentent en traction simple les mêmes tendances qu'en compression simple.

2.2.4 Analyse des études traditionnelles – Influence sur le remplissage

Les mesures des masses volumiques périphériques montrent que la gravité n'est plus capable de générer une contrainte suffisante pour vaincre l'effet de paroi. Tandis qu'à cœur, le poids propre du matériau apparaît toujours capable de mettre en place un matériau quasi-homogène.

Dans un premier temps, pour quantifier l'influence de la gravité par rapport à la fluidité du matériau, nous étudions le ratio adimensionné entre la contrainte seuil τ_0 et une contrainte de remplissage. D'un point de vue dimensionnel, nous étudions le ratio suivant :

$$\frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot L} \quad (2.1.)$$

Avec :

τ_0 : la contrainte seuil du matériau, (Pa).

ρ : la masse volumique du matériau, ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

g : l'accélération gravitationnelle terrestre, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

L : une longueur caractéristique de l'écoulement, (m).

Pour remplir les éprouvettes cylindriques, une distance caractéristique correspond au rayon des échantillons, noté r_E , égal à 8 cm. Ainsi, le ratio précédent devient:

$$\frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot r_E} \quad (2.2.)$$

Ainsi, quand $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot r_E) \ll 1$ alors la contrainte gravitationnelle permet le remplissage. Tandis que pour $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot r_E) \gg 1$, la contrainte seuil du matériau empêche un remplissage total. Pour déterminer le seuil τ_0 , à partir de l'affaissement, nous utilisons la formule de Roussel et Coussot [17] présentée dans le chapitre 1, $\tau_0 = (25,5 - S) \cdot \rho / 17,6$.

Parallèlement, nous étudions le ratio adimensionné entre la masse volumique totale des éprouvettes 16/32 obtenue sans vibration, ρ_{TNV} et la masse volumique totale des échantillons vibrés, ρ_{TV} . Nous traçons alors sur la Figure 2.10 le ratio ρ_{TNV}/ρ_{TV} en fonction du ratio $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot r_E)$. La courbe en pointillé, $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot r_E) = 1$, sépare, en théorie, les deux domaines d'écoulement.

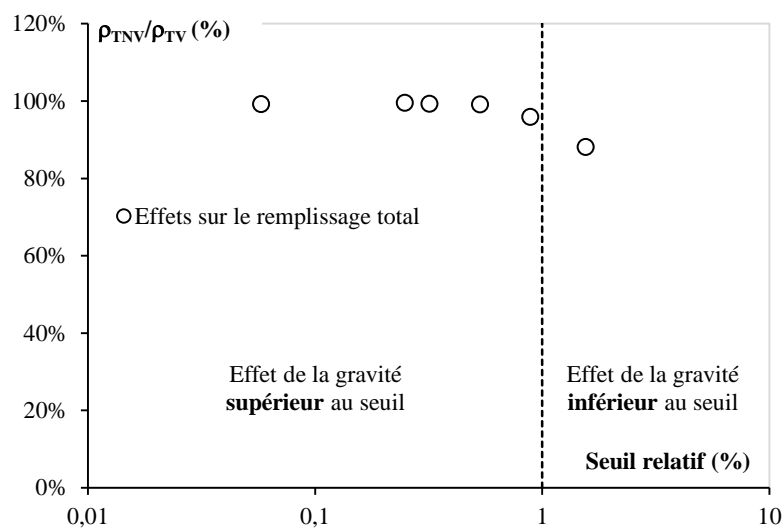


Figure 2.10. Évolution du ratio de la masse volumique relative en fonction de la contrainte seuil relative.

Dans le cas de remplissage d'éprouvette 16/32, nos résultats montrent que l'unique effet de la gravité permet de remplir les moules et de compacter les bétons.

Dans un second temps, nous effectuons le même raisonnement avec la masse volumique périphérique des échantillons. Pour cette étude, la longueur caractéristique L est choisie égale à l'épaisseur totale de la couronne soit 8 cm et le ratio entre les masses volumiques correspond à la masse volumique mesurée pour les couronnes non vibrées et celles mesurées pour les couronnes vibrées.

De plus, nous appliquons aussi cette approche avec les résistances mécaniques. Nous choisissons comme longueur caractéristique la distance de béton en compression pure, *i.e.* la hauteur du cœur égale à 16 cm et nous étudions le ratio entre les résistances obtenues sans vibration et obtenues avec vibration.

Ainsi, nous traçons sur la Figure 2.11 ces trois propriétés relatives en fonction du seuil relatif.

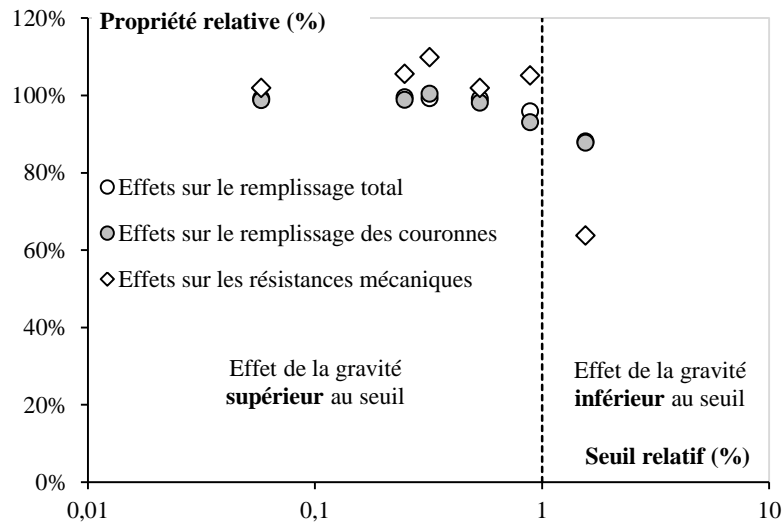


Figure 2.11. Évolution de plusieurs propriétés adimensionnées en fonction de la contrainte seuil relative du béton pour différents mode de mise en œuvre.

Ces résultats montrent une tendance similaire à celle évoquée précédemment avec l'étude de la masse volumique totale des éprouvettes. En effet, nous obtenons deux comportements distincts. Quand la contrainte seuil du matériau est inférieure à la contrainte gravitationnelle, $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot d_E) < 1$, les propriétés testées atteignent 100% de leur valeur potentielle. En revanche, dès que la contrainte seuil du béton dépasse l'effet de la gravité alors les propriétés tendent à diminuer. Cependant, à partir de nos essais, uniquement la classe de consistance S1 semble être sensible à la vibration. De plus, nous n'avons pas pu identifier une configuration dont la valeur de la propriété diminuerait fortement en absence de vibration.

Par conséquent, il semble nécessaire de déterminer d'autres critères pour caractériser l'influence de la vibration. La chute de la masse volumique périphérique a mis en évidence que l'application d'une pervibration a un effet plus marqué au niveau des interfaces du matériau. Il apparaît donc intéressant de continuer à étudier les interfaces dans le béton. Ainsi, nous pourrions compléter le précédent graphique et améliorer notre compréhension de l'utilisation de la pervibration.

2.3 Effets de la vibration sur l'aspect de parement

En parallèle de notre étude des masses volumiques, nous avons observé des contrastes prononcés entre les aspects des parements des éprouvettes. Ainsi, à partir d'un outil d'analyse d'image, nous proposons de caractériser la surface de ces échantillons.

2.3.1 Présentation macroscopique

Nous rassemblons dans les figures ci-dessous les parements des éprouvettes 16/32. Celles-ci sont confectionnées avec des bétons de classe de consistance S1 à BAP selon le protocole expérimental décrit en début du chapitre.

La Figure 2.12 présente une série d'échantillons mis en œuvre sans vibration. A partir de simples observations visuelles, cette figure montre que les parements des bétons les plus fermes sont davantage détériorés par rapport aux autres fluidités. En effet, pour les bétons de consistance S1 et S3 deux catégories de défauts se distinguent. Les premiers ont une taille de l'ordre du centimètre et tapissent près de la moitié de la surface. Les seconds, plus classique, correspondent à des bulles d'air. De plus, pour les bétons de consistance S4 à autoplaçant, uniquement les défauts de dimensions millimétriques apparaissent.

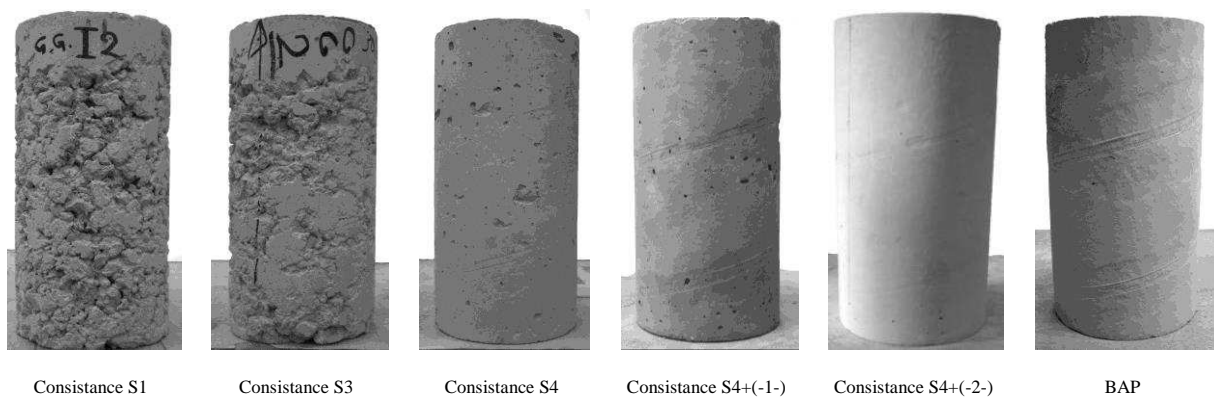


Figure 2.12. Exemples des parements des éprouvettes 16/32 non vibrées.

Parallèlement, la Figure 2.13 réunit des éprouvettes issues des mêmes formulations des bétons mais celles-ci sont fabriquées avec l'utilisation d'une pervibration. Pour cette configuration, nous émettons deux constats qualitatifs. Premièrement, à consistance fixée, l'application d'une vibration diminue fortement la quantité de défauts des bétons les plus fermes (S1 & S3). Deuxièmement, les effets bénéfiques de l'aiguille vibrante sont moins prononcés avec l'accroissement de la fluidité du matériau (S4 à BAP).

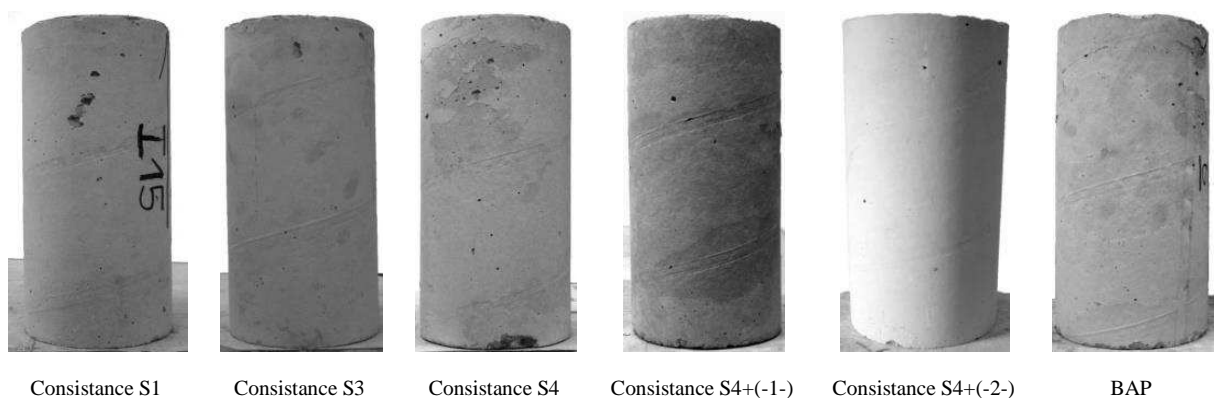


Figure 2.13. Exemples des parements des éprouvettes 16/32 vibrées.

Par conséquent, l'évolution de l'état de surface des parements met en évidence l'existence d'un indicateur macroscopique exploitable pour définir l'efficacité d'une vibration.

2.3.2 Développement d'un outil d'analyse d'image

Pour caractériser analytiquement les défauts de surface, nous utilisons un logiciel gratuit d'analyse d'image dénommé ImageJ [18]. Il est utilisé dans de nombreux domaines, principalement dans le milieu médical [19] pour l'identification cellulaire par microscopie [20]. Pour nos études, nous nous focalisons sur les fonctions de détection des formes et les capacités des calculs associées. Par exemple, à partir d'une photographie, ImageJ est capable de détecter les formes, de les comptabiliser et de fournir leur surface. Pour y parvenir, ce logiciel propose plusieurs outils. Le plus simple consiste à indiquer manuellement une valeur seuil de nuance de gris, compris entre 0 et 255, au sein d'une image en noir et blanc. En dessous de cette valeur, ImageJ détecte tous les contours et calcule la surface de la forme rencontrée.

Pour vérifier l'exactitude des résultats fournis par le logiciel nous avons créé une image numérique comportant un nombre fixe de carrés de dimensions variées (de 1 à 500 pixels de côté) et espacés au minimum d'un pixel. (Cf Figure 2.14.). Le Tableau 2.4 rassemble les propriétés de l'image étalon. A partir de la fonction détection présentée ci-dessus, ImageJ identifie exactement le nombre et les surfaces des carrés.

Nombre de carrés	taille du côté (pixel)
10	1
10	5
10	10
10	50
10	100
5	500

Tableau 2.4. Dimensions et quantité des carrés répartis au sein de l'image étalon.

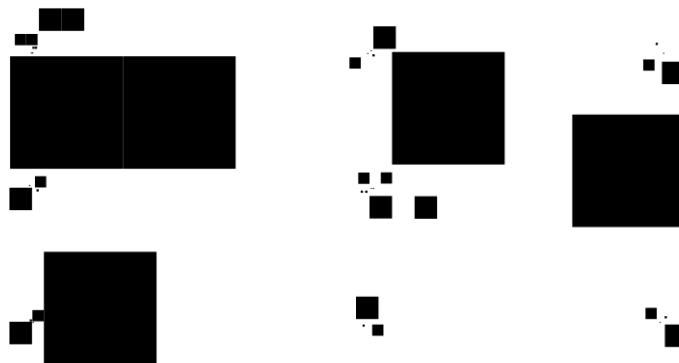


Figure 2.14. Image étalon pour vérifier les capacités de détection du logiciel ImageJ.

2.3.3 Protocole expérimental

Les parements des éprouvettes en béton ne présentent pas naturellement un contraste aussi net que celui de l'image étalon. Les creux et les bosses générés par les défauts et les bulles d'air forment des nuances de gris variés sur les surfaces des échantillons. Ainsi, nous avons développé un système spécifique pour l'obtention d'un seuil précis entre les teintes. Celui consiste à mettre en évidence la matrice cimentaire grise en opposition avec le fond noir des trous formés par l'ensemble des défauts. Par conséquent, chaque échantillon est photographié avec une projection de lumière rasante afin de ne pas éclairer les pores à la surface. Nous limitons notre étude à une unique photo de l'éprouvette. Ensuite, chaque photo est aisément exploitable avec le logiciel ImageJ.

Afin d'étudier des photos semblables des parements, nous nous focalisons uniquement sur une zone centrale de l'image. Ainsi, nous supprimons un pourtour de 5 cm de large avant le traitement numérique. Nous résumons l'ensemble des étapes précédentes dans la figure suivante.

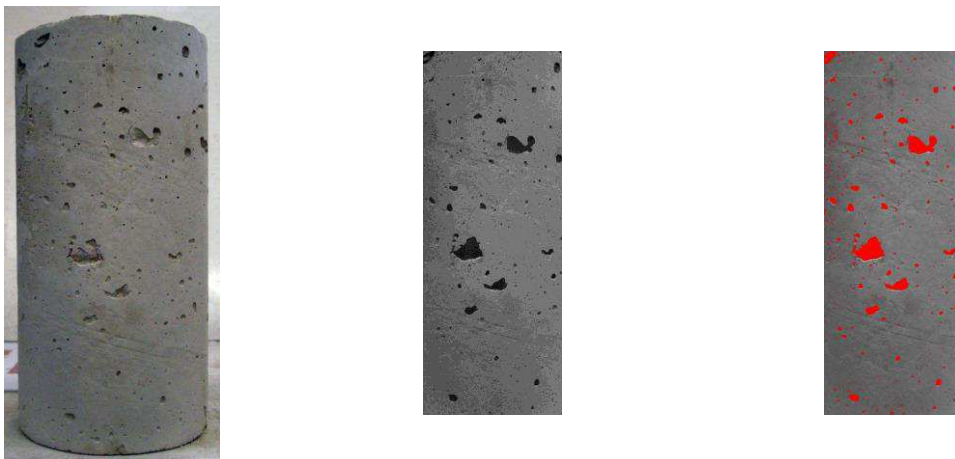


Photo de l'échantillon à traiter Phase de seuillage de l'image Détection des vides par le logiciel

Figure 2.15. Étapes de traitement pour la détection des vides de surface avec le logiciel ImageJ.

A partir des fonctions de détection présentées préalablement, nous choisissons deux critères d'étude : la porosité de surface de l'échantillon, noté P_S et le diamètre moyen des défauts, noté D_{MOYEN} .

Le premier correspond au ratio entre la surface totale générée par tous les défauts, S_V , et la surface de l'image de l'échantillon traitée, S_T , tel que :

$$P_S = \frac{S_V}{S_T} \quad (2.3.)$$

Ce terme de porosité de surface exprimé en pourcentage, s'étale entre 0 et 100% respectivement pour une quantité de défauts nulle et une quantité de trous égale à la surface de l'échantillon. Ainsi, une vibration adaptée doit assurer l'obtention d'une valeur faible de P_S . A contrario, une absence de vibration devrait mettre en évidence une porosité de surface de valeur importante.

Nous calculons le second critère à partir d'une pondération des diamètres de chaque défaut par rapport à la surface totale des défauts tel que :

$$D_M = \frac{\sum_i^{n_d} D_i \cdot A_i}{\sum_i^n A_i} \quad (2.4.)$$

Avec :

D_i : diamètre du défaut rencontré (m)

A_i : aire du défaut de diamètre D_i (m^2)

n_d : le nombre total de défaut qui varie en fonction de l'image traitée.

De plus, la probabilité de la présence des défauts à la surface des échantillons est identique quelque soit la zone considérée. Par conséquent, nous limitons notre étude à l'analyse d'un demi-cylindre.

Enfin, nous émettons l'hypothèse de bulles d'air parfaitement sphériques. Ainsi, les surfaces détectées sont exploitables d'un point de vue volumique.

2.3.4 Résultats expérimentaux

Nous traçons sur la Figure 2.16 l'évolution de la porosité de surface des parements en fonction de la classe de consistance. Ces résultats mettent en évidence deux constatations principales.

Tout d'abord, en absence de vibration, la porosité de surface diminue fortement avec l'augmentation de la fluidité du béton à l'état frais. En effet, deux ordres de grandeur séparent la porosité de surface du béton de consistance S1 et celui de consistance S4+(-2-) respectivement égale à 64% et 0,1 %. Parallèlement, cette diminution est davantage prononcée pour des matériaux suffisamment fluides, *i.e.* à partir de la classe de consistance S4. Ainsi, nos résultats présentent une évolution significative en fonction du mode de mise en œuvre

Deuxièmement, quelque soit la consistance du matériau, la vibration assure un parement comportant une quantité de défaut limitée. En effet, la porosité de surface est toujours approximativement égale à 1%. Parallèlement à ces effets bénéfiques, la Figure 2.16 montre aussi que pour les BAP, l'utilisation d'une vibration a tendance à augmenter la porosité de surface. Enfin, pour une consistance très fluide de type S4+, la vibration ne semble pas affecter ce type de matériau.

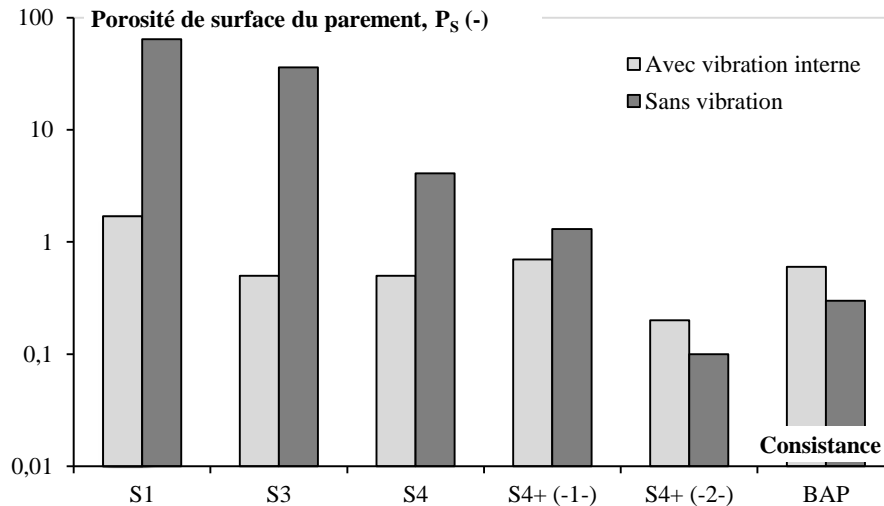


Figure 2.16. Porosité de surface mesurée par analyse d'image sur des échantillons de bétons à 28 jours.

Nous traçons sur la Figure 2.17 le second critère d'analyse d'image, soit l'évolution du diamètre moyen des défauts en fonction de la consistance. Nous retrouvons globalement les mêmes tendances que celles présentées précédemment. En effet, en l'absence de vibration, le diamètre moyen des défauts diminue fortement avec l'augmentation de la fluidité jusqu'à une valeur minimale approximativement égale à 1 mm. De plus, à consistance fixée, l'utilisation de la vibration assure un diamètre moyen des défauts plus petit que celui des échantillons non vibrés.

Cependant, contrairement à la porosité de surface, le diamètre moyen des défauts des échantillons vibrés n'est pas égal à une même valeur. Malgré un protocole identique en fonction de la consistance, D_M après vibration diminue aussi avec l'augmentation de la fluidité.

Enfin, ce critère d'étude montre aussi que les bétons de consistance très fluides (S4+) ne semblent pas être affectés par une absence de vibration. En effet, quelque soit le mode de mise en œuvre, nous obtenons une valeur semblable pour leur diamètre moyen des défauts.

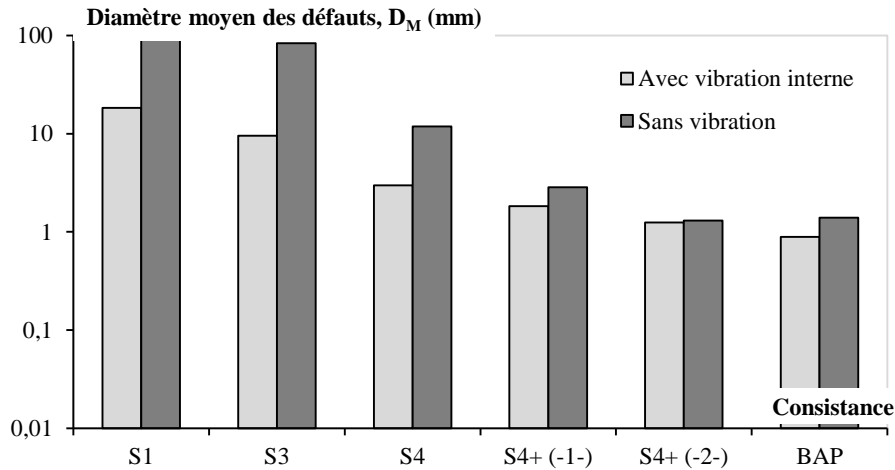


Figure 2.17. Diamètre moyen des défauts de surface mesuré par analyse d'image sur des échantillons de béton durci.

Par conséquent, une étude de la porosité de surface ou du diamètre moyen des défauts permet de mettre en évidence l'influence de la vibration à l'état frais. Ces deux critères montrent qu'un mauvais remplissage des moules traduit des problèmes de qualité d'interface air/solide (bulle/matrice cimentaire).

2.3.5 Analyse de l'aspect de parement

Nous procédons à une analyse similaire à celle présentée préalablement à partir des essais mécaniques traditionnels. Ainsi, nous choisissons d'étudier la quantité de surface non affectée par des défauts en fonction de l'effet de la gravité par rapport au seuil du matériau. Tout d'abord, à partir de la porosité de surface, nous déduisons une aire dépourvue de défaut telle que :

$$1 - \frac{P_S}{100} \quad (2.5.)$$

Avec :

P_S : porosité de surface obtenue par analyse d'image à partir de l'étude de parement d'éprouvette 16/32 non vibrée, (%).

Ainsi, pour des parements très détériorés, la porosité de surface tend vers la valeur de 100 % et $1 - P_S/100$ est très inférieur à 1. De même pour une surface dépourvue de défauts, P_S tend vers 0%, alors $1 - P_S/100$ est proche de 1.

De plus, nous étudions l'effet de la gravité à partir de la relation suivante :

$$\frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot L} \quad (2.6.)$$

Pour choisir une longueur caractéristique, L , nous calculons le diamètre moyen des défauts, D_{MOYEN} sans vibration. Ainsi, à partir des résultats précédents (Cf. Figure 2.17), D_M est égal à 4 cm. Nous obtenons le ratio suivant :

$$\frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot D_M} \quad (2.7.)$$

Alors, nous traçons sur la Figure 2.18 la quantité de surface sans défaut en fonction du ratio $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot D_M)$. Sur la même figure, nous rappelons nos résultats obtenus avec les masses volumiques et avec les résistances mécaniques.

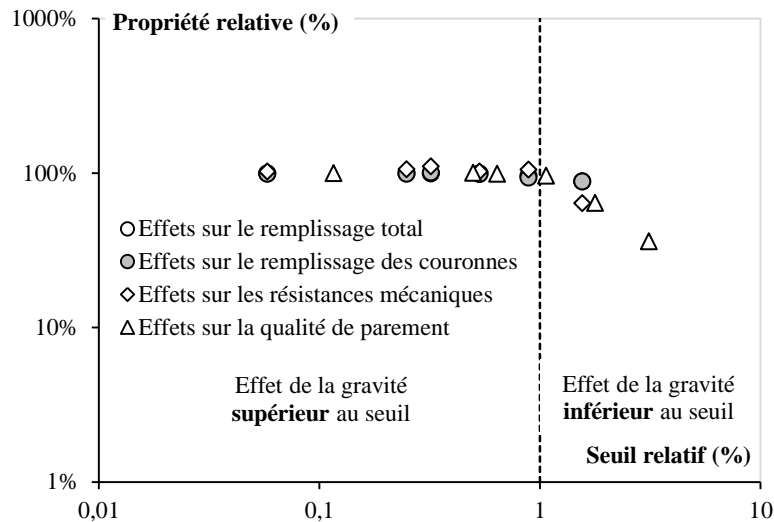


Figure 2.18. Évolution de plusieurs propriétés adimensionnées en fonction de la contrainte seuil relative du béton pour différents mode de mise en œuvre.

Nous retrouvons les mêmes tendances que celles présentées en début de chapitre. En effet, quand $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot D_M) \ll 1$ alors la contrainte gravitationnelle favorise le remplissage et permet d'obtenir des parements dépourvus de défaut en absence de vibration. De même, quand $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot D_M) \gg 1$ la contrainte seuil du béton limite l'écoulement du matériau. Dans cette configuration, la vibration apparaît comme un outil nécessaire de mise en œuvre pour assurer des parements sans bullage apparent.

2.4 Évolution de l'adhérence acier/béton

2.4.1 Présentation générale

La réglementation française sur le calcul des structures [21] impose que l'ensemble des éléments de construction en béton (poteau, poutre, dalle, fondation...) possèdent des armatures métalliques pour reprendre les efforts de traction ayant lieu au sein du matériau. Ces efforts sont induits, soit par des sollicitations macroscopiques, comme par exemple une poutre en flexion ; soit par des réactions chimiques lors de la prise comme celle du retrait d'auto-dessiccation [22].

Par ailleurs, l'enrobage de l'acier est influencé par le sens de coulage du béton. Deux configurations majeures existent. Tout d'abord, l'armature est perpendiculaire au sens de l'écoulement. Une cavité peut se former en-dessous de la barre si le matériau n'est pas suffisamment fluide pour remplir le

coffrage. Nous avons, dans ce cas, la représentation des aciers longitudinaux d'une poutre. Deuxièmement, l'armature est parallèle au sens de l'écoulement. Le matériau peut ne pas circuler entre les barres métalliques ou bien entre le parement et les aciers. Ce défaut se forme préférentiellement au niveau de la partie supérieure des voiles, plus exactement entre les faces coffrantes des banches et les treillis soudés.

2.4.2 Essai d'adhérence

2.4.2.1 Description

Afin de mesurer l'adhérence acier/béton, nous utilisons un dispositif d'arrachement de barre métallique. Celui-ci se compose d'un vérin hydraulique couplé à un mord d'accroche anti-glisement qui applique un effort de traction, noté F , sur l'armature. De plus, un capteur de déplacement mesure le déplacement relatif, noté Δ_s , de la barre d'acier (mobile) par rapport au bloc béton qui est fixe. Enfin, un système de connexion par table traçante enregistre l'effort de traction en fonction du déplacement relatif. (Cf Figure 2.19 et Figure 2.20).

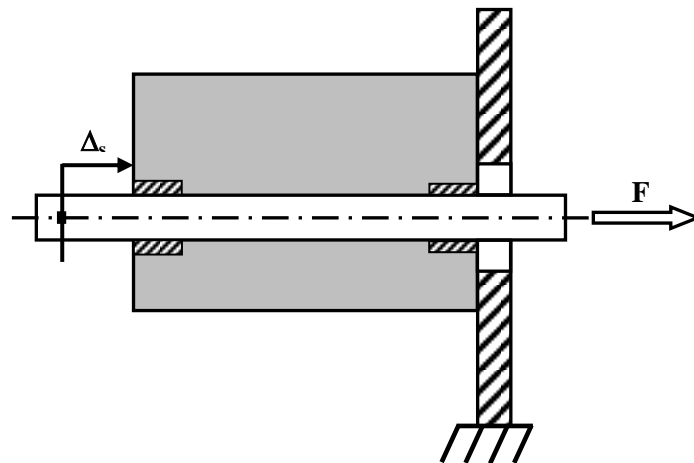


Figure 2.19. Schéma du dispositif expérimental pour les essais d'adhérences acier/béton.

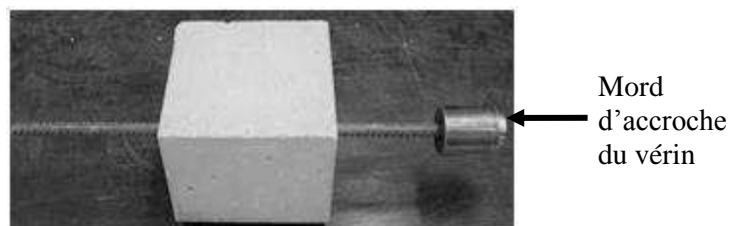


Figure 2.20. Préparation de l'éprouvette avant la réalisation d'un essai.

2.4.2.2 Résultats théoriques

A partir des recommandations de la RILEM [23], un essai classique d'adhérence produit une courbe $F - \Delta_s$ de la forme suivante :

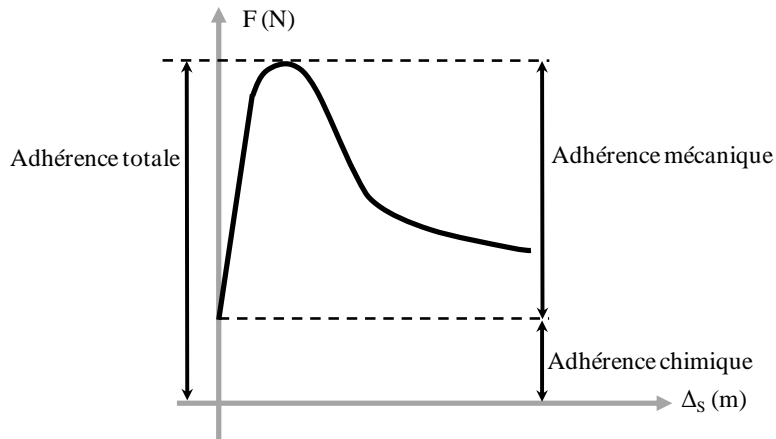


Figure 2.21. Courbe théorique d'un essai d'adhérence acier/béton.

La Figure 2.21 distingue deux comportements d'adhérence acier/béton. Dans un premier temps, malgré l'augmentation de l'effort d'arrachement, la barre d'acier reste immobile dans le matériau. Cette étape correspond à une adhérence chimique générée par les hydrates de la matrice cimentaire autour de l'armature [24,25]. Par la suite, un glissement s'établit au niveau de l'interface acier/béton. La mise en place d'un frottement entre le béton et les crénelures de l'armature produit une adhérence mécanique et permet une augmentation de la résistance à l'arrachement. Ainsi la somme de ces deux comportements produit l'adhérence totale mesurée par le dispositif d'essai. Dès que celle-ci est dépassée, le déplacement relatif entre la barre métallique et le béton augmente fortement avec une chute brutale de la résistance.

2.4.3 Protocole expérimental

2.4.3.1 Matériaux et matériels

Pour cette étude, nous reprenons les mêmes formulations de bétons que celles décrites au tout début du chapitre, exceptée la classe de consistance S4+(-2-). Le dispositif de confection des échantillons permet la préparation de cube en béton de 15 cm de côté avec l'insertion, à mi-hauteur, d'une barre d'acier. Celle-ci correspond à une armature en acier haute adhérence de 14 mm de diamètre (HA14). Un système d'enrobage (tube en PVC, cf. Figure 2.22.), disposé contre les faces coffrantes internes, assure une longueur de contact acier/béton égale à 80 mm. Ainsi, nous empêchons la mise en place de bielle de compression contre la surface périphérique de l'armature à proximité des parements. Enfin, uniquement dans le but d'assurer une manutention aisée des échantillons de béton à l'état durci, nous utilisons une armature de longueur égale à 50 cm (Cf Figure 2.22).

Les recommandations émises par la RILEM [23] stipulent que le cube en béton mesure dix fois le diamètre de l'armature. De même, la longueur d'adhérence de la barre correspond à cinq fois le diamètre de celle-ci. Ainsi, avec un échantillon de 15 cm de côté, le diamètre maximal de la barre métallique ne peut excéder 15 mm avec une longueur d'adhérence égale à 75 mm. Bien que les

dimensions de nos échantillons respectent les préconisations de la RILEM, la zone d'adhérence est en désaccord. En effet, celle-ci devrait se situer au cœur du bloc béton et non à proximité d'une paroi. Par conséquent, nos résultats nous permettront une comparaison qualitative entre nos multiples essais. En revanche, l'établissement d'une confrontation quantitative précise avec la littérature sera plus délicat.

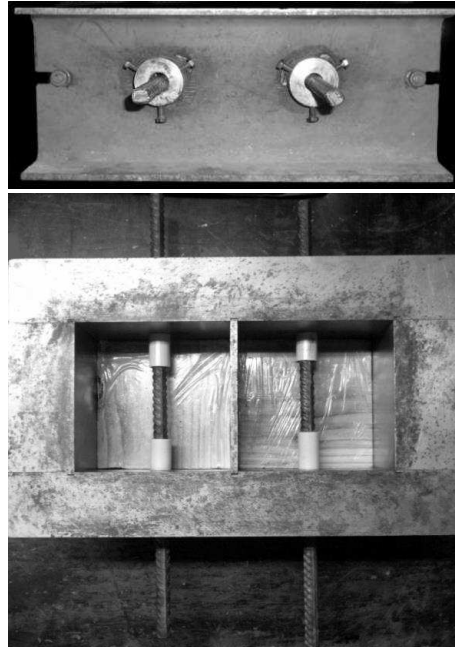


Figure 2.22. Moules en acier pour le coulage des échantillons d'adhérence acier/béton. Vue de face (haut). Vue de dessus (bas).

2.4.3.2 Configurations d'étude

Nous avons rappelé ci-dessus qu'il existe deux orientations majoritaires des aciers dans les éléments en béton armé. Afin de se rapprocher des dispositions de coulage des chantiers, nous étudions deux configurations de mise en œuvre des échantillons.

Tout d'abord, nous nous focalisons sur une représentation de type poutre dont l'armature se situe à proximité du fond de coffrage. Nous choisissons une distance d'enrobage égale à 3 cm qui correspond à l'épaisseur la plus fréquemment utilisée lors de la fabrication des pièces en béton armé. Cependant, les dimensions des moules pour la réalisation des échantillons sont fixes. Ainsi, pour obtenir cette configuration nous disposons une cale d'enrobage sous la barre d'acier. (Cf Figure 2.23).

Deuxièmement, nous étudions une représentation de type voile avec une armature disposée à proximité d'une face latérale. De même que pour les poutres en béton armé, un enrobage de 3 cm correspond à une distance extrêmement fréquente. Ainsi, nous utilisons le même système de cale mais celle-ci est disposée contre un parement et non en fond de coffrage. (Cf Figure 2.23).

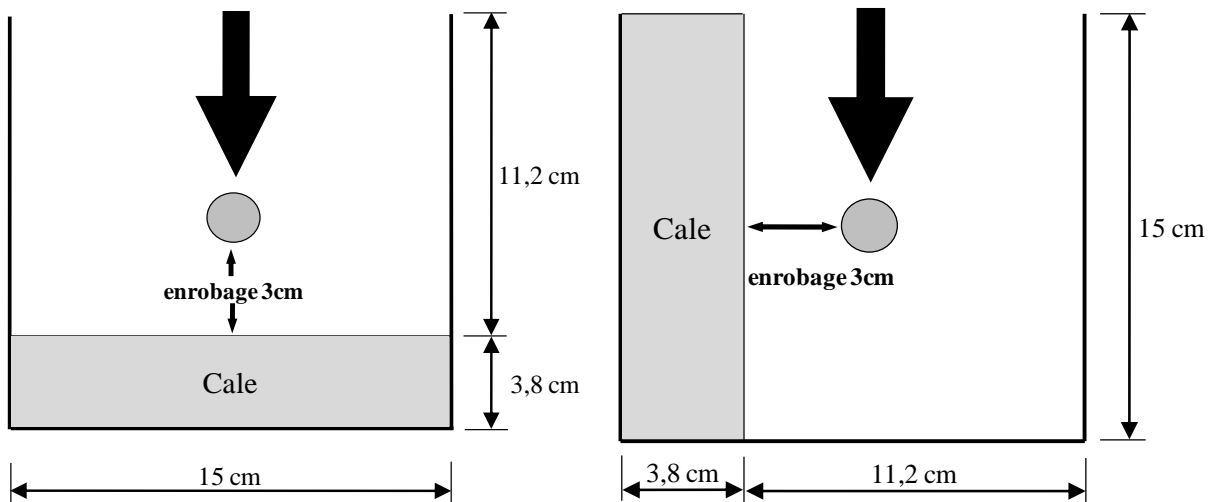


Figure 2.23. Coulage type poutre (gauche). Coulage type voile (droite). Les flèches indiquent le sens du coulage.

Enfin, les recommandations de la RILEM ne proposent pas l'utilisation de ces cales. Par conséquent, nos essais s'éloignent davantage de ces suggestions et réduisent d'autant plus les connexions avec les travaux issus de la littérature.

2.4.3.3 Préparation des échantillons

Pour chaque classe de consistance et pour chaque configuration (poutre et voile), nous fabriquons trois échantillons. Parallèlement, nous comparons deux modes de vibration.

Tout d'abord, nous utilisons la même aiguille vibrante traditionnelle de laboratoire que celle présentée en début de chapitre. Celle-ci possède un diamètre de 25 mm et délivre une fréquence de rotation égale à 200 Hz avec 1 mm d'amplitude dans l'air. De plus, nous choisissons d'appliquer une pervibration de durée identique quelque soit la fluidité du béton. Nous avons présenté dans le paragraphe 2.2.1 les durées de vibration d'après la norme NF P 18-422 [7]. Cependant, celles-ci ne se focalisent que sur des éprouvettes cylindriques pour tester les résistances mécaniques. Nous choisissons d'insérer deux fois le vibreur pendant 5s de part et d'autre de l'armature. Ainsi, cette méthode de vibration de 5s+5s semble se rapprocher de celle proposée par la norme NF P 18-422.

Deuxièmement, nous confectionnons une série d'échantillons non vibrés. Les moules sont simplement remplis de béton et un talochage « doux » nivèle l'horizontalité des cubes. Notre dispositif de foisonnement du béton n'est pas compatible avec le remplissage de ces coffrages. Comme pour la mise en œuvre d'éprouvette 16/32, un système de cure recouvre la surface des cubes en contact avec l'atmosphère. Enfin, nous conservons nos échantillons à 20°C pendant 28 jours avant chaque essai.

2.4.4 Résultats expérimentaux

Nous traçons sur la Figure 2.24 l'effort d'adhérence total acier/béton pour une configuration de type poutre en fonction de la consistance. En absence de vibration, nos résultats montrent que la résistance

à l'arrachement est quasi nulle pour les bétons de consistance S1. L'adhérence acier/béton augmente avec la fluidité des formulations testées. De plus, pour les consistances S1 à S4 mise en œuvre avec l'utilisation d'une pervibration, nous obtenons une valeur moyenne proche de 40 kN. Cependant, pour les bétons vibrés, l'adhérence des matériaux de forte fluidité (S4+ et BAP) est plus faible que celle des autres consistances. Nous pouvons interpréter ce résultat à partir du phénomène connu de « top-bar effect » [26,27]. En effet, les formulations des BAP limitent les remontées d'eau dans le matériau à l'état frais. Ainsi, une couche d'eau se forme sous les armatures et diminue la surface de contact entre les aciers et le béton. Cependant, ce phénomène est surtout prononcé pour les aciers se situant en partie supérieure au sein d'élément vertical de grande hauteur.

Enfin, de récents travaux [28,29] ont montré que l'utilisation d'armature de diamètre inférieur à 20 mm avec des BAP permet d'obtenir des résistances d'adhérence supérieures à celles mesurées avec des bétons vibrés traditionnels.

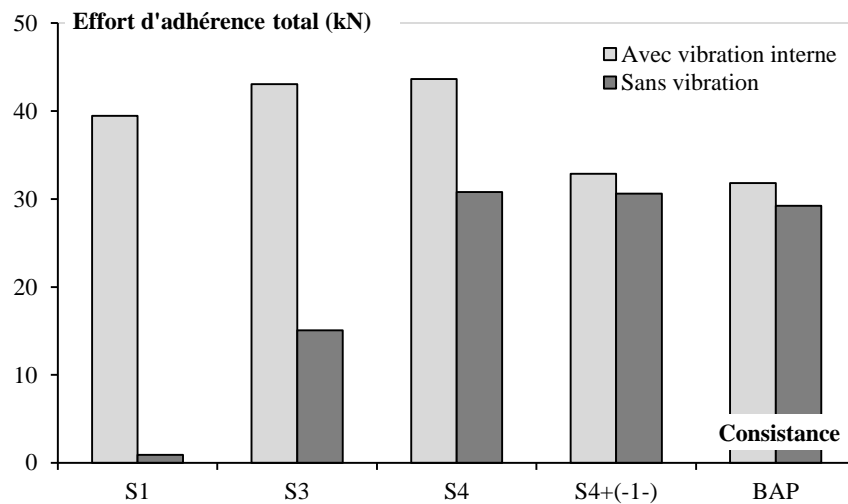


Figure 2.24. Résistance d'adhérence en fonction de la consistance du béton dans le cas d'une configuration type poutre.

Nous traçons sur la Figure 2.25 l'effort d'adhérence total acier/béton pour une configuration de type voile en fonction de la consistance. Comme pour la configuration de type poutre, en absence de vibration, nos résultats montrent que la résistance à l'arrachement est quasi nulle pour les bétons de consistance les plus ferme. En revanche, elle augmente avec la fluidité des formulations testées. De plus, pour les consistances S1 à S4 mises en œuvre avec l'utilisation d'une pervibration, nous obtenons une résistance moyenne plus faible que pour la configuration précédente, avec une baisse de l'ordre de 10 kN.

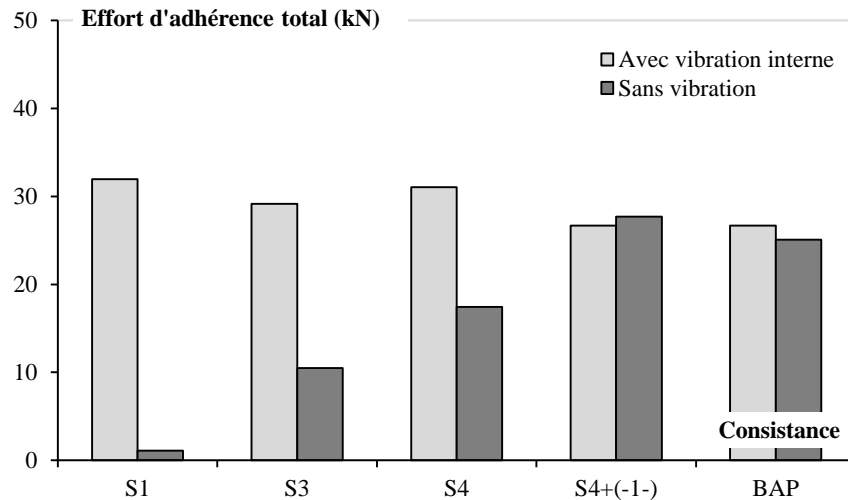


Figure 2.25. Résistance d'adhérence en fonction de la consistance du béton dans le cas d'une configuration type voile.

A noter que, dans le cas des bétons de classe de consistance S1 sans vibration avec un coulage de type voile, la fluidité du matériau n'a pas été suffisante pour enrober l'armature et la maintenir au démoulage. Pour ces échantillons, quelque soit le maintien de la barre d'acier, l'aspect de parement est très dégradé. (Cf. Figure 2.26).

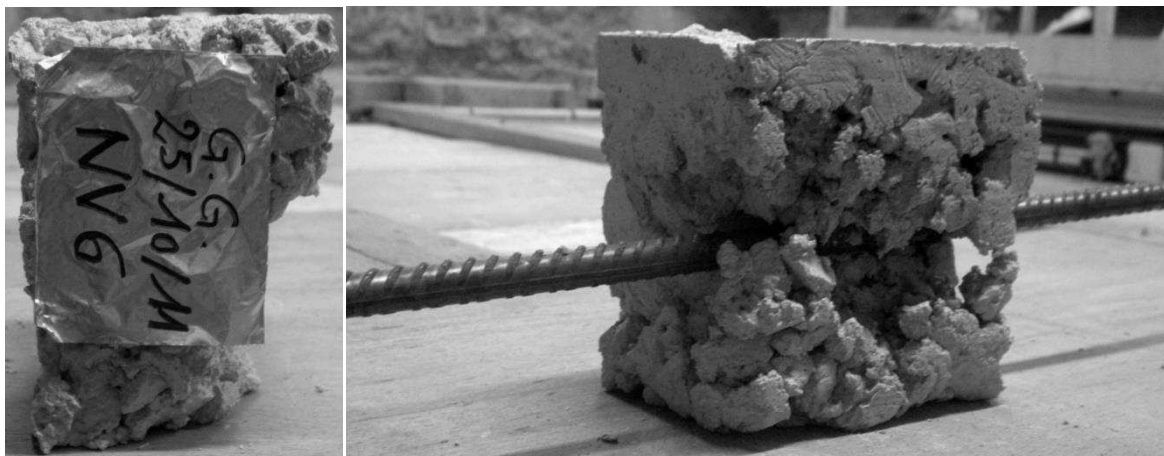


Figure 2.26. Échantillon de configuration de type voile avec un béton de consistance S1 et mis en œuvre sans vibration. L'armature est tombée au démoulage (gauche). L'armature est maintenue au démoulage (droite).

2.5 Analyse

Sur la Figure 2.27, nous traçons le ratio adimensionné de l'effort de résistance maximal à l'arrachement des armatures dans le béton entre un béton vibré et un béton non vibré en fonction de la consistance. La valeur 100% est atteinte quand la force d'arrachement des échantillons non vibrés est identique à celle des échantillons vibrés. Ces résultats montrent la nécessité d'appliquer une pervibration pour obtenir une adhérence de qualité pour toutes les classes de consistances testées, sauf pour les deux plus fluides (S4+ et BAP).

Cet essai d'arrachement met en évidence la qualité de l'interface acier/béton. En effet, lorsque le béton n'enrobe pas parfaitement l'acier, la surface de contact entre ces deux matériaux diminue (cf. Figure 2.26). Ainsi, les liaisons chimiques et mécaniques nécessaires à la création de l'adhérence acier/béton ne peuvent pas se former totalement. Nous obtenons alors une dégradation de la résistance à l'arrachement.

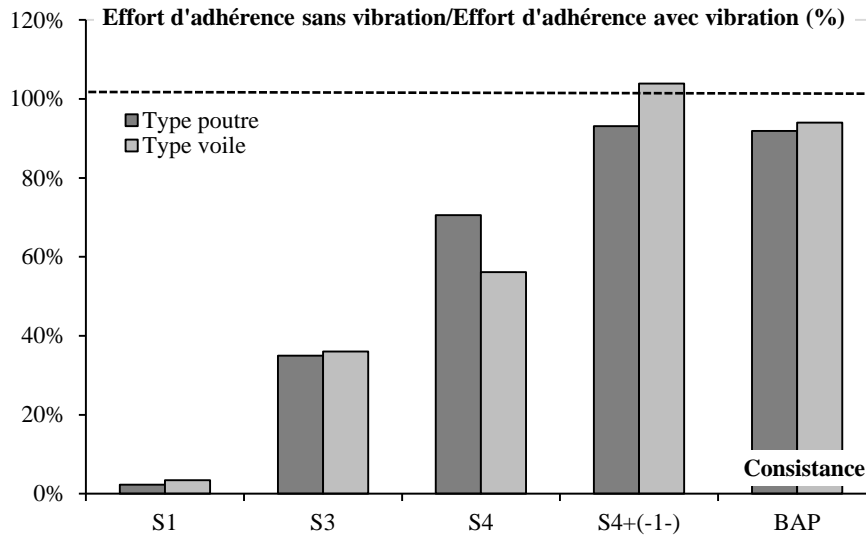


Figure 2.27. Ratio adimensionné de l'effort de résistance d'adhérence de l'armature dans le béton entre un béton non vibré et un béton vibré en fonction de sa consistance. Les deux types de coulages sont tracés.

De plus, nous appliquons notre approche dimensionnelle de caractérisation de l'adhérence acier/béton en fonction de la contrainte seuil du matériau. Nous choisissons une longueur caractéristique égale à 3 cm. Celle-ci correspond à la distance d'enrobage (L_E) des armatures quelque soit la configuration étudiée (poutre ou voile). De même, nous calculons le ratio adimensionné F_{NV}/F_N correspondant respectivement à l'effort total d'adhérence avec une mise en œuvre non vibrée et l'effort total d'adhérence avec application d'une pervibration.

Ainsi, nous traçons sur la Figure 2.28, le ratio F_{NV}/F_N en fonction du ratio $\tau_0/(\rho \cdot g \cdot L_E)$ pour une configuration de coulage de type poutre et de type voile. Ces courbes complètent les résultats obtenus précédemment avec notre approche dimensionnelle avec les études de masse volumique, de résistance mécanique et de qualité de parement. En effet, lorsque la contrainte seuil du matériau est supérieure à la contrainte gravitaire au niveau de l'enrobage, la résistance à l'arrachement diminue fortement. Tandis que pour une contrainte seuil suffisamment faible, l'adhérence acier/béton est maximale.

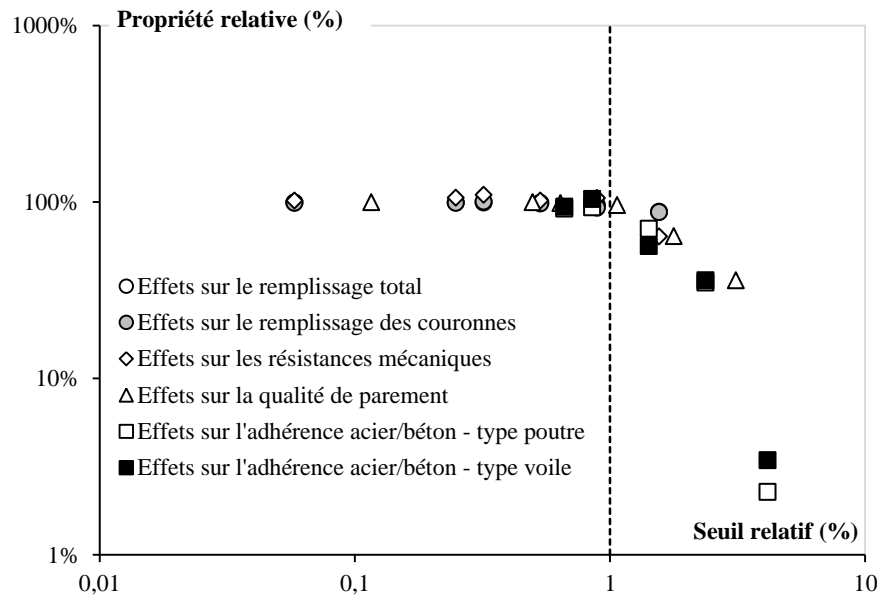


Figure 2.28. Évolution de plusieurs propriétés adimensionnées en fonction de la contrainte seuil relative du béton pour différents mode de mise en œuvre.

2.6 Conclusions du chapitre

Afin de définir les caractéristiques d'une vibration adéquate, nous étudions l'influence de la vibration sur les propriétés des bétons pour différentes consistances de béton (béton très ferme à béton auto-plaçant).

Ainsi, nous avons mesuré sur ces échantillons la résistance en compression à 28 jours, la résistance en traction par fendage, la masse volumique à cœur (*i.e.* sur une carotte de 8 cm de diamètre au centre de nos éprouvettes de 16 cm de diamètre), la masse volumique en parement (*i.e.* sur une couronne de 4 cm d'épaisseur située à la périphérie de nos éprouvettes de 16 cm de diamètre), la proportion surfacique de défauts de parement ainsi que la taille moyenne des défauts par analyse d'image et l'adhérence acier / béton sur des éprouvettes contenant une barre d'acier dont la position a été variée de façon à simuler un coulage de poutre/voile ou de dalle

Quelque soit la consistance du matériau supérieure à une classe S1, nos expériences suggèrent que la confection d'éprouvettes cylindriques 16/32 ne permette pas d'apprécier les effets de la vibration au niveau des résistances mécaniques, ni sur la masse volumique apparente des échantillons. Cependant, ils montrent que le couple consistance/vibration a une influence majeure sur la résistance à l'arrachement de barre d'acier et sur la qualité des parements.

Le Tableau 2.5 synthétise l'ensemble des résultats obtenus pour toutes les consistances des bétons.

Propriétés	S1 Affaissement : 4cm	S3 Affaissement : 13cm	S4 Affaissement : 18cm	S4+ (-1-) Affaissement : 21cm	S4+ (-2-) Affaissement : 22cm	BAP Étalement : 65cm
Compression simple	Nécessaire	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet
Fendage	Nécessaire	Pas d'effet	Pas d'effet	Non testé	Non testé	Non testé
Masse volumique	Nécessaire	Bénéfique	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet
Différence cœur peau	Nécessaire	Bénéfique	Pas d'effet	Pas d'effet	Non testé	Pas d'effet
Parement	Nécessaire	Nécessaire	Bénéfique	Pas d'effet	Pas d'effet	Dégradation
Arrachement de barres type poutre	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Pas d'effet	Non testé	Pas d'effet
Arrachement de barres type voile	Nécessaire	Nécessaire	Nécessaire	Pas d'effet	Non testé	Pas d'effet

Tableau 2.5. Récapitulatif des propriétés à l'échelle du béton.

Le code couleur indique :

- En rouge, les propriétés qui s'améliorent avec la vibration.
- En orange, les propriétés qui évoluent légèrement.
- En vert, les propriétés qui sont peu ou pas sensibles à l'utilisation de la vibration.

Finalement, d'un point de vue pratique, les conclusions suivantes sont proposées :

- Les bétons de classe S1 à S3 doivent être vibrés sinon les propriétés étudiées, dans ce compte-rendu, diminuent fortement. De plus, l'adhérence acier/béton est proche de zéro pour des bétons de consistance S1 non vibrés.
- Pour un béton de consistance S4, si le matériau n'est pas exposé à un environnement agressif, il serait possible de ne pas appliquer de vibration car sa résistance ne serait pas diminuée. Cependant, il faudrait pouvoir tenir compte d'une diminution notable de l'adhérence des armatures lors du dimensionnement des structures. Attention, la qualité des parements en

absence de vibration serait médiocre, favorisant ainsi la pénétration des chlorures ou la carbonatation. Donc, il semble raisonnable de conserver une vibration durant le coulage des bétons de consistance de classe S4.

- La vibration ne semble pas nécessaire pour les bétons de consistance S4+ et elle n'améliore pas les propriétés des BAP (point déjà connu). De plus, il serait préjudiciable de vibrer des BAP car il y a un fort risque de ségrégation même si celle-ci n'a pas été mise en évidence sur la formulation des BAP testés lors de nos essais.

Il est important de noter que l'étude des parements constitue un essai non destructif et peu coûteux contrairement à la vérification de l'adhérence acier/béton.

De plus, nous avons élaboré deux formulations, S4+(-1-) et S4+(-2-), afin de se rapprocher des formulations des bétons, non vibrés, utilisés dans la pratique pour la mise en œuvre de fondations profondes. Nos résultats obtenus avec ces consistances sont en accord avec les techniques de construction des spécialistes de ces ouvrages spécifiques. En effet, l'ensemble des paramètres étudiés, dans ce chapitre, montre que ces matériaux ne sont pas affectés par une absence de vibration à l'état frais.

Dans les prochains chapitres, nous nous focaliserons sur le volume de béton impacté par l'utilisation d'une pervibration ainsi que sur les durées d'application des vibreurs.

Afin de pouvoir étudier ces phénomènes, nous présentons, dans le chapitre suivant, les mesures rhéologiques caractérisant nos matériaux.

2.7 Références du chapitre

- [1] J. Yammine, M. Chaouche, M. Guerin, M. Moranville, and R. Roussel, "From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 890-896, 2008.
- [2] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 206-1 Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.*, 2004.
- [3] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 206-9 Béton. Règles complémentaires pour le BAP.*, 2010.
- [4] "LOI n°2005-781 du 13 Juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique," France, Journal Officiel vol. 163, 2005.
- [5] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-2 Essai pour béton frais - Essai d'affaissement.*, 1999.
- [6] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-8 Essai pour béton frais. Partie 8 Béton Auto-Plaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams.*, 2010.
- [7] AFNOR, Norme Européenne, *NF P 18-422 Béton Mise en place par aiguille vibrante.*, 1981.
- [8] Irex, *Les bétons auto-plaçant*, Presses Ponts et Chaussées, Ed., 2011.
- [9] Office 365. (2013) Intervalle confiance. [Online]. <http://office.microsoft.com/fr-fr/excel-help/intervalle-confiance-HP005209021.aspx>
- [10] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-7 Essai pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air – Méthode de la compressibilité.*, 2001.
- [11] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12390-3 Essai pour béton durci. Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes.*, 2003.
- [12] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12390-6 Essai pour béton durci - Essai de fendage.*, 2012.
- [13] R. Dutron, *Vibration du béton et du béton armé*, Annales des Travaux Publics de Belgique ed., GOEMAERE, Ed., 1944.
- [14] Th. Makchéeff, *Manuel du béton vibré*, Encyclopédie Industrielle et Commerciale ed., Eyrolles, Ed. Paris, 1939.
- [15] H. Hansen, A. Kielland, K.E.C. Nielsen, and S. Thaulow, "Compressive strength of concrete – cube or cylinder?," *Bulletin RILEM*, vol. 17, 1962.
- [16] C. Boulay and A. Colson, "A concrete extensometer eliminating the influence of transverse strains on the measurement of longitudinal strains," *Materials and structures*, vol. 14, no. 79, pp. 35-38, 1981.
- [17] N Roussel and P Coussot, "'Fifty-cent rheometer' for yield stress measurements: From slump to spreading flow," *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 705-718, 2005.

-
- [18] National Institute of Health. ImageJ. [Online]. <http://rsbweb.nih.gov/ij/>
- [19] M.D. Abramoff, P.J. Magalhães, and S.J. Ram, "Image Processing with ImageJ," *Biophotonics international*, vol. 11, no. 7, pp. 36-42, 2004.
- [20] T.J. Collins, "ImageJ for microscopy," *Biotechniques*, vol. 43, pp. 25-30, 2007.
- [21] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 1992-1-1 Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments.*, 2005.
- [22] K. Kovler and N. Roussel, "Properties of fresh and hardened concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, 775-792 2011.
- [23] RILEM, "Essais portant sur l'adhérence des armatures du béton," *Materials and Structures*, vol. 3, no. 3, pp. 175-178, May 1970.
- [24] Ioan Pop, Geert De Schutter, Pieter Desnerck, and Traian Onet, "Bond between powder type self-compacting concrete and steel reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 824-833, 2013.
- [25] Ceb-Fip, *Bulletin 55 – model code 2010 – first complete draft.*, 2010.
- [26] K.H. Khayat, "Use of Viscosity-Modifying Admixture to Reduce Top- Bar Effect of Anchored Bars Cast with Fluid Concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 95, no. 2, pp. 158-167, 1998.
- [27] K.H. Khayat, "Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete," *ACI MATERIALS JOURNAL*, vol. 96, pp. 346-353, 1999.
- [28] Peter Helincks, Veerle Boel, Wouter De Corte, Geert De Schutter, and Pieter Desnerck, "Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity," *Engineering Structures*, vol. 48, pp. 121-132, 2013.
- [29] F.M. de Almeida Filho, M.K. El Debs, and A.L.H.C. El Debs, "Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests," *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 1073-1089, 2008.

Chapitre 3

Caractérisations rhéologiques des matériaux

Chapitre 3

Caractérisations rhéologiques des matériaux

Dans le premier chapitre, nous avons présenté, à partir d'un modèle de Bingham, le comportement rhéologique des matériaux cimentaires comme des fluides visqueux à seuil. Celui-ci se compose de deux paramètres intrinsèques aux matériaux : le contrainte seuil, τ_0 et la viscosité plastique μ_p .

Parallèlement, nous avons montré les possibilités des mesures expérimentales afin d'obtenir les valeurs de ces coefficients. Les travaux disponibles dans la littérature ont mis en évidence les capacités d'écoulement des matériaux cimentaires en fonction de leurs propriétés rhéologiques [1]. De plus, de récents travaux ont montré que le volume de matériau soumis à une pervibration dépend à la fois de leur contrainte seuil et de leur viscosité [2].

Par conséquent, afin de répondre à notre deuxième et troisième question, il semble important de caractériser précisément la contrainte seuil et la viscosité de nos matériaux d'études. Tout d'abord, nous présentons les matériels de mesures rhéologiques adaptés aux pâtes de ciment. Puis, nous développons les protocoles associés à l'étude des bétons.

3.1 Mesures rhéométriques

3.1.1 Étude des pâtes de ciment

Tout d'abord, nous préparons nos pâtes de ciment à l'aide d'un agitateur mécanique. Nous malaxons l'eau et le ciment pendant 120 secondes. (Cf. Figure 3.1).



Figure 3.1. Agitateur mécanique Turbo Test Rayneri Groupe VMI

Puis, afin d'obtenir le seuil et la déformation critique des pâtes de ciment, nous utilisons un rhéomètre Bohlin C-VOR 200 et une géométrie Vane, cf. Figure 3.2. Un croisillon à quatre pales de diamètre 25 mm plonge dans une cuve de diamètre 50 mm et 60 mm de hauteur. Cette configuration assure un entrefer suffisamment large par rapport aux dimensions des particules [1,3]

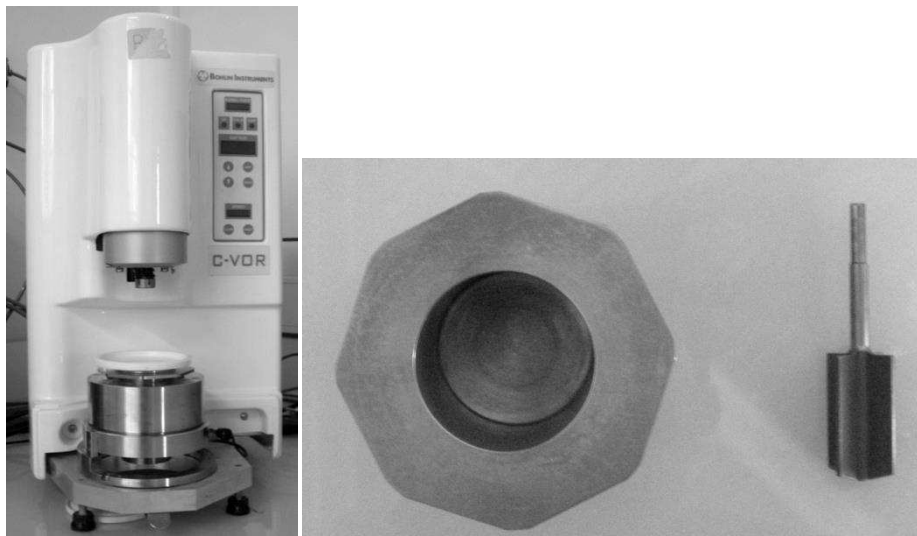


Figure 3.2 Rhéomètre Bohlin C-VOR 200 (gauche). Cuve et outil (droite).

Une fois la cuve remplie par notre échantillon, nous appliquons un pré-cisaillement de 100 Pa pendant 60 secondes. Ainsi, chaque pâte de ciment se situe dans un état totalement détroué avant le démarrage de l'essai. Ensuite, nous imposons un gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ constant et égal à $0,01s^{-1}$ pendant un temps suffisamment long pour obtenir une courbe similaire à la Figure 3.3. La contrainte seuil du matériau correspond au niveau du pic sur la courbe, à l'ordonnée τ_{max} . La déformation critique associée correspond à γ_c .

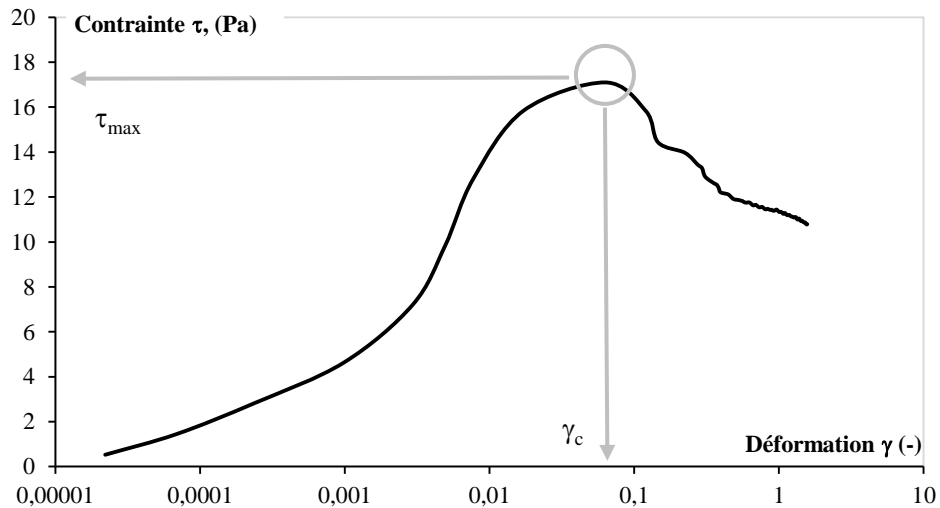


Figure 3.3. Mesure du seuil et de la déformation critique d'une pâte de ciment $E/C=0,50$. Ciment CEM III/A 52.5 L-LH CE PM-ES-CPI NF

La mesure de la viscosité apparente nécessite un protocole adapté. Pour cette mesure, nous pilotons la géométrie VANE à partir d'une vitesse de rotation entre 10 s^{-1} et 150 s^{-1} . Nous obtenons l'évolution de la viscosité en fonction du gradient de vitesse appliquée. (Cf. Figure 3.4).

Cette courbe montre trois régimes caractéristiques du comportement rhéologique des pâtes de ciment. Tout d'abord, une décroissance de la viscosité pour des gradients de vitesse inférieurs à environ 40 s^{-1} . Dans cette zone, le comportement rhéologique est dicté par les interactions colloïdales des particules de ciment et nous mesurons la viscosité apparente [1]. Puis entre, 40 s^{-1} et environ 100 s^{-1} , la viscosité est relativement constante. Nous avons un plateau et nous mesurons la viscosité plastique du matériau imposé par le comportement hydrodynamique des grains de ciment [1]. Enfin, au-dessus de 100 s^{-1} , la viscosité augmente avec la mise en place d'un rhéo-épaississement.

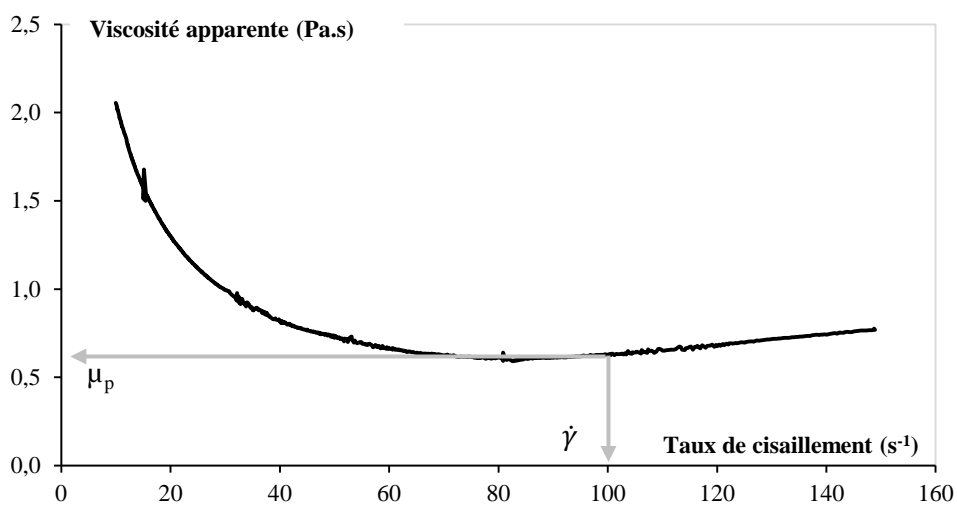


Figure 3.4. Mesure de la viscosité apparente d'une pâte de ciment $E/C=0,50$. Ciment CEM III/A 52.5 L-LH CE PM-ES-CPI NF

3.1.2 Études des bétons

Le BTRHEOM est un rhéomètre pour bétons et mortiers mis au point dans sa première version par Hu *et al* [4]. Nous utilisons ici la version II de cet appareil. Celui-ci se compose d'une géométrie VANE à six pales et d'une cuve comme le rhéomètre Bohlin. En revanche, les dimensions des matériels sont adaptées à la taille des granulats. L'outil a un diamètre de 150 mm et la cuve une profondeur de 350 mm. (Cf. Figure 3.5).



Figure 3.5. Vue générale du BTRHEOM II (gauche). Cuve en cours de remplissage (droite).

Pour mesurer la viscosité des bétons, nous utilisons le protocole d'essai installé dans le logiciel. Celui-ci consiste, dans un premier temps, à pré-cisailler le matériau pendant 30 s à la vitesse de 1 tr.s^{-1} (*i.e.* $\dot{\gamma} = 5 \text{ s}^{-1}$). L'échantillon se situe, ainsi, dans un état déstructuré. Puis, nous choisissons d'appliquer une rampe de vitesses de cisaillement croissantes de $0,1 \text{ tr.s}^{-1}$ à 1 tr.s^{-1} par paliers de $0,1 \text{ tr.s}^{-1}$ toutes les 30 s, (*i.e.* $0,5 \text{ s}^{-1}$ à 5 s^{-1}).

Nos essais avec le BTRHEOM II, comme ceux d'un rhéomètre à pâte de ciment, fournissent la valeur de la contrainte seuil et de la viscosité plastique de nos bétons. A partir de ces résultats, nous pouvons tracer une courbe d'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du gradient de vitesse comme présenté sur la Figure 3.6. Ainsi, à partir du modèle de Bingham présenté dans le Chapitre 1 pour caractériser le comportement en écoulement des matériaux, nous déduisons de nos résultats les paramètres de contrainte seuil τ_0 et de viscosité plastique, μ_p .

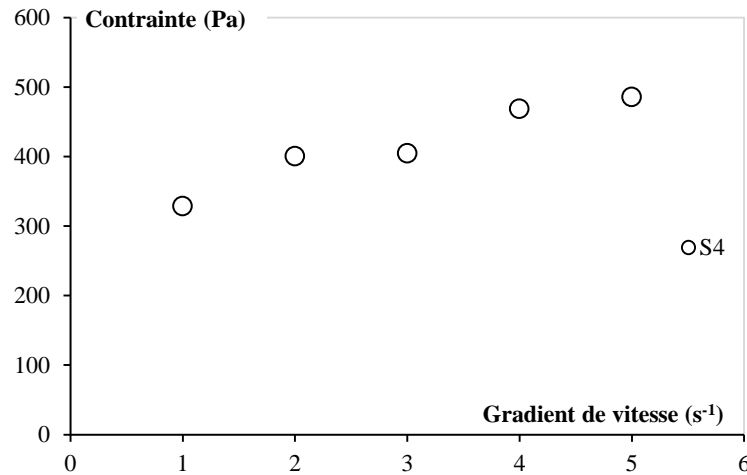


Figure 3.6. Contrainte en fonction de la vitesse de cisaillement. Exemple d'un béton de consistance S4

3.1.3 Matériaux

Comme présenté dans le Chapitre 1, les pâtes de ciment, au sein des bétons actuels, sont formulées avec des adjuvants assurant une fluidité suffisante aux matériaux. En fonction des besoins de la construction et de la mise en œuvre sur le chantier, la fluidification sera plus ou moins forte. Afin de se rapprocher des conditions *in situ*, nous avons établi des compositions de pâte de ciment avec un faible ratio Eau/Ciment, (E/C), couplé à une adjuvantation assurant un seuil du même ordre de grandeur que des pâtes de ciment non adjuvantées dont le ratio E/C est plus élevé.

Pour nos mesures de rayon d'action d'un pervibrateur plongé dans un matériau cimentaire, nous utiliserons les pâtes de ciment présentées dans le Tableau 3.1. Il est important de garder à l'esprit que ces pâtes ne correspondent pas à celles incorporées dans les formulations des bétons présentés par la suite. Elles sont composées à base de ciment CEM III/A 52.5 CE PM-ES-CP1 NF [5]. Il s'agit du même ciment que celui présenté dans le Chapitre 2. Leurs propriétés rhéologiques sont mesurées à partir d'un Bohlin C-VOR 200 et d'une géométrie Vane. Leur seuil évolue sur deux ordres de grandeur entre 8 et 180 Pa pour des viscosités comprises entre 0,3 et 5,5 Pa.s. Pour ces formulations, nous avons choisi un fluidifiant haut réducteur d'eau, Sika® Viscocrete® Tempo 12 [6] (cf. Annexe 3.1).

Pâtes de ciment	1	2	3	4
EauTotale/Ciment (-) (E/C)	0,30	0,40	0,50	0,35
Adjuvant Tempo 12 (%)	0	0	0	0,30

Tableau 3.1. Formulations des pâtes de ciment testées pour les mesures de diamètre d'action des vibreurs.

De plus, afin de caractériser l'évolution du rayon d'action d'un vibreur, en fonction de la viscosité du matériau, nous avons établi trois catégories de bétons : ordinaires, visqueux et très visqueux.

Dans le cas de nos bétons ordinaires, la fluidité du matériau est dictée par la variation du volume de la pâte de ciment par rapport au volume du squelette granulaire. Le pourcentage d'adjuvant ainsi que les ratios EauTotale/Ciment (E/C), EauEfficace/Ciment et Gravier/Sable (G/S) sont maintenus constants. Ainsi, entre les bétons ordinaires S3 et S4, seule la quantité de ciment et d'eau augmentent. Cette approche est la même que celle développée lors de l'établissement des formulations des bétons du Chapitre 2 qui se base sur l'évolution du seuil d'écoulement en fonction de la fraction volumique granulaire [7]. Nous supposons alors que la variation de la valeur de la viscosité est faible par rapport à l'évolution du seuil pour ces deux bétons. Enfin, un simple fluidifiant, Plastiment® HP [8] assure la consistance souhaitée. Le Tableau 3.2 présente les formulations des bétons ordinaires utilisés pour nos essais de mesure du diamètre d'action d'un pervibrateur plongé au sein d'un matériau cimentaire

Parallèlement, nous avons aussi établi une catégorie de bétons visqueux nommés S3V et S4V. Les termes S3 et S4 font référence à la consistance du matériau et la lettre « V » indique qu'ils ont une viscosité supérieure aux bétons ordinaires. De plus, nous avons aussi maintenu constants les ratios E/C et G/S. D'un point de vue pratique, afin d'assurer une consistance équivalente avec les bétons ordinaires, l'adjuvant des bétons visqueux est le superplastifiant Sika® Viscocrete® Tempo 12 au lieu du Plastiment® HP. En effet, ce dernier ne permet pas d'obtenir la fluidité escomptée quelque soit son dosage. Par ailleurs, les formulations S3V et S4V présentent un pourcentage variable de superplastifiant Sika® Viscocrete® Tempo 12. Cependant, du point de vue de la viscosité, ces variations sont négligeables par rapport à l'évolution du seuil de ces matériaux. Le Tableau 3.2 présente les formulations des bétons visqueux utilisés pour nos essais de mesure du diamètre d'action d'un pervibrateur plongé au sein d'un matériau cimentaire.

Afin d'étudier davantage l'influence de la viscosité pour la prédiction du rayon d'action des pervibrateurs, nous avons établi trois formulations de bétons très visqueux, nommées S2TV, S4TV et S5TV. Les termes S2, S4 et S5 font référence à la consistance du matériau et les lettres « TV » indique qu'ils ont une viscosité nettement supérieure aux bétons ordinaires. De plus, nous avons aussi maintenu constant le taux d'adjuvantation ainsi que les ratios E/C et G/S. Comme dans le cas des bétons ordinaires, la fluidité du matériau est dictée par l'unique variation du volume de la pâte de ciment par rapport au volume du squelette granulaire. Pour amplifier la viscosité des bétons S2TV, S4TV et S5TV par rapport aux bétons visqueux, nous avons abaissé le ratio E/C à 0,4 et augmenté le pourcentage d'adjuvant par un facteur 3. Le Tableau 3.2 présente les formulations des bétons très visqueux utilisés pour nos essais de mesure du diamètre d'action d'un pervibrateur plongé au sein d'un matériau cimentaire.

Dénomination	S3	S4	S3V	S4V	S2TV	S4TV	S5TV
EauEfficace/Ciment (-) (E/C)	0,58	0,58	0,42	0,42	0,39	0,39	0,39
EauTotale/Ciment (-) (E/C)	0,60	0,60	0,45	0,45	0,4	0,4	0,4
Gravier/Sable (G/S)	1,22	1,22	1,22	1,22	1,0	1,0	1,0
Quantité de ciment (kg.m ⁻³)	300	320	358	381	403	425	448
Adjuvant. Plastiment HP (% en masse de ciment)	0,41	0,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Adjuvant. Tempo 12 (% en masse de ciment)	0,0	0,0	0,75	0,51	1,5	1,5	1,5

Tableau 3.2. Formulations des trois catégories des bétons testées pour les mesures de diamètre d'action des vibreurs.

Les formulations détaillées de tous ces bétons sont disponibles dans l'Annexe 3.1.

3.1.4 Résultats

Le Tableau 3.3 récapitule les résultats des mesures des seuils et des viscosités des pâtes de ciment obtenus à partir de la caractérisation rhéométrique de ces matériaux

Pâtes de ciment	1	2	3	4
Seuil mesuré (Pa)	180	41	8	21
Viscosité mesurée à 100 s⁻¹ (Pa.s)	5,5	1,6	0,3	1,9

Tableau 3.3. Mesures des seuils et des viscosités des pâtes de ciment

Le Tableau 3.4 présente les valeurs des seuils des bétons à partir de la formule $\tau_0 = (25,5 - s) \cdot \rho / 17,6$ de Roussel et Coussot [9] présentée dans le Chapitre 1 ainsi qu'une mesure ou une estimation de la viscosité de ces matériaux.

Pour calculer la contrainte seuil τ_0 , nous effectuons un essai d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NF EN 12350-2 [14]. La hauteur de la chute du béton correspond au paramètre « s » dans la formule précédente.

A partir du premier chapitre, nous savons que la viscosité des bétons varie entre quelques dizaines de Pa.s à plusieurs centaines de Pa.s. Nos bétons visqueux et très visqueux nécessitent une forte adjuvantation pour obtenir les classes de consistances désirées. Ainsi, dans le but d'observer une évolution du rayon d'action ayant uniquement pour origine la viscosité des bétons pour des seuils équivalents, nous supposons que ces matériaux possèdent des valeurs fortement distinctes du coefficient μ_p par rapport aux formulations des bétons ordinaires.

Pour mesurer la viscosité de nos bétons, nous utilisons le BTRHEOM II présenté dans les paragraphes précédents. Nous obtenons des valeurs de viscosités proches de nos estimations. (Cf. Tableau 3.4), *i.e.* la viscosité des bétons ordinaires est environ égale à 60 Pa.s tandis que celle des bétons visqueux est supérieur à 200 Pa.s.

Cependant, nous n'avons pas pu mesurer la viscosité des bétons très visqueux. Cependant, nous considérons que ces matériaux conservent la même tendance que celle mesurée pour les bétons visqueux, S3V et S4V.

Bétons	S3	S4	S3V	S4V	S2TV	S4TV	S5TV
Affaissement (cm)	12	19	15	19	7	17,5	23,5
Seuil calculé [9] (Pa)	1800	900	1400	900	2500	1100	300
Estimation de la viscosité (Pa.s)	75	75	150	150	200	200	200
Viscosité avec le BTRHEOM II (Pa.s)	62	59	275	212	Non testé		

Tableau 3.4. Estimations et mesures des seuils et des viscosités des bétons.

3.2 Mesure pratique de la viscosité des bétons

Nous avons observé dans le Chapitre 1 que la mesure de la viscosité des bétons est difficile. En effet, bien que les rhéomètres disponibles dans le commerce identifient les mêmes tendances du comportement rhéologique des bétons, ils ne fournissent pas une valeur absolue commune [10,11]. Cependant, le BTRHEOM et le CEMAGREF semble montrer une tendance similaire au niveau des résultats.

Parallèlement aux mesures rhéométriques avec le BTREHOM II, nous tentons de mettre en place un classement des bétons en fonction de leur viscosité.

3.2.1 A partir de la table à choc

L'essai d'étalement à la table à choc NF EN 12350-5[12] permet de déterminer la consistance d'un béton en mesurant son étalement sur un plan soumis à des chocs. Le protocole d'essai nécessite la mise en place d'un cône de matériau frais semblable au cône traditionnel d'affaissement mais d'une hauteur réduite de 20 cm. Après démoulage, l'expérimentateur applique une succession de 15 coups à l'aide du plan incliné. A la fin de l'essai, le diamètre final de l'étalement du béton est mesuré. (Cf. Figure 3.7).



Figure 3.7. Mesure du diamètre de béton à la fin de l'essai d'étalement à la table à choc.

Nous pratiquons l'essai d'étalement à la table à choc avec nos formulations de bétons ordinaires et de bétons visqueux (cf. Tableau 3.4.). Cependant, nous choisissons d'appliquer une variante avec une répétition de trois séries de cinq coups. Après chaque série, nous mesurons le diamètre d'étalement du matériau. Nous traçons ces résultats sur la Figure 3.8.

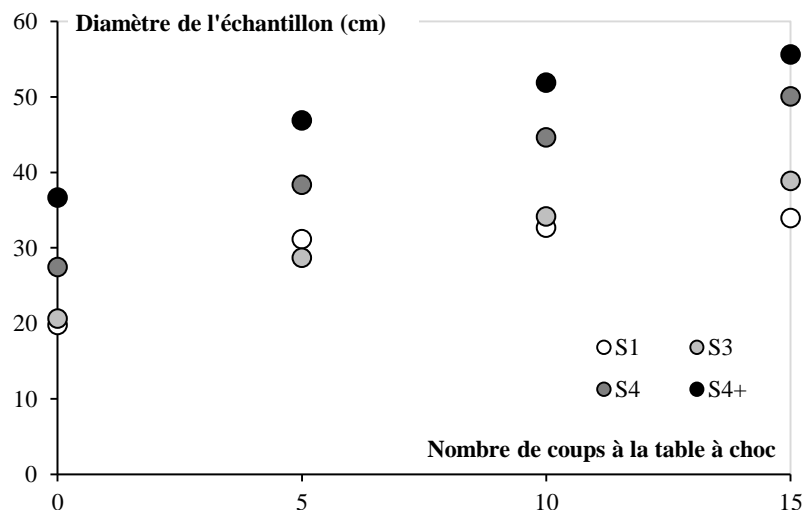


Figure 3.8. Diamètre des échantillons obtenus en fonction du nombre de coups appliqué avec la table à choc pour les bétons décrits dans le chapitre 2.

Quelque soit la consistance, le diamètre des échantillons augmente avec l'application des coups et avec la consistance initiale du béton. En effet, un béton fluide aboutit à un diamètre final supérieur à celui d'un béton plus ferme. Cependant, le diamètre initial de chaque échantillon est aussi plus faible.

De plus, nous traçons sur la Figure 3.9 le diamètre de l'échantillon de béton obtenu à partir d'un essai à la table à choc. Nous comparons des bétons de consistance identique, S3, mais de viscosité différente, *i.e.* 62 Pa.s et 275 Pa.s. Nos résultats montrent que le diamètre du béton augmente avec le nombre de chocs appliqués au matériau. Cependant, une fois l'essai terminé, le diamètre final de l'échantillon est identique quelque soit la formulation testée.

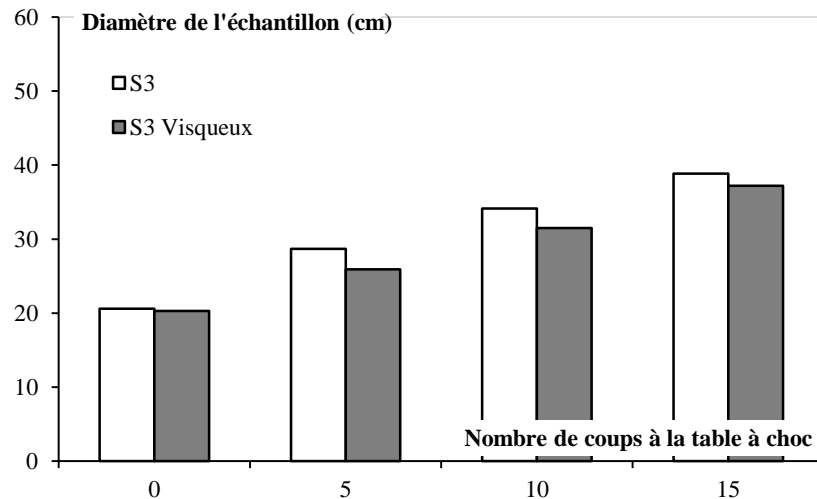


Figure 3.9. Diamètre de l'échantillon obtenu par un essai à la table à choc. Comparaison de béton de consistance identique, S3, mais de viscosité différente.

Nous traçons Figure 3.10 le diamètre de l'échantillon de béton obtenu à partir d'un essai à la table à chocs. Nous comparons des bétons de consistance identique, S4, mais de viscosité différente, *i.e.* 59 Pa.s et 212 Pa.s. Comme pour les bétons de consistance S3, nous obtenons une augmentation du diamètre de l'échantillon avec le nombre de chocs appliqués. De même, une fois l'essai terminé, le diamètre final du béton est semblable quelque soit la consistance testée. Nous pouvons noter un léger décalage entre le diamètre expérimental initial du béton de formulation S4 et S4V qui est conservé avec la mesure du diamètre final.

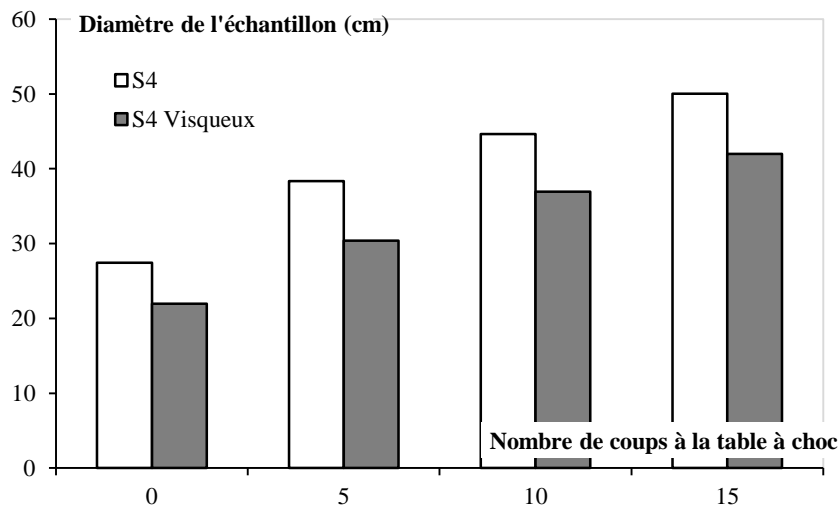


Figure 3.10. Diamètre de l'échantillon obtenu par un essai à la table à choc. Comparaison de béton de consistance identique, S4, mais de viscosité différente.

Par conséquent, cet essai ne semble pas être adapté pour mettre en place un classement des bétons en fonction de leur viscosité.

3.2.2 A partir du cône renversé

Dans le premier chapitre, nous avons montré que l'essai au cône d'Abrams modifié de De Larrard et Ferraris [13] montre une limite d'utilisation dans le cas des bétons visqueux. La mesure du temps de chute du béton est trop petite pour obtenir une valeur précise dans le cas des bétons visqueux.

Afin de mettre en place un classement plus distinct des bétons en fonction de leur viscosité, nous suggérons une variante du test de De Larrard et Ferraris [13]. Comme eux, nous considérons que pour un affaissement identique entre deux bétons, la durée nécessaire à l'arrêt de l'écoulement du matériau dépend, au premier ordre, de la viscosité du matériau. De plus, pour ne pas ajouter un matériel supplémentaire à une utilisation *in situ*, nous conservons uniquement le matériel disponible pour l'essai d'affaissement traditionnel [14]. Ainsi, nous proposons l'essai au **cône d'Abrams inversé** avec le protocole suivant :

- Positionner sur une surface horizontale, le cône d'Abrams avec la section la plus petite vers le bas.
- Remplir le cône avec du béton frais en une couche.
- A l'aide la tige métallique, appliquer 25 coups sur toute la hauteur du matériau et de façon homogène.
- Soulever le cône à la même vitesse que l'essai d'affaissement traditionnel. La hauteur de levée doit être suffisante pour ne pas ralentir ou bloquer l'écoulement du béton à la sortie du cône. Une hauteur minimum de 30 cm est recommandée. Indiquer par un signal vocal le démarrage de l'essai et démarrer le chronomètre.
- Indiquer, par un signal vocal, quand le cône est totalement vide et arrêter le chronomètre.

Nous avons pratiqué cet essai avec les bétons présentés dans les paragraphes précédents. Nous rassemblons nos résultats dans le tableau suivant. Les valeurs des affaissements et des temps de vidanges sont des moyennes d'au minimum trois essais.

Matériaux	Affaissement (cm)	Temps de vidange (s)
Béton ordinaire	20	2,76
Béton très visqueux (labo)	23	9,57

Tableau 3 5. Mesure du temps de vidange du cône pour l'essai au cône d'Abrams renversé.

A partir de cette campagne exploratoire et de nos mesures de la viscosité avec le BTRHEOM II, nous suggérons à titre exploratoire une classification des bétons (cf. Tableau 3.6) :

1. Un béton ordinaire doit être capable de passer à travers la base du cône d'Abrams en moins de trois secondes.
2. Un béton sera considéré comme visqueux si le temps nécessaire à vidanger le cône d'Abrams est supérieur à sept secondes.

Temps de vidange	Viscosité associée	Type de béton
$\leq 3s$	$\leq 100 \text{ Pa. s}$	Béton ordinaire
$\geq 7s$	$\geq 150 \text{ Pa. s}$	Béton visqueux, BHP

Tableau 3.6. Temps de vidange du cône et viscosité associée.

Cependant, il est nécessaire de prolonger cette étude avec des configurations seuil/viscosité variées.

3.3 Conclusions du chapitre

Tout d'abord, nous avons présenté les protocoles expérimentaux de mesures des paramètres rhéologiques des matériaux cimentaires. Nous nous sommes focalisés sur un rhéomètre adapté aux pâtes de ciment puis sur un rhéomètre spécifique pour l'étude des bétons.

Puis, nous avons développé des formulations de matériaux cimentaires variées en lien avec le contexte environnemental actuel. Ainsi, nos bétons possèdent des consistances fermes à auto-placant avec une adjuvantation adaptée.

Enfin, les travaux de la littérature ont mis en évidence que la viscosité des bétons est un paramètre influençant le diamètre d'action des vibreurs. Ainsi afin de pouvoir répondre à la deuxième question, « Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ? », nous avons amorcé une réflexion d'un protocole simple et peu coûteux de classification des bétons en fonction de leur viscosité.

3.4 Références du chapitre

- [1] N. Roussel, A. Lemaître, R.J. Flatt, and P. Coussot, "Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art," *Cement and Concrete Research*, vol. 40, pp. 77-84, 2010.
- [2] P.F.G. Banfill, M.A.O.M. Teixeira, and R.J.M. Craik, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941, 2011.
- [3] Guillaume Ovarlez, "Introduction to the rheometry of complex suspensions," in *Understanding the Rheology of concrete.*, Nicolas Roussel, Ed.: Woodhead, 2012, ch. 2, pp. 23-62.
- [4] C. Hu. et al., "Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete," *Materials and Structures*, vol. 29, no. 10, pp. 620-631, 1996.
- [5] Ciment Calcia. (2013) Italcementi Group. [Online]. <http://www.ciments-calcia.fr>
- [6] S.A. SIKA® France. (2010) Sika Viscocrete Tempo 12. [Online]. <http://fra.sika.com/>
- [7] Joumana Yammine, Mohend Chaouche, Michel Guerinet, Micheline Moranville, and Nicolas Roussel, "From ordinary rheology concrete to self compacting concrete: A transition between frictional and hydrodynamic interactions," *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 890-896, 2008.
- [8] S.A. SIKA® France. (2010) PLASTIMENT® HP. [Online]. <http://fra.sika.com/>
- [9] N. Roussel and P. Coussot, "'Fifty-cent rheometer' for yield stress measurements: From slump to spreading flow," *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 705-718, 2005.
- [10] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of concrete rheometers: Comparison of concrete rheometers (Nantes, France) in October, 2000," The National Institute of Standards and Technology Interragency Report (NISTIR), 6819, 2001.
- [11] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB (Cleveland, OH, USA) in May 2003," The National Institute of Standards and Technology Interragency Report (NISTIR), 7154, 2004.
- [12] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-5 Essai pour béton frais Partie 5 - Essai d'étalement à la table à choc.*, 2009.
- [13] F. De Larrard and C.F. Ferraris, "Rhéologie du béton frais remanié. III L'essai au cône d'Abrams modifié," *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 215, no. 4178, pp. 53-60, 1998.
- [14] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-2 Essai pour béton frais - Essai d'affaissement.*, 1999.
- [15] N. Roussel, "Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1656-1664, 2005.

Chapitre 4

**Quel est le volume de béton
affecté par une
pervibration ?**

Chapitre 4

Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ?

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, une aiguille vibrante est un système complexe. Son comportement mécanique est lié d'une part à sa conception (matériaux, système rotatif,...) et d'autre part à ses éléments constitutifs (moteur, balourd,...). En effet, bien que les vibreurs disponibles dans le commerce possèdent une forme globalement cylindrique et des diamètres similaires, aucun industriel spécialiste de la vibration ne propose le même système.

Le but de ce chapitre est, dans un premier temps, de décrire les différentes corrélations possibles par la mise en mouvement d'une aiguille vibrante telles que les relations *diamètre/amplitude* ou *force centrifuge/fréquence*. Puis dans un second temps, nous présenterons un modèle analytique simple de prédiction du rayon d'action d'un vibreur en fonction de ces caractéristiques mécaniques. Nous confronterons notre approche à l'étude de matériaux cimentaires de consistances variées.

Ensuite, nous mettrons en évidence une limite de la transmission de la vibration en fonction de la viscosité du béton. Il semblerait que les puissances électriques des aiguilles vibrantes ne soient pas suffisantes pour liquéfier les matériaux à forte viscosité.

Enfin, nous étudierons une configuration de milieu semi-infini vertical représenté par les éléments de type voile ou de type poutre sur les chantiers de construction. Nous identifierons une transmission ou une réverbération des ondes de vibration par les parois des coffrages.

4.1 Comportement mécanique

4.1.1 Relation amplitude – diamètre

Dans un premier temps, à partir des données constructeurs issues de l'Annexe 1.1 nous traçons sur la Figure 4.2, l'amplitude des aiguilles vibrantes en fonction de leur diamètre pour des vibreurs électriques. Nous obtenons que l'amplitude des vibreurs augmente proportionnellement avec leur diamètre. Cependant, ce coefficient de proportionnalité variant d'un constructeur à l'autre, la relation entre le diamètre et l'amplitude est à moduler en fonction du fournisseur de matériel. Par ailleurs, la Figure 4.1 rappelle le système de rotation d'un vibreur présenté dans le Chapitre 1.

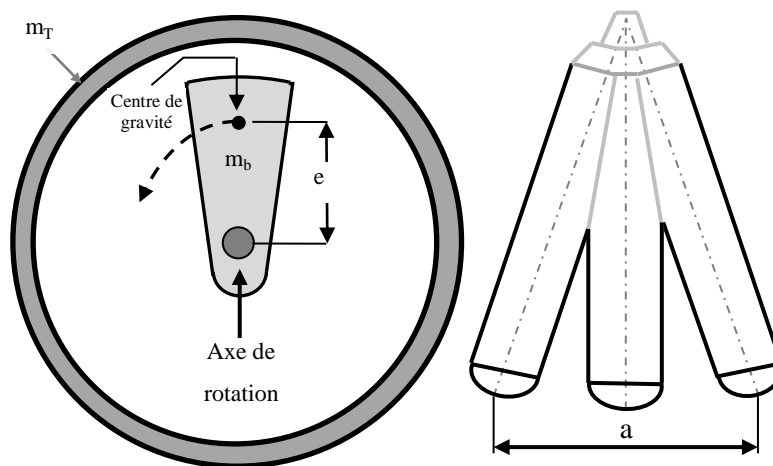


Figure 4.1. Coupe intérieure d'une aiguille vibrante (gauche). Représentation de l'amplitude (droite).

Soit :

m_T : la masse totale du corps vibrant (kg),

m_b : la masse du balourd (kg),

e : la distance entre le centre de gravité du balourd et celui de l'aiguille vibrante (m).

D'un point de vue mécanique, et dans le plan longitudinal de l'aiguille, nous obtenons la relation (4.1.) reliant l'amplitude totale de l'aiguille, notée « a », aux composants vibrants [1,2,3] :

$$a = 2 \cdot \frac{m_b \cdot e}{m_T} \quad (4.1.)$$

Par ailleurs, les fournisseurs d'aiguilles vibrantes stipulent que la densité du matériau utilisé pour la conception du balourd reste constante avec l'accroissement des diamètres. De même, en faisant l'hypothèse que les variations de la masse totale du corps vibrant sont négligeables devant celles du balourd, nous pouvons en déduire que l'augmentation de l'amplitude est induite, au premier ordre, par un balourd de dimensions croissantes générant un gain de masse, tel que

$$a \propto m_b \quad (4.2.)$$

Par conséquent, d'un point de vue dimensionnel, nous obtenons la relation (4.3.) reliant le diamètre de l'aiguille, noté « D_0 », aux paramètres mécaniques de celle-ci. En effet, le diamètre d'une aiguille conditionne le volume disponible pour le balourd et son excentricité.

$$D_0 \propto a \propto m_b \quad (4.3.)$$

Ce postula semble cohérent avec les données issues des constructeurs. En effet, à partir de l'Annexe 1.1, nous traçons sur la Figure 4.2 l'évolution de l'amplitude en fonction du diamètre. Nous retrouvons la proportionnalité évoquée ci-dessus entre ces deux paramètres. Nous pouvons noter que quelque soit le mode fonctionnement du vibreur (électrique, mécanique, ou pneumatique) la proportionnalité précédente est conservée. En revanche, celle-ci varie en fonction du type d'aiguille vibrante.

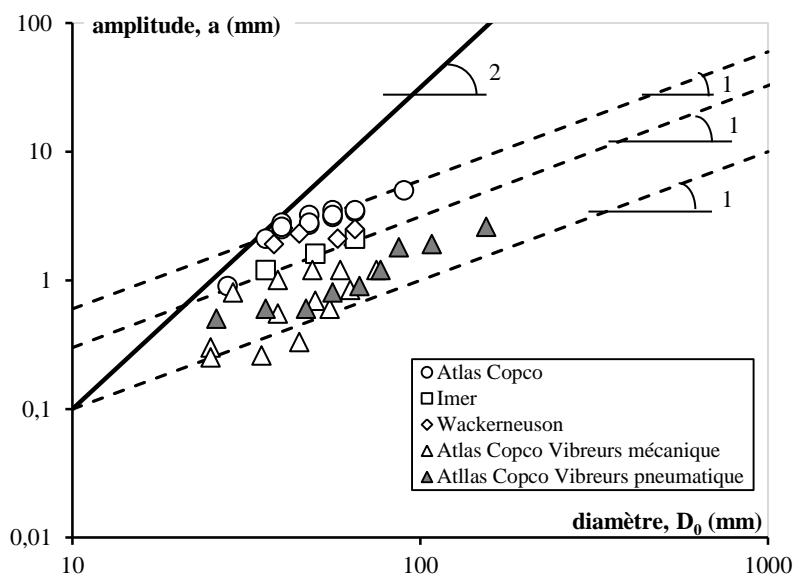


Figure 4.2. Diamètre des aiguilles en fonction des amplitudes. Cas des aiguilles vibrantes électriques, des aiguilles vibrantes mécaniques et pneumatiques.

4.1.2 Relation diamètre théorique-diamètre

A partir de données constructeurs (cf Annexe 1.1), nous traçons sur la Figure 4.3 le ratio adimensionné du diamètre d'action annoncé des aiguilles vibrantes, fourni par les constructeurs, divisé par le diamètre des aiguilles en fonction de leur force centrifuge. Ce graphique montre que, en se focalisant uniquement sur les aiguilles électriques, le ratio D/D_0 est quasiment constant quelque soit la force centrifuge d'une aiguille vibrante.

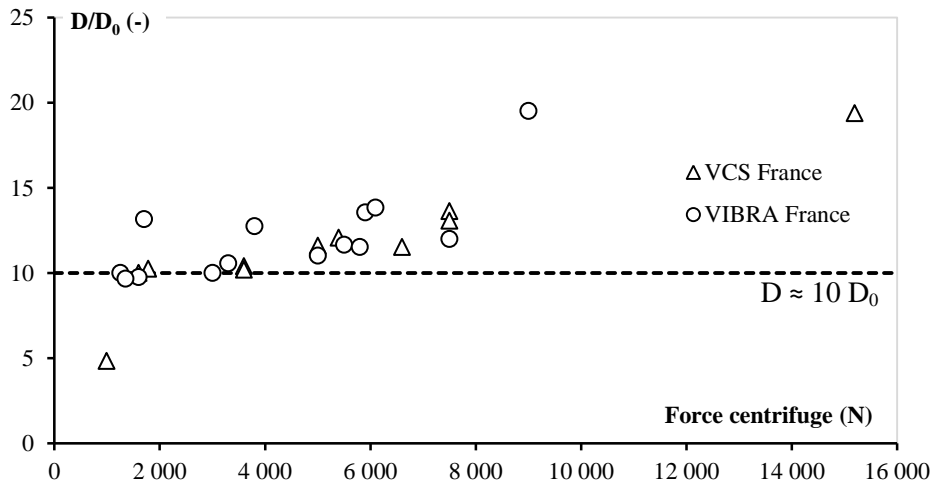


Figure 4.3. Ratio adimensionné du diamètre d'action supposé des aiguilles vibrantes fourni par les constructeurs divisé par le diamètre des aiguilles en fonction de leur force centrifuge.

Parallèlement, la Figure 4.3 permet de retrouver un résultat présenté dans le Chapitre 1 par Geoffroy [4] stipulant que le diamètre d'action d'un vibreur est égal à dix fois son diamètre.

4.1.3 Relation force centrifuge - diamètre

A partir des données constructeurs (cf. Annexe 1.1) nous traçons sur la Figure 4.4 la force centrifuge des aiguilles vibrantes, toutes catégories confondues, en fonction de leur diamètre.

Nous obtenons que la force centrifuge des vibreurs est proportionnelle au carré de leur diamètre quelque soit le fournisseur de matériel et la source d'alimentation de l'aiguille. Ce résultat est résumé par l'équation suivante : $F_c \propto D_0^2$.

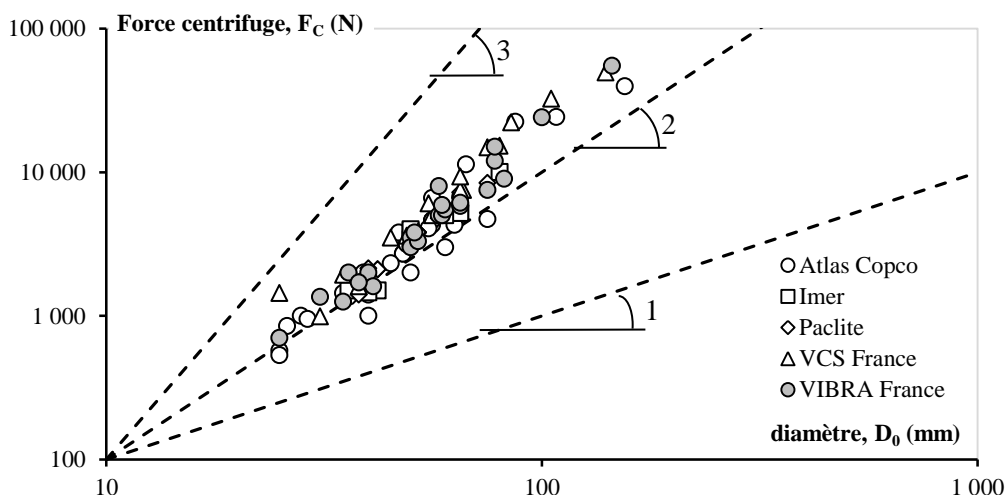


Figure 4.4. Relation force centrifuge et diamètre dans le cas d'aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques et mécaniques.

D'après la Figure 4.4 et la relation amplitude-diamètre (4.3.), nous pouvons déduire que la force centrifuge dépend de la masse du balourd et qu'elle augmente proportionnellement à l'accroissement de celle-ci. De même, d'après l'Annexe 1.1, il est notable que les aiguilles vibrantes électriques

fonctionnent toutes avec une vitesse de rotation identique de 12 000tr/min. Par conséquent, à fréquence constante, la force centrifuge d'une aiguille augmente uniquement avec le carré de son diamètre [1,2].

De plus, d'un point de vue dimensionnel, plusieurs expressions de la force centrifuge semblent envisageables. Nous cherchons ici à identifier quelle relation analytique décrit le mieux cette force en fonction des caractéristiques dimensionnelles des vibreurs. Nous proposons les relations suivantes :

$$F_{C1} = m_b \cdot e \cdot (2\pi f)^2 \quad (4.4.)$$

$$F_{C2} = m_b \cdot e \cdot (2\pi f)^2 \cdot \frac{a}{D_0} \quad (4.5.)$$

Avec :

f : la fréquence, (s^{-1}),

a : l'amplitude, (m),

D_0 : le diamètre de l'aiguille, (m).

La première équation, (4.4.), correspond à une expression classique de la force centrifuge à partir des caractéristiques du vibreur. La seconde, (4.5.), est similaire à la précédente mais elle permet de prendre en considération l'évolution de l'amplitude et du diamètre du vibreur. Nous cherchons à déterminer la validité de l'une ou l'autre.

D'après, les documents édités par les sociétés Atlas Copco [5] et Paclite Equipment [3] à propos de la vibration interne et ceux de l'American Concrete Institute [1], la force centrifuge s'exprime à partir de la première proposition.

De plus, la société Atlas Copco a mis à disposition de l'IFSTTAR une aiguille vibrante à variateur de fréquence, notée AVF, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 4.1 ci-dessous :

Dénomination	Diamètre (mm)	m_b (kg)	e (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)
AVF	25	0,345	0,894	50 à 250	0,9 à 2,3

Tableau 4.1. Caractéristiques de l'aiguille à variateur de fréquence.

Le Tableau 4.2 présente les résultats des équations des forces centrifuges (4.4.) et (4.5.) à partir des paramètres de l'AVF.

Dénomination	AVF
F_{C1} (N), à 191 Hz	447
F_{C2} (N), à 191 Hz	23

Tableau 4.2. Calculs des forces centrifuges.

Nous comparons nos résultats du Tableau 4.2 avec des aiguilles vibrantes de la série SMART de la société Atlas Copco. Leurs caractéristiques sont rassemblées dans le Tableau 4.3. D'après ce tableau,

nous obtenons que l'accroissement des diamètres des aiguilles vibrantes de la série SMART suit un ratio de 1,2. De même l'accroissement des forces centrifuges semble suivre un ratio égal à 1,7.

Dénomination	Diamètre (mm)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	d_{i+1}/d_i	F_{Ci+1}/F_{Ci}
SMART 40	40	2,6	1 600	1,20	1,69
SMART 48	48	2,8	2 700	1,17	1,70
SMART 56	56	3,2	4 600	1,16	1,30
SMART 65	65	3,5	6 000		

Tableau 4.3. Données matériels des aiguilles vibrantes de la série SMART.

A partir du ratio des diamètres et des forces centrifuges, il pourrait exister une aiguille vibrante de 28 mm de diamètre délivrant une force centrifuge d'environ 550 N, cf. Tableau 4.4.

	AVF	Aiguille théorique
$m_b \cdot e$ (kg.mm)	0,3084	/
R_0 (mm)	12,5	14
F_{C1} (N)	447	550

Tableau 4.4. Validation de la formule de F_{C1} .

Par conséquent, le calcul de la force centrifuge à partir de la formule F_{C1} semble cohérent tandis que celui à partir de F_{C2} ne fonctionne pas. Pour la suite, l'expression de la force centrifuge sera dénommée F_C au lieu de F_{C1} .

De plus, d'après (4.3.) reliant le diamètre et l'amplitude, nous savons que la masse du balourd est proportionnelle au diamètre de l'aiguille. Par ailleurs, la masse du balourd est proportionnelle à son volume. A partir du diamètre de la masse excentrée, notée d_b et de sa hauteur, notée h_b , nous établissons la formule suivante :

$$m_b \propto d_b^2 \cdot h_b \quad (4.6.)$$

Parallèlement, les constructeurs indiquent que l'augmentation de la hauteur des aiguilles est négligeable par rapport à celle de leur diamètre. Ainsi, nous pouvons considérer que les variations volumiques du balourd soient principalement dues aux variations de sa section.

Donc, nous obtenons la relation (4.7.) et nous retrouvons la conclusion issue de la Figure 4.4. Relation force centrifuge et diamètre dans le cas d'aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques et mécaniques. tel que :

$$F_C \propto D_0^2 \quad (4.7.)$$

4.1.4 Les recommandations traditionnelles

La relation (4.8.) issue des Techniques de l'Ingénieur [4], montre que la force centrifuge d'une aiguille est proportionnelle à la masse du béton vibré telle que :

$$F_C = a. (2\pi f)^2 m_v \quad (4.8.)$$

Nous pouvons exprimer, la masse de béton vibré à partir du produit de son volume et de sa masse volumique, tel que $m_v = \rho_b \cdot V_v$. De plus, d'un point de vue dimensionnel, le volume vibré est proportionnel au produit du diamètre d'action du vibreur et de sa hauteur, tel que $V_v = D^2 \cdot H_v$. Par conséquent, l'équation précédente devient :

$$F_C \propto \rho_b \cdot f^2 \cdot D^2 H_v \cdot a \quad (4.9.)$$

Soit,

$$F_C \propto D^2 a \quad (4.10.)$$

Par ailleurs, d'après l'équation (4.3.), le diamètre de l'aiguille est proportionnel à son amplitude. Ainsi, nous obtenons :

$$F_C \propto D^2 D_0 \quad (4.11.)$$

Cependant, à partir du premier paragraphe, nous savons que le diamètre d'action, D , devrait être de l'ordre de $10D_0$. Donc, la relation (4.11.) précédente devient :

$$F_C \propto D^2 D_0 \propto D_0^3 \quad (4.12.)$$

Cette équation suggère que la force centrifuge d'une aiguille est proportionnelle au diamètre du vibreur à la puissance trois. Ce résultat semble contradictoire avec les relations analytiques développées dans [1], avec la démarche scientifique élaborée depuis le début de ce paragraphe et avec les résultats de la Figure 4.4 qui suggèrent que la force centrifuge est proportionnelle au carré du diamètre du vibreur. Par conséquent, nous ne conservons pas l'expression (4.12.).

Par ailleurs, à partir de la formule (4.11.), il apparaît que la force centrifuge est dépendante du diamètre du vibreur et de la zone que celui-ci arrive à liquéfier. Dans ce cas, à partir de l'équation (4.7.) nous obtenons :

$$F_C \propto D_0^2 \propto D^2 D_0 \quad (4.13.)$$

Soit

$$D \propto \sqrt{D_0} \quad (4.14.)$$

Cependant, nous avons montré précédemment que, dans la littérature, le ratio entre le diamètre d'action théorique et le diamètre des aiguilles est égal à 10 et qu'il reste constant quelque soit la force centrifuge. Ainsi la relation précédente semble être contradictoire. Nos essais de mesures de rayon d'action compléteront ces données et viseront à lever ces ambiguïtés.

4.2 Prédiction du rayon d'action

4.2.1 Modélisation mécanique

Afin de prédire le rayon d'action d'une aiguille vibrante, nous établissons un modèle simple d'équilibre des forces entre la surface du vibreur et la zone non vibrée. La Figure 4.5 schématise le système mécanique étudié. Autour du pervibrateur, nous supposons que le matériau subit une contrainte constante, égale à $\tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$ sur toute la hauteur du bâti vibrant. De plus, à la frontière entre la zone liquéfiée et la zone non vibrée, notée D , le matériau est au repos et n'est plus soumis à la vibration. Il supporte une contrainte égale à τ_0 . Nous supposons que les contraintes sur ces surfaces sont homogènes sur toute la hauteur de la zone vibrée correspondant à la longueur immergée de l'aiguille vibrante. Nous obtenons ainsi l'équilibre des forces suivant :

$$c \quad (\tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}) \cdot D_0^2 = \tau_0 \cdot D^2 \quad (4.15.)$$

Avec :

τ_0 : le seuil au repos du matériau (Pa),

μ_p : la viscosité plastique du matériau (Pa.s),

$\dot{\gamma}$: le gradient de vitesse du matériau liquéfié (s^{-1}),

D_0 : le diamètre extérieur de l'aiguille vibrante (m),

D : le diamètre d'action maximal de l'aiguille vibrante (m).

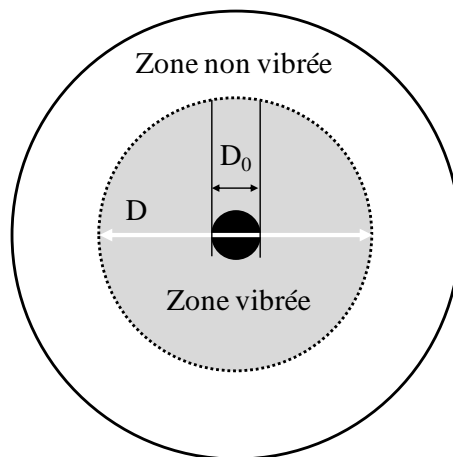


Figure 4.5 Rayon d'action d'une aiguille vibrante.

D'un point de vue analytique, il existe une couche de matériau en contact avec la surface de l'aiguille vibrante qui subit directement le gradient de vitesse que celle-ci impose de par sa vibration. Au sein de la zone du rayon d'action, la vitesse de cisaillement $\dot{\gamma}$ est inconnue et difficilement modélisable. L'équation (4.15.) ne nécessite que de connaître le gradient de vitesse généré par l'aiguille vibrante à sa surface. D'un point de vue dimensionnel, nous décrivons $\dot{\gamma}$ à partir de la fréquence et de l'amplitude du vibreur (*i.e.* une vitesse) et de son rayon (*i.e.* une distance). Nous obtenons donc la relation suivante :

$$\dot{\gamma} = k \frac{f \cdot a}{R_0} \quad (4.16.)$$

Avec :

k : un coefficient sans dimension lié à la géométrie du gradient de vitesse que nous identifierons sur nos résultats (-).

f: la fréquence de l'aiguille (s^{-1}),

a : l'amplitude de l'aiguille (m).

R_0 : le rayon du vibreur (m).

A partir des deux équations précédentes, nous en déduisons le rayon d'action d'une aiguille vibrante plongée dans un matériau cimentaire :

$$D \approx D_0 \sqrt{1 + \frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \dot{\gamma}} \Leftrightarrow D \approx D_0 \sqrt{1 + \frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k \cdot f \cdot a}{R_0}} \quad (4.17.)$$

Notre modèle analytique (4.17.) prédit :

1. une augmentation du diamètre d'action du vibreur proportionnelle à la dimension de l'aiguille vibrante. D'après l'équation (4.3.), nous savons que le diamètre d'un vibreur est proportionnel à son amplitude. Ainsi, nous obtenons que $D \approx D_0 \sqrt{(1 + \mu_p/\tau_0 \cdot k \cdot f)}$ Par conséquent, le diamètre d'action est directement proportionnel à son rayon tel que : $D \propto D_0$. Ceci est en accord avec les travaux de Geoffray [4], de Banfill [6], et Forsblad [7].
2. une augmentation du diamètre d'action du vibreur avec l'accroissement de la vitesse de rotation de l'aiguille. Ce résultat est aussi reporté par Banfill [6] et Forsblad [7].
3. une augmentation du diamètre d'action du vibreur avec l'accroissement de la viscosité du matériau. Ce résultat est aussi noté par Banfill [6].

De plus, notre modèle est semblable dans sa forme à celui proposé par Banfill $D = D_0 \sqrt{\frac{\tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}(D)}{\tau_0}}$ qui est présenté dans le Chapitre 1. Cependant, la solution proposée par Banfill nécessite la résolution d'équations complexes de Bessel au 1^{er} et 2nd ordre [8] pour calculer $\dot{\gamma}(D)$.

Parallèlement, nous décidons de vérifier les capacités de prédiction de notre modèle analytique. Un béton ordinaire a un seuil compris entre 1000 et 2000 Pa et une viscosité variable entre 50 et 100 Pa.s. Ce type de matériau est traditionnellement vibré avec une aiguille électrique dont le diamètre varie entre 40 et 50 mm fonctionnant avec une rotation du balourd à 200 Hz et une amplitude totale de l'ordre de 2 à 3 mm. A partir de ces ordres de grandeurs et d'une valeur du coefficient k comprise entre 10 et 100, notre prédiction (4.17.) retrouve, d'un point de vue dimensionnel, $D \approx 10 \cdot D_0$.

Enfin, les ordres de grandeurs présentés ci-dessus pour k compris entre 10 et 100 montrent que le terme 1 dans le modèle analytique est négligeable par rapport au terme $\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k \cdot f \cdot a}{R_0}$ qui varie entre 10 et 100.

Par conséquent, dans le cas des bétons ordinaires, la formule (4.17.) devient :

$$D \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k \cdot f \cdot a}{R_0}} \quad (4.18.)$$

Nous confronterons ce résultat analytique à nos essais expérimentaux dans les sections suivantes.

4.2.2 Description du montage expérimental

Pour mesurer le rayon d'action d'un pervibrateur, nous remplissons des récipients cylindriques de matériau frais et nous disposons des marqueurs à leur surface. L'ensemble des matériaux testés ont un seuil au repos suffisant pour maintenir ces indicateurs en surface. Soumis à une vibration interne, les marqueurs s'enfoncent dans la zone liquéfiée à proximité du vibreur indiquant ainsi le diamètre d'action de l'aiguille vibrante. L'utilisation de plusieurs diamètres d'aiguilles à fréquence variable et l'étude de matériaux cimentaires de consistances variées ont permis d'explorer une large palette de configuration vibration/fluidité.

4.2.2.1 Matériels

La société Atlas Copco a mis à disposition de l'IFSTTAR une aiguille vibrante électrique de 25 mm de diamètre connectée à un variateur de fréquence dont la plage d'étude s'étend entre 50 et 250 Hz. Une molette permet de modifier la fréquence désirée. Celle-ci s'affiche sur un écran analogique. Le vibreur est de type électronique comme présenté dans le Chapitre 1. Il a pour dénomination AVF. L'ensemble du système est présenté sur la Figure 4.6 et la Figure 4.7.



Figure 4.6. Système de variateur de fréquence.



Figure 4.7. Aiguille vibrante de 25 mm de diamètre connectée au système de variateur de fréquence.

Parallèlement, la société Wackerneuson a aussi mis à la disposition de l'IFSTTAR trois aiguilles de diamètres différents connectables à un système de fréquence variable. Les vibreurs ont pour dénomination « IREN 38 », « IREN 45 » et « IREN 57 ». Le terme IREN indique que les aiguilles vibrantes appartiennent à la catégorie des vibreurs électriques au sein des produits proposés par la société Wackerneuson et le nombre caractérise leur diamètre en mm.

Le convertisseur électrique, dénommé « FUE-M/S 85A », assure une plage de fréquence entre 15 et 190 Hz. Une molette permet de modifier la fréquence désirée qui s'affiche sur un écran analogique. L'ensemble de ces composants est présenté sur la Figure 4.8 et la Figure 4.9. Leurs caractéristiques globales sont rassemblées dans l'Annexe 4.1.



Figure 4.8. IREN 57.



Figure 4.9. Convertisseur à fréquence variable FUE-M/S 85A.

A partir de la donnée de la littérature du facteur 10 entre le diamètre d'action et le diamètre du vibreur et afin de ne pas observer une réverbération ou une transmission des ondes de vibrations par les parois du récipient, nous avons choisi des bassines dont le diamètre est supérieur à dix fois celui des aiguilles vibrantes. Pour nos essais avec les vibreurs AVF, IREN 38 et IREN 45 nous utilisons un récipient de diamètre égal à 70 cm. Pour le vibreur IREN 57, nous utilisons une bassine avec un diamètre égal à 105 cm. De plus, des amortisseurs sont fixés en sous face des récipients pour limiter une réverbération ou une transmission des ondes de vibration par le sol. Enfin, quelque soit le récipient (d'une hauteur égale à 20 cm), les quantités de bétons fabriqués permettent un enfoncement des vibreurs, dans le matériau cimentaire, d'environ 12 cm. La Figure 4.10 présente une mesure de diamètre d'action du vibreur AVF testé avec une pâte de ciment.



Figure 4.10. Mesures du diamètre d'action.

Pour l'ensemble de notre campagne d'essai, nous avons disposé les mêmes marqueurs à la surface de nos matériaux. Ceux-ci correspondent à des clous de menuisiers, présentés sur la Figure 4.11. Leur longueur est égale à 15 mm et leur épaisseur à 1 mm.

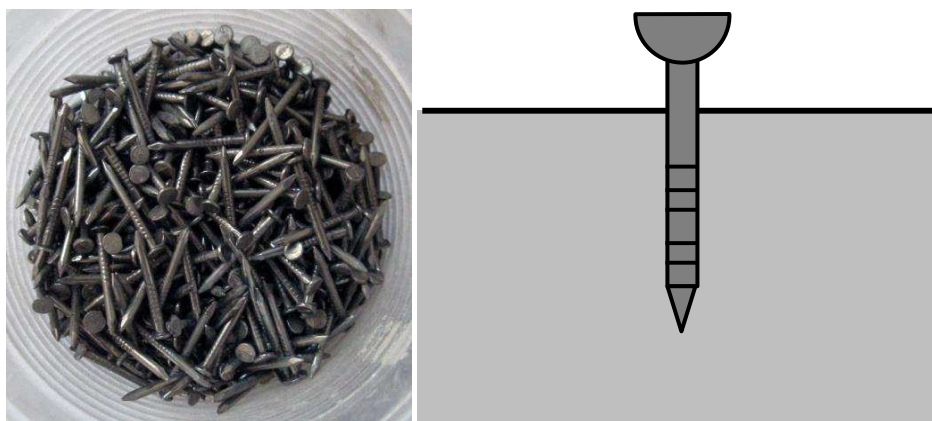


Figure 4.11. Marqueurs pour la mesure du rayon d'action (gauche). Marqueurs disposés à la surface des matériaux cimentaires (droite).

4.2.2.2 Calibration des caractéristiques des aiguilles

Notre modèle analytique $D \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k.f.a}{R_0}}$ nécessite comme paramètres d'entrée la fréquence et l'amplitude du vibreur. Dans le cadre d'une collaboration avec le Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie du Béton (CERIB), nous avons caractérisé, dans l'air, les paramètres de vibrations de l'AVF. La fréquence de rotation des aiguilles est mesurée grâce à trois accéléromètres répartis le long du corps vibrant. La Figure 4.12 présente la mesure de la fréquence de vibration de l'AVF avec une consigne de 100 Hz. Le premier pic majoritaire montre que la fréquence réelle du vibreur est égale à 93,7 Hz. Cet essai est répété tous les 50 Hz entre 50 et 250 Hz.

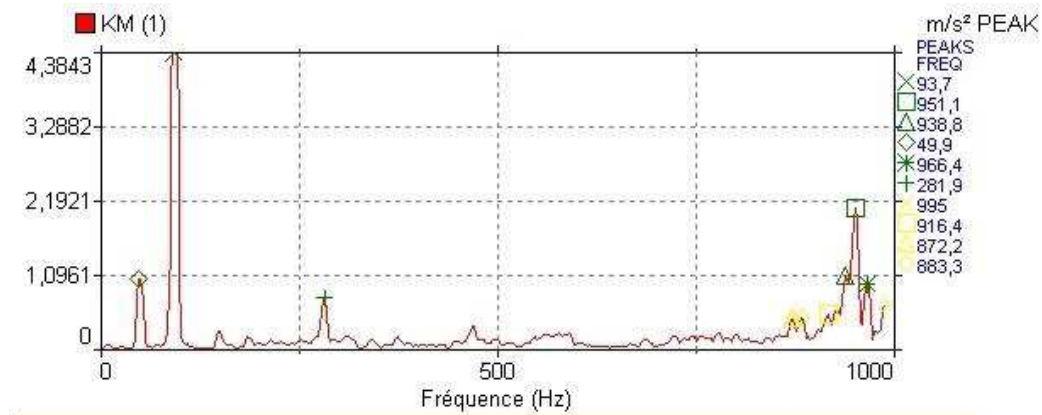


Figure 4.12. Mesure de la fréquence de rotation de l'AVF dans l'air. Fréquence de consigne à 100 Hz.

Le Figure 4.5 récapitule les fréquences théoriques et les fréquences mesurées dans l'air, de l'aiguille à variateur de fréquence mis à notre disposition par la société Atlas Copco.

Fréquence d'affichage (Hz)	Fréquence mesurée (Hz)
49,80	43,7
100,6	93,7
150,3	143,4
200,3	191,6
250,2	228,1

Tableau 4.5. Récapitulatif des fréquences de vibration de l'AVF.

Parallèlement, à partir d'un dispositif de mesure du mouvement des aiguilles vibrantes, illustré par la Figure 4.13, nous caractérisons l'amplitude de ces matériels. Pour y parvenir, nous fixons, une pointe de stylo à l'arase du vibreur. En vibration dans l'air, ce marqueur dessine la trajectoire de l'aiguille vibrante sur une feuille de papier. La Figure 4.14 illustre schématiquement la trajectoire de la pointe d'une aiguille vibrante. L'épaisseur apparente de la sinusoïde correspond à l'amplitude du vibreur.

La Figure 4.15 présente le résultat obtenu avec l'aiguille IREN 38 à 35 Hz.. Cette mesure est répétée pour toutes les aiguilles vibrantes mises à notre disposition. L'ensemble de ces caractérisations est disponible dans l'Annexe 4.2



Figure 4.13. Dispositif de mesure de l'amplitude maximale d'une aiguille vibrante dans l'air. IREN38.

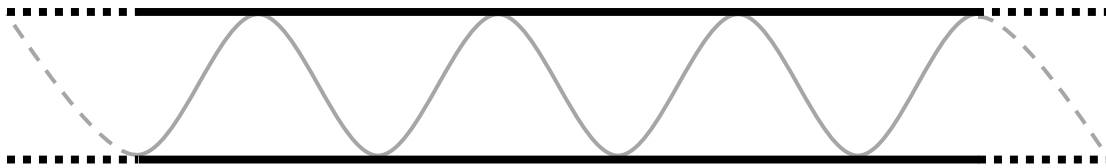


Figure 4.14. Schéma de principe de la trajectoire de la pointe d'une aiguille vibrante dans l'air.

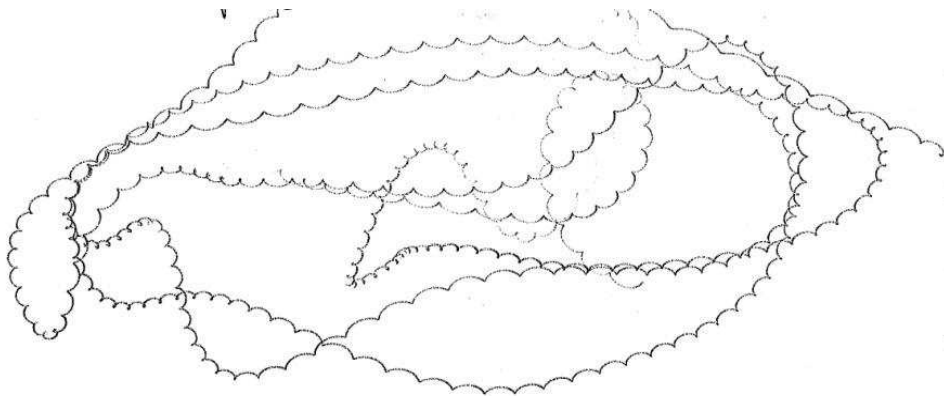


Figure 4.15. Déplacement décrit par la pointe de l'aiguille vibrante IREN 38 à 35 Hz dans l'air.

Le Tableau 4.6 et le Tableau 4.7 récapitulent les mesures des amplitudes des aiguilles vibrantes dans l'air en fonction de la fréquence d'application.

Fréquence mesurée (Hz)	Amplitude mesurée (mm)
43,7	0,9
93,7	1,2
143,4	1,4
191,6	1,2
228,1	2,3

Tableau 4.6. Mesures des amplitudes de l'AVF.

Fréquence (Hz)	IREN 38	IREN 45	IREN 57
	Amplitude mesurée (mm)		
35	1,6	2,0	2,1
75	1,9	2,1	2,5
115	1,9	2,5	3,0
150	1,9	2,5	3,0
188	2,1	3,0	3,0

Tableau 4.7. Mesures des amplitudes des aiguilles de la gamme IREN.

A partir des données constructeurs de la société Atlas Copco et de la formule $a = 2 \cdot (m_b \cdot e) / m_T$, nous pouvons déterminer théoriquement l'amplitude de l'AVF. En effet, la masse du balourd est égale à 0,345 kg avec une excentricité de 0,894 mm pour un poids total de la tête vibrante égal à 2,43 kg. Nous obtenons ainsi une amplitude, indépendante de la fréquence, égale à 0,254 mm. Ce résultat est 10 fois plus petit que notre mesure expérimentale (cf. Tableau 4.6). Cependant, la conception de l'AVF ne permet pas d'incorporer le moteur électrique de l'aiguille vibrante directement dans le bâti vibrant. Celui-ci est alors disposé en amont. Par conséquent, notre dispositif de mesure de l'amplitude semble plus pertinent pour caractériser les propriétés mécaniques de l'aiguille à variateur de fréquence. De plus, il présente l'avantage d'identifier une éventuelle variation de l'amplitude avec la fréquence d'excitation alors que l'équation $a = 2 \cdot (m_b \cdot e) / m_T$ fournit une unique valeur.

De plus, la société Wackerneuson indique une amplitude égale à 1,9 mm, 2,3 mm et 2,1 mm respectivement pour les aiguilles vibrantes IREN 38, IREN 45 et IREN 57. Pour cette catégorie de vibreur, notre dispositif expérimental mesure des amplitudes du même ordre de grandeur que les caractéristiques proposées par le constructeur. Par ailleurs, à partir des données transmises, par cette même société, sur la masse des balourds et leur excentricité, nous retrouvons, par calcul, des amplitudes semblables à celles présentées ci-dessus. Par conséquent, il apparaît que le prototype de l'AVF constitue un cas particulier de non application de la relation $a = 2 \cdot (m_b \cdot e) / m_T$ à cause de sa conception très différente par rapport aux aiguilles électriques traditionnelles.

4.2.3 Protocole expérimental

Nous mesurons le diamètre d'action des vibreurs à partir de l'enfoncement de marqueurs disposés à la surface des matériaux cimentaires.

Les pâtes de ciment sont toutes préparées suivant le même protocole avec l'utilisation d'un malaxeur Eirich Type R08 dont les spécifications techniques sont disponibles dans l'Annexe 4.3. Le ciment est introduit en premier puis l'eau avec 1/3 d'adjuvant. L'ensemble est mélangé pendant 2 minutes à basse vitesse, notée V1, puis à haute vitesse, notée V5 pendant 3 minutes. Le matériau est de-nouveau malaxé à V1 pendant 30s et enfin à V5 pendant 30s, pour terminer à vitesse V0 durant 30s. Le reste de

l'adjuvant (2/3) est ajouté après 3min et 30s de malaxage. Une fois la gâchée de la pâte de ciment terminée, elle est versée dans le récipient d'étude. Parallèlement, une quantité est prélevée pour contrôler la rhéologie du matériau à partir d'un rhéomètre Bohlin C-VOR 200 et une géométrie Vane.

Les bétons sont tous préparés suivant le protocole décrit dans le Chapitre 2. Dès que la fabrication est terminée et avant le démarrage de chaque essai, nous contrôlons la consistance du matériau frais via un test d'affaissement au cône d'Abrams [9].

Le protocole d'essai de mesure du rayon d'action du vibreur est identique quelque soit le matériau cimentaire étudié. Chaque essai n'est pratiqué qu'une seule fois. Tout d'abord, le matériau issu du malaxeur est versé dans le récipient puis les clous sont répartis à la surface avec un écart d'environ 10 mm. Pour assurer une répétabilité des essais, un dispositif de fixation assure le maintien du vibreur au centre de la bassine durant l'ensemble des mesures. Celui-ci est inséré à l'arrêt dans le matériau d'étude. La vibration est appliquée pendant une durée suffisamment longue afin qu'elle atteigne sa vitesse de rotation en régime permanent et qu'aucune évolution temporelle de l'accroissement du diamètre d'action ne soit constatée. Ensuite, l'aiguille vibrante est extraite du matériau en fonctionnement. Enfin, le diamètre d'action est mesuré. Cette mesure est répétée tous les 50 Hz entre 50 Hz et 250 Hz avec l'aiguille à variateur de fréquence de la société Atlas Copco et environ tous les 40 Hz entre 35 Hz et 190 Hz avec les aiguilles IREN de la société Wackerneuson. La Figure 4.16 présente la mesure du rayon d'action de l'AVF plongée dans une pâte de ciment de ratio E/C=0,4 avec une fréquence égale à 100 Hz. Entre chaque fréquence d'étude, le matériau est de nouveau mélangé manuellement. Enfin, nous supposons que la durée de nos essais est suffisamment faible pour ne prendre en considération, au premier ordre, les effets de la thixotropie du matériau sur les valeurs de nos résultats.

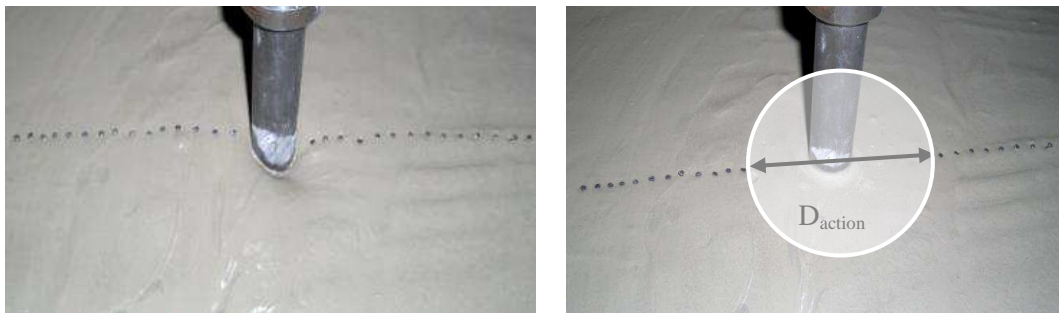


Figure 4.16. Pâte de ciment E/C=0,4. Etat avant vibration (gauche). Etat après vibration avec une fréquence égale à 100 Hz (droite).

4.3 Résultats

4.3.1 Lien avec les recommandations traditionnelles

Dans un premier temps, nous traçons sur la Figure 4.17, les mesures expérimentales du diamètre d'action de l'AVF plongée dans les bétons ordinaires S3 et S4 en fonction de la fréquence du vibreur.

Ces résultats confirment la relation (4.12.), $D = 10.D_0$. En effet, le diamètre de l'AVF est égal à 2,5 cm et nous obtenons un diamètre d'action expérimental de l'ordre de 25 cm pour une fréquence d'excitation proche de 200 Hz. L'imprécision de la mesure expérimentale entraîne un écart des résultats de l'ordre de 15%.

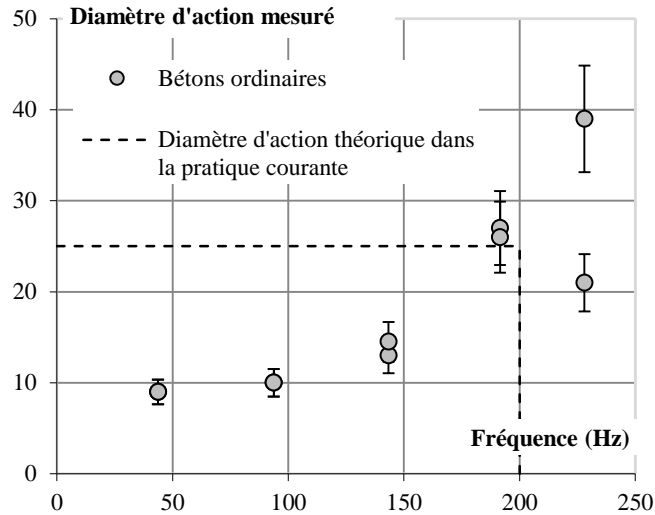


Figure 4.17. Diamètre d'action expérimentale avec l'AVF plongée dans des bétons ordinaires.

De plus, nous traçons sur la Figure 4.18, les mesures expérimentales du diamètre d'action de l'AVF plongée dans les bétons visqueux S3 et S4 en fonction de la fréquence du vibreur. Ces résultats montrent que la relation $D = 10D_0$ n'est pas conservée dans le cas des bétons visqueux. En effet, le ratio D/D_0 n'est plus égal à 10 pour une fréquence d'excitation proche de 200 Hz. Ce ratio est inférieur à 10 et est en moyenne proche de 7,0.

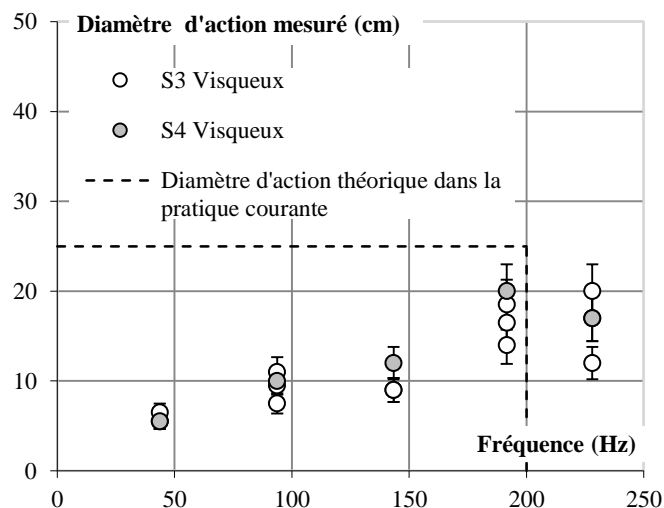


Figure 4.18. Diamètre d'action expérimentale de l'AVF plongée dans des bétons visqueux.

Nous traçons sur la Figure 4.19, les mesures expérimentales du diamètre d'action d'IREN 38 plongée dans les formulations des bétons très visqueux S2 et S5 en fonction de la fréquence du vibreur. Ces résultats montrent que la relation $D = 10D_0$ n'est pas non plus applicable aux cas des bétons à très

forte viscosité. En effet, le ratio D/D_0 n'est plus égal à 10 pour une fréquence d'excitation proche de 200 Hz. Ce ratio est inférieur à 10 et est en moyenne proche de 8 sur la figure.

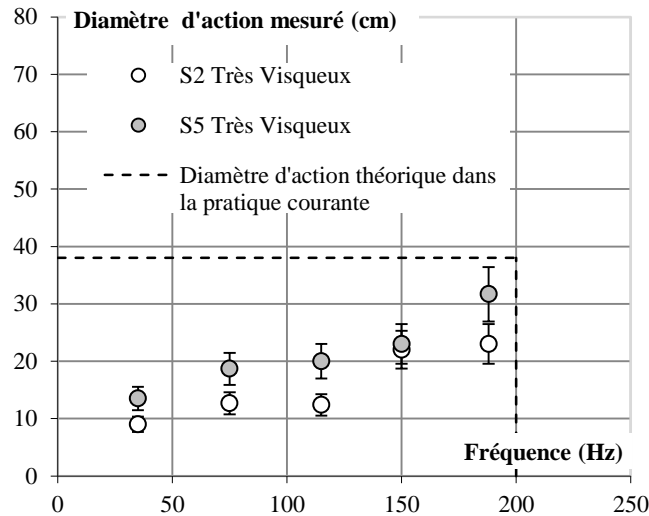


Figure 4.19. Diamètre d'action expérimental d'IREN 38 plongée dans des bétons très visqueux.

Enfin, nous traçons sur la Figure 4.20 les mesures expérimentales du diamètre d'action des aiguilles vibrantes IREN 45 et IREN 57 plongées dans un béton très visqueux S4. Contrairement à IREN 38, le diamètre d'action expérimental de ces vibreurs est égal à 10 fois leur diamètre, pour une fréquence d'excitation proche de 200 Hz comme le propose la relation $D = 10D_0$ et même plus pour IREN 45.

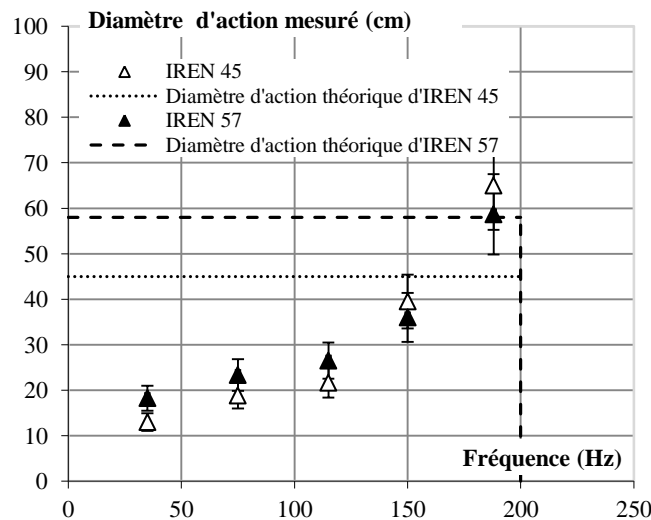


Figure 4.20. Diamètre d'action expérimental d'IREN 45 et IREN 57 plongées dans des bétons très visqueux de consistance S4.

4.3.2 Pâtes de ciment et bétons ordinaires

Premièrement, nous vérifions l'efficacité de la prédiction du rayon d'action d'une aiguille vibrante plongée dans un matériau cimentaire de notre modèle analytique (4.18.), $D \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k.f.a}{R_0}}$, à partir des essais effectués avec des pâtes de ciment. Ainsi, nous traçons sur la Figure 4.21, notre prédiction du

diamètre d'action en fonction de nos résultats expérimentaux obtenus avec l'AVF plongée dans des pâtes de ciment. Quelque soit la formulation de ces matériaux, nous obtenons une prédiction proche des résultats expérimentaux pour un coefficient k égal à 50. Nous retrouvons la conclusion émise à la fin du paragraphe 4.2.1 selon laquelle k est compris entre 10 et 100. Par conséquent, nous figeons pour l'ensemble de nos essais la valeur du paramètre k à 50. L'équation (4.18.) devient alors :

$$D \approx 5D_0 \sqrt{2 \cdot \frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{f_a}{R_0}} \quad (4.19.)$$

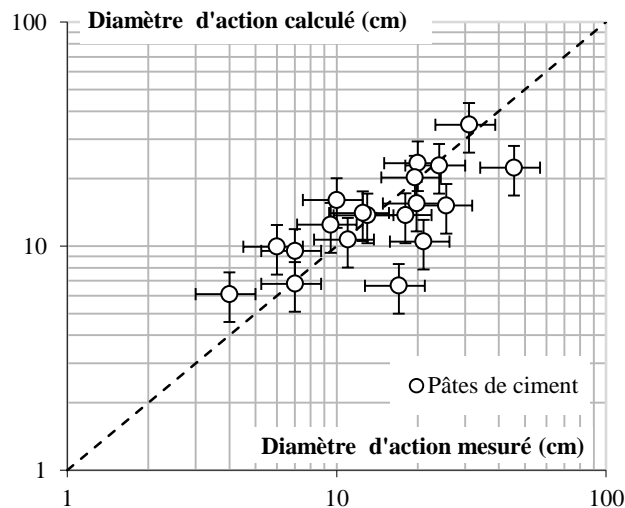


Figure 4.21. Diamètre d'action calculé à partir de (4.19.) en fonction du diamètre d'action mesuré pour des pâtes de ciment avec l'AVF. $k=50$.

Ensuite, nous traçons sur la Figure 4.22, le diamètre d'action prédit par l'équation (4.19.) en fonction de nos résultats expérimentaux obtenus pour des formulations de bétons ordinaires avec l'AVF. Comme dans le cas des pâtes de ciment et avec $k=50$, notre modèle analytique fournit une prédiction du rayon d'action équivalente à nos mesures.

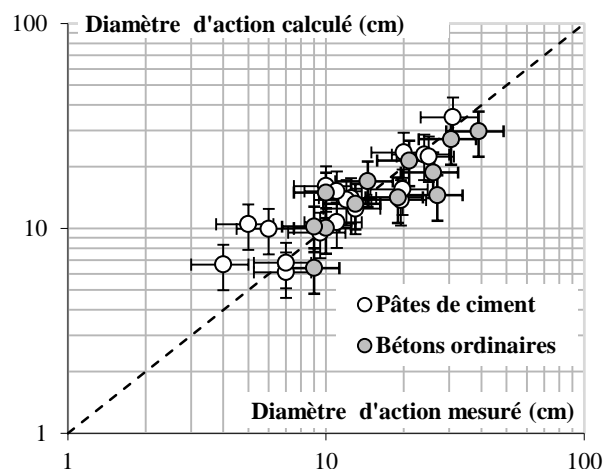


Figure 4.22. Diamètre d'action calculé à partir de (4.19.) en fonction du diamètre d'action mesuré pour des pâtes de ciment et des bétons ordinaires avec l'AVF.

4.3.3 Les bétons visqueux et fortement visqueux

Nous traçons sur la Figure 4.23 le diamètre d'action prédit par l'équation (4.19.) en fonction de nos résultats expérimentaux obtenus pour des formulations de bétons visqueux avec l'AVF. Pour l'étude de ces matériaux, notre modèle analytique (4.19.) montre systématiquement un écart avec nos mesures. De plus, le diamètre d'action expérimental semble être bloqué autour d'une vingtaine de centimètres alors que le modèle prédit une valeur double. Nous constatons aussi cet effet avec les bétons très visqueux et l'aiguille IREN 38. Celui-ci est même amplifié avec la viscosité importante de ces matériaux comme illustré sur la Figure 4.24. Cette limitation expérimentale du rayon d'action est contradictoire avec notre modèle analytique qui prévoit une augmentation de la zone vibrée avec l'accroissement de la viscosité des bétons.

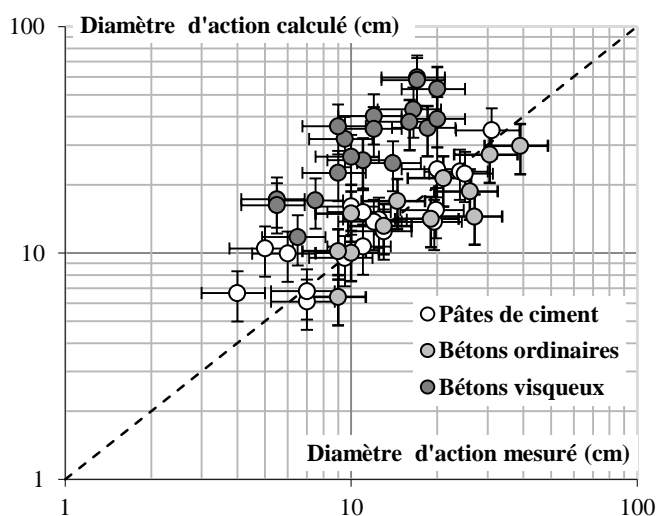


Figure 4.23. Diamètre d'action calculé à partir de (4.19.) en fonction du diamètre d'action mesuré pour des pâtes de ciment, des bétons ordinaires et des bétons visqueux avec l'AVF..

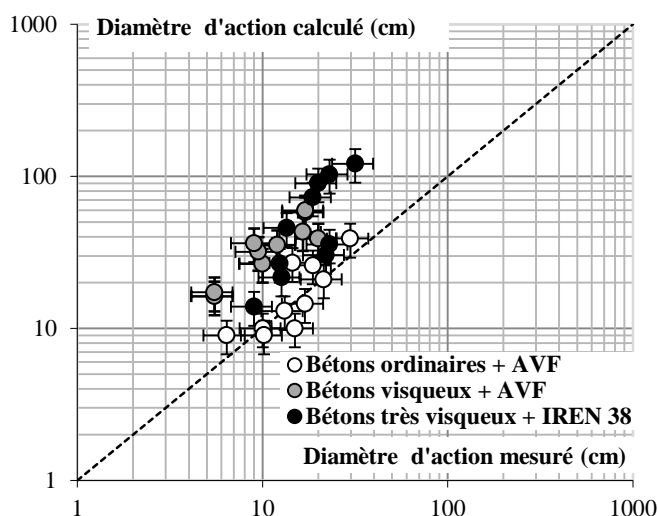


Figure 4.24. Diamètre d'action calculé à partir de (4.19.) en fonction du diamètre d'action mesuré pour des bétons ordinaires et des bétons visqueux avec l'AVF et IREN 38..

De plus, une singularité apparaît régulièrement lors de l'extraction de l'aiguille vibrante au sein de ces matériaux visqueux. En effet, nous observons un trou laissé par le vibreur dans ces bétons. Ce phénomène est illustré par la Figure 4.25. Nous développerons cet aspect dans les prochains paragraphes.



Figure 4.25. Trou laissé après vibration par IREN 38 plongée dans S2TV avec une fréquence rotation égale à 35 Hz.

4.4 Analyses

4.4.1 Validation et comparaison du modèle mécanique

Dans un premier temps, nous décidons de comparer plus précisément l'efficacité de notre prédiction avec l'analyse développée par Banfill [6]. En effet, Banfill étudie parallèlement la vitesse des ondes de cisaillement au sein de la zone du béton vibré et la vitesse des ondes de compression pour décrire le comportement du matériau au repos. La représentation mécanique qu'il développe est modélisable à partir de la figure suivante :

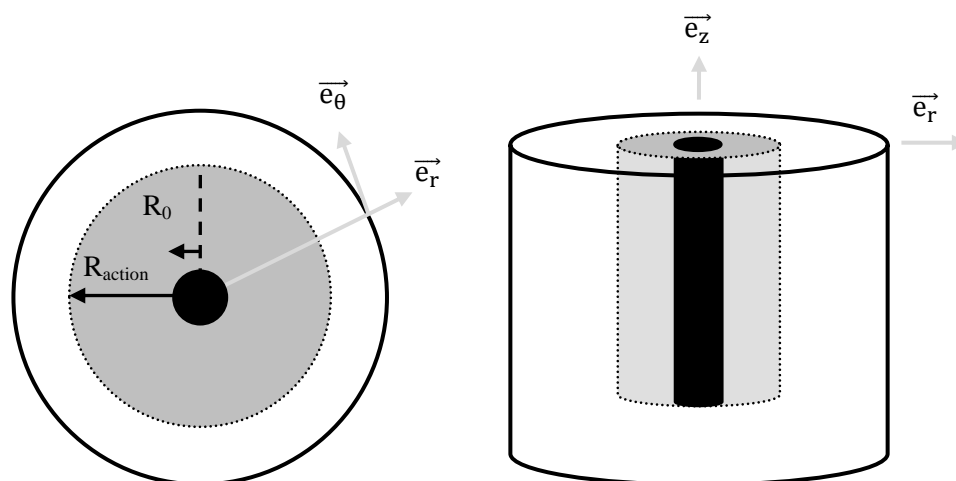


Figure 4.26. Transmission des ondes de cisaillement.

Avant de comparer ces résultats avec notre modèle, nous effectuons un calcul simplifié de la transmission des ondes générées à la surface du vibreur. En effet, les composantes du vecteur vitesse

de propagation des ondes sont (v_r , v_θ , v_z). La symétrie de révolution du problème impose que $v_\theta = 0$ et que l'ensemble des variables ne dépendent pas de θ . De plus, nous émettons l'hypothèse que la vitesse radiale est constante sur toute la hauteur de la zone cisailée et que les ondes sont uniquement générées perpendiculairement à la surface du vibreur. Ainsi, la composante v_z est nulle et la vitesse radiale ne dépend que de r .

Dans ces conditions, il résulte de l'équation de la conservation de la quantité de mouvement la relation suivante :

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \quad (4.20.)$$

La solution de l'équation (4.20.) est de la forme :

$$v_r(r) = -\frac{A}{r^2} + B \quad (4.21.)$$

Les conditions aux limites du problème sont $v_r(r = r_0) = v_0$ avec v_0 la vitesse de rotation de l'aiguille vibrante et $v_r(r = \infty) = 0$. Nous obtenons, la solution de l'équation (4.20.) sous la forme suivante :

$$v_r(r) = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (4.22.)$$

Parallèlement, Banfill établit des résolutions de la vitesse de cisaillement et de compression à partir de système complexe d'équations de Bessel au 1^{er} et 2nd ordre [8]. Néanmoins, à partir d'une analyse au 1^{er} ordre de ces solutions, nous obtenons les formules (4.23.) et (4.24.) décrivant respectivement les ondes de cisaillement et de compression :

$$v_r(r) = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (4.23.)$$

Avec :

$v_r(r)$: la vitesse de l'onde de cisaillement (m/s),

r_0 : le rayon du vibreur (m),

r : la distance par rapport à la paroi extérieure de l'aiguille vibrante (m).

$$v_{rc}(r) = v_{ac} \cdot \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{f}{c \cdot r}} \quad (4.24.)$$

Avec :

$v_{rc}(R)$: la vitesse de l'onde de compression (m/s),

v_{ac} : la vitesse de l'onde de compression à l'interface entre la zone vibrée et la zone au repos (m/s),

D : le diamètre d'action (m),

f : la fréquence du vibreur (Hz),

c : la célérité du son dans le béton (m/s).

Nous remarquons que nos hypothèses proposées pour établir l'équation des ondes de cisaillement à partir de l'équation de la quantité de mouvement semblent en accord avec une étude simplifiée issue des travaux de Banfill puisque les solutions ont la même forme analytique.

Pour compléter cette description, nous traçons sur la Figure 4.27 la prédiction simplifiée de la vitesse des ondes de cisaillement proposée préalablement en fonction de la distance au vibreur et nous la comparons avec la vitesse prédite par Banfill [6]. Dans une zone suffisamment proche de l'aiguille vibrante, les simplifications émises ci-dessus permettent de capturer la décroissance rapide de la vitesse de l'onde de cisaillement tandis qu'elles ne modélisent pas la chute brutale attendue pour un rayon important. L'équation (4.23.) semble donc suffisante pour représenter l'onde de cisaillement dans un béton jusqu'à une distance au moins égale à 10 fois le rayon du vibreur. De plus, nous remarquons que d'après les relations (4.22.) et (4.23.), la vitesse des ondes de cisaillement au sein de la zone liquéfiée est modélisable uniquement à partir des propriétés mécaniques du vibreur quelque soit le matériau dans lequel celui-ci est plongé. Les équations mathématiques développées par Banfill [6] prédisent une décroissance rapide de la vitesse des ondes de cisaillement au-delà du rayon d'action du vibreur. En effet, dans la zone non liquéfiée, le matériau reste au repos et est capable de supporter une contrainte τ_0 . Par conséquent, il est logique que la célérité des ondes de cisaillement tende rapidement vers une vitesse nulle lorsque que le rayon d'action de l'aiguille vibrante est dépassé car le comportement du matériau ne correspond plus à celui d'un liquide cisailé en écoulement mais à un matériau solide déformable.

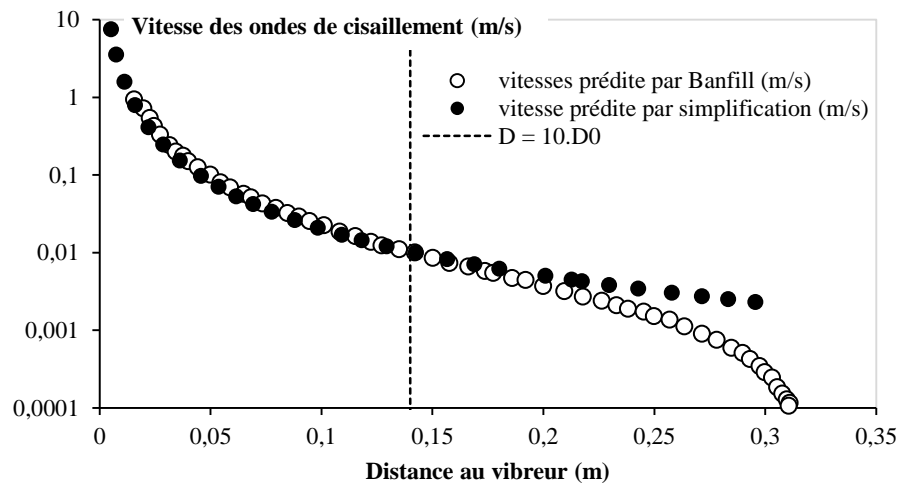


Figure 4.27. Vitesse de l'onde de cisaillement dans un béton. Résultats expérimentaux [6] et modèle analytique.

Pour calculer les ondes de compression à partir de la formule (4.24.), nous émettons une hypothèse forte stipulant que la vitesse de l'onde de compression à l'interface entre la zone vibrée et la zone au repos, notée v_{ac} , est égale à la vitesse de l'onde de cisaillement. De plus, le terme « D » étant à ce stade une inconnue, nous le choisissons égal à $10 \cdot D_0$. Nous traçons sur la Figure 4.28 la prédiction de la vitesse des ondes de compression proposée par la formule (4.24.) en fonction de la distance au vibreur et nous la comparons avec la vitesse prédite par Banfill [6]. L'écart entre les deux modélisations a

pour origine le choix de la valeur du rayon action, $D = 10 D_0$. Cependant, les simplifications évoquées ci-dessus ne semblent pas préjudiciables à la prédiction des ondes de compression.

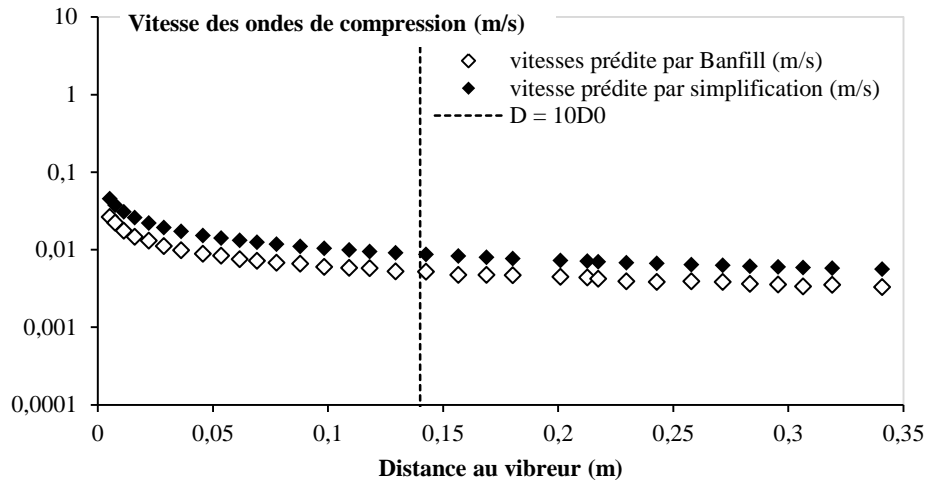


Figure 4.28. Vitesse de l'onde de compression. Résultats expérimentaux [6] et modèle analytique.

Nous traçons sur la Figure 4.29, la valeur absolue de la différence entre les vitesses des ondes de compression et des ondes de cisaillement. Nous comparons nos modèles simplifiés (4.23.) et (4.24.) développés précédemment avec les équations proposées par Banfill [6]. Cette figure montre que la prédiction du rayon d'action émise au sein de [6] est supérieure à la frontière formée par la délimitation des ondes de vibration. Parallèlement, le modèle classique proposant $D = 10.D_0$ minore la zone d'efficacité du vibreur pour le matériau étudié.

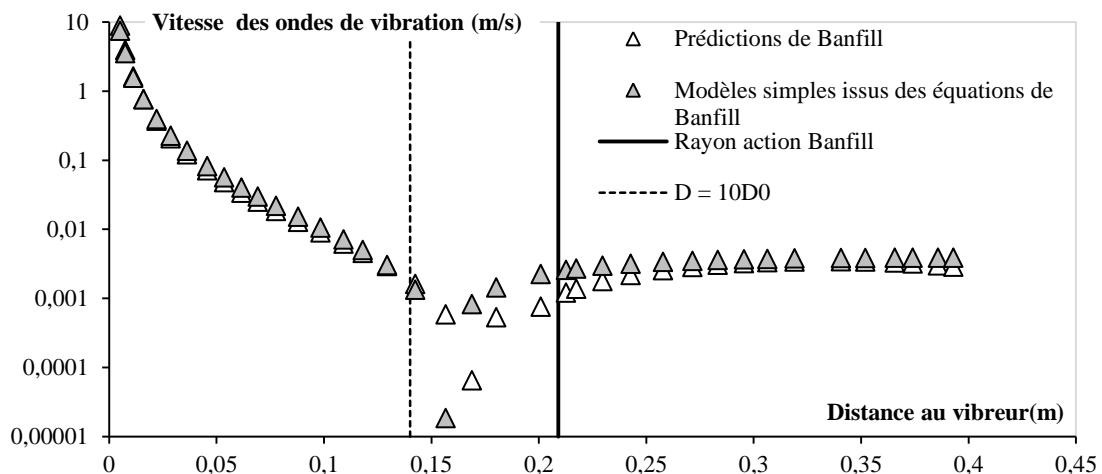


Figure 4.29. Différence entre les vitesses de cisaillement et compression. Modèle analytique simplifié et résultats expérimentaux de Banfill [6].

De plus, nous confrontons notre modèle analytique de la formule (4.18.) $D \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k.f.a}{R_0}}$, avec les paramètres expérimentaux présentés dans [6]. Nous obtenons une prédiction du diamètre d'action égale à 11 cm qui est quatre fois plus faible que la distance proposée par Banfill égale à 42 cm. En

revanche, les valeurs des propriétés rhéologiques du béton testé ($\tau_0 = 570$ Pa et $\mu_p = 15$ Pa.s) et les paramètres mécaniques du vibreur utilisés par Banfill semblent être en décalage par rapport aux valeurs traditionnelles.

4.4.2 Singularité des bétons visqueux

Au cours de l'étude du rayon d'action des aiguilles vibrantes plongées au sein des matériaux visqueux, nous avons mis en évidence l'apparition d'une singularité : une limitation de l'efficacité des pervibrateurs en contradiction avec notre analyse mécanique qui décrit correctement les systèmes peu visqueux. Nous tentons d'expliquer l'origine de cette particularité à partir de mesures complémentaires de la vitesse de rotation du matériel vibrant plongé dans des matériaux cimentaires.

4.4.2.1 Migration locale du matériau

Afin d'étudier l'hypothèse selon laquelle la vitesse de rotation des aiguilles vibrantes diminue lorsqu'elles sont plongées dans un matériau cimentaire, nous avons mis au point un dispositif de mesure comparative de la fréquence et de l'amplitude en cours de vibration. Pour y parvenir, un crayon est fixé perpendiculairement à la surface du bâti vibrant à 20 cm de sa pointe comme illustré sur la Figure 4.30.



Figure 4.30. Dispositif de mesure de l'amplitude et de la fréquence d'une aiguille vibrante.

Ainsi, via un support adapté, nous obtenons sur la Figure 4.31 la trajectoire de l'aiguille vibrante. Bien que ce système se rapproche de celui présenté dans les paragraphes précédents pour caractériser les paramètres de nos vibreurs, il ne permet pas de mesurer précisément l'amplitude et la fréquence mais de fournir uniquement des données comparatives. L'épaisseur de la sinusoïde correspond à l'amplitude et l'espacement entre les maximas et est proportionnelle à la fréquence. Ces mesures sont établies avec l'aiguille vibrante IREN 57 plongée dans une pâte de ciment de ratio E/C = 0,45 et dans des bétons très visqueux de consistances S4 et S5. L'ensemble de ces résultats sont disponibles dans l'Annexe 4.4.

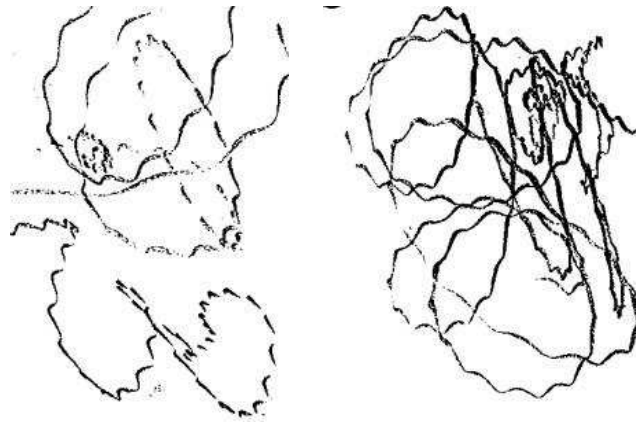


Figure 4.31. Trajectoires contre la surface d'IREN 57 dans une pâte de ciment $E/C=0.45$ avec une rotation égale à 35 Hz. Vibration dans l'air (gauche). Vibration dans le matériau (droite).

Nous traçons sur la Figure 4.32 la variation de la fréquence, entre vibration dans l'air et dans le matériau, de l'aiguille vibrante IREN 57 en fonction de matériaux de consistances variées. Dans le cas d'une pâte de ciment de rapport $E/C = 0,45$ nous ne constatons qu'une très faible diminution de la fréquence de l'ordre de 3%. Tandis que pour des bétons très visqueux de classe S4 et S5, nous observons une chute moyenne d'environ 16 %.

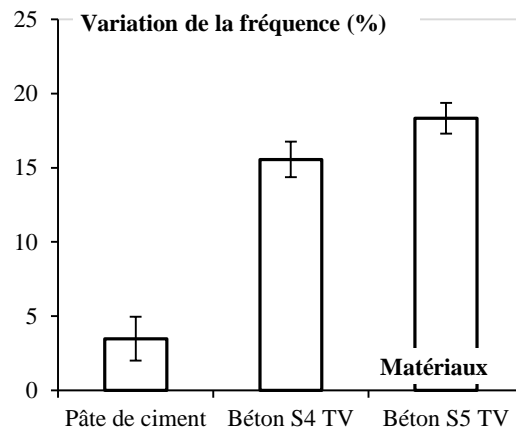


Figure 4.32. Variation la fréquence de rotation d'une aiguille vibrante par rapport à une vibration dans l'air.

Nous traçons sur la Figure 4.33 la variation de l'amplitude, entre vibration dans l'air et dans le matériau, de l'aiguille vibrante IREN 57 en fonction de matériaux de consistances variées.

Dans le cas d'une pâte de ciment de rapport $E/C = 0,45$ nous ne constatons qu'une faible diminution de l'amplitude de l'ordre de 3% comme la fréquence. Tandis que pour des bétons très visqueux de classe S5, nous observons une chute de l'amplitude de l'ordre de 7 %.

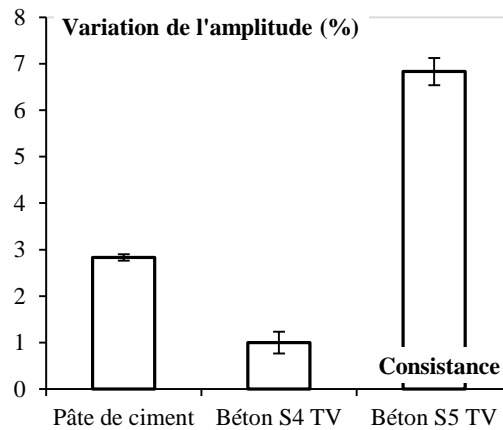


Figure 4.33. Variation de l'amplitude d'une aiguille vibrante par rapport à une vibration dans l'air.

Par conséquent, nos résultats montrent que, dans le cas des pâtes de ciment, les aiguilles vibrantes conservent leurs caractéristiques de vibration aussi bien dans le matériau que dans l'air. La rhéologie de ces matériaux ne semble pas affecter dans ces cas le comportement mécanique des vibreurs qui génèrent une liquéfaction égale à celle attendue par notre prédiction analytique du rayon d'action. En revanche, dans le cas des bétons à forte viscosité, nos résultats montrent une atténuation de la vitesse de rotation du vibreur proche de celle proposée par Kolek. [10]. Il semblerait que la forte viscosité de ces matériaux empêche les aiguilles vibrantes de maintenir leur vitesse de consigne ayant pour conséquence une efficacité plus faible qu'avec une utilisation au sein des bétons ordinaires. Afin d'obtenir un meilleur rendement des vibreurs avec cette configuration d'utilisation, il semble nécessaire de mettre au point des vibreurs plus efficaces que ceux disponibles actuellement dans le commerce.

Nous choisissons d'intégrer ces atténuations au sein de notre prédiction analytique du diamètre d'action à l'aide d'un coefficient réducteur β . A partir de l'hypothèse d'une aiguille vibrante très efficace, *i.e.* conservant les mêmes propriétés mécaniques à la fois dans l'air ou bien plongée dans un matériau cimentaire, β serait égal à 1. A *contrario*, si un vibreur perd totalement son efficacité dès qu'il est inséré dans un béton, alors β tend vers 0. Nos résultats précédents montrent une diminution maximale d'environ 20% de la fréquence et de 7% pour l'amplitude. Ainsi, nous définissons β comme le produit de ces atténuations tel que :

$$\beta \approx (1 - 0.80) \cdot (1 - 0.7) \approx 0.74 \quad (4.25.)$$

Nous intégrons cette atténuation d'efficacité au sein de notre prédiction du rayon d'action et nous définissons un diamètre d'action corrigé D' tel que

$$D' \approx D_0 \sqrt{\beta \cdot \frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k \cdot f \cdot a}{R_0}} \quad (4.26.)$$

Soit,

$$D' \approx D\sqrt{\beta} \Rightarrow D' \approx 0.85.D \quad (4.27.)$$

Nous traçons sur la Figure 4.34. le diamètre d'action corrigé, D' , en fonction du diamètre d'action mesuré. Nous appliquons cette correction du diamètre d'action prédit uniquement pour des bétons visqueux puisque nos résultats ont montré une corrélation de qualité pour l'utilisation de pâtes de ciment et de bétons ordinaires et aussi une faible atténuation des propriétés du vibreur dans ces configurations.

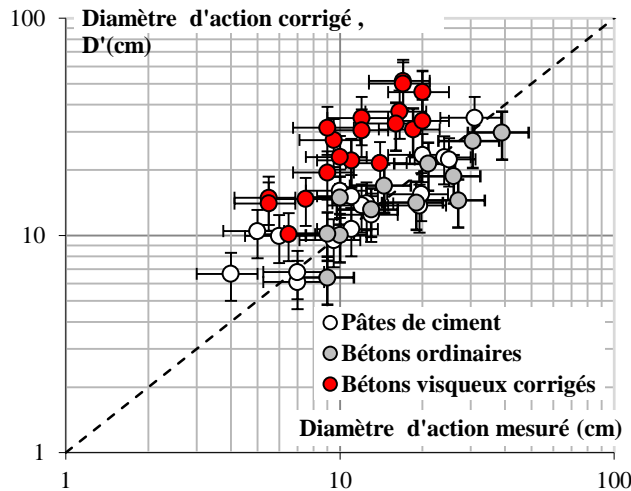


Figure 4.34. Diamètre d'action calculé, D' , à partir de (4.27) en fonction du diamètre d'action mesuré pour des pâtes de ciment, des bétons ordinaires et des bétons visqueux avec l'AVF.

Cette figure montre que l'équation (4.27.) prédit plus précisément le diamètre d'action d'une aiguille vibrante. En revanche, l'efficacité des vibreurs traditionnels ne semble toujours pas suffisante pour atteindre le diamètre d'action attendu avec la mise en œuvre de béton à forte viscosité. Il serait donc intéressant de compléter tous nos essais initiaux par des mesures de diminution de vitesse de rotation des vibreurs. Cependant, comme nous n'avons pas systématiquement mis en place le dispositif expérimental de variations d'amplitude et de fréquence, nous conserverons dans la suite de ce chapitre l'utilisation de la prédiction initiale du diamètre d'action noté D (cf. eq. 4.19).

4.4.3 Effet de la puissance des aiguilles vibrantes

Dans un premier temps nous exprimons la capacité de dissipation d'un matériau cimentaire soumis à une vibration interne. Dans un second temps, nous comparons cette « puissance interne » avec celle fournie par les aiguilles vibrantes du commerce.

4.4.3.1 Puissance dissipative du matériau vibré

Un matériau cimentaire est capable de dissiper une puissance, P_D , en fonction de ces caractéristiques rhéologiques. Pour quantifier ce phénomène, nous intégrons :

$$P_D = \int_{V_V} (\tau \cdot \dot{\gamma}) dV_V \quad (4.28.)$$

En considérant des valeurs moyennes du seuil, (τ) et du gradient de vitesse, ($\dot{\gamma}$) nous obtenons :

$$P_D \simeq \tau \cdot \dot{\gamma} \cdot V_V \quad (4.29.)$$

De plus, nous modélisons le comportement du béton à partir d'un modèle de Bingham, tel que $\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$. De même, nous évaluons le gradient de vitesse d'écoulement moyen du matériau au sein du rayon d'action de l'aiguille à partir de notre modélisation précédente $\dot{\gamma} = kfa/(2R_0)$. Enfin, nous supposons que le volume concerné est cylindrique et correspond à $\pi \cdot D^2 \cdot H_V$. A partir de ces simplifications, nous obtenons la relation suivante :

$$P_D \simeq \left[\tau_0 \left(\frac{kfa}{2R_0} \right) + \mu_p \cdot \left(\frac{kfa}{2R_0} \right)^2 \right] \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H_V \quad (4.30.)$$

Afin de simplifier l'équation précédente, nous effectuons une analyse dimensionnelle de chaque terme. Ainsi, le seuil d'un béton est de l'ordre de 10^3 Pa ; le coefficient k est égal à 50 ; la fréquence de rotation d'une aiguille vibrante est classiquement égale à 200 Hz avec une amplitude variant entre 2 et 4 mm pour un diamètre compris entre 30 et 50 mm et la viscosité des bétons ordinaires est inférieure à 100 Pa.s. Ces ordres de grandeurs montrent que $\tau_0 \left(\frac{kfa}{R_0} \right) \ll \mu_p \cdot \left(\frac{kfa}{R_0} \right)^2$. Enfin, nous savons que

$D \sim D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{kfa}{R_0}}$. Par conséquent, l'équation précédente devient :

$$P_D \simeq \frac{\mu_p^2 \cdot k^3 \cdot f^3 \cdot a^3}{2 \cdot \tau_0 \cdot D_0} \cdot \pi \cdot H_V \quad (4.31.)$$

La dimension H_V correspond à la hauteur du matériau cimentaire soumis à la vibration d'une aiguille. Nous supposons que cette dernière est égale à la hauteur immergée de l'aiguille vibrante.

Enfin, nous prenons en compte une diminution linéaire de l'amplitude de l'aiguille le long du bâti vibrant avec une valeur maximale au niveau de la pointe du vibreur et une valeur nulle à l'autre extrémité. Nous choisissons, une valeur moyenne de l'amplitude maximale. Ainsi, nous remplaçons « a » par « $a_M = a/2$ » et nous obtenons :

$$P_D \simeq \frac{\mu_p^2 \cdot k^3 \cdot f^3 \cdot a^3}{16 \cdot \tau_0 \cdot D_0} \cdot \pi \cdot H_V \quad (4.32.)$$

4.4.3.2 Puissance active du vibreur

Nous cherchons une expression de la puissance mécanique délivrée par les aiguilles vibrantes en fonction de leurs caractéristiques. Classiquement, la puissance d'un corps en rotation s'exprime en fonction du couple de la masse tournante multiplié par sa vitesse de rotation. Les industriels spécialistes de la vibration ne fournissent classiquement pas le couple de leurs aiguilles mais leur force centrifuge. Donc, nous cherchons une expression de la puissance mécanique, P_M , en fonction de la force centrifuge.

En supposant que la vibration est homogène sur toute la hauteur de l'aiguille, nous obtenons :

$$P_M \approx F_C \cdot \dot{\gamma} \cdot a \quad (4.33.)$$

Comme précédemment, nous remplaçons le terme de gradient de vitesse par kfa/R_0 . Nous obtenons la relation suivante :

$$P_M \approx F_C \cdot \left(\frac{kfa}{R_0} \right) \cdot a \quad (4.34.)$$

4.4.3.3 Relation entre les puissances

Nous traçons, sur la Figure 4.35, le ratio adimensionné entre la puissance active du vibreur et la puissance dissipée par le matériau en fonction de la fréquence d'excitation. Le coefficient k est toujours égal à 50. La force centrifuge est calculée pour chaque fréquence.

Nos résultats montrent que dans le cas des pâtes de ciment, l'aiguille possède une puissance systématiquement supérieure à la puissance que les échantillons peuvent dissiper. En effet, P_M/P_D est supérieur à 1.

Dans le cas des bétons ordinaires, notre vibreur a une puissance inférieure à celle des matériaux quelque soit la fréquence appliquée. Enfin, dans le cas des bétons visqueux le résultat précédent s'accroît davantage.

De plus, nos résultats de P_M sont de l'ordre de 0,1 à 1 kW tandis les vibreurs du commerce ont une puissance électrique de l'ordre 0,5 à 1,2 kW. Ainsi, notre approche dimensionnelle semble bien adaptée. Par conséquent, il semblerait que les aiguilles vibrantes utilisées dans la pratique ne soient pas capables de liquéfier suffisamment le matériau. Une augmentation de leur puissance pourrait améliorer leur efficacité.

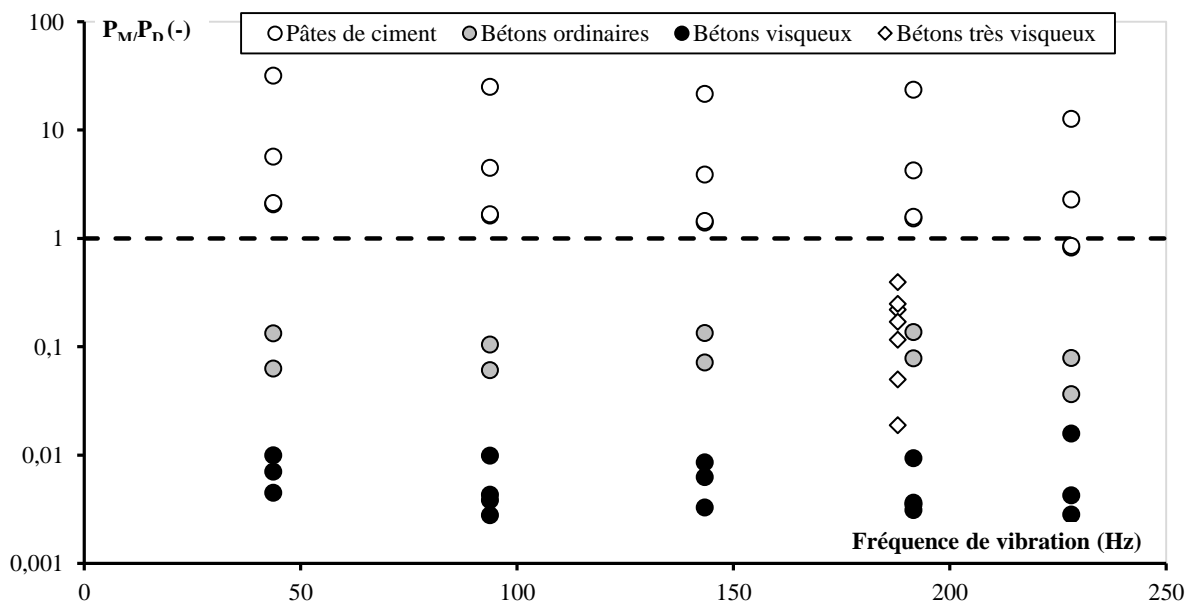


Figure 4.35. Ratio adimensionné entre la puissance active des vibreurs et dissipative des matériaux en fonction de la fréquence des aiguilles vibrantes.

4.4.4 Perspective d'évolution

Les paragraphes précédents mettent en évidence plusieurs origines phénoménologiques de la limitation du rayon d'action des pervibrateurs. Dans le but de dépasser les bornes évoquées préalablement, la société Wackerneuson a mis à notre disposition une aiguille vibrante dont la conception diffère fortement des vibreurs traditionnels utilisés sur les chantiers de construction en Europe de l'Ouest. La principale différence entre ce type de matériel et les aiguilles électriques/électroniques consiste en une séparation en deux éléments entre le moteur et le bâti vibrant. La source de la vibration est générée par un moteur électrique qui se branche sur le réseau d'alimentation électrique. Ce boîtier externe possède une connexion mécanique de l'aiguille vibrante. En effet, la gaine du vibreur est dépourvue d'élément électrique. Elle est composée essentiellement d'une tige d'acier rotative dont l'une des extrémités est fixée au moteur et l'autre possède le balourd du vibreur. De plus, cette masse excentrée possède la même longueur que la tête du vibreur tandis que celui des aiguilles électriques/électroniques est limité à quelques centimètres et ne constitue pas toute la hauteur du bâti vibrant. Par conséquent, ce type de matériel assure une amplitude de vibration plus homogène par sa conception spécifique. La Figure 4.36 présente le moteur électrique dénommé M 3000 avec une aiguille vibrante de diamètre égal à 45 mm, ayant pour référence H45. Enfin, le bâti vibrant a une section rectangulaire contrairement à la conception conique des aiguilles vibrantes traditionnelles.



Figure 4.36. Moteur électrique M 3000 (gauche). Moteur + aiguille vibrante H45 (milieu). Tête d'aiguille vibrante H45 (droite).

A partir du dispositif de caractérisation de la trajectoire dans l'air des aiguilles vibrantes présentée dans les paragraphes précédents, nous avons mesuré l'amplitude de l'H45. Celle-ci est égale à 3,5 mm (Cf. Annexe 4.5). Sa fréquence de vibration est fixe et supposée égale à 200 Hz comme indiqué par la notice du constructeur. Parallèlement, une étude comparative de l'évolution de sa vitesse de rotation dans l'air et dans des bétons visqueux et fortement visqueux montre une diminution de ces propriétés de l'ordre de 10%. Celle-ci est disponible dans l'Annexe 4.6. Ce résultat montre que ce type de vibreur est moins influencé par la rhéologie du matériau dans lequel il est plongé que les aiguilles vibrantes électriques.

Nous testons l'efficacité de ce vibreur à partir de la mesure de son diamètre d'action avec l'emploi de bétons visqueux. Nous comparons ces résultats avec notre modèle analytique $D \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k.f.a}{R_0}}$. La valeur du facteur k est conservée à 50. Nous traçons sur la Figure 4.37 le diamètre d'action théorique de l'H45 en fonction du diamètre d'action mesuré pour des matériaux de consistances variées. Nos résultats montrent une efficacité du vibreur égale à la prédiction attendue. Par conséquent, il semblerait que ce type de matériel soit plus efficace que les aiguilles vibrantes traditionnelles de chantier de construction et mieux adapté aux coulages des bétons dont la viscosité est supérieure à 100 Pa.s.

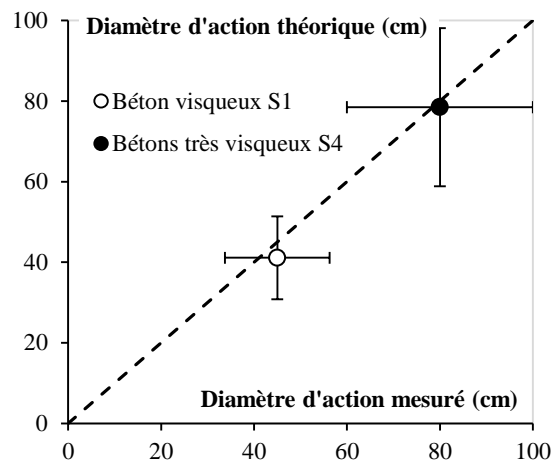


Figure 4.37. Diamètre d'action de l'aiguille vibrante H45 en fonction de consistances variées de bétons.

Finalement, nous traçons sur la Figure 4.38, le ratio adimensionné entre le diamètre d'action mesuré et le diamètre du vibreur en fonction du ratio adimensionné entre les puissances actives et dissipatives. Nous présentons nos résultats pour des configurations viscosité/seuil variées. De plus, nous traçons une droite horizontale de ratio D/D_0 égal à 10, correspondant à celui utilisé dans la pratique. De même, nous traçons, une droite verticale de ratio P_M/P_D égale à 1 correspondant au à la valeur minimale nécessaire pour liquéfier totalement un matériau cimentaire.

Nos résultats montrent que la faible viscosité des pâtes de ciment permet une transmission aisée de la vibration avec le matériel vibrant existant. Dans le cas des bétons, bien que la puissance des vibreurs ne soit pas suffisante pour dépasser leur puissance dissipative, ils fournissent un diamètre d'action de l'ordre de $10D_0$. En revanche, la viscosité des bétons à faible impact environnemental ou à haute performance diminue l'efficacité des aiguilles vibrantes actuelles.

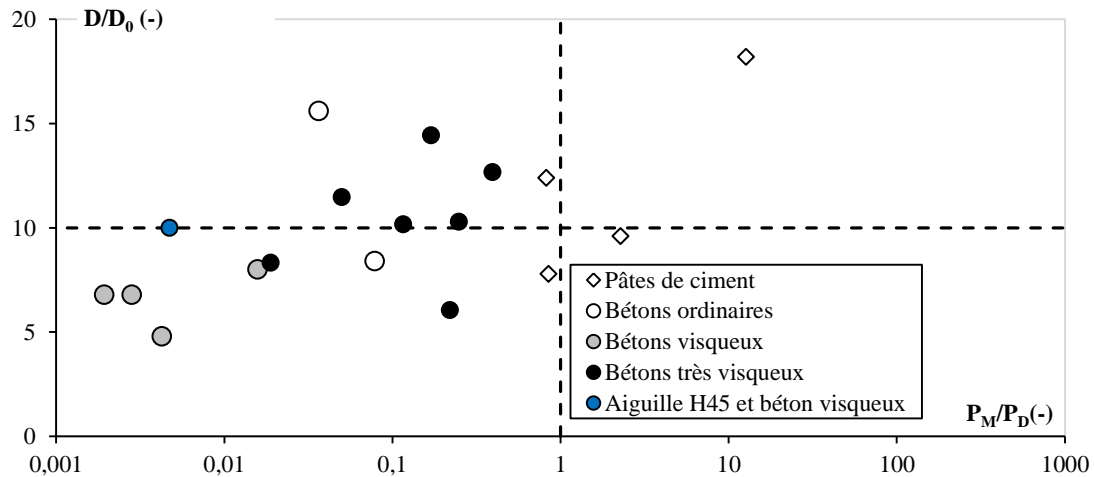


Figure 4.38. Ratio adimensionné du diamètre d'action mesuré par le diamètre du vibreur en fonction du ratio adimensionné des puissances active et dissipée.

4.5 Application du rayon d'action pour des éléments verticaux

4.5.1 Étude en laboratoire

Dans le but d'explorer la robustesse de la prédiction de notre modèle analytique, nous étudions des éléments horizontaux de dimensions constantes avec des bétons de consistances variées. A partir du postula du facteur 10 entre le diamètre d'action et le diamètre du vibreur, nous avons choisi des poutres dont la longueur est nettement supérieure à ce coefficient. De plus, la capacité de coulage en laboratoire limite à 150 litres le volume maximal d'une gâchée fabriquée en une fois. Afin de respecter ces deux critères, nos poutres d'études ont les dimensions suivantes : 1,50m/0,40m/0,20m (longueur/hauteur/largeur).

Parallèlement, ces essais ont pour objectif d'étudier l'influence du ferrailage vis-à-vis de la transmission de la vibration. Ainsi, deux densités d'armatures sont comparées simultanément. En effet, la cage d'armatures test est composée d'une densité dite lâche avec 2HA20 au niveau du lit inférieur et une densité dite dense avec en plus des aciers précédents un second lit avec 2HA14. De plus, les aciers transversaux correspondent à des cadres formés par des aciers HA8 espacés tous les 12 cm ou tous les 6cm respectivement dans la zone lâche et dense. Le plan général de la cage d'armature est disponible dans l'Annexe 4.7.

Nous obtenons la réalisation suivante :



Figure 4.39. Cage d'armature pour l'étude du rayon d'action dans une configuration de type poutre. Ferrailage lâche à gauche et dense à droite.

Préalablement aux essais à l'échelle 1 des poutres, nous pratiquons une étude d'écoulement du béton à travers un ferrailage témoin. Celui-ci se compose de 5HA20 et de 6HA14 espacés tous les 5 cm. Un béton de classe de consistance S3 est versé au dessus des aciers. Cet essai montre une absence de blocage granulaire lors de l'écoulement du matériau à travers les aciers comme présenté par la Figure 4.40.



Figure 4.40. Cage d'armature témoin pour l'étude de la formation d'une voûte granulaire. Béton de consistance S3.

4.5.2 Matériaux et matériels

4.5.2.1 Essais en laboratoire

Pour cette campagne d'essai, nous étudions des bétons de classe de consistance S3 et S4 avec une viscosité ordinaire. Les formulations de ces matériaux sont celles présentées dans le chapitre 3.

De plus, nous utilisons un vibreur de laboratoire de diamètre égal à 33 mm dont la fréquence de rotation est constante à 200 Hz avec une amplitude dans l'air égale à 4,31 mm. Notre prédiction analytique indique un diamètre d'action de cette aiguille vibrante variant entre 30 et 45 cm pour les consistances des bétons testés. Par conséquent, la longueur de la poutre semble être suffisante pour observer au centre une zone vibrée et aux extrémités une zone au repos.

Enfin, l'enrobage de la cage d'armature est assuré par des cales fixées sur les aciers contre les faces coffrantes. La Figure 4.41 montre le système d'enrobage avec la mise en place des aciers dans le coffrage des poutres.

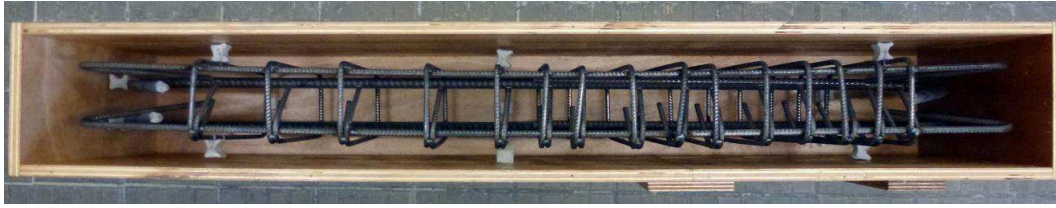


Figure 4.41. Cage d'armature disposée à l'intérieur d'un coffrage bois avec des cales d'enrobages.

4.5.2.2 Essais in situ

Parallèlement aux essais en laboratoire, nous effectuons les mêmes expériences sur deux chantiers d'accueil dont une description est disponible dans l'Annexe 4.8 : La Tour Majunga et la Gare Rosa Parks. Les formulations des bétons *in situ* correspondent à des matériaux de classe de consistance S4 à S5 (Cf. Annexe 4.9).

4.5.3 Protocole

Dans le cas des essais en laboratoire, le béton étudié est fabriqué en une unique gâchée suivant le protocole décrit au sein du Chapitre 2. La consistance de nos formulations nécessite un remplissage manuel en cinq points espacés tous les 25 cm.

Dans le cas des essais *in situ*, les bétons frais sont livrés traditionnellement sur les chantiers avec un camion toupie. Les configurations des sites d'accueil permettent un remplissage des coffrages, soit directement à la sortie du camion, soit à partir d'une benne à béton comme présenté dans le chapitre 2.

De plus, nous vérifions la classe de consistance du matériau à partir d'un essai d'affaissement au cône d'Abrams suivant la norme NF EN 12350-2 [9]. Par ailleurs, chaque échantillon est vibré simplement en son centre durant 15s. La durée de vibration correspond au temps total durant lequel l'aiguille est plongée dans le béton. Enfin, dans le cas de nos essais *in situ*, nous utilisons un vibreur de 25 mm ou de 50 mm de diamètre respectivement sur le chantier de la gare Rosa Parks et de la Tour Majunga. (Cf. Tableau 4.8). De plus, nous estimons que la viscosité des bétons utilisés sur le chantier de la Gare Rosa Parks ont une viscosité ordinaire (*i.e.* inférieur à 100 Pa.s) tandis que ceux de la Tour Majunga possèdent une viscosité élevée (*i.e.* supérieure à 100 Pa.s).

Lieux	Laboratoire			Rosa Parks		Tour Majunga	
Consistance des bétons	S3	S4	S3	S4	S5	S5	S5
Diamètre du vibreur (mm)	32	32	32	25	25	50	50
Viscosité mesurée ou estimée (Pa.s)	62	62	62	50	50	125	125

Tableau 4.8. Classe de consistance des bétons pour les essais diamètres d'action en laboratoire et in situ.

Enfin, afin de déterminer l'influence des aciers, nous réalisons avec le même protocole, des poutres sans cage d'armature.

4.5.4 Résultats expérimentaux et analyse

4.5.4.1 Résultats expérimentaux

Nous traçons sur la Figure 4.42 le diamètre d'action calculé en fonction du diamètre d'action mesuré pour des vibreurs de caractéristiques variées et des bétons de consistance équivalente. Nous comparons des essais effectués en laboratoire et *in situ* dans le cas de poutre en béton armé. Le trait en pointillé correspond à l'égalité entre le diamètre prédit et le diamètre calculé. Le trait plein identifie la longueur de nos poutres d'étude.

Tout d'abord, nos essais, avec un vibreur de 25 mm de diamètre, effectués sur le chantier de la gare Rosa Parks, montrent que le diamètre d'action calculé par notre modèle analytique,

$$D_{\text{action}} \approx D_0 \sqrt{\frac{\mu_p}{\tau_0} \cdot \frac{k.f.a}{R_0}}$$

est semblable au diamètre d'action mesuré.

Deuxièmement, dans le cas des essais en laboratoire et sur le site de la Tour Majunga avec respectivement des vibreurs de diamètre égal à 32 mm et 50 mm, le diamètre d'action mesuré est fortement supérieur à la prédiction attendue. En effet, l'intégralité de l'échantillon s'écoule sous vibration.

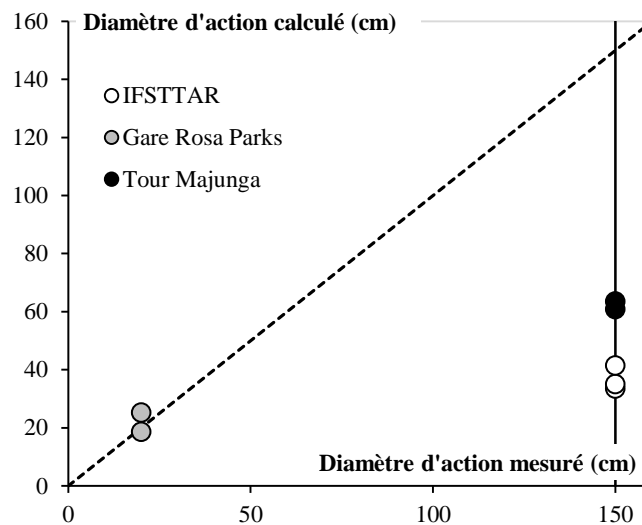


Figure 4.42. Diamètre d'action calculé des vibreurs en fonction du diamètre d'action mesuré. Comparaison d'essais en laboratoire et *in situ* avec des poutres en béton armé de longueur 1,5m.

Enfin, nous pouvons noter que, dans le cas des poutres non armées, nous obtenons des mesures de diamètre d'action identiques que celles des échantillons avec une cage d'armature.

4.5.4.2 Analyse

Dans un premier temps, à partir de nos résultats expérimentaux, il semblerait que la présence des aciers de structure ne modifie pas la transmission de la vibration du béton.

Parallèlement, dans le cas d'utilisation de coffrages verticaux, les diamètres d'action mesurés au-delà de notre prédiction analytique montrent qu'une transmission et/ou une réverbération de la vibration par les parois des coffrages s'établit. Deux configurations de mise en œuvre se distinguent.

Tout d'abord, nous supposons que lorsque le diamètre d'action théorique est inférieur à la largeur de la poutre, nous pouvons conserver notre approche analytique. Nous sommes dans une configuration de milieu semi-infini horizontal. Nous développons cette analyse dans le paragraphe 4.5.5.3.

Cependant, lorsque le diamètre d'action théorique du vibreur est supérieur à la largeur de l'élément de structure, alors l'efficacité réelle de l'aiguille vibrante ne peut-être prédite avec notre modèle analytique.

Par conséquent, afin de déterminer une zone de béton non affectée par la vibration, nous décidons de mesurer le diamètre d'action de vibreur avec des poutres de grandes dimensions, de longueur égale à 3 m. De plus, afin de prendre en compte une réverbération et/ou une transmission des ondes de vibration par les faces coffrantes, nous comparons deux largeurs de poutres : 0,20 et 0,40 m. La hauteur des échantillons est égale à 0,50 m. (Cf. Figure 4.43).

Cependant, les capacités de fabrication en laboratoire ne pouvant pas fournir les volumes nécessaires à ces essais, cette campagne complémentaire a été exclusivement réalisée au sein de chantiers de construction.

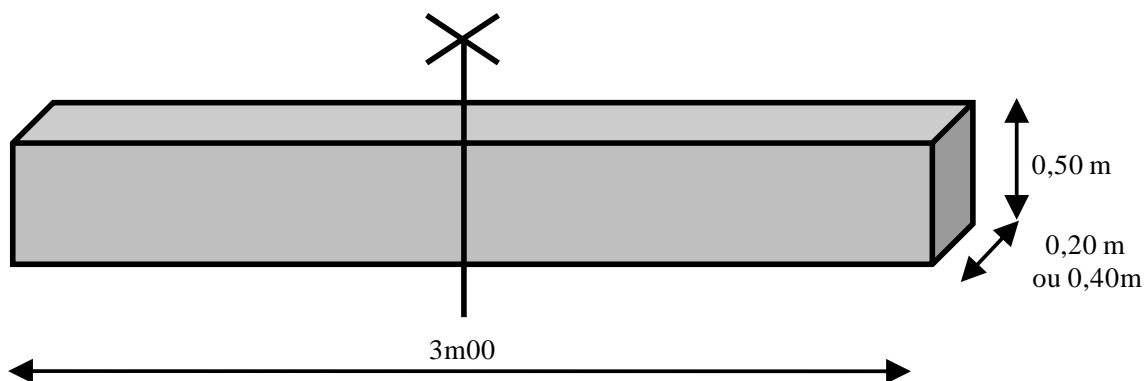


Figure 4.43. Schéma des poutres à l'échelle 1 pour les essais de mesure de rayon d'action.

4.5.5 Étude *in situ* des poutres à l'échelle 1

4.5.5.1 Présentation des essais

Nous réalisons ces essais au sein de deux autres chantiers d'accueil : Le recouvrement de voies SNCF, groupe EIFFAGE et Le Coruscant II, entreprise PETIT du groupe VINCI. Nous présentons ces sites et les coffrages réalisés spécialement pour nos essais dans l'Annexe 4.8. Les formulations de ces bétons ont une consistance S3 à S4. (Cf Annexe 4.9).

Les vibreurs disponibles sur ces chantiers ont un diamètre de 50 mm à 60 mm respectivement pour la construction du Coruscant II et du recouvrement des voies SNCF. De plus, l'aiguille vibrante est plongée uniquement au centre des échantillons pendant une durée de 30s. Enfin, comme avec nos essais de vibration en configuration de type dalle, nous disposons des marqueurs à la surface du béton afin de déterminer le diamètre d'action du vibreur.

Parallèlement, au sein du chantier de la Tour Majunga, nous assistons à deux coulages d'un linteau de grandes dimensions : 3,70 m/1,00 m/0,45 m (Longueur/Hauteur/Largeur). Contrairement aux autres échantillons, la mise en œuvre de ces éléments s'effectue selon les règles traditionnelles de mise en œuvre. A partir de simples observations visuelles, nous estimons le diamètre d'action du vibreur.

4.5.5.2 Résultats

Nous traçons sur la Figure 4.44 le diamètre d'action calculé en fonction du diamètre d'action mesuré pour des vibreurs de caractéristiques variées et des bétons de consistance semblable. Nous comparons des essais effectués en laboratoire et *in situ* dans le cas de poutre avec du béton armé. Le trait en pointillé correspond à l'égalité entre le diamètre prédit et le diamètre calculé. Le trait plein fin identifie la longueur des poutres d'étude égale à 1,5 m et le trait plein épais correspond à la longueur des poutres d'étude égale à 3,0 m.

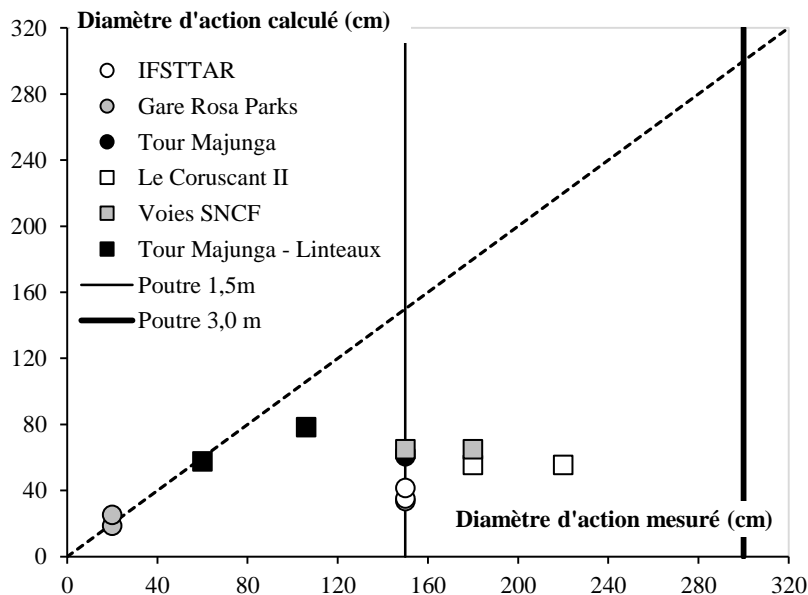


Figure 4.44. Diamètre d'action calculé des vibreurs en fonction du diamètre d'action mesuré. Comparaison d'essais en laboratoire et *in situ* avec des poutres en béton armé de longueur 1,5m et 3,0 m.

Comme précédemment, nos résultats montrent que notre prédiction analytique du diamètre d'action sous-estime la zone d'efficacité du vibreur. Comme précédemment, une transmission et/ou une réverbération de la vibration semblent s'établir contre les parois coffrantes.

Cependant, les dimensions des poutres permettent d'obtenir une zone de béton vibré à proximité de l'aiguille vibrante et une zone de matériau au repos à proximité des extrémités des échantillons.

4.5.5.3 Analyse

A partir de l'ensemble de ces essais nous déterminons deux configurations de vibration.

Premièrement, quand le diamètre d'action théorique du vibreur est inférieur à la largeur de la poutre, $D/L < 1$, notre modèle analytique montre une prédiction équivalente à nos mesures expérimentales. Ainsi, le rayon d'action efficace, D_{EFF} , est inférieur ou égal au rayon d'action prédit. (Cf. Figure 4.45).

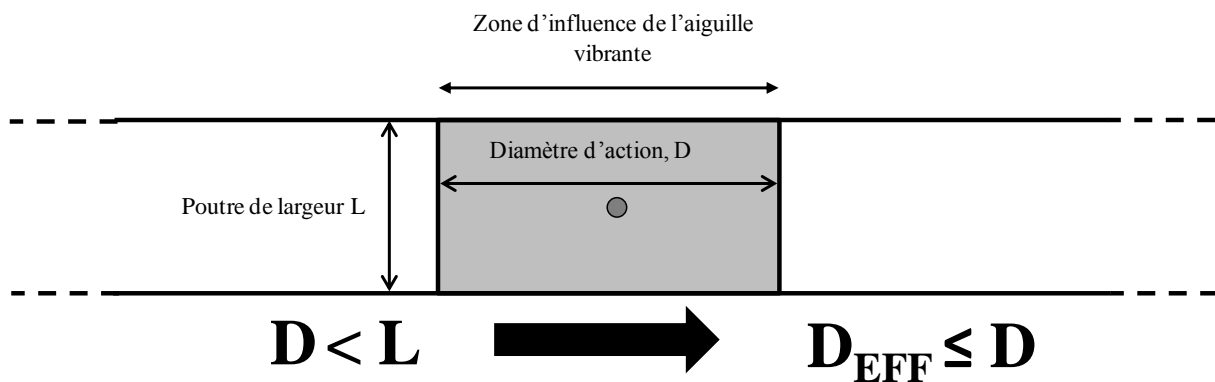


Figure 4.45. Efficacité du vibreur en fonction de la largeur de la poutre. Configuration de type dalle.

Deuxièmement, quand le diamètre d'action théorique du vibreur est supérieur à la largeur de la poutre, $D/L > 1$, notre modèle analytique ne permet plus de prédire correctement l'efficacité du vibreur. Le diamètre d'action efficace est systématiquement supérieur à la prédiction attendue. (Cf. Figure 4.46). Ceci est en accord avec Forsblaad [11].

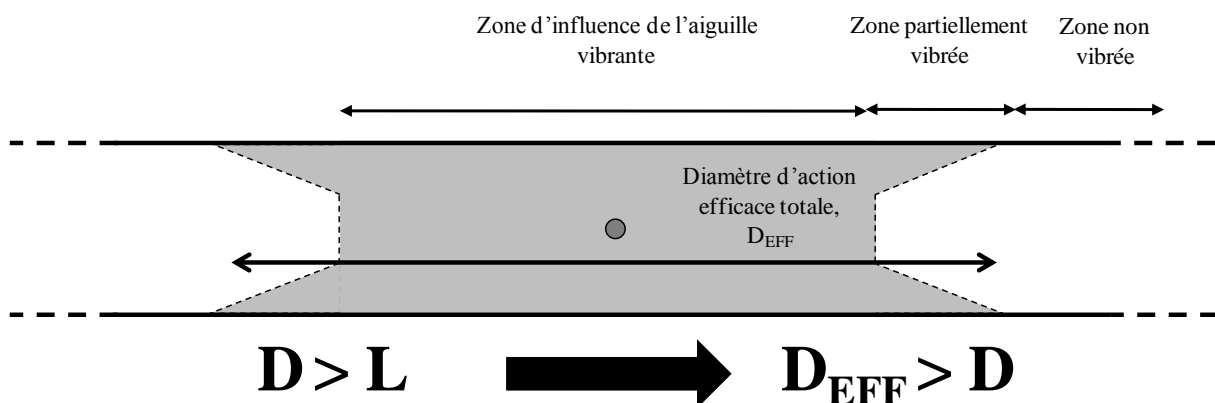


Figure 4.46. Efficacité du vibreur en fonction de la largeur de la poutre. Configuration de type poutre.

Ainsi, nous traçons sur la Figure 4. 47 le ratio adimensionné entre le diamètre efficace et le diamètre théorique d'une aiguille vibrante en fonction du ratio adimensionné entre le rayon théorique et la

largeur de l'élément vibré. Nous comparons nos résultats en configuration de dalle et nos essais en configuration poutre obtenus en laboratoire et *in situ*.

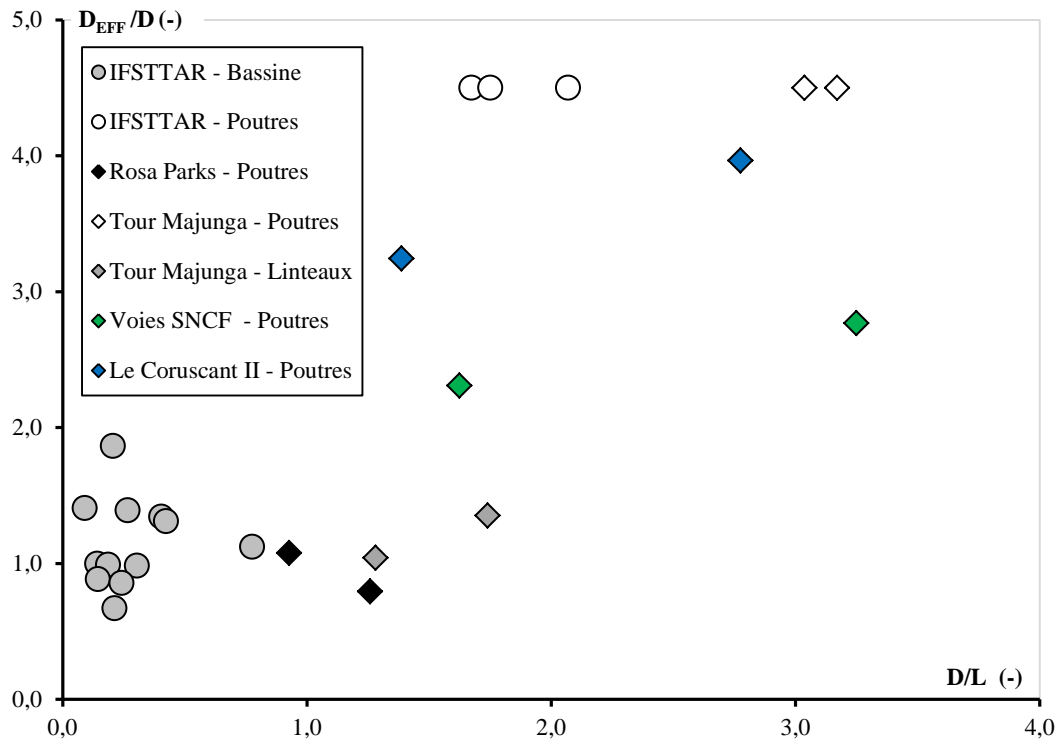


Figure 4. 47. Ratio adimensionné entre le rayon efficace et le rayon théorique d'une aiguille vibrante en fonction du ratio adimensionné entre le rayon théorique et la largeur de l'élément vibré.

A partir de ces résultats, nous pouvons conclure que pour une configuration de type poutre avec une largeur d'élément plus petit que le diamètre d'action du vibreur, la prédiction de l'efficacité du matériel vibrant dépend fortement de la rigidité du coffrage. Une modélisation complexe du phénomène vibratoire semblerait nécessaire pour obtenir une prédiction de qualité.

4.6 Conclusions du chapitre

Dans un premier temps, un modèle analytique simple de prédiction du rayon d'action d'une aiguille vibrante est présenté, dépendant à la fois de la rhéologie du matériau testé et des propriétés vibratoires du matériel. Celui-ci apparaît efficace avec l'emploi des bétons ordinaires et de vibreurs traditionnels. En revanche, il montre une divergence pour des bétons à forte viscosité.

De plus, à partir de nos résultats, il s'avère que les spécialistes de la conception des vibreurs conservent un ratio amplitude/Diamètre (a/D_0) constant. Celui-ci varie entre chaque industriel puisqu'il semble dépendre uniquement des matériaux mis en œuvre pour la fabrication des aiguilles vibrantes. Par conséquent, si le paramètre a/D_0 est maintenu constant par les constructeurs, l'unique

possibilité pour accroître le rayon d'action d'une aiguille vibrante consiste à augmenter la fréquence d'excitation de celle-ci.

Parallèlement, la puissance des vibreurs ne semblent pas être suffisante pour liquéfier totalement les bétons. Nous avons mis en évidence que la fréquence et l'amplitude des aiguilles diminue une fois plongés dans ces matériaux. Une amélioration technologique pourrait contrer cette singularité avec la conception d'aiguille vibrante plus efficace comme la technologie du vibreur H45.

Enfin, lors de la vibration d'élément vertical semi-infini, la rigidité des coffrages semble influencer fortement la transmission et/ou la réverbération des ondes de vibration. Ce phénomène nécessite une modélisation plus complexe du diamètre d'action. Par ailleurs, nos résultats suggèrent que la présence du ferrailage n'influence pas la propagation de la vibration.

Dans la pratique, pour vibrer correctement un béton, deux composantes sont essentielles. Le premier correspond à l'espacement entre les zones d'action du vibreur tandis que le second constitue la durée d'enfoncement entre les points d'applications. Nous nous focalisons, dans le prochain chapitre, sur ce second paramètre.

4.7 Références du chapitre

- [1] ACI Committee 309, "ACI 309R-05: Guide for Consolidation of Concrete," 2005.
- [2] Atlas Copco. (2012) Guide to External Vibration. [Online]. <http://www.podshop.se/atlascopco/>
- [3] Paclite Equipment. (2012) Technical data. [Online]. http://www.paclite-equip.com/pdf/SAV/aiguilles%20Vibrantes/VX_BOOSTER_TD.pdf
- [4] J-M. Geoffray, "Béton Hydraulique - Mise en Oeuvre," Les Techniques de l'Ingénieur, C 2229, 2008.
- [5] Atlas Copco. (2012) Concrete Vibration Equipment. [Online]. <http://www.podshop.se/atlascopco/>
- [6] P.F.G. Banfill, M.A.O.M. Teixeira, and R.J.M. Craik, "Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 9, pp. 932-941, 2011.
- [7] Lars Forssblad, "Investigations of Internal Vibration of Concrete," *Civil Engineering and Building Construction, Acta Polytechnica Scandinavica*, no. 29, p. 32, 1965a.
- [8] S.S. Chen, M.W. Wambsganss, and J.A. Jendrzejczyk, "Added Mass and Damping of a Vibrating Rod in Confined Viscous Fluids," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, pp. 325–329, 1976.
- [9] AFNOR, Norme Européenne, *NF EN 12350-2 Essai pour béton frais - Essai d'affaissement.*, 1999.
- [10] J Kolek, "Research on the Vibration of Fresh Concrete," in *Reports, Conference on Vibrations—Compaction Techniques*, Julius Hoban, Budapest, 1963.
- [11] Lars Forssblad, "Investigations of Internal Vibration of Concrete," *Civil Engineering and Building Construction, Acta Polytechnica Scandinavica*, no. 29, p. 32, 1965a.

Chapitre 5

**Quelle est la durée idéale de
vibration d'un béton ?**

Chapitre 5

Quelle est la durée idéale de vibration d'un béton ?

A partir du chapitre 1, nous connaissons les classes de consistance de matériau pour lesquelles les propriétés tendent à diminuer en l'absence de vibration. De plus, suite aux travaux présentés précédemment, nous pouvons désormais prédire le volume de matériau affecté par la vibration. Afin d'assurer une vibration « de qualité » il est nécessaire de déterminer le temps minimal pour assurer la mise en œuvre du matériau dans le coffrage et le temps maximal pour éviter l'apparition d'une ségrégation.

Ainsi, dans un premier temps, nous réalisons une approche dimensionnelle des phénomènes observés. Puis, dans un second temps, nous comparons nos résultats à une étude d'analyse de vidéos numériques de remplissage de coffrage composé d'une paroi transparente. Enfin, nous étudions l'apparition de la ségrégation en fonction de la durée d'application de la vibration.

5.1 Influence de la durée de vibration

5.1.1 Approche dimensionnelle

De récents travaux [1,2] ont mis en évidence les capacités de prédiction numérique de remplissage d'un coffrage pour un béton à travers des cages d'armature de dimensions variées. Cependant, ils ne considèrent l'écoulement du matériau qu'uniquement sous l'effet de la gravité. De plus, à partir de nos études macroscopiques de l'aspect des parements du chapitre 2, nous avons montré que, sans application d'une pervibration, il existe des cavités de surface de dimensions millimétriques à centimétriques. En effet, les paramètres rhéologiques du matériau conditionnent la taille de ces défauts apparents avec sans doute une influence du diamètre maximal des granulats.

Par conséquent, nous décidons d'étudier, dans un premier temps, la durée nécessaire pour qu'un béton se compacte lorsqu'il est soumis à une pervibration.

5.1.1.1 Temps caractéristique de compaction

A partir d'une approche dimensionnelle, nous pouvons décrire le temps de remplissage, T , d'un coffrage en fonction des propriétés rhéologiques d'un béton comme un ratio viscosité/contrainte tel que :

$$T \approx \frac{\mu_p}{\tau} \quad (5.1.)$$

Toujours d'un point de vue dimensionnel, la contrainte dans le béton équivaut au produit de sa masse volumique, de l'accélération gravitationnelle terrestre et d'une longueur caractéristique de l'écoulement. Afin de prendre en compte les cavités présentes au niveau du parement du matériau avant l'application d'une vibration, nous choisissons comme distance caractéristique le diamètre moyen de ces défauts, noté D_{MOYEN} . Enfin, nous modélisons ce temps de compaction par T_{C1} . Ainsi, le ratio générique (5.1.) devient :

$$T_{C1} \approx \frac{\mu_p}{\rho \cdot g \cdot D_M} \quad (5.2.)$$

De plus, pour un béton traditionnel, nous connaissons les ordres de grandeur des paramètres de cette équation. En effet, sa viscosité est de l'ordre de 10^2 Pa.s, sa masse volumique est de l'ordre de 10^3 kg.m⁻³ et nous savons, d'après le chapitre 2 que le diamètre moyen des défauts sans vibration est de taille centimétrique.

Ainsi, la durée nécessaire pour qu'un béton se compacte sous l'effet d'une pervibration serait de l'ordre de 1 s à 10 s. Cependant, cette durée ne permet pas d'obtenir des parements de qualité. En effet, des bulles d'air entraînés de tailles millimétriques restent toujours maintenues à la surface et au cœur du matériau.

Par conséquent, nous définissons un second temps caractéristique afin de décrire la durée nécessaire pour permettre la remontée de l'air entraîné.

5.1.1.2 Temps caractéristique de remontée des bulles

Nous conservons la même approche dimensionnelle exceptée le terme de distance caractéristique de l'écoulement. Nous remplaçons le diamètre moyen des défauts avant vibration par le diamètre des bulles d'air obtenu par analyse d'image dans le chapitre 2. De plus, nous appelons ce second temps T_{C2} . Ainsi, le ratio générique (5.1.) devient :

$$T_{C2} \approx \frac{\mu_p}{\rho \cdot g \cdot D_A} \quad (5.3.)$$

Pour cette équation, l'ordre de grandeur du diamètre moyen des bulles d'air est millimétrique. Donc, en l'absence d'apparition d'une ségrégation, la durée nécessaire d'un béton pour se désaérer sous l'effet d'une vibration interne est de l'ordre de 10 s et 100 s.

Nous confrontons, dans les prochains paragraphes, ces ratios adimensionnés avec nos résultats expérimentaux.

5.1.2 Description du montage expérimental

Pour cette étude, nous avons choisi des coffrages de dimensions réduites afin de s'assurer que le volume du matériau soit complètement soumis à la vibration appliquée. Toutes les faces coffrantes sont en bois excepté une paroi longitudinale composée d'une vitre en plexiglas. (Cf. Figure 5.1).

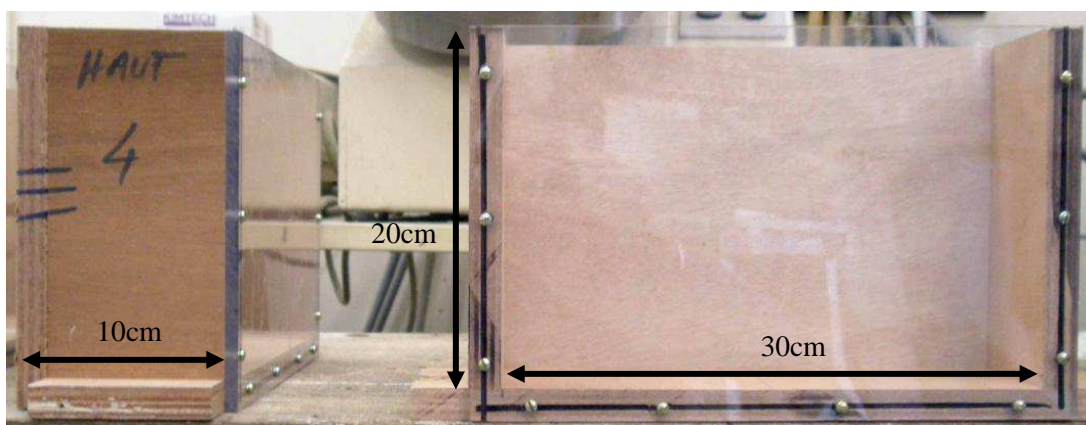


Figure 5.1. Coffrage avec parement transparent.

5.1.2.1 Matériels et matériaux

Pour ces essais, nous utilisons une aiguille vibrante traditionnelle de laboratoire dont les caractéristiques mécaniques dans l'air correspondent à une fréquence fixe de 200 Hz et une amplitude de 1 mm. Nous testons les bétons ordinaires de classe de consistance S1 à auto-plaçant présentés dans le chapitre 2. Enfin, un système d'acquisition numérique par caméra enregistre l'évolution du parement pendant l'application de la vibration.

5.1.2.2 Protocole expérimental

Tout d'abord, nous remplissons le moule dans son intégralité. Puis, nous plongeons l'aiguille vibrante en fonctionnement au centre de l'élément. Nous appliquons des durées de vibrations variées entre cinq secondes et soixante secondes. Ces temps de vibration correspondent à la durée pendant laquelle le vibreur se situe au sein du matériau, descente et remontée du matériel compris.

Ensuite, à partir d'un visionnage des vidéos, nous identifions le temps nécessaire pour que le béton remplisse les cavités de surface (*i.e.* se compacte) ainsi que le temps de remontée des bulles d'air contre le parement transparent.

Nous faisons ainsi l'hypothèse que la durée de remontée des bulles contre le parement est égale à celle à cœur alors que les effets de tension de surface ralentissent probablement les bulles.

5.1.3 Résultats expérimentaux

5.1.3.1 Temps de remplissage

Nous traçons sur la Figure 5.2 le temps de remplissage du coffrage en fonction de la consistance du béton. Ce temps diminue avec l'augmentation de la fluidité du matériau. Il est maximum pour les bétons de classe de consistance S1 avec une durée de l'ordre de 10s et tend vers une valeur proche de 0s pour notre formulation de consistance S4+.

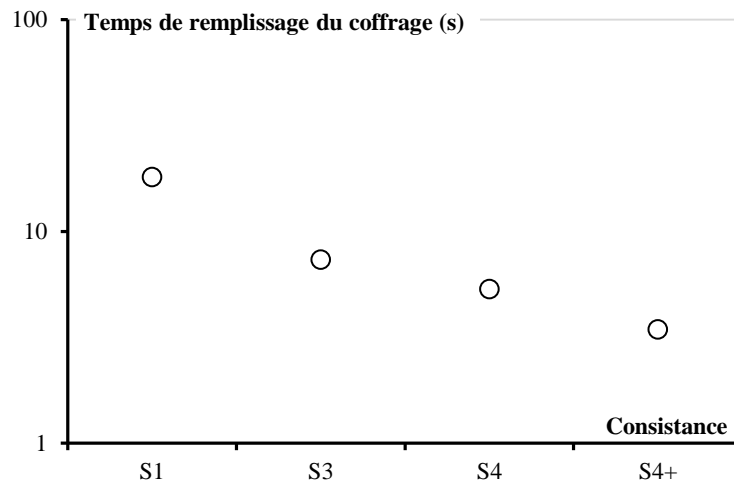


Figure 5.2. Durée de remplissage des coffrages.

5.1.3.2 Temps de remontée des bulles d'air

Nous traçons sur la Figure 5.3 la mesure du temps de remontée des bulles d'air en fonction de la consistance du béton. La durée nécessaire pour que les bulles d'air remontent à la surface est maximale pour les bétons les plus fermes, avec un temps de l'ordre de la centaine de secondes et diminue avec l'accroissement de leur fluidité jusqu'à atteindre quelques dizaines de secondes.

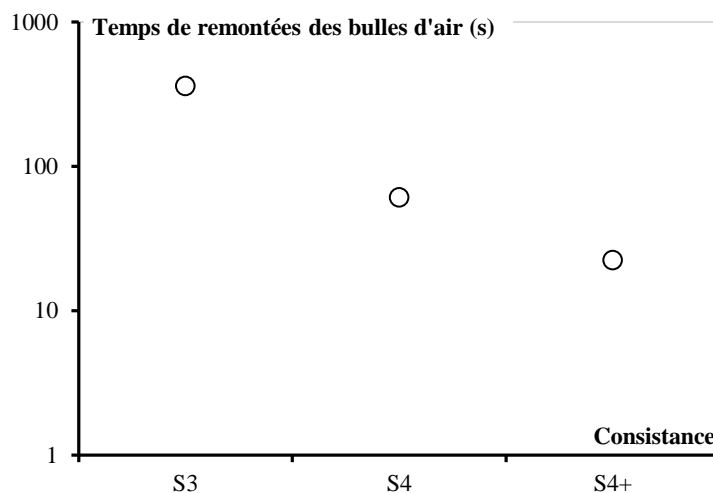


Figure 5.3. Durée de remontées des bulles d'air.

Par ailleurs, nos essais ne permettent pas d'obtenir le temps de remontée des bulles pour la classe de consistance S1. En effet, aucun de ces défauts n'apparaît contre la face transparente après la phase de compactage du béton.

Nos résultats expérimentaux de remplissage des cavités et de remontée des bulles d'air semblent être en accord avec notre approche dimensionnelle. Ainsi, les ratios des temps T_{C1} et T_{C2} peuvent décrire, au premier ordre, nos deux temps caractéristiques.

Nous avons montré que les durées de remontée des bulles d'air à la surface peuvent atteindre plusieurs dizaines de secondes. Ces temps de vibration semblent relativement longs par rapport à la pratique. Ceci, peut être du à la présence de la paroi. Nous étudions, dans le prochain paragraphe, l'apparition de la ségrégation en fonction de la durée d'application de la vibration.

5.1.3.3 Essais in situ

Nous complétons nos résultats d'apparition de la ségrégation et remontée des bulles d'air avec des essais réalisés durant la fabrication d'un radier. Celui-ci possède les dimensions suivantes : 4m/4m/0,40m (Longueur/largeur/épaisseur). La formulation du béton comprend 350 kg/m³ de ciment CEM V avec un ratio E/C=0,43. Un adjuvant Glenium SKY 357 assure une fluidité suffisante pour obtenir une consistance S4. A partir d'observations visuelles, ce béton possède une viscosité élevée. Nous utilisons conjointement deux aiguilles vibrantes de diamètre 36mm et 50 mm.

La durée de vibration fait l'objet de variations (5, 10 et 15 secondes) lors du coulage du plot d'essai dans le but de cerner les durées minimales et maximales permettant respectivement une compaction et une extraction des bulles d'air suffisantes ainsi que la conservation de l'homogénéité du matériau. Enfin après carottage, nous obtenons nos échantillons.

Afin de déterminer la répartition spatiale des bulles, nous avons procédé à un comptage systématique de leur nombre dont la taille est supérieure ou égale à 2 mm à la surface des carottes et des éprouvettes (Cf. Figure 5.4).

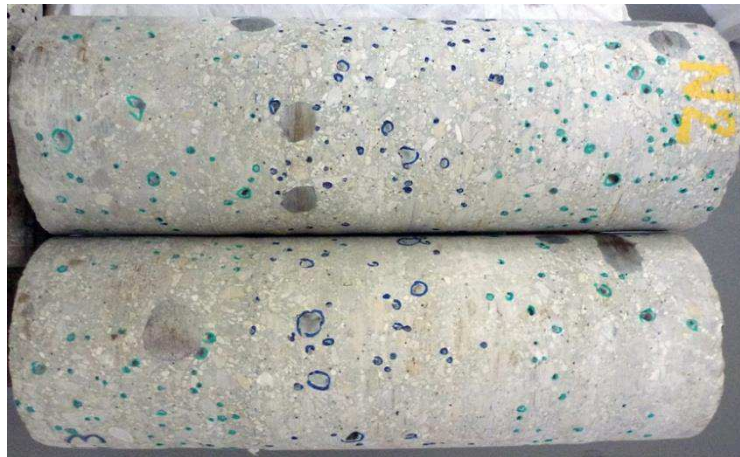


Figure 5.4. Traitement coloré des bulles de surface avant comptage.

De façon à s'affranchir des dimensions variables des échantillons, la quantité de bulles a été ramenée à une valeur surfacique en bulles/m²

Les résultats obtenus sur la Figure 5.5 montrent que la dispersion des mesures est forte. Ainsi, dans les mêmes conditions de vibration (diamètre, zone et durée), les carottes N° 4, 7 et 8 présentent un nombre de bulles de surface de 2650, 1800 et 2000 bulles/m². Nous suggérons que la mesure est plus influencée par la distance aux points de vibration les plus proches que par les paramètres de vibration. Dans les cas où les carottes semblent avoir été effectuées sur le point de vibration, la quantité de bulles/m² tend alors vers celles comptabilisées sur les photos des éprouvettes 16 cm x 32 cm réalisées en parallèle du plot de coulage.

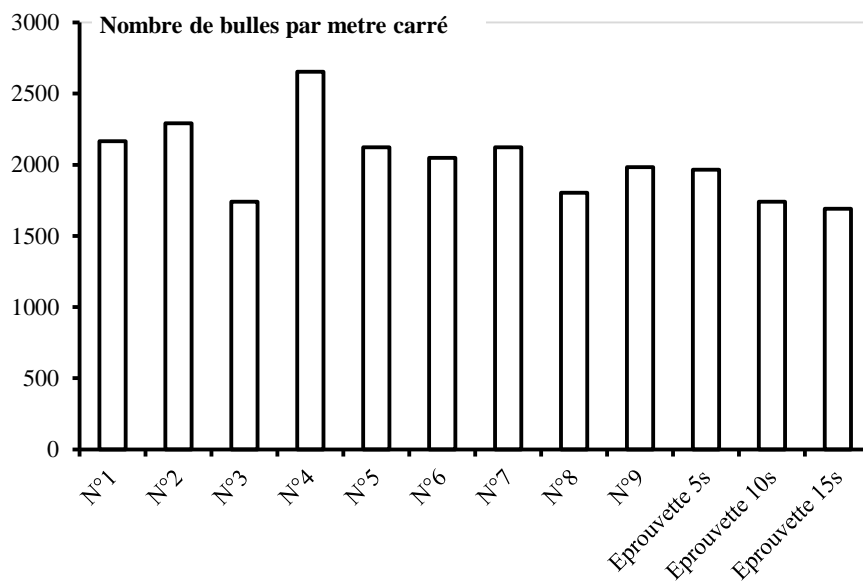


Figure 5.5 Nombre de bulles/m² pour les carottes et les éprouvettes.

Nous choisissons donc de nous focaliser sur ces dernières et nous traçons sur la Figure 5.6 la quantité surfacique de bulles en fonction du temps de vibration.

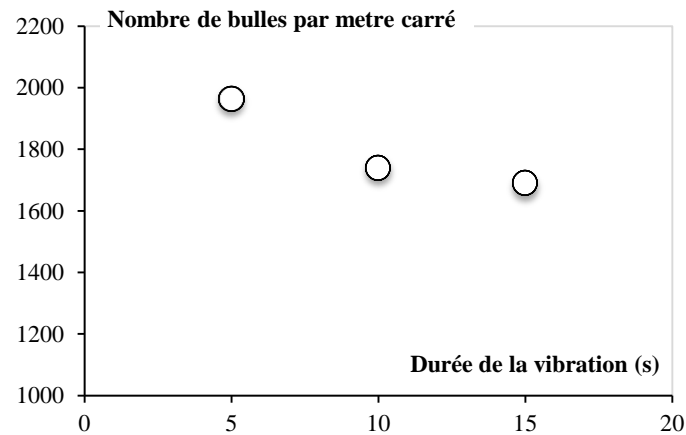


Figure 5.6. Nombre de bulles/m² pour les éprouvettes en fonction de la durée de vibration.

L'étude des carottes a pu montrer visuellement que le bullage semblait décroître pour des durées de vibration de 10 et 15 secondes par rapport à une durée de 5 secondes. Cette diminution semble concerner majoritairement les bulles de taille pluri-millimétriques. Aucune différence ne semble pouvoir être notée sans l'utilisation d'outils de quantification plus élaborés entre une durée de 10 et de 15 secondes. Aucune ségrégation n'a pu être observée.

Le gain en terme de porosité semble être marqué lorsque la durée de vibration passe de 5 à 10 secondes. Il est très faible de 10 à 15 secondes. Il peut être noté que, pour 15 secondes de vibration, aucune sur-vibration n'a pu être observée sur les éprouvettes et carottes (*i.e.* ségrégation des granulats).

5.2 Étude de l'apparition de la ségrégation

5.2.1 Matériels et matériaux

Pour cette étude, nous conservons les mêmes coffrages que ceux utilisés pour l'analyse vidéo des temps caractéristiques. De plus, nous utilisons la même aiguille vibrante traditionnelle de laboratoire. Enfin, nous testons aussi les bétons ordinaires de classes de consistance S1 à auto-plaçant présentés dans ce chapitre.

5.2.2 Protocole expérimental

5.2.2.1 Remplissage des coffrages

Tout d'abord, nous remplissons le moule dans son intégralité puis nous plongeons l'aiguille vibrante en fonctionnement au centre de l'élément. Nous appliquons des durées de vibrations variées : soit 0 s pour obtenir l'échantillon de référence, soit 15 s et enfin 60 s. Ces temps de vibration correspondent à la durée pendant laquelle le vibreur se situe au sein du matériau, descente et remontée du matériel comprises.

5.2.2.2 Mesure de la répartition spatiale des granulats

Après 28 jours de conservation dans l'air, les échantillons sont sciés longitudinalement. (Cf. Figure 5.7). Puis nous les séparons en deux demi éléments de même hauteur. Enfin, nous effectuons un comptage manuel de l'ensemble des granulats dont le diamètre est supérieur à 10 mm se situant dans chacune des demi-parties. (Cf. Figure 5.8 et Figure 5.9). Ces échantillons ne permettent pas d'appliquer notre protocole d'analyse d'image établi avec le logiciel ImageJ. Les teintes variées des granulats empêchent la mise en place d'un seuil manuel simple.

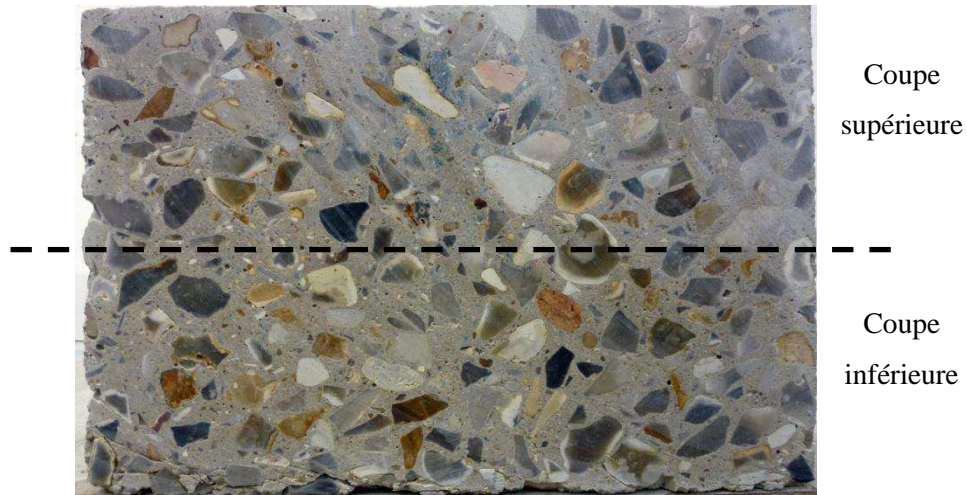


Figure 5.7. Coupe intérieure d'un BAP à 28 jours. Application de 60 s de vibration à l'état frais.

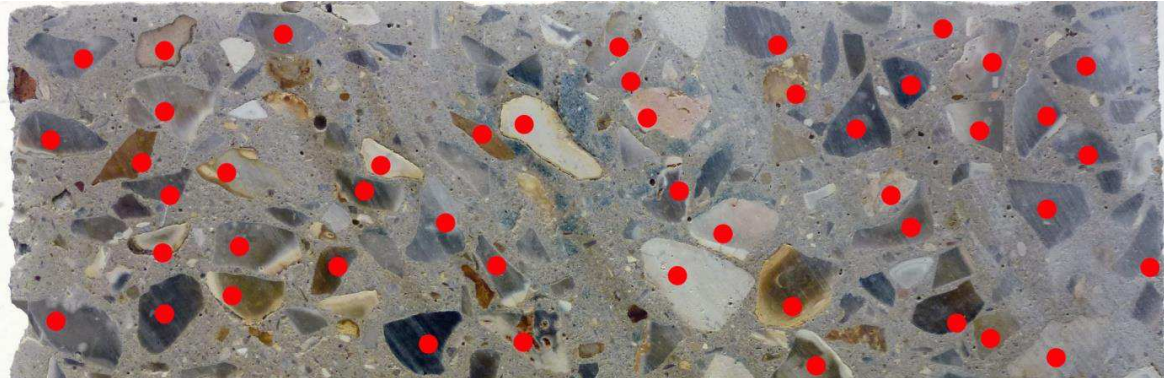


Figure 5.8. Traitement coloré des granulats de la coupe supérieure du BAP.

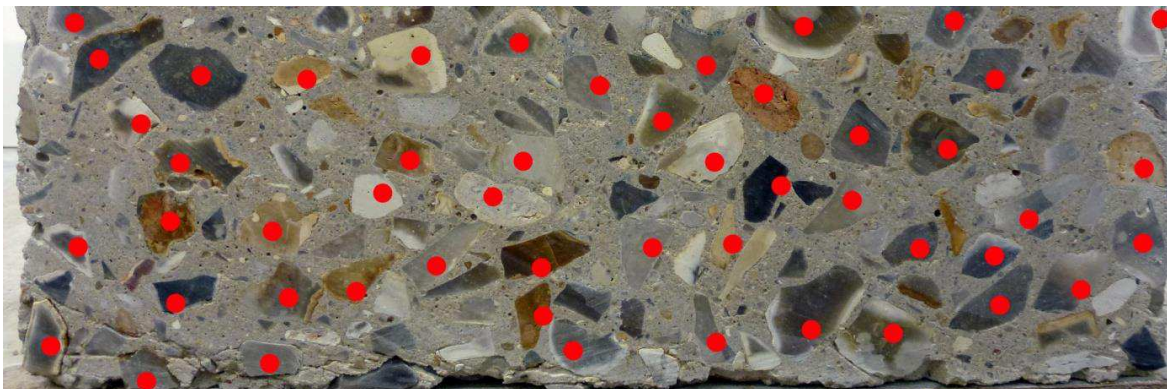


Figure 5.9. Traitement coloré des granulats de la coupe inférieure du BAP.

Trois configurations peuvent exister. Tout d'abord, le nombre de granulats est identique dans la partie supérieure et inférieure. Nous sommes alors en présence d'un matériau homogène.

Deuxièmement, la quantité d'agrégats est plus importante dans la partie supérieure que dans la partie inférieure de l'échantillon. Dans cet état, le matériau est hétérogène. La durée d'application de la vibration n'a pas permis la mise en place d'une répartition spatiale homogène des particules.

Enfin, la quantité de granulats est plus petite dans la partie supérieure que dans la partie inférieure de l'échantillon. Dans cet état, nous avons une apparition de la ségrégation. La durée d'application de la vibration semble avoir été trop importante et a entraîné un désordre des particules.

5.2.3 Résultats expérimentaux

5.2.3.1 Essais en laboratoire

Nous traçons sur la Figure 5.10 la répartition spatiale des granulats dans la partie inférieure des échantillons en fonction de la durée d'application de la vibration. Nous comparons des consistances S1 à S4+. Le trait en pointillé correspond à un arrangement homogène des particules.

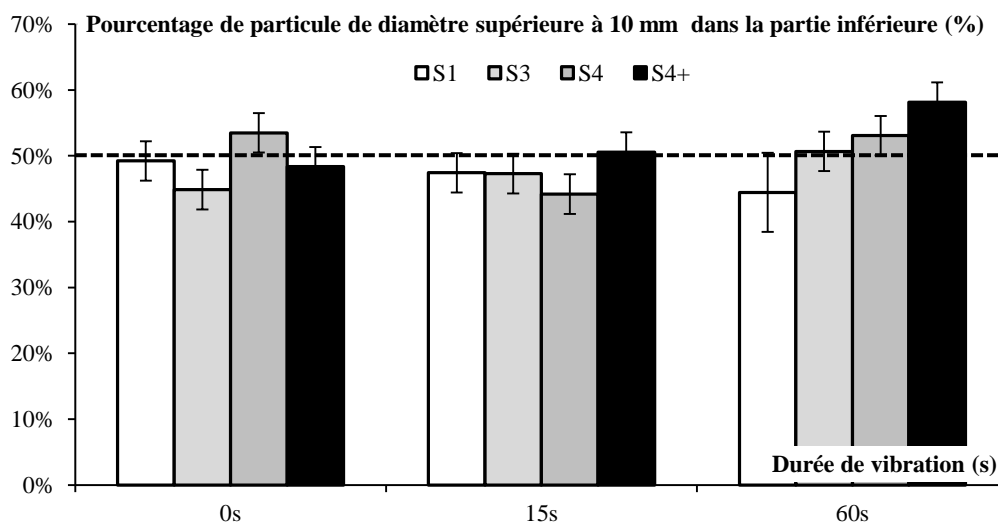


Figure 5.10. Répartition spatiale des granulats dans la partie inférieure des échantillons en fonction de la durée d'application de la vibration. Comparaison des consistances S1 à S4+.

Nos résultats montrent que, malgré une longue durée de vibration égale à 60s, les bétons de formulations S1 à S4 ne présentent pas d'apparition de la ségrégation. En revanche, dans le cas d'une consistance S4+, une vibration de 60s entraîne une ségrégation. Ceci est en accord avec les recommandations traditionnelles d'utilisation de cette consistance pour la mise en œuvre de fondations profondes. En effet, elles sont remplies sans vibration.

De plus, nous traçons sur la Figure 5.11 la répartition spatiale des granulats en fonction de la durée d'application de la vibration pour un BAP. Le trait en pointillé correspond à un arrangement homogène des particules.

Nos résultats montrent que notre formulation de BAP présente une répartition identique des granulats lorsque celui-ci n'est pas vibré. Tandis que, quand une pervibration est appliquée, nous obtenons l'apparition d'une ségrégation dès 15s d'utilisation du vibreur. Par conséquent, nous retrouvons un résultat connu [3] selon lequel la vibration est interdite avec l'utilisation des BAP.

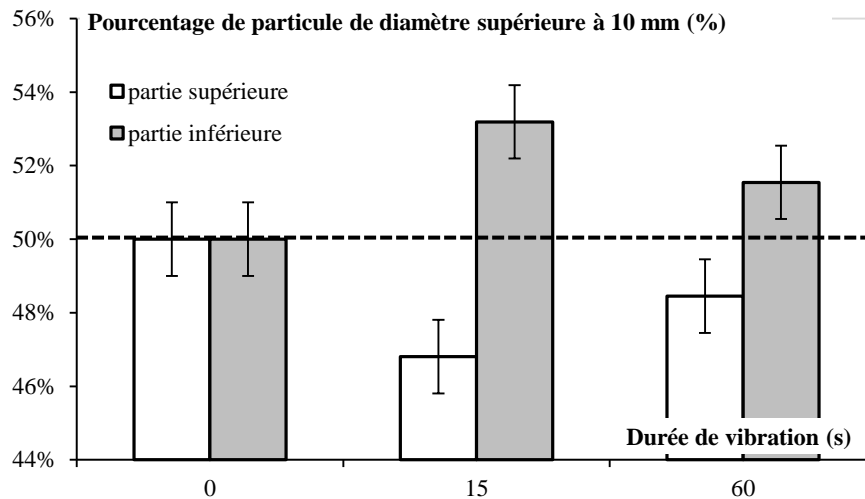


Figure 5.11. Répartition spatiale des granulats du BAP en fonction de la durée de d'application de la vibration.

5.3 Conclusions du chapitre

A partir d'une analyse dimensionnelle et d'application d'ordres de grandeur, nous avons montré que deux temps caractéristiques se distinguent pour mettre en œuvre le béton.

Le premier, T_{C1} , a une durée comprise entre 1 et 10 s et correspond au temps nécessaire pour compacter le matériau afin d'assurer, à l'état durci, des propriétés mécaniques de qualité.

Le second, T_{C2} , identifie un temps de remontée de bulles d'air à la surface compris entre 10 et 100 s. Il permet l'obtention d'une bonne qualité de parement.

Parallèlement, afin de mesurer expérimentalement ces deux temps, nous avons établi des vidéos de remplissage de coffrage avec une face transparente avec des bétons de consistances variées. Nos résultats montrent que notre approche dimensionnelle est en accord avec notre étude expérimentale. Enfin, malgré des durées de vibration relativement longues par rapport à la pratique de l'ordre de soixante secondes, nous n'avons pas observé l'apparition d'une ségrégation sur nos formulations testées excepté dans le cas des bétons de consistance S4+ et auto-plaçant.

Par conséquent, nous retrouvons des conclusions connues et mises en application au sein des règles traditionnelles nationales de mise en œuvre des bétons.

5.4 Références du chapitre

- [1] J. Spangenberg et al., "Patterns of gravity induced aggregate migration during casting of fluid concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 12, pp. 1571-1578, 2012.
- [2] K. Vasilic, B. Meng, H.C. H.C. Kühne, and N. Roussel, "Flow of fresh concrete through steel bars: A porous medium analogy," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 5, pp. 496-503, 2011.
- [3] Irex, *Les bétons auto-plaçant*, Presses Ponts et Chaussées, Ed., 2011.

Conclusion générale

Afin d'identifier l'ensemble des phénomènes mis en jeu lors de la vibration des matériaux cimentaires, nous avons exploré plusieurs axes d'études. A partir de la littérature existante et des évolutions actuelles des formulations de béton, nous avons cherché à apporter des éléments de réponse aux trois questions suivantes :

- 1) Dans quelles conditions est-il nécessaire de vibrer un béton ?
- 2) Quel est le volume de béton affecté par une pervibration ?
- 3) Quelle est la durée idéale de vibration d'un béton ?

Pour répondre à la **première question**, nous avons comparé les propriétés macroscopiques à l'état durci de bétons de rhéologies variées (*i.e.* d'un affaissement de 4 cm à une fluidité de béton auto-plaçant) dans deux configurations : vibrée et non vibrée. L'ensemble des essais a été réalisé sur des échantillons dont la taille réduite associée à un choix de pervibrateur adéquat permettait de s'assurer que l'ensemble du matériau testé était affecté par la vibration de façon à s'affranchir des conséquences de notre réponse à la deuxième question.

Les vibrations appliquées étaient conformes aux recommandations nationales existantes. Nous avons ensuite mesuré sur ces échantillons la résistance en compression à 28 jours, la résistance en traction par fendage, la masse volumique à cœur (*i.e.* sur une carotte de 8 cm de diamètre au centre de nos éprouvettes de 16 cm de diamètre), la masse volumique en parement (*i.e.* sur une couronne de 4 cm d'épaisseur située à la périphérie de nos éprouvettes de 16 cm de diamètre), la proportion surfacique de défauts de parement ainsi que la taille moyenne des défauts par analyse d'image et l'adhérence acier / béton sur des éprouvettes contenant une barre d'acier dont la position a été variée de façon à simuler un coulage de poutre/voile ou de dalle.

Nos résultats ont confirmé que l'ensemble des propriétés était amélioré par une vibration dans le cas des bétons les plus fermes alors que la vibration n'était pas nécessaire voire néfaste dans le cas de bétons auto-plaçants.

Nos résultats ont par ailleurs montré que les propriétés directement dépendantes de zones de béton situées à proximité d'une interface sont les plus sensibles à l'application d'une vibration. Ainsi, les conséquences les plus importantes de la vibration ont pu être mesurées sur la qualité du parement (interface béton /coffrage) et sur l'adhérence acier béton (interface béton/armatures en acier). A ces interfaces, en absence de vibration, les défauts augmentent avec le seuil d'écoulement du matériau.

Une analyse dimensionnelle simple de nos résultats nous a permis de proposer un facteur de vibration dont la valeur détermine le besoin d'une vibration. Ce facteur fait intervenir le seuil du béton (*i.e.* son affaissement), sa densité et la plus petite distance d'écoulement de l'élément à réaliser. Cette plus petite distance est égale à la plus petite valeur obtenue en comparant l'enrobage des armatures, la plus petite distance entre armatures et une valeur de 4 cm permettant de s'assurer de la qualité du parement en terme de proportion surfacique de défauts. Nous avons enfin proposé un abaque permettant pour des coulages standard de déterminer le besoin ou non d'une vibration.

Pour répondre à la **deuxième question**, nous avons tout d'abord réalisé un inventaire technologique des pervibrateurs disponibles commercialement. Nos résultats ont mis en évidence deux généralités technologiques : l'amplitude et le diamètre des aiguilles sont proportionnels et la force centrifuge des aiguilles disponibles est proportionnelle au carré du diamètre des aiguilles.

Par la suite, nous avons développé un système de mesure du rayon d'action des vibreurs plongés dans des matériaux cimentaires basés sur l'observation visuelle de l'immersion de marqueurs de surface dans la zone liquéfiée par la vibration. L'utilisation d'une aiguille à fréquence variable et l'étude de matériaux cimentaires de consistances variées nous ont permis d'explorer une large palette de configurations vibration/fluidité. Cette étude a été initialement réalisée dans des récipients d'une taille suffisante pour pouvoir négliger l'influence des parois et considérer que l'aiguille était plongée dans un milieu semi-infini. Parallèlement, une modélisation mécanique basée sur un simple équilibre des forces entre la surface de l'aiguille et la frontière entre zone vibrée et zone non vibrée nous a permis de prédire le rayon d'action d'une aiguille en fonction des propriétés rhéologiques du matériau testé et des caractéristiques mécaniques du vibreur.

Cette modélisation semble à même de prédire l'intégralité des résultats expérimentaux obtenus pour des pâtes de ciment de viscosité et seuil variés ainsi que pour des bétons de seuils variés mais de viscosité faible. Dans le cas de bétons de forte ou de très forte viscosité, le rayon d'action prédit est, par contre, systématiquement supérieur au rayon d'action mesuré.

Nous avons exploré plusieurs hypothèses permettant d'expliquer cet écart systématique. Notre analyse actuelle suggère que la puissance mécanique disponible des aiguilles n'est pas suffisante pour fluidifier un volume de matériau correspondant à la prédiction de notre modèle. L'analyse dimensionnelle de la compétition puissance mécanique/dissipation visqueuse va dans ce sens ainsi que la mesure d'une diminution de l'amplitude et de la fréquence de l'aiguille lorsqu'elle est plongée dans

un béton visqueux. Cette analyse suggère des pistes de changements technologiques permettant de vibrer cette catégorie de bétons visqueux et très visqueux.

Enfin, nous avons, à titre exploratoire, étudié une potentielle transmission de la vibration par les parois du coffrage pouvant augmenter le rayon d'action efficace d'une aiguille. Les volumes de béton nécessaires à de telles expérimentations nous ont forcé à réaliser ces expériences sur des chantiers de construction. Lorsque la largeur de l'élément en béton est plus faible que le diamètre d'action du vibreur, nos résultats montrent systématiquement une augmentation de l'efficacité de l'aiguille vibrante par rapport à la prédiction attendue. Malgré une caractérisation rhéologique moins poussée qu'en laboratoire des bétons considérés, nos résultats suggèrent ainsi que l'influence de la transmission par les parois est loin d'être négligeable et semble dépendre de la rigidité du coffrage. Par ailleurs, nos résultats suggèrent que la présence du ferrailage n'influence pas la propagation de la vibration (dans les proportions de ferrailage étudiées).

Pour répondre à la **troisième question**, nous avons réalisé des vidéos numériques de l'évolution du parement derrière un coffrage transparent pour des bétons de consistance variés.

Nos résultats expérimentaux couplés avec une approche dimensionnelle nous ont permis d'identifier deux temps caractéristiques associés à la mise en vibration du matériau par pervibrateur. Le premier, de l'ordre de quelques secondes pour les bétons testés, correspond à la durée nécessaire pour compacter le matériau afin de faire disparaître les défauts majeurs centimétriques. Le second est associé à un temps de remontée de bulles d'air millimétriques à la surface de l'ordre de plusieurs dizaines de seconde. Celui-ci permet l'obtention d'une bonne qualité de parement. Notre analyse suggère que ces temps devraient augmenter proportionnellement à la viscosité du béton ou de la pâte de ciment constitutive.

Il peut enfin être noté que, à part dans le cas du béton auto plaçant, nos résultats n'ont pas fait apparaître de cas de sur-vibration se manifestant par une ségrégation des éléments les plus grossiers ou par un ressuage et cela malgré des durées de vibration largement supérieures à celles recommandées actuellement. Nous n'avons cependant étudié que des éléments de faible hauteur écartant ainsi de potentiels effets d'échelle présents dans des coffrages hauts de plusieurs mètres en considérant que la zone vibrée était, dans la pratique, localisée dans les premières dizaines de centimètres de béton situées dans la partie supérieure du béton coulé.

Un obstacle s'oppose à la transposition des résultats obtenus dans ce travail en recommandations pratiques. En effet, les réponses à la deuxième (rayon d'action) et troisième question (durée) font intervenir des valeurs de viscosité du béton. Or, actuellement, ces valeurs ne sont accessibles qu'à partir d'un rhéomètre à béton, un appareil totalement absent des chantiers de construction. Nous avons donc entrepris en guise de conclusion et de perspective d'identifier un essai nous permettant d'avoir

accès à un ordre de grandeur de la viscosité d'un béton. Nos résultats nous orientent actuellement vers un essai de vidange au cône d'Abrams renversé qui semble présenter une bonne corrélation avec les valeurs de viscosité mesurée au rhéomètre en laboratoire.

Annexe 1.1. Caractéristiques des aiguilles vibrantes disponibles dans le commerce**Vibreurs électriques de la société Atlas Copco**

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
AX36	36	200	2,10	1 350
AX40	40	200	2,50	1 400
AX48	48	200	2,70	3 400
AX56	56	200	3,10	4 300
AX65	65	200	3,40	6 700
AX90	90	100	5,00	N.C.

SMART E28	28	200	0,9	1 000
SMART E40	40	205	2,8	1 600
SMART E48	48	205	3,2	2 700
SMART E56	56	205	3,5	4 600

SMART 40	40	200	2,6	1 600
SMART 48	48	200	2,8	2 700
SMART 56	56	200	3,2	4 600
SMART 65	65	200	3,5	6 000

Vibrastar 40	40	200	0,84	1 000
Vibrastar 50	50	200	0,86	2 000
Vibrastar 60	60	200	0,78	3 000

Vibreurs mécaniques de la société Atlas Copco

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
AA27	25	200	0,30	570
AA37	39	200	0,55	2 000
AA47	50	187	0,69	3 800
AA67	63	175	0,84	4 300
AA77	75	153	1,20	4 700

AT29	29	200	0,80	950
AT39	39	200	1,00	1 750
AT49	49	200	1,20	3 150
AT59	59	200	1,20	5 200

AZ26	25	200	0,25	532
AZ36	35	200	0,26	1 436
AZ46	45	200	0,33	2 320
AZ56	55	188	0,60	4 061

Vibreurs pneumatiques de la société Atlas Copco

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
AY107	108	250	1,9	24 200
AY157	155	200	2,6	39 500
AY27	26	350	0,5	850
AY37	36	317	0,6	1 960
AY47	47	300	0,6	3 800
AY57	56	300	0,8	6 600
AY67	67	283	0,9	11 300
AY77	77	267	1,2	14 600
AY87	87	265	1,8	22 400

Vibreurs électriques de la société Imer France

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
T 361	36	200	1,2	1500
T 420	42	200	N.C.	1500
T 505	50	200	1,6	3400
T 665	65	200	2,1	5200
T 505 TH	50	200	1,6	3900
T 665 TH	65	200	2,1	5200

Vibreurs pneumatiques de la société Imer France

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
APN 40	40	367	N.C.	1450
APN 50	50	283	N.C.	4000
APN 60	60	200	N.C.	5000
APN 80	80	183	N.C.	10000

Vibreurs mécaniques de la société Imer France

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
GH 32 S/B	32	150 à 210 Hz	1,8	N.C.
CH 38 S	38		1,8	N.C.
GH 45 B/S	45		2,0	N.C.
GH 60 B	62		2,4	N.C.

Vibreurs électriques de la société Paclite

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
VX-40 PREMIUM	38	200	0,98	1 400
VX-45 PREMIUM	42	200	1,01	2 100
VX-BOOSTER 52	52	197	1,02	3800
VX-BOOSTER 58	58	197	1,09	5500
VX-BOOSTER 65	65	192	1,13	7200
VX-BOOSTER 75	75	192	1,22	8400

VX-40 D	42	200	N.C.	2 100
VX-50-D	52	200	N.C.	3 800

Vibreurs électroniques de la société Paclite

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
Synchromaster-40	40	200	1,01	2 140	336
Synchromaster-51	52	200	1,02	3 815	416
Synchromaster-58	58	200	1,06	5 520	464

Vibreurs mécaniques de la société Paclite

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence(Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)
AAX 25	25	200	0,80	N.C.
AAX 35	35	200	1,20	N.C.
AAX 45	45	200	1,20	N.C.
AAX 55	55	200	1,20	N.C.
AAX 65	68	200	1,00	N.C.

Vibreurs électriques de la société V.C.S France

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
NSN 370	39	200	N.C.	1 780	400
NSN 480	49	200	N.C.	3 600	510
NBN 560	56	200	N.C.	5 000	650
NSN 660	66	200	N.C.	7 500	900

Vibreurs pneumatiques de la société V.C.S France

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
NVV25	25	300	N.C.	160	1 440
NVV35	35	300	N.C.	200	1 924
NVV45	45	283	N.C.	250	3 500
NVV55	55	283	N.C.	380	6 050
NVV65	65	300	N.C.	440	9 301
NVV75	75	300	N.C.	500	14 851
NVV85	85	283	N.C.	550	22 182
NVV105	105	225	N.C.	650	32 460
NVV140	140	17	N.C.	950	49 347
NBI 30	31	200	N.C.	150	990
NBI 37	38	200	N.C.	380	1 600
NBI 47	50	200	N.C.	510	3 600
NBI 57	58	200	N.C.	700	5 400
NBI 67	65	200	N.C.	750	6 600
NBI 67 L	65	200	N.C.	850	7 500

NBI 80	80	200	N.C.	1550	15 200
--------	----	-----	------	------	--------

Vibreurs pneumatiques de la société VibraFrance

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
AIR25	25	333	N.C.	700	180
AIR 40	40	300	N.C.	2 000	350
AIR 50	50	317	N.C.	3 500	500
AIR 60	58	300	N.C.	5 000	600
AIR 80	78	267	N.C.	12 000	800
AIR 100	100	267	N.C.	24 000	1000
AIR 145	145	233	N.C.	55 000	1400
AIRPLUS36	36	400	N.C.	2 000	300
AIRPLUS58	58	333	N.C.	8 000	600
AIRPLUS78	78	300	N.C.	15 000	800

Vibreurs électriques de la société VibraFrance

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
AET 35	35	200	N.C.	1 250	350
AET 50	50	200	N.C.	3 000	500
AET 57	59	200	N.C.	5 000	650
TNE40	41	200	N.C.	1 600	400
TNE50	52	200	N.C.	3 300	550
TNE60	60	200	N.C.	5 500	700
TNE65	65	200	N.C.	5 800	750
TNE75	75	200	N.C.	7 500	900
PEA 30	31	200	N.C.	1 350	300
PEA 37	38	200	N.C.	1 700	500
PEA 47	51	200	N.C.	3 800	650
PEA 57	59	200	N.C.	5 900	800
PEA 65	65	200	N.C.	6 100	900
PEA 82	82	200	N.C.	9 000	1600

Vibreurs électriques de la société Wakerneuson

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
IREN 30	30	200	N.C.	N.C.	400
IREN 38	38	200	1,9	N.C.	500
IREN 45	45	200	2,3	N.C.	600
IREN 57	58	200	2,1	N.C.	850
IREN 65	65	200	2,5	N.C.	1200


Vibreurs électroniques de la société Wakerneuson

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
IRFU 30	30	200	N.C	N.C	400
IRFU 38	38	200	N.C	N.C	500
IRFU 45	45	200	N.C	N.C	600
IRFU 57	57	200	N.C	N.C	850
IRFU 65	65	200	N.C	N.C	1000

Vibreurs pneumatiques de la société Wakerneuson

Dénomination	Diamètre (mm)	Fréquence (Hz)	Amplitude (mm)	Force centrifuge (N)	Diamètre efficace supposé (mm)
PIR 35	35	328	N.C	N.C	40
PIR 55	55	303	N.C	N.C	65
PIR 75	75	275	N.C	N.C	90

Annexe 2.1. Fiche Technique de Produit. Sable - Lafarge Granulats Nord - Bernières-sur-Seine



Lafarge Granulats Nord - Bernières-sur-Seine
Bernières-sur-Seine Hameau de la garenne
27700 Les Andelys

Fiche Technique de Produit
Engagement du 01/07/2013 au 31/12/2013
Page 1/1, Imprimé le lundi 12 août 2013

Granulats : 0/4 All SCL
Péetrographie : Alluvionnaires
Certification : ISO 9001 & 14001

Service Qualité Produits LG Seine Aval : 02 32 54 70 85

Partie contractuelle
Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

0	4
---	---

Norme

Norme NF P 18-545 Article 10

Code

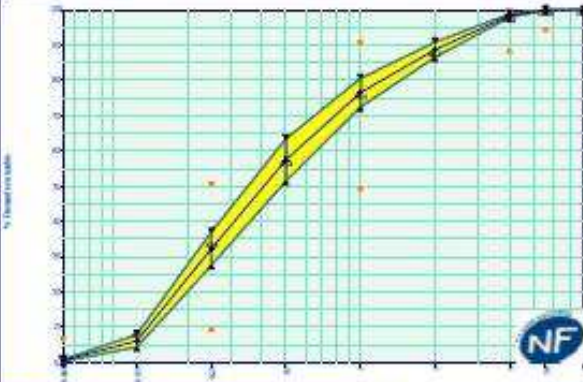
Code A

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	D	1.4D	2D	f	FM	SE10
Etendue e	6		40		40		10			6	0.6	
Incertitude U	1	0	4	0	3	0	2	1		1	0.15	5
V.S.S.+U	7.0		54.0		93.0		100.0	100.0		11.00	2.95	
V.S.S.	6.0		50.0		90.0		99.0	100.0	100.0	10.00	2.80	
V.S.I.	0.0		10.0		50.0		89.0	95.0	100.0		2.20	65.0
V.S.I.-U	0.0		6.0		47.0		87.0	94.0			2.05	60.0
Ecart-type max	1.82		12.12		12.12		3.03				0.18	

Partie informative
Résultats de production

du 02/01/13 au 27/06/13

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	f	FM	SE10
Maximum	1.1	15.8	44.1	69.3	84.8	93.1	99.0	100.0	100.0	1.90	2.81	90.0
3σ+1.25écart-type	0.8	7.9	37.0	63.4	80.5	90.8	98.8	100.0	100.0	0.82	2.56	88.3
Moyenne Xf	0.6	6.1	32.3	57.4	76.5	88.7	98.3	100.0	100.0	0.57	2.41	85.4
3σ-1.25écart-type	0.3	4.4	27.6	51.4	72.4	86.5	97.9	99.9	100.0	0.32	2.26	82.6
Minimum	0.2	2.7	20.2	33.7	64.2	83.3	97.1	99.5	100.0	0.20	2.08	80.0
Ecart-type	0.19	1.41	3.75	4.77	3.23	1.72	0.35	0.05	0.00	0.200	0.120	2.30
Nombre de résultats	272	272	272	272	272	272	272	272	272	272	272	101




Processus de fabrication
NF P 18-545 Article 10

Autres caractéristiques

Absorption d'eau	NF EN 1097-6, art 7.8 ou 1	1.21 % au 29/06/2013
Masse volumique réelle	EN 1097-6	2.53 Mg/m ³ au 29/06/2013
Masse volumique réelle traitée	EN 1097-6	2.56 Mg/m ³ au 29/06/2013
Foison au bleu de méthylène (0/2)	EN 913-9 2009	0.43 g/kg au 15/05/2013
Détermination de la teneur en matière humide	EN 1244-1 Art. (5-1)	NRXATP au 28/02/2013
Impuretés prohibées	NF P 18 545	0.00 au 26/06/2013
pH	NF ISO 10390	9.3 (22/03/2012)
Chlorures	EN 1244-1, art 7.8 ou 9	0.0005 % (28/02/2013)
Soufre total	EN 1244-1 Art.11	0.005 % au 28/02/2013
Alcalins actifs		0.00380 % au 28/02/2013
Alcalis-réaction	P 18-542	PR (28/02/2013)


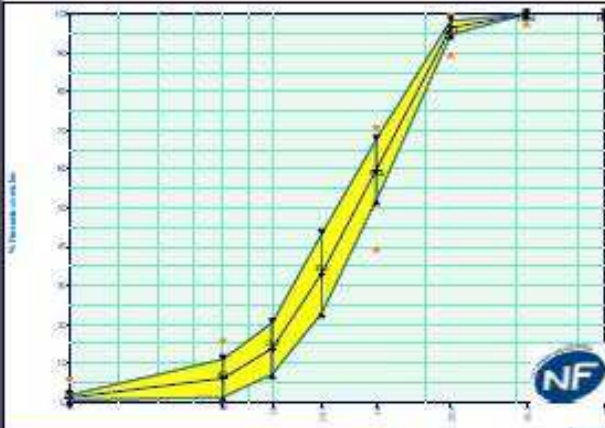

Eric Jammet



Document communiqué par le service Qualité Produits LG Seine Aval

Document communiqué par le service Qualité Produits LG Seine Aval

Annexe 2.2. Fiche Technique de Produit. Gravier - Lafarge Granulats Nord -
Bernières-sur-Seine

	Lafarge Granulats Nord - Bernières-sur-Seine		Bernières-sur-Seine Hameau de la garenne 27700 Les Andelys		Fiche Technique de Produit <small>Engagement du 01/07/2013 au 31/03/2013</small>																																	
	<small>Page 1/1, Imprimé le jeudi 4 juillet 2013</small>																																					
Granulats : 8/22.4 SCL NF Pétrographie : Alluvionnaires Certification : ISO 9001 & 14001																																						
<small>Service Qualité Produits LG Seine Aval : 02 32 54 70 85</small>																																						
Partie contractuelle <i>Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage</i>																																						
Classe granulaire <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">8</td> <td style="width: 50%;">22.4</td> </tr> </table>		8	22.4	Norme <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">Norme NF P 18-545 Article 10</td> </tr> </table>			Norme NF P 18-545 Article 10	Code <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">Code A sauf Absorption Code B</td> </tr> </table>		Code A sauf Absorption Code B																												
8	22.4																																					
Norme NF P 18-545 Article 10																																						
Code A sauf Absorption Code B																																						
	d/2	d		D/1.4	D	1.4D	2D	f	FI																													
	4	8	10	12.5	16	22.4	31.5	45																														
Etendue e		15			30	15																																
V.S.S.+U	6.0	20.0			76.0	100.0		1.80	24.0																													
V.S.S.	5.0	15.0			70.0	99.0		1.50	20.0																													
V.S.I.		0.0			40.0	90.0	98.0	100.0																														
V.S.I.-U		0.0			34.0	85.0	97.0																															
Ecart-type max					9.09																																	
Partie informative Résultats de production <small>du 02/01/13 au 26/06/13</small>																																						
	4	8	10	12.5	16	22.4	31.5	45	f	FI																												
Maximum	3.1	15.0	29.5	53.4	68.8	98.7	100.0	100.0	0.50	13.7																												
25+1.25/Ecart-type	1.7	11.0	20.3	43.3	67.6	98.2	100.0	100.0	0.40																													
Moyenne Xf	1.1	6.1	13.7	33.1	59.8	96.5	100.0	100.0	0.29	12.4																												
25+1.25/Ecart-type	0.4	1.2	7.1	22.9	52.0	94.7	100.0	100.0	0.19																													
Minimum	0.3	1.2	5.0	15.9	44.5	91.7	100.0	100.0	0.10	9.6																												
Ecart-type	0.50	3.90	5.28	8.14	6.25	1.43	0.00	0.00	0.080	1.50																												
Nombre de résultats	92	92	92	92	92	92	92	92	92	6																												
							<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Autres caractéristiques</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Absorption d'eau</td> <td>NF EN 1097-6 art 7. 8 ou 9 2.31 % au 18/03/2013</td> </tr> <tr> <td>Masse volumique réelle</td> <td>EN 1097-6 2.47 Mg/m3 au 18/03/2013</td> </tr> <tr> <td>Masse volumique réelle imbibée</td> <td>EN 1097-6 2.53 Mg/m3 au 18/03/2013</td> </tr> <tr> <td>LA (10/14)</td> <td>EN 1097-2 21 (27/11/2012)</td> </tr> <tr> <td>Sensibilité au gel/dégel</td> <td>NF P 18545 article 3.42 Non gelif (27/11/2012)</td> </tr> <tr> <td>MDE (10/14)</td> <td>EN 1097-1 11 (05/12/2012)</td> </tr> <tr> <td>Boulette d'argile</td> <td>NF P 18 545 § 10.1.6 0.00 % au 07/02/2013</td> </tr> <tr> <td>Teneur en éléments coquilliers</td> <td>EN 933-7 0.00 % au 31/07/2012</td> </tr> <tr> <td>Impuretés prohibées</td> <td>NF P 18 545 0.03 au 04/03/2013</td> </tr> <tr> <td>Chlorures</td> <td>EN 1744-1 art 7.8 ou 9 0.0003 % au 28/02/2013</td> </tr> <tr> <td>Soufre total</td> <td>EN 1744-1 Art.11 0.017 % au 28/02/2013</td> </tr> <tr> <td>Alcalins actifs</td> <td>0.00040 % (28/02/2013)</td> </tr> <tr> <td>Alcali-réaction</td> <td>P 18-542 PRP au 28/02/2013</td> </tr> </tbody> </table>				Autres caractéristiques		Absorption d'eau	NF EN 1097-6 art 7. 8 ou 9 2.31 % au 18/03/2013	Masse volumique réelle	EN 1097-6 2.47 Mg/m3 au 18/03/2013	Masse volumique réelle imbibée	EN 1097-6 2.53 Mg/m3 au 18/03/2013	LA (10/14)	EN 1097-2 21 (27/11/2012)	Sensibilité au gel/dégel	NF P 18545 article 3.42 Non gelif (27/11/2012)	MDE (10/14)	EN 1097-1 11 (05/12/2012)	Boulette d'argile	NF P 18 545 § 10.1.6 0.00 % au 07/02/2013	Teneur en éléments coquilliers	EN 933-7 0.00 % au 31/07/2012	Impuretés prohibées	NF P 18 545 0.03 au 04/03/2013	Chlorures	EN 1744-1 art 7.8 ou 9 0.0003 % au 28/02/2013	Soufre total	EN 1744-1 Art.11 0.017 % au 28/02/2013	Alcalins actifs	0.00040 % (28/02/2013)	Alcali-réaction	P 18-542 PRP au 28/02/2013
Autres caractéristiques																																						
Absorption d'eau	NF EN 1097-6 art 7. 8 ou 9 2.31 % au 18/03/2013																																					
Masse volumique réelle	EN 1097-6 2.47 Mg/m3 au 18/03/2013																																					
Masse volumique réelle imbibée	EN 1097-6 2.53 Mg/m3 au 18/03/2013																																					
LA (10/14)	EN 1097-2 21 (27/11/2012)																																					
Sensibilité au gel/dégel	NF P 18545 article 3.42 Non gelif (27/11/2012)																																					
MDE (10/14)	EN 1097-1 11 (05/12/2012)																																					
Boulette d'argile	NF P 18 545 § 10.1.6 0.00 % au 07/02/2013																																					
Teneur en éléments coquilliers	EN 933-7 0.00 % au 31/07/2012																																					
Impuretés prohibées	NF P 18 545 0.03 au 04/03/2013																																					
Chlorures	EN 1744-1 art 7.8 ou 9 0.0003 % au 28/02/2013																																					
Soufre total	EN 1744-1 Art.11 0.017 % au 28/02/2013																																					
Alcalins actifs	0.00040 % (28/02/2013)																																					
Alcali-réaction	P 18-542 PRP au 28/02/2013																																					
<small>Eric Jammet</small> 							<small>Document en pdf</small> <small>PDF 805 (11/17/13) page 1/2</small>																															
<small>Organisme Certificateur : AFNOR (0203002 1826 11 rue Pierre de Provence 91071 La Plaine St Denis) - 01 49 41 2 00 00</small>																																						

Annexe 2.3. Plastiment HP – SIKA

Notice produit
Edition 04/2010
Numéro 1.14
Version n°2010.070
PLASTIMENT® HP

PLASTIMENT® HP

Plastifiant/Réducteur d'Eau à haute performance

Conforme à la norme NF EN 934-2 tab. 1 et 2



Présentation	<p>Le PLASTIMENT HP est un adjuvant issu d'une nouvelle génération de plastifiants à très hautes performances qui réunit en un seul produit différentes fonctions :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ plastifiant réducteur d'eau, ■ accélérateur de durcissement à dosage normal, ■ hydrofuge, ■ légèrement retardateur de prise en surdosage. <p>Il permet de fabriquer des bétons plastiques ayant de fortes résistances mécaniques à court et à long terme.</p>
Domaines d'application	<p>Bétons plastiques à hautes performances</p> <p>Le PLASTIMENT HP permet de fabriquer avec un rapport E/C faible des bétons plastiques (Affaissement : 8 à 10 cm) ayant des résistances équivalentes ou supérieures à celles d'un béton ferme non adjuvanté (Affaissement : 2 à 3 cm). Il est particulièrement indiqué pour les bétons mis en place à la pompe.</p> <p>Bétons Prêts à l'Emploi</p> <p>Le PLASTIMENT HP permet d'augmenter de l'ordre de 10 à 15 % les performances d'un béton par rapport à un plastifiant classique. Ce gain de résistance peut permettre d'optimiser le dosage en ciment, tout en respectant les dosages minimaux prescrits.</p> <p>Utilisé à fort dosage, le PLASTIMENT HP permet de retarder de quelques heures la prise du béton.</p> <p>Bétons étanches</p> <p>Le PLASTIMENT HP diminue l'absorption capillaire des bétons et augmente leur compacité. Il permet donc de réduire la pénétration de l'eau et peut être utilisé dans les cas suivants : bétons enterrés, réservoirs, piscines, etc.</p>
Caractères généraux	<ul style="list-style-type: none"> ■ Le PLASTIMENT HP joue le rôle d'un agent de cohésion qui améliore la répartition des grains de ciment dans le béton et favorise leur hydratation. ■ Utilisé comme réducteur d'eau, il permet d'obtenir des gains de résistances importants. Il donne une bonne compacité au béton et réduit sa perméabilité. ■ A dosage élevé, le PLASTIMENT HP augmente légèrement le délai de maniabilité du béton. ■ Le PLASTIMENT HP est compatible avec nos accélérateurs de prise (mélange dans l'eau de gâchage).
Agréments, essais officiels	L.C.P.C. PV n° AMP.DP.007.86 du 20.01.87.
Caractéristiques	
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fût de 250 kg ■ Conteneur perdu de 1000 litres ■ Vrac
Stockage	Délai de conservation en emballage intact : 3 ans.

Conservation Le PLASTIMENT HP peut geler à - 4°C, mais après avoir été dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités. En cas de cycles gel/dégel répétés, vérifier que le produit n'a pas été déstabilisé (par exemple en contrôlant la densité en partie haute et en partie basse).

Données techniques

Densité	1,190 ± 0,015
pH	9,0 ± 1
Extrait sec (en masse)	42 ± 1,5 %
Teneur en ion Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O éq.	≤ 3 %
Couleur	Brun foncé

Conditions d'application

Dosage Plage d'utilisation recommandée 0,25 à 1,2 % du poids du ciment
 ■ Utilisation pour béton à la résistance : 0,35 % du poids du ciment (soit 0,3 litre pour 100 kg).
 ■ Bétons étanches : 0,5 % du poids du ciment (soit 0,42 litre pour 100 kg).
 ■ Retards de prise : à partir de 0,6 % du poids du ciment (soit 0,5 litres pour 100 kg). Essai préalable indispensable.
 Pour obtenir des retards de prise importants, utiliser le PLASTIRETARD.

Mise en œuvre Introduire le PLASTIMENT HP dans l'eau de gâchage avant vidange dans le malaxeur.

Précautions d'emploi Manipulation non dangereuse.
 Respecter les règles élémentaires d'hygiène.
 Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr

Mentions légales Produit réservé à un usage strictement professionnel
 Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.
 «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika France S.A.
 64, rue Edouard Vaillant – BP 104
 93351 Le Bourget Cedex
 France

Tel. : 01 49 92 80 00
 Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
 AFNOR CERTIFICATION
 11, avenue Francis de Pressensé
 93571 Saint-Denis La Plaine cedex
 France

Annexe 2.4. Fiche technique Calcia CEM III/A 52.5 CE PM-ES-CP1 NF



CEM III/A 52,5 L ou 52,5 L-LH CE PM-ES-CP1 NF

Domaines d'application

Le ciment CEM III/A 52,5 L ou 52,5 L-LH CE PM-ES-CP1 NF est destiné à tous travaux en béton en milieux humides ou environnements agressifs.

Sa classe de résistance permet également une utilisation en superstructure.

Sa teinte claire valorise les ouvrages architectoniques.

Ce ciment est particulièrement recommandé pour les domaines suivants :

- Travaux en béton armé en sols ou eaux agressifs : eau pure, eau industrielle, eau de mer, eau séléniteuse.
- Ouvrages massifs.
- Ouvrages architectoniques.
- Travaux en béton précontraint par post-tension.
- Ouvrages souterrains et fondations profondes, injections.
- Usage routier : béton extrudé pour barrières de sécurité et drainage sur autoroute.
- Préfabrication d'éléments en béton pour les réseaux enterrés.
- Travaux et produits manufacturés pour l'assainissement et les stations d'épuration.
- Inertage des déchets.
- **Béton prêt à l'emploi** : environnements - XS, XF4, XA1, XA2, XA3 - de la norme NF EN 206-1.



Pont de Rouen

Livraison par voie d'eau : le nouveau système de pesage des barges permet une livraison sur-mesure de nos produits. (cf. page 210)

Composition chimique du ciment (Valeurs moyennes en %)

Usines de production	Dénomination des produits	35% ≤ clinker ≤ 40%			SO ₂	S ⁺⁺	Na ₂ O Equivalent Actif
		C ₂ A	C ₂ S	C ₃ S			
Gargenville (52 L-LH)	CEM III/A 52,5 L-LH CE PM-ES CP1 NF	17	68,6	10,5	1,5	0,5	0,56
Rombas (52,5 L)	CEM III/A 52,5 L CE PM-ES CP1 NF	10,9	65,5	13,4	2,5	0,5	0,86
Valeurs garanties NF EN 197-4 marquage CE et marque NF					≤ 4,5		
NF P 15-318 marque NF						< 0,7	

Caractéristiques physiques (Valeurs moyennes)

Usines de production	Résistances mécaniques mortier CEN en MPa		Finesse		Eau pâte pure (%)	Début de prise
	2J	28J	Blaine (cm ² /g)	Refus (%) à 40µm		
Gargenville (52 L-LH)	17	59	3890	7,1	30	3h10
Rombas (52 L)	21	62	3850	2,2	32,6	3h20
Valeurs garanties NF EN 197-4 marquage CE et marque NF	≥ 8	≥ 50				≥ 0h40



Fondations profondes



Unité de traitement des eaux usées Les Grésillons

Caractéristiques complémentaires de la norme (Valeurs moyennes)

Usines de production	Tenue L	Chaleur d'hydratation à 41 h en J/g	Maniabilité mortier E/C : 0,50 en secondes
Gargenville* (52 L-LH)	71	226	-
Rombas (52 L)	73	286	6,3
Valeurs garanties NF EN 197-1/A1 *Gargenville marquage CE et marque NF		< 300	



Bordures en béton extrudé

Règles de l'art

- Eviter le sous-dosage en ciment qui altère la durabilité des bétons.
- Limiter le rapport E/C qui contribue à la diminution des résistances et à l'augmentation de la porosité.
- Vérifier la compatibilité entre le ciment et les adjuvants utilisés (rhéologie, résistances).
- Ajuster la vibration du béton à sa consistance pour obtenir une compacité maximale sans ségrégation.
- Prendre toutes les dispositions pour éviter une dessiccation précoce par temps chaud ou par vent desséchant en procédant à une cure adaptée (paillasse, eau pulvérisée, produit de cure, etc).



Station d'épuration - Ambonne

Ciments Calcia

Les Technodes - BP 01
78931 Guerville cedex
Tél : 01 34 77 78 00 - Fax : 01 34 77 79 06
www.ciments-calcia.fr - E-mail : info@ciments-calcia.fr

juillet 2008

Annexe 3.1 Tempo 12 – SIKA

Construction

Notice technique
Edition août 2009
Numéro 2.11
Version n°174.2009
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.



Présentation SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



Caractéristiques

Aspect	Liquide brun clair
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fûts de 230 kg ■ CP de 1000 L ■ Vrac
Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	1 an en emballage intact

Données techniques

densité	1,06 ± 0,01
pH	4,5 à 6,5
Teneur en Na₂O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	28,0 à 31,0 %



Construction

Teneur en ions Cl⁻	≤ 0,1 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur internet www.sika.fr
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



SIKA® France S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Annexe 3.2 Formulation des bétons

Formulation des bétons ordinaires

Constituants	Nature/Provenance	S3	S4
Sable (kg)	Seine 0/4	775	755
Gravillons (kg)	Seine 6,3/20	948	923
Ciment (kg)	Calcia CEM IIIA	300	320
Eau totale (kg)	/	178,4	191,2
Eau efficace (kg)	/	172,1	184,5
Adjuvant (Plastifiant) (%)	Plastiment HP - Sika	0,41	0,41

Formulation des bétons visqueux

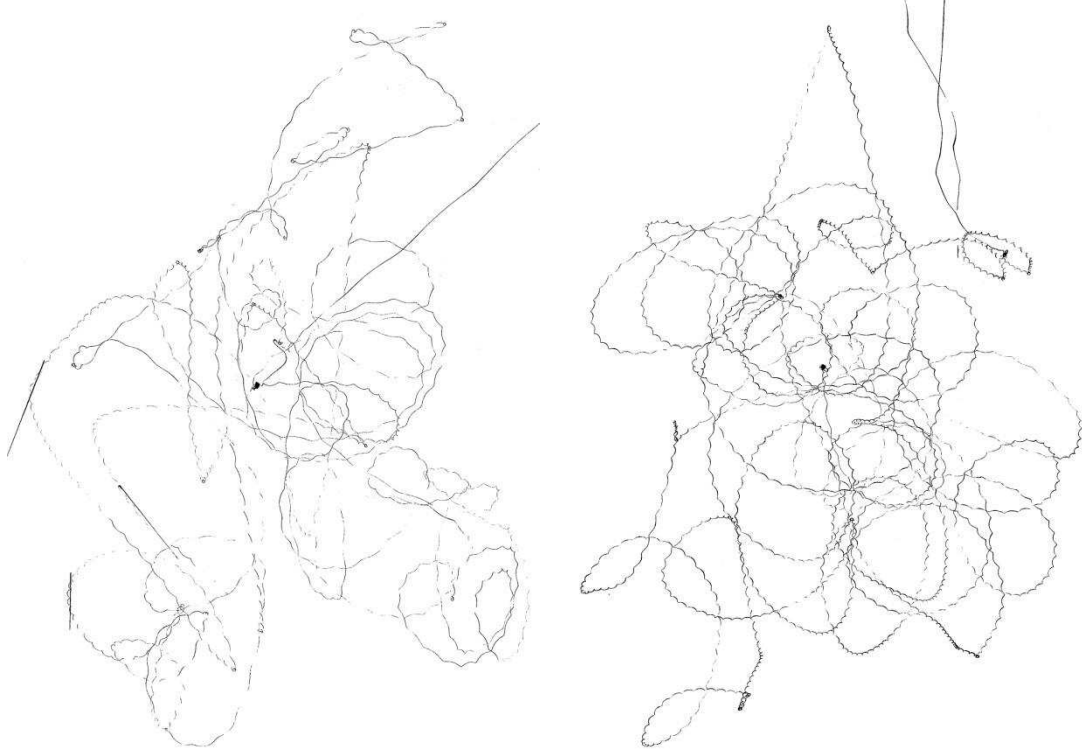
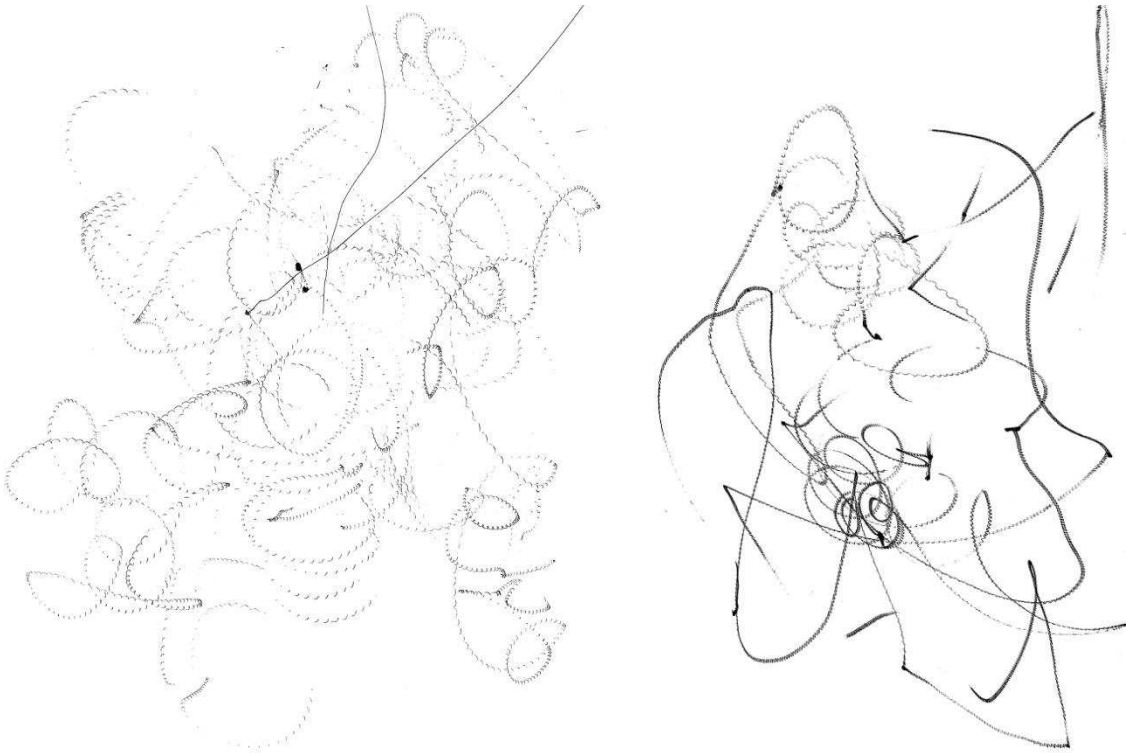
Constituants	Nature/Provenance	S3V	S4V
Sable (kg)	Seine 0/4	776	757
Gravillons (kg)	Seine 6,3/20	949	925
Ciment (kg)	Calcia CEM IIIA	358	381
Eau d'ajout (kg)	/	157,1	167,3
Eau efficace (kg)	/	151,6	162,4
Adjuvant (Plastifiant) (%)	Tempo 12 - Sika	0,75	0,51

Formulation des bétons très visqueux

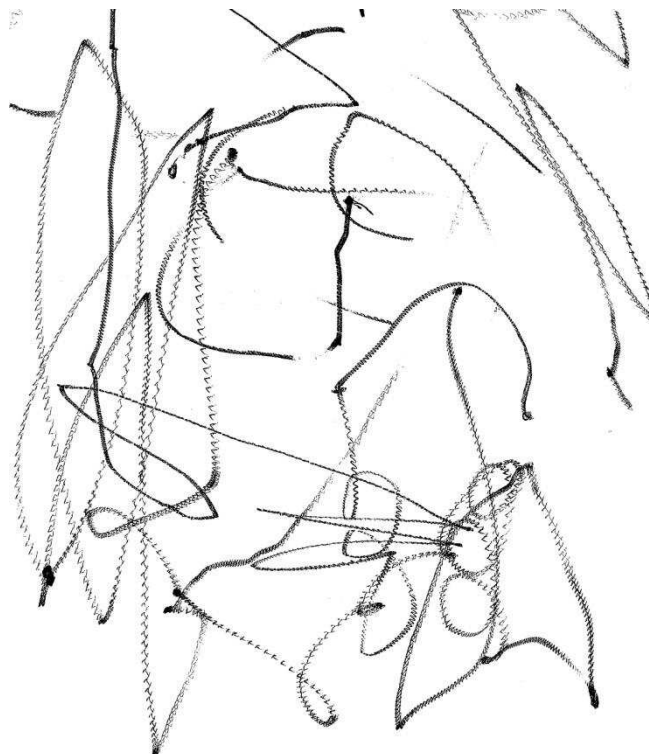
Constituants	Nature/Provenance	S2TV	S4TV	S5Tv
Sable (kg)	Seine 0/4	894	876	876
Gravillons (kg)	Seine 6,3/20	891	876	876
Ciment (kg)	Calcia CEM IIIA	403	425	448
Eau d'ajout (kg)	/	161,2	170	179
Eau efficace (kg)	/	155,5	164,0	172,7
Adjuvant (Plastifiant) (%)	Tempo 12 - Sika	1,5	1,5	1,5

Annexe 4.1 Caractérisation des aiguilles IREN38, IREN 45 et IREN 57.

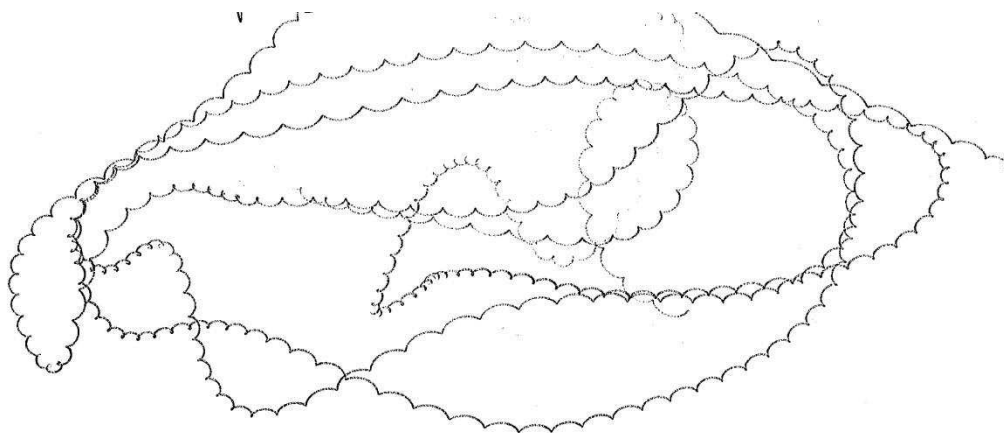
	IREN 38	IREN 45	IREN 57
Diamètre de la tête de vibration (mm)	38	45	57
Longueur de la tête de vibration (mm)	353	382	400
Poids de la tête de vibration (kg)	2,2	3,5	5,8
Flexible de protection (m)	5	5	5
Poids opérationnel (kg)	10,5	11,8	16,2
Diamètre d'action (cm)	50	60	85
Oscillations (1/min)	12.000	12.000	12.000
Moteur	Moteur haute fréquence triphasé à cage d'écureuil	Moteur haute fréquence triphasé à cage d'écureuil	Moteur haute fréquence triphasé à cage d'écureuil
Tension (V)	42	42	42
Courant (A)	7	10	17,3
Fréquence (Hz)	200	200	200
Câble de raccordement (m)	15	15	15

Annexe 4.2 Caractérisation de l'amplitude des aiguilles vibrantes**Aiguille Atlas Copco à 47,3 Hz (gauche) et 93,7 (droite) Hz****Aiguille Atlas Copco à 143,4 Hz (gauche) et 191,6 (droite) Hz**

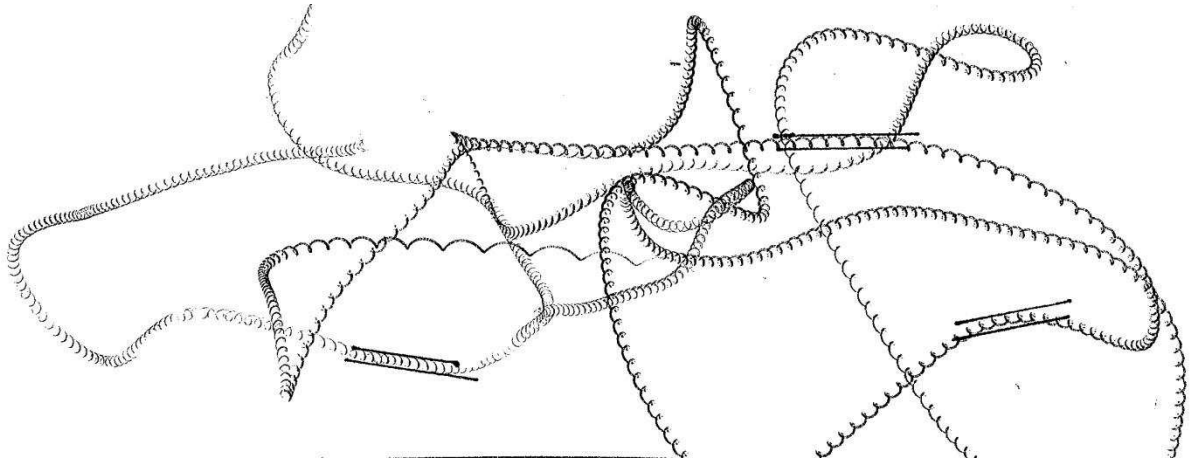
Aiguille Atlas Copco à 228,1 Hz



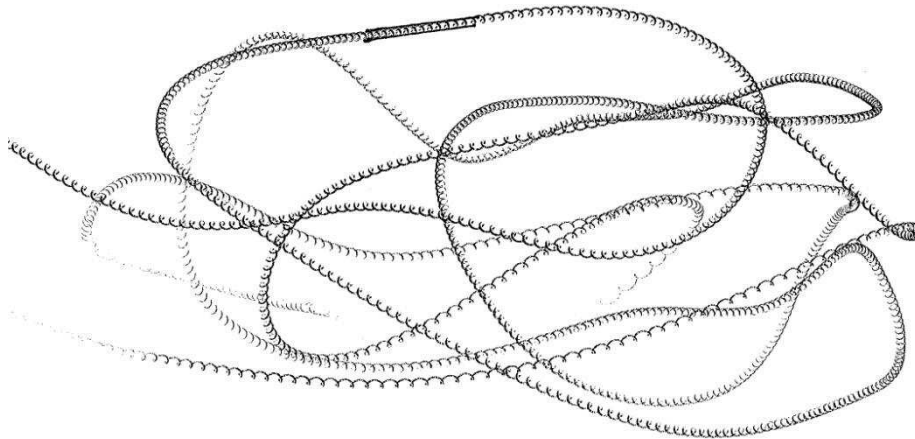
Aiguille Wackerneuson IREN 38 à 35 Hz



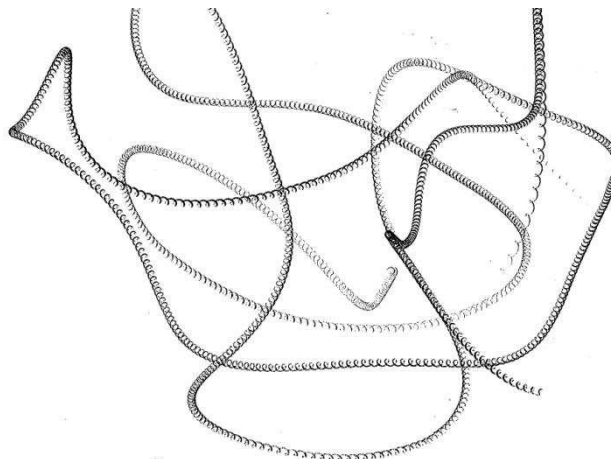
Aiguille Wackerneuson IREN 38 à 75 Hz



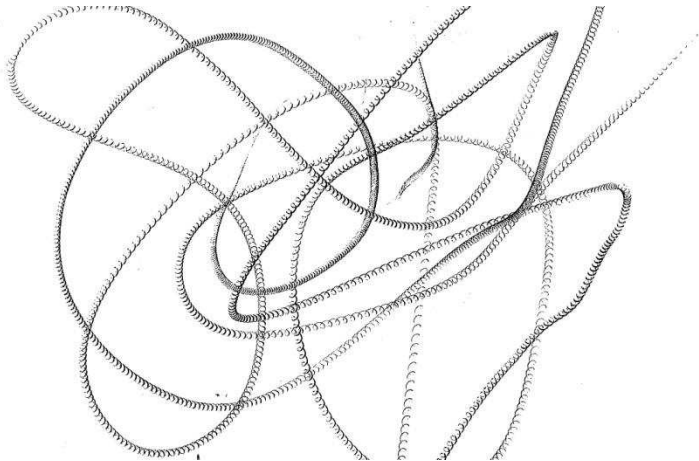
Aiguille Wackerneuson IREN 38 à 115 Hz



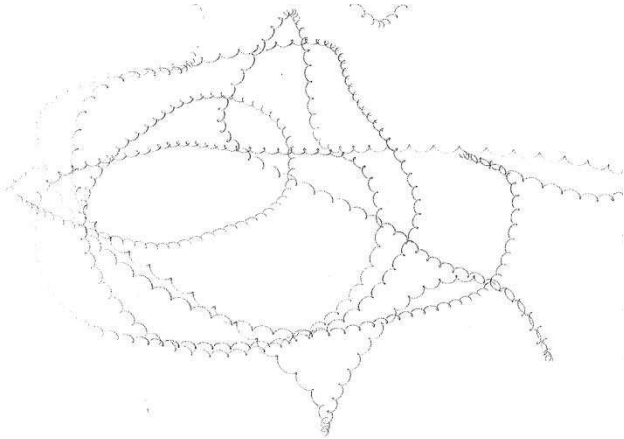
Aiguille Wackerneuson IREN 38 à 150 Hz



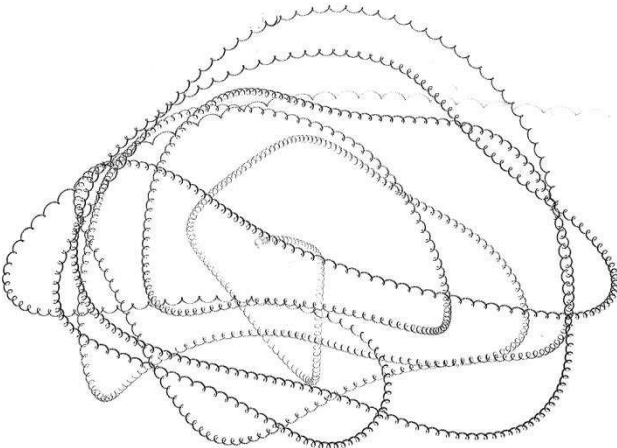
Aiguille Wackerneuson IREN 38 à 190 Hz



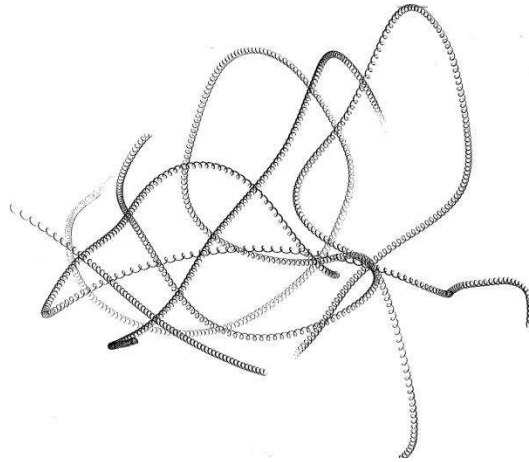
Aiguille Wackerneuson IREN 45 à 35 Hz



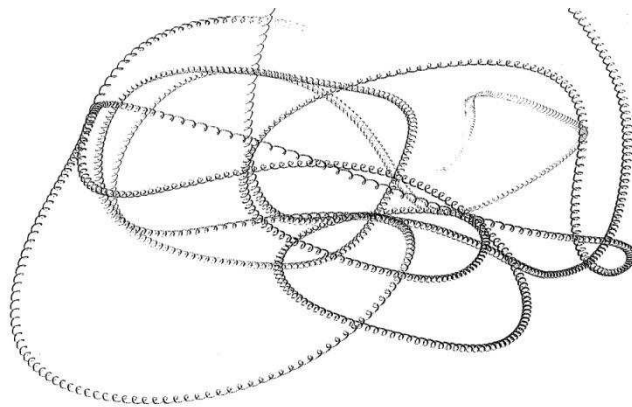
Aiguille Wackerneuson IREN 45 à 75 Hz



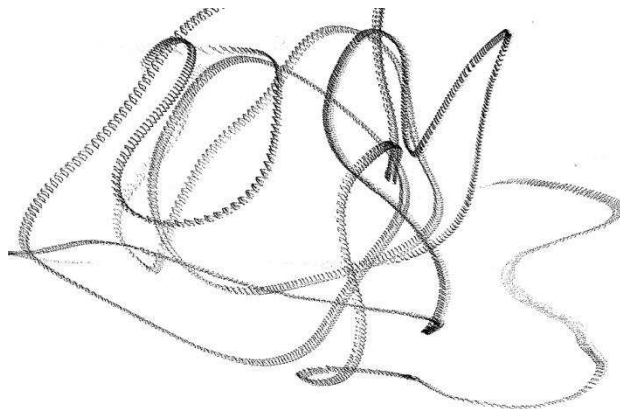
Aiguille Wackerneuson IREN 45 à 115 Hz



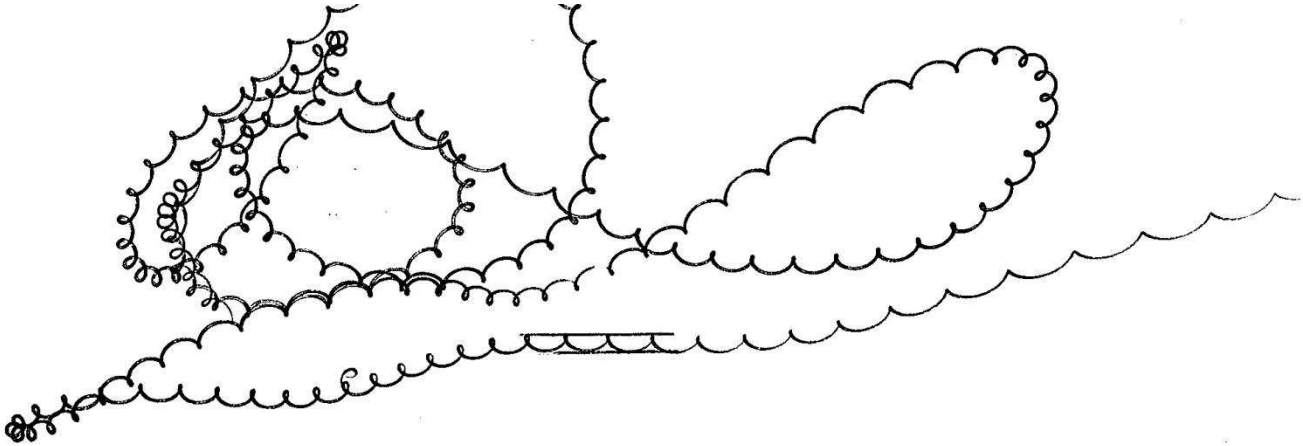
Aiguille Wackerneuson IREN 45 à 150 Hz



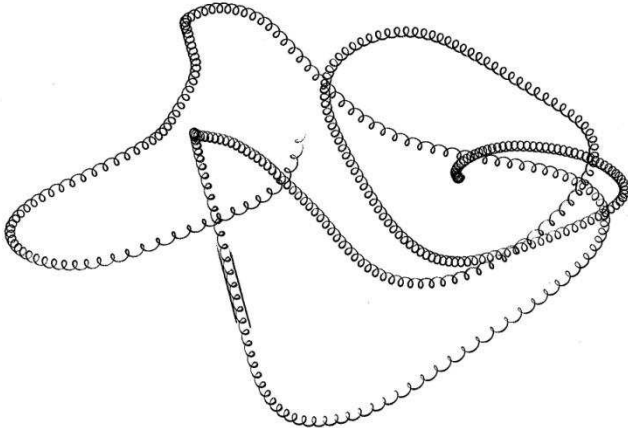
Aiguille Wackerneuson IREN 45 à 190 Hz



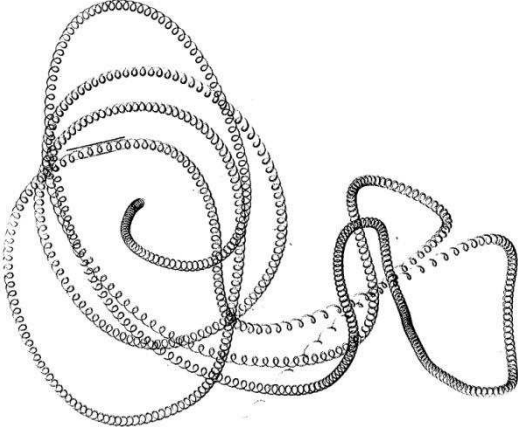
Aiguille Wackerneuson IREN 57 à 35 Hz



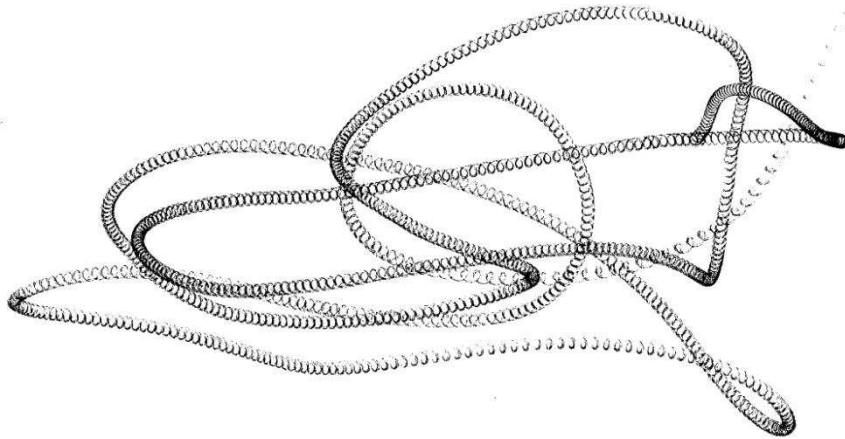
Aiguille Wackerneuson IREN 57 à 75 Hz



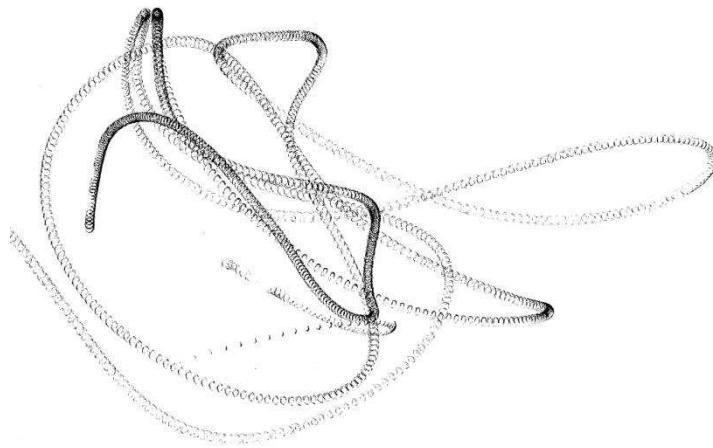
Aiguille Wackerneuson IREN 57 à 115 Hz



Aiguille Wackerneuson IREN 57 à 150 Hz



Aiguille Wackerneuson IREN 57 à 190 Hz



Annexe 4.3 Caractéristiques techniques du malaxeur Eirich Type R08



Leaflet no. MR.1412-2-en

EIRICH Intensive Mixer

Type R08 / R09 / R15



- economic efficiency
- reliability
- low maintenance



agglomerating - batching - coating - cooling - conveying - deaerating - defibrating - disagglomerating - dispersing - dissolving - emulsifying - evacuating - granulating - grinding - drying - heating - impregnating - mixing - moistening - pelletizing - plasticizing - reacting - suspending - stripping - slurring - waterproofing - weighing - measuring - controlling

Range of application

Intensive mixer for excellent results in the preparation of materials of all consistencies – from powdery to stiff-plastic.

Type	Capacity*		Pan drive kW max.	Rotor drive kW max.	Weight approx. kg
	liters	kg max.			
R08	75	120	3.75	22	950
R09	150	240	6.25	22	1200
R15	500	800	13.5	55	2800
RV15	750	1200	13.5	55	3000

* product-specific

Advantages of this mixer type

1. Shortest mixing times yet optimum homogenization of products
2. No entrainment of product from one mix to the next
3. Low cleaning effort
4. Short set-up times when tools are changed
5. Reliable reproducibility of product quality and batch times

Function

The globally acclaimed EIRICH mixing principle guarantees a constant, reproducible quality of the mix at shortest mixing times – in continuous or batchwise mode of operation.

Key components:

1. An inclined rotating mixing pan
2. A single rotating mixing tool
3. An adjustable multi-purpose tool

Feeding

From above

Emptying

Bottom discharge

Servicing and cleaning

A big inspection door ensures easy access to the mixing pan. Wall, bottom and cover of the mixing pan are smooth and therefore easy to clean. A multi-purpose tool which simultaneously acts as a scraper reliably prevents material accumulations.

Drives / Motors

Mixing pan:

Friction wheels or gear rim

Mixing tools:

Standard motor with V-belt or gear motor

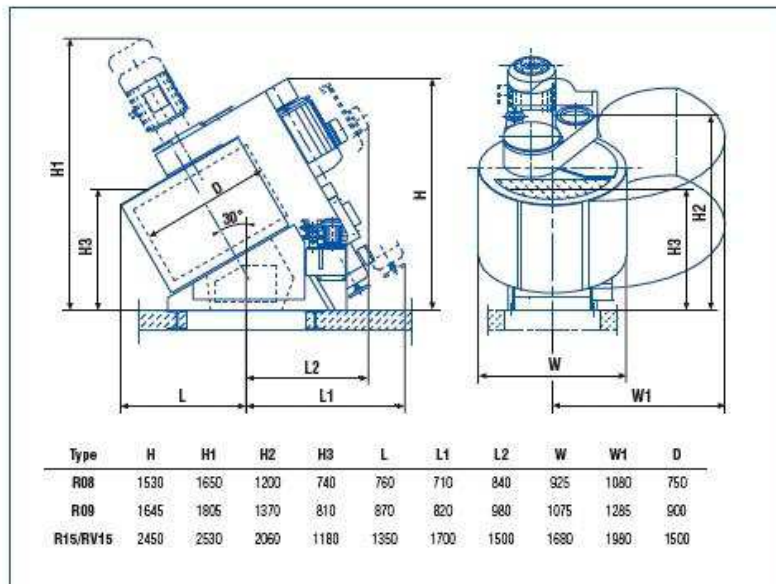
Control

All mixer types can be supplied with control concepts supporting automatic formula management.

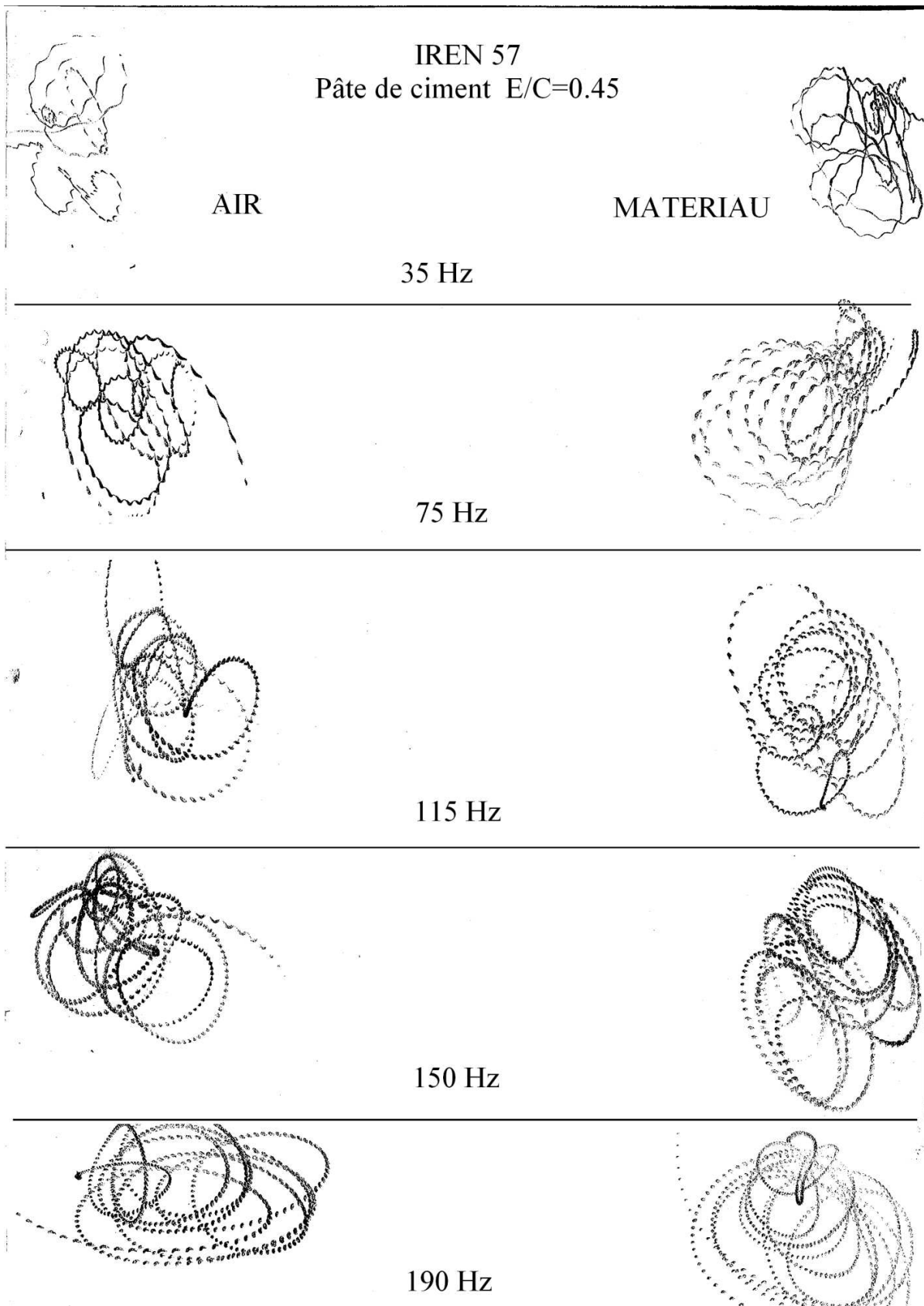
These control concepts optimize production and log each batch as the basis for a well organized quality assurance.

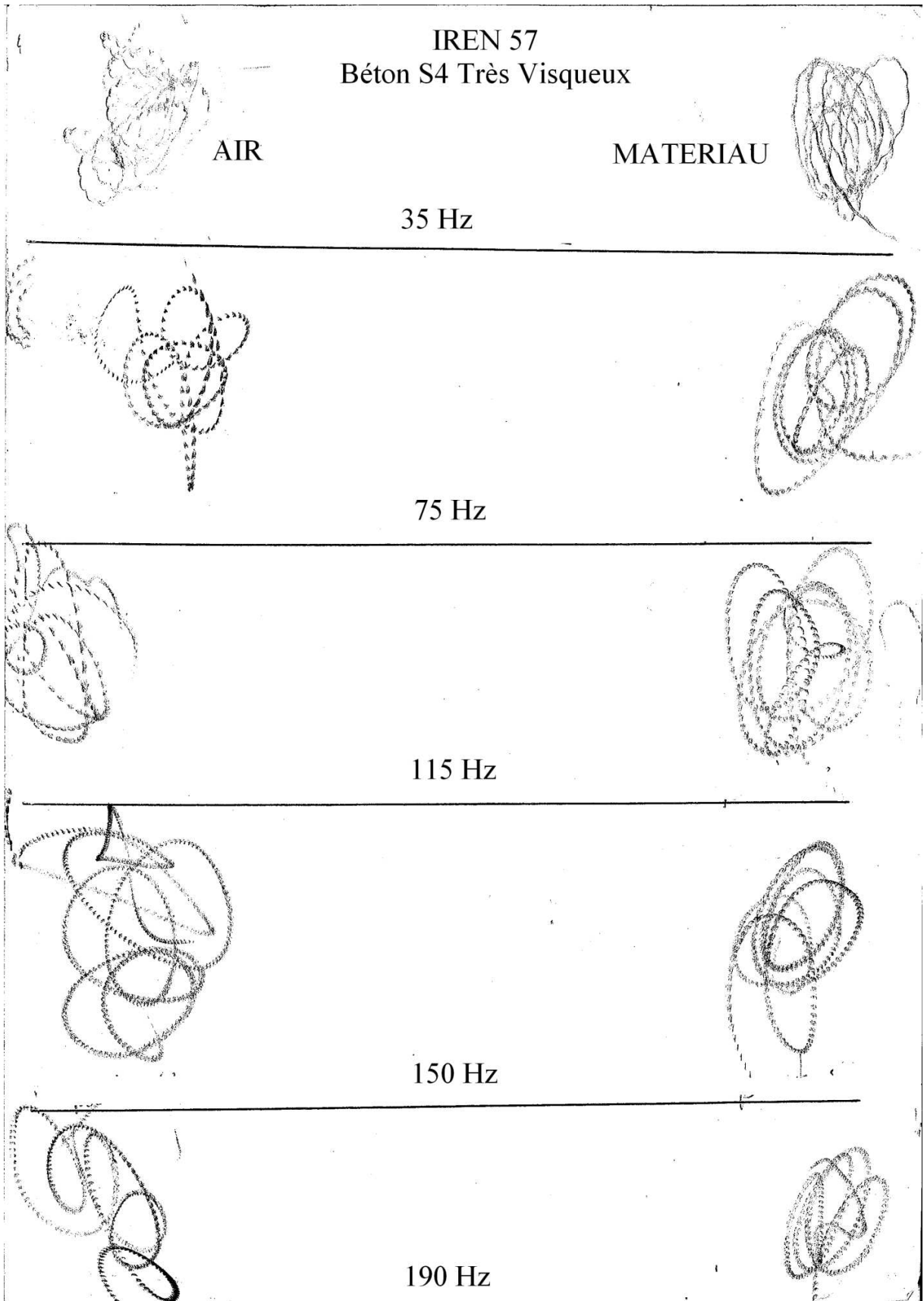
Special version

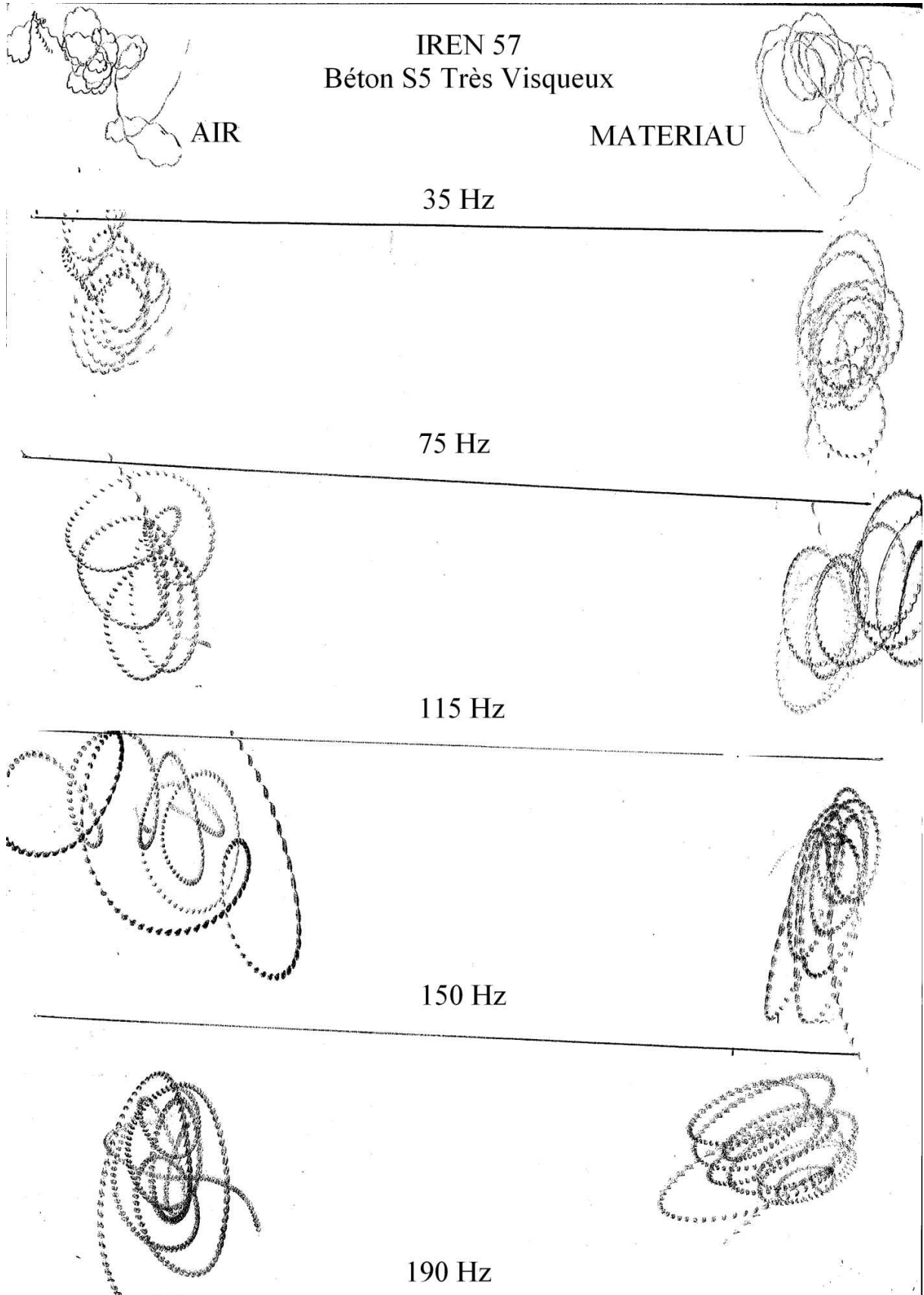
All parts in contact with the mix can be made of special materials.



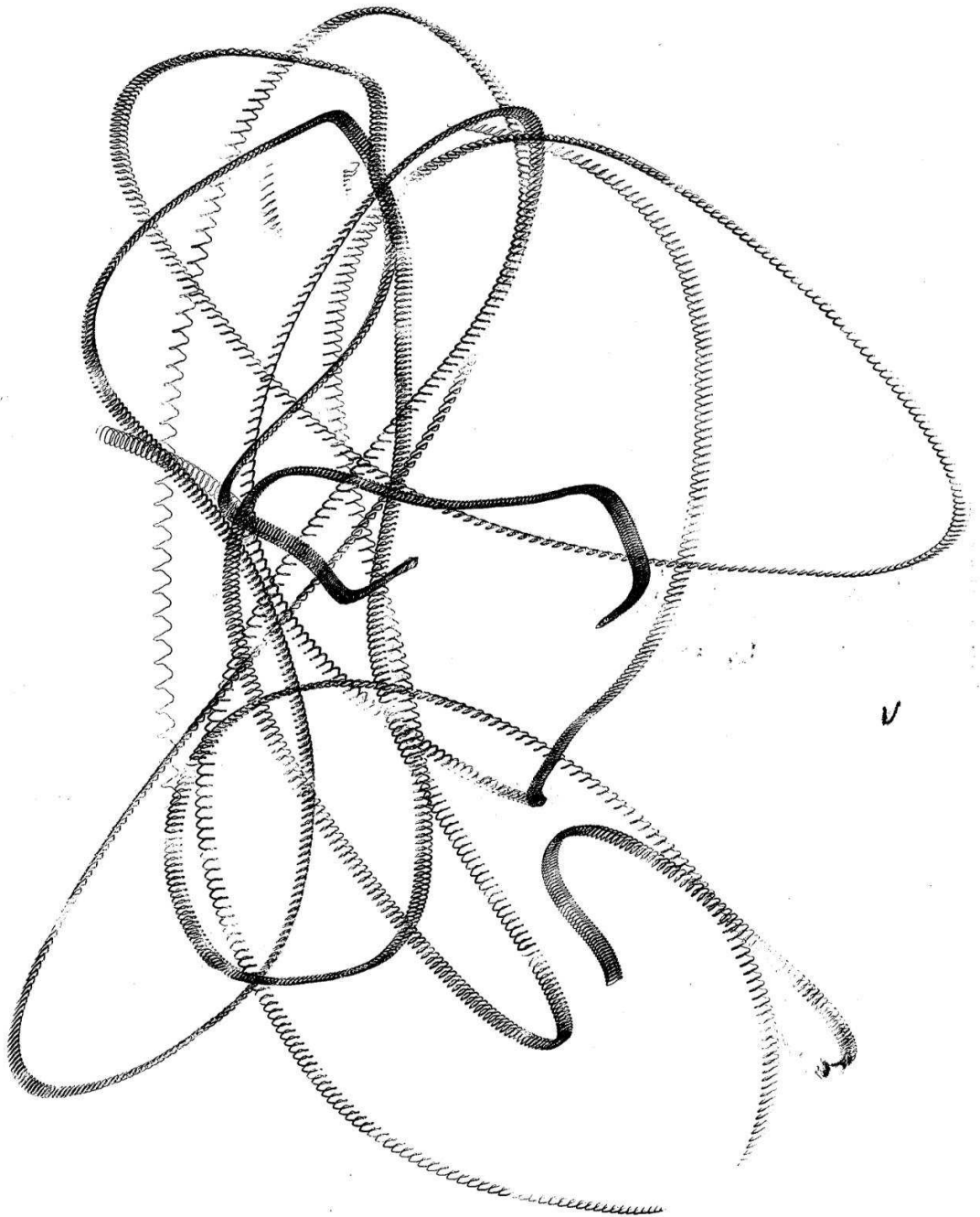
Annexe 4.4 Mesures comparatives des paramètres de vibration d'IREN 57 dans l'air et dans le matériau.







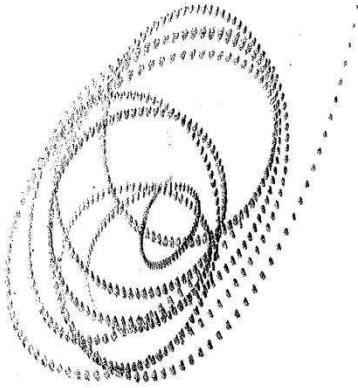
Annexe 4.5 Aiguille vibrante H45



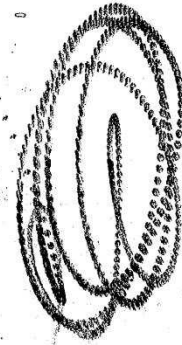
Annexe 4.6 Mesures comparatives des paramètres de vibration de l'aiguille H25 dans l'air et dans le matériau

Aiguille vibrante H45 + M 3000
Béton visqueux

AIR

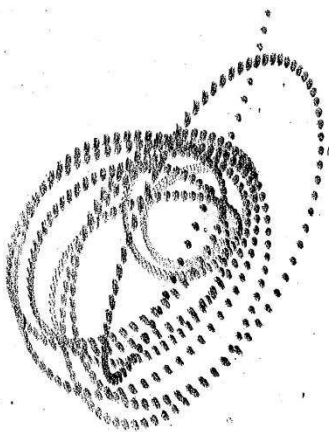


MATERIAU

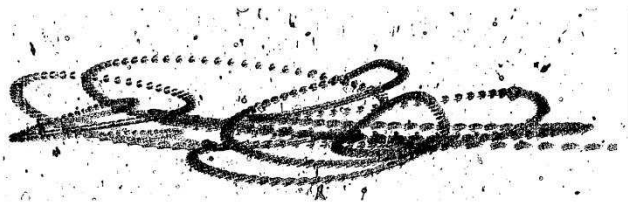


Aiguille vibrante H45 + M 3000
Béton très visqueux

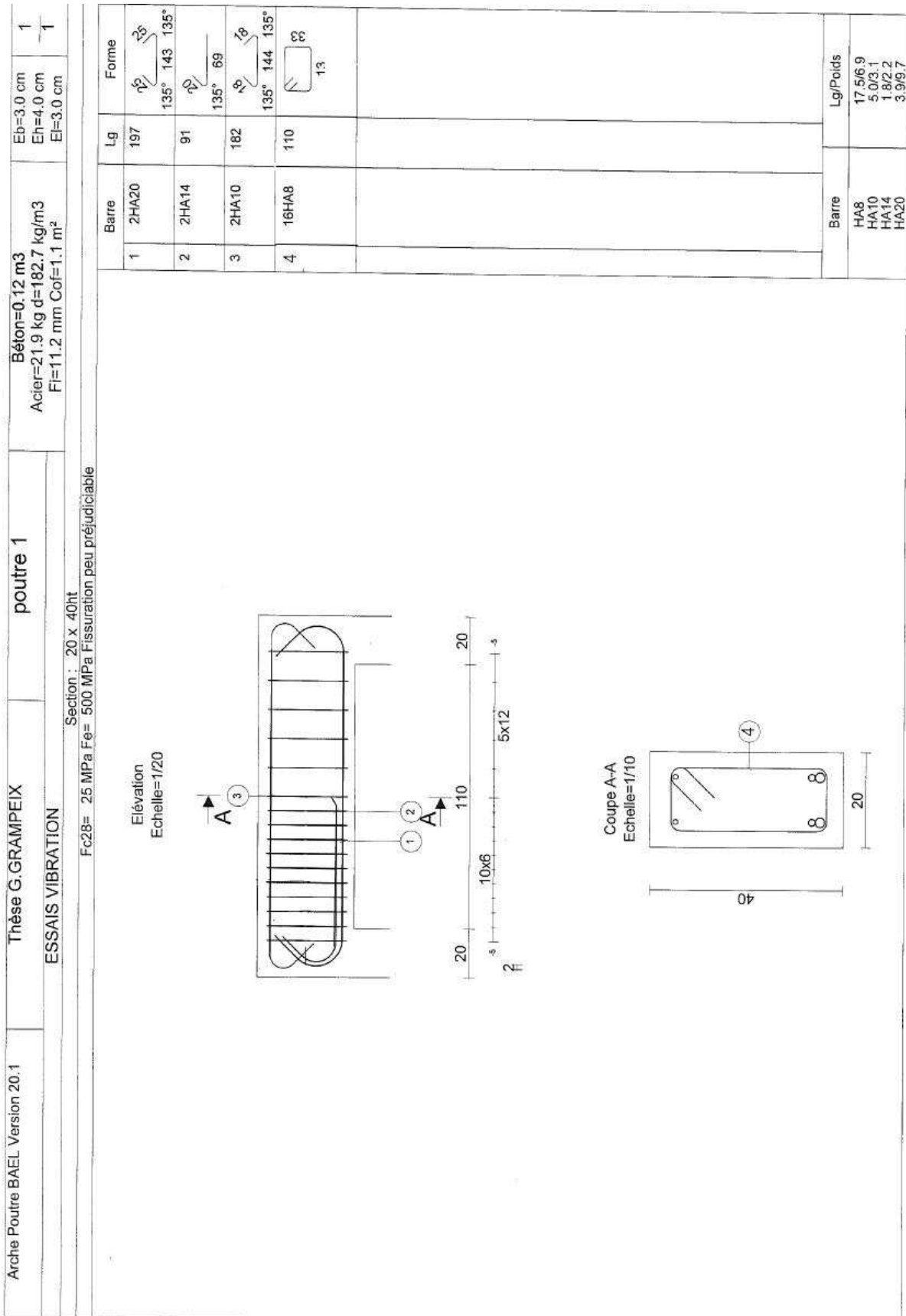
AIR



MATERIAU



Annexe 4.7 Plan de la cage d'armature pour les poutres en béton armé



Annexe 4.8 Description des chantiers

Le chantier de la Gare Rosa Parks – Groupe EIFFAGE

Le projet a pour objectif la réalisation des travaux de voies, de génie civil liés aux terrassements, aux quais et à l'assainissement/hydraulique des voies nouvellement créées et remaniées aux abords de la future gare ROSA PARKS dans le 19^e arrondissement de la ville de PARIS sur la ligne ferroviaire de Paris-Est (ligne PARIS – MULHOUSE).

La durée totale des travaux s'étale sur près de trois ans. Ce chantier a démarré en novembre 2012 et devrait se terminer par une mise en fonction de la gare à la fin de l'année 2015.

Le marché a pour objet la réalisation des travaux relatifs à l'élargissement de la plateforme ferroviaire de Paris Est ainsi qu'à la création de murs de soutènement dans le cadre des projets de la future gare Rosa Parks. Les travaux consistent succinctement à la réalisation d'une plateforme liée à l'infrastructure ferroviaire. Puis, des modifications du tracé des voies existantes couplées aux réseaux d'assainissement permettent *in fine* la création du quai de la nouvelle gare.

Pour l'ensemble de ces réalisations, le montant total du marché s'élève à environ 13 millions d'euros.

Sur ce chantier, nous avons réalisé des poutres à partir de coffrages traditionnels en bois comme présentés sur la figure ci-dessous. Les poutres possèdent les mêmes dimensions que celles fabriquées en laboratoire, soient 1,50m/0,40m/0,20m (longueur/hauteur/largeur). Le vibreur employé a un diamètre de 25 mm.

Pour supporter la pression hydrostatique du béton à l'état frais, nous avons mis en place des bastings et des étriers sur les faces coffrantes. Ces dispositions constructives assurent une rigidité de qualité du moule.



A partir de l'ensemble des essais réalisés *in situ*, nous pouvons réaliser un classement comparatif des rigidités des coffrages, s'étalant de très rigides à souples. Ce type de réalisation se situe en deuxième position.

Le chantier de la Tour Majunga – Groupe EIFFAGE

Le projet de la Tour Majunga a pour objectif la réalisation d'un Immeuble de Grande Hauteur (IGH) de 195 m de haut situé à Puteaux-La Défense. Ce gratte ciel repose sur un raider de 3 m d'épaisseur soit environ 6 000m³ de béton. Plusieurs centaines de colonnes de renforcement – jet grouting – sont coulées dans le sol.

L'ensemble des étages de ce gratte-ciel permet d'obtenir une Surface Hors Œuvre Net (SHON) d'environ 69 500 m² répartie dans 47 niveaux. En plus de sa complexité d'exécution en zone urbaine, cet immeuble présente des façades inclinées afin d'optimiser l'ensoleillement des locaux et de minimiser l'impact sur les bâtiments voisins. De plus, d'un point de vue thermique, l'ouvrage vise le label BBC Effinergie et la certification NF HQE.

Le démarrage des travaux de la Tour ont débuté en janvier 2011 et doivent se terminer avec la livraison de l'opération à la fin de l'année 2013. Enfin, le montant total de cette opération est de 199 millions d'euros.

Sur ce chantier, nous avons réalisé des poutres à partir de coffrages traditionnels en bois comme présentés sur la figure ci-dessous. Les poutres possèdent les mêmes dimensions que celles fabriquées en laboratoire, soient 1,50m/0,40m/0,20m (longueur/hauteur/largeur). Le vibreur employé a un diamètre de 50 mm.

Pour supporter la pression hydrostatique du béton à l'état frais, nous avons mis en place de nombreux bastings et tiges de serrages sur les faces coffrantes. Ces dispositions constructives assurent une forte rigidité du moule.



A partir de l'ensemble des essais réalisés *in situ*, nous pouvons réaliser un classement comparatif des rigidités des coffrages, s'étalant de très rigides à souples. Ce type de réalisation se situe en première position.

Le chantier de couverture des voies SNCF – Groupe EIFFAGE

Le projet de recouvrement des voies SNCF a pour objectif de réaliser une promenade plantée au-dessus d'un espace ferroviaire. Cette nouvelle voie de circulation se situe dans le prolongement de la Bibliothèque Nationale Française (BNF) et se termine au niveau des Halles Freyssinet dans le 13^{ème} arrondissement de Paris.

Cet ouvrage, enjambant les lignes ferroviaires SNCF, repose sur deux culées d'extrémité situées aux abords des voies et une pile centrale. Ces systèmes d'appuis en béton armé supportent un tablier en construction mixte acier/béton sur lequel sera mise en place la future promenade.

Cette réalisation a démarré en août 2012 et se termine en décembre 2013 avec un montant des travaux d'environ 18 millions d'euros.

Sur ce chantier, nous avons réalisé des poutres à partir de coffrages traditionnels en bois comme présentés sur la figure ci-dessous. Les poutres possèdent les dimensions suivantes 3,00m/0,50m/0,20m ou 0,40m (longueur/hauteur/largeur). Le vibreur employé a un diamètre de 60 mm.

Pour supporter la pression hydrostatique du béton à l'état frais, nous avons mis en place de nombreux bastings et tiges de serrages sur les faces coffrantes. Ces dispositions constructives assurent une forte rigidité du moule.



A partir de l'ensemble des essais réalisés *in situ*, nous pouvons réaliser un classement comparatif des rigidités des coffrages, s'étalant de très rigides à souples. Ce type de réalisation se situe en première position, égalité avec les coffrages réalisés sur le chantier de la Tour Majunga.

Le chantier du Coruscant II – Groupe VINCI

Ce projet a pour objectif la réalisation d'un complément administratif au pôle audiovisuel des studios télévisuels du Lendit avec une augmentation de la capacité des locaux d'activités. L'ensemble se situe au sein de la Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) du Landy Pleyel dans la ville de Saint Denis.

Cette réalisation consiste en en la création de 11 000 m² de bureaux sur sept niveaux de bâtiment en deux ailes distinctes et 3 000 m² de locaux d'activités sur deux niveaux rattachés. De plus, cet ouvrage est complété par un parking disposé en deux niveaux avec une capacité d'accueil de 210 places..

Les opérations ont démarré en juin 2012 et devraient se prolonger jusqu'en février 2014 pour un montant total de 28 millions d'euros. Une fois terminé, ce projet atteindra le label BBC, et visera le label HQE.

Sur ce chantier, nous avons réalisé des poutres à partir de coffrages métalliques de grandes dimensions comme présentés sur la figure ci-dessous. La longueur du banc de coffrage dépasse fortement celle de nos échantillons. Un arrêt de coulage est mis en place. Les poutres d'études possèdent les dimensions suivantes 3,00m/0,50m/0,20m ou 0,40m (longueur/hauteur/largeur). Le vibreur employé a un diamètre de 50 mm.

Pour supporter la pression hydrostatique du béton à l'état frais, le banc de coffrage possède des raidisseurs. Ces dispositions constructives assurent la rigidité du moule.



A partir de l'ensemble des essais réalisés *in situ*, nous pouvons réaliser un classement comparatif des rigidités des coffrages, s'étalant de très rigides à souples. Ce type de réalisation se situe en troisième position. Les dimensions du banc de coffrage sont fortement supérieures à celles de nos échantillons.

Annexe 4.9 Formulations des bétons de chantierClient/Chantier : EIFFAGE TP –Rosa Parks – Paris 19Dénomination : BPS NF EN 206-1 C35/45 CEM III/A 42.5 N LH CE PM ES CP NF Dmax=20mm S5
XF-XC3-XC4 XD1(F) CL 0,65

DOSAGES ET PROVENANCES DES CONSTITUANTS				
CONSTITUANTS		DOSAGE (/m ³) Granulats secs	PROVENANCES	
			Fournisseurs	Carrières ou usines
CEM III/A 42.5 N LH CE PM ES CP1	kg	370	HOLCIM (France) SAS	LUMBRES
4/20 SA LA FERRE SEMI-	kg	290	HOLCIM GRANULATS (France)	LA FERRE
4/10 VILLENEUVE	kg	520	HOLCIM GRANULATS (France)	VILLNEUVE/CHATE
0/4 VIMPELLE	kg	190	HOLCIM GRANULATS (France)	VIMPELLES
CHRYSOFLUID OPTIMA 100	kg	4,625	CHRYSO SAS	SERMAISE
L AUCRAIS FILCARB 0/100	kg	80	CARMEUSE France SAS	AUCRAIS
EAU NATURELLE	L	185		

Client/Chantier : EIFFAGE TP –Rosa Parks – Paris 19Dénomination : BPS NF EN 206-1 C30/37 CEM III/A 42.5 N LH CE PM ES CP1 NF Dmax=20mm
S180 XF-XC3-XC4 XD1 XF1(F) CL 0,65

DOSAGES ET PROVENANCES DES CONSTITUANTS				
CONSTITUANTS		DOSAGE (/m ³) Granulats secs	PROVENANCES	
			Fournisseurs	Carrières ou usines
CEM III/A 42.5 N LH CE PM ES CP1	kg	350	HOLCIM (France) SAS	LUMBRES
4/20 SA LA FERRE SEMI-	kg	500	HOLCIM GRANULATS (France)	LA FERRE
4/10 VILLENEUVE	kg	400	HOLCIM GRANULATS (France)	VILLNEUVE/CHATE
0/4 VIMPELLE	kg	840	HOLCIM GRANULATS (France)	VIMPELLES
CHRYSOFLUID OPTIMA 100	kg	2.45	CHRYSO SAS	SERMAISE
EAU NATURELLE	L	185		

Observation : S18 : Consistance visée = 180mm + ou – 30 mm. Correspond au tableau II de la norme
NF EN 206

Client/chantier : EIFFAGE/Tour Majunga

Dénomination : BPS C60/75 CEMI D14 (200+/-30) XF1

Dmax	14,0	Liant équ.	400
Consistance	S5 > 210 mm	Eau efficace	157
Résistance garantie	60 MPa Cylindre	Eau eff / liant équ.	0,39
Classe d'exposition	XF1 et XC3.XC4.XD1(F)	A dans liant équ.	0
Classe de chlorure	0,40	Dosage mini	301
E/C maxi	0,60	G/S	1,20

Type	Constituant	Libellé	Quantité (kg/m ³)
Adjuvant	GLENIUM 27	Glenium 27	5,60
Ciment	I52LH	CEM I 52,5N CP2 le Havre	400
Eau	EAU NATUR	EAU NATURELLE	170
Gravillons	3,45/14 VH	4/14 cal vallée heureuse	1000
Sables	0/4 BER	0/4 rc NF Bernières	830
TOTAL			2 405,60

Client/chantier : EIFFAGE/Tour Majunga

Dénomination : BPS C40/50 CEMI D20 (200+/-30) XF1

Dmax	20	Liant équ.	370
Consistance	S5 > 210 mm	Eau efficace	161
Résistance garantie	40 MPa Cylindre	Eau eff / liant équ.	0,44
Classe d'exposition	XF1 et XC3.XC4.XD1(F)	A dans liant équ.	0
Classe de chlorure	0,40	Dosage mini	280
E/C maxi	0,60	G/S	1,10

Type	Constituant	Libellé	Quantité (kg/m ³)
Adjuvant	GLENIUM 27	Glenium 27	4,81
Ciment	I52LH	CEM I 52,5N CP2 Le Havre	370
Eau	EAU DECANT	EAU DECANTEE	180
Gravillons	4/20 JUM	4/20 SCL Jumieges	940
Sables	0/4 BER	0/4 rc NF Bernières	850
TOTAL			2 344,81

Client/chantier : EIFFAGE/Voies SNCF

Dénomination : BPS C45/55 CEM III D20 (210+ou-30) XF1 Retard

Dmax	20,0	Liant équ.	420
Consistance	210 + ou – 30 mm	Eau efficace	175
Résistance garantie	45 MPa Cylindre	Eau eff / liant équ.	0,42
Classe d'exposition	XF1 et XC3.XC4.XD1(F)	A dans liant équ.	0
Classe de chlorure	0,65	Dosage mini	280
E/C maxi	0,60	G/S	1,10

Type	Constituant	Libellé	Quantité (kg/m ³)
Ciment	III52ES LH	CEM III/A 52,5L PMES CP1 Le Havre	420
Sable	0/4BER	0/4 rc NF Bernière	830
Gravillon	6/20 C VG	6,3/20 Vallée Heureuse	910
Adjuvant 1	391N	Pozzolith 391 N	1,05
Adjuvant 2	GLENIUM 27	Glenium 27	5,04
Eau	EAU NATUR	Eau naturelle	185
TOTAL			2 351,09

Client/chantier : EIFFAGE/Voies SNCF

Dénomination : BPS C60/75 CEM III D20 (210+ou-30) XF1 Retard

Dmax	20,0	Liant équ.	430
Consistance	210 + ou – 30 mm	Eau efficace	151
Résistance garantie	60 MPa Cylindre	Eau eff / liant équ.	0,35
Classe d'exposition	XF1 et XC3.XC4.XD1(F)	A dans liant équ.	0
Classe de chlorure	0,65	Dosage mini	280
E/C maxi	0,60	G/S	1,10

Type	Constituant	Libellé	Quantité (kg/m ³)
Ciment	III52ES LH	CEM III/A 52,5L PMES CP1 Le Havre	430
Sable	0/4BER	0/4 rc NF Bernière	845
Gravillon	6/20 C VG	6,3/20 Vallée Heureuse	930
Adjuvant 1	391N	Pozzolith 391 N	1,08
Adjuvant 2	GLENIUM 27	Glenium 27	6,02
Eau	EAU NATUR	Eau naturelle	160
TOTAL			2 372,10

Client/chantier : PETIT ENTREPRISE/ZAC du Landy Pleyel

Dénomination : BPS C25/30 CEMI+Cv D22 S3 XF1