



HAL
open science

Optimisation de la dispersion des fibres pendant le cycle de malaxage des bétons industriels

Marie David

► **To cite this version:**

Marie David. Optimisation de la dispersion des fibres pendant le cycle de malaxage des bétons industriels. Génie civil. Université Paris-Est, 2014. Français. NNT : 2014PEST1157 . tel-01143363

HAL Id: tel-01143363

<https://theses.hal.science/tel-01143363>

Submitted on 17 Apr 2015

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.

THÈSE

présentée à

UNIVERSITÉ PARIS-EST

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES, INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT

par **Marie DAVID**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : **Génie civil**

Optimisation de la dispersion des fibres pendant le
malaxage des bétons fibrés

Date de soutenance : 30 juin 2014

Jury :

G. DE SCHUTTER	Rapporteur
C. LANOS	Rapporteur
B. CAZACLIU	Examineur
S. DEHAUDT	Examineur
N. ROUSSEL	Directeur de thèse

Pour la liberté et pour le rire,

Je suis Charlie

Résumé

L'homogénéité des caractéristiques est garantie par une présence en fibres constante en tout point du matériau.

La dispersion d'une espèce dans une autre est régie par des mécanismes de convection et/ou de diffusion. Pour des objets de la taille d'une fibre métallique, ces deux phénomènes trouvent leur origine dans le cisaillement appliqué au matériau, une donnée souvent inconnue et difficile à mesurer dans les malaxeurs à béton. Dans un premier temps, nous proposons une méthode permettant d'estimer l'efficacité d'un malaxeur. Elle est basée sur la mesure du diamètre moyen de granulés de ciment fabriqués dans ce malaxeur. Nous montrons que la mesure de ce diamètre moyen permet de quantifier le cisaillement moyen. Dans un second temps, nous présentons un moyen de mesurer la dispersion des fibres pendant le malaxage des bétons basé sur des mesures de résistivité électrique. Puis, dans un troisième temps, nous mesurons la présence en fibres pendant le malaxage et relierons le temps nécessaire à l'obtention d'une répartition homogène à la capacité de cisaillement du malaxeur.

Mots clés : Malaxage – Béton fibré – Fibres – Dispersion des fibres – Résistivité électrique – Granulation humide

Abstract

Fibers are added to the concrete to give it new properties. The homogeneity of these characteristics is assured by a constant presence of fiber as the whole material. The dispersion of one species within another is governed by convection and/or diffusion mechanisms. Concerning objects having the size of steel fiber, these two phenomena are caused by the shearing applied to the material, an unknown and difficult to measure datum in the case of concrete mixer. To begin, a method allowing to estimate the mixer's shearing is suggested. This method is based on the measurement of the medium diameter of cement aggregates produced in the mixer. The link between the medium diameter and the mean shearing is established. In a second time, a mean to measure fiber dispersion from electrical resistivity measurements during the concrete mixing is presented. Then, in a third time, fiber dispersion are measured during mixing. The link between necessary time to obtain an homogeneous distribution and the mixer's shearing ability is established.

Keywords : Mixing- Fiber Reinforced concrete – Fiber dispersion – Electrical resistivity – Wet granulation

Remerciements

A l'heure où j'écris ces lignes, le manuscrit est terminé, la soutenance est passée et une nouvelle aventure professionnelle a commencé. Il ne s'agit à présent plus de conclure ou d'envisager des perspectives mais de se rappeler de toutes les personnes concernées par ce travail de thèse. Et de leur dire MERCI.

En premier lieu, je tiens à remercier Nicolas Roussel, mon directeur de thèse, d'avoir accepté d'encadrer ce travail. Merci pour ses conseils, tout au long de la thèse, pour ces corrections rapides lors de la rédaction (*et pour ses relances pour la correction finale du manuscrit*). Merci surtout pour la confiance qu'il m'a accordé pendant ces trois années.

Je tiens également à remercier François Fernandez et Sylvain Dehaut pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en m'accordant une place au sein du pôle Technologie du Béton du Cerib.

J'en profite pour remercier toutes les personnes que j'ai pu côtoyer au CERIB et particulièrement la Direction Matériau et Technologie du Béton...Bien évidemment, je n'oublie pas feu la Direction de l'Appui Industriel.

Merci à Patrick Rougeau et Philippe Fransisco, pour leur participation à cette étude. Je tiens également à remercier Frédéric de Backer, Diane Achard et Olivier Gradelle d'avoir gardé un œil sur ce travail. Un grand merci à Annabelle Brizou de m'avoir permis de faire des mesures sur des sites industriels.

Cette thèse a également permis des échanges avec le laboratoire allemand de l'IAB (Weimar). Je souhaite donc remercier Marc Lebrun, de m'avoir impliqué dans cette collaboration. Merci au Dr Palzer, à Knut Krenzer, Mirko Landmann et David Abouem pour leur accueil toujours chaleureux.

Merci aux différentes personnes de l'IFSTTAR croisées durant cette thèse, pour leur sympathique accueil lors de chacune de mes venues. Hela, Rim, Jennifer, bon courage pour la fin de votre thèse ! Merci à Jeanne et Pauline pour leur réactivité incroyable face aux problèmes administratifs.

Bien évidemment, je remercie Geert de Schutter et Christophe Lanos d'avoir rapporté ce travail. Merci à Bogdan Cazacliu et Sylvain Dehaut de l'avoir examiné. Merci, encore, à Nicolas de l'avoir dirigé. Merci pour vos remarques et vos questions qui trouveront, je l'espère, réponse dans cette dernière version du manuscrit...

J'aimerais également remercier vivement l'ensemble de l'équipe R&D de Chryso pour l'accueil qui m'a été réservé ; nul doute que cette nouvelle expérience sera tout aussi intéressante que ces années de thèse ! Un merci tout particulier à Pascal Boustingorry et Amjad Mallat pour leur sympathique présence lors de ma soutenance.

Cette thèse n'aurait sans doute pas été la même sans eux, je remercie donc ...

...Pauline, pour avoir partagé avec moi les premiers essais boulettes.

...Florian, pour avoir été mon colocataire de bureau

...Patrick, pour sa gestion optimale du stock de café

...Odile, pour ses compétences wordistiques, ses bonnes idées et ses propositions de voyage

...Benjamin Helnan-Moussa, pour nos conversations palpitantes sur Deborah

...Thomas, Loïc et Nancy, pour avoir été de super stagiaires

...Thomas (*un autre*) et Loïc (*le même*) pour leur art dans l'organisation de goûter

...Samone, Félicien, Guillaume et Nicolas, pour avoir un jour fait partie de la DAI

...Céline et Catherine, pour m'avoir expliqué le « Processus Etudes & Recherches » et ces moments conviviaux à la cantine

...Céline (*une autre*), pour nos fous rires quotidiens et son *amazing* attitude

...Chantal, pour le temps consacré à l'impression de ma thèse

...Mohamad, Mickaël et Amine pour nos trajets communs

...Stéphanie, pour ces invitations de soutenance qui ont tant d'allure

A ce stade, je suis quasi-certaine d'avoir oublié beaucoup de personnes pourtant très importantes ; Qu'elles trouvent dans ces lignes mes excuses et la certitude que, pour faire d'exhaustifs remerciements, il faut faire une liste.

Enfin, et parce que ma vie ne serait pas pareille sans eux, merci à...

...ma famille et mes amis, pour leur soutien et leur intérêt (*peut-être feint !*), pour cette thèse.

...Loïc, mon incroyable neveu, d'être si génial

...Tim, son petit frère, si jeune et déjà tellement génial aussi

...leurs parents, d'avoir fait de moi une tatie comblée (*et d'autres trucs, mais le plus important, c'est quand même ça*)

...Bastien, pour nos échanges philosophiques (*si si*) et notre longue amitié

...Benjamin, pour la folie et le bonheur que tu apportes dans notre quotidien (*je fais un cœur avec mes mains*)

...Pinpin (*parce que tu es délabré mais toujours à mes côtés*).

Pour Loïc...

Tu as été mon stagiaire, mon collègue, mon ami, et tu nous as subitement quittés ce 18 décembre...Aucun mot ne saurait définir ma peine ni hélas te ramener parmi nous. Je préfère donc dans ces lignes exprimer toute la chance que j'ai eu de te connaître...

Ton CV est arrivé un peu par hasard entre mes mains mais il m'a plu, tu es donc venu passer un entretien (et tu es arrivé en retard). Tout s'est bien passé et, le 2 avril 2012, tu as débuté ton stage de fin d'étude. Tu as commencé par me demander un jour de congé pour soucis administratif puis nous avons commencé à ensemble "faire avancer la Science". Ta contribution à cette thèse est importante : la Rhobox, c'est toi ! La caractérisation du principe de mesure avec une quarantaine de pot de gel coiffant rose, c'était avec toi aussi ; c'était un peu crado, mais on a bien rigolé.

6 mois au CERIB, et quelques soirées au foyer plus tard, tu devenais ingénieur le 6 septembre 2012. J'étais là, fière de toi, comme tu étais là deux ans plus tard, avec un magnet en peluche, pour ma soutenance de thèse. De notre duo, je retiens bien sur cette synergie professionnelle, mais pas que.

Je retiens ton style vestimentaire, tes casquettes US, même le jour de ta soutenance, ta période improbable de port quotidien de la cravate, ton gilet "papistyle" affreux et ton goût pour les charentaises. Je retiens notre intérêt commun pour les émissions intelligentes, de type Les Anges de la Télé-Réalité, je retiens le "bonne année" qui débutait toutes nos discussions. Je me rappelle de nos achats de plantes carnivores, de la chasse aux mouches qui a suivi (le néon s'en souvient aussi j'en ai peur...), de tes conservations longue durée de végétaux, avec en premier lieu Norman, ton sapin de Noël. Je me rappelle de nos goûters, de nos repas coquillettes-knacki et de cette soirée arrosée où tu pensais gagner un séjour à l'île Maurice. Je me souviens de ce concert d'Eminem, de notre rencontre avec la silhouette cartonnée de Maître Gim's et de ta présence lors de notre pendaison de crémaillère. Je me rappelle aussi de quelques moments sérieux et de confidences pudiques. Mais surtout, je retiens que tu avais "une très belle implantation de barbe", et ça, c'est Nicolas Roussel qui l'a dit, et personne ne te l'enlèvera.

Aucun nouveau souvenir ne viendra hélas s'ajouter à cette petite liste non exhaustive. Mais ne crois pas qu'avec ton départ notre collaboration prend fin ! Non, non non, je compte sur toi pour me transmettre, de là où tu es, tes bonnes idées, si astucieuses et inventives !

Je compte sur toi pour veiller sur nous. Compte sur nous pour que nous continuions tous à vivre sans trop d'inquiétude et toujours avec le sourire, comme toi.

Heureuse de t'avoir connu,

Marie

Table des notations

a	[Pa.s]	Coefficient de consistance [Herschel Bulkley]
a_f	[m]	Distance caractéristique de l'espèce à diffuser
A	[N.m.s]	Terme lié à la viscosité plastique d'un matériau [Herschel Bulkley]
A_f	[Ω .m]	Terme lié à la résistivité électrique des fibres
b	[-]	Indice d'écoulement [Herschel Bulkley]
B_b	[Ω .m]	Terme lié à la résistivité électrique du béton
C	[N.m]	Couple
C_A	[-]	Concentration de l'espèce A
C_0	[N.m]	Terme lié au seuil de cisaillement du matériau [Herschel Bulkley]
C_1, C_2	[-]	Points d'injection d'un courant électrique
C_2S	[-]	Silicate bicalcique $2CaO, Si$
C_3S	[-]	Silicate tricalcique $3 CaO, SiO_2$
C_3A	[-]	Aluminate tricalcique $3CaO Al_2O_3$
C_4AF	[-]	Aluminoferrite tétracalcique $4 CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$
$C\bar{S}H_2$	[-]	Gypse, $CaSO_4, 2H_2O$
$C_4A\bar{S}H_{12}$	[-]	Monosulfoaluminate de calcium $CaO Al_2O_3 3CaSO_4 12 H_2O$
$C_6A\bar{S}_3H_{32}$	[-]	Trisulfo aluminate de calcium (ettringite) $3 CaO Al_2O_3 3CaSO_4 32 H_2O$
CH	[-]	Hydroxyde de calcium (portlandite) $Ca(OH)_2$
$C-S-H$	[-]	Silicate de calcium hydraté, $XCaO, y SiO_2, z H_2O$
d	[m]	Diamètre des granulés d'un coulis en phase pendulaire
d_f	[m]	Diamètre d'une fibre cylindrique
d_{ie}	[m]	Distance inter-électrode
D	[m]	Distance inter-granulaire séparant deux grains reliés par un pont liquide
$\overline{D(\phi_f)}$	[-]	Coefficient de diffusion adimensionné
D_{diff}	[$m^2.s^{-1}$]	Coefficient de diffusion d'une espèce au sein d'une autre
Di	[m]	Dimension intermédiaire entre deux tamis successifs
D_m	[m]	Diamètre moyen d'un coulis en phase pendulaire

Table des notations

Dm_1, Dm_2	[m]	Diamètre moyen correspondant aux vitesses 1 et 2
D_{AB}	[m ² .s ⁻¹]	Coefficient de diffusion de l'espèce A dans l'espèce B
D_F	[m]	Diamètre d'une sphère F
D_G	[m]	Diamètre d'une sphère G
D_{M^-}	[m]	Diamètre d'une sphère M ⁻
D_{M^+}	[m]	Diamètre d'une sphère M ⁺
E	[J]	Energie de cohésion
\vec{E}	[V.m ⁻¹]	Champ électrique
E_c	[J]	Energie cinétique
E_{eff}	[-]	Coefficient d'efficacité des malaxeurs
E_Y	[Pa]	Module de Young
EC	[-]	Ecart type mesuré
f	[m]	Flèche d'une fibre soumise à une contrainte
f_p	[-]	Facteur d'orientation des fibres
F	[-]	Sphère correspondant à la catégorie des granulés fins (d < 0,25 mm)
$F_{capillarité}$	[N]	Force de capillarité
g	[m.s ⁻²]	Coefficient de pesanteur
g_r	[N.m]	Terme lié au seuil de cisaillement du matériau [Bingham]
G	[m ³]	Constante rhéologique liée [Newtonien]
G	[-]	Sphère correspondant à la catégorie des gros granulés (d > 4 mm)
h	[m]	Hauteur de la cuve d'un rhéomètre
h_r	[N.m.s]	Terme lié à la viscosité plastique d'un matériau [Bingham]
H	[m]	Hauteur du cône de béton après l'essai au cône d'Abrams
I	[A]	Intensité de courant
I_i	[m ⁴]	Moment d'inertie
I_z	[A]	Intensité de courant à la profondeur z
$I_{z=0}$	[A]	Intensité de courant à la profondeur z=0
\vec{j}	[A.m ⁻²]	Vecteur densité de courant
\vec{J}_A	[A.m ⁻²]	Vecteur densité de particule
J	[A.m ⁻²]	Densité de courant
J_z	[A.m ⁻²]	Densité de courant à la profondeur z

$J_{z=0}$	[A.m ⁻²]	Densité de courant à la profondeur $z = 0$
k	[m ^{5/3} .s ^{-2/3}]	Coefficient reliant le diamètre moyen à la vitesse de malaxage
K	[-]	Constante rhéologique
l_{conv}	[m]	Longueur à partir de laquelle l'homogénéité est supposée atteinte dans un mélange par convection pure
l_{diff}	[m]	Longueur de diffusion
L	[m]	Distance caractéristique sur laquelle l'échantillon doit se disperser
L_f	[m]	Longueur d'une fibre
m	[Pa.s]	Constante de consistance [Loi de puissance]
m_b	[kg]	Masse d'une bille
m_c	[kg]	Masse du coulis
m_{p+b}	[kg]	Masse d'une bille et de l'eau contenue dans le pont liquide reliant la bille à une autre
M^+, M^-	[-]	Sphère correspondant à la catégorie des granulés de taille moyenne ($0,25 \text{ mm} \leq d \leq 4 \text{ mm}$)
M_n	[-]	Dénomination d'un malaxeur
M_v	[kg.m ⁻³]	Masse volumique
n	[-]	Indice d'écoulement [Loi de puissance]
n	[-]	Nombre de chaîne latérale dans un copolymère
n_e	[-]	Nombre d'échantillons testés
nb_p	[-]	Nombre de ponts liquides
nb_F	[-]	Nombre de sphères F comprises dans l'empilement
nb_{M^-}	[-]	Nombre de sphères M- comprises dans l'empilement
nb_{M^+}	[-]	Nombre de sphères M ⁺ comprises dans l'empilement
N	[-]	Nombre de monomère dans la chaîne principale d'un copolymère
N_c	[-]	Nombre de divisions apportées par le phénomène de convection
p	[m]	Point situé dans l'entrefer d'un rhéomètre à cylindres coaxiaux
P	[-]	Nombre de monomère dans la chaîne latérale d'un co-polymère
P_i	[-]	Pourcentage massique
$P_{pont\ liquide}$	[N]	Poids de l'eau contenue dans un pont liquide
P_1, P_2	[-]	Points de mesure d'un potentiel électrique
r	[-]	Facteur d'aspect d'une fibre

Table des notations

r	[m]	Distance entre un point et une source de courant
R	[Ω]	Résistance électrique
R_c	[m]	Rayon d'un grain de ciment
R_L, R_2	[m]	Rayons des cylindres intérieurs et extérieurs dans un BTRHEOM
S	[$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]	Conductivité électrique
S	[m]	Affaissement d'un matériau
$S1$ à $S5$	[m]	Classe d'affaissement d'un matériau [NF EN 12350-2'12]
SF	[m]	Diamètre d'étalement d'un matériau
$SF/2$	[m]	Rayon d'étalement après l'essai au cône d'Abrams
$SF1$ à $SF3$	[m]	Classes d'étalement d'un matériau [NF EN 12350-8'12]
t	[s]	temps
t_{conv}	[s]	Temps nécessaire pour disperser une espèce dans le cas d'un mélange purement convectif
t_{diff}	[s]	Temps nécessaire pour disperser une espèce dans le cas dans le cas d'un mélange faisant intervenir le phénomène de diffusion
t_i	[s]	Temps effectifs de malaxage
t_{V1}, t_{V2}	[s]	Temps nécessaire à l'homogénéisation des fibres dans le mélange avec une vitesse de malaxage $V1$
V	[$m \cdot s^{-1}$]	Vitesse
V_e	[V]	Potentiel électrique
V_f	[m^3]	Volume unitaire d'une fibre
V_{pale}	[$m \cdot s^{-1}$]	Vitesse linéaire d'un point appartenant à la pale d'un malaxeur
$V_{sphère F}$	[m^3]	Volume unitaire d'une sphère F
$V_{sphère G}$	[m^3]	Volume unitaire d'une sphère G
$V_{sphère M^-}$	[m^3]	Volume unitaire d'une sphère M^-
$V_{sphère M^+}$	[m^3]	Volume unitaire d'une sphère M^+
V_t	[m^3]	Volume testé pendant l'essai au cône d'Abrams
$V_{tétrèdre}$	[m^3]	Volume du tétraèdre formé par le centre de 4 sphères G
V_{total}	[m^3]	Volume occupé par l'ensemble des sphères dans l'empilement
V_F	[m^3]	Volume occupé par les sphères F dans l'empilement granulaire
V_G	[m^3]	Volume occupé par les sphères G dans l'empilement granulaire
V_{M^-}	[m^3]	Volume occupé par les sphères M^- dans l'empilement granulaire
V_{M^+}	[m^3]	Volume occupé par les sphères M^+ dans l'empilement granulaire
V_1, V_2	[$m \cdot s^{-1}$]	Vitesse de malaxage 1 et 2

VF	[s]	Temps d'écoulement d'un matériau [NF EN 12350-9'12]
VF1 et VF2	[s]	Classe de temps d'écoulement d'un matériau [NF EN 12350-9'12]
z	[m]	Pronfondeur
α_m	[-]	Coefficient représentatif du nombre de contact entre les fibres
δ	[°]	Angle de « remplissage » d'un pont liquide
ΔV	[V]	Différence de potentiel
γ	[-]	Déformation
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Cisaillement
$\dot{\gamma}_{max}$	[s ⁻¹]	Cisaillement maximal
$\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2$	[s ⁻¹]	Cisaillement correspondant aux vitesses 1 et 2
ϑ	[°]	Angle de mouillage
μ	[Pa.s]	Viscosité dynamique
ρ	[Ω.m]	Résistivité électrique
ρ_T	[Ω.m]	Résistivité électrique d'un milieu stratifié composé des espèces 1 et 2
ρ_0	[Ω.m]	Résistivité électrique du béton sans fibres à t = 0
ρ_1	[Ω.m]	Résistivité électrique de l'espèce 1
ρ_2	[Ω.m]	Résistivité électrique de l'espèce 2
ρ_b	[Ω.m]	Résistivité électrique du béton
ρ_{bf}	[Ω.m]	Résistivité électrique d'un milieu stratifié composé des espèces 1 et 2
$\rho_{bf}(\%)$	[-]	Résistivité électrique du béton fibré exprimé en fonction de la résistivité initiale du béton non fibré
$\rho_b(t)$	[Ω.m]	Evolution de la résistivité électrique du béton au cours du temps
ρ_f	[Ω.m]	Résistivité électrique des fibres
$\rho_{z=0}$	[Ω.m]	Résistivité électrique à la profondeur z = 0
ρ_z	[Ω.m]	Résistivité électrique à la profondeur z
σ	[N.m ⁻¹]	Tension de surface d'un liquide
τ	[Pa]	Contrainte
τ_0	[Pa]	Seuil de cisaillement
\emptyset_f	[-]	Fraction volumique de fibre

Table des notations

$\emptyset_{f\ max}$	[-]	Fraction volumique de percolation
\emptyset_{fm}	[-]	Fraction volumique dense
$\emptyset_{f/oursins}$	[-]	Fraction volumique de fibre dans un oursin
\emptyset_1	[-]	Fraction volumique de l'espèce 1
Ω	[rad.s ⁻¹]	Vitesse de rotation
Ω_{max}	[rad.s ⁻¹]	Vitesse de rotation maximale

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract	iii
Remerciements	v
Pour Loïc.....	ix
Table des notations	xi
Table des matières	xvii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1	3
1. Contexte de l'étude.....	3
1.1. Problématique de la dispersion des fibres	3
1.2. Béton fibré	5
1.2.1. Béton frais	8
1.2.1.1. Rhéomètres à béton	9
1.2.1.2. Essais sur béton frais.....	14
1.2.1.3. Hydratation du ciment.....	17
1.2.2. Fibres	18
1.2.3. Apport des fibres dans les bétons.....	20
1.2.3.1. Rôle à l'état frais	20
1.2.3.2. Rôle structurel.....	23
1.2.3.3. Rôle dans le confort du bâtiment	25
1.2.3.4. Conclusion sur l'apport des fibres dans les bétons	26
1.2.4. Malaxage du béton.....	27
1.2.4.1. Procédure de malaxage	28

1.2.4.2.	Malaxeurs à béton	31
1.2.4.3.	Simulation du malaxage des bétons fibrés	32
1.2.5.	Conclusion sur les bétons fibrés.....	34
1.3.	Mélange	34
1.3.1.	Mécanismes de mélange.....	34
1.3.2.	Temps caractéristique	37
1.3.3.	Cas de la dispersion des fibres dans le béton	37
1.4.	Malaxage, cisaillement et homogénéité	38
1.4.1.	Etude d'un malaxeur	39
1.4.2.	Etude du malaxage	40
1.4.3.	Etude du béton.....	44
1.4.3.1.	Essais sur béton frais.....	44
1.4.3.2.	Essais sur béton durci	45
1.4.4.	Conclusion sur le malaxage	52
1.5.	Démarche scientifique adoptée	52
Chapitre 2	55
2.	Estimation du cisaillement dans un malaxeur	55
2.1.	Granulation humide.....	56
2.2.	Méthodes et paramètres.....	58
2.2.1.	Paramètres de formulation	59
2.2.1.1.	Paramètre ciment	59
2.2.1.2.	Paramètre eau	60
2.2.1.3.	Paramètre superplastifiant	61
2.2.2.	Paramètre de fabrication	62
2.2.2.1.	Paramètre vitesse	62

2.2.2.2.	Paramètre remplissage	63
2.2.2.3.	Paramètre temps	64
2.2.3.	Coulis de référence.....	64
2.3.	Résultats	65
2.3.1.	Coulis de référence.....	65
2.3.2.	Paramètres de formulation	69
2.3.2.1.	Paramètre ciment	69
2.3.2.2.	Paramètre eau	72
2.3.2.3.	Paramètre Superplastifiant.....	74
2.3.3.	Paramètre de fabrication	75
2.3.3.1.	Paramètre vitesse	75
2.3.3.2.	Paramètre remplissage	78
2.3.3.3.	Paramètre temps de malaxage.....	79
2.3.3.4.	Conclusion.....	82
2.3.4.	Influence de la quantité d'eau	83
2.3.5.	Analyse globale des coulis.....	87
2.4.	Lien avec l'intensité du malaxage.....	92
2.4.1.	Energie cinétique.....	92
2.4.2.	Cohésion et capillarité.....	93
2.4.2.1.	Abrasion en surface	94
2.4.2.2.	Rupture d'un granulé	95
2.4.3.	Intensité du cisaillement	96
2.4.3.1.	Rupture du granulé	96
2.4.3.2.	Abrasion du granulé	97
2.4.3.3.	Intensité de cisaillement.....	99

2.5. Conclusion	103
Chapitre 3	105
3. Développement d'une méthode de mesure de la teneur relative en fibres.....	105
3.1. Méthode retenue	106
3.1.1. Cahier des charges	106
3.1.2. Principe général.....	106
3.2. Matériaux.....	110
3.2.1. Le gel.....	110
3.2.2. Le ciment	110
3.2.3. Les granulats.....	110
3.2.4. Les fibres.....	111
3.2.5. Les adjuvants	111
3.2.6. Formulations des mortiers et bétons testés	112
3.3. Validation de la méthode	112
3.3.1. Champ de mesure	113
3.3.1.1. Largeur du champ de mesure	113
3.3.1.2. Profondeur du champ de mesure.....	115
3.3.1.3. Chemin préférentiel	119
3.3.2. Conclusion sur le dispositif de mesure.....	122
3.4. Adaptation au cas des bétons fibrés	123
3.4.1. Influence de la conductivité électrolytique.....	123
3.4.2. Résistivité électrique et degré d'hydratation.....	125
3.4.3. Lien entre résistivité électrique et teneur en fibres	127
3.4.3.1. Relation théorique	127
3.4.3.2. Validation avec des fibres métalliques	130

3.4.3.3.	Validation sur des fibres polymériques	133
3.4.4.	Création d'une boîte de mesure	134
3.5.	Essai industriel	136
3.5.1.	Conclusion sur la méthode de mesure.....	138
Chapitre 4	139
4.	Mesures de dispersion de fibres.....	139
4.1.	Matériaux et démarche de travail.....	139
4.1.1.	Composition des bétons testés	139
4.1.1.1.	Le ciment.....	140
4.1.1.2.	Les granulats	140
4.1.1.3.	L'adjuvant.....	140
4.1.1.4.	Les fibres	140
4.1.1.5.	Le béton de référence.....	140
4.1.1.6.	Formulations des bétons	141
4.1.2.	Démarche de travail	142
4.1.2.1.	Mécanismes de mélange	142
4.1.2.2.	Etapes du malaxage	147
4.1.3.	Campagne expérimentale	148
4.1.3.1.	Protocole expérimental	148
4.1.3.2.	Influence de la conductivité électrolytique	151
4.1.3.3.	Précision des mesures.....	152
4.1.3.4.	Présentation des essais.....	153
4.1.3.5.	Présentation de l'essai de référence	154
4.2.	Influence des fibres	154
4.2.1.	Paramètre dosage	155

Table des matières

4.2.1.1.	35 kg/m ³	155
4.2.1.2.	45 kg/m ³	155
4.2.1.3.	70 kg/m ³	156
4.2.1.4.	Conclusion sur le paramètre dosage	156
4.2.2.	Paramètre de forme	157
4.2.2.1.	$l_f = 35$ mm.....	158
4.2.2.2.	$l_f = 12$ mm	158
4.2.2.3.	$l = 60$ mm et $r = 85$	158
4.2.2.4.	Conclusion sur le paramètre de forme des fibres	159
4.2.3.	Conclusion sur le paramètre fibre.....	161
4.3.	Paramètre béton	162
4.3.1.	Essai sur mortier.....	162
4.3.2.	Paramètre rhéologie	163
4.3.3.	Conclusion sur le paramètre béton.....	164
4.4.	Influence du cycle de malaxage.....	165
4.4.1.	Vitesses de malaxage	165
4.4.2.	Moment d'introduction des fibres.....	167
4.4.3.	Mode d'introduction des fibres	171
4.4.3.1.	Influence du mode d'introduction sur la présence d'oursins.....	172
4.4.3.2.	Influence du mode d'introduction sur la distribution finale des fibres....	173
4.5.	Influence du malaxeur	176
4.5.1.	Essais sur le malaxeur M_4	176
4.5.2.	Conclusion sur l'influence du malaxeur	177
4.6.	Bilan de la campagne expérimentale	178
	Conclusion générale	181

Bibliographie	183
Annexes	1
Annexe 1 Les matériaux.....	3
Annexe 1.1 Les liants.....	3
Annexe 1.2 Les granulats	19
Annexe 1.3 Les adjuvants.....	21
Annexe 1.4 Les fibres	25
Annexe 2 Empilement granulaire	39
Annexe 2.1 Empilement théorique.....	39
Annexe 2.2 Empilement granulaire réel	49
Annexe 3 Détermination de la compacité de l'empilement granulaire.....	55
Annexe 4 Détermination de la masse volumique des coulis en phase pendulaire.....	57
Annexe 5 Détermination des vitesses linéaires en bout de pale	61
Annexe 6 Estimation de la teneur en fibre d'un béton dans le malaxeur	63
Annexe 7 Comparaison d'intensité de cisaillement de malaxeur	65

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, des fibres sont très fréquemment ajoutées dans les matériaux cimentaires. Elles leur confèrent de nouvelles propriétés ou améliorent leurs caractéristiques initiales. Les fibres peuvent ainsi être utilisées comme renfort structurel dans les bétons durcis, limiter les phénomènes de retrait à l'état frais et éviter l'écaillage des bétons soumis à des hautes températures. Elles peuvent également permettre d'obtenir un béton léger et isolant du point de vue thermique comme acoustique.

La présence de nouvelles fibres, le développement de formulation plus complexes et la performance des nouveaux équipements de production ont ainsi permis de créer des bétons fibrés plus performants, aux propriétés améliorées.

En dépit de ces récents progrès, un point reste rarement abordé dans la littérature comme dans le contexte normatif. Il concerne la dispersion des fibres au sein du béton, pourtant garante de l'homogénéité des caractéristiques des bétons fibrés. La répartition des fibres dans le béton a lieu pendant l'étape de malaxage mais est susceptible d'être modifiée lors d'autres phases du procédé de fabrication (pompage, coulage etc). Dans cette étude, seule la répartition des fibres pendant le malaxage sera étudiée.

Dans le premier chapitre de ce travail est dressé le contexte de l'étude. Les problématiques liées à une mauvaise dispersion des fibres sont rappelées. Le béton frais et les fibres sont ensuite présentés séparément avant que les caractéristiques des bétons fibrés ne soient abordées. Puis, nous nous intéressons au malaxage du béton fibré, tant au niveau des procédés, des matériels et des outils numériques permettant leur étude. Les mécanismes usuels de mélange par convection et/ou diffusion sont ensuite rappelés et le lien intuitif entre qualité de malaxage, cisaillement du matériau et homogénéité du béton est discuté à l'aide de la bibliographie existante et des textes réglementaires.

Ce constat nous incite à répondre aux trois questions suivantes :

1) Comment évaluer l'efficacité d'un malaxeur ?

2) Comment connaître la dispersion des fibres pendant le malaxage ?

3) Le lien entre efficacité de malaxeur et homogénéité de dispersion est-il avéré ?

Des éléments de réponse à ces problématiques sont apportés dans les trois chapitres suivants.

Le second chapitre se concentre en effet sur l'efficacité des malaxeurs. Les principes de la granulation humide sont rappelés et cette technique est appliquée à un mélange ciment/eau. Une analyse granulométrique des coulis en phase pendulaire ainsi créés met en évidence la légitimité du diamètre moyen comme représentant de l'ensemble du coulis en phase pendulaire. Il apparaît également que ce diamètre moyen correspond à un équilibre entre les forces de cohésion induites par la présence d'eau dans le système et l'abrasion causée par le mouvement du malaxeur. La taille caractéristique des coulis en phase pendulaire fabriqués dans un malaxeur à béton semble donc être un moyen de caractérisation des malaxeurs et de leur capacité de cisaillement.

Le développement d'un outil de mesure de dispersion des fibres pendant le malaxage est l'objet du troisième chapitre. Le choix satisfaisant au cahier des charges dressé correspond à une méthode de résistivité électrique. Une étude bibliographique et des tests sur différents matériaux permettent de valider l'utilisation de cette méthode pour détecter la présence de fibres dans les bétons. Le lien entre résistivité mesurée et teneur en fibres est établi et une boîte de mesures est créée, afin d'isoler le volume testé des organes métalliques des malaxeurs. Un test réalisé dans une entreprise de préfabrication valide le dispositif de mesure et l'utilisation de cette méthode dans un contexte industriel.

Le quatrième chapitre consiste en des mesures de dispersion de fibres réalisées sur des gâchées dont les paramètres, de formulation ou de process, varient. Dans un premier temps, les résultats obtenus sont confrontés aux mécanismes de mélange abordés dans le premier chapitre. Il apparaît que la répartition des fibres obéit à des phénomènes de diffusion et de convection dépendant du cisaillement apporté par le malaxeur au matériau. Une relation est alors faite avec les résultats obtenus dans le second chapitre concernant le cisaillement des malaxeurs. Ce lien aboutit à une estimation du temps nécessaire de malaxage avant l'obtention d'une répartition homogène en fibres.

Chapitre 1

1. Contexte de l'étude

1.1. Problématique de la dispersion des fibres

La dispersion des fibres dans le béton est un élément aussi important que problématique : important car l'homogénéité des propriétés apportées par les fibres est garantie par la distribution de celles-ci, problématique car, à l'heure actuelle, les phénomènes de dispersion ne sont ni connus ni maîtrisés, ce qui aboutit par exemple au cas de la Figure 1.1.



Figure 1.1 : Amas de fibres, ou oursins, à la fin du malaxage

Cette zone de surconcentration en fibres ne pose pas problème uniquement lors de la mise en œuvre des bétons, elle traduit également l'existence de zones pauvres en fibres, et donc déficitaires sur le plan de certaines propriétés, détaillées dans le § 1.2.3. Pour assurer les caractéristiques attendues sur l'ensemble du matériau, le surdosage en fibres est une méthode régulièrement adoptée, qui engendre un surcoût important et qui peut avoir des conséquences sur la maniabilité du béton.

Les comités normatifs tentent de solutionner ce problème en imposant, dans les normes [NF EN 14889-1'06] et [NF EN 14889-2'06], aux fabricants de fibres d'indiquer une procédure de malaxage à suivre pour obtenir une dispersion optimale des fibres. Les recommandations concernent principalement le moment d'introduction des fibres (phase sèche ou phase humide) dans le malaxeur (Extrait 1.1).

5.9 Mélange

Le fabricant doit fournir des instructions dans lesquelles est indiqué l'ordre dans lequel il est recommandé de réaliser le mélange lors de l'introduction des fibres dans une centrale à béton et dans un camion malaxeur à sec.

Extrait 1.1 : Mise en œuvre des fibres dans le béton - [NF EN 14889-1'06] et [NF EN 14889-2'06]

Les organismes spécialisés ne donnent pas non plus de consignes précises : l'AFGC (Association Française de Génie Civil) reconnaît dans un rapport de 2002 ([AFGC '02]) que la mise en œuvre de ces bétons n'est pas encore bien maîtrisée (Extrait 1.2).

Maîtrise de la mise en œuvre : les connaissances rationnelles manquent clairement à l'heure actuelle pour comprendre et optimiser le processus de malaxage de ces matériaux, le transport et l'écoulement des BFUP à l'état frais et l'incidence du coulage en termes de répartition et orientation des fibres, l'effet d'une éventuelle vibration en fonction de la rhéologie de la matrice, etc.

Extrait 1.2: Avis de l'AFGC sur la mise en œuvre des bétons fibrés [AFGC'02]

En dépit de la problématique reconnue de la dispersion des fibres pendant le malaxage, la question de sa mesure n'est pas abordée. La norme [NF 1170-2'98] propose, dans le cas des composites ciment-verre, de compter les fibres présentes dans différents prélèvements mais d'autres normes suggèrent, de manière facultative, un contrôle visuel, comme le rappelle l'Extrait 1.3.

10 Rapport d'essai

Le rapport doit mentionner

[...]

r) observation de l'uniformité de la distribution des fibres à la surface de rupture (facultatif) ;

Extrait 1.3 : Observation de la dispersion des fibres lors d'essais mécaniques [NF EN 14651'05]

Ce premier aperçu permet d'établir l'importance de la dispersion des fibres d'une part, son lien avec le malaxage d'autre part et surtout l'absence, reconnue, de connaissances globales sur ce sujet.

Cette étude se propose d'étudier les mécanismes menant à une dispersion homogène des fibres afin d'optimiser l'étape de malaxage.

Dans ce travail, une dispersion homogène de fibres correspond à une dispersion garantissant l'optimum des propriétés apportées par les fibres au béton sans gêner sa mise en œuvre. Ceci se traduit par une quantité constante de fibres par unité de volume de béton, indépendamment de l'orientation des fibres. Ce choix s'explique par le fait que les fibres sont principalement orientées lors des étapes de coulage ou de pompage, le malaxage ne favorisant pas la présence d'écoulements permanents.

Dans ce chapitre sera dressé le contexte précis de l'étude, à commencer par une description générale du béton, des fibres et des bétons fibrés. Le rôle du malaxage dans l'homogénéisation de ce mélange sera ensuite abordé.

1.2. Béton fibré

Le béton fibré est un matériau composite, constitué de fibres et de béton, qui est en lui-même le résultat d'un mélange. Le béton fibré peut donc être considéré comme un assemblage de granulats, de ciment, d'addition pulvérulente (filler réactif ou non réactif, fumée de silice), d'eau, d'adjuvant et de fibres. Le Tableau 1.1 détaille les constituants des bétons fibrés, et l'ordre de grandeur de leurs dimensions.

Élément	Échelle
Eau et adjuvant	nanométrique
Ciment et addition	micrométrique
sable	millimétrique
Gravillons et fibres	centimétrique

Tableau 1.1: Echelle de taille des éléments constitutifs des bétons fibrés

La dispersion des fibres pendant le malaxage requiert une étude à l'échelle d'une gâchée de béton, c'est-à-dire de quelques litres à quelques centaines de litres. Le malaxage met néanmoins en contact des éléments de taille très variée, la question de l'échelle de l'étude du béton fibré se pose donc.

Une réponse possible réside dans le processus de malaxage choisi et notamment dans le moment d'introduction des fibres.

En effet, si les fibres sont introduites avec les composants granulaires ou avec les composants liquides, la problématique est de comprendre les mécanismes de dispersion de fibres dans un empilement granulaire, hétérogène et éventuellement humide. L'approche multi-échelle est donc, dans ces conditions, indispensable.

En revanche, en introduisant les fibres dans le béton frais, considéré comme déjà homogène, une représentation bi-phasique matrice/fibre semble suffisante.

Le moment d'introduction des fibres est donc un paramètre à considérer dans la compréhension des phénomènes de dispersion et de l'approche à suivre, multi-échelle dans le cas d'une introduction des fibres avec les autres constituants du béton, bi-phasique dans le cas d'un ajout des fibres dans le béton.

L'instant d'introduction des fibres dans le mélange est un sujet d'étude, notamment discuté dans [CAZACLIU'06] et [CHEN'93]. A notre connaissance, aucun moment d'introduction n'est, pour le moment, réputé comme favorisant une bonne dispersion des fibres et le corpus normatif n'impose pas un moment d'introduction précis ; en revanche, il impose aux fabricants de fibres d'en recommander un (cf Extrait 1.1).

Les fiches techniques des fibres indiquent donc un moment d'introduction, qui varie selon les produits. L'ajout peut avoir lieu en phase sèche ou en phase humide dans le cas des fibres métalliques, comme le montrent la Figure 1.2 et l'Extrait 1.4.



Figure 1.2 : Recommandations concernant le moment d'introduction de fibres métalliques à crochet Dramix, extrait d'un document BEKAERT, Annexe 1.4.5

Mode d'emploi

L'introduction des fibres MEDAFAC se fait :

-Soit à la centrale à béton avec les agrégats ou en fin de mélange

[...]

Dans tous les cas veiller à garantir une parfaite homogénéité du mélange béton-fibres.

Extrait 1.4 : Recommandation concernant le moment d'introduction de fibres métalliques ondulées MEDAFAC, extrait de la fiche technique des fibres, Annexe 1.4.8

Pour les fibres polymériques, une introduction en phase sèche, avec les granulats, est parfois recommandée mais cette disposition peut être liée au conditionnement des fibres en sachet pulvable, un emballage se déchirant sous l'effet de l'abrasion causée par les granulats pour libérer les fibres (Extrait 1.5).

Mise en œuvre / Préparation du mélange

Il est recommandé d'ajouter les sikafibre force viscochape directement dans le malaxeur de la centrale à béton simultanément au sable.

Extrait 1.5 : Recommandation concernant le moment d'introduction de fibres polymériques Sika conditionnées en sachet pulvable, Annexe 1.4.1

Pour d'autres fibres synthétiques, aucune phase du malaxage n'est spécialement conseillée pour l'introduction des fibres, comme en témoigne l'Extrait 1.6.

Mode d'emploi

[...]

Fibrin 1950 D s'incorpore au béton à n'importe quelle phase du processus de malaxage

Extrait 1.6 : Recommandation concernant le moment d'introduction de fibres synthétiques Chryso conditionnées en sachet pulvable, fiche technique en annexe 1.4.3

Les extraits des fiches techniques de fibre présentés ci-dessus montrent qu'aucun instant d'introduction ne se distingue pour le moment.

Pour cette étude, le choix est donc fait d'introduire les fibres dans le béton frais, considéré comme homogène, et d'approcher le problème de la dispersion à l'échelle macroscopique, du béton et de la fibre. Le matériau sera donc étudié comme un mélange entre une matrice cimentaire et des fibres. Les caractéristiques de ces deux phases sont détaillées dans les paragraphes suivants.

1.2.1. Béton frais

La fabrication du béton associe une phase liquide, essentiellement aqueuse, à une phase solide, composée de ciment, de sable, de granulats et éventuellement d'autres pulvérulents. Ce mélange évolue de manière importante au cours du temps et le béton frais correspond aux premiers instants de son existence.

A l'échelle de l'utilisateur, le béton est considéré comme frais tant qu'il est maniable et que les opérations de moulage, coulage ou pompage sont possibles. A l'échelle du matériau, le béton passe d'un état fluide (suspension de grains polydisperses) à un état solide. Cette modification est dictée par les réactions d'hydratation, à l'origine de la prise du béton.

A l'état frais, le béton est essentiellement caractérisé par sa rhéologie. Reconnu comme étant un fluide à seuil, il est généralement assimilé à un fluide de Bingham dont le comportement visco-plastique est illustré dans la Figure 1.3 ci-dessous.

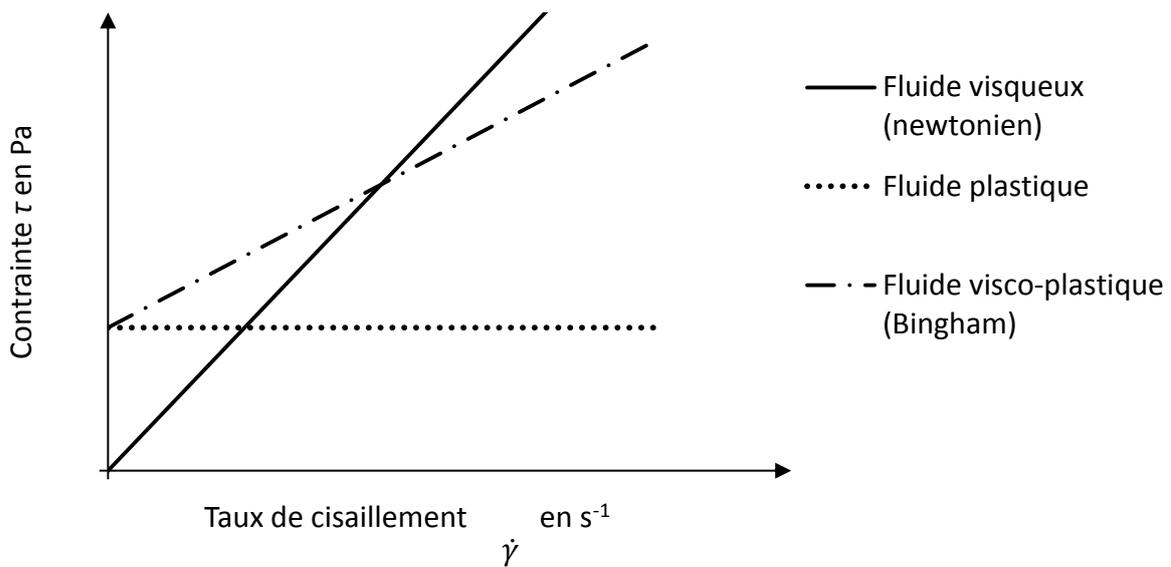


Figure 1.3 : Rhéogramme

Dans le cas d'un fluide suivant une loi de Bingham, l'équation (1.1) relie la contrainte τ au cisaillement $\dot{\gamma}$ via τ_0 , le seuil d'écoulement du béton et μ , sa viscosité plastique.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

Pour connaître ces deux propriétés, τ_0 et μ , plusieurs méthodes existent : les rhéomètres à béton d'une part, présentés dans le § 1.2.1.1 et les essais habituels encadrés par les normes, détaillés dans le § 1.2.1.2.

1.2.1.1. Rhéomètres à béton

L'utilisation d'un rhéomètre permet d'appliquer au béton un couple C ou une vitesse Ω et de mesurer la réponse du matériau à cette sollicitation. Les données doivent ensuite être transformées en valeurs de contrainte et de cisaillement. Les équivalences entre ces deux types de valeurs dépendent du rhéomètre utilisé. En effet, plusieurs modèles de rhéomètre existent, ils se distinguent par leur contenance, le procédé de mise en mouvement du fluide et par la méthode d'interprétation des données mesurées

Rhéomètre BML :

Le BML est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le matériau à tester est placé entre deux cylindres de rayon p_i et p_o et de hauteur h . Un des cylindres est mobile et tourne à une vitesse Ω (Figure 1.4).

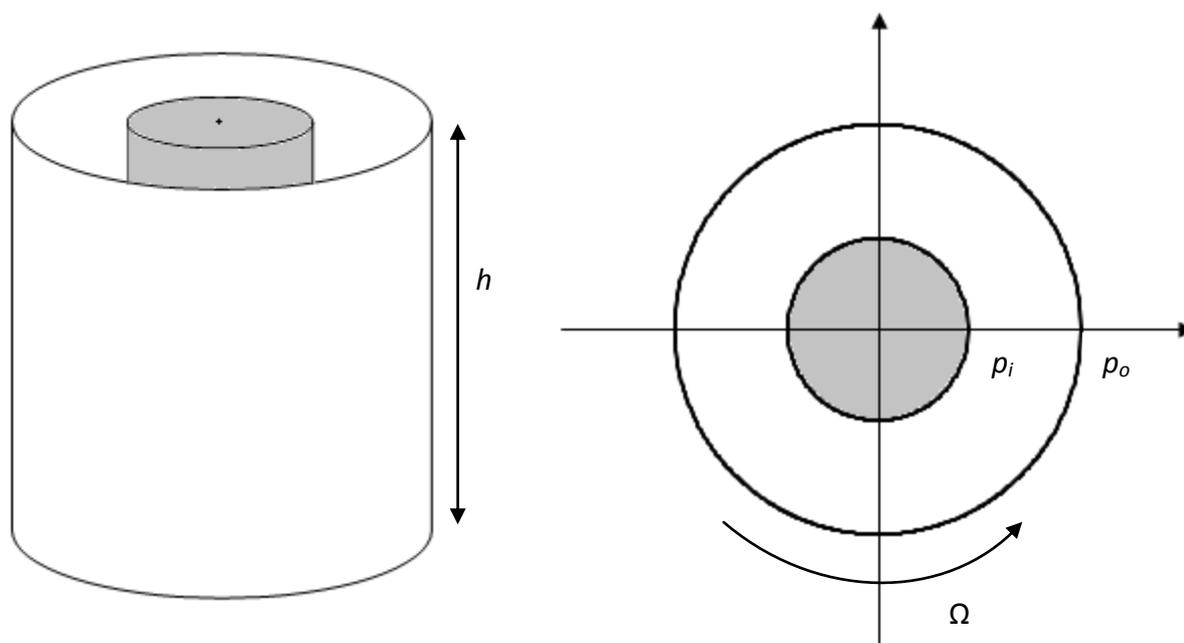


Figure 1.4: Rhéomètre à cylindres coaxiaux

Dans cette configuration, assez habituelle, les valeurs rhéologiques sont déduites des valeurs de contrainte et de cisaillement à l'aide des équations (1.2) et (1.3) ([ESTELLE'08]) :

$$\tau = \frac{C}{2 \pi h p^2} \quad (1.2)$$

$$\dot{\gamma} = 2 C \frac{d\Omega}{dC} \quad (1.3)$$

Avec p un point du matériau, $p \in [p_i ; p_o]$ (cf Figure 1.4).

Rhéomètre CEMAGREF-IMG

Le CEMAGREF-IMG est également un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Il est habituellement utilisé pour tester des boues et des matériaux naturels. Sa grande contenance (500 litres environ) lui permet, dans le cas de [FERRARIS'01], de tester des bétons indépendamment du diamètre du plus gros grain. Les parois sont recouvertes de dispositif limitant le glissement du béton à leur surface, comme le montre la Figure 1.5.

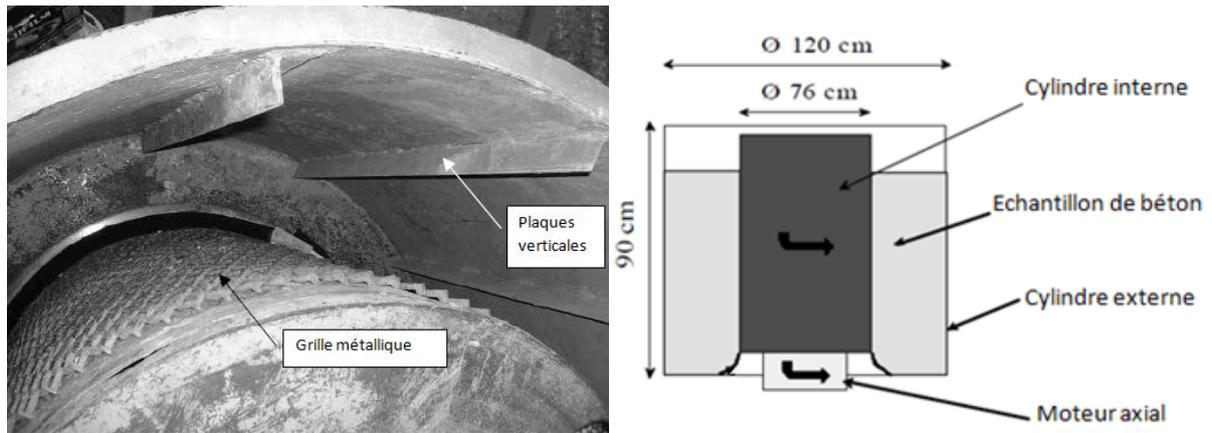


Figure 1.5 : Rhéomètre CEMAGREF-IMG - [FERRARIS'00]

La transformation des données expérimentales en données rhéologiques est faite comme dans le cas précédent, à l'aide des relations établies par [ESTELLE'08].

Rhéomètre « Two-point »

Le mobile du rhéomètre « Two-Point » n'est pas un cylindre mais une pale (Figure 1.6).

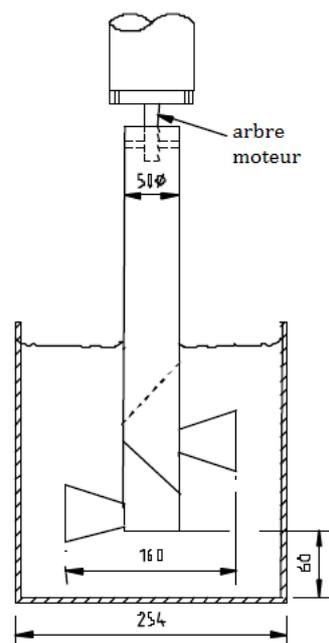


Figure 1.6 : Rhéomètre Two-Point [FERRARIS'01]

[TATERSALL'83] propose d'interpréter les résultats expérimentaux ainsi : Le couple C et la vitesse Ω sont supposés être reliés par l'équation (1.4) dans le cas du béton :

$$C = g_r + h_r \Omega \quad (1.4)$$

g_r est lié au seuil de cisaillement du matériau, h_r à sa viscosité plastique. Les valeurs rhéologiques τ_0 et μ sont exprimées à travers les coefficients g_r , G , h_r et K selon les relations (1.5) et (1.6).

$$\mu = \frac{1}{G} h_r \quad (1.5)$$

$$\tau_0 = \frac{K}{G} g_r \quad (1.6)$$

En termes d'unité, h_r étant homogène à des N.m.s, soit au produit d'un volume (m^3) par une viscosité (Pa.s), G est donc en m^3 , ce qui permet aussi de dire que K (équation (1.6)) n'a pas de dimension, g_r étant homogène à un couple, exprimé en N.m.

Le calibrage du rhéomètre avec d'autres fluides (des huiles au comportement rhéologique connu par exemple) permet de déterminer les propriétés rhéologiques des bétons. Ainsi, G est déterminé à partir d'un essai réalisé sur un fluide newtonien et K à partir d'un fluide obéissant à une loi de puissance du type $\tau = m \dot{\gamma}^n$.

Rhéomètre BTRHEOM :

Le BTRHEOM est quant à lui un rhéomètre à plans parallèles dont la Figure 1.7 illustre le fonctionnement.

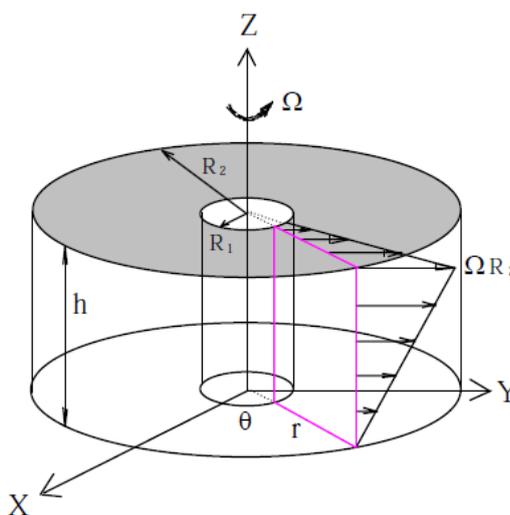


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement du BTRHEOM [FERRARIS'00]

[DE LARRARD'98] établit dans cette configuration les liens entre mesures (couple et vitesse) et données rhéologiques de seuil de cisaillement (τ_0) et de cisaillement ($\dot{\gamma}$), en considérant le matériau comme un fluide de Herschel-Bulkley, c'est-à-dire obéissant à la relation (1.7).

$$\tau = \tau_0 + a \dot{\gamma}^b \quad (1.7)$$

a , le coefficient de consistance est homogène à des Pa.s. b , l'indice d'écoulement du matériau, est adimensionnel. Les coefficients a et b peuvent être déduits de la relation (1.8) reliant le couple à la vitesse via les coefficients liés au seuil du matériau (C_0) et à sa consistance (A).

$$C = C_0 + A \Omega^b \quad (1.8)$$

Le cisaillement maximal dans le rhéomètre est exprimé selon la relation (1.9).

$$\dot{\gamma}_{max} = \frac{\Omega_{max} R_2}{h} \quad (1.9)$$

A partir des relations (1.7), (1.8) et (1.9), [DE LARRARD'98] établit les expressions (1.10) et (1.11) relatives respectivement au taux de cisaillement τ_0 et à la viscosité μ :

$$\tau_0 = \frac{3}{2 \cdot \pi \cdot (R_2^3 - R_1^3)} C_0 \quad (1.10)$$

$$\mu = \frac{3a}{b+2} \dot{\gamma}_{max}^{b-1} \quad (1.11)$$

Les particularités géométriques de rhéomètres expliquent les différentes manières existantes de transcription des valeurs expérimentales en données rhéologiques.

Les travaux de [FERRARIS'00] proposent une comparaison des résultats obtenus sur des bétons identiques testés avec les rhéomètres détaillés précédemment : le BTRHEOM, le BML, le Cemagref IMG et le Two-point. Les résultats sont indiqués dans la Figure 1.8 et démontrent toute la complexité de la rhéologie des bétons. En effet, en présentant des valeurs très différentes pour des bétons identiques, ces graphiques confirment que les lois connues pour la rhéologie des milieux continus ne s'appliquent pas de manière exacte dans le cas du matériau composite qu'est le béton. Les hypothèses formulées pour obtenir ces résultats (le béton suit une loi de Bingham et le couple reste constant dans l'ensemble du matériau) peuvent également être à remettre en cause dans le cas de certains bétons. Les

valeurs de seuil et de viscosité suivent cependant les mêmes variations selon les bétons testés, ce qui permet une comparaison des comportements rhéologiques.

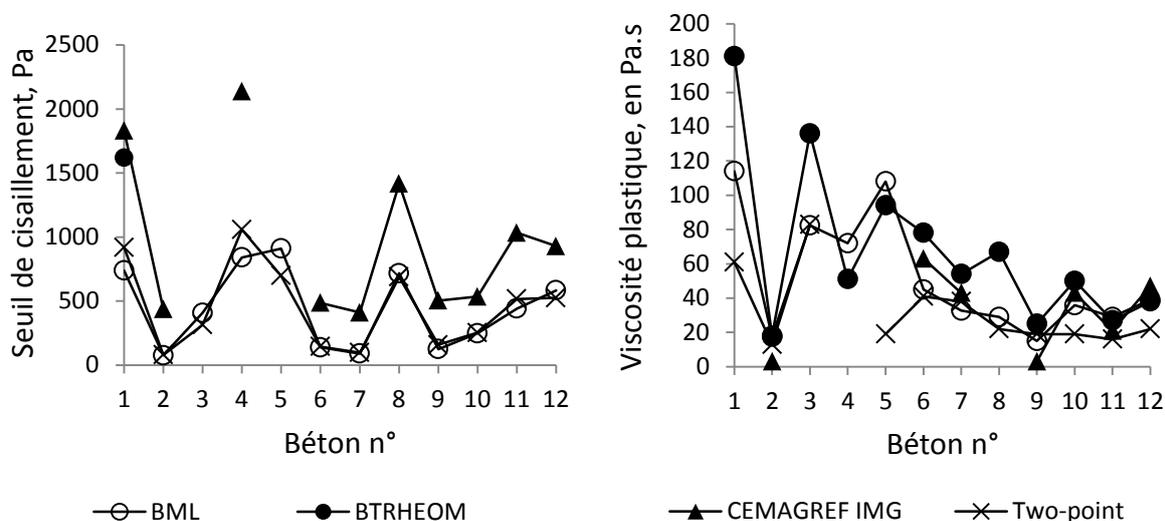


Figure 1.8 : Valeurs de seuil de cisaillement (à gauche) et de viscosité (à droite) déduites des mesures réalisées avec différents rhéomètres [FERRARIS'00]

Les difficultés rencontrées pour obtenir des valeurs exactes et indiscutables de seuil et de viscosité expliquent l'existence d'autres méthodes de caractérisation des bétons frais, encadrées par [NF 12350'12] et applicables *in situ*.

1.2.1.2. Essais sur béton frais

Plusieurs essais sont présentés dans cette norme mais tous suggèrent de mesurer une dimension et/ou un temps pour caractériser le béton frais.

L'essai d'affaissement est détaillé dans la norme [NF EN 12350-2'12] et présenté dans la Figure 1.9. Il consiste en la mesure de l'affaissement *S* qui permet ensuite une classification des bétons de S1 (affaissement de 10 mm) à S5 (affaissement supérieur à 220 mm).

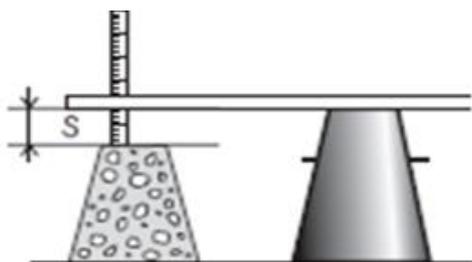


Figure 1.9 : Essai d'affaissement [NF EN 12350-2'12]

Dans le cas des bétons auto-plaçants, cet essai est remplacé par un essai d'étalement. La mesure du diamètre d'étalement permet une classification des bétons, de SF1 (étalement compris entre 550 et 650 mm) à SF3 (étalement compris entre 760 et 850 mm).

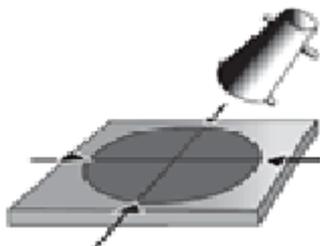


Figure 1.10 : Essai d'étalement [NF EN 12350-8'12]

L'essai au V-funnel, illustré par la Figure 1.11, propose de mesurer le temps nécessaire pour vider le dispositif. Ce temps classe les bétons en deux catégories, VF1 pour les durées inférieures à 9 secondes, et VF2 pour un temps compris entre 9 et 25 secondes.

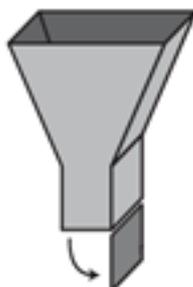


Figure 1.11 : V-Funnel [NF EN 12350-9'12]

Ces essais permettent de classer les bétons par rapport à leur comportement à l'état frais. Ils ne donnent pas accès à des valeurs rhéologiques de seuil et de viscosité mais s'avèrent, dans la pratique, très utiles pour comparer différents bétons.

Différents chercheurs se sont cependant employés à établir les relations existantes entre les grandeurs expérimentales de dimension et de temps et les valeurs rhéologiques.

Le lien entre viscosité et temps d'écoulement est depuis longtemps pressenti ([EMBORG'99] [UTSI'03]). La Figure 1.12 confirme qu'une relation forte existe entre le temps nécessaire pour que l'entonnoir se vide et la viscosité calculée à partir d'un essai au rhéomètre. Cependant, à notre connaissance, aucune relation quantitative permettant de relier le temps d'écoulement à la viscosité n'existe à ce jour.

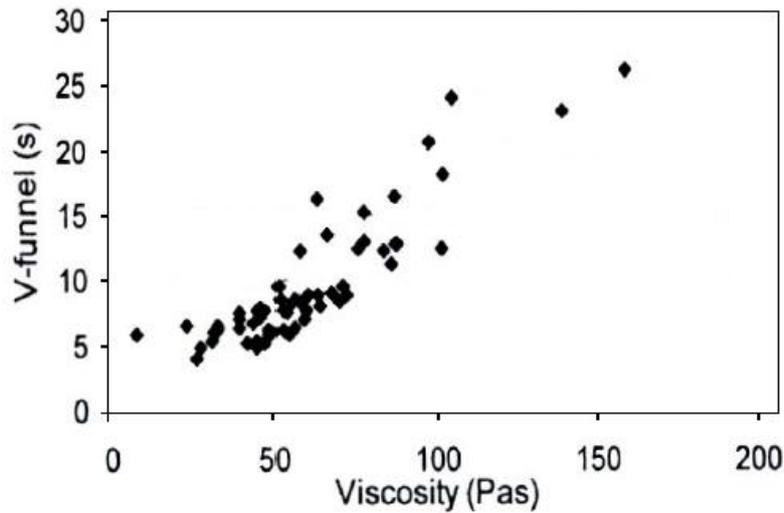


Figure 1.12: Temps d'écoulement au V-Funnel et viscosité (calculée à partir d'un essai au BML) [UTSI'03]

L'équivalence entre un affaissement ou un étalement mesurés au cône d'Abrams et le seuil de cisaillement du béton est quant à elle établie par [ROUSSEL'06] à partir de la Figure 1.13.

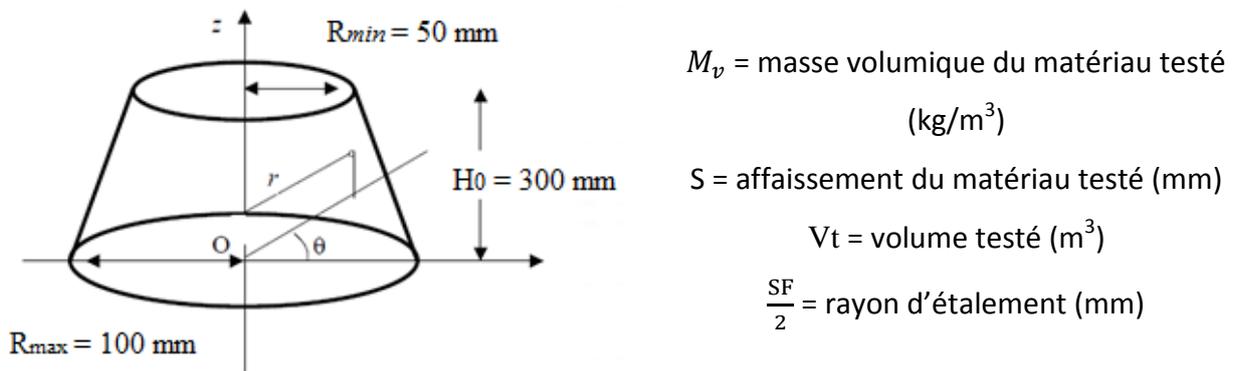


Figure 1.13: Configuration du cône d'Abrams

Si le béton s'affaisse, c'est-à-dire si la hauteur du cône final est supérieure à son rayon, le seuil de cisaillement s'exprime à l'aide de la relation (1.12) :

$$\tau_0 = \frac{M_v \cdot g \cdot (H_0 - S)}{\sqrt{3}} \quad (1.12)$$

Au contraire, si le béton s'étalement, et que le rayon du cône, égal à la moitié de l'étalement, est supérieur à sa hauteur, la relation (1.13) s'applique.

$$\tau_0 = \frac{225 \cdot M_v \cdot g \cdot V_t^2}{128 \cdot \pi^2 \cdot (SF/2)^5} \quad (1.13)$$

Les outils de caractérisation du béton frais sont donc variés et permettent une comparaison des bétons entre eux. Le temps de réalisation des essais est un paramètre à considérer puisque la maniabilité du béton dépend de l'hydratation des grains de ciment, un phénomène détaillé dans le prochain paragraphe.

1.2.1.3. Hydratation du ciment

L'hydratation du ciment consiste en la réaction, au contact de l'eau, de ses constituants anhydres présentés dans le Tableau 1.2

Constituant anhydre	Formule	Notation
Silicate bicalcique	2 CaO, SiO ₂	C ₂ S
Silicate tricalcique	3 CaO, SiO ₂	C ₃ S
Aluminate tricalcique	3 CaO, Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrite tétracalcique	4 CaO Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Gypse	CaSO ₄ , 2H ₂ O	C \bar{S} H ₂

Tableau 1.2 : Constituants anhydres du ciment

Les principaux produits formés responsables du durcissement du béton sont rassemblés dans le Tableau 1.3 et les réactions d'hydratation correspondantes sont ensuite détaillées.

Constituant hydraté	Formule	Notation
Silicate de calcium hydraté	X CaO, y SiO ₂ , z H ₂ O	C-S-H
Hydroxyde de calcium (portlandite)	Ca(OH) ₂	CH
Monosulfoaluminate de calcium	CaO Al ₂ O ₃ 3CaSO ₄ , 12 H ₂ O	C ₄ A \bar{S} H ₁₂
Trisulfoaluminate de calcium (ettringite)	3 CaO Al ₂ O ₃ 3CaSO ₄ 32 H ₂ O	C ₆ A \bar{S} ₃ H ₃₂

Tableau 1.3 : Constituants résultants de l'hydratation du ciment

Les silicates bicalciques et tricalciques forment au cours des réactions (1.14) et (1.15) des silicates de calcium hydratés ainsi que de la portlandite.



L'aluminat tricalcique réagit avec le gypse pour former de l'ettringite (réaction (1.16)), qui réagit à nouveau pour donner des monosulfoaluminates de calcium (réaction (1.17)).



Les silicates de calcium hydratés, la portlandite, l'ettringite, les monosulfoaluminates de calcium entraînent le durcissement du béton. Les réactions d'hydratation débutent après la dissolution des ions dans l'eau et la période dormante. Elles perdurent tant qu'il y a de l'eau dans le matériau et des grains anhydres accessibles par celle-ci. La chronologie des réactions d'hydratation est rappelée sur la Figure 1.14.

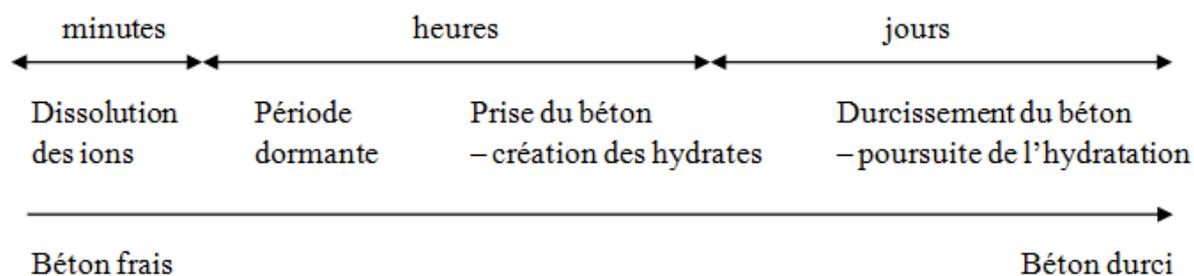


Figure 1.14 : Hydratation du ciment

Dans ce travail, l'ensemble des mesures réalisées sur béton frais auront lieu dans les 30 minutes suivant le malaxage, afin de s'affranchir de l'influence des phénomènes d'hydratation.

1.2.2. Fibres

Une fibre désigne un matériau représenté en un élément unitaire, indivisible dont la longueur est grande devant les autres dimensions, comme en témoigne la définition de [NF T 25-003'92] dans l'Extrait 1.7.

2.14 fibre (V,C,A) : Unité de matière caractérisée par un rapport longueur sur diamètre ou épaisseur très élevé.

Extrait 1.7 : définition d'une fibre selon [NF T 25-003'92]

Les fibres peuvent être caractérisées par différents paramètres tels que leurs origines (naturelle, synthétique, métalliques), leur forme (droite, à crochet) et leurs dimensions. Celles-ci sont souvent exprimées, dans le cas des fibres cylindriques, en termes de facteur d'aspect avec r le ratio longueur/diamètre (1.18).

$$r = L_f / d_f \quad (1.18)$$

Ces paramètres conditionnent le caractère hydrophile ou hydrophobe de la fibre, son adhérence avec la matrice et sa rigidité, des caractéristiques importantes pour des fibres incorporées dans le béton.

Les fibres peuvent également être classées en fonction de leur action dans le béton ; le paragraphe 1.2.3 présentera les fibres utilisées selon l'application souhaitée.

D'après les normes [NF EN 14889-1'06] et [NF EN 14889-2'06], les fibres métalliques ou polymériques destinées à renforcer les bétons doivent avoir les caractéristiques précisées dans l'Extrait 1.8 et l'Extrait 1.9. La capacité de dispersion dans le béton est également mentionnée comme une condition *sine qua non* à leur utilisation.

Fibres d'acier

Éléments droits ou déformés provenant de fil étiré à froid raboté, de tôle découpée, d'extraits de coulée, de fil étiré froid raboté ou de blocs d'acier fraisés. Les fibres doivent pouvoir être mélangées de manière homogène dans le béton ou le mortier.

Extrait 1.8 : Définition des fibres et mise en œuvre dans le béton [NF EN 14889-1'06]

Fibres de polymère

Éléments droits ou déformés de produit extrudé, orienté et coupé, qui conviennent pour être mélangés de manière homogène dans le béton ou le mortier.

Extrait 1.9 : Définition des fibres et mise en œuvre dans le béton [NF EN 14889-2'06]

Il est important de définir les fibres également par rapport à leur rigidité. En effet, selon ce critère, elles perturberont plus ou moins le squelette granulaire du matériau et donc sa rhéologie à l'état frais et ses capacités en compression à l'état durci. [MARTINIE'10] définit la

rigidité d'une fibre selon le ratio flèche/longueur de celle-ci soumise à une contrainte dans le béton qui n'est autre que le seuil du matériau.

En considérant une fibre de diamètre d_f , de longueur L_f , ayant un module de Young E_Y (Pa) immergée dans un béton de seuil τ , la flèche f peut s'écrire selon la relation (1.19) :

$$f \sim \frac{\tau d_f L_f^4}{E_Y I_i} \quad (1.19)$$

Le moment d'inertie de la fibre I_i est défini par la relation (1.20) dans le cas d'une fibre cylindrique :

$$I_i = \frac{\pi d_f^4}{64} \quad (1.20)$$

Le ratio flèche/longueur est alors :

$$\frac{f}{L_f} \sim \frac{\tau}{E_Y} r^3 \quad (1.21)$$

Dans le cas de cette étude, les fibres majoritairement utilisées sont métalliques, avec un rapport L_f/d_f de 64 et une flèche maximale annoncée par le constructeur de 5% de la longueur de la fibre (voir Annexe 1.4.7). Cette configuration extrême correspond à une contrainte de 40 000 Pa environ, ce qui est loin des valeurs de seuil habituelles pour des bétons. Les fibres employées par la suite sont donc des fibres rigides, au regard du critère défini par [MARTINIE'10].

Les propriétés présentées ci-dessus conditionnent l'influence des fibres dans le béton, frais comme durci. Le paragraphe suivant se propose de détailler l'impact des fibres sur les matériaux cimentaires, à l'état frais comme à l'état durci.

1.2.3. Apport des fibres dans les bétons

1.2.3.1. Rôle à l'état frais

Comme l'a montré le § 1.2.1.3, le béton frais évolue rapidement. Pendant les premières heures de son existence, il subit de nombreuses sollicitations telles le ressuage ou les

retraits, plastique, endogène ou thermique. Ces transformations génèrent de faibles contraintes qui peuvent déformer le matériau, donner naissance à des microfissures, et fragiliser à long terme le béton. Pour contenir ces fissures, les fibres ayant un faible module d'élasticité conviennent bien puisqu'elles réagissent à des contraintes très faibles. Les fibres polymériques (polyéthylène, polypropylène) dont le module est inférieur à 10 GPa sont indiquées pour cette utilisation ; elles garantissent un meilleur comportement du béton dans le temps vis-à-vis du risque de fissuration à jeune âge. Le dosage recommandé par les fournisseurs de fibres est généralement de l'ordre de 600 g de fibres/m³ de béton mais s'étend de 450 à 1200 g/m³.

Si les fibres jouent un rôle de renfort dans le béton frais, elles en perturbent aussi beaucoup la caractéristique principale, sa rhéologie. La Figure 1.15 montre différentes consistances de pâte de ciment fibrée, classée selon le facteur de fibre, produit du facteur d'aspect r et de la fraction volumique de fibres \emptyset_f .

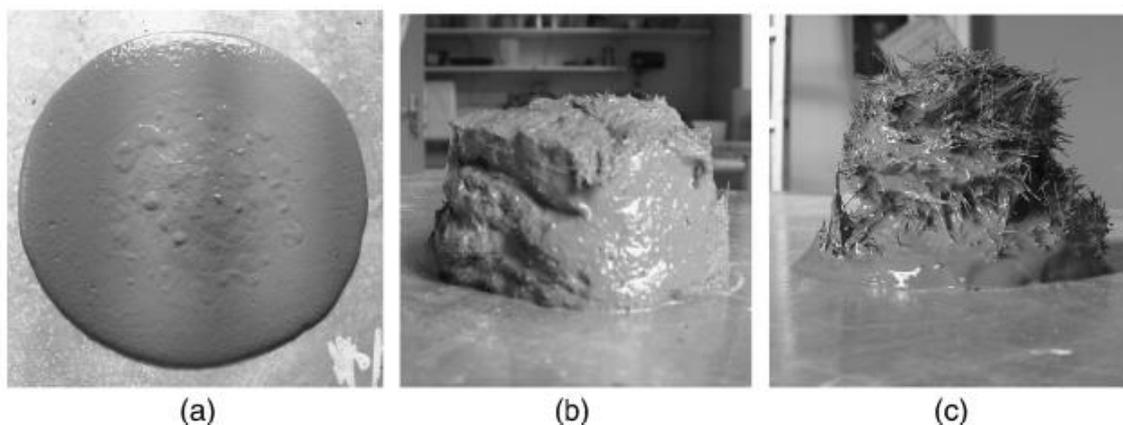


Figure 1.15 : [MARTINIE'10] Consistance d'un coulis. a) $\emptyset_f = 5\%$, $r = 17$ et $r\emptyset_f = 0,85$

b) $\emptyset_f = 20\%$, $r = 17$ et $r\emptyset_f = 3,4$

c) $\emptyset_f = 5\%$, $r = 80$ et $r\emptyset_f = 4$

La formulation des bétons doit donc être ajustée de manière à obtenir un béton garantissant de meilleures propriétés mécaniques et une maniabilité conservée. Pour ce faire, il est nécessaire que le volume de fibres soit inférieur au seuil de percolation, c'est-à-dire à la fraction volumique à partir de laquelle les fibres sont susceptibles de former un réseau percolé de fibres en interaction.

Cette fraction volumique maximale peut-être calculée à partir de la Figure 1.16 qui représente l'encombrement d'une fibre rigide.

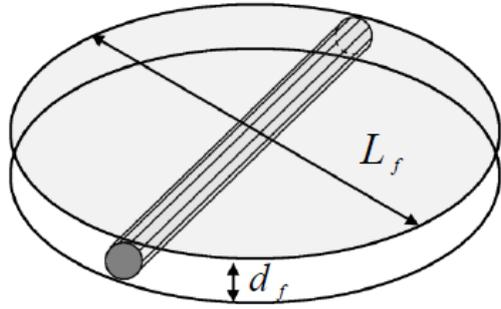


Figure 1.16: Encombrement d'une fibre, [MARTINIE'10]

Le volume d'une fibre cylindrique droite se calcule selon la relation (1.22).

$$V_f = \pi \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 L_f \quad (1.22)$$

L'encombrement d'une fibre peut être défini par son volume apparent, un cylindre de diamètre L_f et de hauteur d_f (relation (1.23)).

$$V_{app} = \pi \left(\frac{L_f}{2} \right)^2 d_f \quad (1.23)$$

En intégrant l'expression (1.22) dans la relation (1.23), l'équation (1.24) est obtenue.

$$V_{app} = \frac{\pi}{4} L_f \cdot L_f \cdot \frac{d_f^2}{d_f} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{L_f}{d_f} \cdot d_f^2 \cdot L_f = \pi \left(\frac{d_f}{2} \right)^2 L_f r \quad (1.24)$$

$$V_{app} = r V_f$$

La percolation est atteinte lorsque l'encombrement de l'ensemble des fibres est égal au volume de la gâchée, ce qui peut s'écrire ainsi :

$$V_{gâchée} = r V_{total\ fibre} \quad (1.25)$$

En divisant la relation (1.25) par le volume de la gâchée, la fraction volumique de percolation $\phi_{f\ max}$ s'exprime selon (1.26), en fonction du facteur d'aspect des fibres concernées :

$$1 = r \phi_{f \max} \quad (1.26)$$

Dans le cas de la Figure 1.15, les fractions volumiques maximales pour les fibres de facteur d'aspect égal à 17 (cas (a) et (b)) est de 5,9 %, ce qui explique la fluidité du matériau (a) et son non-écoulement dans la configuration (b). Pour les fibres de facteur d'aspect de 80, $\phi_{f \max}$ est égal à 1,25%, un dosage largement dépassé dans le cas (c) de la Figure 1.15.

L'utilisation de fibres rigides dans les matériaux cimentaires doit être soumise aux précautions évoquées ci-dessus pour limiter leur impact sur le comportement à l'état frais du béton tout en garantissant l'apport structurel, détaillé dans le prochain paragraphe.

1.2.3.2. Rôle structurel

Comportement des bétons en flexion :

Le béton est un matériau fragile. Des fibres à haut module d'élasticité sont ajoutées dans le béton afin de lui conférer une déformabilité hors de sa zone élastique et donc d'améliorer son comportement post pic de rupture. Elles ne retardent pas la contrainte à laquelle la première fissure apparaît mais limite sa propagation. Le cas le plus remarquable est celui des BFUHP qui atteignent grâce aux fibres (métalliques dans notre exemple), un comportement écrouissant, comme illustré dans la Figure 1.17.

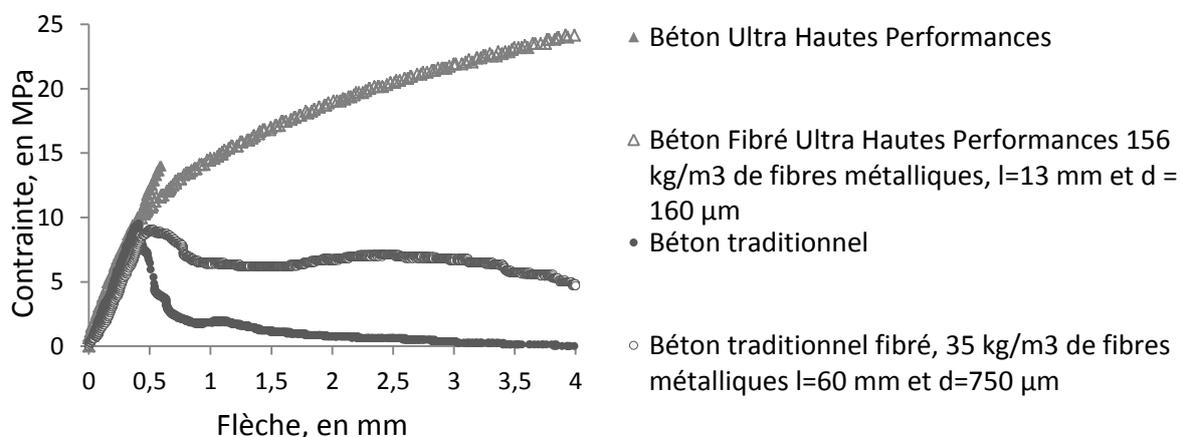


Figure 1.17 : Courbes contrainte/déformation obtenues lors d'un essai de flexion 4 points sur des plaques de bétons non-fibrés et fibrés [DEHAUDT'10]

Comportement en compression :

La présence de fibres dans un béton ne garantit pas forcément une meilleure résistance en compression. En effet, selon [PARANT'03], [RICHARD'95] et [DE LARRARD'94], améliorer la résistance en compression d'un béton est réalisable en modifiant la compacité du squelette granulaire, la porosité du béton et l'homogénéité macroscopique. Or, l'introduction de fibres dans le béton brise l'homogénéité de la matrice, vient perturber l'empilement granulaire et contribue à une plus grande teneur en air ([CAZACLIU'06], [GAWESKA'04]). Toutes ces raisons expliquent que la présence de fibres peut ne pas améliorer les propriétés mécaniques en compression des éprouvettes.

Tenue au feu :

Face au feu, le béton peut s'écailler et éclater, fragilisant ainsi la structure qu'il compose. L'éclatement du béton est dû à deux phénomènes ([KALIFA'00]) : d'une part, les hautes températures entraînent une dilatation du matériau et d'autre part, certains constituants (notamment l'eau), en passant en phase gazeuse, cherchent à s'échapper du matériau, engendrant alors une pression importante dans les pores du béton.

[KALIFA'01] montre que la présence de fibres polymériques entraîne une diminution de la pression dans le matériau à haute température. En effet, à 170°C, les fibres de polypropylène fondent. Elles forment ainsi un réseau poreux qui permet l'évacuation des gaz, réduisant ainsi la surpression dans les pores et évitant l'écaillage du béton ([KALIFA'01], [GAWESKA'04], [ROSSI'09]).

La norme européenne Eurocode 2 ([EUROCODE'04]) recommande l'emploi de monofilament de polypropylène à hauteur de 2 kg/m³ minimum pour lutter contre l'éclatement des bétons soumis au feu. Un dosage plus important en fibres (3 kg/m³) n'améliore pas de façon significative le comportement d'un béton traditionnel ([KALIFA'01]) mais peut se révéler meilleur dans le cas de matrices cimentaires à ultra hautes performances utilisées par [CHEFDEBIEN'13].

Ces exigences normatives sont corroborées par [KNACK'09]. En effet, les tests réalisés (Tableau 1.4) montrent clairement que les fibres de polypropylène longues et fines (diamètre 15 µm et de longueur 6 à 20 mm) incorporées à hauteur de 2 kg/m³ sont les plus efficaces pour lutter contre l'écaillage du matériau.

Les fibres mentionnées pour améliorer la tenue au feu sont généralement des fibres de polypropylène. Cependant, étant donné le mode d'action – la fonte d'un polymère libère un réseau permettant la diminution de la pression dans le béton –, l'utilisation d'autres polymères ayant un point de fusion bas pourrait être envisagée. Des fibres de polyéthylène ont donc été testées (plage de fusion 90 à 135°C pour le PE et 150 à 170 °C pour le PP). Les résultats présentés dans le Tableau 1.4 montrent une meilleure aptitude des fibres de polypropylène à lutter contre l'écaillage. D'autres phénomènes (meilleure absorption par la matrice de certains polymères, viscosité du matériau fondu, fonte plus rapide d'une fibre ayant une section plus faible...) conditionnent donc certainement le rôle des fibres dans les bétons soumis au feu.

	Béton	Fibres de polypropylène									Fibres de polyéthylène	
Diamètre (µm)		non fibré	15	34	53	15			20	34	200	64
Longueur (mm)	2,2		6	12	20	6	20	6	6	6	4,6	
0 kg/ m ³	100%	Pourcentage d'écaillage par rapport à un béton non fibré										
1 kg/ m ³		55	41	65	16	10	11	29	33	104	26	33
2 kg/ m ³		14	16	27	5	1	5	2	7	85	14	17

Tableau 1.4 : Ecaillage de différentes éprouvettes par rapport à une éprouvette de béton non-fibré [KNACK'09]

1.2.3.3. Rôle dans le confort du bâtiment

Certaines fibres peuvent conférer au béton (sous forme de bloc, ou bien projeté) des propriétés d'isolation thermiques et acoustiques, qualités recherchées pour assurer le confort des bâtiments.

Isolation thermique :

L'air étant un très bon isolant, la teneur en air des bétons durcis est donc le critère principal pour caractériser la capacité isolante du matériau. Une mesure de masse volumique sur béton durci permet d'estimer la teneur en air de l'éprouvette.

Certaines fibres ajoutées au mélange absorbent beaucoup d'eau, la quantité d'eau de gâchage utilisée est alors très importante et la perte de masse lors du séchage est conséquente. Les bétons ainsi obtenus contiennent beaucoup d'air, ont donc une masse

volumique relativement faible (entre 400 et 800 kg/m³) et sont par conséquent très isolants. [CEREZO'05] et [NGUYEN'10] obtiennent pour des bétons de chanvre dont la masse volumique est comprise entre 400 et 800 kg/m³ des conductivités thermiques inférieures à 0,15 W/(m.K). La littérature donne des valeurs similaires avec, à la place du chanvre, des copeaux de bois. La conductivité thermique d'un bloc béton « classique » étant de l'ordre de 0,9 W/(m.K), les bétons de chanvre et de bois apparaissent donc comme une bonne alternative en termes d'isolation.

Isolation phonique :

L'onde sonore se propage en faisant vibrer le milieu qu'elle traverse. L'isolation acoustique peut donc se traduire de deux façons : l'onde ne traverse pas le matériau (phénomène « d'effet de masse » assuré par des matériaux à forte inertie) ou bien est amortie par le matériau. Cette absorption varie selon la fréquence du son.

La tendance actuelle se dirige plutôt vers des matériaux légers que vers des matériaux à forte inertie. Comme dans le cas de l'isolation thermique, les bétons à faible masse volumique présentent un intérêt en pouvant absorber les ondes via le réseau de pores présent dans le matériau. L'absorption de l'onde est possible si les pores sont reliés entre eux, il s'agit alors de porosité ouverte. Les fibres, celles de chanvre notamment, ne sont pas parfaitement enrobées par la matrice lors de la fabrication, ce qui contribue à la création d'un réseau de pores ouvert, susceptible de bien absorber les ondes sonores [CEREZO'05].

1.2.3.4. Conclusion sur l'apport des fibres dans les bétons

Les fibres améliorent les propriétés du béton, où lui en confèrent de nouvelles. Pour que ces nouvelles caractéristiques soient constantes dans l'ensemble du matériau, leur dispersion se doit d'être homogène. Celle-ci est assurée en premier lieu par le malaxage, une étape complexe et peu étudiée dans le processus de fabrication des bétons. Il peut être noté que le transport et la mise en œuvre du béton influencent également la répartition des fibres dans les bétons mais cette étude se concentre sur le malaxage, procédé de fabrication dont les facteurs principaux sont abordés dans le § 1.2.4.

1.2.4. Malaxage du béton

Le malaxage consiste en un mélange des différents constituants des bétons dans le but d'obtenir un matériau homogène (Extrait 1.10).

8.1 Dosage et malaxage

[...]

Le malaxage des constituants doit être effectué et poursuivi jusqu'à l'obtention d'un mélange de béton d'aspect homogène. Si les additions sont des fibres, des précautions particulières doivent être prises pour assurer leur répartition homogène dans le mélange.

Extrait 1.10 : Recommandations normatives avant la projection de béton fibré [NF EN 14887-2]

Le malaxage permet de passer, grâce à l'ajout d'eau et d'éventuels adjuvants, d'un ensemble granulaire sec à un fluide. Cette transition n'est pas immédiate et une étape intermédiaire peut être citée, la phase pendulaire, apparaissant à gauche dans la Figure 1.18.



Figure 1.18 : Evolution d'un matériau cimentaire avec l'ajout d'eau : a) phase pendulaire b) état fluide

Pendant cette phase, certains grains se sont agglomérés entre eux mais l'eau n'est pas encore suffisamment dispersée dans l'ensemble du mélange pour que le matériau atteigne les niveaux 5 et 6 décrits dans la Figure 1.19, états où les grains sont peu à peu en suspension dans l'eau.

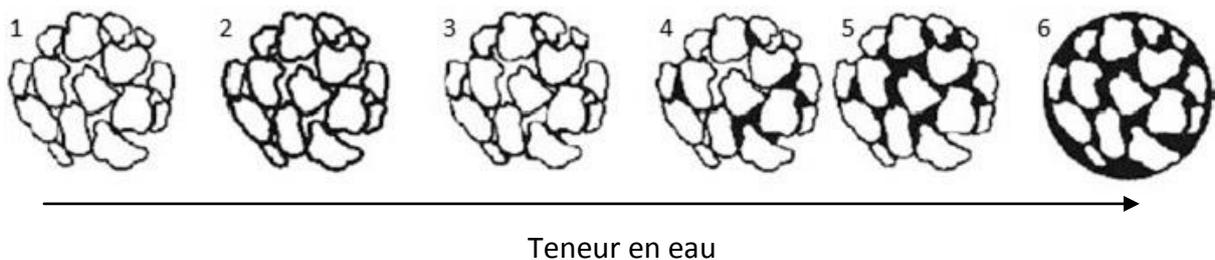


Figure 1.19 : Evolution d'un milieu granulaire avec l'ajout d'un liquide [PIETSCH'08]

1.2.4.1. Procédure de malaxage

L'évolution du matériau avec le malaxage est importante. La fabrication de béton fibré est d'autant plus complexe que l'inclusion ajoutée au système n'est pas sphérique, et vient donc perturber l'empilement granulaire.

Moment d'introduction des fibres :

La question du moment d'introduction des fibres a été abordée précédemment, dans le paragraphe 1.2. Dans la pratique, et en accord avec les fiches techniques des fibres, tous les moments d'introduction peuvent être utilisés. La décision d'introduire, dans le cas de cette étude, les fibres à la fin du malaxage, dans le béton frais considéré comme homogène, est lié à la démarche de travail retenue.

Méthode d'introduction des fibres :

Tout comme le moment d'introduction des fibres, le mode d'introduction des fibres dans le malaxeur n'est pas clairement défini.

[MARTINIE'10] et [PARANT'03] reflètent assez bien la réalité industrielle de l'ajout manuel des fibres dans le mélange. D'autres solutions existent, avec des dispositifs d'introduction des fibres par tapis roulant ou à l'aide de vibrations dans un convoyeur. La Figure 1.20 illustre ces deux types de procédés.



Figure 1.20 : A gauche : tapis roulant servant à convoyer les fibres jusqu'au malaxeur (Source Incite AB) – A droite : silo doseur (CERIB)

Afin d'avoir une méthode facile et reproductible d'introduction des fibres, des fabricants de fibres ont décidé d'emballer celles-ci dans des sachets dits « pulpables » destinés à être introduits directement dans le malaxeur, puis à être déchirés afin de libérer les fibres (Figure 1.21). Cette méthode d'introduction n'est conseillée que dans le cas où des granulats sont incorporés dans le malaxeur (ils permettent de déchirer le sachet).



Figure 1.21 : Sachet "pulpable" de fibres

Notons que les cimentiers se sont également intéressés au béton fibré et ont développé des mélanges fibres-ciment permettant ainsi une introduction simultanée de ces deux constituants.

Comme c'est le cas pour les procédures de malaxage, différentes méthodes d'introduction des fibres cohabitent sans que l'une d'elles apparaisse comme meilleure qu'une autre.

Temps et vitesse de malaxage :

Le temps et la vitesse de malaxage sont parfois abordés dans les fiches techniques des fibres. L'Extrait 1.11 préconise un malaxage de 5 minutes, l'Extrait 1.12 de 30 secondes et l'Extrait 1.13 de 90 secondes. Notons qu'aucun de ces extraits ne donnent d'indications sur le malaxeur utilisé.

Mixing

To achieve optimum fibre distribution during mixing it is recommended the total fibre requirement is added first "bags and all" to the mixer with the initial batch water. [...] The mulchable bag will release the fibres which will be homogenously distributed throughout the mix after 5 minutes of mixing.

Extrait 1.11 : Recommandation de Elasto Plastic Concrete concernant le temps de malaxage d'une de ses fibres, voir Annexe

Malaxeur :

Chryso® Fibre S50 s'incorpore avec les granulats pendant un temps de malaxage à sec de 30 secondes.

Extrait 1.12 : Recommandation de Chryso concernant le temps de malaxage en cas d'ajout de fibre S50, voir Annexe 1.4.4

Mise en œuvre/Préparation du mélange

[...] Malaxer le mélange (sable, ciment, filler et fibres) pendant les 15 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 90 secondes.

Extrait 1.13 : Recommandation de Sika concernant le temps de malaxage relatif à l'introduction de fibres viscochape, Annexe 1.4.1

La Figure 1.22 indique quant à elle que le temps de malaxage dépend de l'efficacité du malaxeur.



Figure 1.22 : Conseils de Bekaert concernant le malaxage de béton de fibres, Annexe 1.4.5

A notre connaissance, il n'existe pas aujourd'hui de procédure proposant un temps et une vitesse de malaxage donnée dans le cas des bétons fibrés. Les fiches techniques des fibres qui conseillent un moment d'introduction indiquent également un temps de malaxage après l'ajout des fibres. De manière générale, le malaxage doit durer quelques minutes après l'addition des fibres, si celles-ci sont introduites avec les autres constituants, ou quelques dizaines de secondes si elles sont ajoutées dans le mélange déjà homogénéisé.

Rien ne concerne dans les données techniques les vitesses de malaxage mais [CAZACLIU'06] conseille, dans le cas des BFUP, un compromis entre une vitesse de malaxage trop faible, induisant un temps de malaxage beaucoup trop long, et une vitesse excessive, entraînant une ségrégation des fibres.

Conclusion sur les process de malaxage :

L'expérience a montré que certaines procédures de malaxage étaient plus adaptées dans certains cas. Ces résultats empiriques ne permettent cependant pas de dégager une procédure optimale, d'autant que le process de fabrication n'est pas seul acteur de la dispersion des fibres, les paramètres liés au malaxeur étant eux aussi importants.

1.2.4.2. Malaxeurs à béton

De nombreux malaxeurs à béton existent sur le marché. La Figure 1.23 et la Figure 1.24 représentent la gamme de malaxeurs disponibles, selon l'axe du malaxage (horizontal, vertical ou incliné). De nombreux autres paramètres permettent de distinguer les malaxeurs. Leur cuve par exemple, peut être fixe ou rotative, cylindrique ou conique. Le nombre, la forme, l'orientation et la disposition des pales et des racles par rapport à la cuve est également un élément de distinction entre les malaxeurs. Enfin, le mouvement des pales choisi (rotation, train-valseur ...) permet une autre classification des malaxeurs.

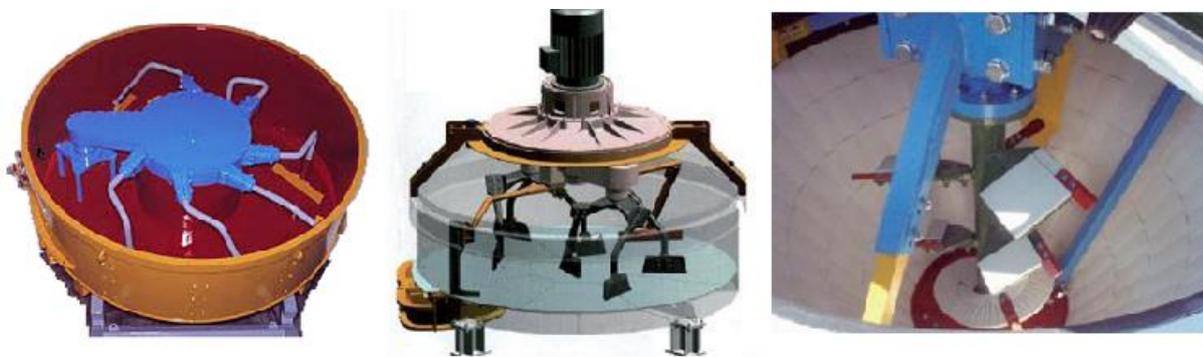


Figure 1.23 : Malaxeurs à axe vertical – à gauche : turbo malaxeur (cliché Liebherr), au milieu, malaxeur à train valseur, à droite malaxeur conique (cliché Kniele)



Figure 1.24 : Malaxeurs à axes horizontaux et inclinés, à gauche : deux arbres équipés de pales, au centre, monoarbre à hélice, à droite malaxeur à cuve inclinée

La diversité des malaxeurs à béton et les nombreuses possibilités en termes de process de malaxage incitent à se tourner vers la simulation numérique pour comprendre l'impact des choix de procédure et d'appareil sur le béton final tout en diminuant le nombre d'essais à effectuer.

1.2.4.3. Simulation du malaxage des bétons fibrés

Les techniques de simulations sont multiples. Elles se distinguent notamment par leur type d'approche, continue ou discrète. Une approche continue implique de considérer le milieu étudié comme un tout, tandis qu'une approche discrète s'intéresse à chaque constituant de ce milieu.

Les méthodes DEM (Discrete Element Methode) correspondent bien à la simulation du comportement des milieux granulaires. Les fluides quant à eux sont habituellement modélisés avec la technique dite CFD (Computational Fluid Dynamic). La Figure 1.25 donne un exemple de malaxage de béton selon les deux méthodes.

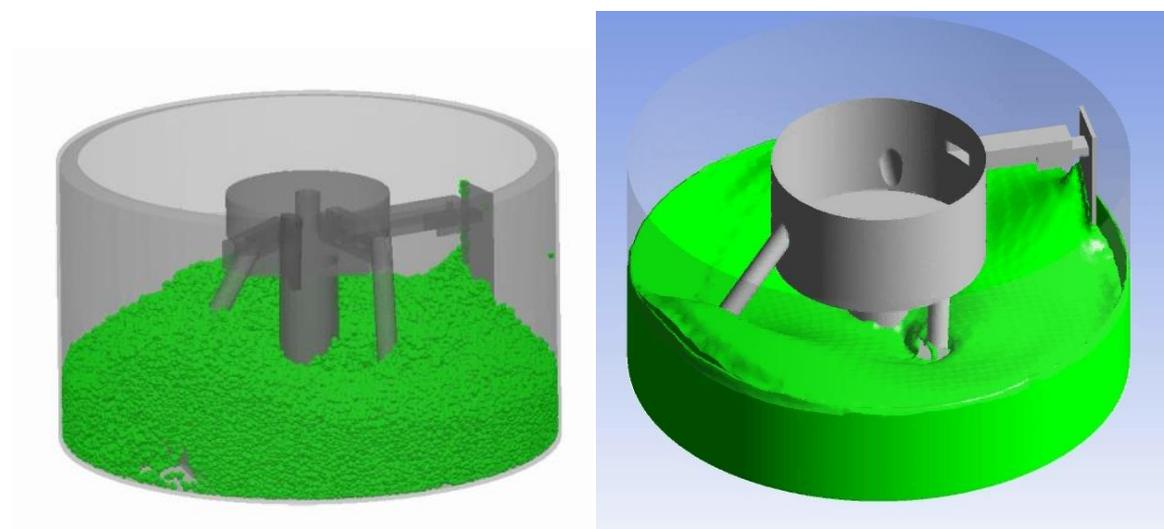


Figure 1.25 : Simulation numérique du malaxage par a) DEM ou b) CFD, source IAB

La différence entre ces deux simulations concerne la façon dont le béton est considéré, milieu granulaire dans le cas a) et matériau fluide dans le cas b). Or le malaxage est justement l'étape qui transforme un ensemble de grains hétérogènes en un milieu homogène, ce qui invalide la supériorité éventuelle d'une méthode sur l'autre.

La simulation du malaxage des bétons fibrés fait l'objet d'une collaboration entre le CERIB et l'IAB (Institut für Angewandte Bauforschung, institut de recherche appliquée sur la construction, Weimar, Allemagne). Aujourd'hui, l'insertion de matériau solide (fibres) dans le fluide modélisé dans les méthodes CFD n'est pas maîtrisée. La méthode DEM est certes dédiée aux matériaux granulaires mais simuler une cohésion entre deux éléments, afin de se rapprocher du cas du béton, est possible. La modélisation d'essais rhéologiques tels que le test au V-Funnel ou un essai d'étalement ont ainsi été réalisés, comme le montre la Figure

1.26. La méthode des éléments distincts, normalement réservée aux matériaux granulaires, peut donc être employée pour simuler le comportement de matériau fluide.

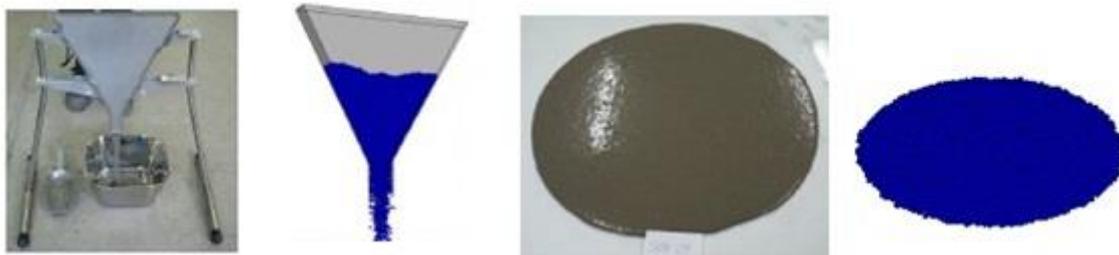


Figure 1.26 : Simulation numérique d'essais rhéologiques via la méthode DEM – IAB Weimar

Le modèle permet également d'associer des particules entre elles, pour représenter des fibres par exemple (Figure 1.27).

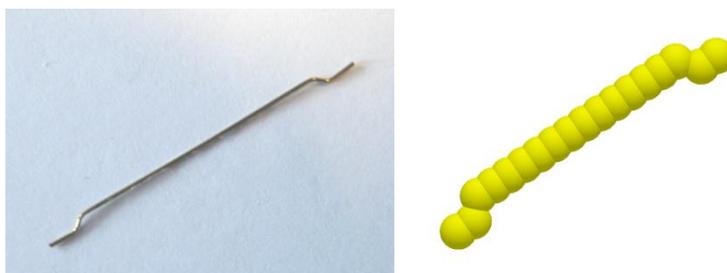


Figure 1.27 : Représentation d'une fibre métallique à crochet par la méthode DEM - IAB Weimar

En couplant les résultats précédents, une simulation numérique du malaxage d'un béton fibré a pu être proposée, comme illustrée Figure 1.28.

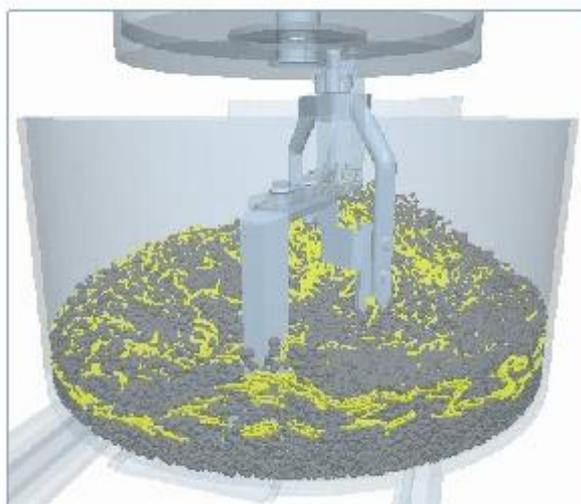


Figure 1.28 : Modélisation DEM du malaxage d'un béton fibré - Modélisation du malaxeur : Loïc ROUAULT, CERIB, Simulation numérique : Knut KRENZER, IAB Weimar

La simulation numérique pourra dans l'avenir permettre de vérifier instantanément l'influence d'un paramètre sur la dispersion des fibres. Avant d'atteindre cette fonctionnalité, de nombreuses questions doivent être traitées, notamment celles concernant la nature du matériau à considérer (milieu granulaire ou fluide) et le mouvement d'ensemble du matériau suite à l'action des pales ou à un choc entre deux éléments.

1.2.5. Conclusion sur les bétons fibrés

L'ajout de fibres dans le béton permet d'obtenir de nouvelles propriétés cependant, la dispersion de celle-ci au sein du matériau conditionne la plus-value apportée par le renfort.

La compréhension de l'étape de malaxage est donc nécessaire pour optimiser la quantité de fibres introduites dans les bétons. Pour ce faire, les mélanges sont étudiés, dans le cas général tout d'abord puis dans le cas des bétons, avec notamment le lien entre homogénéité finale et qualité de malaxage.

1.3. Mélange

1.3.1. Mécanismes de mélange

L'objectif des mélanges est de rendre homogène, à une échelle donnée, l'association de plusieurs matériaux différents.

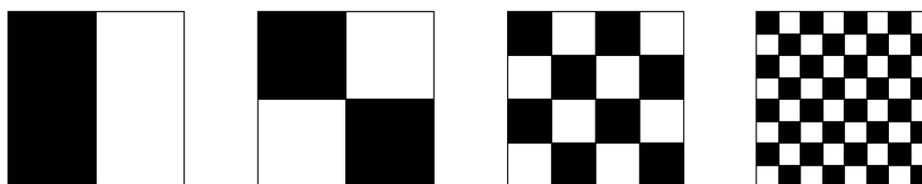


Figure 1.29 : Echelle de mélange [SCHOFIELD'71]

Pour obtenir des mélanges de plus en plus intimes (Figure 1.29), tous les phénomènes peuvent être utilisés, qu'ils soient hydrodynamiques, thermiques, mécaniques ou chimiques. Quelle que soit la sollicitation initiale, les mécanismes de mélange se classent selon deux catégories, détaillées ci-dessous :

La diffusion est un phénomène tendant à homogénéiser un milieu par des déplacements individuels de particules. Elle est caractérisée par l'équation de diffusion, établie

empiriquement par Fick en 1855 à partir d'une analogie à la loi sur la conduction de la chaleur de Fourier et des premières observations sur le mouvement brownien.

La première loi de Fick correspond à une relation de proportionnalité entre le flux de diffusion et le gradient de concentration. Ainsi l'espèce chimique A, de concentration C_A se diffuse dans le milieu B selon le vecteur densité de courant de particules \vec{J}_A et avec D_{AB} le coefficient de diffusion de A dans B (m^2/s), selon l'équation (1.27) :

$$\vec{J}_A = -D_{AB} \overrightarrow{\text{grad}} C_A \quad (1.27)$$

Au contraire de la diffusion qui concerne les particules de manière individuelle, le mélange par convection implique un mouvement collectif de particules mis en mouvement suite à l'existence dans le milieu d'un gradient (de température, de concentration, de contrainte etc).

Dans la réalité, il est difficile de dissocier ces mécanismes et il apparaît, d'après la Figure 1.30, que l'association des deux phénomènes permette d'accélérer le phénomène de mélange.

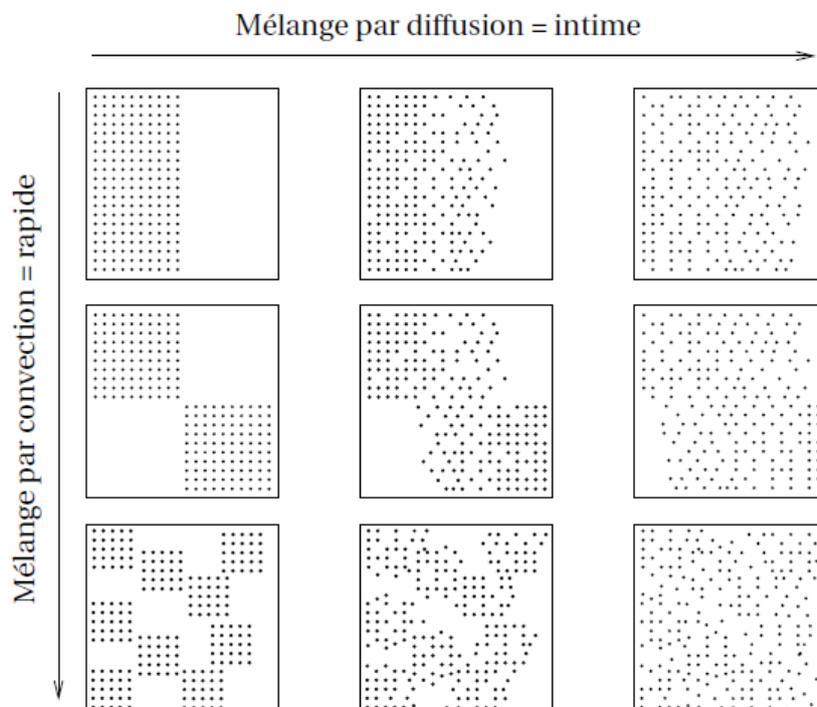


Figure 1.30 : Simulation de mélange par diffusion et/ou convection [SCHOFIELD'71]

En effet, la convection permet de fractionner l'espèce à disperser, ce qui facilite ensuite sa diffusion. Pour diminuer la distance de diffusion grâce au convectif, [KIRBY'09] évoque deux méthodes.

La première est dite « du boulanger » et consiste en un étirement et un pliage du matériau, comme le montre la Figure 1.31.

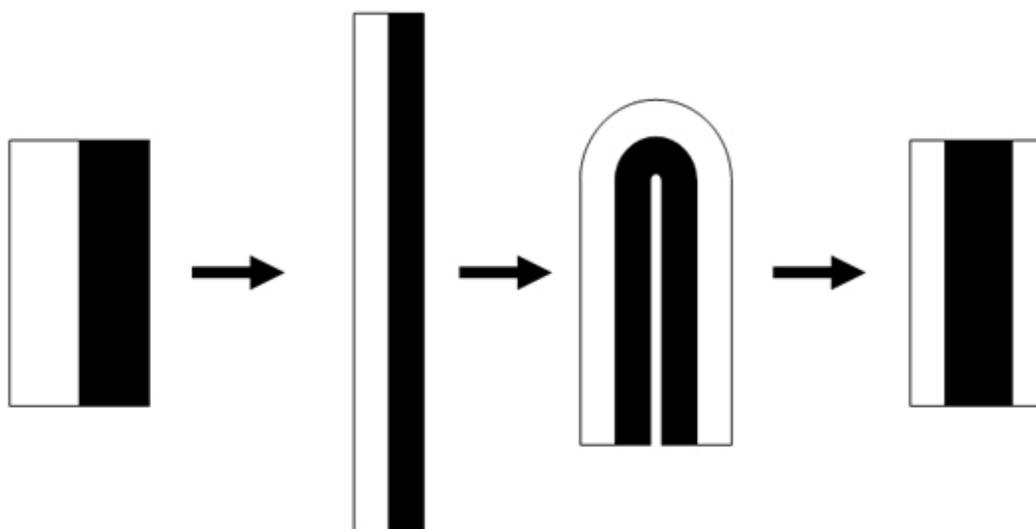


Figure 1.31 : Principe de la méthode "du boulanger" d'après [KIRBY'09]

Cette technique, si elle est répétée, mène à un mélange intime des deux espèces, schématisées en noir et en blanc sur la Figure 1.32.

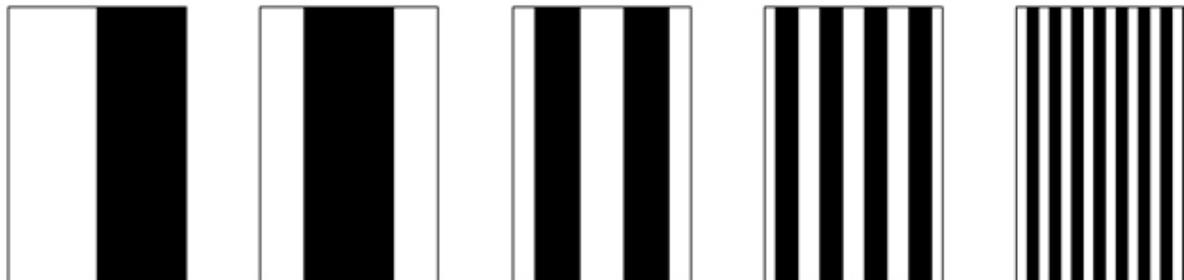


Figure 1.32 : Influence de la méthode "du boulanger" sur un mélange binaire [KIRBY'09]

La deuxième méthode consiste en une torsion du matériau sur lui-même qui, comme le montre la Figure 1.33 conduit également à une réduction des longueurs de diffusion.



Figure 1.33 : Influence de la torsion d'un matériau binaire [KIRBY'09]

L'action du convectif permet donc d'accélérer la diffusion en réduisant les longueurs sur lesquelles l'espèce doit diffuser. Voyons à présent quel impact les phénomènes de convection peuvent avoir sur le temps nécessaire au mélange par diffusion.

1.3.2. Temps caractéristique

La relation (1.28) est établie dans le cas de la propagation d'une espèce par diffusion. Elle traduit la propagation d'une espèce au sein d'un autre matériau en fonction du temps et de sa diffusivité.

$$l_{diff} = \sqrt{D_{diff}t} \quad (1.28)$$

l_{diff} est la longueur de diffusion, en mètre, D_{diff} est le coefficient de diffusion de l'espèce, en $m^2.s^{-1}$ et t est le temps, en seconde.

Le convectif permet de réduire la taille caractéristique L de l'espèce à mélanger. La longueur l_{diff} sur laquelle l'espèce doit se disperser est alors divisée par N_c , le nombre de divisions apportées par le convectif (relation (1.29)).

$$l_{diff} = \frac{L}{N_c} \quad (1.29)$$

La diffusion d'une espèce au sein d'une autre est donc d'autant plus rapide que la convection est importante. Ces mécanismes peuvent être transposés au cas des bétons fibrés, c'est l'objet du paragraphe suivant.

1.3.3. Cas de la dispersion des fibres dans le béton

Dans cette étude, le choix a été fait d'introduire les fibres dans le béton frais, en une seule fois et en un seul point du malaxeur. L'amas initial de fibres est donc important et il est envisageable que les organes de mélanges du malaxeur (convectif) divisent ce groupement de fibres qui ensuite se disperse dans le mélange (diffusif).

L'obéissance de la dispersion des fibres à ces mécanismes n'est pas à ce jour établie. Dans le § 4.1.2.1, nous analyserons les dispersions de fibres mesurées à la lumière des mécanismes de la convection et/ou de la diffusion.

Habituellement, le malaxage est étudié sans faire référence à ces phénomènes mais plutôt en s'intéressant au malaxeur, au cycle de fabrication ou encore au béton obtenu. Ces méthodes, utilisées dans le cas des bétons, fibrés ou non fibrés, sont présentées dans le paragraphe § 1.4 ci-dessous.

1.4. Malaxage, cisaillement et homogénéité

Le béton est obtenu après un mélange de différents constituants lors de la phase de malaxage. D'après [FERRARIS'01], cette étape est d'autant plus efficace qu'elle disperse les éléments de manière homogène le plus rapidement possible. Le mélange des constituants étant assuré par le cisaillement transmis au matériau par le malaxeur, il y a donc un lien entre efficacité de malaxage, cisaillement imposé et homogénéité finale. De nombreux paramètres peuvent influencer le malaxage, une liste est proposée dans la Figure 1.34.

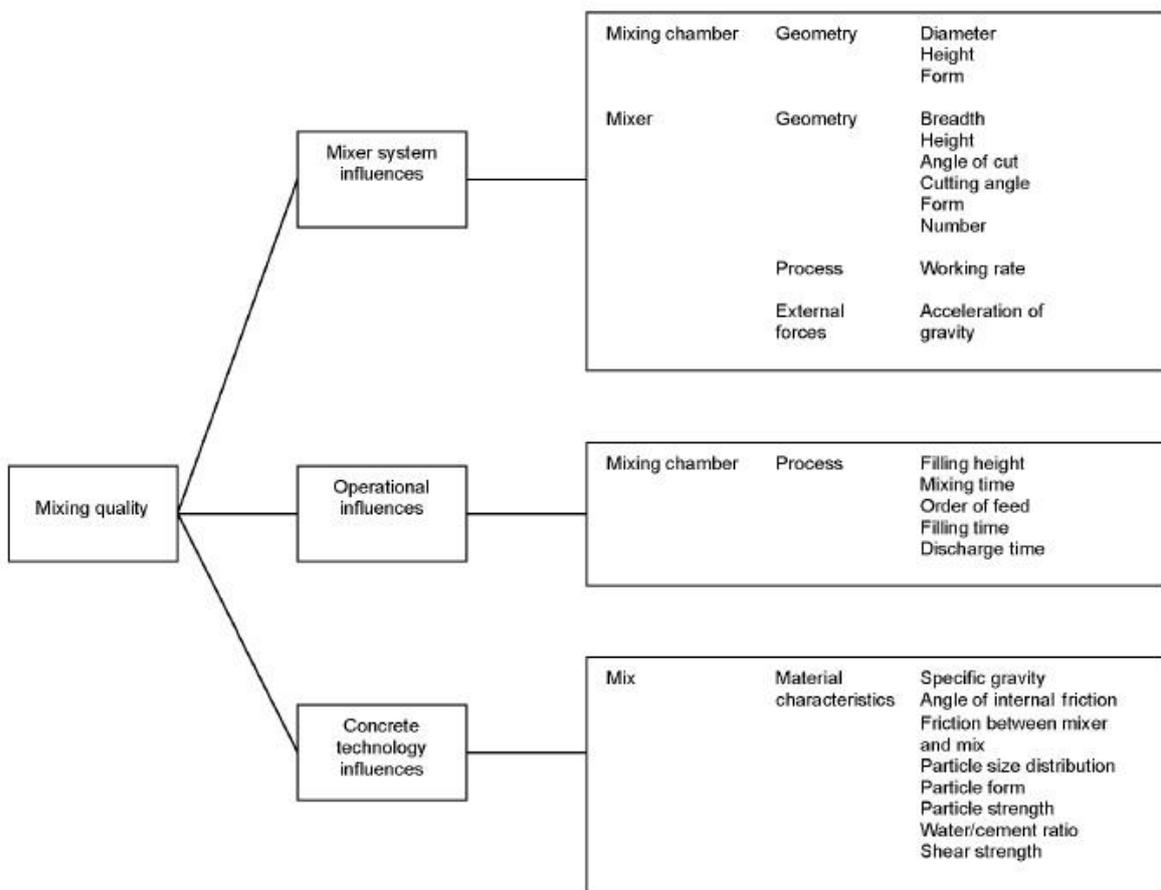


Figure 1.34 : Paramètres influençant la qualité du malaxage [CHARONNAT'03]

La Figure 1.34 relie la qualité du malaxage à trois familles de paramètres : le malaxeur, le cycle de malaxage et le béton. Ces trois possibilités peuvent donc être exploitées pour déterminer le cisaillement subi par le mélange ou pour mesurer l'homogénéité du matériau. Les paragraphes suivants détaillent ces méthodes, dans le cas des bétons non fibrés et des bétons fibrés.

1.4.1. Etude d'un malaxeur

[CHARONNAT'03] évoque dans la Figure 1.34 l'influence du malaxeur sur le béton final. Les caractéristiques de ces malaxeurs sont nombreuses (contenance, forme de la cuve, présence d'une racle, cinématique des pales...) comme l'illustrent la Figure 1.23 et la Figure 1.24 (cf § 1.2.4.2). Dans ce contexte, établir un lien entre système de mélange et cisaillement apparaît comme une tâche trop complexe. Cette conclusion est partagée par [CAZACLIU'13] qui constate que les protocoles proposés pour déterminer l'efficacité des malaxeurs (norme [NF EN 18650-2'06] ou recommandations RILEM [CHARONNAT'03]) ne s'adaptent pas à l'ensemble des malaxeurs disponibles sur le marché. Les références évoquées ci-dessus proposent de relier la performance des malaxeurs au cycle de malaxage d'une part et au béton obtenu d'autre part, confirmant le lien existant entre type de malaxage, cisaillement et homogénéité.

Dans le cas des bétons fibrés, un lien entre dispersion des fibres et malaxeur est également évoqué par la Japan Society of Civil Engineers ([JSCE '08]) au sujet des BFUHP qui préconise de malaxer ces bétons avec des malaxeurs déjà réputés comme convenant à ce type de béton, comme le montre l'Extrait 1.14.

10.4.3 Mixing

(1) In principle, use mixers that are confirmed in advance by existing field data or tests to satisfy the design material properties and required performance for the manufacturing of HPCRCC.

Extrait 1.14 : Préconisation concernant le malaxage des bétons fibrés d'après la JSCE [JSCE'08]

[PARANT'03] aborde la relation entre dispersion des fibres et orientation des pales, le parallélisme des pales avec le fond de la cuve (cas B sur la Figure 1.35) favorisant d'après lui la répartition des fibres dans le matériau.

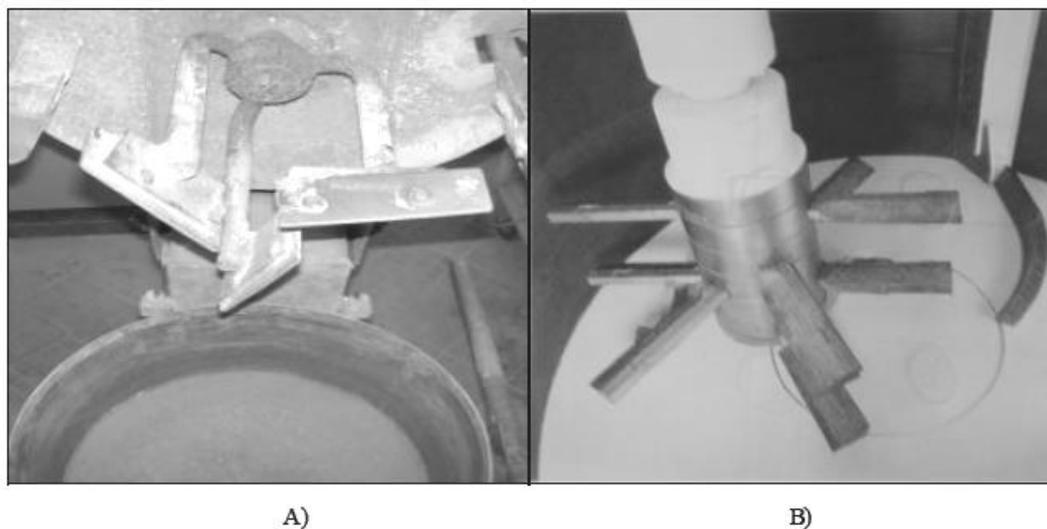


Figure 1.35 : Pale de malaxeur, perpendiculaire à l'écoulement dans le cas A) et parallèle dans le cas B) , [PARANT'03]

En dépit du constat, unanime, de l'influence du malaxeur sur le béton, fibré ou non fibré, ce paramètre n'est pas, à notre connaissance, étudié de manière globale. La détermination des cisaillements imposés au matériau selon les malaxeurs serait une solution, mais la complexité des malaxeurs rend cette question difficile à traiter par les méthodes habituelles, basées sur la cinématique et la géométrie.

1.4.2. Etude du malaxage

Le cycle de malaxage est constitué, d'après la Figure 1.34, d'un ensemble de paramètres conditionnant sa qualité. Pour étudier cette étape du process, [BRACHET'76] propose d'enregistrer différents paramètres liés à des gâchées et notamment la puissance consommée par le malaxeur. Cette idée est reprise également par [CHARONNAT'76] et [CHARONNAT'91] qui définissent l'évolution de la puissance consommée par le malaxeur selon différentes phases du malaxage, comme le présente la Figure 1.36.

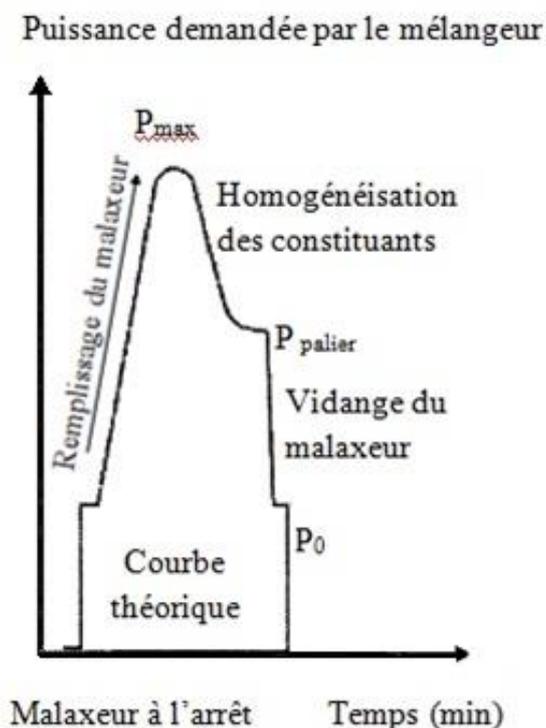


Figure 1.36 : Schéma de puissance nécessaire pendant les différentes phases de malaxage [CHARONNAT'91]

Le cycle de malaxage se découpe en différentes phases qui peuvent être caractérisées par rapport à la puissance demandée.

Phase n°1 : L'accroissement de la puissance lors du remplissage du malaxeur renseigne sur l'efficacité des dispositifs d'introduction des constituants (qui a lieu en une seule fois). Cette phase correspond sans doute également à l'état pendulaire (voir Figure 1.18 dans § 1.2.4) dans lequel se trouve le matériau, état qui cesse naturellement lorsque toute l'eau a été introduite et que l'homogénéisation de l'intégralité des constituants commence.

Phase n°2 : La puissance maximale P_{max} atteinte indique le taux de remplissage du malaxeur, à conditions de remplissage égales.

Phase n°3 : La décroissance de la puissance montre le temps nécessaire au malaxeur pour homogénéiser le mélange.

Phase n°4 : La puissance stabilisée P_{palier} donne plusieurs informations. Elle peut être corrélée à la plasticité du béton d'une part et signaler la fin du malaxage d'autre part. [CHOPIN'02] se sert également de cette stabilisation de puissance pour définir un temps de malaxage.

Phase n°5 : Le temps nécessaire pour passer de P_{palier} à P_0 correspond à la capacité de vidange du malaxeur.

Phase n°6 : La puissance finale P_0 permet de savoir si la vidange du malaxeur est totale ou non.

Notons que les courbes réelles de puissance mesurées par [CHARONNAT'91] (Figure 1.37) suivent les évolutions annoncées sur la courbe théorique de la Figure 1.36.

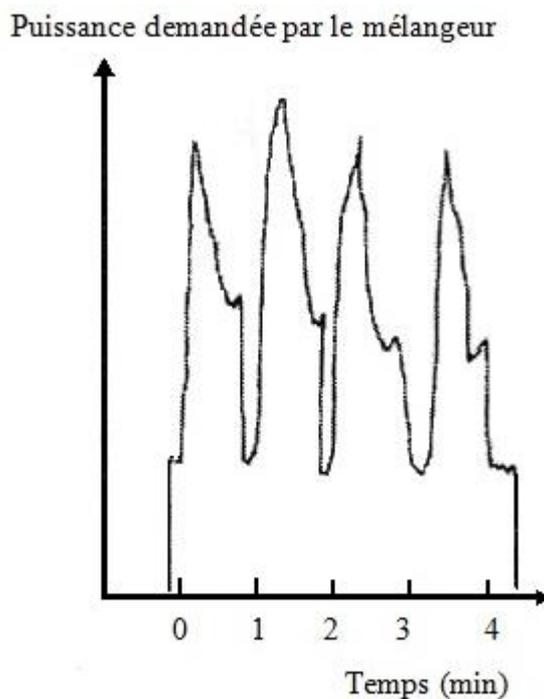
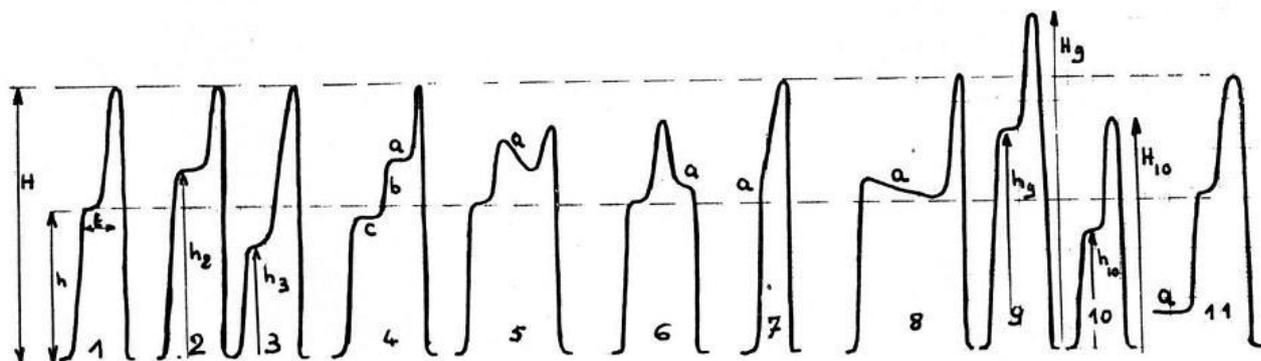


Figure 1.37 : Evolution de la puissance pendant le malaxage [CHARONNAT'91]

Les points significatifs de la courbe dépendent du béton fabriqué, du malaxeur utilisé et du process suivi. [CHARONNAT'76] propose, sur la Figure 1.38, une interprétation aux écarts constatés entre les courbes réelles et la courbe de référence (Figure 1.36).



Type 1	Courbe type caractéristique H, h, t	Type 6	Temps de malaxage très court (a : palier inexistant)
Type 2	Manque d'eau $h_2 > h$	Type 8	Temps de malaxage trop long (a : raidissement du béton)
Type 3	Excès d'eau $h_3 < h$	Type 9	Excès d'un constituant solide $H_9 < H \rightarrow h_9 < h$
Type 4	Manque d'eau (a) suivi d'un ajout (b) ce qui a entraîné un excès d'eau (c)	Type 10	Manque d'un constituant solide $H_{10} < H \rightarrow h_{10} < h$
Type 5	Ajout d'un constituant solide ou difficultés dans l'écoulement du ciment (a)	Type 11	La vidange du malaxeur ne s'est pas faite complètement
Type 6	Retard pour l'introduction d'un constituant solide (a)		

Figure 1.38 : Courbes de malaxage possibles, [CHARONNAT'76]

Une comparaison de la courbe réelle avec les cas évoqués sur la Figure 1.38 peut permettre une correction immédiate de la déficience détectée. La courbe de puissance apparaît donc comme un moyen efficace pour suivre le déroulement du cycle de malaxage en temps réel.

A notre connaissance, l'étape de malaxage n'a été étudiée que par le biais des puissances consommées. Cette méthode qui existe depuis plusieurs dizaines d'années est d'ailleurs toujours utilisée pour suivre l'évolution du malaxage, comme en témoignent les travaux de [LE'07] ou de [CAZACLIU'06]. Cependant la dépendance des courbes de malaxage vis-à-vis du béton, du malaxeur et du cycle de malaxage choisi complexifie son utilisation.

Dans le cas des bétons fibrés, des études des courbes de puissance ont également été faites et apparaissent dans la Figure 1.39. Le premier pic, mesuré après 100 secondes de malaxage, correspond à l'introduction de l'eau. La présence de fibres dans le mélange au moment de l'ajout d'eau nécessite une puissance plus importante, cette surconsommation se retrouve également lors de l'introduction des fibres en phase humide, ce qui confirme l'influence de la présence de fibres sur l'étape de malaxage.

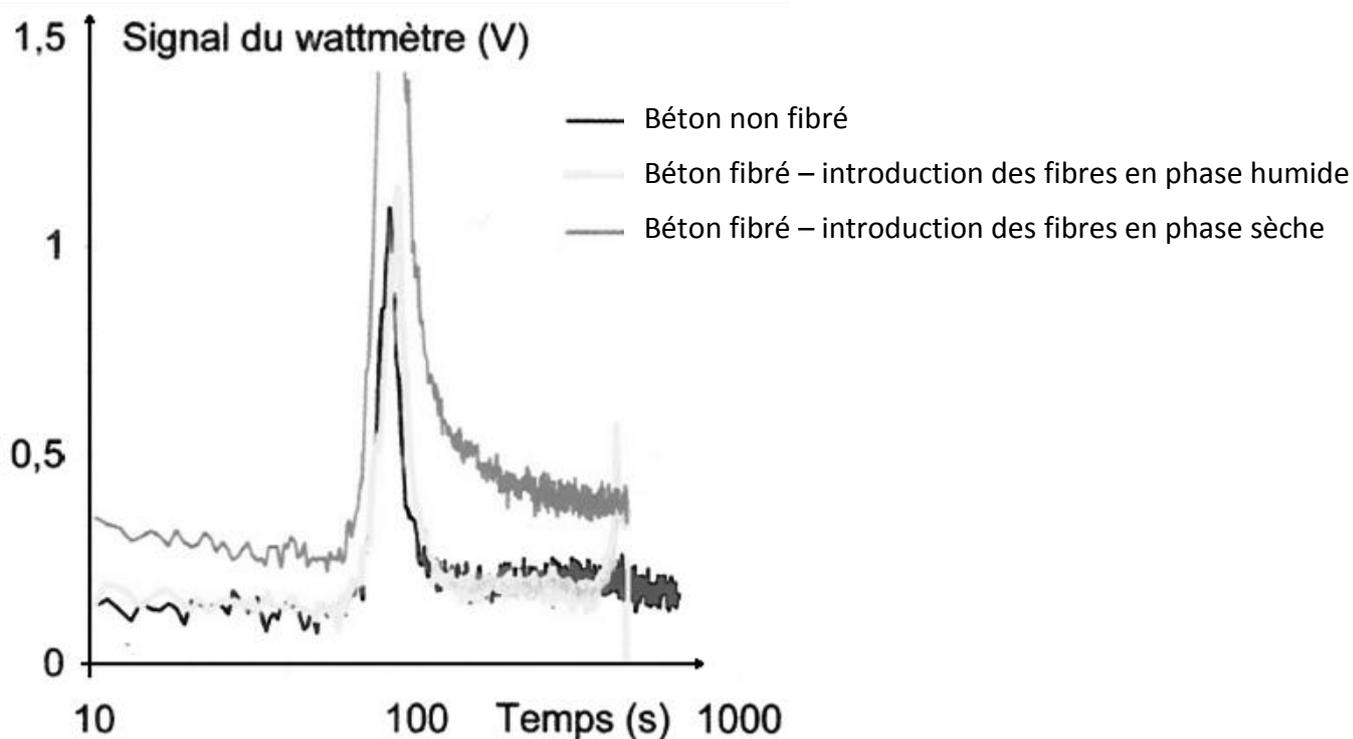


Figure 1.39 : Evolution de la puissance de malaxage par mesure de la tension [CAZACLIU'06]

A notre connaissance, rien dans la littérature n'établit un lien direct entre le cisaillement subi par le mélange, et la puissance consommée par le malaxeur. La démarche présentée ci-dessus n'est donc pas applicable dans l'objectif de connaître le cisaillement subi par le mélange pendant cette étape de fabrication. La relation entre puissance de malaxage et homogénéité du mélange n'est pas non plus évidente, ce qui explique que les mesures de puissance soient souvent couplées à des essais réalisés sur le béton, frais ou durci.

1.4.3. Etude du béton

L'étude du béton est évoquée dans toutes les tentatives d'amélioration du malaxage, et notamment dans les textes de référence comme [NF EN 18650-2'06] et [CHARONNAT'03]. Les essais mentionnés sont réalisés sur des échantillons, souvent prélevés en différents endroits de la cuve. Il peut s'agir de béton frais comme de béton durci.

1.4.3.1. Essais sur béton frais

Le premier essai sur le béton frais concerne sa teneur en eau ([CHARONNAT'03]), déterminée par le séchage d'un échantillon. Les mesures d'affaissement/d'étalement sont également souvent effectuées ([NF 18650-2'06] ; [CAZACLIU'06]), tout comme l'essai au V-

funnel ou au maniabilimètre. L'emploi d'un rhéomètre est parfois également requis ([CAZACLIU'06] ; [CHOPIN'02]).

Le pourcentage en granulat d'une portion de béton est également souvent recherché. La norme [NF EN 18650-2'06] impose de connaître le pourcentage en granulat dont le diamètre est supérieur à 4 mm. Cet essai est mis en pratique dans [CAZACLIU'13] qui compare ainsi la répartition des éléments en quatre points du malaxeur après des temps de malaxage différents. Les recommandations [CHARONNAT'03] sont plus précises puisque le pourcentage de chaque classe granulaire est étudié (diamètre < 0,25 mm, 0,25 mm < diamètre < D/2 et D/2 < diamètre < D, avec D le plus grand diamètre). La teneur en air peut également être réalisée sur des échantillons ([NF 18650-2'06]).

Les essais précédemment décrits peuvent être également réalisés dans le cas des bétons fibrés. [NF EN 1170-2'98] propose également d'estimer la dispersion des fibres à la fin du malaxage en pesant les fibres présentes dans différents prélèvements. Cette méthode, assez facile à mettre en œuvre et fonctionnant avec toutes les fibres, est cependant longue et fastidieuse.

1.4.3.2. Essais sur béton durci

L'homogénéité d'un matériau, reliée à l'efficacité du malaxage dans [NF 18650-2'06] peut être appréciée par la similarité de ses propriétés mécaniques, testées sur différents échantillons provenant d'une même gâchée.

La norme [NF 18650-2'06] prévoit des essais de compression réalisés sur des éprouvettes prélevées en différents points de la cuve du malaxeur. Ces essais sont également repris par [CHOPIN'02], qui les complètent avec des essais d'écaillage au gel et de perméabilité à l'azote. D'autres essais mécaniques, comme les essais de flexion, sont également réalisables [CAZACLIU'06].

L'homogénéité du mélange se déduit de la variance calculée à partir des résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons prélevés. [NF 18650-2'06] définit comme critère d'uniformité les seuils apparaissant dans le Tableau 1.5.

Essais	Valeur acceptable
Teneur en air	Variance $\leq 10 \%$
Teneur en mortier (diamètre ≤ 5 mm)	Variance $\leq 0,8 \%$
Teneur en gros granulats (diamètre > 5 mm)	Variance $\leq 5 \%$
Affaissement	Variance $\leq 15 \%$
Résistance à la compression	Variance $\leq 7,5 \%$

Tableau 1.5 : Exigences d'uniformités fixés par [NF 18650-2'06]

[CHOPIN'02] a mesuré les résistances en compression de sept bétons différents, obtenus après différents temps de malaxage. Les variances de ces résultats sont indiquées dans le Tableau 1.6.

Temps de malaxage, en secondes	Béton n°1	Béton n°2	Béton n°3	Béton n°4	Béton n°5	Béton n°6	Béton n°7
20	6,450	2,310	2,723	5,954	4,580	12,676	11,051
38	4,710	1,416	8,410	-	3,386	21,030	8,733
55	15,290	1,488	5,336	-	2,1904	6,138	3,915
360	-	-	-	1,188	-	-	-
600	2,690	1,464	6,150	-	2,2201	-	-

Tableau 1.6 : Variances calculées selon les résultats de valeurs de résistance en compression de [CHOPIN'02]

Globalement, la variance diminue avec l'augmentation du temps de malaxage, qui permettrait donc une meilleure homogénéisation du mélange. La plupart des résistances mesurées permet de garantir un mélange uniforme, en accord avec [NF 18650-2'06]. Il apparaît cependant quelques valeurs de variance assez élevées (en gras dans le Tableau 1.6) qui témoignent de l'hétérogénéité des résultats obtenus entre différentes éprouvettes provenant d'une même gâchée.

Le cas du béton n°1 est surprenant puisqu'une variance très élevée est obtenu après 55 s de malaxage, temps normalement suffisant (d'après la marque NF BPE) pour fabriquer un béton

adjuvanté. Ce résultat est cependant en accord avec la courbe de malaxage obtenue, assez différente des courbes enregistrées pour les autres temps de malaxage pour le même béton. La mesure de puissance trouve ses limites avec le cas du béton n°6, puisque les courbes de puissance de la Figure 1.40 se superposent alors que les résultats des éprouvettes soumises en compression sont très différents.

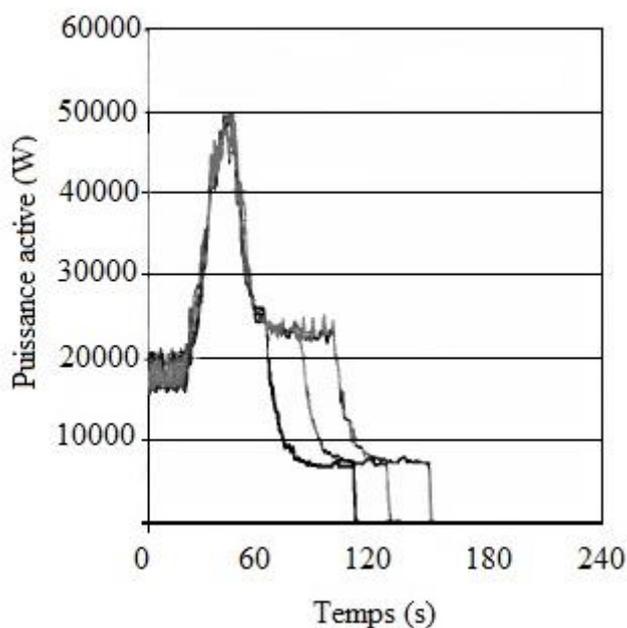


Figure 1.40 : Puissances enregistrées pendant les fabrications du béton n°1 pour 20 , 38 et 55 secondes de malaxage

La disparité des résultats peut également venir d'un échantillonnage de la cuve non représentatif de l'ensemble du matériau. En effet, l'échantillon doit être suffisamment important pour la réalisation des essais et pour la représentativité de l'ensemble de la gâchée mais également assez petit pour que les mesures réalisées soit discriminantes. Sur ce sujet, la norme [NF 18650-2'06] propose de faire deux ou trois prélèvements alors que [CHARONNAT'03] suggère de prélever au moins 20 échantillons (pour un malaxeur de 500 litres). La masse de l'échantillon à analyser fait également l'objet de calcul précis dans [CHARONNAT'03] car elle doit prendre en compte la composition du béton afin que chaque élément ait une chance de figurer dans l'échantillon. [NF 18650-2'06] suggère dans ce but des volumes prélevés de 20 à 100 litres, selon le type de malaxeur utilisé (respectivement pour des malaxeurs continus et discontinus).

Ces problèmes de représentativité, le nombre d'essais à réaliser, la destructivité de certains ou le délai nécessaire pour les effectuer (essais mécaniques par exemple) expliquent que l'étude de l'homogénéité du béton soit longue et fastidieuse.

Cette étude se complique encore lorsque la dispersion des fibres doit être étudiée. La norme [NF EN 1170-2'98] propose une méthode par comptage de fibres, après avoir broyé l'échantillon. Dans le cas des fibres rigides à section constante, une autre solution consiste à faire des coupes dans l'éprouvette et d'analyser les sections obtenues. Le nombre de fibres est ainsi connu et des renseignements sur l'orientation peuvent être déduits, comme l'illustre la Figure 1.41. En réalisant ce travail sur des sections successives d'une éprouvette, une reconstruction spatiale de la dispersion des fibres est possible.

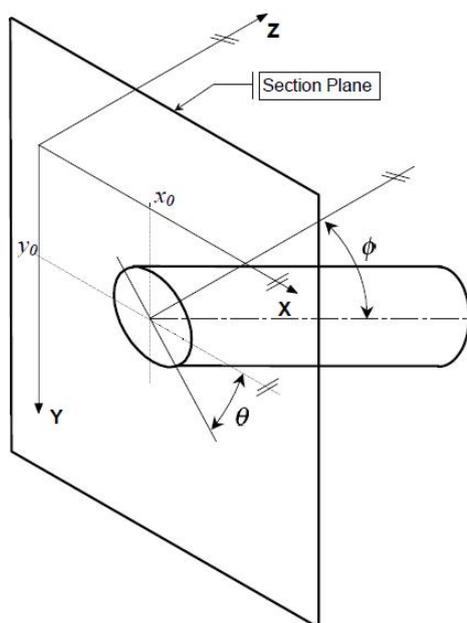


Figure 1.41 : Méthode permettant de déterminer l'orientation d'une fibre [ZAK'00]

D'autres méthodes exploitent les discontinuités induites par les fibres dans les bétons pour détecter leur présence. Comme dans le cas de l'imagerie médicale, une analyse aux rayons X fournit un cliché 2D d'un échantillon tridimensionnel. La Figure 1.42 est une image radiographique d'un échantillon de béton fibré. Une densité de fibres trop importante empêche toute reconstruction 3D réaliste, ce qui implique une faible concentration en fibre d'une part et une épaisseur des échantillons limitée d'autre part (50 mm dans le cas de la Figure 1.42).



Figure 1.42 : Images radiographiques obtenues avec un signal de 100 kV, 3 mA sur des échantillons d'épaisseur 50 mm [STROEVEN'78a]

Une autre méthode s'appuie sur la discontinuité des propriétés électriques induites par les fibres dans les matériaux cimentaires. Des électrodes sont placées sur une éprouvette et mesurent sa résistivité électrique quand un courant circule à l'intérieur. Très largement utilisé dans le milieu universitaire ([CHUNG'01], [LATASTE'07], [CHUNG'05], [CHEN'93], [MARTINIE'10]), ce dispositif ne s'applique qu'à certaines conditions. Les fibres doivent être évidemment conductrices (fibres métalliques, de carbone...) et leur conductivité doit être suffisamment différente de celle de la matrice cimentaire (10 fois plus grande selon [CHUNG'01]). Les résultats obtenus doivent être interprétés avec précaution : une conductivité électrique élevée pouvant en effet traduire une bonne dispersion des fibres mais également la présence d'un oursin, c'est-à-dire d'un amas de fibres ([CHUNG'05]).

L'exploitation de la modification de la réponse électromagnétique de l'éprouvette peut également avoir lieu. Celle-ci est sollicitée par deux aimants, en rotation autour d'elle (Figure 1.43a). Le couple magnétique est enregistré et apparaît dans la Figure 1.43b.

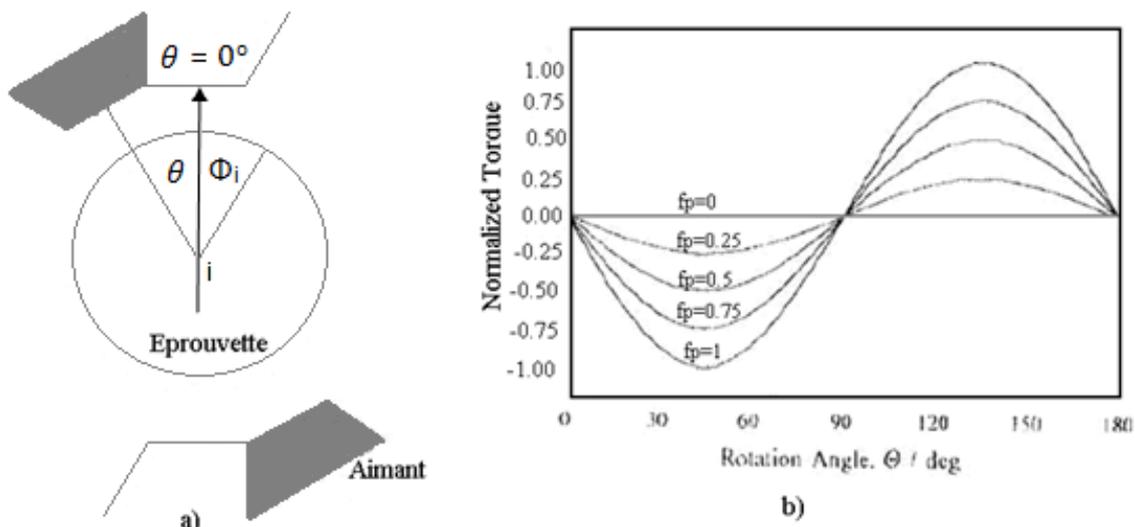


Figure 1.43 : Principe de la méthode électromagnétique exposée dans [WATANABE'02]

a) dispositif de mesure b) réponse théorique du matériau selon l'angle et selon f_p , facteur d'orientation préférentielle des fibres

La réponse du matériau à l'application d'un champ magnétique est analysée et reliée à une orientation de fibres via f_p , un facteur d'orientation de fibres [WATANABE'02]. f_p est égal à 1 lorsque toutes les fibres sont alignées dans la même direction et f_p est nul dans le cas où les fibres n'ont pas de direction commune. Les cas intermédiaires sont imagés sur la Figure 1.44

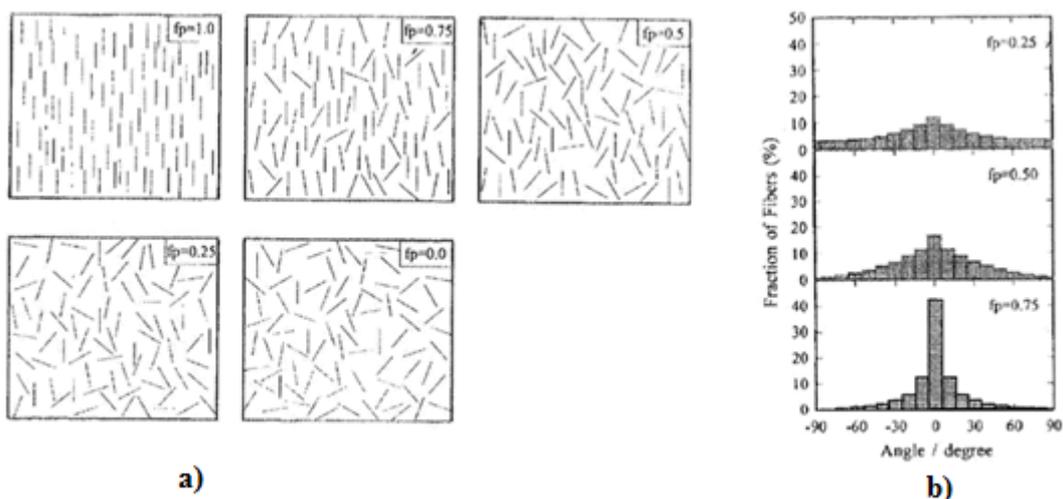


Figure 1.44 : Orientation des fibres selon la méthode électromagnétique exposée dans [WATANABE'02]

a) représentation de l'orientation des fibres selon la réponse du matériau au champ magnétique
b) orientation statistique des fibres selon f_p

Cette technique permet de connaître la réponse du matériau à un champ magnétique et d'en déduire l'orientation des fibres, si celles-ci sont ferromagnétiques.

Les méthodes explicitées ci-dessus ne donnent pas une représentation spatiale de l'éprouvette. Une reconstruction virtuelle est possible à partir des probabilités ([ZAK'00]) ou de méthodes statistiques ([STROEVEN'78b], [KASPERKIEWICS'77], [REGULIER'03]). La reconstruction 3D n'est pas très performante pour caractériser un volume important de béton, cependant, c'est une méthode peu onéreuse qui ne nécessite pas de matériel spécifique.

La tomographie est une méthode non destructive qui consiste à envoyer sur un objet des rayons X afin de restituer une image 3D de l'échantillon testé. Dans le cas d'éprouvettes de béton fibré, les résultats de la Figure 1.45 sont obtenus.

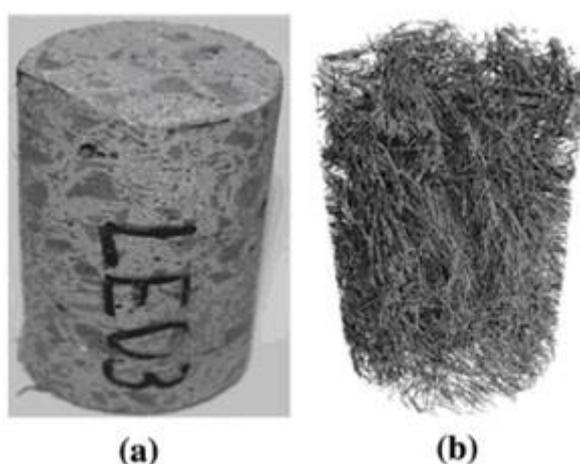


Figure 1.45 : Image d'un béton fibré obtenue par tomographie RX a) éprouvette non scannée b) fibres présentes dans l'échantillon – source [KRAUSE'10]

Un logiciel de traitement d'images permet ensuite de connaître précisément la position spatiale de chaque fibre au sein de l'éprouvette. Cet outil est très performant mais également très onéreux. De plus, l'exploitation de l'ensemble des données obtenues nécessite du temps, ce qui explique également que cette méthode ne peut être utilisée que de manière occasionnelle.

L'étude de l'homogénéité du béton par l'analyse de ses caractéristiques est longue et la liste de ces propriétés s'allonge encore dans le cas des bétons fibrés. Dans tous les cas précédemment présentés, l'échantillonnage de la gâchée est obligatoire, certains essais sont destructifs et d'autres requièrent un délai important. De plus, si le Tableau 1.5 donne des indicateurs d'homogénéité pour certains paramètres, d'autres restent sans référence normative, laissant à l'utilisateur le soin d'interpréter lui-même les résultats obtenus et leur conséquence en termes d'homogénéité du mélange.

1.4.4. Conclusion sur le malaxage

Comme cela a été présenté dans les paragraphes précédents, l'étude du malaxage est accessible selon trois axes : le malaxeur (§ 1.4.1), le cycle de malaxage (§ 1.4.2) et le matériau malaxé (§ 1.4.3). Aucune des méthodes utilisées n'aboutit, à notre connaissance, à un lien reliant le malaxeur, sa capacité de cisaillement et l'homogénéité finale du matériau.

1.5. Démarche scientifique adoptée

Les sections précédentes ont permis de dresser le contexte de l'étude.

De manière unanime, il est reconnu que la dispersion des fibres dans le béton n'est pas maîtrisée, ce qui est très problématique puisque l'homogénéité des propriétés apportées par les fibres est garantie par l'uniformité de leur distribution dans le matériau.

Les bétons fibrés sont le résultat d'un mélange de différents constituants, ciment, granulat, eau et bien sûr fibres. Le choix est fait ici de considérer le béton fibré comme un matériau bi-phasique constitué de béton et de fibres, ce qui implique d'introduire les fibres dans le béton déjà homogénéisé. L'introduction des fibres en phase sèche sera également étudiée dans le chapitre 4 en tant que paramètre du process de fabrication.

Les fibres sélectionnées sont des fibres métalliques et rigides (au sens du critère de rigidité défini par [MARTINIE'10] et développé dans le § 1.2.2). Ce choix correspond à l'utilisation préférentielle de ce type de fibres dans l'industrie et permet de se concentrer sur les mécanismes intervenant pendant la dispersion, indépendamment des déformations subies par les fibres souples.

La dispersion des fibres dans le béton est assurée par le malaxeur. De manière générale, le malaxage est reconnu comme efficace si le matériau final est homogène.

Aujourd'hui, à notre connaissance il n'existe pas de moyen de mesure de la répartition des fibres en temps réel, dans le malaxeur ni de méthode permettant de déterminer quantitativement l'efficacité d'un malaxeur. Le lien supposé entre l'efficacité du dispositif d'une part et le résultat d'autre part n'est donc pas avéré.

Cette thèse propose, dans le chapitre suivant, de déterminer l'efficacité d'un malaxeur en étudiant une phase transitoire du malaxage, celle où le béton est en phase pendulaire. Le

chapitre 3 sera quant à lui consacré au développement d'une méthode de mesure de répartition de fibres. Cette méthode sera appliquée pour obtenir les résultats obtenus dans le chapitre 4, ce qui permettra de comprendre les mécanismes à l'origine de la dispersion des fibres.

Chapitre 2

2. Estimation du cisaillement dans un malaxeur

Ce chapitre a pour objectif de déterminer l'efficacité d'un malaxeur à travers sa capacité à cisailer un mélange. Le chapitre 1 a proposé différentes pistes permettant de quantifier un malaxeur, notamment à travers des courbes de puissance ou des essais sur les bétons fabriqués mais les résultats obtenus ne sont pas reliés directement au cisaillement. Le choix a donc été porté sur l'analyse de la phase pendulaire, une phase où le béton est sous forme d'agglomérats, comme le rappelle la Figure 1.18 a).



Figure 1.18 : Evolution d'un matériau cimentaire avec l'ajout d'eau : a) phase pendulaire b) état fluide

Ces granulés sont le résultat de l'agglomération de grains entre eux sous l'influence des forces capillaires. Dans certains process industriels de l'agroalimentaire ou de la pharmaceutique, ces granulés peuvent être le produit final escompté, obtenu par la voie de la granulation humide. Ce procédé est détaillé dans le prochain paragraphe.

2.1. Granulation humide

D'après [SALEH'09a], le terme de granulation humide s'applique pour l'ensemble des procédés permettant de former des granulés à partir de fines particules dispersées dans un milieu liquide. Les granulés peuvent être obtenus de deux façons : soit la quantité de liquide est faible et les particules s'agglomèrent autour des ponts liquides, soit la poudre est en suspension dans une quantité de liquide importante et le granulé se forme après séchage. Ces deux possibilités sont illustrées dans la Figure 2.1 mais la seconde technique est moins fréquemment utilisée.

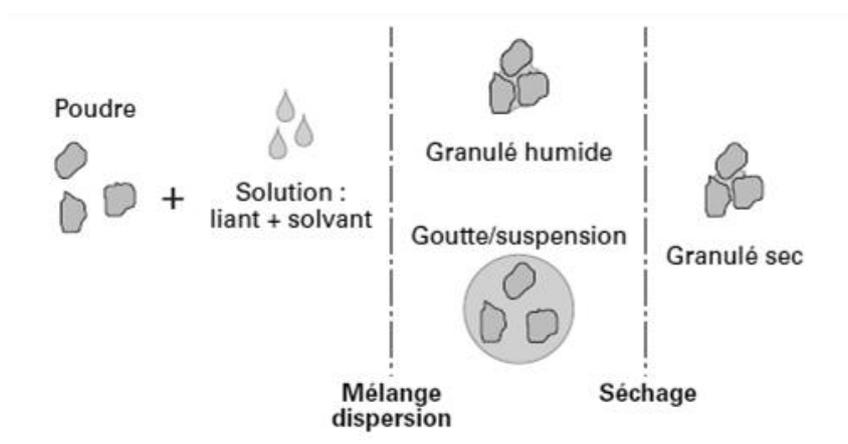


Figure 2.1 : Procédés de granulation humide [SALEH'09a]

La Figure 2.2 présente les principaux dispositifs pouvant être utilisés pour la granulation humide, qui diffèrent essentiellement sur le choix de la mise en mouvement des poudres. Dans le cas de la technique de « lit fluidisé », les particules sont mélangées grâce à un flux de gaz. Pour les trois autres méthodes, l'agitation des poudres est mécanique, soit par l'action d'une pale, comme dans le cas b, ou par le mouvement de la cuve contenant les particules (cas c et d de la Figure 2.2).

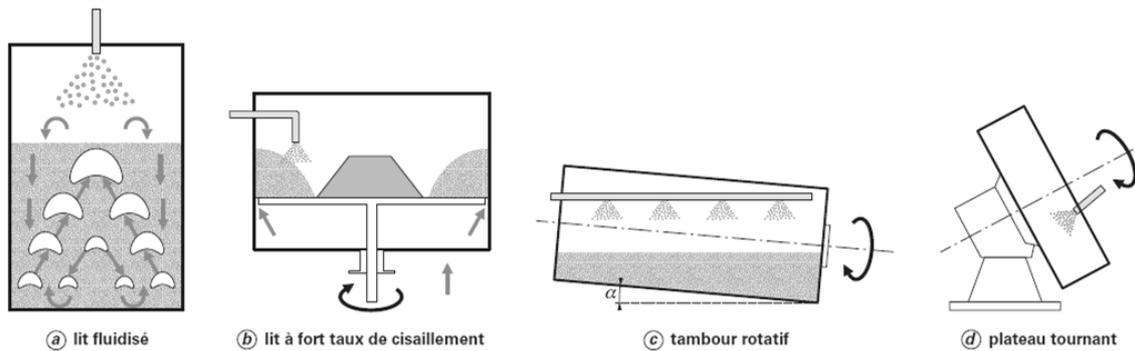


Figure 2.2 : Dispositifs de granulation humide [SALEH'09a]

La granulation humide obéit à des mécanismes explicités dans la Figure 2.3. La croissance des granulés est dictée par la présence pendant l'agitation des forces de liaison et des forces de rupture. Les premières sont liées aux forces de capillarité induites par la présence de ponts liquides et sont à l'origine des deux premières phases de la granulation humide, le mouillage des particules et la croissance des agglomérats. Le cisaillement du milieu génère rupture et abrasion. La rupture correspond à la séparation d'un granulé en plusieurs parties de volumes équivalents alors que l'abrasion consiste au détachement de certaines particules situées en périphéries du granulé. Ces deux phénomènes conduisent à des granulés plus petits.

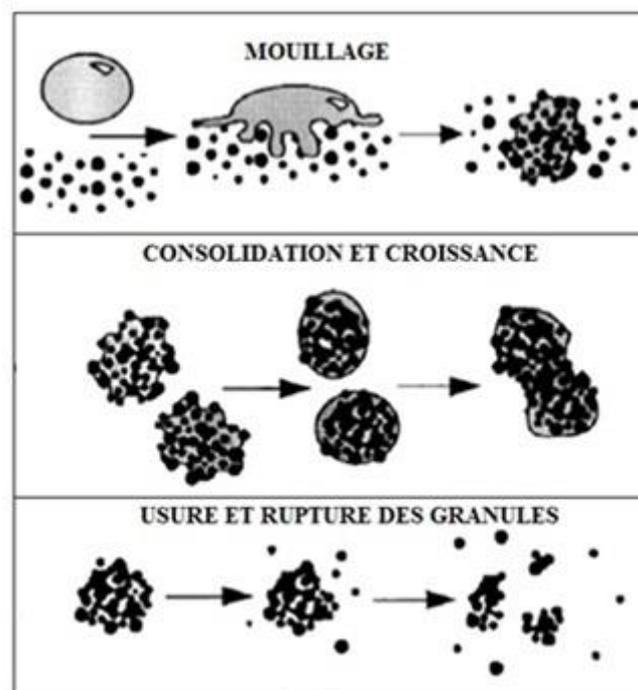


Figure 2.3 : Etapes de la granulation humide [IVESON'01]

La compétition entre cohésion et rupture conditionne le diamètre des grains formés.

La granulation humide est donc une technique de fabrication de granulés basée sur les actions antagonistes d'un liquide et d'un mouvement sur des poudres. Toute agitation de poudre avec un ajout d'eau apparaît alors comme un procédé de granulation humide, ce qui englobe les premières phases du malaxage d'un béton maintenu en phase pendulaire par l'introduction d'une faible quantité d'eau.

Il apparaît alors comme envisageable, à partir du diamètre des granulés formés et en connaissant l'action de la capillarité dans le système de déterminer l'influence du mouvement de malaxage, et donc du cisaillement fourni par le malaxeur, indépendamment de considérations géométriques. Dans ce but, les essais décrits dans le prochain paragraphe ont été réalisés.

2.2. Méthodes et paramètres

La granulation humide met en présence une poudre et un liant qui, sous l'action des forces de capillarité et du cisaillement, forment des granulés. La poudre choisie est le ciment qui sera mélangé à de l'eau, le choix de ce fluide assurant la prise des granulés.

Les coulis sont élaborés dans un premier temps dans un malaxeur de laboratoire d'une contenance de 40 litres, représenté dans la Figure 2.4. Ce malaxeur sera par la suite noté M_1 .



Figure 2.4 : Malaxeur utilisé pour élaborer les coulis

Après fabrication, les coulis prennent à température ambiante puis, après 24 heures, sont tamisés à l'aide de tamis dont les ouvertures vont de $63\ \mu\text{m}$ à $8\ \text{mm}$. Le choix du tamis le plus fin est basé sur le diamètre du plus gros grain de ciment, déterminé à partir d'un essai de granulométrie laser. Ce tamis permet d'isoler le ciment non piégé dans les granulés.

Chacun des paramètres étudiés est testé trois fois minimum ; les mesures faites sur ces trois essais montrent peu de variation et témoignent donc de la répétabilité des essais.

2.2.1. Paramètres de formulation

2.2.1.1. Paramètre ciment

Dans le cadre de la granulation humide, la taille des particules initiales influence le résultat final, notamment lors des phases d'abrasion et de rupture, ayant lieu sous l'influence de l'agitation mécanique.

Un granulé composé de grains fins sera plus exposé à l'abrasion qu'un granulé de taille équivalente composé de grains plus gros car l'énergie à fournir pour rompre un pont liquide est lié à son volume, et est donc plus importante dans le cas d'un empilement de gros grains (Figure 2.5).



Figure 2.5 : Configurations possibles pour un granulé

Dans le cas d'une rupture du granulé, la cohésion est assurée par un nombre supérieur de ponts liquides si l'empilement est constitué de petits grains mais ces ponts liquides sont aussi moins volumineux, et donc plus faciles à rompre. La conclusion valable pour l'abrasion ne s'étend donc pas au cas de la rupture de granulés.

Le caractère polydisperse d'une poudre permet de créer des granulés plus solides face à la rupture car aux ponts liquides formés entre les gros grains viennent s'ajouter les ponts liquides formés entre les grains plus petits, ce qui renforce, d'après [SMIRANI'06], la cohésion du granulé.

Ces différences entre rupture et abrasion seront abordées plus en détail dans l'analyse des résultats (§ 2.4).

L'influence de la taille des grains de ciment a été testée grâce à deux ciments, de finesse Blaine différentes. Les caractéristiques des ciments sont rappelées dans le Tableau 2.1.

Dénomination du ciment	Finesse Blaine	Diamètre du plus gros grain de ciment
Ciment blanc : CEM I 52,5 N CE CP2 NF Blanc	4220 g/cm ²	63 µm
Ciment gris : CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF	3590 g/cm ²	50 µm

Tableau 2.1: Caractéristiques des ciments testés

2.2.1.2. Paramètre eau

La quantité d'eau introduite doit permettre au mélange d'atteindre et de rester en phase pendulaire. D'après [SALEH'09b] son dosage entraîne, dans le cas des granulations humides, des modifications en termes de taille finale pour les granulés formés.

Des essais exploratoires ont suggéré que la quantité d'eau correspondant à l'état pendulaire n'était pas forcément la même selon les ciments utilisés. Le Tableau 2.2 présente les dosages en eau correspondant aux phases pendulaires des deux ciments testés :

Ciment utilisé	Rapports E/C testés				
Ciment blanc : CEM I 52,5 N CE CP2 Nf Blanc	0,14	0,16	0,18	0,2	
Ciment gris : CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16

Tableau 2.2 : Rapports E/C utilisés selon les ciments choisis

En réalité, l'analyse granulométrique réalisée sur ces coulis en phase pendulaire a parfois révélé une quantité importante de granulés ayant un diamètre inférieur au plus diamètre du plus gros grain de ciment. Ceci correspond notamment au matériau récupéré sur les parois du malaxeur, qui, en dépit de la racle, n'a pas participé au mélange.

Cette masse est déduite de la masse totale du coulis afin de ne considérer que les granulés formés. Les rapports E/C réels sont donc modifiés, comme le Tableau 2.3 et le Tableau 2.4 le

montrent, et les dosages en eau correspondant à l'état pendulaire sont finalement similaires.

	Ciment blanc : CEM I 52,5 N CE CP2 NF Blanc			
E/C initial	0,14	0,16	0,18	0,20
E/C réel	0,16	0,17	0,19	0,20

Tableau 2.3: E/C réel pour les coulis élaborés avec du ciment blanc

	Ciment gris : CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF				
E/C initial	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16
E/C réel	0,13	0,14	0,19	0,20	0,22

Tableau 2.4 : E/C réel pour les coulis élaborés avec du ciment gris

Lorsque des comparaisons entre ces coulis seront nécessaires, elles seront faites à rapport E/C réel identique.

2.2.1.3. Paramètre superplastifiant

Un adjuvant est, dans le cas du béton et d'après la norme NF EN 934-2, un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure de 5% de la masse de ciment) dans les bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de telle ou telle propriété, à l'état frais ou à l'état durci.

Les adjuvants sont classés en trois catégories, selon l'influence qu'ils ont sur le matériau. Dans le cas d'une modification de l'ouvrabilité du matériau, les adjuvants sont appelés plastifiant, réducteur d'eau ou superplastifiant. Ils permettent d'obtenir la même ouvrabilité avec un rapport E/C réduit ou de fluidifier le mélange à rapport E/C constant. La diminution de la quantité d'eau (par rapport à la maniabilité souhaitée) permet d'améliorer la durabilité et les propriétés mécaniques du matériau à l'état durci.

Une autre catégorie d'adjuvant a pour but de modifier le temps de prise ou de durcissement en agissant sur la vitesse de dissolution et la solubilité des constituants du ciment.

La dernière famille d'adjuvants est utilisée pour modifier des propriétés du béton telles que sa teneur en air, son caractère hydrofuge ou son ressuage.

Dans cette étude des superplastifiants ont été ajoutés dans le mélange lors de la granulation humide. Ces superplastifiants sont de type polycarboxylate et agissent en défloculant les grains de ciment. Cette action est possible grâce à l'adsorption du polymère à la surface des grains induite par les ions carboxylates et à la répulsion stérique générée par les chaînes d'oxyde d'éthylène. La Figure 2.6 décrit les superplastifiants de type polycarboxylate, avec n le nombre de chaîne latérale, N et P le nombre de monomère respectivement dans les chaînes principales et latérales [FLATT'08].

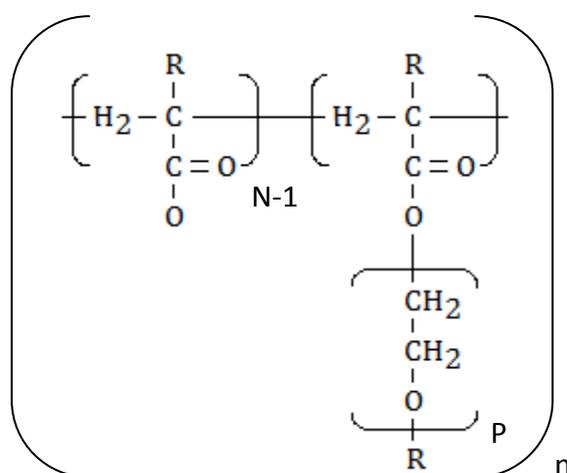


Figure 2.6 : Superplastifiant de type polycarboxylate

Ce co-polymère est également un tensioactif, constitué d'une partie hydrophile (ions carboxylate) et d'une partie hydrophobe représentée par l'oxyde d'éthylène. Or, d'après [SMIRANI'06], la tension de surface du liquide ajouté dans la poudre influence la formation du granulé, d'où l'étude de ce paramètre. Le superplastifiant Glenium ACE 43 (fiche technique en Annexe 1.3.1) a été ajouté dans certains des coulis, à hauteur de 0,5%, 1% ou 2%, conformément au dosage indiqué par le fabricant. Son extrait sec (27%) a été pris en compte pour doser l'eau ajoutée également au mélange.

2.2.2. Paramètre de fabrication

2.2.2.1. Paramètre vitesse

La vitesse d'agitation est un paramètre sur lequel les chercheurs se contredisent. En effet, [KNIGHT'93] suggère que l'accroissement de la vitesse d'agitation entraîne une

augmentation de la taille des granulés. Ce résultat est expliqué par des collisions plus fréquentes et donc une probabilité d'assemblage de particules plus grande. [ENNIS'91] réfute cette conclusion en soutenant qu'une augmentation de vitesse favorise la rupture des granulés déjà formés. Finalement [RAMAREK'98] et [IVESON'01] mettent en avant le rôle de la déformabilité des grains : les grains déformables se déforment sous l'effet de la collision, offrant ainsi des surfaces de contact qui favorisent l'assemblage des particules. Les grains indéformables quant à eux se rompent lors de la collision, ce qui explique la diminution de diamètre constaté par [ENNIS'91].

La vitesse d'agitation est donc un paramètre important dans la granulation humide. Quatre vitesses sont disponibles sur le malaxeur utilisé. Le mouvement de la pale est planétaire et les vitesses indiquées dans le Tableau 2.5 correspondent à la vitesse de rotation de la pale :

Vitesse 1	Vitesse 2	Vitesse 3	Vitesse 4
96 tr/min	211 tr/min	320 tr/min	450 tr/min

Tableau 2.5 : Vitesses du malaxeur

2.2.2.2. Paramètre remplissage

Dans le but de faciliter l'analyse granulométrique, des faibles quantités de coulis sont fabriquées. La question de l'influence du remplissage de la cuve peut se poser, c'est pourquoi différentes quantités de ciment ont été testées, comme indiqué dans le Tableau 2.6.

Masse de ciment, en g	% de remplissage de la cuve
3500 g	16,4
5000 g	23,4

Tableau 2.6 : Taux de remplissage testés

Les taux de remplissage correspondant sont calculés à partir des résultats des granulométries en considérant un indice de vide dans le milieu de 0,5.

2.2.2.3. Paramètre temps

En tant que procédé exploitant un équilibre physique, la granulation humide dure jusqu'à l'atteinte d'un régime permanent. De ce fait, la durée de l'agitation n'apparaît pas comme un paramètre dans la littérature concernant la granulation humide. Trois durées de malaxage ont été testées afin d'avoir un ordre de grandeur sur le temps nécessaire à l'obtention de ce régime permanent et de vérifier l'impact d'une durée supérieure sur les granulés. Les temps de malaxage testés correspondent aux durées postérieures à l'introduction de l'eau et sont de 1 minute, 3 minutes et 10 minutes.

Dans le cas des granulations humides, le mode d'introduction de l'eau ainsi que son débit sont des paramètres majeurs. Pour cette étude, aucun dispositif particulier d'introduction de l'eau n'était disponible, l'eau a donc été introduite manuellement dans le mélangeur, en un seul point et en une vingtaine de secondes.

2.2.3. Coulis de référence

Afin de comparer les différents résultats entre eux, un coulis de référence a été fixé arbitrairement avec les paramètres indiqués dans le Tableau 2.7.

Type de ciment	Ciment blanc : CEM I 52,5 N CE CP2 NF Blanc finesse Blaine = 4220 cm ² /g
Masse de ciment, g	3500
Rapport E/C réel	0,16
Superplastifiant	0 %
Vitesse de malaxage	Vitesse 1 – 96 tr/min
Temps de malaxage	3 minutes

Tableau 2.7 : Paramètres du coulis de référence

Les résultats expérimentaux sont détaillés dans le prochain paragraphe.

2.3. Résultats

2.3.1. Coulis de référence

Le coulis de référence a été élaboré avec les paramètres précisés dans le Tableau 2.7. Après séchage des granulés, ceux-ci sont tamisés. La distribution granulométrique du coulis de référence apparaît sur la Figure 2.7 ci-dessous.

Les barres d'erreur correspondant aux incertitudes sont calculées à partir des résultats de chaque tamis pour les quatre coulis réalisés à l'aide de la formule (2.1) (avec EC l'écart type et n_e le nombre de coulis réalisés).

$$\bar{\%} = \pm \frac{3 EC}{\sqrt{n_e}} \quad (2.1)$$

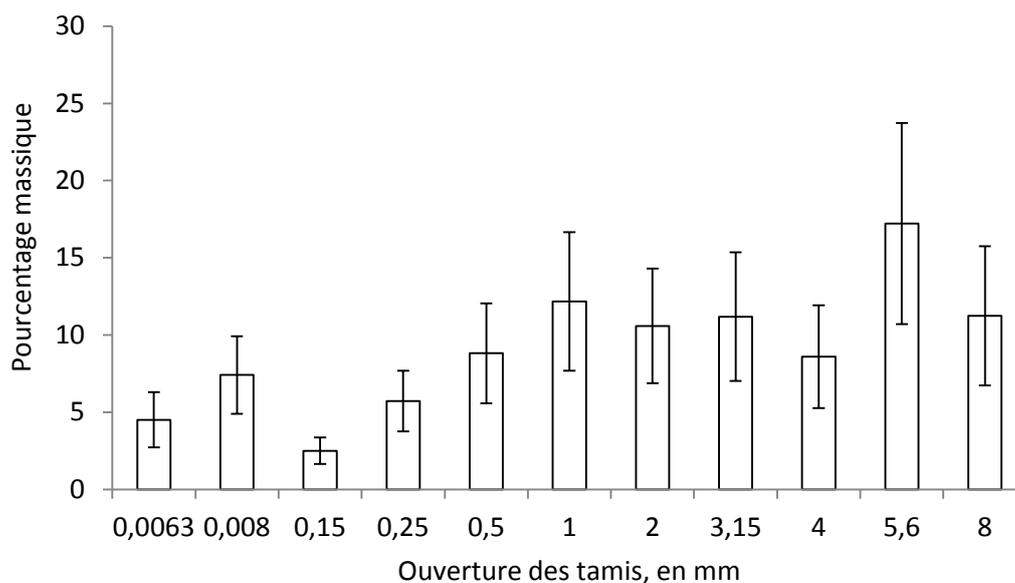


Figure 2.7 : Granulométrie du coulis de référence

L'incertitude moyenne est de 3,4 %. L'incertitude maximale a été relevée sur le tamis de 5,6 mm et est de 6,5 %. L'historgramme de la Figure 2.7 présente trois pics correspondants aux tamis de 80 μm , de 1 mm et de 5,6 mm. Voyons si les résultats obtenus sur les autres coulis en phase pendulaire (Figure 2.8) suivent les mêmes tendances.

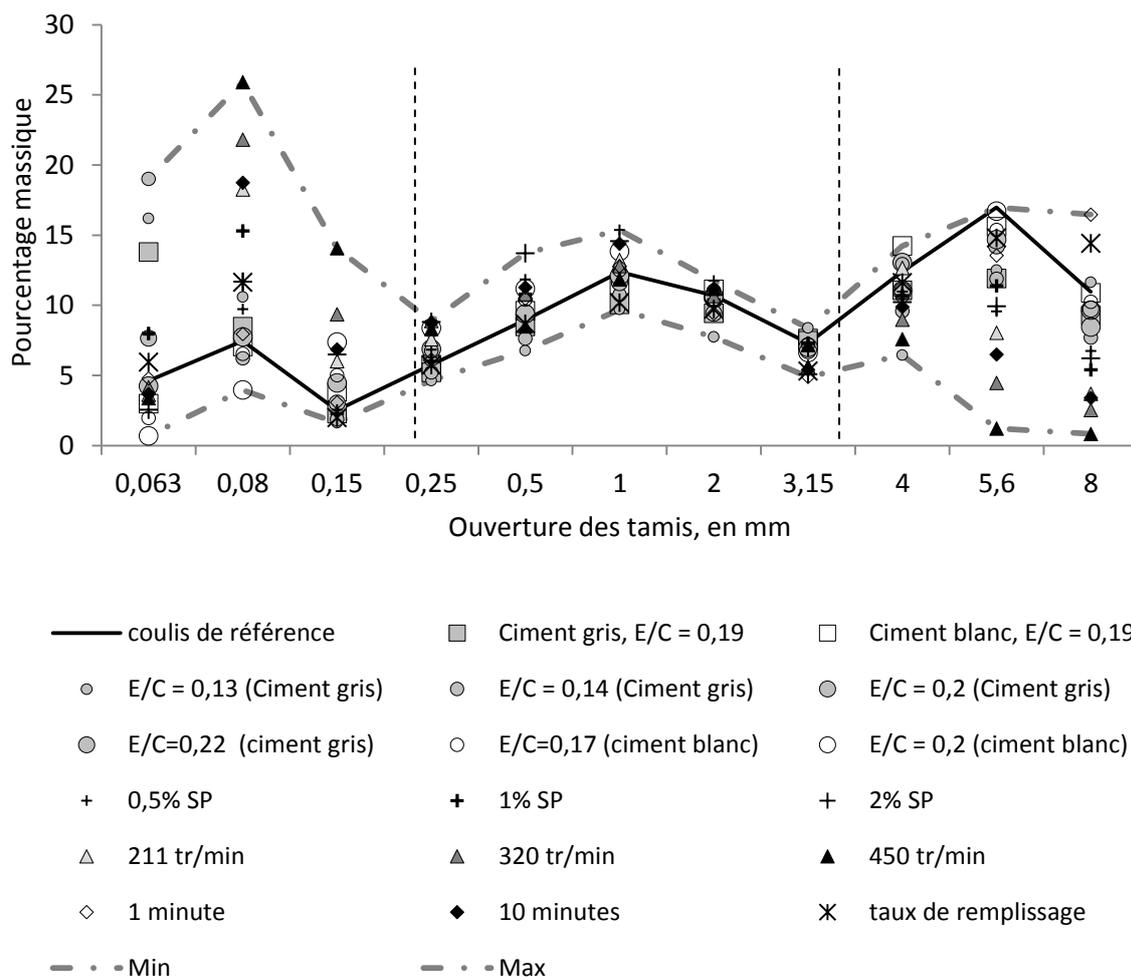


Figure 2.8 : Répartitions granulométriques des coulis

Pour plus de lisibilité, un fuseau a été tracé à l'aide des valeurs minimales et maximales obtenues par tamis sur l'ensemble des résultats. L'ensemble des courbes suit les mêmes variations, avec des pics à 5,6 mm, 1 mm et 80 ou 63 μm (selon la nature du ciment, cet aspect sera détaillé dans le § 2.3.2.1). Trois catégories de diamètre se dessinent avec des variations importantes uniquement pour les diamètres les plus gros ou les plus fins.

Ce constat concernant trois zones distinctes peut également s'étendre au cas exposé dans la Figure 2.9 à propos de la poudre cellulosique [CHITU'09].

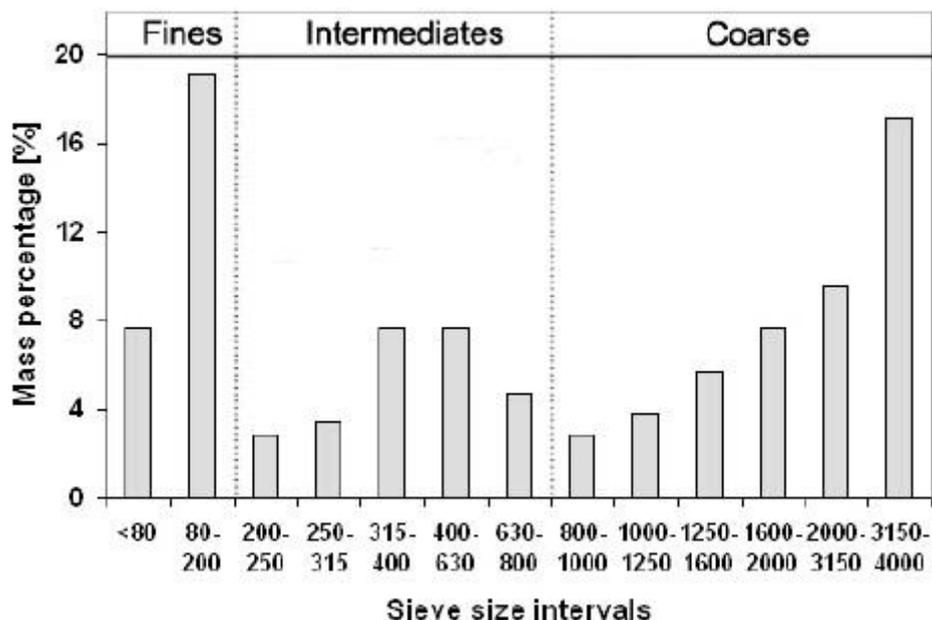


Figure 2.9 : Courbe granulométrique [CHITU'09] obtenu pour un rapport liquide/solide = 0,5 et une vitesse de 800 tr/min (poudre cellulosique)

En s'inspirant de [CHITU'09] qui classe les granulés par taille, le Tableau 2.8 présente les différentes catégories de granulés formés pendant le malaxage du coulis de référence selon leur dimension.

Granulés fins F	$d < 0,25 \text{ mm}$	14,6 %
Granulés moyens M	$0,25 \text{ mm} \leq d \leq 4 \text{ mm}$	45,1 %
Granulés gros G	$4 \text{ mm} < d$	40,3 %

Tableau 2.8: Catégories de granulés

Les granulés formés pendant la fabrication se répartissent selon trois catégories de taille, les grains fins ont un diamètre inférieur à 0,25 mm, les granulés de taille intermédiaire ont un diamètre compris entre 0,25 et 4 mm et enfin les plus gros granulés sont ceux dont le diamètre est supérieur à 4 mm.

La Figure 2.8 permet de voir que la quantité des granulés moyens reste globalement constante, quels que soient les paramètres, qui agissent donc plutôt sur la proportion des petits et des gros granulés.

La Figure 2.10 met en évidence la constance de la somme entre petits et gros granulés, ce qui confirme d'une part que la quantité de granulés de taille intermédiaire est constante et d'autre part que les proportions d'agglomérats F et G semblent être liées entre elles par un

effet de vases communicants. Ce phénomène retranscrit la troisième étape de la granulation humide telle qu'elle est décrite dans la Figure 2.3.

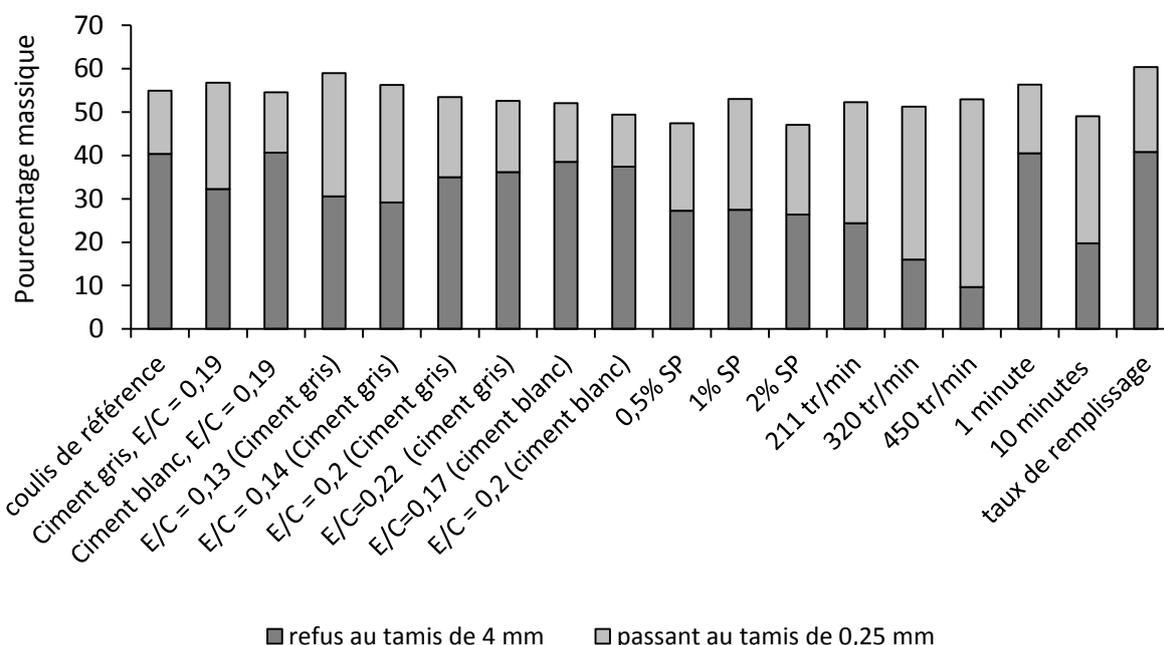


Figure 2.10 : Proportion de granulés G et F selon les paramètres testés

Les coulis obtenus peuvent donc être représentés par trois catégories de diamètre de granulés ; parmi ces trois classes, l'une reste constante dans tous les cas testés et les deux autres sont complémentaires. Il apparaît alors comme légitime à ce stade de ne décrire les coulis qu'à l'aide d'un seul paramètre, le diamètre moyen.

Le diamètre moyen est défini par la formule (2.2), avec P_i le pourcentage massique mesuré pour chaque tamis et D_i est le diamètre intermédiaire entre deux ouvertures de tamis :

$$D_m = \frac{\sum_{i=0,05}^8 P_i \cdot D_i}{\sum_{0,05}^8 P_i} \quad (2.2)$$

La Figure 2.11 superpose les résultats présentés sur la Figure 2.10 et les diamètres moyens calculés avec la formule (2.2).

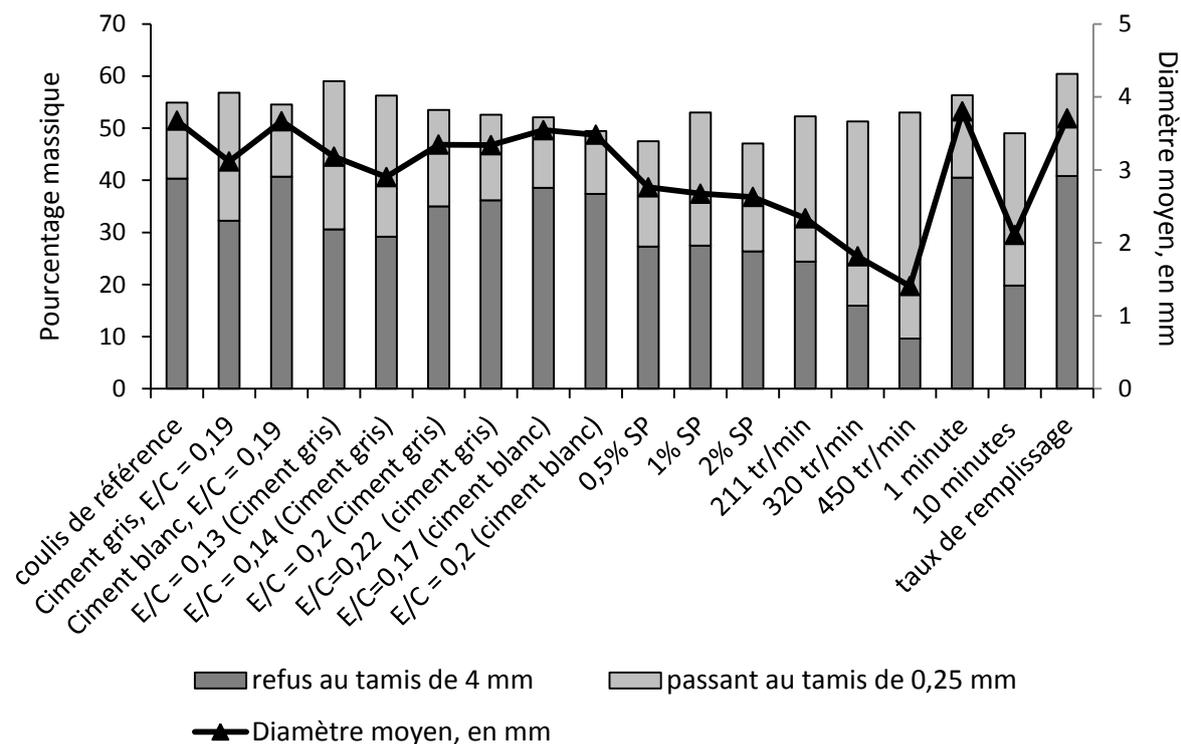


Figure 2.11 : Proportion massique de granulés G et F et diamètre moyen correspondant

Le diamètre moyen suit les variations de la quantité de gros granulés. Chaque coulis testé sera par la suite décrit grâce à sa courbe granulométrique et à son diamètre moyen calculé selon la relation (2.2).

2.3.2. Paramètres de formulation

2.3.2.1. Paramètre ciment

Deux ciments ont été utilisés, ils diffèrent essentiellement par leur finesse Blaine : 4220 cm^2/g pour le ciment blanc et 3590 cm^2/g pour le ciment gris (cf Annexe 1.1.1 et Annexe 1.1.2). Cette différence en termes de surface spécifique implique une différence de taille des grains constituant le ciment, ce qui peut avoir une conséquence sur la taille des granulés formés [SMIRANI'06].

Une granulométrie laser a été effectuée sur ces deux ciments (cf Annexe 1.1.1.2 et Annexe 1.1.2.2). En dépit d'une finesse Blaine plus élevée, le ciment blanc est en réalité composé de grains globalement plus gros que le ciment gris. Ceci s'explique par une étendue granulométrique plus importante (le diamètre du plus gros grain de ciment est de 63 μm pour le ciment blanc et de 50 μm pour le ciment gris) et par sa masse volumique plus faible

qui implique un volume de grains supérieur dans une masse donnée. Le calcul des aires sous les courbes représentant les pourcentages volumiques en fonction du diamètre des particules aboutit à des valeurs plus faibles pour le ciment gris que pour le ciment blanc, ce qui confirme que le ciment gris a des grains de diamètre plus faible que le ciment blanc.

Le Tableau 2.9 recense les principales informations concernant la granulométrie des deux ciments.

		Diamètre des particules, en μm	
		Ciment gris	Ciment blanc
Finesse blaine, en cm^2/g		3590	4220
Volume en %	10	< 2,16	< 3,10
	25	< 5,29	< 6,63
	50	< 10,63	< 11,87
	75	< 19,90	< 22,33
	90	< 28,57	< 33,37
Moyenne		13,25	15,38
Médiane		10,63	11,87
Mode		26,14	10,29
Diamètre du plus gros grain, en μm		50	63

Tableau 2.9 : Caractéristiques granulométriques des ciments utilisés

Des coulis en phase pendulaire sont réalisés avec ces deux ciments. La comparaison est faite entre les coulis dont les rapports E/C réels sont les mêmes, soit pour des rapports E/C de 0,19 et de 0,20. La Figure 2.12 présente les courbes granulométriques obtenus pour les coulis testés. Notons que les coulis fabriqués à partir de ciment gris sont passés à travers un tamis supplémentaire, d'ouverture $50 \mu\text{m}$, afin de correspondre au diamètre du plus gros grain de ciment.

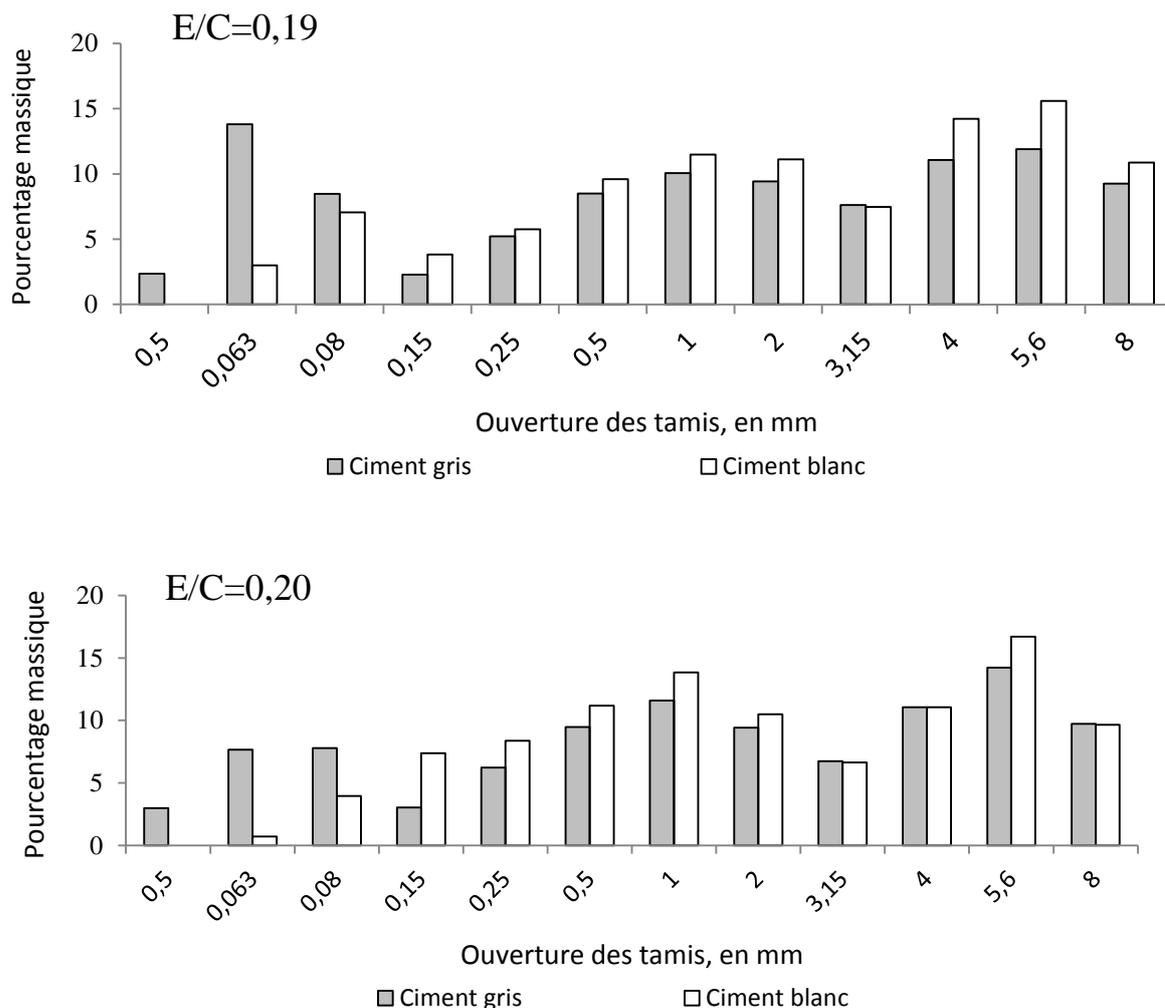


Figure 2.12 : Analyse granulométrique de coulis obtenus avec deux ciments différents a) avec un rapport E/C = 0,19 et b) avec un rapport E/C = 0,20

D'après la Figure 2.12, les pourcentages massiques sont globalement proches quel que soit le ciment utilisé et pour les deux rapports E/C testés. Une analyse plus précise permet de constater que les pourcentages massiques sont, dans le cas du ciment gris, légèrement inférieurs sur les granulés de diamètre supérieur à 4 mm et supérieurs pour les diamètres plus faibles. L'effet de vase communicant entre granulés G et F est donc plus marqué dans le cas des ciments gris. Les remarques faites dans le paragraphe 2.2.1.1 concernant la solidité des granulés peuvent expliquer cette différence : La résistance à l'abrasion est favorisée par la taille des grains (des gros grains résistants davantage) et leur polydispersité. Les données indiquées dans le Tableau 2.9 montrent que le ciment gris est plus fin que le ciment blanc et que la plage des diamètres des particules est plus restreinte. Il est donc normal que des granulés de ciment gris soient plus sensibles à l'abrasion que des granulés fabriqués à partir de ciment blanc.

Cette différence se répercute sur les diamètres moyens, présentés dans le Tableau 2.10 avec des diamètres moyens plus faibles pour les coulis de ciment gris.

		Diamètre moyen, en mm	Ecart type
E/C = 0,19	Ciment blanc	3,67	0,10
	Ciment gris	3,03	0,014
E/C = 0,20	Ciment blanc	3,49	0,106
	Ciment gris	3,12	0,17

Tableau 2.10 : Influence du ciment sur des coulis de rapports E/C = 0,19 et E/C = 0,20

Rappelons que le diamètre moyen est calculé, dans le cas du ciment gris, avec une valeur supplémentaire (tamis de 50 µm), ce qui favorise sa diminution par rapport au diamètre moyen des coulis de ciment blanc. La différence entre ces coulis en phase pendulaires reste donc minime et montre que la répartition granulométrique du ciment a un impact limité sur la distribution en taille des granulés formés.

2.3.2.2. Paramètre eau

Différents rapports E/C ont été testés, comme indiqué dans le Tableau 2.3 et le Tableau 2.4. Les graphiques suivants représentent l'ensemble des analyses granulométriques effectuées sur des coulis de ciment gris (Figure 2.13) et de ciment blanc (Figure 2.14).

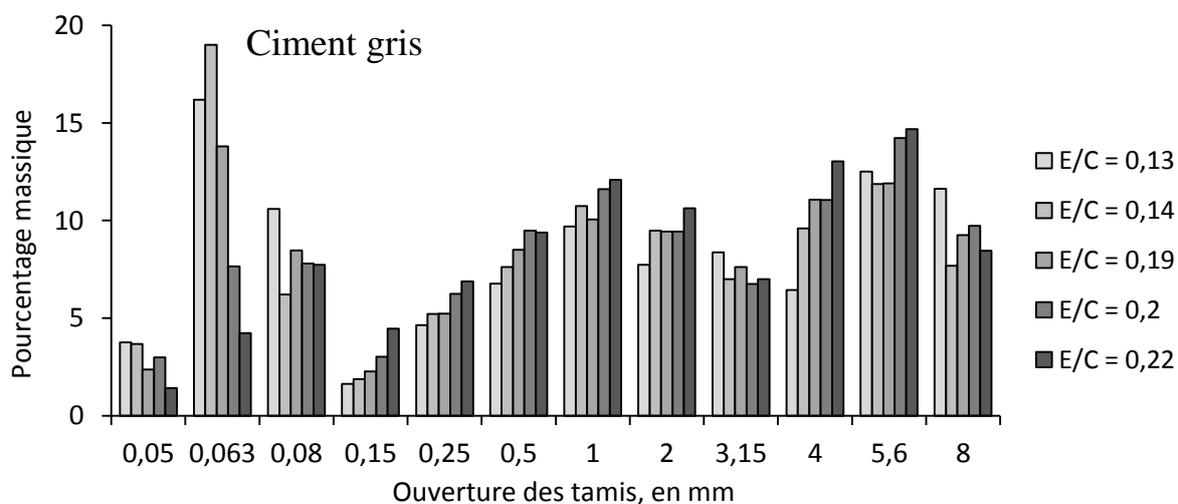


Figure 2.13 : Granulométrie des coulis de ciment gris selon le rapport E/C

Pour le coulis de ciment gris, la répartition massique des granulés selon leur taille varie peu avec la quantité d'eau, hormis pour les particules de diamètre compris entre 63 et 80 μm , où l'écart entre deux coulis peut atteindre 15 %. Les variations du diamètre moyen suivent les différences mesurées sur le tamis de 63 μm , comme le montre le Tableau 2.11.

	E/C réel	Diamètre moyen, en mm	Ecart-type
Ciment gris	E/C=0,13	3,06	0,17
	E/C= 0,14	2,79	0,27
	E/C=0,19	3,03	0,014
	E/C = 0,20	3,12	0,17
	E/C = 0,22	3,29	0,12

Tableau 2.11 : Diamètre moyen selon le rapport E/C

Concernant les coulis de ciment blanc, les écarts de pourcentages massiques sont très faibles, quels que soient les tamis.

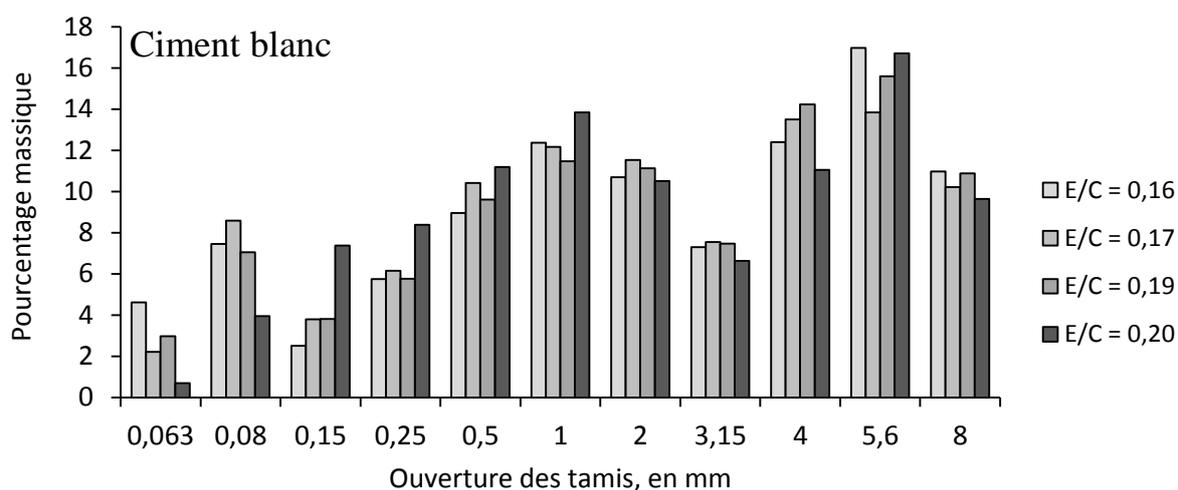


Figure 2.14 : Granulométrie des coulis de ciment blanc selon le rapport E/C

La similitude de l'ensemble des coulis se répercute sur les diamètres moyens mesurés, indiqués dans le Tableau 2.12.

	E/C réel	Diamètre moyen, en mm	Ecart-type
Ciment blanc	E/C = 0,16	3,67	0,59
	E/C = 0,17	3,48	0,23
	E/C = 0,19	3,67	0,10
	E/C = 0,2	3,48	0,11

Tableau 2.12 : Influence de la quantité d'eau sur des coulis de ciment blanc en phase pendulaire

La variation du rapport E/C (dans les limites de la phase pendulaire présentées dans le Tableau 2.2) n’affecte pas grandement la dispersion par taille des granulé. Ce résultat peut être surprenant puisque la phase pendulaire est directement liée à la présence de liquide dans un milieu granulaire et que le dosage en eau est un paramètre important dans la granulation humide. Ce résultat sera davantage détaillé dans le paragraphe 2.3.4, concernant l’analyse des résultats.

2.3.2.3. Paramètre Superplastifiant

Trois dosages en superplastifiant Glenium ACE 43 (fiche technique en Annexe 1.3.1) ont été testés : 0,5 %, 1 % et 2 %. L’extrait sec de l’adjuvant a été pris en compte et la quantité d’eau a été ajustée en conséquence. Les résultats obtenus apparaissent dans la Figure 2.15.

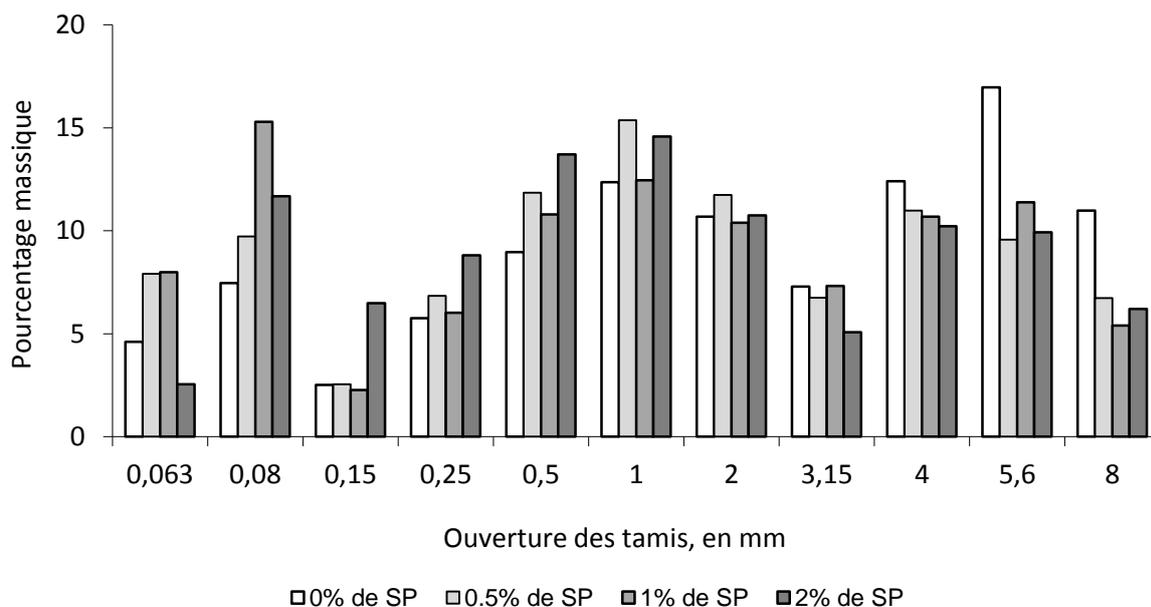


Figure 2.15 : Granulométrie des coulis selon le pourcentage de superplastifiant

Le Tableau 2.13 précise les diamètres moyens obtenus pour ces quatre dosages en superplastifiant.

Dosage en Superplastifiant	Diamètre moyen, en mm	Ecart type
0 %	3,67	0,59
0,5 %	2,76	0,21
1 %	2,67	0,39
2 %	2,63	0,17

Tableau 2.13: Influence du superplastifiant

Le superplastifiant a plus d'impact que la nature du ciment ou que la quantité d'eau sur la répartition du coulis en phase pendulaire. Cette incidence était attendue, le superplastifiant ayant comme résultat, pour ces dosages, la défloculation des grains de ciment.

Les modifications des paramètres de formulation ciment et superplastifiant ont induit des légères différences dans les diamètres moyens mesurés, comme annoncé dans le cas de la granulation humide. L'influence très limitée du rapport E/C dans le domaine pendulaire ne correspond pas à un résultat attendu ; ce paramètre sera donc étudié plus précisément dans le § 2.3.4.

Les matériaux cimentaires offrent des variations assez limitées, tant sur la taille des particules, que sur une plage de rapport E/C correspondant à un état pendulaire ou encore sur l'apport usuel en superplastifiant, ce qui peut expliquer la similitude des granulométries obtenues. Voyons à présent l'influence des paramètres de fabrication.

2.3.3. Paramètre de fabrication

2.3.3.1. Paramètre vitesse

Le § 2.2.2.1 indiquait deux conséquences possibles à l'augmentation de la vitesse sur la répartition en taille des granulés formés. En effet, en favorisant les rencontres entre particules, l'augmentation de la vitesse peut entraîner la formation de nouveaux granulés ou bien la rupture et/ou l'érosion d'un granulé existant. La distinction entre ces deux conséquences opposées réside dans la déformabilité des grains.

Les quatre vitesses disponibles sur le malaxeur ont été testées et les granulométries correspondantes apparaissent dans la Figure 2.16.

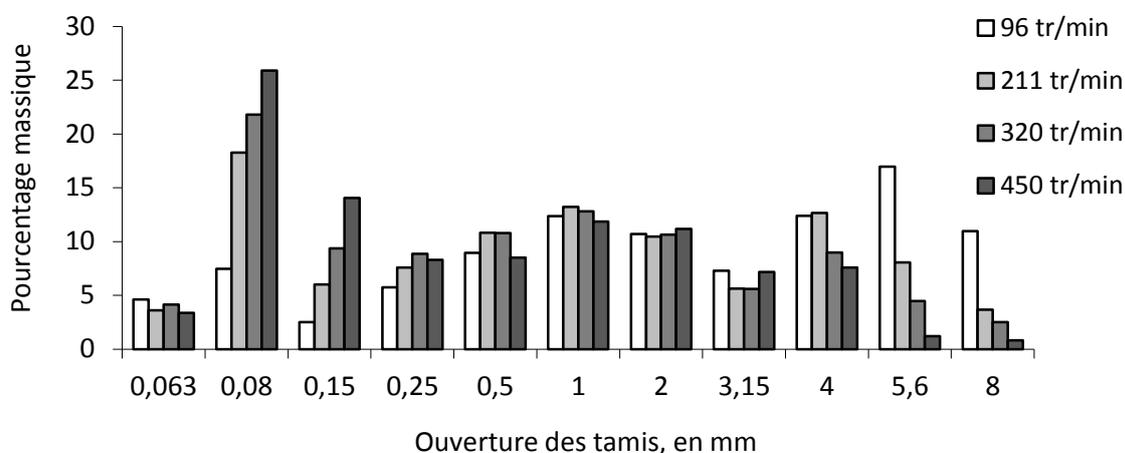


Figure 2.16 : Granulométrie des coulis réalisés à différentes vitesses, E/C=0,14

Dans le cas de l’agglomération des grains de ciment en présence d’eau, l’accroissement de la vitesse favorise plutôt l’émergence de petits granulés, comme l’attestent les diamètres moyens, indiqués dans le Tableau 2.14.

Vitesse	Diamètre moyen, en mm	Ecart type
96 tr/min	3,67	0,59
211 tr/min	2,34	0,24
320 tr/min	1,82	0,33
450 tr/min	1,41	0,13

Tableau 2.14 : Influence de la vitesse

Le paramètre vitesse apparaît comme le paramètre le plus important en termes d’influence sur la répartition granulométrique des coulis. Les écarts constatés entre les coulis sont importants, surtout pour le tamis d’ouverture 80 μ m. Ce résultat est en accord avec [ENNIS’91] qui voyait la vitesse comme un facteur de rupture des granulés. Ces résultats sont confirmés par [CHITU’09] qui constate, dans le cadre de la granulation humide de cellulose micro cristalline, une modification importante de la distribution en taille des granulés avec l’augmentation de la vitesse. La Figure 2.17 et la Figure 2.18 permettent de comparer les

résultats de ce travail avec ceux de [CHITU'09] en présentant les pourcentages massiques obtenus après des malaxages effectués à des vitesses similaires.

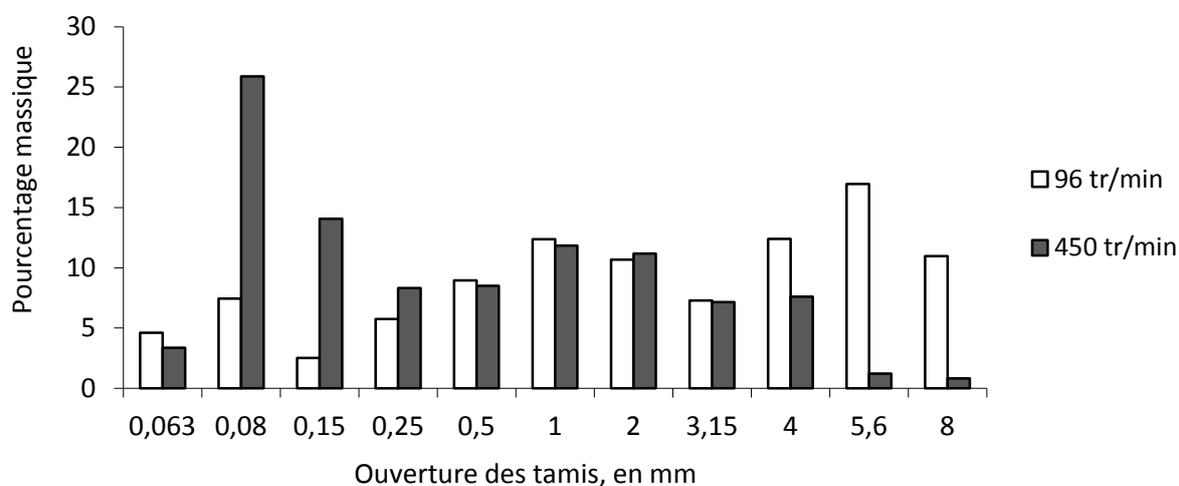


Figure 2.17 : Granulométrie des coulis obtenus à des vitesses de 96 et 450 tr/min

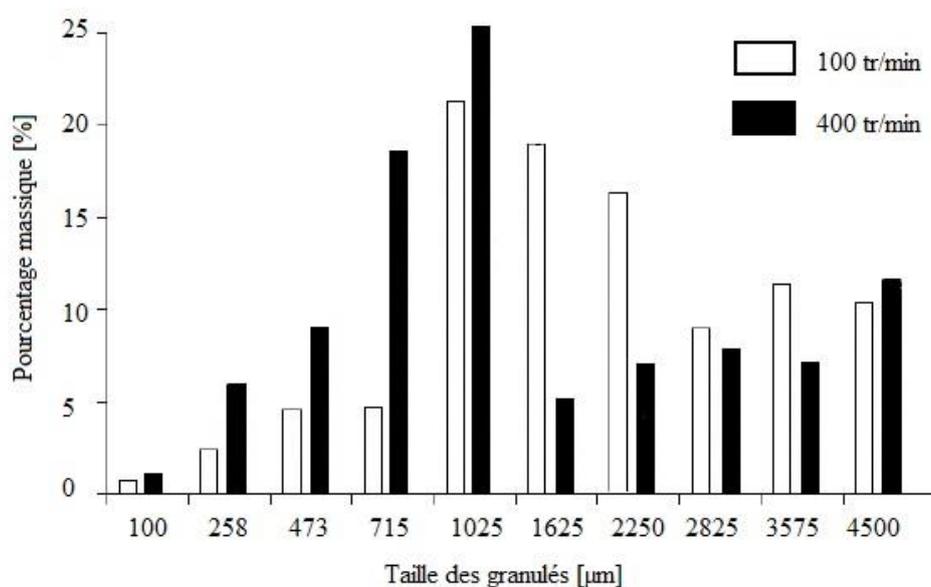


Figure 2.18 : Pourcentage massique de granulés de différentes tailles obtenus après un malaxage à 100 et 400 tours / minute [CHITU'09]

Il est intéressant de constater que dans le cas du ciment comme de la cellulose, une vitesse plus élevée mène aux mêmes tendances en termes de distribution en taille de granulés, à savoir plus de particules de petit diamètre. Des informations supplémentaires sur la déformabilité de ces deux grains, ou des résultats concernant une poudre déformable, permettraient d'étayer l'hypothèse de [IVESON'01] et de [RAMAREK'98] (Figure 2.2, § 2.2.2.1).

2.3.3.2. Paramètre remplissage

D'après [CHITU'09], le remplissage de la cuve peut influencer le malaxage humide des poudres. Cependant, la configuration du malaxeur utilisé dans [CHITU'09] (Figure 2.19) peut expliquer cette conclusion. En effet, l'outil de mélange se trouvant au fond de la cuve, l'augmentation du remplissage de celle-ci n'induit pas une surface de contact entre les poudres et la racle plus importante. Avec un procédé égal en tout point par ailleurs, il est donc normal que le taux de remplissage ait une influence sur la distribution des granulés.

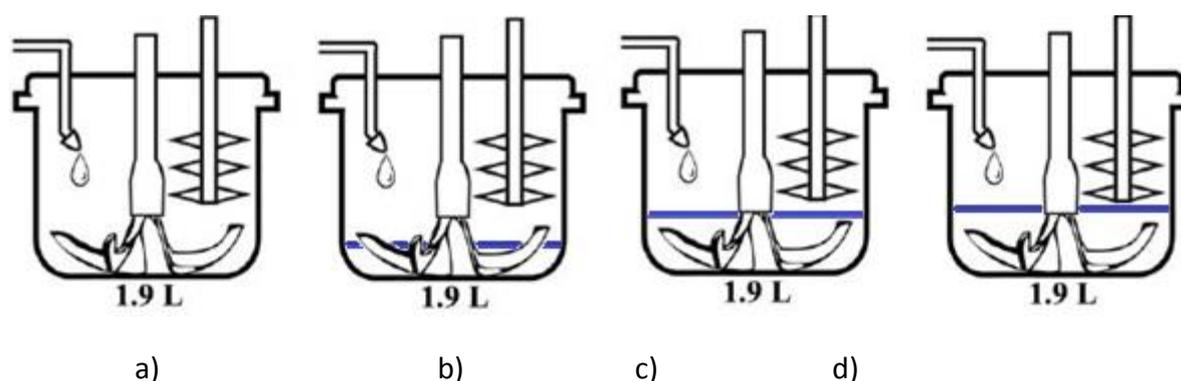


Figure 2.19 : Malaxeur a) vide b) 16 % remplissage c) 26 % remplissage d) 32 % remplissage [CHITU'09]

Le malaxeur utilisé pour réaliser les coulis en phase pendulaire est différent, avec notamment un outil de mélange « actif » sur toute la hauteur de la cuve (Figure 2.4). Dans ce cas, il se peut que le taux de remplissage n'ait pas d'impact sur la distribution des granulés, c'est en tous cas ce que suggère la Figure 2.20.

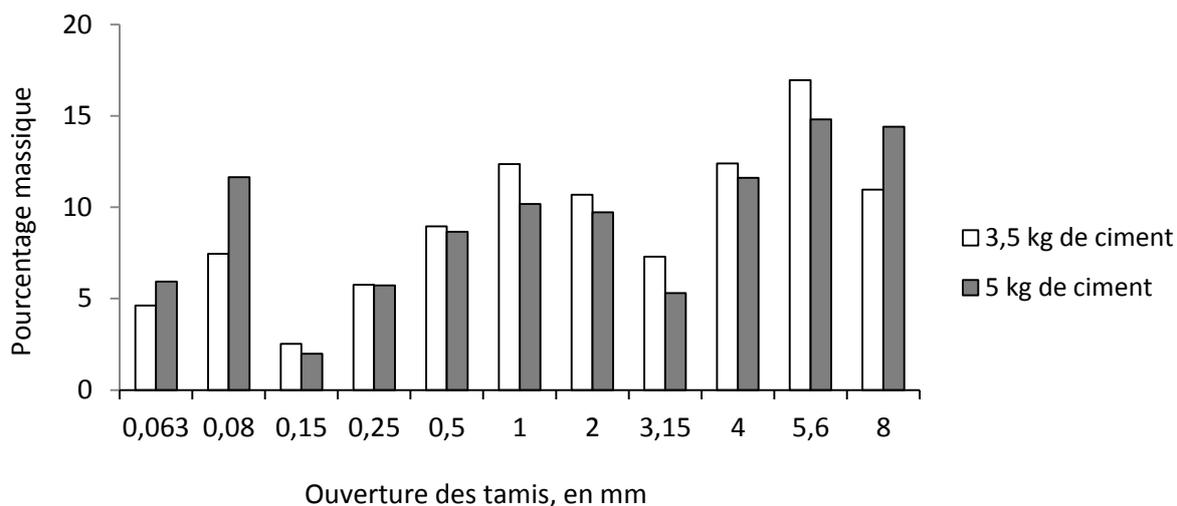


Figure 2.20 : Granulométrie des coulis obtenus avec 3,5 et 5 kg de ciment

Les diamètres moyens entre les deux coulis diffèrent également peu, comme le montre le Tableau 2.15. Les écart-types n'apparaissent pas car un seul coulis a été fabriqué avec 5 kg de ciment.

Taux de remplissage	Diamètre moyen, en mm
16,4 %	3,67
23,4 %	3,71

Tableau 2.15 : Diamètre moyen selon le taux de remplissage – malaxeur M₁

Le paramètre du remplissage n'impacte pas de manière significative la répartition massique des granulés selon leur taille. Cependant, ces premiers essais correspondent à des taux de remplissage faibles et relativement proches.

Ces essais ont été également faits dans un malaxeur conique, noté M₅, d'une capacité de 30 litres. Les taux de remplissage testés sont de 15 et de 50 %. Les résultats obtenus apparaissent dans le Tableau 2.16 et montrent des diamètres moyens très proches pour les deux essais, malgré la différence importante en termes de remplissage.

Taux de remplissage	Diamètre moyen, en mm
15 %	2,81
50 %	2,77

Tableau 2.16 : Diamètre moyen selon le taux de remplissage - malaxeur conique M₅

Il peut être noté que, comme dans le cas du malaxeur M₁, le malaxeur M₅ dispose d'une pale présente sur toute la hauteur de la cuve. Le cas présenté dans le Tableau 2.16 est donc lui aussi différent de la configuration de la Figure 2.19.

2.3.3.3. Paramètre temps de malaxage

Le coulis de référence est malaxé pendant 3 minutes, cette durée a été fixée arbitrairement au début de la campagne expérimentale suite à des constatations visuelles. L'évolution de la taille des granulés en fonction du temps est indiquée dans la Figure 2.21.

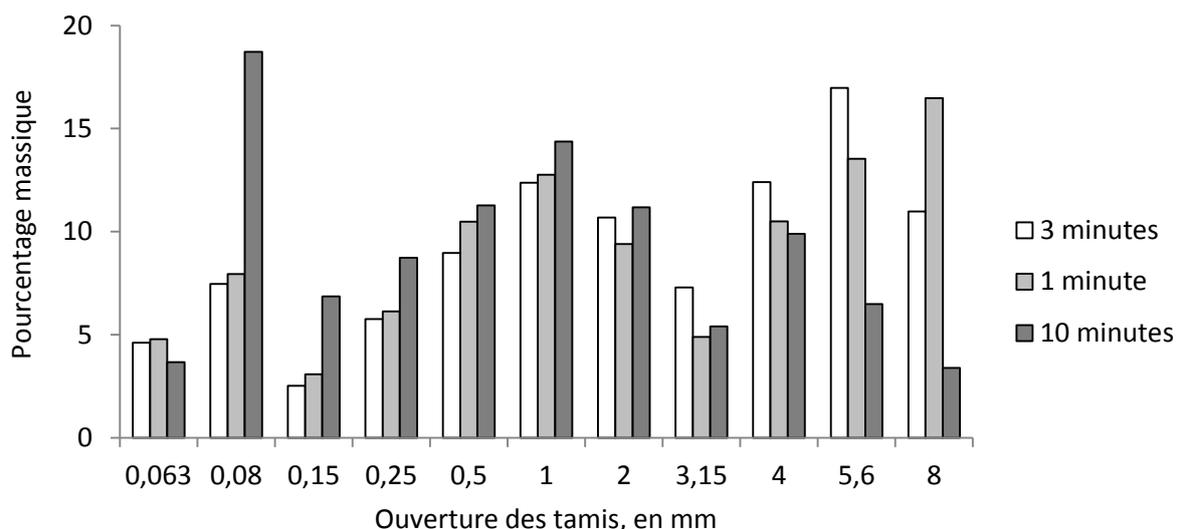


Figure 2.21 : Granulométrie des coulis réalisés après 1, 3 et 10 minutes de malaxage

Ce graphique montre de grandes similarités pour les coulis malaxés pendant une et trois minutes, confirmées par la proximité des deux diamètres moyens (Tableau 2.17). Le régime permanent semble donc être atteint en une minute. Le coulis malaxé 10 minutes se distingue davantage des deux autres, notamment concernant les pourcentages massiques obtenus pour les tamis d’ouverture 0,08, 5,6 et 8 mm. Le diamètre moyen, beaucoup plus faible que pour des temps de malaxage plus longs, reflète ces différences.

	Diamètre moyen, en mm	Ecart type
1 minute de malaxage	3,80	0,22
3 minutes de malaxage	3,67	0,59
10 minutes de malaxage	2,11	0,09

Tableau 2.17 : Influence du temps sur la granulométrie

En tant que résultat d’un équilibre cohésion/rupture, la taille des granulés devrait rester stable, en dépit d’un temps de malaxage plus long. Si ce constat est fait entre les durées de 1 et de 3 minutes de malaxage, il ne peut être étendu au cas des 10 minutes de malaxage qui conduit à un diamètre moyen plus petit.

L’hypothèse de l’intervention d’un phénomène de séchage a rapidement été faite et été confirmée par un suivi de l’essai qui a mis en évidence une perte en eau de 15 g (sur 490 g initialement introduit) au cours du malaxage. Cette perte en eau s’explique par l’élévation en

température du mélange (ressenti lors de la manipulation) et par une exposition à l'air du mélange plus importante, du fait de la durée de l'essai. Pour éviter cette perte d'eau, la même expérience a été réitérée dans une salle humide, et le résultat apparaît dans la Figure 2.22.

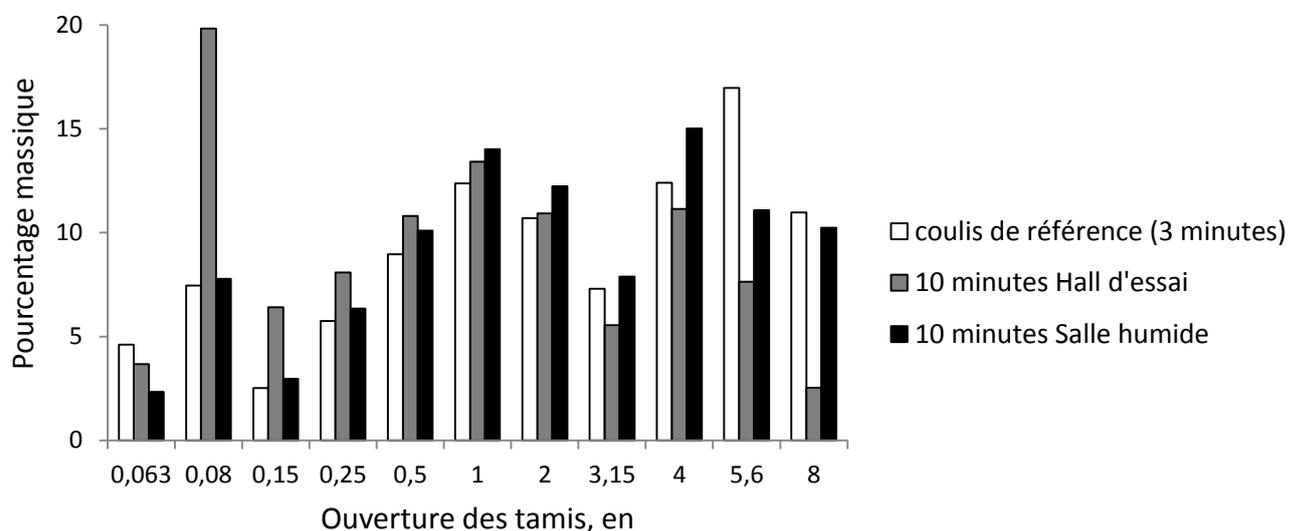


Figure 2.22 : Granulométrie des coulis selon les conditions atmosphériques

Le coulis obtenu après un malaxage de 10 minutes en salle humide mène à une répartition granulométrique assez proche de celle du coulis de référence, obtenu après 3 minutes de malaxage en atmosphère normale. Le diamètre moyen mesuré sur le coulis réalisés en salle humide (Tableau 2.18) confirme la conclusion tirée de la Figure 2.22.

	Diamètre moyen, en mm	Ecart type
3 minutes de malaxage	3,67	0,59
10 minutes de malaxage dans le Hall d'essai (humidité non contrôlée)	2,11	0,09
10 minutes de malaxage en salle humide	3,42	-

Tableau 2.18 : diamètres moyens des coulis réalisés en hall d'essai et en salle humide

Le phénomène de séchage apparaît comme étant à l'origine de la création de granulés plus fins. Ce résultat n'est pas en contradiction avec l'influence limitée du rapport E/C sur la

répartition granulométrique (§ 2.3.2.2). En effet, dans le cas d'une modification dans la quantité d'eau à introduire dans le mélange, la variation se répercute sur l'ensemble des granulés alors que le séchage provoque une perte en eau à la surface des granulés, qui favorise alors son érosion. Dans la suite de ce travail le diamètre moyen correspondant à un temps de malaxage de 10 minutes sera celui obtenu en salle humide, soit $D_m = 3,42$ mm.

2.3.3.4. Conclusion

Des coulis en phase pendulaire ont été fabriqués selon la variation de différents paramètres, liés à la formulation ou au process. L'influence de chacun de ces paramètres peut être appréciée grâce au diamètre moyen, comparable à celui du coulis de référence.

La Figure 2.23 présente les diamètres moyens obtenus suite à la modification de paramètres de formulation. Les incertitudes sont calculées à partir de la formule (2.1) évoquée dans le paragraphe 2.3.1.

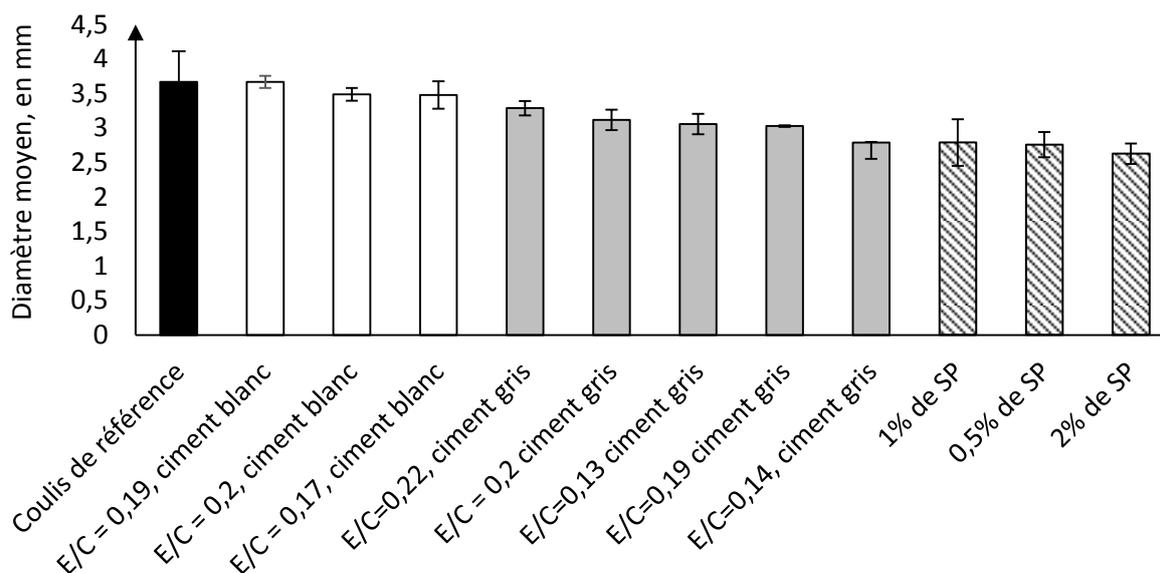


Figure 2.23 : Diamètres moyens des coulis réalisés avec des variations de formulation

L'ajout de superplastifiant dans le mélange est le paramètre ayant la plus grande influence. La tension de surface est une caractéristique contrôlée dans le domaine de la granulation humide, la modification de la granulométrie finale suite à la présence de ces types d'adjuvant n'a donc rien de surprenant. La légère diminution du diamètre moyen avec l'emploi d'un ciment plus fin était elle aussi attendue.

La non-influence de la quantité d'eau est en revanche plus étonnante, ce résultat sera donc discuté plus amplement dans le prochain paragraphe (§ 2.3.4).

La Figure 2.24 présente les diamètres moyens mesurés sur des coulis fabriqués en faisant varier des paramètres liés au process. Les incertitudes sont calculées à l'aide de la formule (2.1) (§ 2.3.1).

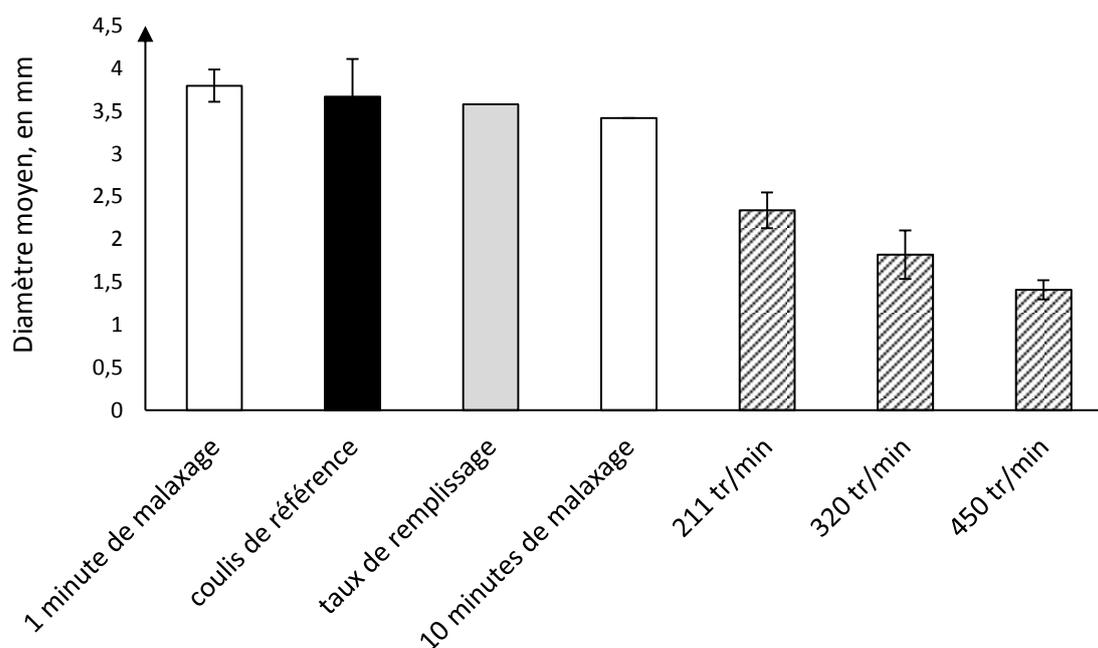


Figure 2.24 : Diamètres moyens des coulis réalisés en faisant varier les paramètres liés au process

Le taux de remplissage n'influence pas, dans le cas étudié, la répartition granulométrique des granulés formés. L'augmentation de la vitesse entraîne une diminution visible du diamètre moyen, un résultat annoncé par les connaissances liées à la granulation humide [SALEH'09b].

2.3.4. Influence de la quantité d'eau

Le paramètre E/C est étudié plus en détail dans le cas des coulis fabriqués avec le ciment blanc, ciment utilisé pour le coulis de référence.

La variation de la quantité d'eau ajoutée à du ciment blanc sous agitation donne les résultats présentés précédemment dans le Tableau 2.12.

Rapport E/C réel	Diamètre moyen, en mm	Ecart type
E/C = 0,16	3,67	0,59
E/C = 0,17	3,48	0,23
E/C = 0,19	3,67	0,10
E/C = 0,20	3,48	0,11

Tableau 2.12 : Influence de la quantité d'eau sur des coulis de ciment blanc en phase pendulaire

Les diamètres moyens sont similaires pour l'ensemble des coulis, contrairement au cas habituel des granulés formés par granulation humide, dont la taille croît normalement avec la quantité de liquide.

En réalité, il y a une différence importante entre les coulis réalisés dans cette étude et la fabrication usuelle de granulés. Dans notre cas, l'eau permet à la fois de rapprocher les particules et de les maintenir ensuite assemblées grâce à l'hydratation du ciment au contact de l'eau. La granulation humide requiert de l'eau pour que les particules coalescent mais pour que cette liaison survive au séchage, un liant est ajouté dans le mélange.

Dans ce contexte, si la quantité d'eau est augmentée, le liant est dilué et le paramètre testé n'est alors pas le dosage en eau mais la teneur en liant. Si le pourcentage en liant est maintenu constant, il y a plus de liant pour le même nombre de particules, ce qui peut également avoir une influence sur le diamètre des granulés formés. Il est donc difficile d'adapter, dans ce cas-là, les résultats de la granulation humide au coulis en phase pendulaire.

Pour comprendre les résultats obtenus, revenons aux fondamentaux des phénomènes physiques de la phase pendulaire : des particules liées entre elles par un pont liquide, comme illustrée Figure 2.25.

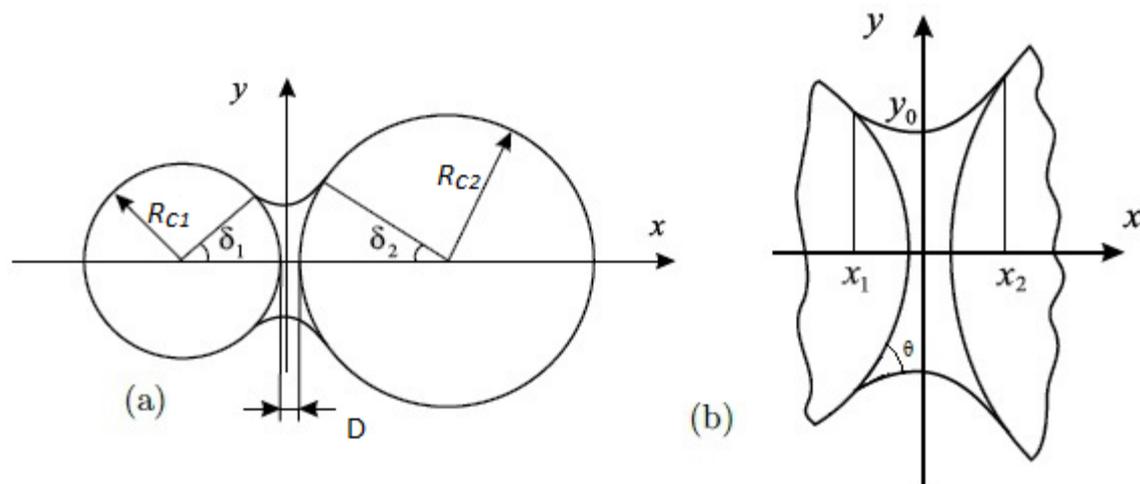


Figure 2.25 : Pont liquide entre deux grains de taille différente

Dans cette configuration, le volume du pont liquide, dont le profil est décrit par l'équation $y(x)$, et est exprimé par (2.3), avec V_1 et V_2 les portions de grains situées sous le pont liquide.

$$V = \pi \int_{x_1}^{x_2} y^2(x) dx - V_1 - V_2 \quad (2.3)$$

Le volume du pont liquide dépend donc de $y(x)$, de V_1 et de V_2 , c'est-à-dire de la géométrie du pont liquide, et notamment de la distance inter-granulaire D , et des angles θ et δ , indiqués sur la Figure 2.25.

[SOULIE'05] a cherché à établir le lien entre ces données géométriques et la force de capillarité à l'origine du pont liquide. Pour ce faire, des essais de traction sur un pont liquide reliant deux grains de diamètre différent ont été réalisés.

Dans cette configuration, la force de capillarité permet la liaison entre les deux billes, malgré la gravité s'exerçant sur le pont liquide. Elle équilibre dans ce cas le poids du pont liquide. L'essai de traction a donc lieu sur une balance qui mesure, pour chaque distance inter-granulaire la masse de la bille inférieure et du pont liquide.

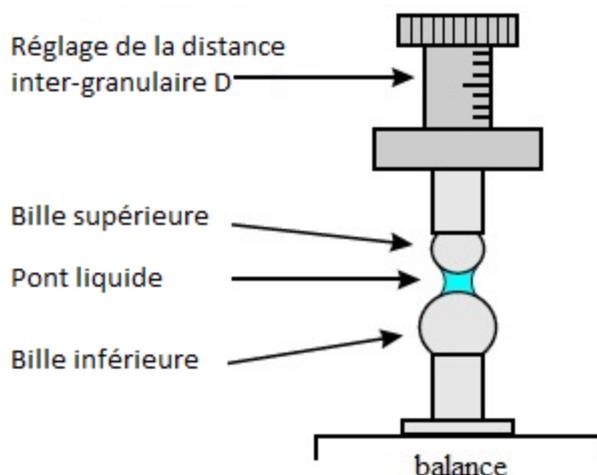


Figure 2.26 : Essai de traction sur un doublet capillaire [SOULIE'05]

La masse de la bille inférieure est connue, elle est notée m_b . La balance mesure en permanence, c'est-à-dire pour chaque distance inter-granulaire, la masse du pont liquide et de la bille inférieure, cette masse est notée m_{p+b} .

L'équilibre des forces implique la relation (2.4) :

$$F_{\text{capillarité}} + P_{\text{pont liquide}} = 0 \quad (2.4)$$

Le poids du pont liquide peut s'écrire ainsi :

$$P_{\text{pont liquide}} = (m_{p+b} - m_b) \cdot g \quad (2.5)$$

(2.4) et (2.5) permettent de déterminer l'expression de la force de capillarité (2.6).

$$F_{\text{capillarité}} = (m_b - m_{p+b}) g \quad (2.6)$$

Le dispositif permet donc de connaître la force de capillarité pour un volume et une distance inter-granulaire donnés. De ces tests est obtenue la Figure 2.27 établie à partir de grains de diamètres 1,5 mm et 3 mm.

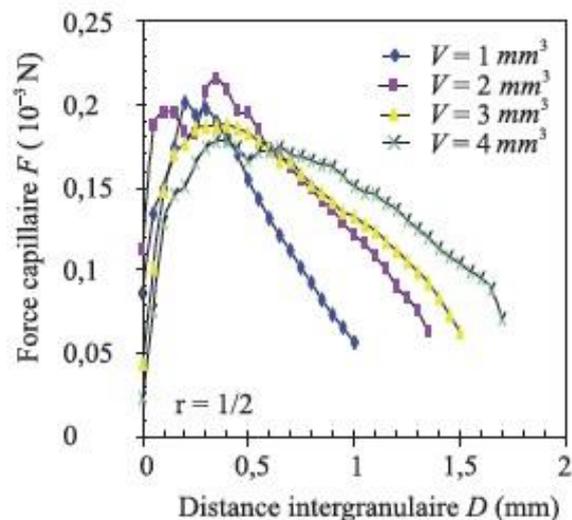


Figure 2.27 : Relation entre force de capillarité et distance intergranulaire pour des volumes de pont liquide différent [SOULIE'05]

Il apparaît que deux grains peuvent être à la même distance, avec cependant un volume d'eau entre eux plus important, selon la force de capillarité en présence. Obtenir des agglomérats de taille similaire avec un volume d'eau plus important est donc envisageable, selon l'action de la force de capillarité. La non-influence de la quantité d'eau – dans une certaine plage correspondant à la phase pendulaire – sur la taille des granulés formés est donc possible.

2.3.5. Analyse globale des coulis

La Figure 2.8, rappelée ci-dessous, superpose les courbes obtenues avec les différents paramètres testés et permet de constater que les variations sont les mêmes pour l'ensemble des coulis. Ce constat a permis en début de chapitre de distinguer trois catégories de granulés, dont l'une reste stable, les deux autres s'équilibrant selon un principe de vase communicant (Tableau 2.8. et Figure 2.10).

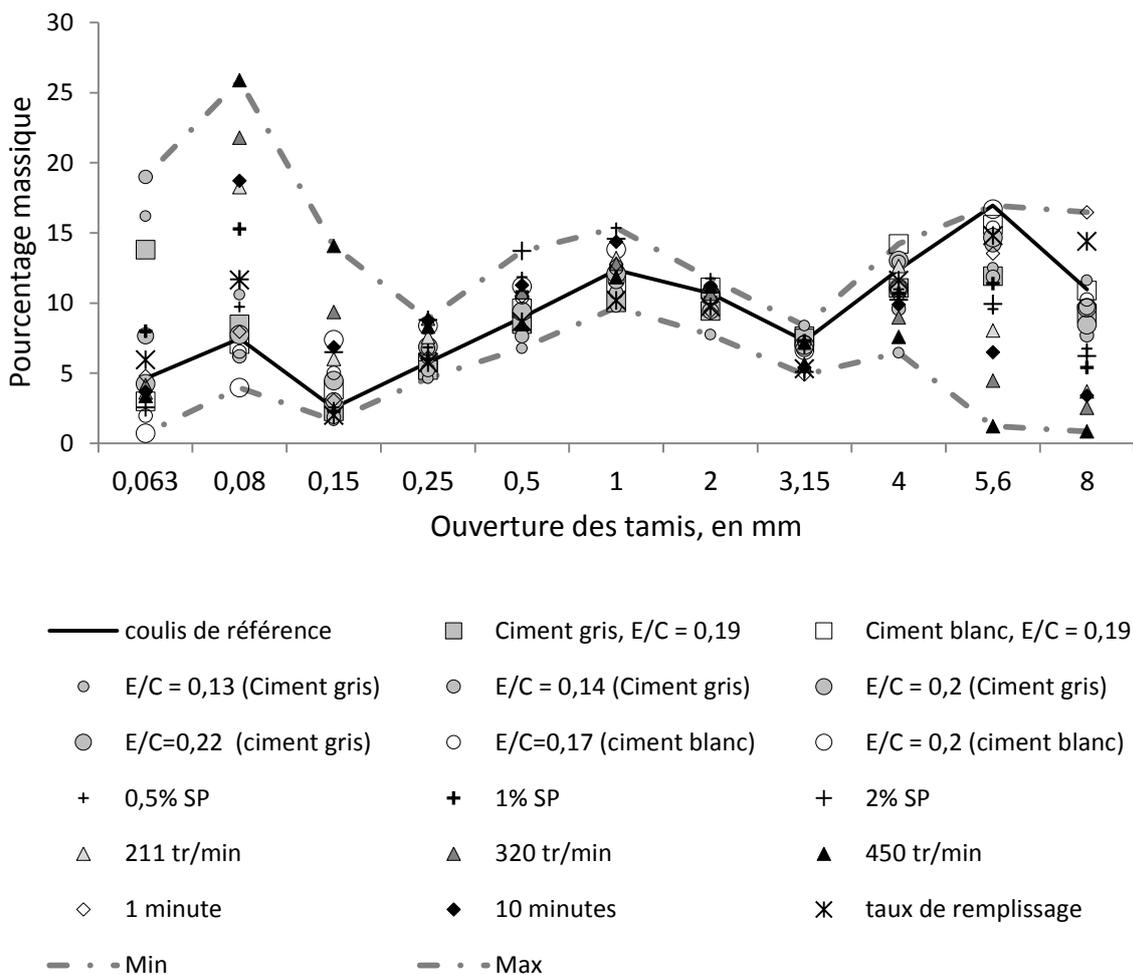


Figure 2.8 : Répartitions granulométriques des coulis

Rappelons à présent les trois plages de diamètre retenues (Tableau 2.8) :

Granulés fins F	$d < 0,25 \text{ mm}$
Granulés moyens M	$0,25 \text{ mm} \leq d \leq 4 \text{ mm}$
Granulés gros G	$4 \text{ mm} < d$

Tableau 2.8: Catégories de granulés

Il est envisageable que ces trois catégories de taille génèrent un empilement optimal du coulis. Les détails concernant un tel arrangement granulaire sont présentés dans l'Annexe 2 mais les grandes lignes sont rappelées ci-dessous.

Empilement théorique :

L'empilement est régi par les gros granulés, les plus petits pouvant se loger dans les vides générés par leurs aînés.

Entre des gros granulés (sphères G) peuvent venir s'intercaler deux types de granulés de taille moyenne, les sphères M^+ situées à l'interstice entre les sphères G et les sphères M^- placées dans les « cols » de l'empilement. La Figure 2.28 illustre cet empilement.

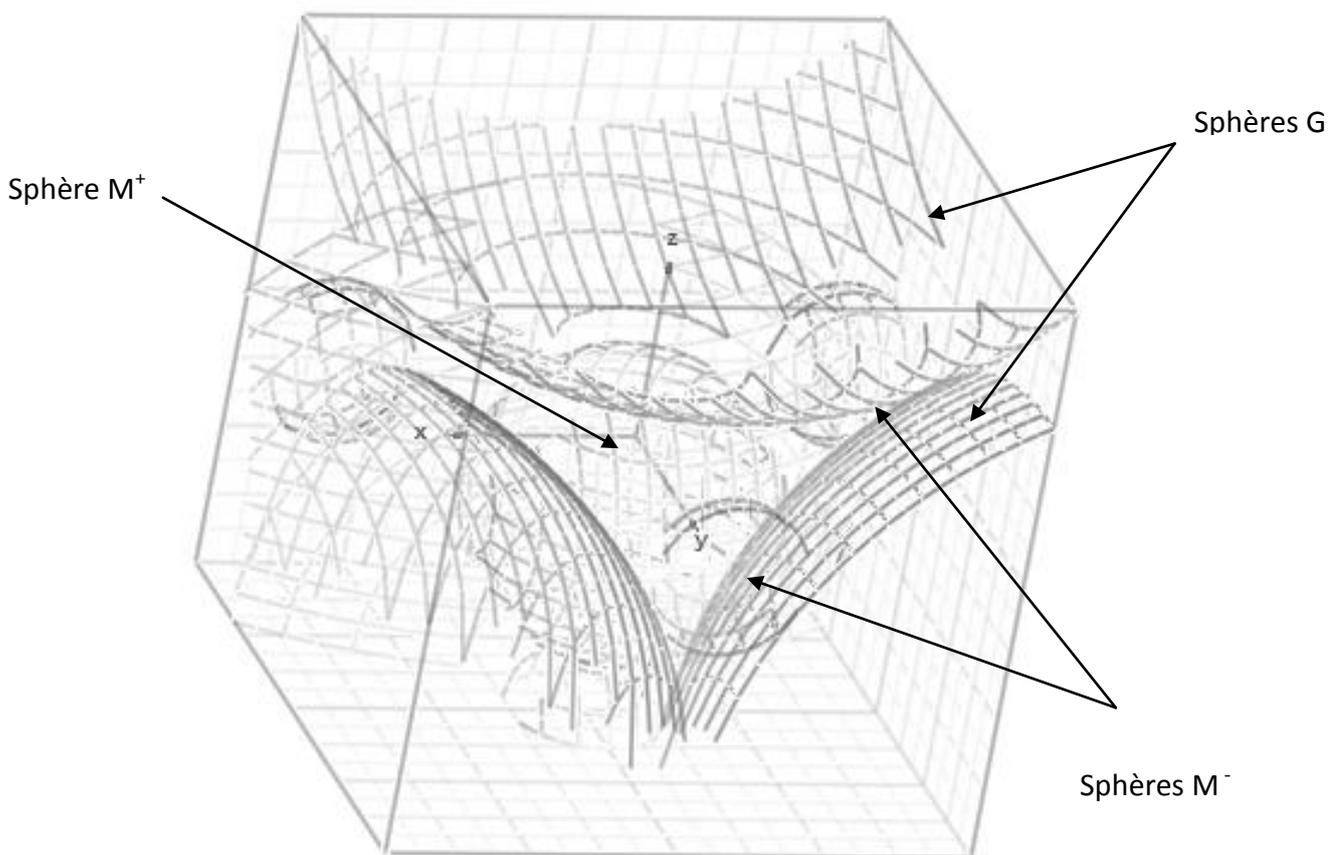


Figure 2.28 : Empilement de sphères

Le diamètre des sphères M^+ et M^- est dicté par celui des sphères G selon les relations (2.7) et (2.8) établies dans l'Annexe 2.1:

$$D_{M^+} = 0,299 D_G \quad (2.7)$$

$$D_{M^-} = 0,1547 D_G \quad (2.8)$$

L'empilement théorique est construit dans un tétraèdre formé par les centres des quatre sphères G. Ce volume comprend 1/6 de sphère G, 1 sphère M^+ et 4 sphères M^- . Cet

empilement possède encore une porosité qui permet à des granulés plus petits (sphères F) de s'intercaler. La comparaison entre empilement théorique et empilement réel est détaillée dans l'Annexe 2.2. Le Tableau 2.19 présente les résultats obtenus, en nombre de granulé M^+ , M^- et F dans un empilement généré par un granulé G et en pourcentage volumique correspondant.

	Empilement théorique		Empilement réel	
	Nombre de granulé	En % volumique	Nombre de granulé	En % volumique
G	1	59	1	41
M^+	6	10	9	17
M^-	24	5	69	27
F	99894	26	84455	15

Tableau 2.19 : Confrontation entre le coulis de référence et l'empilement optimal théorique

Le Tableau 2.19 permet d'apprécier les différences entre l'empilement théorique et le coulis en phase pendulaire réel. Les ordres de grandeurs sont respectés mais les valeurs théoriques et empiriques ne coïncident pas exactement. Ceci peut s'expliquer par la reconstitution de l'empilement réel à partir de valeurs obtenues après deux discrétisations consécutives, la première lors du tamisage, la seconde lors du découpage de l'ensemble du coulis en trois catégories distinctes. Ces deux étapes permettent de comprendre les phénomènes liés à la granulation mais génèrent également une perte d'information sur la répartition granulométrique précise des coulis en phase pendulaire. Ceci a une incidence sur les empilements théorique et réel puisque l'empilement théorique est bâti à partir du diamètre des gros granulés D_G , une valeur déduite des mesures expérimentales. Les manipulations subies par les granulés puis par les mesures expérimentales sont susceptibles d'être à l'origine des écarts constatés.

En dépit de ces différences, l'organisation d'un empilement dicté par la présence des gros granulés est en revanche établie puisque les grains de taille inférieure viennent combler les vides générés par les sphères G. Si cette catégorie de sphères conditionne les quantités de sphères de tailles inférieures, il est envisageable d'utiliser le diamètre moyen D_G de la classe des gros granulés pour caractériser l'ensemble du coulis. Substituer le D_G au D_m permettrait entre autres de réduire l'étape d'analyse granulométrique.

La Figure 2.29 est obtenue en remplaçant les diamètres moyens des coulis par les D_G calculés. Le coulis de référence apparaît en noir, les paramètres de formulation en blanc et les paramètres liés au process sont en gris.

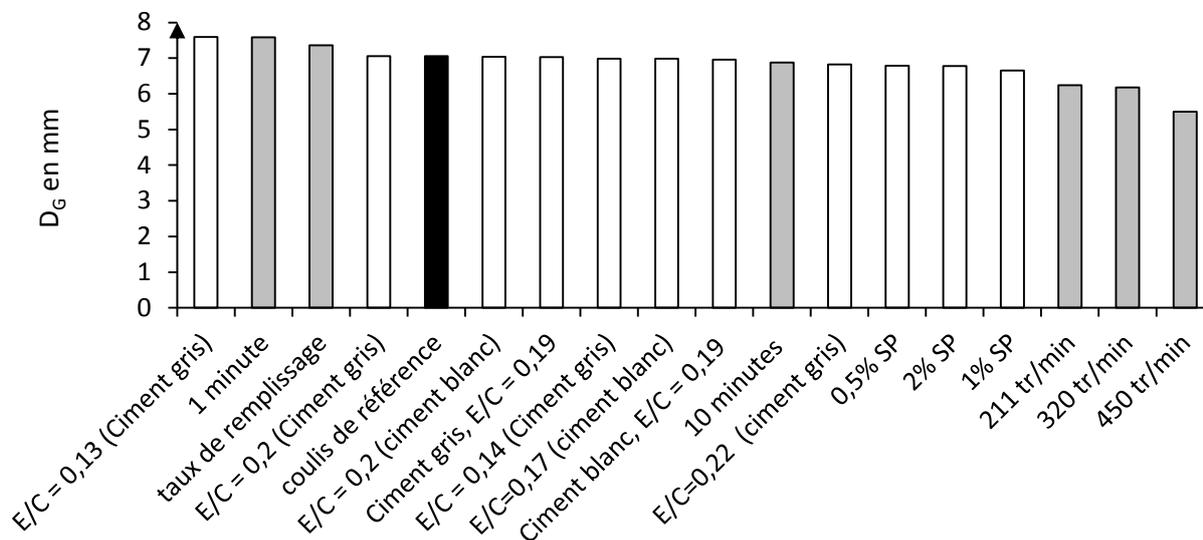


Figure 2.29 : D_G des coulis réalisés

Le classement décroissant des D_G de chaque coulis n'aboutit pas exactement à la même classification des paramètres que dans le cas d'une ordonnée en D_m (Figure 2.23 et Figure 2.24). Les très faibles différences entre certains D_G empêchent également de tirer des conclusions fiables sur l'influence des paramètres. En effet, comme le montre la Figure 2.30, la variation des D_G est beaucoup moins importante que celle des D_m .

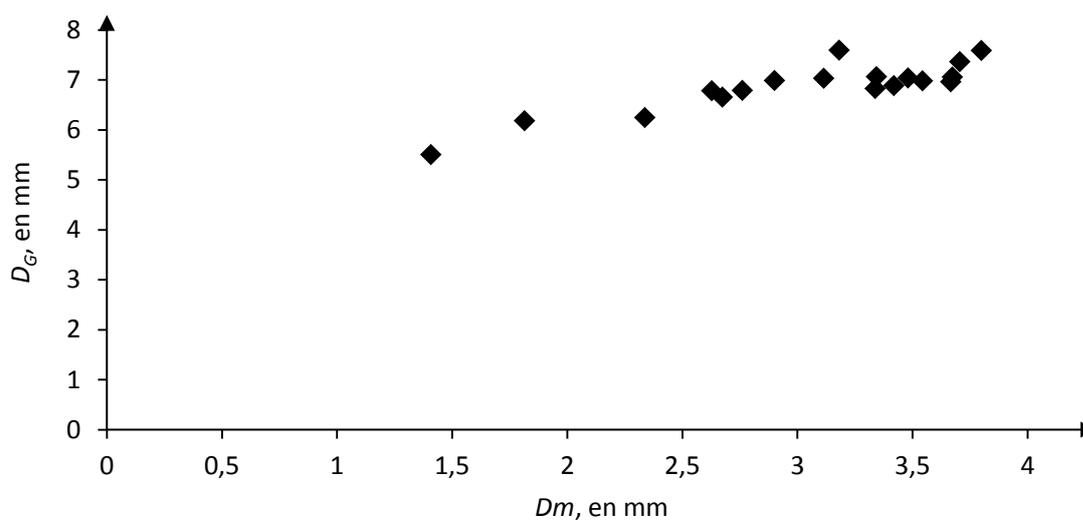


Figure 2.30 : $D_G=f(D_m)$

Le diamètre moyen, calculé sur l'ensemble du coulis, présente des différences entre les coulis plus significatives que D_G , ce qui permet une meilleure interprétation des variations. Le diamètre moyen sera donc dans la suite de cette étude préféré à D_G bien que ce dernier paramètre permette une bonne description du coulis tout en assurant un gain de temps important lors de l'analyse granulométrique.

2.4. Lien avec l'intensité du malaxage

L'empilement granulaire généré dans le malaxeur est dicté par la compétition entre l'énergie de cohésion et rupture. Ces deux phénomènes sont détaillés et explicités ci-après, avant d'être confrontés aux résultats expérimentaux.

2.4.1. Energie cinétique

Le cisaillement du milieu par les pales du malaxeur aboutit à l'endommagement de certains granules. Dans ces cas, l'énergie apportée par la pale est supérieure à celle nécessaire pour vaincre la cohésion assurée par les ponts liquides. Cette énergie est cinétique et s'exprime généralement selon (2.9) :

$$E_c = \frac{1}{2} m_c V^2 \quad (2.9)$$

La masse m_c des granules n'est pas connue, et varie selon leur diamètre d . En revanche, la masse volumique M_v est constante et m_c peut donc s'exprimer selon (2.10).

$$m_c = M_v \cdot \text{Volume} \sim \rho \cdot d^3 \quad (2.10)$$

La détermination de la masse volumique M_v des coulis est explicitée dans l'Annexe 4.

La vitesse V reçue par le granulé est proportionnelle à la vitesse de malaxage dont les valeurs apparaissent dans le Tableau 2.20. L'équivalence (2.11) est donc faite.

$$V^2 \sim V_{pale}^2 \quad (2.11)$$

L'énergie cinétique E_c s'écrit alors selon (2.12) :

$$E_c \sim M_v \cdot d^3 V_{pale}^2 \quad (2.12)$$

Les vitesses du malaxeur utilisées sont rappelées dans le Tableau 2.20.

Vitesse	Vitesse de rotation de la pale, en	Vitesse d'un point de la pale, en
Vitesse 1	96 tr/min	1,33 m/s
Vitesse 2	211 tr/min	2,97 m/s
Vitesse 3	320 tr/min	4,46 m/s
Vitesse 4	450 tr/min	6,32 m/s

Tableau 2.20 : Vitesses de malaxage

2.4.2. Cohésion et capillarité

L'eau est à l'origine de la cohésion entre les particules. Dans cette étude, seule l'action de la capillarité sera considérée car, comme le montre la Figure 2.31, les forces de capillarité prédominent sur les autres forces cohésives, quel que soit le diamètre des particules.

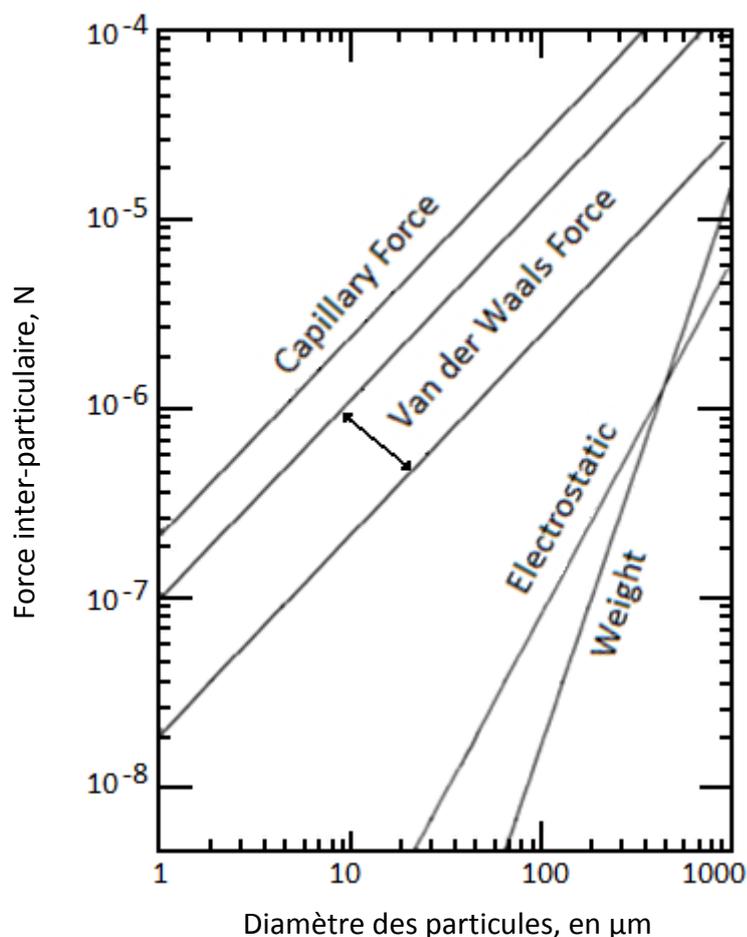
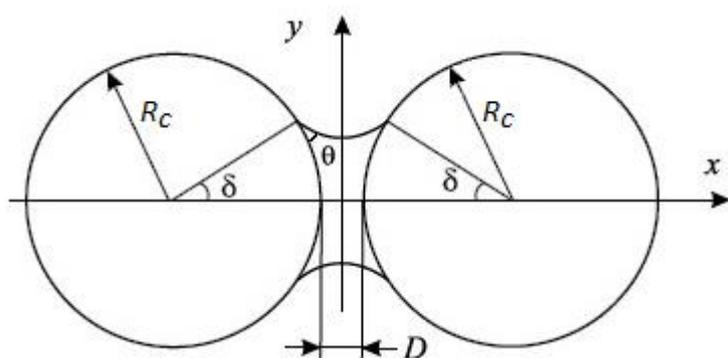


Figure 2.31 : Evolution des forces inter-particulaires en fonction du diamètre des particules (sphère de même diamètre) [SEVILLE et al'00]

L'eau tend à assembler les grains en établissant des ponts liquides entre eux. Ces ponts liquides naissent de la différence de pression à l'interface entre le liquide (l'eau), le solide (le grain de ciment) et le gaz (l'air). Quand l'énergie cinétique est trop grande, les granulés formés par des ponts liquides se rompent. Deux modes de rupture peuvent alors être distingués : une abrasion, qui consiste en la rupture d'un pont liquide situé en périphérie du grain et une rupture du granulé en deux, qui correspond alors à la rupture des ponts liquides se trouvant sur une section complète du granulé. L'énergie de cohésion s'exprime différemment dans ces deux cas, détaillés ci-après.

2.4.2.1. Abrasion en surface

Exprimer la capillarité entre deux grains de ciment, de tailles différentes et de forme non sphérique n'est pas envisageable dans le cadre de cette étude, une approche plus simple est ici proposée, dans le cas d'un pont liquide entre deux sphères de même taille, comme décrit dans la Figure 2.32.



R_c est le rayon des grains

δ est l'angle « de remplissage »,

θ est l'angle de mouillage

D est la distance intergranulaire,

Figure 2.32 : Pont liquide entre deux sphères

La force de capillarité dépend du rayon des grains, de la force de capillarité et d'une fonction liée à la géométrie du pont liquide, conformément à l'expression (2.13) ([COLLET'10]).

La géométrie du pont liquide est également imposée par le rayon R_c , l'équivalence (2.14) est donc possible.

$$F_{\text{Capillarité}} = R \cdot \sigma \cdot f(\theta, \delta, R) \tag{2.13}$$

$$F_{\text{capillarité}} \sim R_c \cdot \sigma \quad (2.14)$$

L'énergie à apporter au système pour vaincre la force de capillarité est proportionnelle à cette force et à une distance caractéristique d'un pont liquide entre deux sphères, forcément équivalente à R_c . L'énergie à fournir pour rompre un pont liquide obéit donc à l'équivalence (2.15).

$$E \sim \sigma \cdot R_c^2 \quad (2.15)$$

L'expression retenue pour l'énergie de cohésion ne capture pas toute la complexité des ponts liquides dans un mélange de grains non sphériques de dimensions variées mais elle permet d'estimer l'énergie à fournir pour rompre le pont liquide. Le Tableau 2.21 rassemble les résultats obtenus dans le cas des coulis réalisés, selon la taille des grains de ciment et le liquide utilisé pour établir les ponts liquides.

- Tension de surface de l'eau, à 20°C : $\sigma = 0,07 \text{ N.m}^{-1}$
- Tension de surface de l'eau mélangée à du superplastifiant, à 20°C : $\sigma = 0,035 \text{ N.m}^{-1}$
- Rayon moyen des grains de ciment blanc : $6 \mu\text{m}$
- Rayon moyen des grains de ciment gris : $5 \mu\text{m}$

Coulis	Energie de cohésion
Ciment blanc	$E \sim (6 \cdot 10^{-6})^2 * 0,07 = 2,52 \cdot 10^{-12} \text{ J}$
Ciment gris	$E \sim (5 \cdot 10^{-6})^2 * 0,07 = 1,75 \cdot 10^{-12} \text{ J}$
Ciment blanc + Superplastifiant	$E \sim (6 \cdot 10^{-6})^2 * 0,035 = 1,26 \cdot 10^{-12} \text{ J}$

Tableau 2.21: Estimation de l'énergie nécessaire pour rompre les ponts liquides

2.4.2.2. Rupture d'un granulé

La séparation en deux d'un granulé correspond à la rupture des ponts liquides situés sur la section de la rupture.

Le nombre de ces ponts liquides nb_p est proportionnel au nombre de grain de ciment de section πR_c^2 composant un granulé de section πD^2 .

$$nb_p = \frac{D^2}{R^2} \quad (2.16)$$

L'énergie à apporter au système pour vaincre un pont liquide est décrite dans (2.15). Pour n ponts liquides, l'équivalence (2.17) peut être écrite. En remplaçant nb_p par son expression définie par (2.16), (2.18) est obtenue.

$$E \sim nb_p \sigma R_c^2 \quad (2.17)$$

$$E \sim D^2 \sigma \quad (2.18)$$

La comparaison de ces deux expressions de cohésion, pour une abrasion et pour une rupture du granulé, avec l'énergie cinétique permettra de définir le mode de rupture des granulés.

2.4.3. Intensité du cisaillement

D'après les principes de la granulation humide, le diamètre moyen correspond à un équilibre entre cohésion et rupture. La rupture est ici engendrée par le cisaillement apporté par les pales du malaxeur. Il y a rupture lorsque l'énergie cinétique (cf § 2.4.1) correspondante égale l'énergie de cohésion présente dans les granulés du système. Deux cas possibles de rupture existant (§ 2.4.3.1 et 2.4.3.2.), l'équilibre cohésion/rupture doit être écrit selon ces deux possibilités.

2.4.3.1. Rupture du granulé

Dans le cas d'une rupture du granulé, l'énergie de cohésion s'écrit selon (2.18) et peut être comparée à l'expression de l'énergie cinétique définie en (2.12). Dans ce cas, il existe $D = D_m$ tel que :

$$M_v D_m^3 V_{pale}^2 \sim \sigma D_m^2 \quad (2.19)$$

Le diamètre moyen est alors équivalent à :

$$D_m \sim \frac{\sigma}{M_v V_{pale}^2} \quad (2.20)$$

Traçons à présent sur la Figure 2.23 le diamètre moyen D_m mesuré expérimentalement en fonction du diamètre moyen théorique calculé grâce à (2.20) :

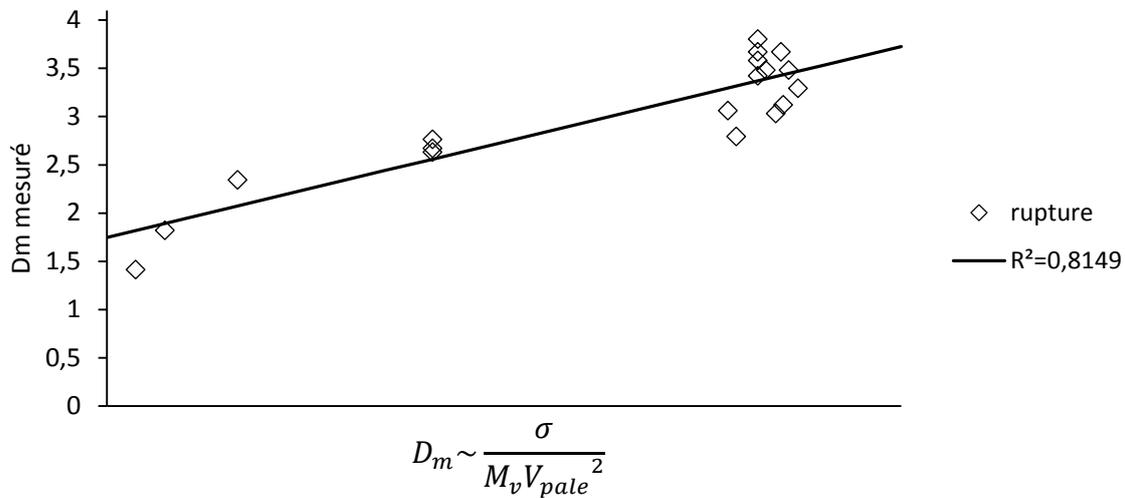


Figure 2.33 : D_m expérimental = $f(D_m$ théorique) dans le cas d'une rupture des granulés

Les points apparaissant sur la Figure 2.23 ne forment pas une droite (coefficient de corrélation $R^2 = 0,8149$), il n'y a donc pas une équivalence forte entre le diamètre moyen mesuré expérimentalement d'une part et son estimation théorique d'autre part. Les granulés ne subissent donc pas une rupture.

2.4.3.2. Abrasion du granulé

La seconde possibilité réside en une abrasion des granulés. Dans cette configuration, il est possible d'écrire l'équivalence (2.21), en utilisant les relations (2.15) et (2.12) :

$$M_v D_m^3 V_{pale}^2 \sim \sigma R_c^2 \quad (2.21)$$

Le diamètre moyen est alors équivalent à (2.22) :

$$D_m \sim \left(\frac{\sigma \cdot R_c^2}{M_v \cdot V_{pale}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

La Figure 2.34 présente le diamètre moyen réel en fonction du diamètre moyen théorique, calculé à partir d'un équilibre entre cohésion et abrasion.

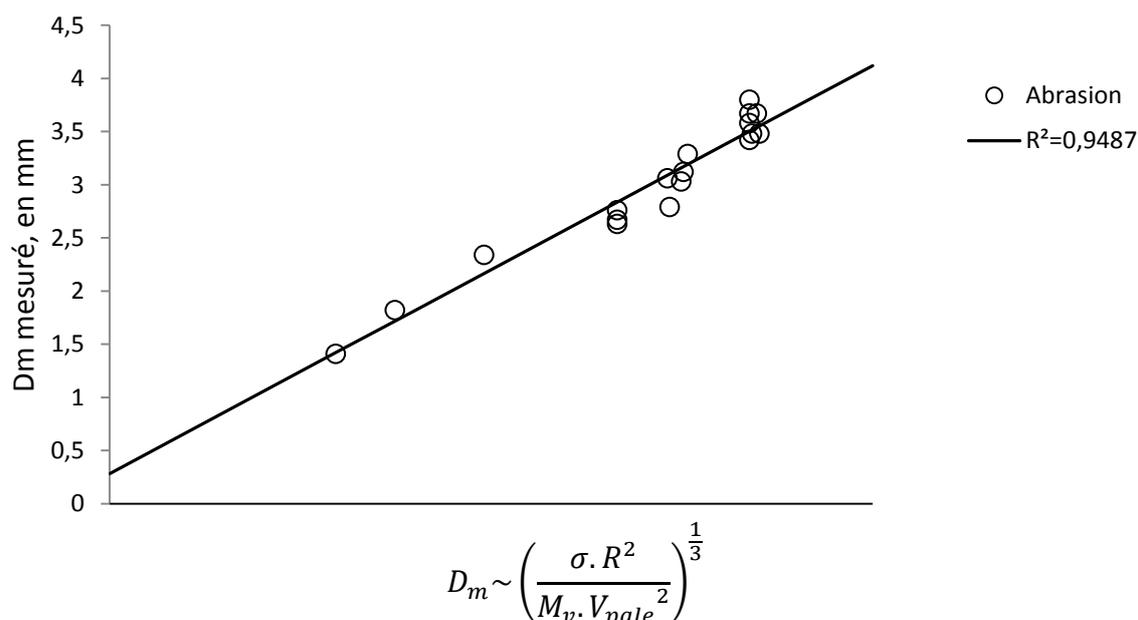


Figure 2.34 : $D_m = f(D_m \text{ théorique})$ dans le cas d'une abrasion des granulés

Avec un coefficient de corrélation proche de 0,95, il est possible de dire qu'il existe une relation linéaire entre les diamètres moyens mesurés (en ordonnée) et l'équivalence théorique au diamètre moyen dans le cas d'une abrasion des granulés (axe des abscisses). Ceci confirme que le diamètre moyen est bien le résultat d'une compétition entre la capillarité d'une part et l'abrasion générée par le cisaillement d'autre part.

Cette courbe est en accord avec les observations expérimentales. En effet, les pourcentages massiques importants obtenus dans certains cas pour le tamis d'ouverture $80 \mu\text{m}$ et les effets de vases communicants entre petits et gros granulés (Figure 2.10) corroborent l'hypothèse d'une érosion du granulé suggérée par la Figure 2.34.

Cette conclusion est établie grâce aux résultats mesurés après trois minutes de malaxage. En réalité, au début du malaxage, les granulés subissent des ruptures qui permettent d'obtenir des granulés de taille plus faible. Progressivement, le système tend vers un équilibre, il minimise son énergie et l'abrasion devient alors le mode d'endommagement des granulés le moins énergivore (puisque R_c est inférieur à D_m). Une étude plus précise de la cinétique de formation de ces granulés permettrait de déterminer les phases dominées par la rupture puis par l'abrasion.

Ici, les nombreuses équivalences utilisées ne permettent pas de proposer une valeur précise du cisaillement mais d'établir une relation physique forte entre diamètre moyen des granulés formés, énergie de cohésion et énergie cinétique.

2.4.3.3. Intensité de cisaillement

Le cisaillement est lié à la vitesse de malaxage et à la configuration géométrique du malaxeur. L'influence de cette dernière n'étant pas connue, il est possible d'écrire la relation (2.23) :

$$\dot{\gamma} \sim V_{pate} \quad (2.23)$$

L'augmentation du cisaillement, et donc de la vitesse, conduit, d'après (2.22), à un diamètre moyen plus petit.

Dans un malaxeur M_1 , il suffit pour augmenter le cisaillement d'augmenter la vitesse de malaxage. La configuration géométrique d'un malaxeur M_2 peut engendrer un cisaillement égal à celui dans M_1 mais pour une vitesse différente. Si cette vitesse est plus élevée, alors le malaxeur M_2 est moins efficace que le mélangeur M_1 .

Les malaxeurs peuvent donc être comparés entre eux grâce aux diamètres moyens des granulés fabriqués. Dans ce but, des coulis ont été réalisés dans d'autres malaxeurs, un malaxeur planétaire M_2 , un malaxeur intensif à cuve inclinée M_3 , un turbo-malaxeur M_4 et un malaxeur conique M_5 . Les résultats concernant ces essais apparaissent dans le Tableau 2.22.

	Vitesse des pales, en m/s	D _G , en mm
Malaxeur habituel M ₁	1,33	7,06
	2,97	6,30
	4,46	6,2
	6,32	5,5
Malaxeur à planétaire M ₂	1,5	17,6
	2,38	17,3
Malaxeur à cuve inclinée M ₃	1,3	13,7
Turbo-malaxeur M ₄	[-]	16,3
Malaxeur conique M ₅	25 % V _{racle} – 50 % V _{pale}	12,4
	100 % V _{racle} – 100 % V _{pale}	8,6

Tableau 2.22 : Efficacité des malaxeurs

La méconnaissance des vitesses de malaxage des malaxeurs M₄ et M₅ ne nous permet pas de tracer la fonction (2.22) pour l'ensemble des résultats obtenus.

$$D_m = f \left(\frac{\sigma \cdot R_c^2}{M_v \cdot V_{pale}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

En revanche, il est possible d'écrire la relation (2.24). L'intensité de cisaillement est alors estimable grâce au diamètre moyen des gros granulés formés.

$$D_G \sim \frac{1}{\dot{\gamma}^{2/3}} \rightarrow \dot{\gamma} \sim \frac{1}{D_G^{3/2}} \quad (2.24)$$

La Figure 2.35 rappelle les résultats obtenus sur différents malaxeurs et les classe selon les diamètres des granulés formés.

<p>Malaxeur M₂</p> <p>$17,3 \text{ mm} \leq D_G \leq 17,6 \text{ mm}$</p>		<p>Intensité de cisaillement</p> 
<p>Malaxeur M₄</p> <p>$D_G = 16,3 \text{ mm}$</p>		
<p>Malaxeur M₃</p> <p>$D_G = 13,7 \text{ mm}$</p>		
<p>Malaxeur M₅</p> <p>$8,6 \leq D_G \leq 12,4$</p>		
<p>Malaxeur M₁</p> <p>$5,5 \leq D_G \leq 7,06$</p>		

Figure 2.35: Intensité de cisaillement des malaxeurs utilisés

Rappelons que la Figure 2.35 est construite d'après des résultats expérimentaux qui ne couvrent pas l'intégralité des possibilités des malaxeurs en termes de vitesse et de remplissage. Ainsi, si l'intégralité des vitesses a été testée sur les malaxeurs M_1 et M_4 , ce n'est pas le cas des trois autres malaxeurs.

Notons également que la différence de contenance des malaxeurs explique que les coulis n'aient pas été fabriqués dans les mêmes quantités. Le paramètre remplissage a été écarté dans le § 2.2.2.2 car aucune modification du diamètre moyen n'a été décelée sur des coulis fabriqués dans des malaxeurs ayant une pale « active » sur toute la hauteur de la cuve. S'il n'a pas d'influence dans le cas des malaxeurs M_1 et M_5 , le taux de remplissage peut en revanche modifier les résultats obtenus sur les malaxeurs M_2 , M_3 et M_4 . En effet, les pales des malaxeurs M_2 et M_4 ont une hauteur d'action inférieure à la hauteur de la cuve et l'inclinaison du mélangeur M_3 provoque la concentration le mélange dans le bas du malaxeur, l'intégralité des pales n'est alors pas utilisée. Un paramètre d'immersion des pales dans le mélange pourrait être étudié pour écarter ces incertitudes de nos conclusions premières.

Ce classement n'est donc pas à considérer comme figé car il peut dépendre des paramètres de fabrication employés. L'Annexe 7 répertorie les différentes étapes permettant d'établir ce comparatif selon les critères des malaxeurs étudiés.

Toutes les possibilités offertes par ces cinq malaxeurs n'ont pas été exploitées ; les résultats à disposition permettent néanmoins d'aboutir à un classement cohérent puisqu'il est aisé de voir sur la Figure 2.35 que l'intensité de cisaillement évolue avec le volume occupé par les organes de mélange dans la cuve. Cette remarque est en adéquation avec la pratique industrielle qui consiste à mettre d'autant plus de pales dans le malaxeur que sa contenance est importante.

Conclusions :

Le cisaillement et l'efficacité d'un malaxeur ne sont pas aujourd'hui quantifiable de manière numérique. L'étude des diamètres moyens des granulés formés dans ces malaxeurs mène cependant à une hiérarchisation de l'efficacité des malaxeurs. Cette conclusion est basée sur la relation existant entre le diamètre moyen réel des coulis et un diamètre moyen théorique déduit de la compétition entre cohésion et rupture pendant le malaxage.

$$D_m \sim \left(\frac{\sigma \cdot R_c^2}{M_v \cdot V_{pale}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.22)$$

2.5. Conclusion

Les mécanismes de la granulation humide régissent le malaxage des coulis en phase pendulaire. La bonne répétabilité des essais fut un premier élément nous indiquant l'existence d'un équilibre physique à l'origine de la répartition granulométrique. Les variations identiques des courbes granulométriques et le phénomène de vases-communicants a renforcé cette hypothèse. Finalement, une relation forte liant le diamètre moyen, la cohésion par capillarité et la rupture par cisaillement a été établie et confirme que la capacité de cisaillement d'un malaxeur, peut être estimée via l'étude des granulés formés par les actions combinées de l'eau et de l'agitation.

Une comparaison de différents diamètres moyens mesurés dans des coulis provenant de malaxeurs différents a permis de classer les malaxeurs selon leur intensité de cisaillement. Pour un industriel, un malaxeur efficace sera peut-être celui dont la consommation électrique est la plus faible, pour une même taille de granulés fabriqués. Une procédure permettant de comparer des malaxeurs à partir de la méthode développée dans ce chapitre est disponible en Annexe 7.

Le lien entre le cisaillement d'un malaxeur et la dispersion des fibres reste à établir mais nécessite le développement d'une méthode adaptée pour le contrôle de la dispersion des fibres, c'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 3

3. Développement d'une méthode de mesure de la teneur relative en fibres

L'étude de la dispersion des fibres pendant le malaxage implique d'être capable de connaître la teneur en fibre en différents points de la gâchée. Aujourd'hui, différentes méthodes existent pour mesurer la répartition des fibres. Le Tableau 3.1 synthétise les principaux moyens de mesure déjà présentés dans le premier chapitre (§ 1.4.3.1 et 1.4.3.2) et leur intérêt par rapport à une utilisation dans le béton.

Méthodes	Avantages recherchés				Inconvénients à éviter		
	Facilité de mise en œuvre	Réalisable sur béton frais	Coût faible	Facilité d'interprétation des résultats	Echantillonnage	Essais destructif	Coût élevé
Comptage / pesée de fibres prélevées dans un volume	x	x	x	x	x	x	
Analyses de section	x		x		x	x	
Méthode rayons X					x	x	x
Méthode électrique / électromagnétique					x	x	
Tomographie					x	x	x

Tableau 3.1 : Méthodes de mesure de dispersion des fibres

Les méthodes existantes ne sont pas satisfaisantes pour une application dans le béton frais. Dans cette partie de l'étude sera donc présentée la méthode de mesure retenue. Puis, cette méthode sera testée sur différents matériaux afin de comprendre son principe de fonctionnement. Des adaptations liées à une utilisation pour les bétons fibrés seront ensuite réalisées.

3.1. Méthode retenue

3.1.1. Cahier des charges

La mesure de dispersion de fibres doit être facile à mettre en œuvre, reproductible, réalisable pendant le malaxage, c'est-à-dire sur béton frais, et ne pas représenter un investissement trop important (afin d'être par exemple utilisée pour des contrôles lors de la production).

Une méthode de mesure de résistivité électrique du béton dans le malaxeur a été retenue. Cette méthode, basée sur les différences de résistivité entre fibres et béton, est *a priori* reproductible, applicable dans le malaxeur et nécessite un investissement limité.

Ces mesures sont réalisées dans le cadre de la compréhension des mécanismes à l'origine de la dispersion des fibres. Le dispositif développé est utilisable pour optimiser un procédé mais n'a pas vocation à devenir un moyen de contrôle permanent.

A notre connaissance, ce moyen de mesure n'est employé aujourd'hui que sur les bétons durcis pour détecter par exemple les zones de corrosion des armatures [NAAR'06] ou plus généralement l'état d'endommagement d'une structure en béton armé [LATASTE'02].

3.1.2. Principe général

Le principe de la mesure est basé sur la loi d'Ohm. Comme le décrit la Figure 3.1, un courant est envoyé entre les bornes C_1 et C_2 et la tension correspondante est mesurée entre P_1 et P_2 .

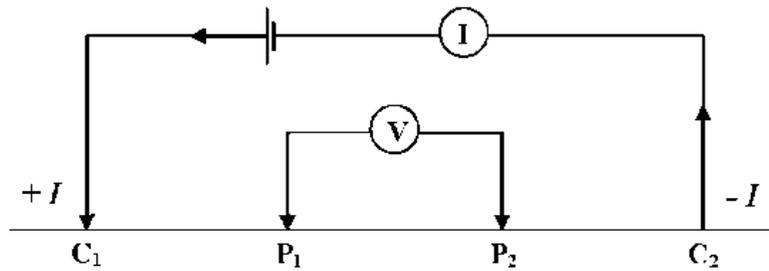


Figure 3.1 : Principe de la mesure de résistivité électrique

Les lignes de courant et de tension d'un tel dispositif apparaissent sur la Figure 3.2.

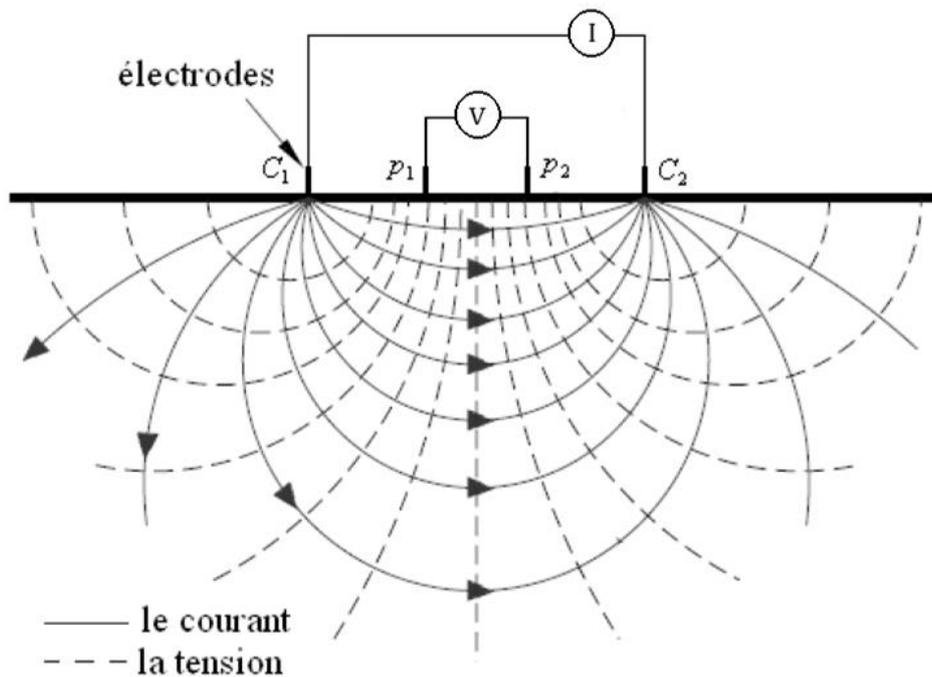


Figure 3.2 : Equipotentiels et lignes de courant

Le courant est relié à la différence de potentiel ΔV par la loi d'Ohm (équation (3.1)).

$$\Delta V = R \cdot I \quad (3.1)$$

Localement, avec \vec{j} le vecteur densité de courant, S la conductivité électrique et \vec{E} le champ électrique, la relation (3.1) peut aussi s'écrire :

$$\vec{j} = S \vec{E} \quad (3.2)$$

Rappelons également les relations existant entre la résistivité ρ et la conductivité électrique S ((3.3)) ainsi qu'entre le champ électrique E et du potentiel V_e (3.4).

$$\rho = \frac{1}{S} \quad (3.3)$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad} V_e \quad (3.4)$$

En associant les relations (3.2), (3.3) et (3.4) et en prenant deux points séparés d'une distance ∂r , la différence de potentiel s'exprime ainsi :

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\rho J \quad (3.5)$$

De plus J , la densité de courant correspond à une intensité I rapportée à une surface. La surface de l'équipotentielle est une demi-sphère et pour un point situé à une distance r de la source de courant, il est possible d'écrire :

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.6)$$

Les relations (3.5) et (3.6) mènent à l'expression (3.7):

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3.7)$$

En intégrant et en prenant $V = 0$ pour $r = \infty$, le potentiel en un point M , situé à une distance r de la source peut s'écrire :

$$V(M) = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (3.8)$$

Dans cette étude, la différence de potentiel est mesurée aux bornes de P_1 et de P_2 . Ces deux points sont sur les équipotentielles générées par le courant injecté en C_1 et en C_2 . Les expressions de $V(P_1)$ et de $V(P_2)$ (respectivement (3.9) et (3.10)) doivent donc prendre en compte les deux sources de courant, en considérant les distances entre électrodes, P_1C_1 , P_1C_2 , P_2C_1 et P_2C_2 :

$$V(P_1) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P_1C_1} - \frac{1}{P_1C_2} \right) \quad (3.9)$$

$$V(P_2) = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{P_2C_1} - \frac{1}{P_2C_2} \right) \quad (3.10)$$

Pour une configuration de Wenner où $C_1P_1 = C_2P_2 = P_1P_2 = d_{ie}$, la différence de potentiel s'écrit donc selon (3.11) :

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{d_{ie}} - \frac{1}{2d_{ie}} - \frac{1}{2d_{ie}} + \frac{1}{d_{ie}} \right)$$

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi d_{ie}}$$
(3.11)

Ce qui donne la relation (3.12) pour la résistivité ρ :

$$\rho = 2\pi d_{ie} \frac{\Delta V}{I} = 2\pi d_{ie} R$$
(3.12)

En réglant la distance d_{ie} dans le dispositif présenté dans la Figure 3.1, l'appareil fournit donc la résistance et la résistivité du matériau testé à partir de la mesure de la tension aux bornes de P_1 et P_2 .

Le dispositif photographié dans la Figure 3.3 est habituellement utilisé pour sonder les sols. En effet, les différents constituants de la couche terrestre n'ont pas la même conductivité électrique et des mesures de ce type permettent de connaître la nature du sol. Nous reviendrons sur la manipulation de ces résultats en géologie dans le § 3.4.3.1.

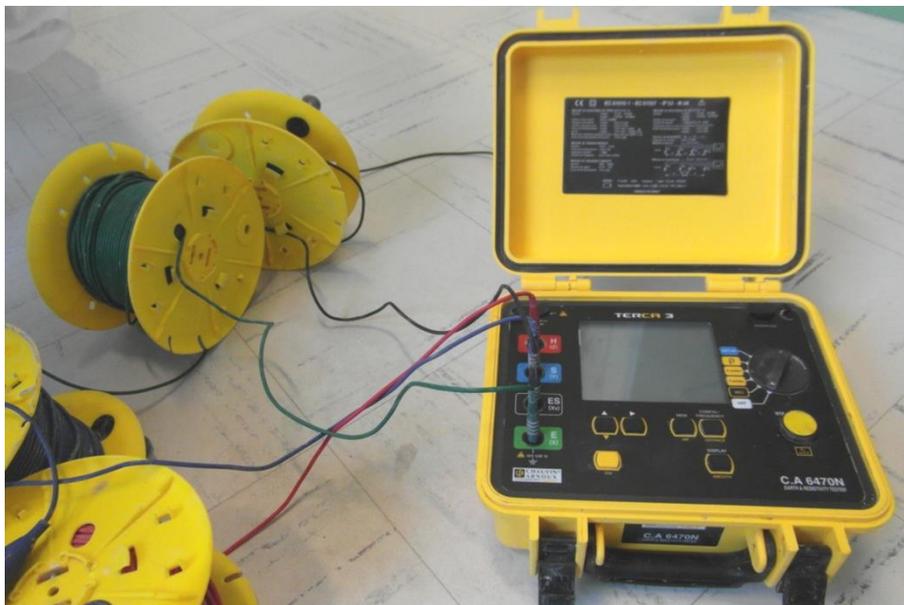


Figure 3.3 : Appareil de mesure de résistivité électrique C.A. 6470 N Terca3

Ce dispositif est utilisé dans ces travaux pour déterminer la présence de la teneur en fibre. Il est donc nécessaire de connaître la relation entre la résistivité électrique mesurée et la

quantité de fibres. Cette information requiert de connaître plus précisément le principe de la mesure faite par l'appareil ainsi que le volume testé lors d'une mesure.

Ces validations seront faites sur différents matériaux, détaillés dans le prochain paragraphe.

3.2. Matériaux

3.2.1. Le gel

Le développement de la méthode de mesure a nécessité des validations. L'emploi d'un matériau homogène et translucide a été requis pour visualiser le contenu testé par le dispositif. Le choix s'est porté sur une solution de polymère ayant un comportement de type gel. L'Extrait 3.1, tiré de l'étiquette commerciale du gel, précise ses constituants.

AQUA, ALCOHOL DENAT, PVP, TRIETHETHALONAMINE, CARBOMER, PEG-12 DIMETHICONE, PARFUM, BENZYL ALCOHOL, METHYLCHLOROISOTHIAZOLINONE, METHYLISOTHIAZOLINONE, CITRONELLOL, GERANIOL, CIN 16255, CI 28440
--

Extrait 3.1 : Constituants du gel

Initialement conditionné en pot de 250 ml, l'ensemble du volume testé (soit l'équivalent de 40 pots) a été stocké dans des contenants hermétiques d'une contenance de 5L. Les utilisations successives ont assuré un brassage de l'ensemble des pots. Avant chaque utilisation, la résistivité électrique du gel seul est mesurée.

3.2.2. Le ciment

Un ciment CEM I 52,5 N a été choisi pour l'ensemble des essais. Ce choix est motivé par l'absence d'additifs dans ce type de ciment. Cet argument sera davantage développé dans le § 3.4.2.

3.2.3. Les granulats

Les granulats utilisés sont des siliceux roulés et un calcaire concassé. Les courbes granulométriques de ces granulats sont visibles dans l'Annexe 1.2.

3.2.4. Les fibres

Les fibres utilisées sont des fibres métalliques, à crochet, de la marque Arcelor. Les fibres ont une longueur de 35 mm et une section de 0,55 mm de diamètre. Elles sont considérées comme rigides, selon le critère défini dans le § 1.2.2. Des informations supplémentaires sont délivrées par la fiche technique (*cf* Annexe 1.4.7)

3.2.5. Les adjuvants

Le rôle des adjuvants a déjà été évoqué dans le chapitre 2, dans le paragraphe 2.2.1.3. Toute addition dans le béton est susceptible de faire varier sa résistivité électrique, la présence d'adjuvant a donc été testée. Le choix de l'adjuvant est fait selon l'action souhaitée : Dans notre cas, les bétons testés au chapitre 4 doivent conserver une certaine maniabilité pour faciliter les mesures, ce qui nous a conduits à tester des adjuvants de type superplastifiant. Le Glenium ACE 43 et le Glenium SKY 537 ont donc été sélectionnés ; leurs fiches techniques sont disponibles dans l'Annexe 1.3.

3.2.6. Formulations des mortiers et bétons testés

Le Tableau 3.2 détaille les formulations des matériaux cimentaires utilisés dans ce chapitre.

			Mortier non adjuvanté	Mortier fibré	Mortier adjuvanté GS 537	Béton adjuvanté ACE 43	Béton test malaxeur
E/L			0,5	0,5	0,523	0,214	0,59
Liants	Ciment	CEM I 52,5 N CE CP2	400	400	200	400	416
	Fine	Filler calcaire betocarb P2	-	-	70	89	117
Granulat	Gr1	Silicieux roulé loire 0-5	1600	1600	-	1000	-
	Gr2	Silicieux roulé loire 5-12	-	-	-	880	1050
	Gr3	Calcaire concassé boulonnais 0-4	-	-	1600	-	1000
Fibres	Fib 1	Fibre Arcelor HE 55-35	-	10 à 90	-	-	-
Adjuvant	Adj 1	ACE 43	-	-	-	5,8	-
	Adj 2	Glenium sky 537	-	-	3,7	-	-

Tableau 3.2 : Composition des matériaux cimentaires utilisés pour valider la méthode de mesure sélectionnée

3.3. Validation de la méthode

Le champ de mesure et le principe de mesure sont des données nécessaires pour l'interprétation future des mesures de résistivité dans le malaxeur. C'est donc l'objet de ce paragraphe.

3.3.1. Champ de mesure

Le dispositif présenté précédemment propose une valeur de résistivité moyenne correspondant à un volume donné. D'après le constructeur, le champ de mesure de l'appareil a les dimensions indiquées dans la Figure 3.4.

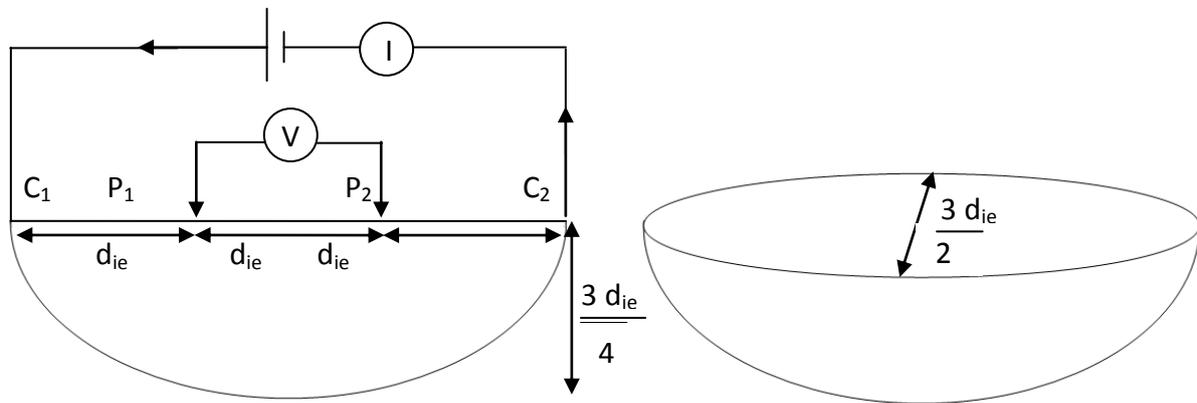


Figure 3.4 : Champ de mesure

Afin de valider ces indications, la largeur et la profondeur d'investigation du dispositif ont été testées, non pas avec du béton, dont l'opacité et les phénomènes liés à sa prise auraient pu gêner les mesures, mais à l'aide d'un gel dont la résistivité électrique est stable dans le temps.

3.3.1.1. Largeur du champ de mesure

La mesure de la largeur du champ consiste à placer, entre deux plaques de bois isolantes, le gel conducteur. Lorsque l'écartement des deux plaques est inférieur au champ de mesure, la résistivité affichée n'est pas celle du gel ($50 \Omega\text{m}$) puisque la résistivité importante des plaques est également prise en compte. En revanche, quand l'éloignement des plaques dépasse la largeur du champ de mesure du dispositif, la résistivité électrique mesurée n'est que celle du gel. La Figure 3.5 illustre l'expérience menée.

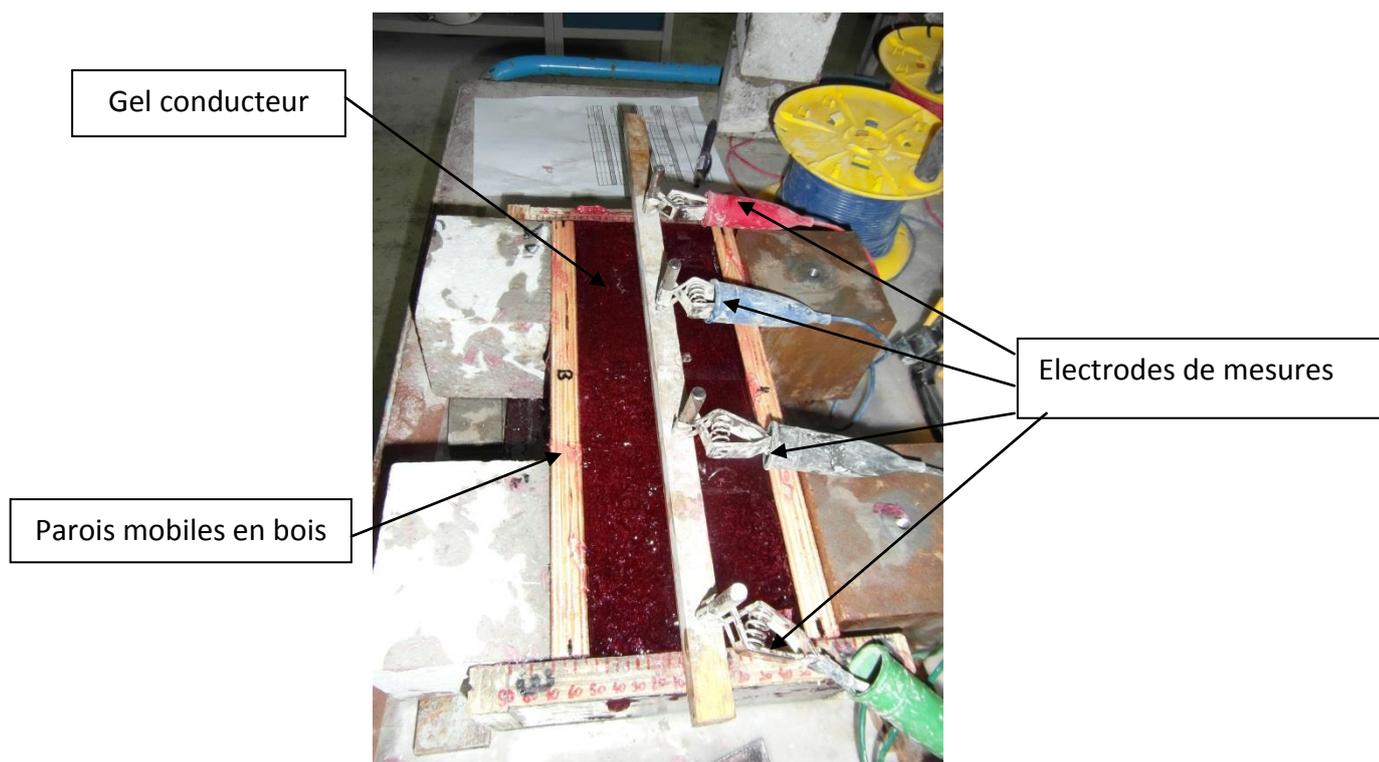


Figure 3.5 : Mesure expérimentale de la largeur du champ d'investigation du dispositif

Le constructeur annonce une largeur de champ de mesure égale à $\frac{3d_{ie}}{2}$, soit dans notre cas, avec une distance inter-électrodes de 10 cm, 15 cm. Les résultats sont reportés dans la Figure 3.6 ; lorsque les plaques sont éloignées de cette distance, la résistivité mesurée est de 53 Ω m, ce qui est légèrement supérieur à la résistivité électrique du gel, symbolisé par la ligne noire. Le champ réel est donc visiblement un peu plus large que prévu, tout en restant dans l'ordre de grandeur annoncé par le constructeur. Dans la suite de cette étude, la largeur du champ retenue sera de 15 cm, pour un espacement entre électrodes de 10 cm.

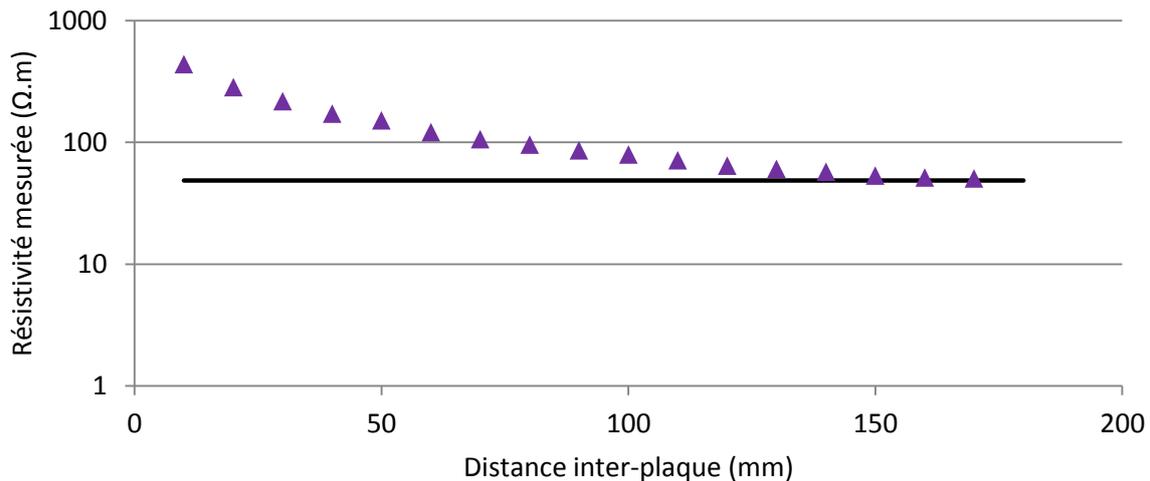


Figure 3.6 : Résultats expérimentaux concernant la largeur du champ de mesure

3.3.1.2. Profondeur du champ de mesure

Le fournisseur du dispositif annonce une profondeur d'investigation égale à $\frac{3d_{ie}}{4}$. Dans ce cas, et avec une distance de 10 cm entre chacune des électrodes, la profondeur d'investigation est de 7,5 cm. Cette valeur a été vérifiée expérimentalement. Pour ce faire, le gel a été placé dans une boîte en plastique transparente dont le fond est percé pour le placement des électrodes. Une barre métallique, conductrice, a ensuite été introduite à différentes profondeurs dans le gel, comme le montrent la Figure 3.7.

La transparence de la boîte et le caractère translucide du gel permettent de contrôler la distance électrode-barre métallique de manière précise. Evidemment, le réglet métallique utilisé à cette fin ne reste pas dans la boîte pendant la mesure. Ce dispositif a également servi à comprendre le principe de la mesure de cet appareil (§ 3.3.1.3), notamment en insérant trois barres métalliques (visibles sur le cliché de la Figure 3.7). Dans ce paragraphe, la profondeur du champ de mesure sera estimée avec la présence d'une seule barre métallique dans le mélange.

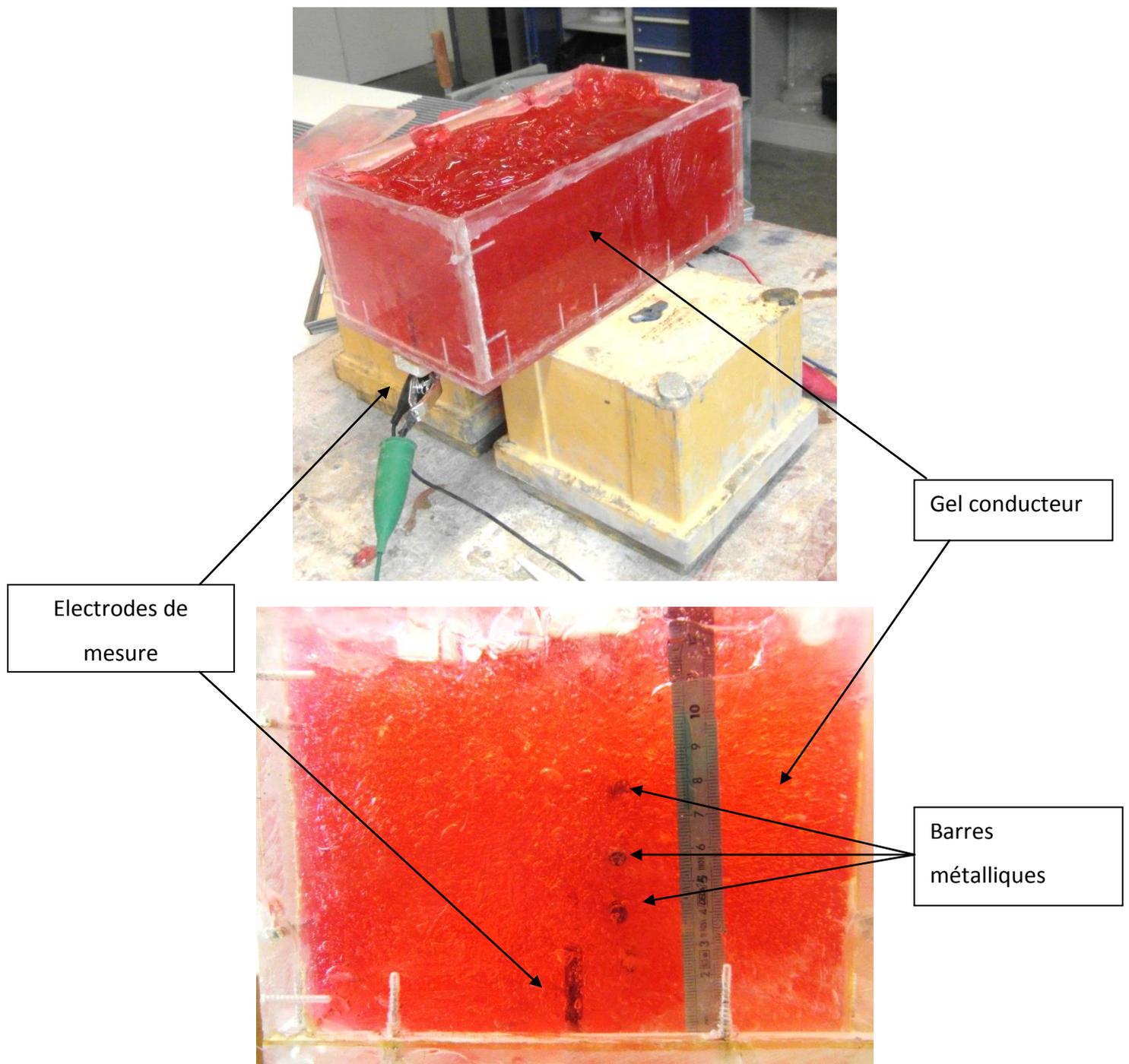


Figure 3.7 : Mesure expérimentale de la profondeur du champ d'investigation

Les résultats sont reportés sur le graphique de la Figure 3.8.

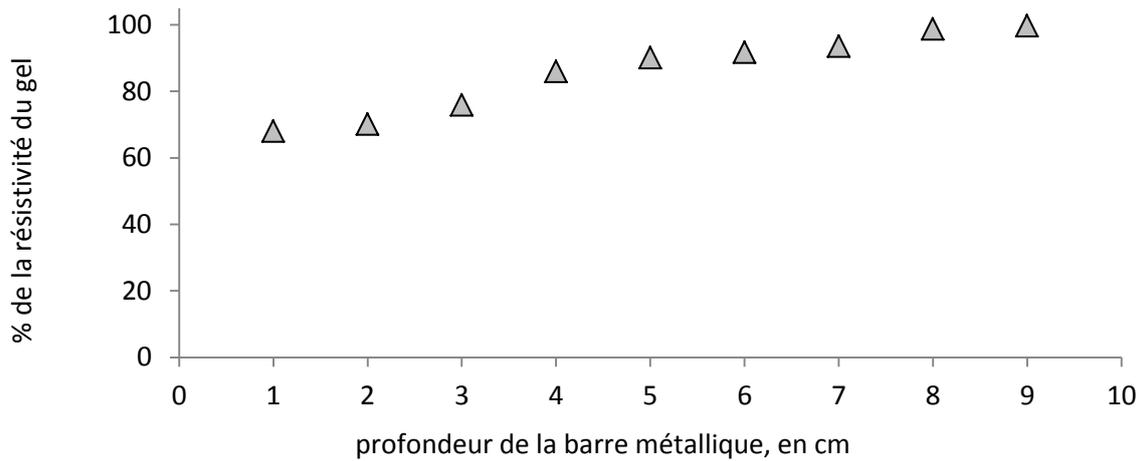


Figure 3.8 : Résultats expérimentaux concernant la profondeur du champ de mesure

La résistivité mesurée se rapproche de celle du gel seul à partir d'une profondeur de 8 cm environ, ce qui confirme une nouvelle fois la donnée du constructeur. Le graphique de la Figure 3.8 permet de voir que la résistivité de l'ensemble diminue avec la présence d'un élément conducteur mais également que la profondeur à laquelle est le matériau influence la réponse électrique de l'ensemble.

[TELFORD'90] explique ce phénomène en indiquant que la densité de courant diminue avec la profondeur selon la relation (3.13) suivante :

$$\frac{J_z}{J_{z=0}} = \frac{(3d_{ie})^3}{8 \left(z^2 + \left(\frac{3d_{ie}}{2} \right)^2 \right)^{3/2}} \quad (3.13)$$

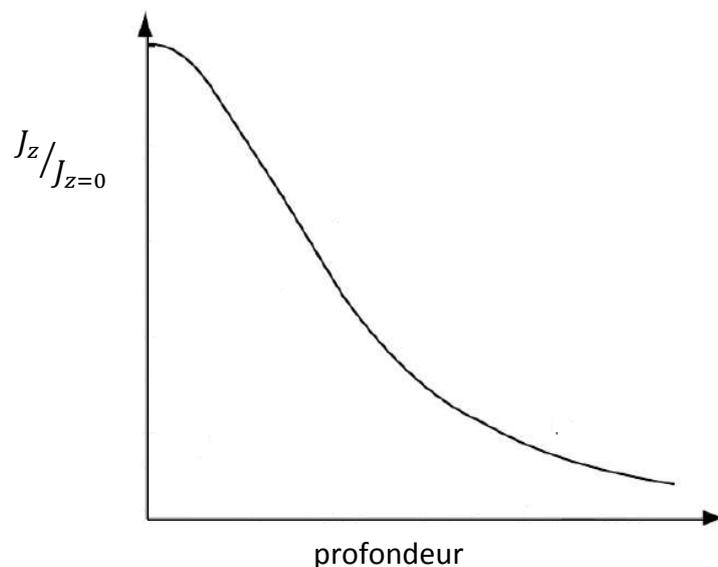


Figure 3.9 : Evolution de la densité de courant en fonction de la profondeur [TELFORD'90]

Le courant I est lié à la densité de courant J par la relation (3.14), avec S la surface, en m^2 parcourue par la densité de courant J en $A.m^{-2}$.

$$I = J S \quad (3.14)$$

Il y a donc une proportionnalité entre les grandeurs I et J et il est possible d'écrire l'équivalence (3.15):

$$\frac{J_z}{J_{z=0}} \sim \frac{I_z}{I_{z=0}} \quad (3.15)$$

La résistivité s'écrivant selon la relation (3.12), rappelée ci-dessous, le ratio $\rho_{z=0}/\rho_z$ évolue normalement de la même façon que le ratio $J_z/J_{z=0}$.

$$\rho_z = 2 \pi d_{ie} \frac{\Delta V}{I_z}, \quad (3.12)$$

Figure 3.10 Figure 3.10 présente l'évolution de $\rho_{z=0}/\rho_z$ et une comparaison avec l'allure de la courbe de la Figure 3.9 confirme que la diminution de la densité de courant avec la profondeur est à l'origine des différentes valeurs de résistivité relevées en présence d'un même élément conducteur, mais situé à des distances différentes des électrodes.

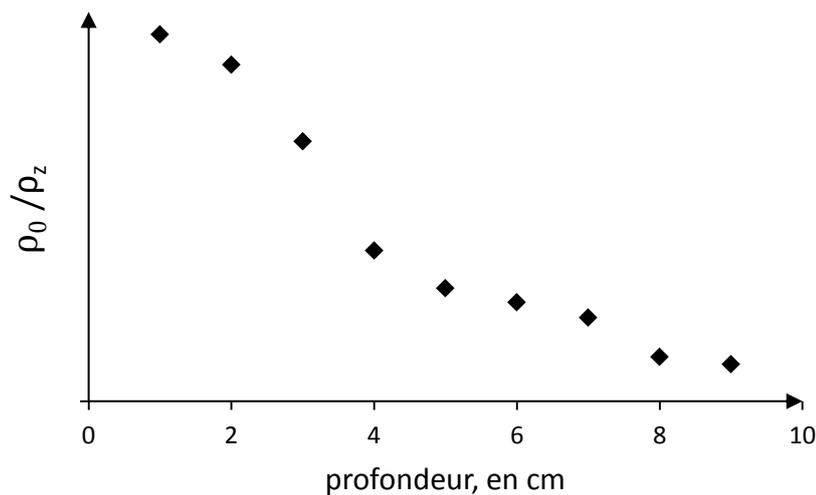


Figure 3.10 : Evolution du ratio $\rho_{z=0}/\rho_z$ en fonction de la profondeur

L'ajout d'un élément conducteur dans un matériau conduit à une diminution de la résistivité de l'ensemble. Cette diminution est d'autant plus perceptible lors des mesures que la barre métallique conductrice est près des électrodes de mesure.

L'utilisation prévue de cet appareil de mesure est le sondage de sol afin de connaître la nature des constituants sur une certaine profondeur. Ces profondeurs sont évidemment importantes et la diminution de la densité de courant est donc un phénomène à considérer. La résistivité mesurée est alors appelée résistivité apparente car elle ne correspond pas exactement à la résistivité du matériau. Les algorithmes de tomographie électrique sont capables de convertir les résistivités apparentes en résistivités et ainsi de reconstituer les différentes strates d'un sol à partir des données électriques.

3.3.1.3. Chemin préférentiel

Dans un matériau électriquement homogène, le courant se propage en suivant des lignes de courant. La présence d'un élément conducteur crée un chemin préférentiel. Il est alors envisageable que, si un élément conducteur est proche des électrodes, l'intégralité du volume défini plus haut ne soit pas pris en considération. Pour répondre à cette question, plusieurs barres métalliques ont été introduites à différentes profondeurs dans le gel, selon le même principe que dans le cas de la mesure de profondeur de champ (§ 3.3.1.2). La première barre B_1 a été ajoutée : son influence sur la résistivité a été mesurée selon sa profondeur, de 7 à 1 cm. Puis, alors que B_1 restait à 1cm de profondeur, B_2 a été introduite et le même protocole a été répété pour les quatre barres métalliques.

Les résultats apparaissent sur la Figure 3.11. Ils témoignent que le courant choisit un chemin préférentiel puisque l'ajout des barres a de moins en moins d'effet sur la résistivité de l'ensemble.

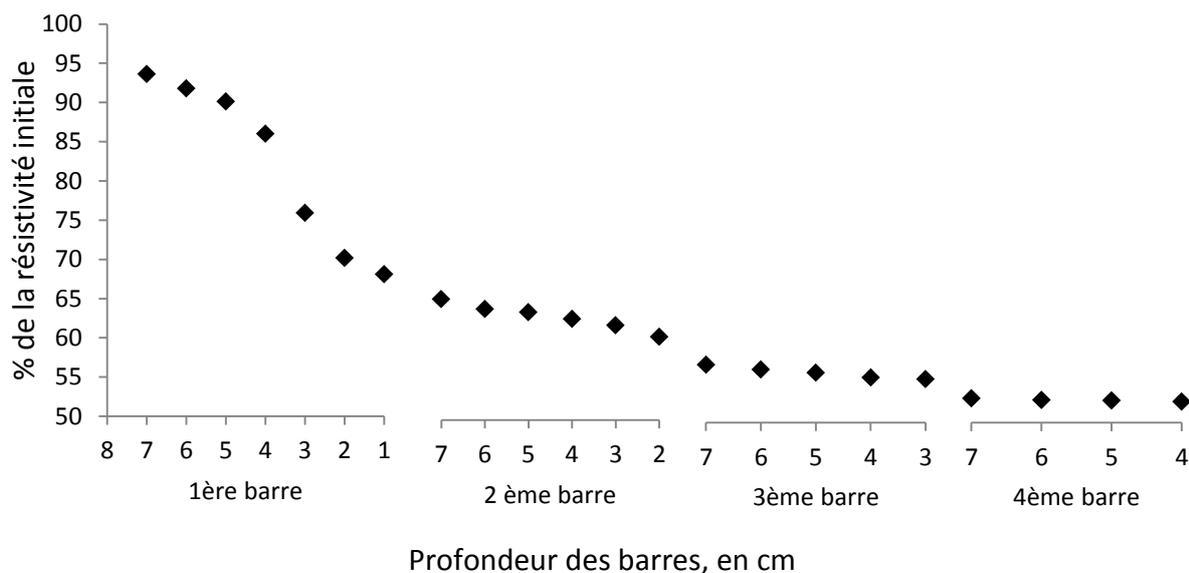


Figure 3.11 : Evolution de la résistivité avec l'ajout de barres métalliques

Ce chemin préférentiel, engendré par la position de la première barre métallique au plus près des électrodes, n'empêche pas de détecter la présence des autres éléments conducteurs puisque la résistivité de l'ensemble continue de décroître avec l'ajout d'élément conducteur.

Les valeurs indiquées dans le Tableau 3.3 montrent l'influence de l'ajout de chaque barre sur la résistivité de l'ensemble. Il apparaît que, lorsque les barres sont à une profondeur de 7 cm, leur impact sur la résistivité est similaire, malgré la présence d'autres barres métallique, plus proches des électrodes. Ce résultat confirme que l'appareil permet de sonder sur toute la profondeur de champ annoncée.

En revanche, lorsque B_2 , B_3 et B_4 se rapprochent de B_1 , leur influence diminue, témoignant de la formation d'un chemin préférentiel lorsque les barres se rapprochent les unes des autres.

Profondeur, en cm	Ajout B ₁	Ajout B ₂	Ajout B ₃	Ajout B ₄	Ecart- Type
	% résistivité gel	% résistivité gel + B ₁	% résistivité gel + B ₁ +B ₂	% résistivité gel + B ₁ +B ₂ +B ₃	
7	93,6	95,8	94,9	95,6	0,97
6	91,8	94,0	93,9	95,2	1,42
5	90,1	93,4	93,2	95,1	2,06
4	86,0	92,1	92,2	94,8	3,73
3	76,0	90,9	91,8	-	8,94
2	70,2	88,8	-	-	13,19
1	68,1	-	-	-	-

Tableau 3.3 : Influence des barres métalliques sur la résistivité

Décelé dans le cadre d'une différence de résistivité très importante (50 Ω .m pour le gel et 0,0015 Ω .m pour les barres métalliques), la présence d'un chemin préférentiel n'est pas systématique dans le cas des sols dont les composants présentent globalement des résistivités électriques plus proches (Figure 3.12). De plus la structure en strate de la couche terrestre exclut la présence d'un élément aux propriétés électriques très différentes au sein de l'une d'elle.

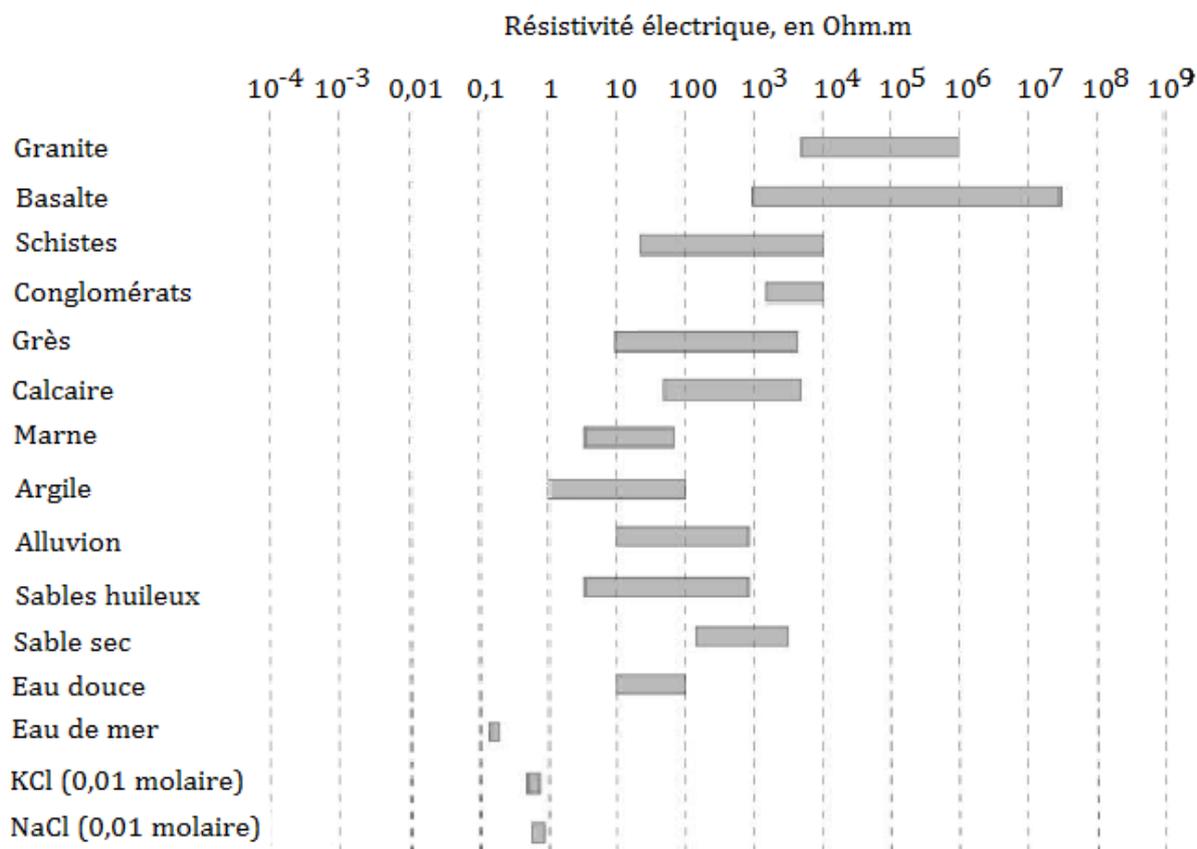


Figure 3.12 : Gamme de résistivité électrique des matériaux géologiques [LEKMINE'11]

La possibilité d'un chemin préférentiel occultant la présence de fibres situées plus en profondeur est mince, les fibres ne formant normalement pas une ligne continue dans le matériau. L'orientation des fibres peut affecter la mesure de résistivité électrique mais il est peu probable que toutes les fibres soient orientées de la même façon dans un béton pendant le malaxage. L'existence d'un chemin préférentiel n'est donc pas un obstacle à l'utilisation de cette méthode de mesure dans le cas des bétons fibrés.

3.3.2. Conclusion sur le dispositif de mesure

Les paragraphes précédents ont permis de comprendre et d'illustrer le principe de la mesure réalisée par le dispositif choisi.

La largeur du champ de mesure correspond à la donnée annoncée par le constructeur ce qui donne, pour un espacement inter-électrodes de 10 cm, une largeur de 15 cm.

La profondeur du champ de mesure est elle aussi conforme à la valeur annoncée, de 7,5 cm pour la distance entre électrodes choisie. La diminution de la densité de courant avec la profondeur explique les variations de la résistivité mesurée avec la localisation de l'élément conducteur. Dans un milieu électriquement homogène, ce phénomène ne modifie pas la résistivité mesurée donc si les fibres sont réparties convenablement dans le matériau, ce phénomène ne modifie pas les résultats.

Cette méthode de mesure correspond au cahier des charges et peut donc être adaptée à la mesure de résistivité électrique dans le cas des bétons fibrés.

Le paragraphe suivant présente les points relatifs à une utilisation dans le béton de cette méthode.

3.4. Adaptation au cas des bétons fibrés

La méthode explicitée dans le paragraphe précédent ne peut être transposée directement dans le cas de notre étude. Des essais préliminaires ont donc lieu et sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.4.1. Influence de la conductivité électrolytique

Le dispositif de mesure utilisé est basé sur la modification des propriétés électriques du matériau du fait de l'ajout de fibres. Celle-ci peut avoir deux origines : la conductivité électrique ou la conductivité électrolytique. La conductivité électrolytique est causée par le déplacement des ions dans le béton ; les teneurs en ion dans la solution interstitielle évoluent en fonction du degré d'hydratation, et donc du temps. Il est donc nécessaire de vérifier l'évolution de la conductivité électrolytique pendant les plages de temps nécessaires pour les essais.

La Figure 3.13 présente l'évolution de la résistivité de différents matériaux cimentaires non fibrés, adjuvantés ou pas, pendant l'heure suivant la fin du malaxage. La formulation de ces mortiers et bétons est indiquée dans le Tableau 3.2. La mesure de résistivité électrique n'a pas lieu dans le malaxeur puisque l'objectif de ces tests est de connaître l'évolution de cette propriété au cours du temps, indépendamment de l'ajout de fibres conductrices. Le temps de transfert du béton entre le malaxeur et le lieu de la mesure est de moins de 5 minutes.

La résistivité électrique du mortier non adjuvanté évolue assez peu. Après une heure, sa résistivité a baissé de moins de 8 % tout comme celle du béton contenant l'adjuvant Glenium ACE 43. En revanche, le Glenium Sky 537 (noté GS 537) provoque une diminution plus rapide de la résistivité

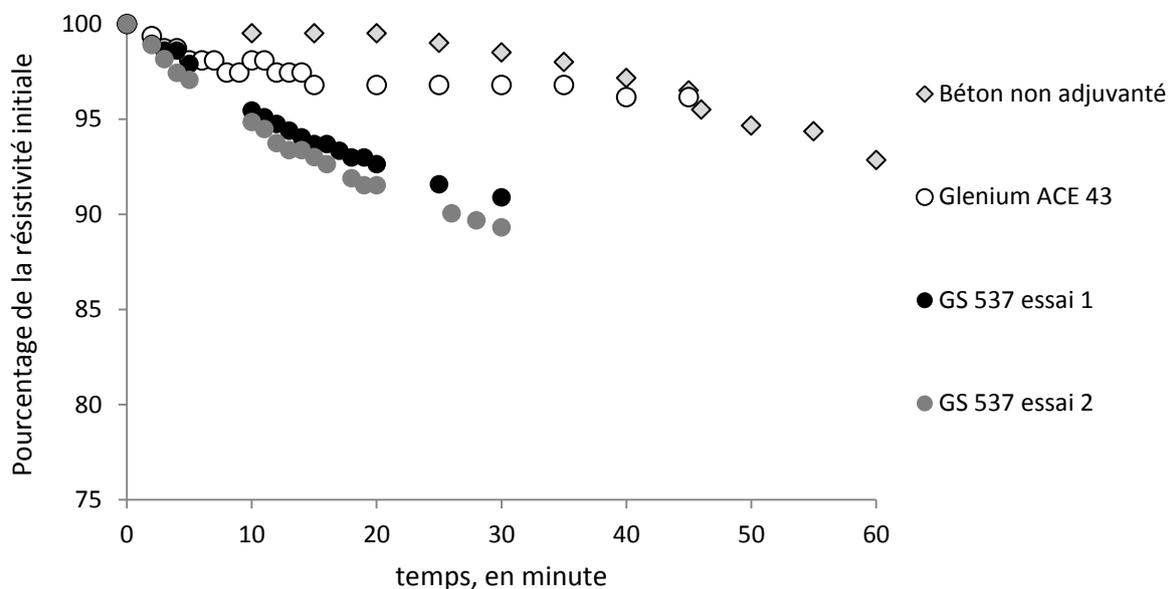


Figure 3.13 : Evolution de la résistivité d'un béton non fibré au cours du temps

La conductivité électrolytique est causée par le déplacement des ions dans le béton. La quantité d'ions disponibles dans le matériau à un temps t peut varier en présence d'un adjuvant, susceptible de modifier la vitesse de dissolution des constituants du clinker dans l'eau. Les deux adjuvants testés appartiennent tous deux à la famille des superplastifiants hauts réducteurs d'eau (comportement expliqué dans le § 2.2.1.3.), ils agissent cependant différemment puisque le mortier contenant du Glenium Sky 537 voit sa résistivité électrique baisser rapidement alors que le béton contenant l'adjuvant Glenium ACE 43 présente une résistivité électrique stable pendant 50 minutes et relativement proche de sa résistivité initiale. L'explication réside peut-être dans l'Extrait 3.2 qui précise une première action immédiate de l'adjuvant.

Dès l'incorporation du GLENIUM[®] dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive

Extrait 3.2: Indication donnée dans la fiche technique du Glenium Sky 537, Fiche technique complète en Annexe 1.3.2

L'adjuvant Glenium Sky 537 sera utilisé dans les bétons testés ultérieurement. L'évolution de la conductivité électrolytique sera prise en compte lors de l'analyse des mesures réalisées dans le béton fibré.

3.4.2. Résistivité électrique et degré d'hydratation

Le paragraphe précédent témoigne de la présence de la conductivité électrolytique dans les bétons. La propagation du courant électrique dans les matériaux est assurée par la présence d'ions dans la solution interstitielle et l'évolution de leur quantité est liée à l'hydratation du ciment, détaillée dans § 1.2.1.3. Le degré d'hydratation du béton peut par conséquent être suivi grâce aux mesures de résistivité électrique ([POWERS'48] [HANSSON'83], [McCARTER'84]). Celle-ci commence par diminuer pendant une durée de 1 à 3 heures et augmente ensuite, à partir du début de la prise ([TAMAS'82]). Les additions potentiellement contenues dans le ciment, ou rajoutées dans la matrice cimentaire modifie l'évolution de l'hydratation, et donc de la résistivité électrique, avec le temps. La Figure 3.14 présente l'évolution avec le temps des conductivités électriques de différentes pâtes de ciment contenant diverses quantités (0 à 30 % de la masse du ciment CEM I utilisé) de cendres volantes, de fumées de silice et de laitiers de haut fourneau. Le rapport eau/liant dans ces cas est de 0,4.

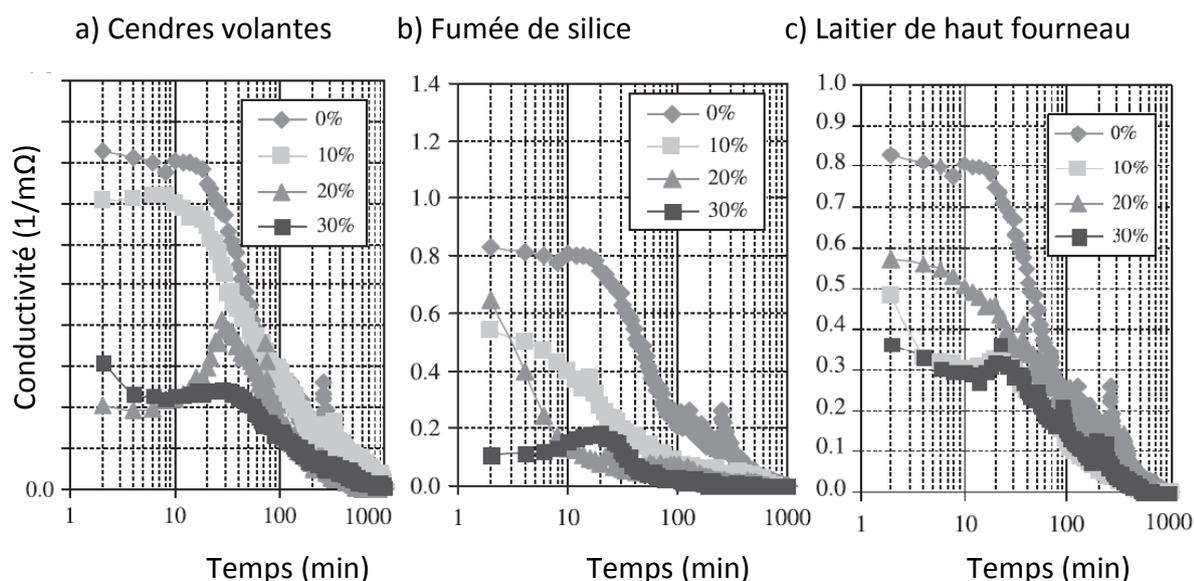


Figure 3.14: Evolution de la conductivité de pâtes de ciment contenant différents quantités d'additions [TOPÇU'12]

Deux observations peuvent être faites sur la Figure 3.14 : D'une part, l'ajout d'une addition modifie la conductivité électrolytique d'une pâte de ciment et d'autre part, il influence sans doute le processus d'hydratation puisque certaines courbes suivent des variations très différentes. Par exemple, entre 2 et 10 minutes, la courbe représentant la pâte de ciment contenant 20 % de fumée de silice décroît alors que celle correspondant à un ajout de 30 % augmente. Le choix dans cette étude d'utiliser un ciment CEM I, composé presque exclusivement de clinker, permet normalement de s'affranchir des variations de résistivité électrique liées aux additions.

Pour vérifier ce point, la résistivité électrique du mortier non-adjuvanté a été testée sur une durée plus longue que dans le cas de la Figure 3.13. La Figure 3.15 représente l'évolution de la résistivité du mortier non adjuvanté. La courbe débute, comme annoncé, par une diminution suivie ensuite d'une croissance de la résistivité électrique liée au début de la prise. Le point d'inflexion de la courbe se situe au niveau du temps de prise annoncé par le fabricant de ciment (170 minutes).

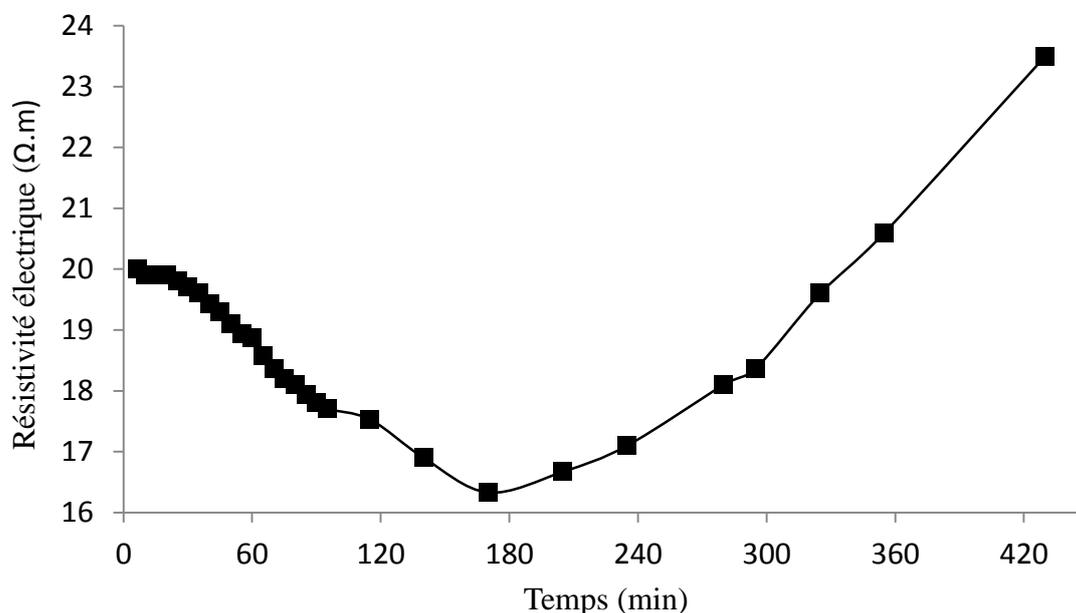


Figure 3.15 : Evolution de la résistivité électrique d'un béton non adjuvanté au cours du temps

La courbe présente un pallier pendant la première demie heure. Il est possible que cette plage de temps corresponde à la période dormante de l'hydratation. Rien dans la littérature ne nous a permis de confirmer, ou d'infirmer, cette hypothèse puisque la plupart des auteurs utilisent la conductivité électrique pour suivre l'hydratation et que celle-ci s'étend

sur plusieurs jours. Les graphiques présentés sont donc souvent gradués en heure, ou en jours, et les valeurs mesurées après quelques minutes ne sont pas accessibles.

L'évolution de la conductivité électrolytique d'un béton contenant du superplastifiant Glenium Sky 537 a été déterminée dans le paragraphe 3.4.1. Elle sera prise en compte afin de ne pas attribuer cette diminution de résistivité électrique à la présence des fibres métalliques conductrices. La relation entre résistivité électrique et présence en fibres doit à présent être établie, c'est l'objet du prochain paragraphe.

3.4.3. Lien entre résistivité électrique et teneur en fibres

3.4.3.1. Relation théorique

L'appareil choisi est conçu initialement pour connaître les constituants des sols sur une profondeur donnée. Pour ce faire, plusieurs électrodes sont utilisées et sollicitées selon différentes configurations, comme présenté dans la Figure 3.16.

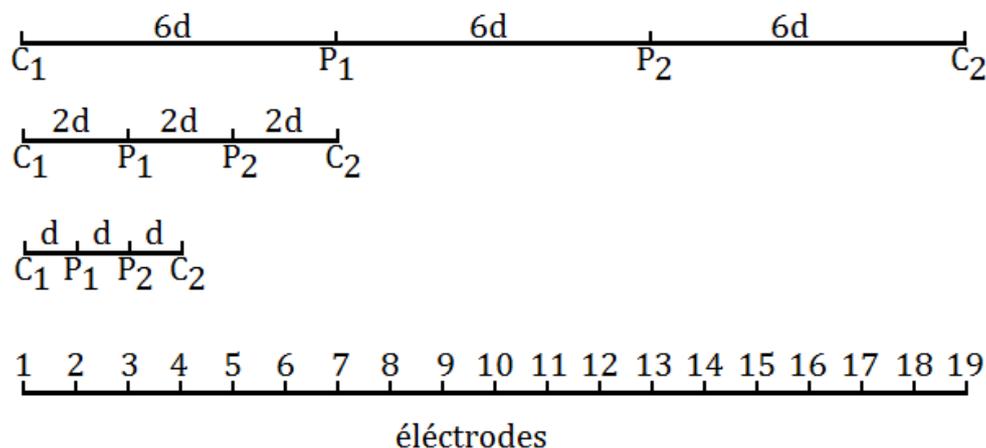


Figure 3.16 : Dispositif de Wenner à 20 électrodes [LOKE'04]

La variation de la distance inter électrodes, de d_{ie} à $6 d_{ie}$, permet d'acquérir un nombre important de mesures de résistivités apparentes. Les logiciels sont ensuite capables de reconstituer les emplacements correspondants à différentes résistivités et donc différents matériaux (Figure 3.17).

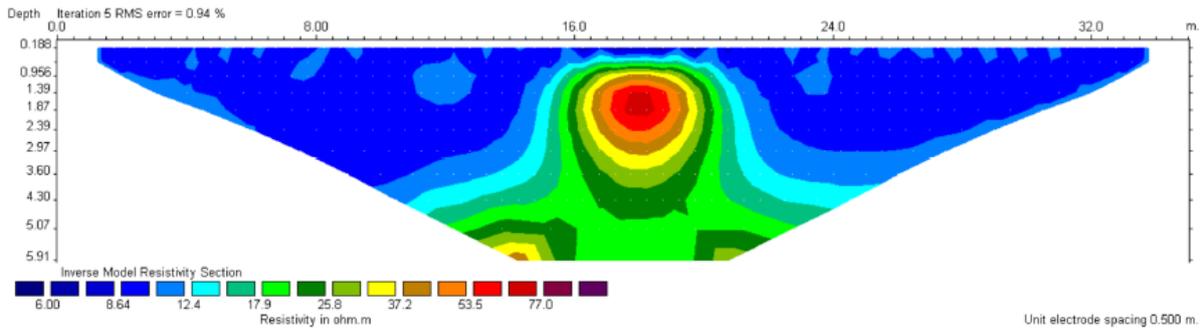


Figure 3.17 : Reconstitution d'un sol à partir de données électriques, [BOUBAKI'13]

Ce processus de mesure n'est pas applicable dans le cas des bétons frais, car les dimensions du malaxeur laissent peu de possibilité en termes de nombres d'électrodes et de distance entre elles. De plus, les fibres ne formant normalement pas de couches homogènes, déduire leur emplacement exact dans le volume testé n'est pas possible avec les logiciels utilisés habituellement en géophysique.

Dans notre cas, les constituants du matériau testé sont connus, ainsi que les fractions volumiques attendues de chacun. Il est donc envisageable de déterminer la résistivité d'un béton fibré, connaissant la résistivité électrique du béton frais, des fibres et le dosage de celles-ci.

En géophysique, il est possible de prédire la résistivité d'un milieu stratifié (Figure 3.18) à partir des résistivités électriques de chacun de ses composants à l'aide de la relation (3.16):

$$\rho_T = \rho_1 \phi_1 + \rho_2 (1 - \phi_1) \tag{3.16}$$

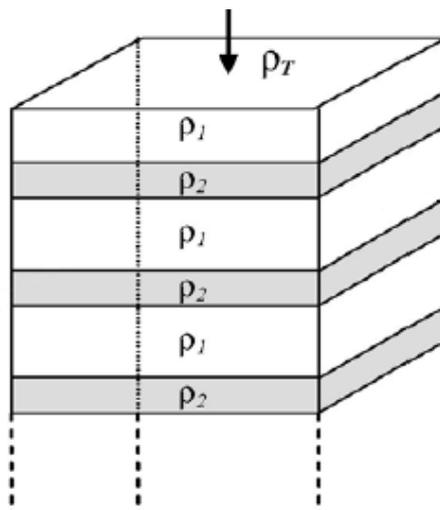


Figure 3.18 : Milieu stratifié [REY'05]

Dans le cas des bétons fibrés, non-organisés en strate, une telle loi ne peut être utilisée, ni pour la résistivité électrique, ni pour d'autres propriétés des bétons.

En effet, à l'état frais, le béton peut être considéré comme des grains en suspension dans une solution. Selon la fraction volumique d'inclusions, les interactions dans le mélange se font entre le grain et la suspension (milieu semi-dilué) ou bien entre deux grains, à partir du seuil de percolation [MARTINIE'10].

Dans le cas d'inclusions non sphériques comme le sont les fibres, le facteur d'aspect r doit être pris en compte dans la notion de fraction de percolation, comme ceci a déjà été détaillé dans le § 1.2.3.1.

Voyons à présent quelle est la relation entre la résistivité mesurée ρ_{bf} et la teneur en fibres Φ_f .

La résistivité électrique dépend de la fraction volumique de fibres, conformément à (3.17) :

$$\rho_{bf} = f(\Phi_f) \quad (3.17)$$

Il est envisageable que la résistivité varie linéairement avec la fraction volumique de fibre :

$$\rho_{bf} = A_f \Phi_f + B_b \quad (3.18)$$

A_f est un terme lié à la présence de fibres dans le béton et B_b est lié à la résistivité électrique du béton non fibré. Quand il n'y a pas de fibres, la résistivité ρ_{bf} est celle du béton :

$$\rho_{bf} = B_b = \rho_b \quad (3.19)$$

Quand la fraction volumique de fibre permet la création d'un réseau continu de fibres, c'est-à-dire lorsque la percolation est donc atteinte, la résistivité est celle des fibres :

$$\rho_{bf} = A_f \Phi_{f \max} + \rho_b = \rho_f \quad (3.20)$$

Le coefficient A_f peut donc être déduit de (3.20)

$$A_f = \frac{\rho_f - \rho_b}{\Phi_{f \max}} \quad (3.21)$$

Dans le § 1.2.3.1, il a été défini que la fraction de percolation s'exprimait selon (1.26). La résistivité d'un béton fibré peut donc s'écrire :

$$\phi_{f \max} = \frac{1}{r} \quad (1.26)$$

En combinant les expressions (3.20), (3.21) et (1.26), la fonction (3.22) est obtenue

$$\begin{aligned} \rho_{bf} &= r(\rho_f - \rho_b) \phi_f + \rho_b \\ \rho_{bf} &= r\rho_f \phi_f + \rho_b(1 - r\phi_f) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Cette relation est confrontée à des mesures expérimentales préliminaires. Ces essais sont décrits dans le prochain paragraphe.

3.4.3.2. Validation avec des fibres métalliques

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres Arcelor HE 55/35, métalliques à crochet (Annexe 1.4.7). Dans le cadre de cet essai de validation de la formule énoncée précédemment, les fibres sont introduites dans un mortier dont la composition est indiquée dans le Tableau 3.2. Après malaxage, le mortier est transféré dans une caisse en plastique où les fibres sont progressivement ajoutées. Le malaxage du matériau entre deux additions de fibres se fait manuellement.

La fraction volumique de fibres varie de 0,127 % à 1,14 %. Les valeurs suivantes sont utilisées :

- Pour le facteur d'aspect : $r = \frac{l}{d} = 64$
- Pour la résistivité des fibres : $\rho_f = 10^{-7} \Omega.m$ Cette valeur est celle du fer et correspond à l'ordre de grandeur des éléments constitutifs de l'acier.

Les ordres de grandeur des valeurs r , ϕ_f et ρ_f permettent de considérer que le premier terme de l'expression (3.22) est négligeable, la résistivité électrique s'exprime alors selon (3.23), avec ρ_b la résistivité du béton sans fibres.

$$\rho_{bf} = r \phi_f \rho_f + (1 - r \phi_f) \rho_b \quad (3.22)$$

$$\rho_{bf} = \rho_b (1 - r \phi_f) \quad (3.23)$$

L'évolution de la résistivité avec l'ajout de fibres apparaît dans la Figure 3.19. Les incertitudes ont été calculées sur chaque point. 97 % des valeurs sont comprises dans l'intervalle défini par $\bar{\rho} \pm \frac{3 EC}{\sqrt{n_e}}$, où $\bar{\rho}$ est la moyenne des résistivités mesurées, EC l'écart-type de ces valeurs et n_e le nombre de mesures réalisées (cf expression (2.1) dans le paragraphe 2.3.1)

Dans le cas de la Figure 3.19, la très bonne répétabilité des mesures explique les incertitudes très faibles (visibles principalement pour le point correspondant à un dosage de 0 kg/m³).

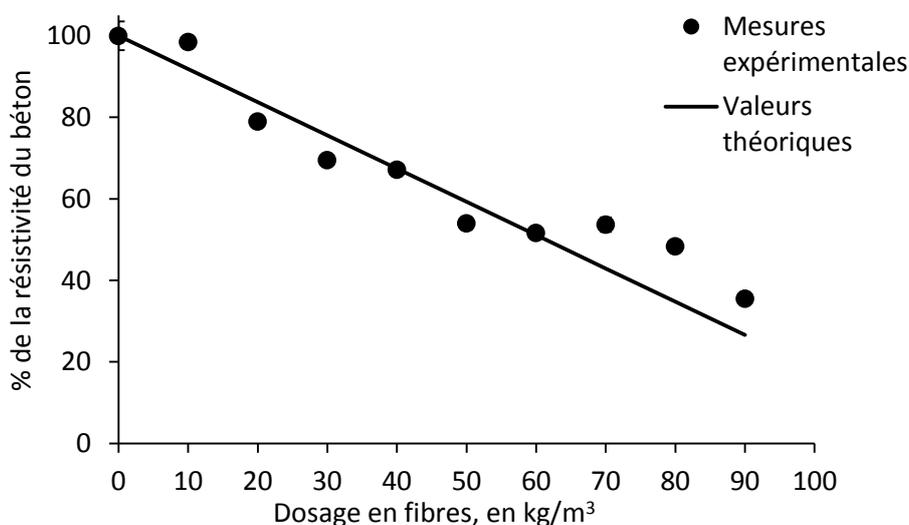


Figure 3.19 : Evolution de la résistivité électrique avec l'ajout de fibres conductrices

La résistivité électrique diminue avec l'ajout de fibres conductrices dans la matrice cimentaire. Les mesures expérimentales suivent la relation théorique proposée. Les écarts entre les deux courbes peuvent s'expliquer par le malaxage manuel du mortier, difficile dans le volume restreint de la mesure (caisse en plastique d'une contenance de 10 litres).

L'essai décrit montre une bonne corrélation entre la relation théorique et les mesures expérimentales mais l'unicité de l'essai ne peut suffire pour une validation complète.

La Figure 3.20 a été établie à l'aide des résultats de la campagne expérimentale, qui seront présentés dans le Chapitre 4. Pour chaque dosage, les résultats proviennent de gâchées différentes, en terme de formulation, de durée ou de vitesse.

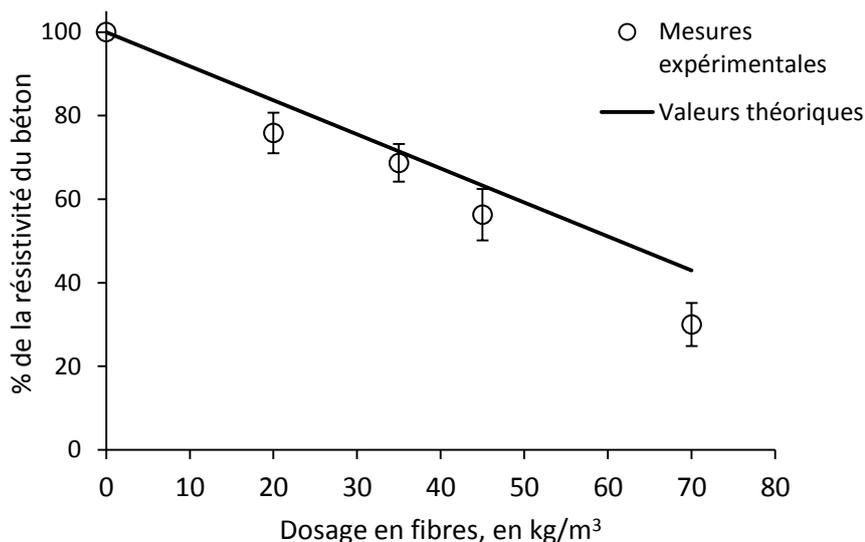


Figure 3.20 : confrontation des résultats théoriques et expérimentaux

La Figure 3.20 montre les résultats théoriques et expérimentaux. La corrélation entre les deux courbes est bonne et permet de valider, au moins pour des fibres métalliques ayant ce facteur d'aspect, la relation permettant de déterminer la résistivité correspondant à une dispersion homogène de fibres.

La Figure 3.21 superpose les résultats de l'essai préliminaire (en noir) et ceux issus de la campagne expérimentale. L'incertitude la plus grande, obtenue sur des gâchées contenant 45 kg/m³ de fibres, est reportées sur l'ensemble des points.

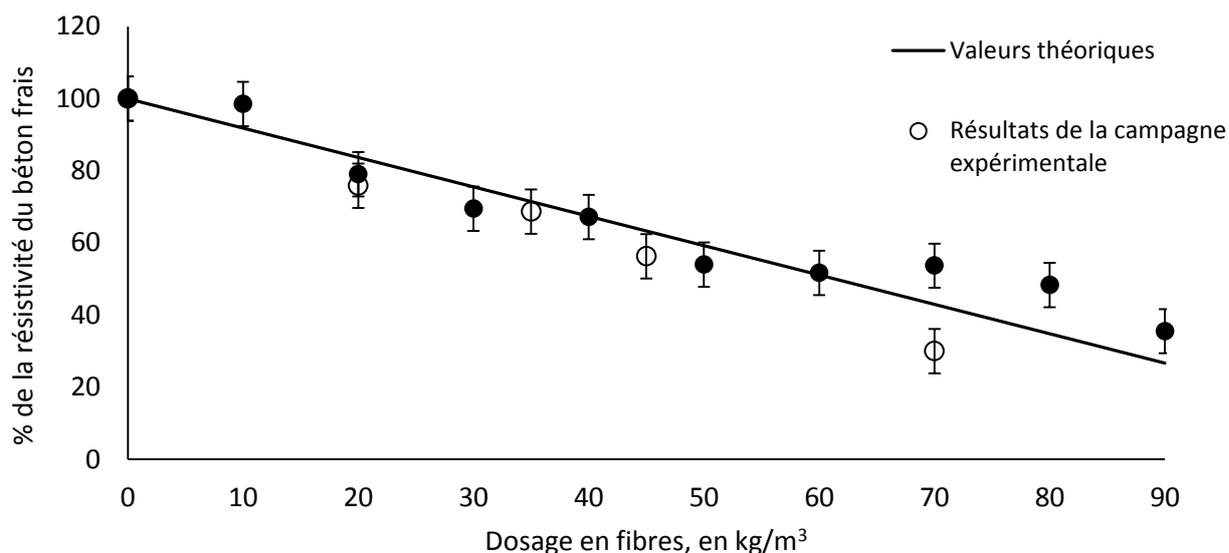


Figure 3.21 : Résistivité électrique en fonction du dosage en fibre

La relation théorique fonctionne indépendamment des conditions de la mesure, conditions pouvant être très différentes. Il apparaît également que l'orientation des fibres, ou leur répartition sur la hauteur du volume testé, ne constituent pas un obstacle à l'utilisation de ce dispositif de mesure pour connaître la teneur en fibre d'un béton.

Dans le cas d'un béton fibré avec les fibres étudiées ici, la Figure 3.21 permet de connaître la teneur en fibre relative à une mesure électrique et donc de vérifier, pendant le malaxage, si la dispersion des fibres est homogène.

Les premiers essais dans le malaxeur ont cependant révélé des valeurs de résistivité très différentes selon l'emplacement de la mesure, avant même l'introduction des fibres. Il en a été déduit que les organes métalliques de l'appareil étaient pris en compte dans la mesure. Devant ce constat, la création d'un dispositif permettant d'isoler les mesures a été envisagée. Le développement de celui-ci est l'objet du paragraphe 3.4.4 .

3.4.3.3. Validation sur des fibres polymériques

L'étude s'est concentrée sur les fibres métalliques mais des fibres polymériques de PolyVynilAlcool ont également été testées afin de vérifier si le dispositif de mesure pouvait être employé sur des bétons de fibres polymériques. Les résultats apparaissent dans la Figure 3.22. La résistivité électrique augmente linéairement avec le dosage en fibres. La résistivité électrique des fibres de PVA n'étant pas une donnée en notre possession, nous ne pouvons pas confronter ces résultats expérimentaux à des valeurs théoriques. En revanche, la régression linéaire permet d'estimer la valeur de la résistivité électrique des fibres de PVA à une centaine de $\Omega.m$, ce qui n'est pas un ordre de grandeur correspondant à un matériau très isolant mais qui peut correspondre à un matériau non conducteur en milieu humide telles que le sont les fibres employées.

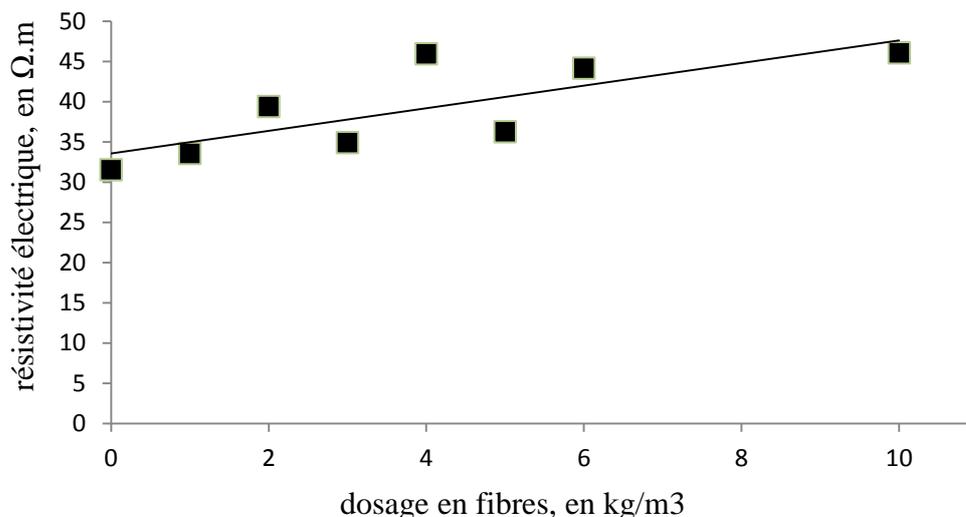


Figure 3.22 : Evolution de la résistivité électrique d'un béton fibré avec des fibres de PVA

L'application de la méthode de mesure retenue sur les fibres polymériques n'a pas été davantage étudiée ; les résultats présentés dans la Figure 3.22 vont cependant dans le sens d'une possibilité d'utilisation de ce moyen de mesure dans le cas des bétons de fibres polymériques.

3.4.4. Création d'une boîte de mesure

Une étude précise du matériel et de son principe de mesure a été réalisée et a permis de vérifier le champ d'investigation du matériel, qui correspond donc bien à l'annonce faite par le constructeur.

La méthode Wenner (Figure 3.4) est valable pour une distance inter-électrodes fixe. Dans cette étude, cette distance sera fixée à 10 cm pour des raisons pratiques. En effet, cette longueur correspond à un compromis entre un volume testé représentatif de la gâchée et un encombrement moindre permettant des mesures dans différentes zones du malaxeur.

Le dispositif d'isolation des mesures se doit de respecter le champ de mesure de l'appareil, dans la configuration sélectionnée, c'est-à-dire avec une distance inter électrodes de 10 cm.

La première version de cette boîte de mesure, baptisée Rhobox, est présentée sur la Figure 3.23 (polyméthacrylate de méthyle) assemblées entre elles par des vis en polyamide. Ses dimensions permettent d'englober l'intégralité du champ de prospection et donc de ne pas

prendre en compte les fibres potentiellement orientées par l'introduction de la boîte au niveau des parois. Les quatre électrodes permettent la mesure de la résistivité.

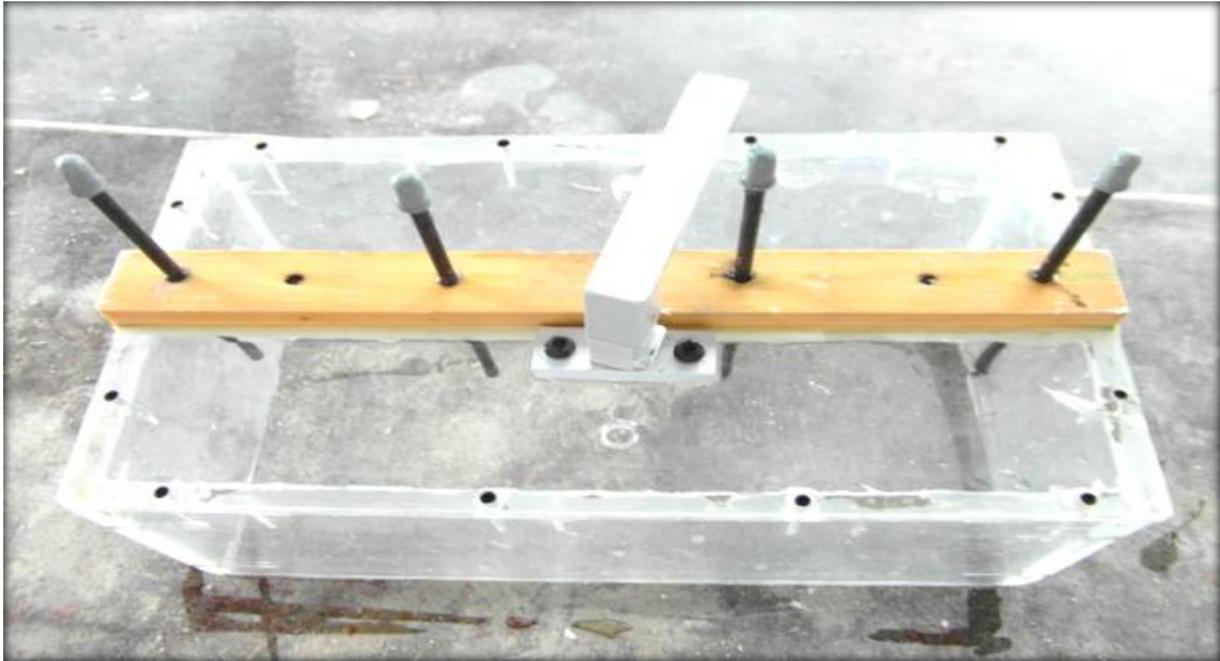


Figure 3.23 : Rhobox 1^o version

La Rhobox a évolué au fil de son utilisation : des trous ont été percés en surface pour permettre à l'air emprisonné sous la boîte de s'évacuer, facilitant ainsi une meilleure pénétration de la boîte dans le béton ; les bords inférieurs ont été biseautés dans ce même but.

La Figure 3.24 représente la dernière version de la Rhobox, équipée de deux poignées permettant une manipulation plus facile.

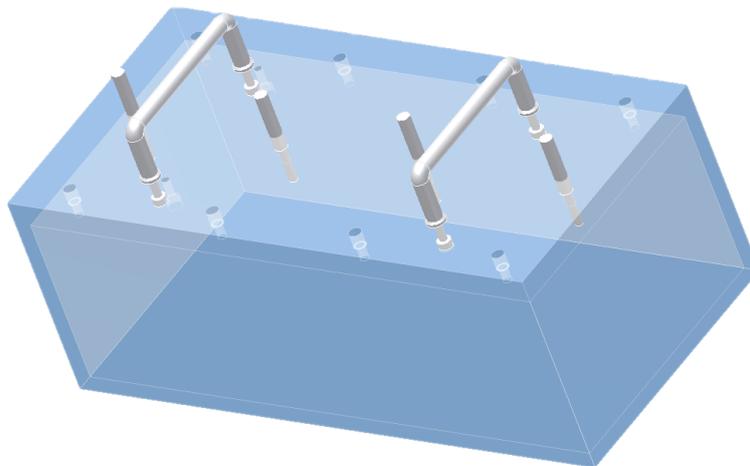


Figure 3.24 : Evolution de la Rhobox

L'utilité de cette boîte de mesure est confirmée par le Tableau 3.4 qui présente les valeurs de résistivité électrique mesurées sur un béton dont la composition est donnée dans le Tableau 3.2. Les mesures ont été faites avant l'introduction des fibres, sans et avec le dispositif d'isolation des mesures.

		Résistivité ρ ($\Omega.m$)
Mesures à l'intérieur du malaxeur	Sans boîte	4,7
	Avec boîte	12,5

Tableau 3.4 : Mesure de résistivité permettant la validation de l'utilité de la boîte

La différence entre les valeurs mesurées avec la boîte et sans la boîte confirme l'influence des organes métalliques du malaxeur. Le dispositif d'isolation des mesures est donc efficace et permet de connaître la résistivité électrique des bétons pendant le malaxage. La Rhobox garantit également une distance inter électrode constante, ce qui supprime une source potentielle d'erreur. Elle fixe également l'échelle d'observation de l'homogénéité, qui est donc la distance inter-électrodes.

3.5. Essai industriel

Dans le but de valider cette méthode de mesure, un essai a été réalisé chez un préfabricant de béton. Le béton est fabriqué dans une centrale de 750 litres, la vitesse du malaxage n'est pas connue et la rhéologie du béton est adaptée par un ajout d'eau suite à la mesure de la puissance électrique requise pour assurer le mélange. Les fibres sont des fibres métalliques à crochet, d'un facteur d'aspect de 80 (Figure 3.25). Elles sont introduites en une seule fois, conditionnées en plaquette et à un dosage de 20 kg/m³.



Figure 3.25 : Caractéristique des fibres utilisées dans le cadre de l'essai industriel (Fiche technique en Annexe 1.4.6)

Les dispositifs de sécurité liés à l'utilisation de la centrale et la distance entre celle-ci et son poste de pilotage empêchent des arrêts fréquents du malaxeur. Un premier temps de 60 secondes a donc été décidé.



Figure 3.26 : Mesures de résistivité électrique dans un malaxeur industriel de 750 litres (Alkern)

Les mesures sont réalisées en sept zones différentes du malaxeur (Figure 3.26). La première mesure, réalisée après 60 secondes, présente très peu d'écart selon les zones de mesures ainsi qu'une résistivité proche de la résistivité optimale, comme le montre la Figure 3.27.

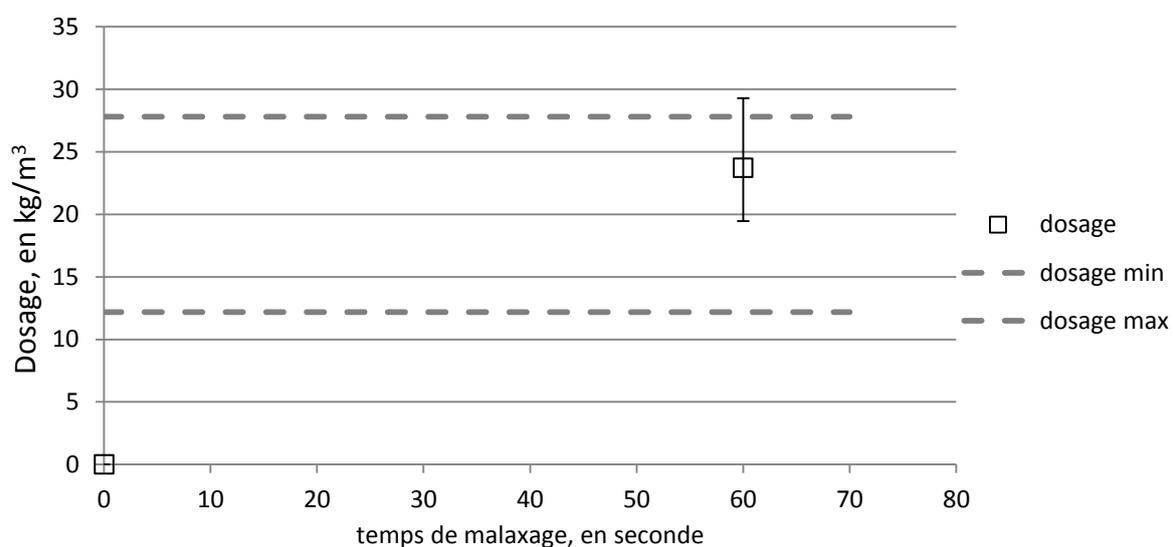


Figure 3.27 : Evolution de la résistivité d'un béton fibré dans le cadre d'un essai industriel, 20 kg/m³

La faible épaisseur des pièces fabriquées ont permis de constater visuellement la bonne répartition des fibres, au moment du coulage et du démoulage.

Cet essai confirme l'adaptabilité de la méthode dans un contexte industriel.

3.5.1. Conclusion sur la méthode de mesure

Le dispositif de mesure de résistivité électrique habituellement utilisé dans le domaine de la géophysique peut être utilisé dans le cas des bétons pour détecter la présence de fibres conductrices.

L'influence de la conductivité électrolytique n'est pas à négliger mais ce paramètre peut être écarté en utilisant un adjuvant approprié ou en connaissant l'influence de celui-ci.

L'influence des fibres sur la résistivité électrique se déduit de la relation (3.23), avec ρ_{bf} la résistivité électrique du béton fibré, ρ_b la résistivité du béton et ϕ_f la fraction volumique de fibres.

$$\rho_{bf} = \rho_b(1 - r\phi_f) \quad (3.23)$$

Le développement de la Rhobox à partir du champ d'investigation de l'appareil permet d'isoler les mesures et de connaître, grâce à la relation établie, la teneur en fibre dans un volume donné. Les dimensions de ce dispositif peuvent être revues pour correspondre à des malaxeurs de contenance différente. Des améliorations sont encore à apporter pour s'adapter aux géométries complexes de certains malaxeurs (cuve inclinée ou conique).

Tous les éléments sont à présents rassemblés pour tester cette méthode de mesure dans le cas de la dispersion des fibres dans les bétons fibrés. Les paramètres testés concernent les fibres (dosage), le béton (rhéologie) et le processus de malaxage (vitesse, moment d'introduction, mode d'introduction). Les résultats expérimentaux sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

4. Mesures de dispersion de fibres

Le chapitre précédent a présenté un dispositif de mesures de résistivité permettant de contrôler l'homogénéité de la dispersion des fibres dans le malaxeur. Cette méthode peut à présent être utilisée pour mesurer la dispersion des fibres dans différentes configurations. L'objectif de cette campagne d'essai est de comprendre les mécanismes de répartition des fibres et de voir comment certains paramètres affectent cette distribution.

Le malaxage du béton étant réputé dépendre du béton, des fibres, du malaxeur et du cycle de malaxage, les paramètres testés concernent les fibres (dosage et forme), le béton (rhéologie), le process de fabrication (vitesse de malaxage, moment et mode d'introduction des fibres) et le malaxeur utilisé.

4.1. Matériaux et démarche de travail

4.1.1. Composition des bétons testés

La formulation du béton ne figure pas dans la liste des paramètres à tester. Il est néanmoins arrivé, au cours de cette campagne d'essai, que les bétons n'aient pas rigoureusement la même formulation. Ceci s'explique par le fait que certaines des gâchées ont été formulées à d'autres fins mais ont également servi de support à des mesures de résistivité. Des précautions ont toutefois été prises en s'assurant que les gâchées contenaient un adjuvant dont le comportement vis-à-vis de la résistivité électrique a été déterminé dans le chapitre 3 (Glenium Sky 537) et un ciment CEM I, afin de limiter l'impact des constituants du béton sur la conductivité électrolytique (§ 3.4.1).

4.1.1.1. Le ciment

Deux ciments différents ont été utilisés dans cette campagne d'essai, selon la disponibilité de chacun. Les deux ciments sont des CEM I 52,5 N, et leurs caractéristiques sont similaires, comme le montrent les fiches techniques situées dans les Annexes 1.1.2 et 1.1.3.

4.1.1.2. Les granulats

Les granulats utilisés sont concassés ou roulés. Les sables ont un diamètre moyen maximal de 4 mm pour les concassés et de 5 mm pour les roulés. Les gravillons ont un diamètre maximal de 12 mm. Les caractéristiques des quatre granulats utilisés sont en Annexe 1.2.

4.1.1.3. L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à base de polycarboxylate. Le Glenium Sky 537 a été testé dans le chapitre 3 (§ 3.4.1) et son influence sur la conductivité électrolytique du béton au cours du temps est connue. La fiche technique de cet adjuvant se trouve en Annexe 1.3.2.

4.1.1.4. Les fibres

Les fibres sont des fibres métalliques à crochet Arcelor HE 55-35 dont la fiche technique est en Annexe 1.4.7. Deux autres types de fibres ont été testés, des fibres métalliques RC 80/60 BP et des fibres métalliques droites de longueur 12 mm.

4.1.1.5. Le béton de référence

Un béton a été défini comme étant un mélange de référence, ce qui a permis d'évaluer l'influence de certains paramètres. Le béton de référence est un béton auto plaçant, d'étalement 71,5 cm (non fibré), comportant 35 kg/m³ de fibres.

4.1.1.6. Formulations des bétons

			Béton de référence	Paramètres Fibres				Paramètre béton		Paramètres Process
				dosage		Facteur d'aspect		Mortier	Béton ferme	Vitesse, moment et moode d'introduction des fibres
				45 kg/m ³	70 kg/m ³	R = 41	R = 85			
E/L			0,414	0,45	0,45	0,41	0,41		0,21	0,414
Liants	Ciment 1	CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF	380	-	-	380	380	400		380
	Ciment 2	CEM I 52,5 N CE CP2 NF Couvrot		350	380				400	
	Fine	Filler calcaire betocarb P2	90	100	200	90	90		30	90
Granulat	Gr4	Calcaire boulonnais 5-12	-	565	565	-	-		-	-
	Gr3	Calcaire concassé boulonnais 0-4	837	960	960	837	837	160 0	-	837
	Gr2	Silicieux roulé loire 5-12	776	-	-	776	776		864	776
	Gr1	Silicieux roulé loire 0-5	-	-	-				966	-
u >	Adj 1	Glenium SKY 537	2,20	1,58	1,95	2,20	2,20		1,74	2,20
Fibres	Fib 1	Fibre Arcelor HE 55-35	35	45	70			35	35	35
	Fib 2	Fibre Bekaert RC 80/60/BP					35			
	Fib 3	Fibre métallique l = 12 mm				35				

Tableau 4.1 : Formulation des bétons testés

4.1.2. Démarche de travail

L'objectif de cette campagne expérimentale est de comprendre quel paramètre influence la dispersion des fibres pendant le malaxage. Le § 1.3 rappelait les principaux mécanismes de mélanges, à savoir la diffusion et la convection. Ces deux phénomènes seront explicités dans le cas d'une dispersion sous cisaillement dans le §4.1.2.1. Dans les paragraphes suivants, les résultats expérimentaux seront présentés puis analysés à la lumière des lois régissant les mouvements de convection et de diffusion. Les mesures expérimentales permettent ainsi d'appréhender les paramètres ayant de l'influence d'une part et de vérifier si ces paramètres agissent selon les mécanismes connus de convection et de diffusion.

4.1.2.1. Mécanismes de mélange

Comme dit dans le paragraphe 1.3, deux sortes de mélange existent, les mélanges convectifs, qui concernent un ensemble d'éléments, et les mélanges diffusifs, où chaque élément est concerné de manière individuelle. Les paragraphes 4.1.2.1.1 et 4.1.2.1.2 rappellent les principes de ces deux phénomènes.

4.1.2.1.1. Diffusion

Dans le cas d'un mélange par diffusion, le temps t nécessaire pour que la diffusion ait lieu sur une distance l_{diff} est donnée par la relation (1.28) dans le § 1.3.2, avec D_{diff} le coefficient de diffusion de l'espèce en $m^2.s^{-1}$.

$$l_{diff} = \sqrt{D_{diff} t} \quad (1.28)$$

Pour disperser de manière homogène une espèce sur une distance caractéristique L , le temps t_{diff} est nécessaire, conformément à (4.1).

$$L = \sqrt{D_{diff} t_{diff}} \quad (4.1)$$

D'après [LEIGTON'87] et [OVARLEZ'05], le coefficient de diffusion d'une espèce sous cisaillement est de la forme (4.2):

$$D_{diff} = \overline{D(\Phi)} \dot{\gamma} a_f^2 \quad (4.2)$$

$\dot{\gamma}$ est le cisaillement dans le mélange et a_f est une distance caractéristique de l'espèce à diffuser. $\overline{D(\emptyset)}$ est un coefficient de diffusion adimensionné. Il est proportionnel à \emptyset_f^2 (relation (4.3)), \emptyset_f étant la fraction volumique de fibre.

$$\overline{D(\emptyset)} \sim \emptyset_f^2 \quad (4.3)$$

4.1.2.1.2. Convection

L'intervention du convectif par l'action mécanique des pales permet de réduire la longueur de diffusion l_{diff} , comme le montre la relation (4.4) avec N_c le nombre de divisions apportées par le convectif.

$$l_{diff} = \frac{L}{N_c} \quad (4.4)$$

Comme constaté visuellement, la convection permet par ailleurs de rompre les oursins de fibres, résidus de l'introduction des fibres en une fois et en un seul point du malaxeur.

Une combinaison de ces deux types de mélange est également possible ; elle garantit d'obtenir au plus vite un mélange intime de plusieurs composants. Le convectif, en réduisant les distances de diffusion, permet en effet d'accélérer le processus.

Pour vérifier si la dispersion des fibres obéit à des mécanismes de diffusion et/ou convection, plusieurs cas sont à envisager.

- Cas n°1 : La dispersion des fibres obéit à des mécanismes de diffusion pure.
- Cas n°2 : La convection et la diffusion régissent la dispersion des fibres.
- Cas n°3 : La convection seule assure la dispersion des fibres.

Les temps de malaxage peuvent à présent être estimés dans ces trois cas.

4.1.2.1.3. Temps de malaxage

Avant de déterminer les temps de malaxage correspondant aux mécanismes ayant lieu, rappelons les équivalences suivantes :

Le nombre de divisions apportées par la convection est équivalent à la déformation subie par le matériau, conformément à la relation (4.5) :

$$N_c \sim \gamma \quad (4.5)$$

Pendant le malaxage, la déformation est liée au cisaillement par la relation (4.6) :

$$\gamma = \dot{\gamma} t \quad (4.6)$$

Les expressions (4.2) et (4.3) permettent d'écrire l'équivalence (4.7).

$$D_{diff} \sim \phi_f^2 \dot{\gamma} a_f^2 \quad (4.7)$$

Estimons à présent les temps de malaxage selon les configurations présentées plus haut.

- Cas n°1 : Mélange par diffusion pure

En élevant l'équation (4.1) au carré, la relation (4.8) est obtenue :

$$L^2 = D_{diff} t_{diff} \quad (4.8)$$

En remplaçant D_{diff} par la relation (4.7), l'équation (4.8) devient la relation de proportionnalité (4.9) :

$$L^2 \sim \phi_f^2 \dot{\gamma} a_f^2 t_{diff} \quad (4.9)$$

Le temps nécessaire à la dispersion des fibres par diffusion est estimé avec (4.10).

$$t_{diff} \sim \frac{L^2}{\phi_f^2 \dot{\gamma} a_f^2} \quad (4.10)$$

- Cas n°2 : Mélange par diffusion et convection

Dans le cas d'une action combinée du convectif et du diffusif, la diffusion est accélérée par la réduction de la longueur sur laquelle l'espèce se diffuse. En association les relations (4.4) et (4.8), la relation (4.11) est obtenue : elle relie le temps de diffusion t_{diff} , l'action du convectif N_c , la longueur de dispersion L et le coefficient de diffusion des fibres D_{diff} .

$$D_{diff} t_{diff} = \frac{L^2}{N_c^2} \quad (4.11)$$

En combinant les équivalences (4.5), (4.6) et (4.7), la relation (4.11) devient :

$$t_{diff} \sim \frac{L^2}{\dot{\gamma}^3 t_{diff}^2 \phi_f^2 a_f^2} \quad (4.12)$$

Et la relation (4.13) se déduit naturellement de l'équivalence (4.12) établie précédemment.

$$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{a_f \phi_f} \right)^{2/3} \quad (4.13)$$

- Cas n°3 : Mélange par convection pure

Dans notre cas, la dispersion des fibres au sein du matériau est assurée uniquement par le mouvement des pales. Un mélange par convection peut être illustré par la Figure 4.1. Les flèches représentent l_{conv} , la longueur sur laquelle le mélange n'est pas encore réalisé. L'homogénéité du mélange dépend de l'échelle d'observation et un temps infini est nécessaire pour aboutir à une longueur l_{conv} la plus petite possible.

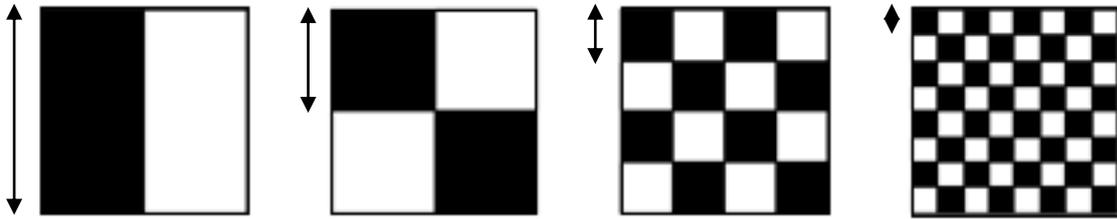


Figure 4.1: Mélange par convection

Dans cette étude, nous considérerons que l'homogénéité est atteinte pour une longueur $l_{conv} = \frac{d_{ie}}{10}$, d_{ie} étant la distance inter-électrodes du dispositif de mesure. Dans la configuration utilisée $l_{conv} = 1$ cm, ce qui est suffisant pour caractériser un matériau contenant des fibres de longueur $l_f = 35$ mm et dont le diamètre du plus gros grain est de 12 mm.

La relation (4.4) peut alors s'écrire :

$$l_{conv} = \frac{L}{N_c} = \frac{d_{ie}}{10} \quad (4.14)$$

En réutilisant les équivalences (4.5) et (4.6), la relation (4.15) apparaît :

$$\frac{L}{\dot{\gamma} t_{conv}} \sim \frac{d_{ie}}{10} \tag{4.15}$$

Et l'expression du temps s'écrit selon l'équivalence (4.16), d_{ie} étant constant pour l'ensemble des essais.

$$t_{conv} \sim \frac{10 L}{\dot{\gamma} d_{ie}} \sim \frac{L}{\dot{\gamma}} \tag{4.16}$$

Le Tableau 4.2 rappelle les expressions du temps de malaxage selon les mécanismes de mélange intervenant pendant le malaxage :

	Diffusion pure	Diffusion + convection	Convection pure
Temps	$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{\phi_f a_f} \right)^2$	$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{\phi_f a_f} \right)^{2/3}$	$t_{conv} \sim \frac{L}{\dot{\gamma}}$

Tableau 4.2 : Temps de mélange selon les mécanismes de mélange suivis

Les expressions de temps confirment que le convectif accélère le processus de mélange.

Notons que ces trois expressions peuvent être écrites sous la forme (4.17) qui montre que la dispersion d'une espèce sous cisaillement est assurée par la déformation apportée au système.

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} t &\sim cste \\ \gamma &\sim cste \end{aligned} \tag{4.17}$$

Dans notre cas d'étude, la diffusion pure est à écarter : en effet, la séparation de l'amas initial de fibres en plusieurs oursins constaté au début du malaxage trahit la présence d'un phénomène convectif.

Notons qu'un mélange par convection pure ne fait intervenir aucun paramètre lié aux fibres, ce qui suggère que ni le dosage, ni d'autres paramètres concernant les fibres, n'influencent la dispersion des fibres. Le temps d'homogénéisation dans ce cas ne dépendrait que de $\dot{\gamma}$ et de L , deux grandeurs liées au malaxeur. Les premiers essais concerneront donc le dosage et

la forme des fibres afin de déterminer si elles ont une influence et dans ce cas, si cette influence correspond à un modèle de diffusion/convection.

4.1.2.2. Etapes du malaxage

Le malaxage du béton fibré comporte une succession d'étapes qui nécessitent d'être explicitées afin de préciser le cadre de ce travail. La Figure 4.2 présente la chronologie du malaxage et fait le lien entre ces phases et l'état de dispersion des fibres. La Figure 4.2 schématise la répartition dans l'ensemble du malaxeur des fibres pendant le malaxage. Le seuil de percolation et la fraction volumique de fibre attendue figurent également sur ce graphique.

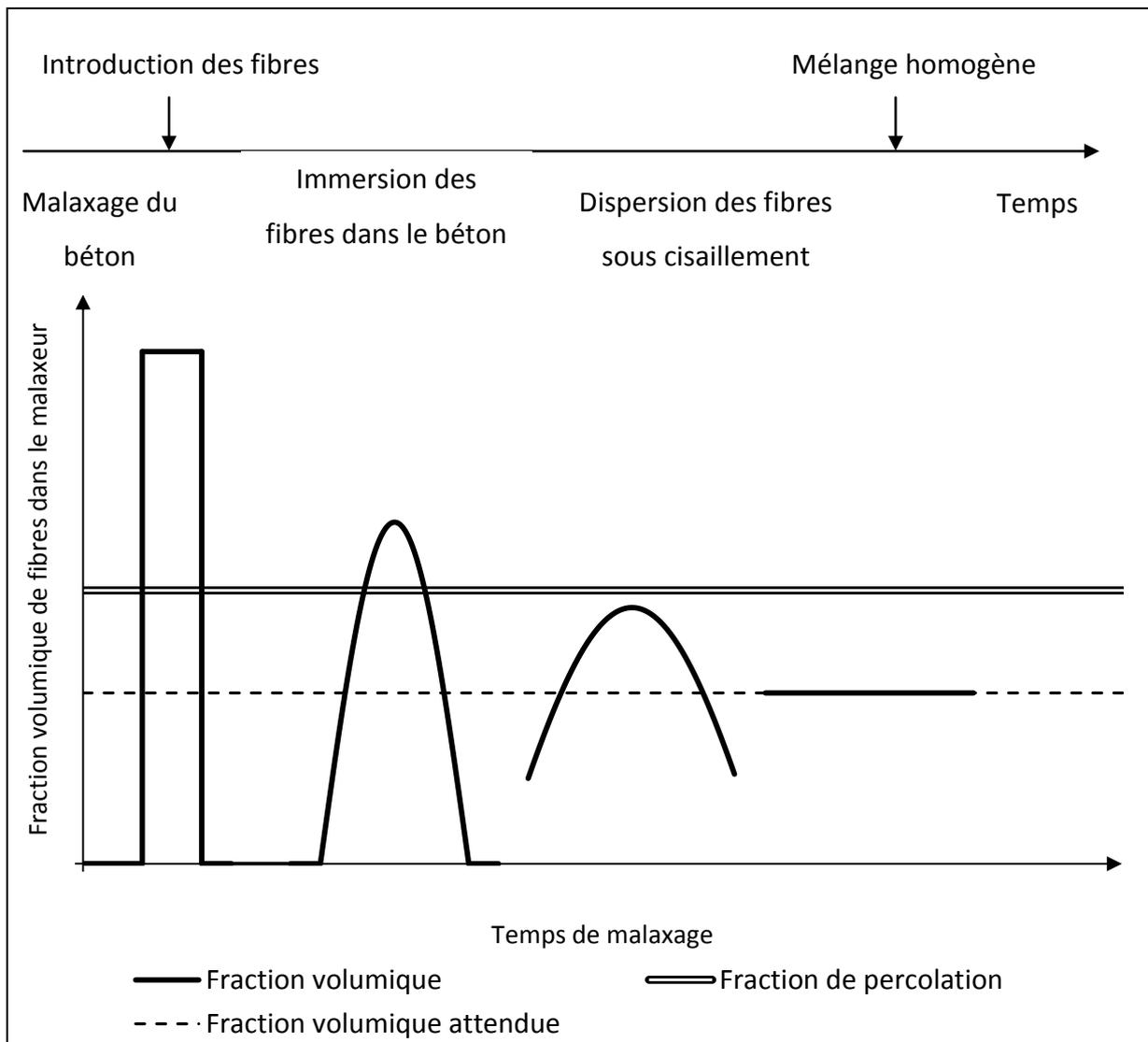


Figure 4.2 : Schéma de la répartition des fibres au sein du malaxeur au cours du temps

La première phase, à propos malaxage du béton non-fibré, ne sera pas détaillé ici. L'introduction des fibres se fait dans le béton frais, conformément au choix proposé dans le paragraphe 1.2.

Après l'ajout des fibres, celles-ci sont réunies dans la zone d'introduction et forment l'oursin initial. Le malaxeur étant divisé en trois zones, la concentration de fibres avant que le malaxage ne débute est donc trois fois supérieure à celle attendue. Rappelons qu'un oursin de fibres est créé si le volume de fibres dans un volume de béton dépasse la fraction volumique de percolation $\phi_{f \max}$ définie dans le § 1.2.3.1.

La seconde phase arrive après l'introduction des fibres et concerne leur immersion dans le mélange. Pendant cette période, les premiers mouvements du malaxeur contribuent à rompre l'oursin initial en plusieurs amas de taille inférieure dont quelques fibres s'échappent. Les concentrations en fibres sont donc très différentes au sein du malaxeur, avec des zones très pauvres en fibres et des zones où le seuil de percolation est dépassé. Cette seconde étape du malaxage comporte donc des oursins, qui disparaissent rapidement sous l'action du cisaillement (phase 3). La fraction volumique de fibres est alors en tout point inférieure au seuil de percolation. Les fibres peuvent alors être correctement dispersées avant que le matériau ne devienne homogène.

Voyons à présent en détail la campagne expérimentale menée.

4.1.3. Campagne expérimentale

4.1.3.1. Protocole expérimental

La formulation de chaque gâchée est précisée dans le Tableau 4.1. Les mesures sont faites dans le malaxeur à planétaire M₂ de 80 litres présenté sur la Figure 4.3.



Figure 4.3 : Malaxeur utilisé au cours de l'étude

Le déroulement d'un essai commence par la détermination de la teneur en eau des granulats, puis la composition prévue du béton est ajustée en fonction de celle-ci. Les constituants sont ensuite tous pesés et les pulvérulents sont introduits dans le malaxeur. Une première homogénéisation a lieu pendant 30 secondes environ avant l'introduction de l'eau et des adjuvants (60 secondes environ). Le malaxage se poursuit pendant encore 30 secondes et une première mesure a lieu dans le béton frais, en trois points du malaxeur. Si ces mesures sont similaires, le béton est, au moins électriquement, homogène et les fibres sont ajoutées. L'introduction des fibres se fait manuellement alors que le malaxeur est à l'arrêt, comme le montre la Figure 4.4. Les fibres sont toujours introduites dans la même zone du malaxeur, la zone 1.



Figure 4.4 : Ajout des fibres dans le malaxeur

Les mesures sont ensuite réalisées à l'aide du dispositif électrique et de la boîte de mesure, directement dans le malaxeur et en trois zones différentes, afin de vérifier l'homogénéité du mélange, comme l'illustre la Figure 4.5.



Figure 4.5 : Mesures de résistivité dans la cuve du malaxeur

Cette méthode permet de contrôler la dispersion à la fin du malaxage. Il n'existe pas à notre connaissance un temps défini comme étant le temps de malaxage d'un béton fibré. Pour déceler la fin effective du malaxage et comprendre les phénomènes de répartition, des mesures de résistivités ont été faites régulièrement pendant le malaxage, tous les 4 tours du bras de malaxage, fréquence qui correspond à un positionnement identique des pales et qui permet donc de conserver les zones de mesure.

Sur chaque zone, la mesure est répétée trois fois et la moyenne de ces trois valeurs est considérée comme étant celle de la zone, les variations d'une mesure à une autre dans une même zone étant très faibles (de l'ordre de 1 %).

La valeur mesurée est une résistivité électrique. Cependant, cette mesure n'est pas très explicite pour apprécier la dispersion des fibres. Les résistivités électriques ρ_{bf} mesurées seront donc exprimées en termes de dosage en fibres, grâce aux relations (3.23) et (4.18).

Cette manipulation des résultats mesurés permet également de prendre en compte la résistivité initiale du béton, qui n'est pas toujours exactement la même, le béton frais n'ayant pas toujours rigoureusement la même composition.

$$\rho_{bf} = \rho_b(1 - r\phi_f) \quad (3.23)$$

$$\phi_f = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\rho_{bf}}{\rho_b} \right) \quad (4.18)$$

4.1.3.2. Influence de la conductivité électrolytique

L'évolution de la conductivité électrolytique du béton frais entraîne une diminution de la résistivité électrique du béton frais avec le temps, indépendamment de l'ajout de fibre. Dans le cas d'un ajout en Glenium Sky 537, cette diminution est considérée comme étant linéaire et est de 10% après 30 minutes (*cf* Figure 3.13). Il est alors possible d'écrire la relation (4.19), avec le temps exprimé en seconde :

$$\rho_b(t) = \rho_0 \left(1 - \frac{0,1 t}{1800} \right) \quad (4.19)$$

La valeur de la résistivité du béton apparaît dans l'expression de la résistivité correspondant à une teneur en fibre ϕ_f donnée ((3.23)) :

$$\rho_{bf} = \rho_b (1 - r \phi_f) \quad (3.23)$$

En prenant en compte la variation de la conductivité électrolytique du béton (4.20) frais exprimée par (4.19), la résistivité attendue s'exprime alors selon:

$$\rho_{bf} = \rho_0 \left(1 - \frac{0,1 t}{1800} \right) (1 - r \phi_f) \quad (4.20)$$

Ou encore, en terme de dosage :

$$\phi_f = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\rho_{bf}}{\rho_0 \left(1 - \frac{0,1 t}{1800} \right)} \right) \quad (4.21)$$

Ce phénomène est à prendre en compte car si la durée du malaxage en elle-même est de l'ordre de la minute, chaque session de mesure implique un arrêt du malaxeur, puis l'ouverture des trappes, puis les mesures à proprement dites, répétées trois fois dans chacune des trois zones. 5 minutes sont donc nécessaires pour réaliser une série de mesures. La Figure 4.6 présente l'équivalence entre les temps de malaxage et les moments des mesures.

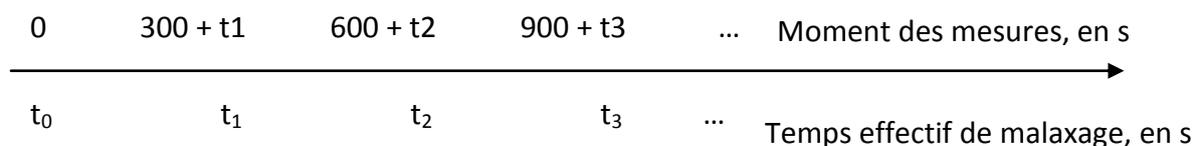


Figure 4.6 : Instant de la mesure et temps effectif de malaxage

Les temps effectifs de malaxage t_i sont calculés grâce à la relation suivante :

$$t_i(s) = \frac{\text{Nb de tours}}{\text{Vitesse [tr/min]}} \cdot 60 \quad (4.22)$$

Le calcul de la résistivité correspondant à une dispersion homogène de fibre à un instant donné peut ainsi être effectué en fonction du temps écoulé depuis la première mesure, réalisée à la fin du malaxage du béton frais, avant l'introduction des fibres.

4.1.3.3. Précision des mesures

Les manipulations effectuées associent un dispositif de mesure et un matériau composite évoluant avec le temps. Les sources d'incertitude sont donc les suivantes :

Le matériel : une répétition des mesures dans un même volume a permis de tester la reproductibilité des mesures. Les variations mesurées sont de l'ordre de 1 %.

Le béton frais : Les mesures réalisées dans un béton frais considéré comme homogène ont montré des variations allant jusqu'à 5 %.

Le temps : L'influence de la conductivité électrolytique a été estimée en considérant une durée de 5 minutes pour réaliser une série de mesure. Les essais n'ont pas été chronométrés, cette valeur n'est donc probablement pas exacte dans tous les cas. 5 minutes supplémentaires conduisent à une diminution de la résistivité électrique du béton frais d'environ 1 %.

L'orientation des fibres : La résistivité mesurée est en partie influencée par l'orientation des fibres. Dans le § 3.4.3.2., l'incertitude la plus grande, décelée pour le dosage à 45 kg/m³, était de 6,15 % (Figure 3.21). Cette incertitude peut être considérée comme celle liée à l'orientation des fibres.

L'emplacement de la mesure : Trois mesures sont réalisées dans la cuve du malaxeur. Etant donné l'encombrement de la Rhobox et la disposition des organes de mélange, il n'est pas envisageable de faire plus de mesures. Dans ce contexte, la représentativité de l'intégralité de la cuve par ces trois zones de mesure n'est pas certaine et cette incertitude n'a pas été mesurée.

Dans le cadre de ce travail expérimental, et en l'absence d'informations sur toutes les sources d'erreur potentielles, nous accordons aux valeurs mesurées une incertitude de +/- 10%. Cette incertitude apparaît sur les graphiques en pointillé et encadrera le dosage à atteindre correspondant. Il est à noter que selon le dosage choisi et le facteur d'aspect des fibres, l'incertitude de la mesure se traduira par une incertitude sur le dosage plus ou moins marquée.

4.1.3.4. Présentation des essais

Cette campagne expérimentale a pour objectif de comprendre l'influence de paramètres liés aux fibres, au béton et au process de malaxage.

Les fibres sont des fibres métalliques ; trois dimensions sont testées. Pour les fibres de longueur $l_f = 35$ mm, trois dosages sont envisagés : 35 kg/m^3 , 45 kg/m^3 et 70 kg/m^3 . Le résultat de ces essais est présenté dans le § 4.2.

Le plus souvent, les fibres sont dispersées au sein d'un béton auto-plaçant tel que décrit dans le § 4.1.1.5. Afin d'étudier l'influence du matériau, le béton a été remplacé par un mortier et par un béton très ferme. Les résultats obtenus apparaissent dans le §4.3.

Des variations ont été appliquées au process de malaxage. Trois vitesses différentes sont testées (12,5, 16,25 et 20 tr/min). Le moment d'introduction des fibres est également étudié (phase sèche, phase humide). Concernant le mode d'introduction des fibres, n'ayant pas un matériel d'introduction continue, un ajout fractionné, en deux et cinq fois a été envisagé. Ces résultats figurent dans le §4.4.

Au cours de ces essais, les différentes phases du malaxage illustrées sur la Figure 4.2 sont visibles. Expérimentalement, la phase 2 se traduit par la présence d'oursins lors des deux premières mesures sur béton fibré. Dès la troisième mesure, il n'y a plus dans notre cas d'étude, d'oursins visibles.

4.1.3.5. Présentation de l'essai de référence

Les essais sont dans la plupart des cas comparés à l'essai de référence. Cet essai concerne un béton de référence (cf §4.1.1.5), fibré à hauteur de 35 kg/m^3 , à l'aide fibres métalliques dont la longueur est 35 mm (fiche technique en Annexe 1.4.7). La vitesse de malaxage est de 12,5 tr/min, les fibres sont introduites en une fois, en un point du malaxeur et dans le béton déjà homogénéisé.

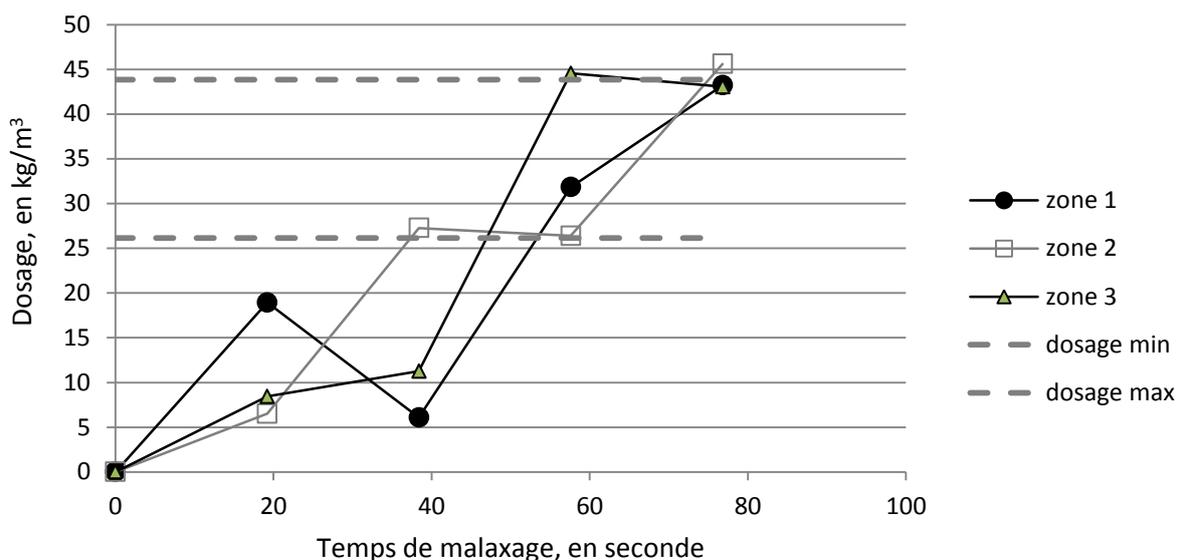


Figure 4.7 : Dispersion des fibres au cours du temps dans le cas de l'essai de référence

Un graphique dosage = $f(\text{temps})$ est tiré de chaque résultat, conformément à la Figure 4.7.

Celle-ci nous permet également d'apprécier le temps nécessaire à l'atteinte de l'homogénéité du mélange. Après 80 s, les dosages dans les trois zones de mesures sont proches et dans la limite de dosage conférée par l'incertitude de mesure. A partir de cet essai, il est possible de dire que l'homogénéité du mélange a été atteinte entre 60 et 80 s.

Passons à présent à la présentation des résultats et commençons par étudier l'influence des fibres sur leur dispersion pendant le malaxage.

4.2. Influence des fibres

Deux paramètres liés aux fibres sont analysés : leur dosage et leur forme. Les résultats sont présentés, commentés et confrontés aux mécanismes de convection et de diffusion pure. Si

une influence des fibres est décelée, la possibilité d'une dispersion par convection pure sera à écarter.

4.2.1. Paramètre dosage

Différents dosages ont été testés : 35, 45 et 70 kg/m³. Ces dosages correspondent à des fractions volumiques allant de 0,445 % à 0,89 %. Le facteur d'aspect des fibres est de 64. La vitesse du bras de malaxage est, pour l'étude de ce paramètre, de 12,5 tr/min.

4.2.1.1. 35 kg/m³

Cet essai correspond au béton de référence, déjà détaillé dans le 4.1.3.5. Rappelons que l'homogénéité du mélange semble atteinte entre 60 et 80 s de malaxage.

4.2.1.2. 45 kg/m³

La Figure 4.8 montre l'évolution de la résistivité pour un béton fibré à hauteur de 45 kg/m³. Après 60 secondes de malaxage, les trois points de mesure présentent un dosage proche mais encore trop éloigné de la cible de 45 kg/m³. Un point supplémentaire de mesure aurait sans doute permis d'atteindre une répartition homogène des fibres dans le mélange.

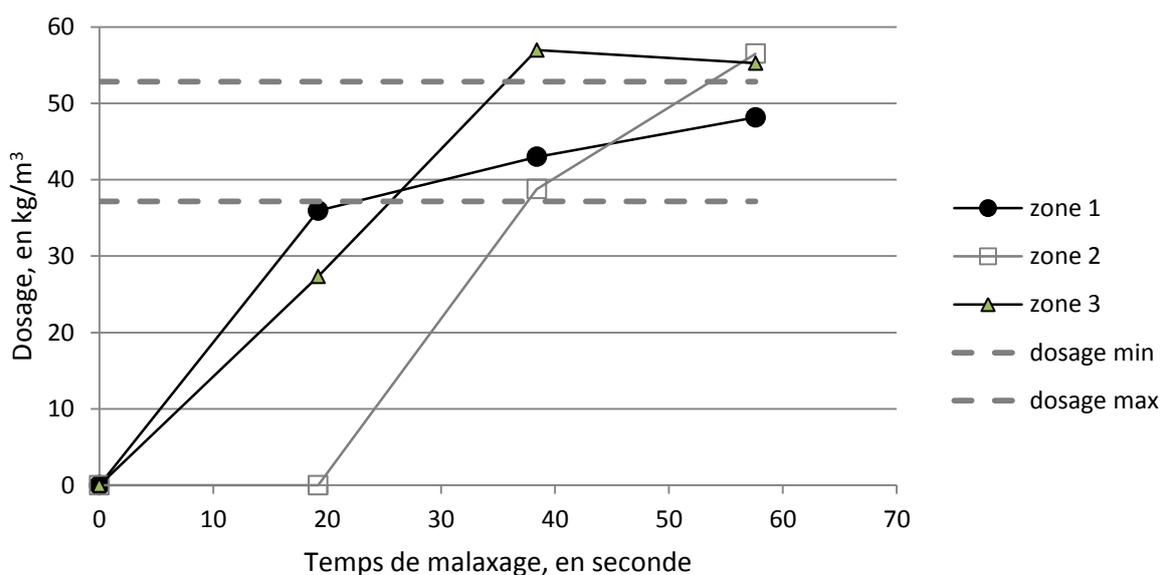


Figure 4.8 : Dispersion des fibres en fonction du temps - 45 kg/m³

4.2.1.3. 70 kg/m³

Dans le cas du béton fibré à 70 kg/m³, les premières mesures ont été faites après 60 secondes de malaxage, soit le temps correspondant dans le cas du béton de référence à la première mesure réalisée en l'absence d'oursins visibles.

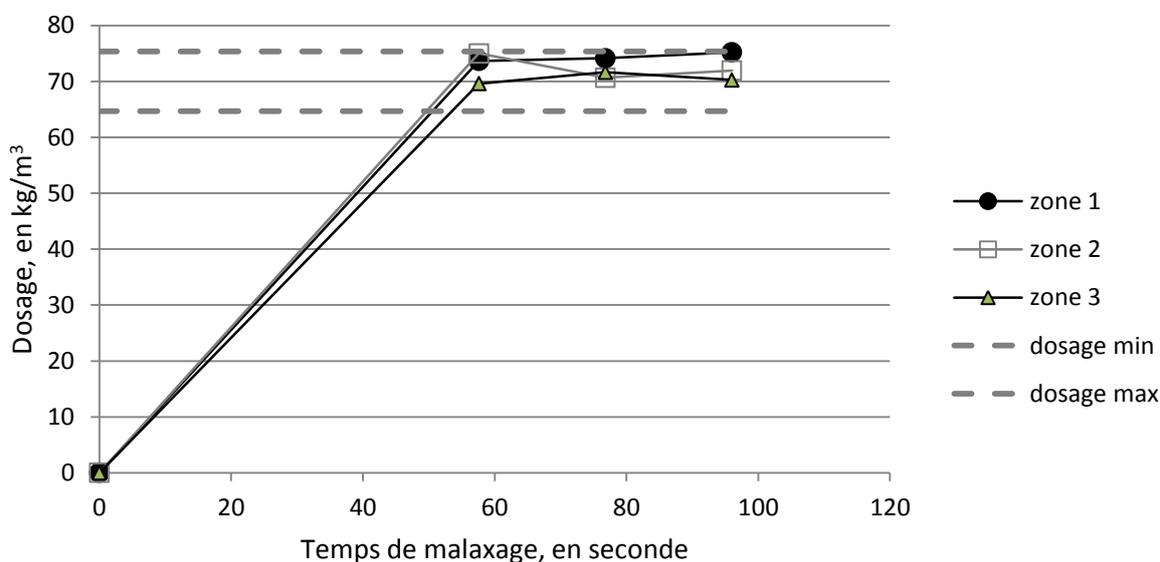


Figure 4.9 : Dispersion des fibres en fonction du temps - 70 kg/m³

La Figure 4.9 permet de constater que l'homogénéité semble atteinte dès 60 secondes et que la poursuite du malaxage ne modifie pas l'état de dispersion.

4.2.1.4. Conclusion sur le paramètre dosage

Trois dosages ont été testés. Concernant l'essai réalisé avec 35 kg/m³, l'homogénéité semble atteinte entre 60 et 80 secondes. Dans le cas d'un dosage plus élevé (45 kg/m³), les 60 secondes ne sont pas suffisantes pour atteindre l'homogénéité et l'absence de mesures supplémentaires empêche toute conclusion. Avec 70 kg/m³, l'homogénéité est déjà atteinte après 60 secondes de malaxage. Ces premiers constats sur les temps de malaxage sous entendent que le dosage est susceptible d'avoir une influence sur la répartition des fibres.

Voyons à présent si cette influence correspond à une dispersion des fibres selon les mécanismes de convection et de diffusion.

La relation (4.13) établie dans le § 4.1.2.1.3 propose une estimation du temps de malaxage dans le cas où la dispersion des fibres obéit à des mécanismes de convection et de diffusion.

$$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{a_f \phi_f} \right)^{2/3} \quad (4.23)$$

Dans le cadre de ces essais, seul le dosage diffère entre les trois essais.

Prenons $\phi_{f1}=35 \text{ kg/m}^3$. Dans ce cas, pour $\phi_{f2} = 2 \phi_{f1}=70 \text{ kg/m}^3$, le temps de dispersion t_{diff2} est quantifiable à partir de la relation (4.24).

$$t_{diff2} \sim t_{diff1} \left(\frac{1}{2} \right)^{2/3} \quad (4.24)$$

$$t_{diff2} = 0,63 t_{diff1}$$

Confrontons ces expressions avec le constat expérimental appelé ci-dessous.

$$t_{diff1}(\phi_{f1}) = 80 \text{ secondes}$$

$$t_{diff2} = 0,63 t_{diff1} = 50 \text{ secondes}$$

Dans l'hypothèse où la dispersion des fibres est homogène après 80 secondes de malaxage pour un dosage de 35 kg/m^3 , le temps nécessaire pour disperser convenablement 70 kg/m^3 est de 50 secondes. Cette durée est compatible avec les essais réalisés puisque l'homogénéité a été détectée à 60 secondes.

Le dosage en fibre a une influence sur les temps de dispersion ; il ne s'agit donc pas de convection pure, un mécanisme ne faisant intervenir aucun paramètre lié aux fibres.

De plus, les premiers résultats semblent confirmer la présence d'un mécanisme de convection/diffusion à l'origine de la dispersion des fibres. Vérifions ceci en confrontant les expressions théoriques à la variation du facteur d'aspect des fibres.

4.2.2. Paramètre de forme

Trois fibres différentes ont été testées. Elles se distinguent principalement par leur longueur (12, 35, 60 mm). Le dosage est de 35 kg/m^3 et la vitesse de malaxage de 12,5 tr/min.

4.2.2.1. $l_f = 35$ mm

La fibre de 35 mm utilisée est celle de l'essai de référence, présenté dans le § 4.1.3.5. L'homogénéité semble atteinte entre 60 et 80 secondes de malaxage.

4.2.2.2. $l_f = 12$ mm

Une fibre métallique droite d'une longueur de 12 mm a été utilisée. Dès 80 secondes, les mesures sont dans la zone attendue, cependant, celle-ci est assez étendue du fait du facteur d'aspect des fibres, plus petit ($r = 41$). A partir d'une centaine de secondes, les trois mesures sont proches du dosage attendu, et l'état de dispersion n'évolue plus.

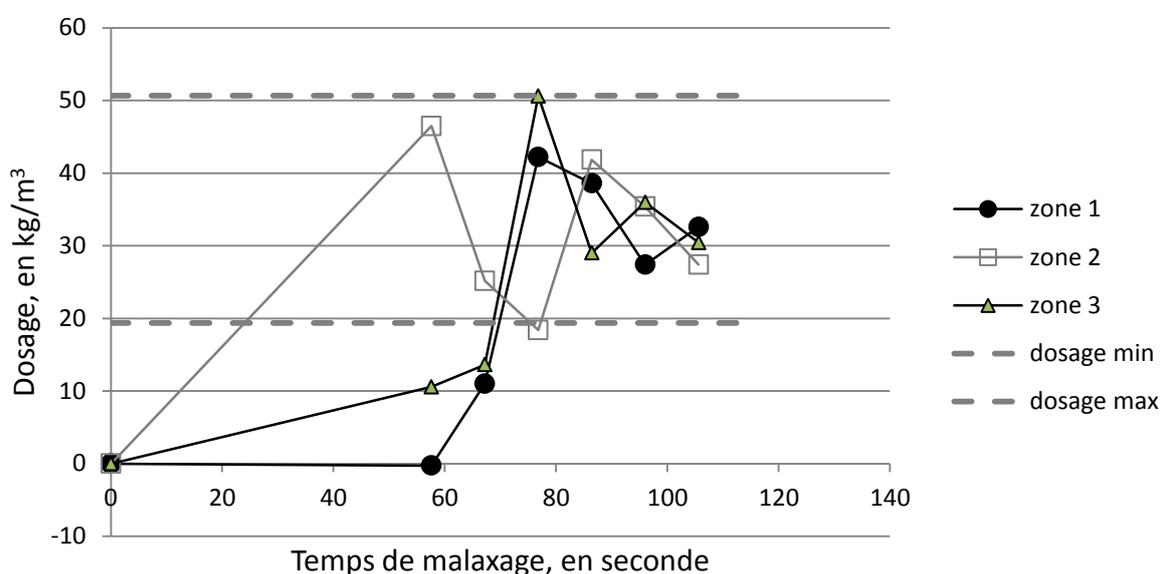
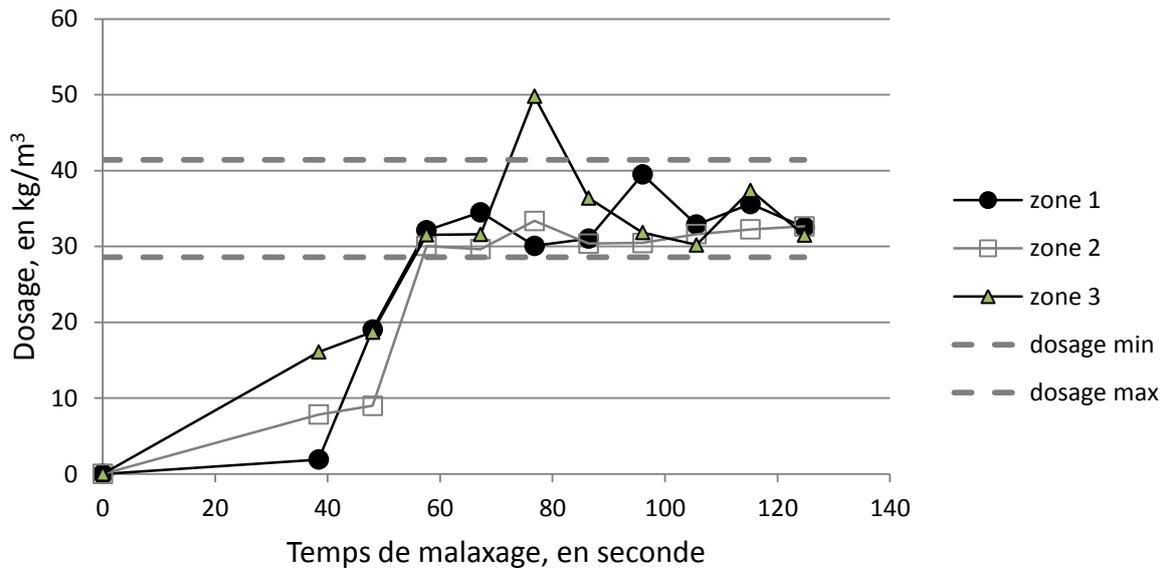


Figure 4.10 : Dispersion des fibres en fonction du temps - $l_f = 12$ mm

4.2.2.3. $l = 60$ mm et $r = 85$

La troisième fibre testée est une fibre métallique à crochet de longueur 60 mm. LA fiche technique de cette fibre est disponible dans l'Annexe 1.4.9.

Figure 4.11 : Dispersion des fibres en fonction du temps - $l_f = 60$ mm

Les résultats apparaissent sur la Figure 4.11. Il est possible de voir que, dès 60 secondes, l'homogénéité est atteinte, et ce, en dépit de la tolérance faible sur le dosage (facteur d'aspect plus grand avec $r=85$).

4.2.2.4. Conclusion sur le paramètre de forme des fibres

Les essais présentés montrent que la dimension des fibres influence le temps nécessaire à leur dispersion. Il apparaît qu'une longueur plus importante conduit à des temps de dispersion plus courts. Voyons si ces résultats sont cohérents avec le mécanisme de diffusion/convection.

Dans l'expression (4.13) rappelée ci-dessous apparaît un coefficient a_f qui est la distance caractéristique de l'espèce à diffuser. Dans le cas d'une sphère, a_f correspond au rayon mais l'équivalence dans le cas d'une fibre n'est pas donnée.

$$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{a_f \phi_f} \right)^{2/3} \quad (4.13)$$

Deux hypothèses sont donc faites. La première consiste à supposer que a_f est proportionnel à la longueur de la fibre, selon l'expression (4.25).

$$a_f \sim l_f \quad (4.25)$$

La seconde hypothèse suggère que a_f est proportionnel au facteur d'aspect de la fibre, conformément à l'équivalence (4.26).

$$a_f \sim r \quad (4.26)$$

Les résultats expérimentaux sont à présent confrontés à ces deux hypothèses à partir de l'expression (4.27).

$$t_{diff\ 1} \sim cste \left(\frac{1}{a_{f1}} \right)^{2/3} \quad (4.27)$$

$$t_{diff\ 2} \sim t_{diff\ 1} \left(\frac{a_{f1}}{a_{f2}} \right)^{2/3}$$

Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 4.3. Les valeurs théoriques sont calculées à partir du temps de dispersion de 80 secondes mesurées lors de l'essai de référence, pour des fibres de longueur 35 mm et de facteur d'aspect 64.

	Temps mesuré, en s	Temps théorique avec $a_f \sim l_f$	Temps théorique avec $a_f \sim r$
$l_f = 35 \text{ mm} ; r = 64$	80 s	-	-
$l_f = 12 \text{ mm} ; r = 41$	100 s	163 s	107 s
$l_f = 60 \text{ mm} ; r = 85$	< 60 s	27 s	47 s

Tableau 4.3 : Estimation des temps théoriques de malaxage

La confrontation des temps théoriques et pratiques montre que nos résultats sont cohérents avec le mécanisme de diffusion/convection (le temps augmente quand la longueur, ou le facteur d'aspect diminue). Les résultats théoriques sont plus proches de la réalité dans le cas de l'hypothèse n°2, la distance caractéristique a_f serait donc plutôt liée au facteur d'aspect de la fibre qu'à la longueur de celle-ci.

La dimension des fibres a une influence sur le temps de dispersion ; cette influence est cohérente avec celle annoncée par la relation (4.13) et une bonne corrélation est faite entre les mesures expérimentales et les temps théoriques dans le cas de l'approximation (4.26).

4.2.3. Conclusion sur le paramètre fibre

La relation (4.13) peut aussi s'écrire comme une combinaison de fonction dont l'une serait liée aux fibres et l'autre au malaxeur (cf (4.28))

$$t_{diff} \sim \left(\frac{1}{\phi_f a_f} \right)^{2/3} \frac{L^{2/3}}{\dot{\gamma}} \sim f(\text{fibres})g(\text{malaxeur}) \quad (4.28)$$

En remplaçant a_f par r , la fonction f s'écrit ainsi :

$$f(\text{fibres}) = \left(\frac{1}{\phi_f r} \right)^{2/3} \quad (4.29)$$

Il est alors possible de tracer le temps mesuré en fonction de cette fonction afin d'illustrer la corrélation entre les temps expérimentaux et l'influence théorique des fibres dans le cas d'une dispersion par convection/diffusion (cf Figure 4.12). Les incertitudes correspondent à l'intervalle de temps pendant lequel l'homogénéité du mélange a été atteinte.

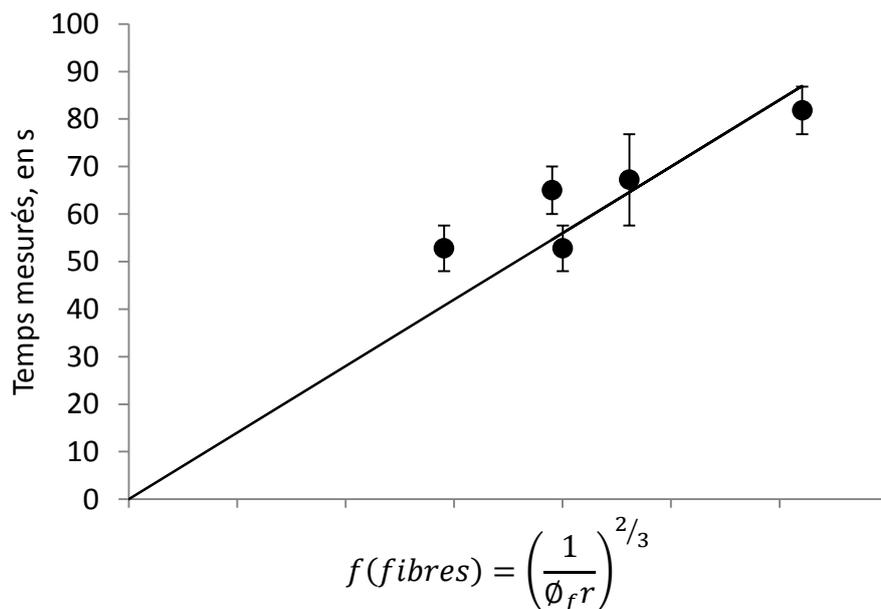


Figure 4.12 : Temps mesuré en fonction de l'influence théorique des fibres

Il est possible de voir sur la Figure 4.12 que la relation entre les temps mesurés et l'influence des fibres est linéaire, ce qui semble confirmer la présence d'un mécanisme diffusion/convection à l'origine de la dispersion des fibres. Des essais supplémentaires, réalisés avec d'autres dosages ou d'autres formats de fibres, permettraient de valider davantage cette théorie. La détermination de α_f dans le cas d'une fibre serait également à étudier plus précisément.

4.3. Paramètre béton

Le paragraphe 4.2 a permis de mettre en évidence l'influence des fibres sur le temps nécessaire à leur dispersion dans le béton selon des lois régissant la diffusion et la convection. Voyons à présent comment le béton est susceptible d'influencer lui aussi cette dispersion. La relation (4.28) montre une dépendance du temps de dispersion aux fibres et au malaxeur utilisé mais pas au béton.

$$t_{diff} \sim \left(\frac{1}{\phi_f a_f} \right)^{2/3} \frac{L^{2/3}}{\dot{\gamma}} \sim f(\text{fibres})g(\text{malaxeur}) \quad (4.28)$$

Afin de vérifier ceci, deux essais différents ont été réalisés : les fibres ont été introduites dans un mortier et dans un béton très différent du béton de référence, un béton très ferme dont l'affaissement est de 1,5 cm.

4.3.1. Essai sur mortier

Ce mortier suit la composition du mortier adjuvanté au GS 537 présentée dans le Tableau 3.2. Il contient 35 kg/m^3 de fibres Arcelor 55/35 et est malaxé à la vitesse de 12,5 tr/min. Rappelons-nous que, dans le cas du béton de référence, la dispersion des fibres est considérée atteinte après 80 secondes de malaxage.

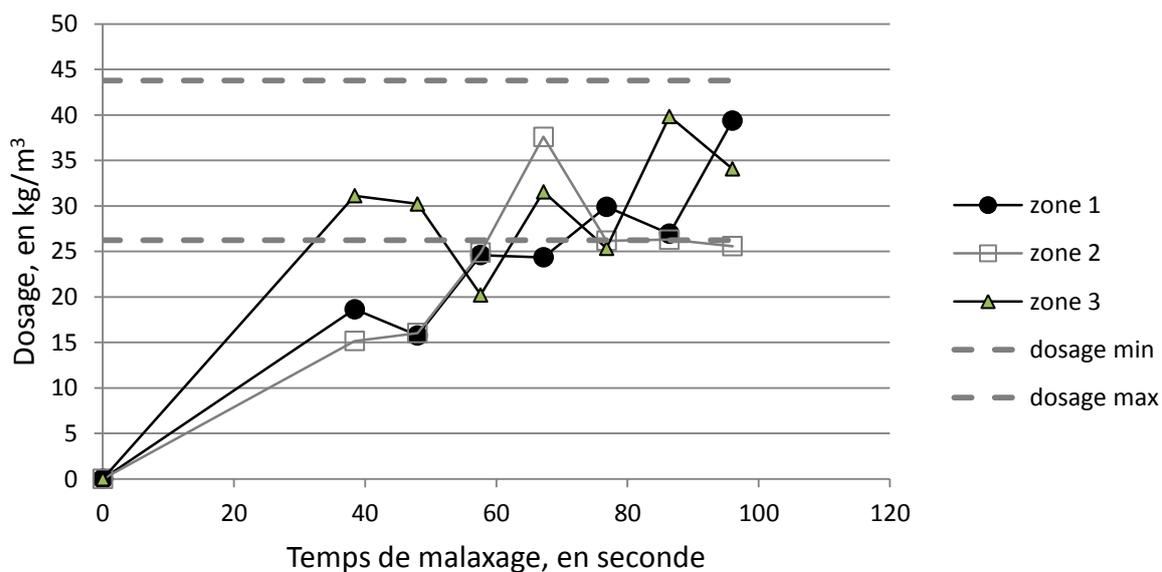


Figure 4.13 : Dispersion des fibres en fonction du temps, essai sur mortier

La dispersion des fibres apparaît dans la Figure 4.13 ; il est possible de voir que, après 80 secondes de malaxage, la répartition des fibres est correcte et que l'homogénéité est atteinte, comme dans le cas du béton de référence. L'absence des granulats 5-12 dans la composition du matériau cimentaire ne semble donc pas avoir d'impact sur le temps nécessaire à la dispersion des fibres. Voyons à présent comment la rhéologie du béton affecte la répartition des fibres.

4.3.2. Paramètre rhéologie

Dans la pratique, il est considéré que la rhéologie du béton influence le malaxage et donc la dispersion des fibres (§ 1.4). Or, l'expression (4.28) ne fait pas apparaître l'influence de la rhéologie. Deux bétons ayant un comportement rhéologique très différents ont donc été testés. Le premier est le béton de référence, un BAP, d'étalement 71,5 cm (non fibré) et le second est un béton ferme, ayant un affaissement de 1,5 cm (non fibré) et suivant la formulation indiquée dans le Tableau 4.1. La vitesse de malaxage est de 20 tr/min, une vitesse plus rapide que celle employée pour l'essai de référence mais pour laquelle des mesures ont été réalisées sur le même béton.

Pour ces deux bétons, les mesures n'ont pas été poursuivies au-delà de 48 secondes de malaxage, un temps pour lequel l'homogénéité de la dispersion n'a pas été atteinte, comme le montre la Figure 4.14.

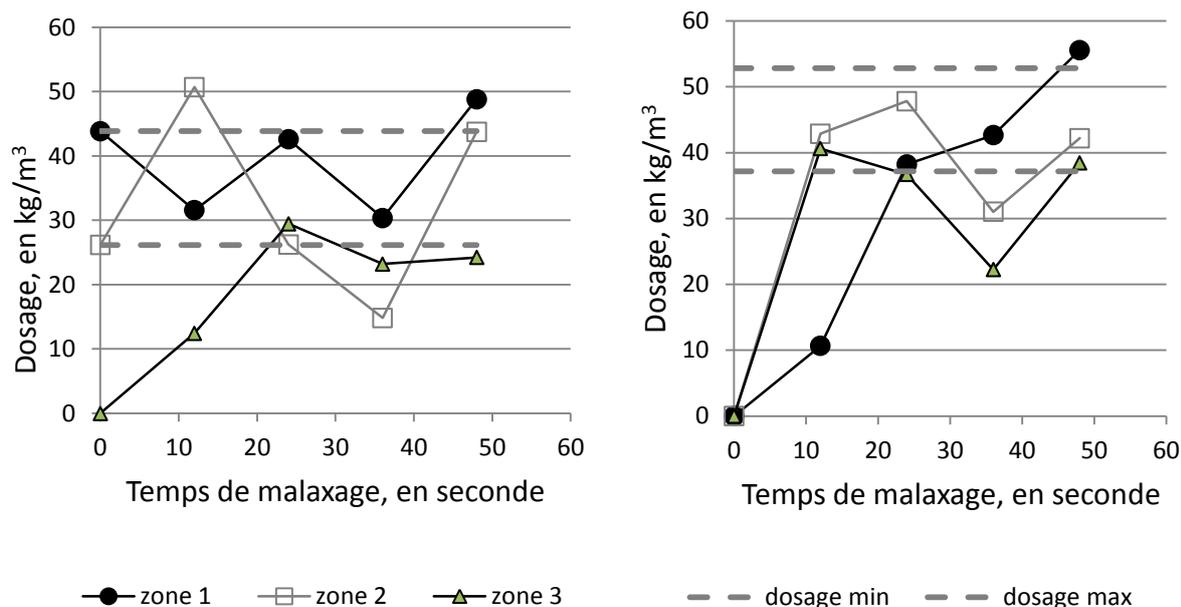


Figure 4.14 : Dispersion des fibres en fonction du temps – à gauche : béton ferme ; à droite : bap

Les deux bétons présentent néanmoins le même état de dispersion de fibres lors des deux dernières mesures. Cet essai ne se conclut donc pas sur l’homogénéité de répartition de fibres mais il montre en revanche qu’aucune des deux rhéologies ne favorise la dispersion des fibres.

4.3.3. Conclusion sur le paramètre béton

Les essais réalisés sur des matériaux ne comportent pas de granulat ou ayant une rhéologie très différente n’ont pas permis de détecter l’influence de ces paramètres sur la cinétique de la dispersion des fibres, conformément à l’expression (4.31). Ceci s’explique par le fait que les malaxeurs à bétons sont assez puissants pour appliquer la même déformation, et donc le même cisaillement, quelle que soit la rhéologie des bétons fabriqués. $\dot{\gamma}$ est donc le même dans les deux cas testés. Les fibres présentes dans le système étant les mêmes, et introduites au même dosage, il n’est pas étonnant que les temps de malaxage aboutissant à une dispersion similaire des fibres soient les mêmes pour des bétons aux formulations et aux rhéologies différentes.

4.4. Influence du cycle de malaxage

Le cycle de malaxage représente une multitude de paramètres susceptibles d'influencer la dispersion des fibres. Dans cette étude, seuls trois d'entre eux ont été testés : la vitesse de malaxage, le moment d'introduction des fibres et le type d'introduction des fibres.

4.4.1. Vitesses de malaxage

Deux vitesses ont été testées : 12,5 tr/min, la vitesse de l'essai de référence et 20 tr/min. Pour l'essai de référence, l'homogénéité est atteinte pour 80 secondes, temps qui correspond à 12 tours du bras de malaxage. La Figure 4.15 relate l'évolution de la dispersion des fibres dans le cas d'une vitesse plus élevée de 20 tr/min. Il apparaît qu'un temps de malaxage plus court (50 secondes) permet d'atteindre l'homogénéité recherchée. En revanche, ce temps correspond au même nombre de tours du bras de malaxeur, soit 12 tours.

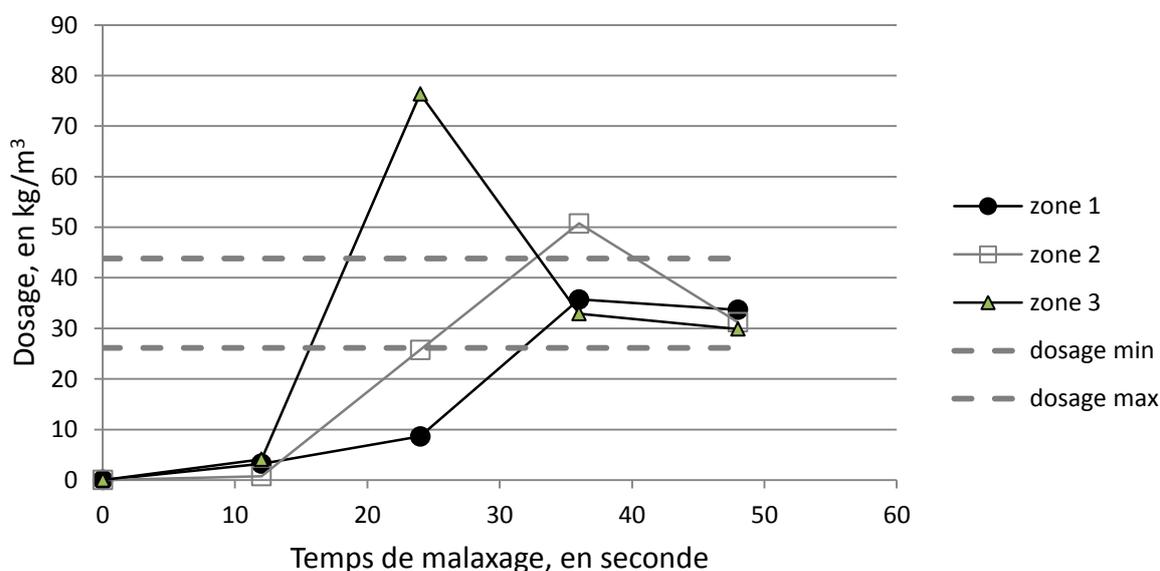


Figure 4.15 : Dispersion des fibres en fonction du temps - 20 tr/min

Il semble donc que la dispersion des fibres soit plus liée à la déformation apportée au système via le nombre de tours des pales dans le mélange que par la vitesse à laquelle cette déformation a lieu. Voyons à présent si ces déductions sont compatibles avec le mécanisme de convection/diffusion régi par l'expression (4.13).

$$t_{diff} \sim \frac{1}{\dot{\gamma}} \left(\frac{L}{a_f \phi_f} \right)^{2/3} \quad (4.13)$$

Dans les deux essais comparés, les paramètres L , a_f et ϕ_f sont les mêmes ; seul $\dot{\gamma}$ change, conformément à l'équivalence évoquée dans le chapitre 2 :

$$\dot{\gamma} \sim V_{pale} \quad (2.23)$$

Il est alors possible d'écrire :

$$t_{diff1} \sim cste \frac{1}{V_1} \quad \text{et} \quad t_{diff2} \sim cste \frac{1}{V_2} \quad (4.30)$$

$$t_{diff2} \sim t_{diff1} \frac{V_1}{V_2}$$

La relation (4.30) permet de vérifier si les résultats expérimentaux obtenus sont compatibles avec le mécanisme de convection/diffusion. La réponse apparaît dans le Tableau 4.4.

	Temps mesuré, en s	Temps théorique
$V_1 = 12,5 \text{ tr/min}$	80 s	-
$V_2 = 20 \text{ tr/min}$	< 50 s	48 s

Tableau 4.4 : Estimation des temps théoriques de malaxage selon la vitesse de malaxage choisie

Le temps de malaxage nécessaire à la dispersion des fibres mesuré dans le cas d'une vitesse de 20 tr/min est cohérent avec le temps estimé pour cette même vitesse.

L'étude du paramètre vitesse contribue à confirmer que la dispersion des fibres dépend de la combinaison des mécanismes de convection et de diffusion.

La relation (4.6) rappelée ci-dessous explique quant à elle pourquoi l'homogénéité est atteinte après la même déformation mais pour un temps plus court, quand le cisaillement augmente.

$$\gamma = \dot{\gamma} \cdot t \quad (4.6)$$

La vitesse de malaxage a donc une influence sur le temps de dispersion des fibres ; cette influence est quantifiable via les expressions établies à partir des mécanismes de convection et de diffusion. Etudions à présent l'impact du moment d'introduction des fibres.

4.4.2. Moment d'introduction des fibres

Dans le cadre de ce travail, et pour simplifier l'étude de la dispersion des fibres à une approche bi-phasique béton frais/fibres, les fibres ont été introduites directement dans le béton frais lors de chaque essai (§ 1.2). Une question fréquente chez les industriels concerne pourtant le moment d'introduction des fibres et principalement la phase, sèche ou humide, à privilégier pour obtenir une distribution homogène.

Un essai a donc été réalisé en introduisant les fibres dans le mélange de granulats et de ciment déjà homogénéisé (Figure 4.16). La vitesse choisie est de 20 tr/min pour le bras de malaxage et le dosage en fibre est de 35 kg/m³.



Figure 4.16 : Introduction des fibres en phase sèche

Sans un ajout d'eau, des amas de fibres persistent, même après 48 secondes de malaxage, durée qui correspond à une dispersion des fibres déjà correcte dans le cas d'une insertion en phase humide et d'un malaxage à cette vitesse. La Figure 4.17 présente ses amas de fibres, qui se trouvent derrière les pales, contre les parois du malaxeur ou encore au milieu de la cuve.



Figure 4.17 : Oursins de fibres après 48 secondes de malaxage

L'eau est ensuite ajoutée dans le malaxeur, ce qui suffit à rompre les oursins et, après une minute d'introduction d'eau, ceux-ci ont tous disparu. La première mesure de résistivité électrique est réalisée à la fin de la phase d'ajout d'eau. Aucune mesure de résistivité du béton frais sans fibres n'existe pour cet essai, la transformation des mesures de résistivités électriques en dosage en fibres est donc réalisée en extrapolant la valeur de la résistivité du béton à partir d'autres gâchées de béton, à la composition identique.

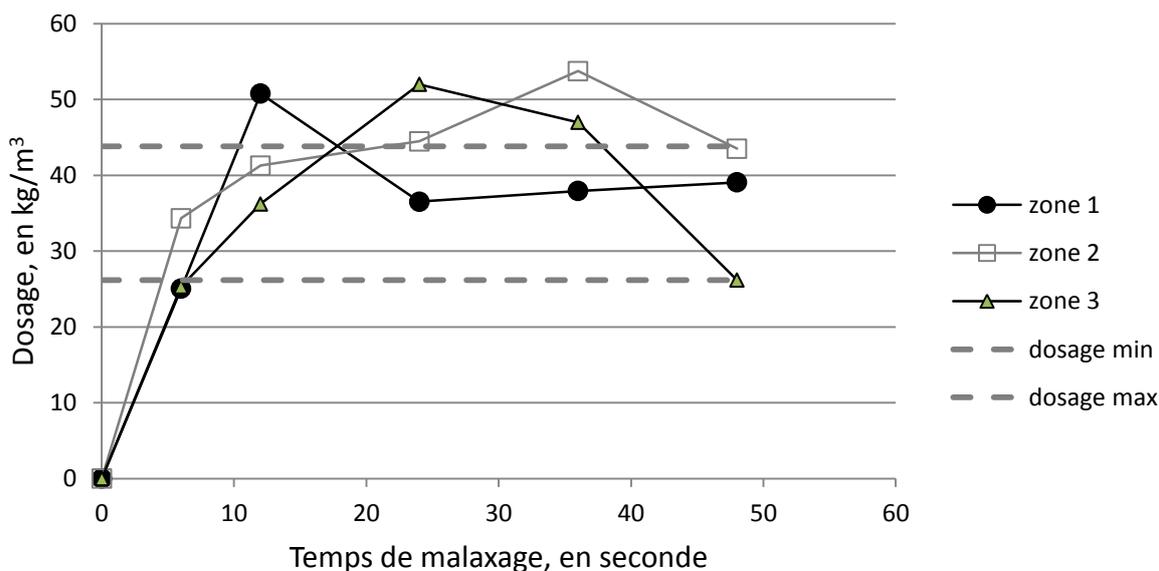


Figure 4.18 : Dispersion des fibres dans le béton humide après une introduction en phase sèche

La Figure 4.18 montre l'évolution de la dispersion des fibres dans le béton humide. Le constat visuel de l'homogénéisation du mélange pendant l'ajout d'eau est confirmé par les valeurs de résistivité électrique mesurées, assez proches sur l'ensemble des zones, et ce, dès les premières secondes de malaxage humide. Les dosages attendus sont obtenus après 50 secondes de malaxage, comme dans le cas de l'introduction des fibres en phase humide (pour une vitesse de malaxage de 20 tr/min).

Dans ces conditions, il ne semble pas qu'une introduction en phase sèche ou en phase humide favorise une meilleure répartition des fibres.

Le Tableau 4.5 donne des indications sur la durée de chacun des étapes du malaxage. Les phases d'homogénéisation des pulvérulents ou du béton frais sans les fibres ne sont pas chronométrées et la fin de l'étape est appréciée visuellement, les valeurs sont donc approximatives d'une part et non optimales d'autre part.

Introduction en phase sèche		Introduction en phase humide	
Homogénéisation des poudres	30 s	Homogénéisation des poudres	30 s
Homogénéisation poudre + fibre	50 s	Ajout de l'eau + adjuvant	60 s
Ajout de l'eau + adjuvant	60 s	Homogénéisation du béton frais	30 s
Homogénéisation de l'ensemble jusqu'à atteinte de la résistivité optimale	10 s	Homogénéisation de l'ensemble jusqu'à atteinte de la résistivité optimale	50 s
Durée du malaxage	2 min 30	Durée du malaxage	2 min 50

Tableau 4.5 : Durée de chaque étape du malaxage selon le moment d'introduction des fibres

D'après le Tableau 4.5, les durées de malaxage nécessaire pour une homogénéisation totale du mélange sont similaires dans les deux cas testés. Ce constat est en accord avec l'expression du temps de malaxage qui ne dépend que de $\dot{\gamma}$ en cas de dosage égal en fibre, comme c'est le cas dans cet essai. Or, comme cela a été dit précédemment dans le cas de la rhéologie, le malaxeur est assez puissant pour appliquer la même déformation au matériau quelle que soit sa consistance. La dispersion des fibres devrait donc suivre les mêmes mécanismes en phase sèche comme en phase humide.

Expérimentalement, ce constat n'est pas fait et, dans le cas d'une introduction des fibres en phase sèche, leur dispersion semble bloquée dans la seconde étape 2 décrit dans la Figure 4.2 (présence d'oursins).

En réalité, le mode d'introduction, le malaxeur utilisé et les propriétés des fibres influencent la répartition des fibres en phase sèche.

Influence du mode d'introduction :

L'introduction en une seule fois de l'ensemble des fibres génère un oursin initial qui se divise ensuite sous l'effet du malaxage (cf Figure 4.2 dans le §4.1.2.2). Une introduction continue des fibres ne créerait pas d'oursins initiaux, ils ne subsisteraient donc pas pendant le malaxage.

Influence des fibres :

Les fibres incorporées dans les bétons ont des densités différentes, inférieures à 1 dans le cas des fibres synthétiques et de l'ordre de 7,8 dans le cas des fibres métalliques. La masse volumique d'un oursin est inférieure à celle des fibres qui le composent. Un oursin étant un amas de fibre, la fraction volumique de fibre dans cet oursin est comprise entre la fraction de percolation telle qu'elle est définie dans le paragraphe 1.2.3.1 et la fraction volumique dense de fibre définie par [MARTINIE'10] avec la relation (4.31).

$$\phi_{fm} = \frac{\alpha_m}{r} \quad (4.31)$$

α_m est un coefficient représentatif du nombre de contact entre les fibres (La percolation est atteinte s'il y a un seul contact, cf formule (1.26) § 1.2.3.1). Pour un empilement dense, α_m est égal à 4 pour des fibres ayant un facteur d'aspect supérieur à 50.

La fraction volumique de fibres dans un oursin de fibres de facteur d'aspect 64 est donc comprise entre 0,015 et 0,0625, conformément aux applications numériques des formules (1.26) et (4.31).

Fraction de percolation :

$$\phi_{f \max} = \frac{1}{r} = \frac{1}{64} = 0,015 \quad (1.26)$$

Fraction d'empilement dense :

$$\phi_{fm} = \frac{\alpha_m}{r} = \frac{4}{64} = 0,0625 \quad (4.31)$$

La masse volumique d'un oursin de fibres métalliques est ensuite calculée à l'aide de (4.32) et conduit à des masses volumiques comprises entre 117 et 490 kg/m³.

$$M_{v \text{ oursin}} = \phi_{f \text{ oursin}} \cdot M_{v \text{ fibre}} \quad (4.32)$$

$$117,75 \text{ kg/m}^3 \leq M_{v \text{ oursins}} \leq 490 \text{ kg/m}^3$$

Le mélange de pulvérulents a quant à lui une densité de l'ordre de 2,7. La gravité ne va donc pas favoriser l'intégration des oursins de fibres dans le mélange.

Influence du malaxeur :

Dans cette étude, le malaxeur utilisé (Figure 4.3 § 4.1.3.1) est à axe vertical et les pales sont situées au fond du malaxeur. Le brassage des couches supérieures et inférieures du mélange est donc restreint. Cette configuration explique que, pendant la phase sèche, les fibres restent majoritairement en surface et sous forme d'oursins.

Influence de l'ajout d'eau :

L'ajout d'eau permet de diminuer la masse volumique du mélange d'une part et d'augmenter celle des oursins puisque la pâte adhère aux fibres. La réduction des écarts de densité entraîne l'immersion de l'oursin dans le mélange où il subira l'action des pales et disparaîtra au profit de la dispersion des fibres.

Ce scénario correspond aux observations visuelles faites pendant les essais et explique le maintien du mélange poudre + fibres dans la seconde phase du malaxage tel qu'il est décrit dans la Figure 4.2.

Une introduction des fibres en phase sèche est susceptible d'influencer la dispersion des fibres en la bloquant, dans nos conditions d'essais, dans la phase « oursins ». L'utilisation d'un dispositif d'introduction de fibres en continu et d'un malaxeur permettant un mélange haut/bas des éléments peut aboutir à une meilleure répartition des fibres en phase sèche mais ne conduit pas à un temps de malaxage plus court, comme le Tableau 4.5 le montrait plus haut.

4.4.3. Mode d'introduction des fibres

Dans les cas précédemment exposés, les fibres sont ajoutées en une fois et en une seule zone du malaxeur (Figure 4.4). Ce mode d'introduction n'est pas optimal mais permet d'être reproductible et ne nécessite pas de dispositif d'introduction de fibres. Aucun moyen d'ajout continu de fibres dans le béton n'est à notre disposition, l'étude de ce paramètre a donc consisté en une introduction fractionnée des fibres, en 2 fois, et en 5 fois.

Dans le cas de l'introduction des fibres en deux fois, 50 % de la quantité globale de fibres (35 kg/m^3) est ajoutée après la première mesure de résistivité, à $t = 0 \text{ s}$. La seconde moitié est ajoutée après la seconde mesure, après $t = 12 \text{ s}$ de malaxage. L'introduction en cinq fois suit le même principe, avec une introduction de 20 % des fibres à $t=0, 12, 24, 36$ et 48 secondes de malaxage.

Tester le mode d'introduction des fibres revient également à étudier l'influence du dosage en fibres sur les débuts de la répartition des fibres. Le mécanisme de dispersion tel qu'il est décrit dans la Figure 4.2 met en avant deux points : la présence d'oursins d'une part et l'atteinte de l'homogénéité d'autre part. Les prochains paragraphes proposent d'étudier l'influence de l'ajout fractionné sur la présence des oursins et sur la distribution finale des fibres.

4.4.3.1. Influence du mode d'introduction sur la présence d'oursins

Pour les gâchées dont les fibres ont été introduites en une seule fois, les oursins restent visibles lors des deux premières mesures, quel que soit le dosage. Dans le cas d'une introduction fractionnée, ce phénomène a également lieu.

La persistance des oursins, même pour la gâchée très faiblement dosée (7 kg/m^3 pour une introduction de fibre en cinq fois) confirme l'existence des états 1 et 2 présentés dans la Figure 4.2, et ce quel que soit le dosage en fibre (dans une gamme allant de 7 à 70 kg/m^3).

Cependant, une quantité moindre en fibres implique des oursins plus petits et ayant potentiellement un impact plus faible sur les mesures réalisées. La Figure 4.19 présente les dosages en fibres en présence d'oursins. Dans le cas d'une introduction en une fois, les écarts avec le dosage attendu sont importants. Lorsque les fibres sont introduites en deux fois, les dernières mesures réalisées en présence d'oursins correspondent plus aux valeurs attendues que dans le premier cas. Ajoutées en cinq fois, la dispersion des fibres correspond presque immédiatement à celle visée.

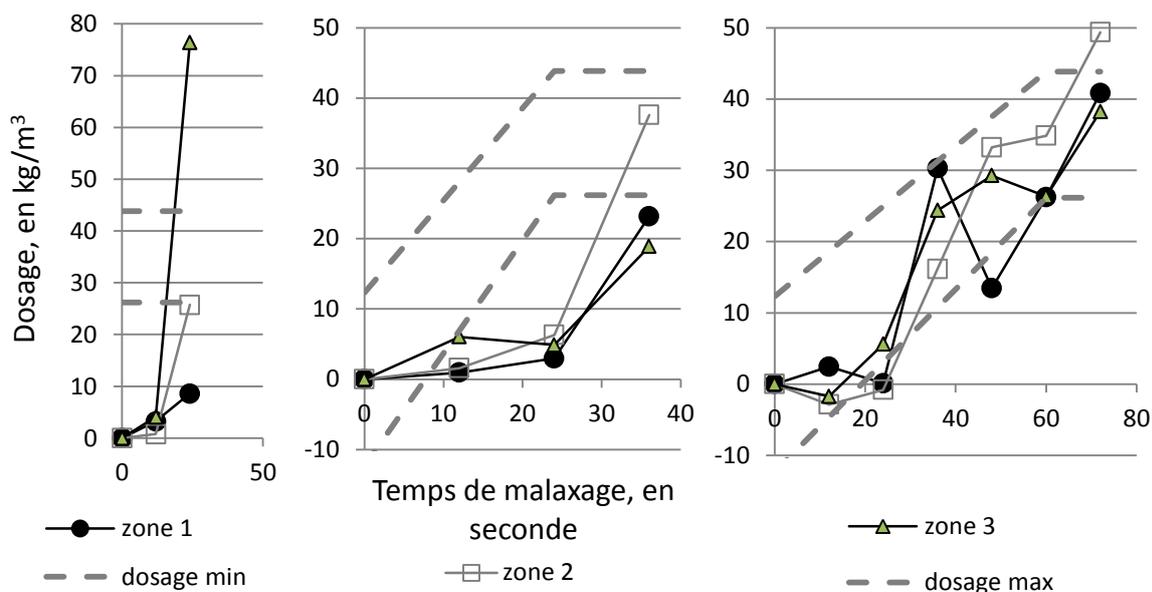


Figure 4.19 : Introduction fractionnée et présence d'oursins

Un mode d'introduction fractionné des fibres n'a pas permis de déceler une disparition plus rapide des oursins. En revanche, ceux-ci étant de taille inférieure, ils impactent moins la distribution globale des fibres, ce qui est constaté sur la Figure 4.19. Voyons à présent si cette méthode d'ajout des fibres conditionne la répartition finale des fibres.

4.4.3.2. Influence du mode d'introduction sur la distribution finale des fibres

En disparaissant, les oursins permettent aux fibres qu'ils contiennent de se répartir correctement dans le mélange. L'introduction fractionnée des fibres a une influence sur la taille des oursins présents dans le mélange, cette influence se poursuit-elle après la disparition des oursins ?

La Figure 4.20 montre que la première mesure faite sans oursins (à 36 s) ne permet pas d'atteindre un état de dispersion acceptable. Avec quelques secondes de malaxage supplémentaire, la dispersion des fibres est homogène dans le béton.

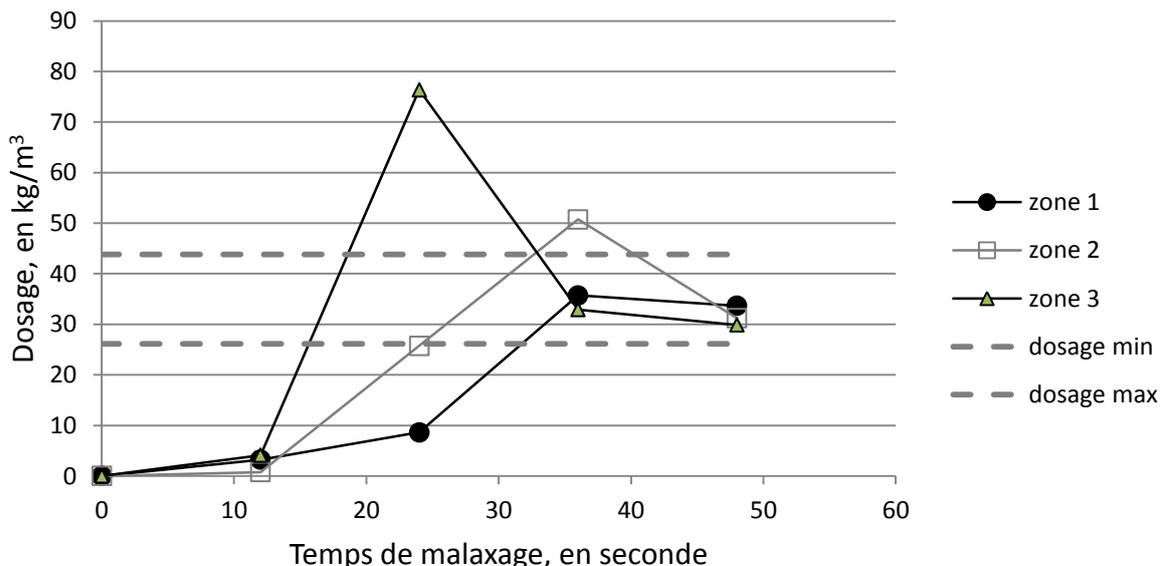


Figure 4.20 : Dispersion des fibres - introduction des fibres en une fois (20tr/min)

Dans le cas d’une introduction en deux fois (cf Figure 4.21), la première mesure sans oursins est réalisée après 50 secondes de malaxage et montre une forte hétérogénéité en termes de dispersion de fibres. Les valeurs mesurées, bien que s’approchant de la plage souhaitée ne permettent pas de déclarer l’homogénéité atteinte, et ce même après 70 secondes de malaxage. L’ajout des fibres en deux fois n’a donc pas permis d’accélérer le processus de dispersion des fibres.

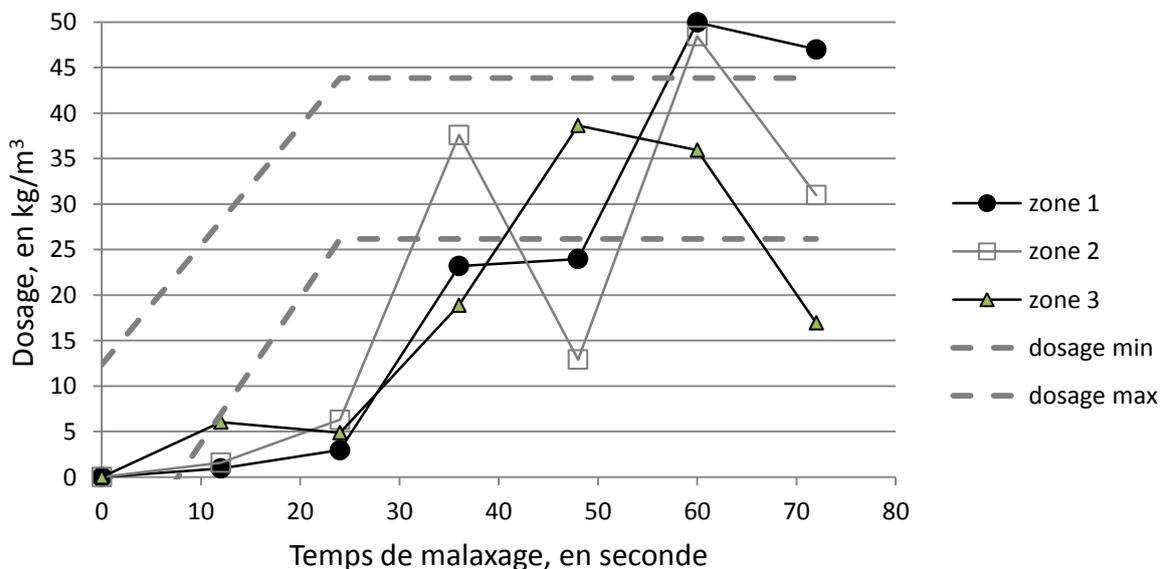


Figure 4.21 : Dispersion des fibres - introduction en deux fois

Concernant l'introduction des fibres en cinq fois, la première mesure en l'absence d'oursins est faite 84 secondes après l'introduction des premières fibres. Les résultats sont alors meilleurs que dans les autres cas présentés mais ont nécessité un temps de malaxage beaucoup plus long et tous les points de mesure ne sont pas dans le faisceau de dosage.

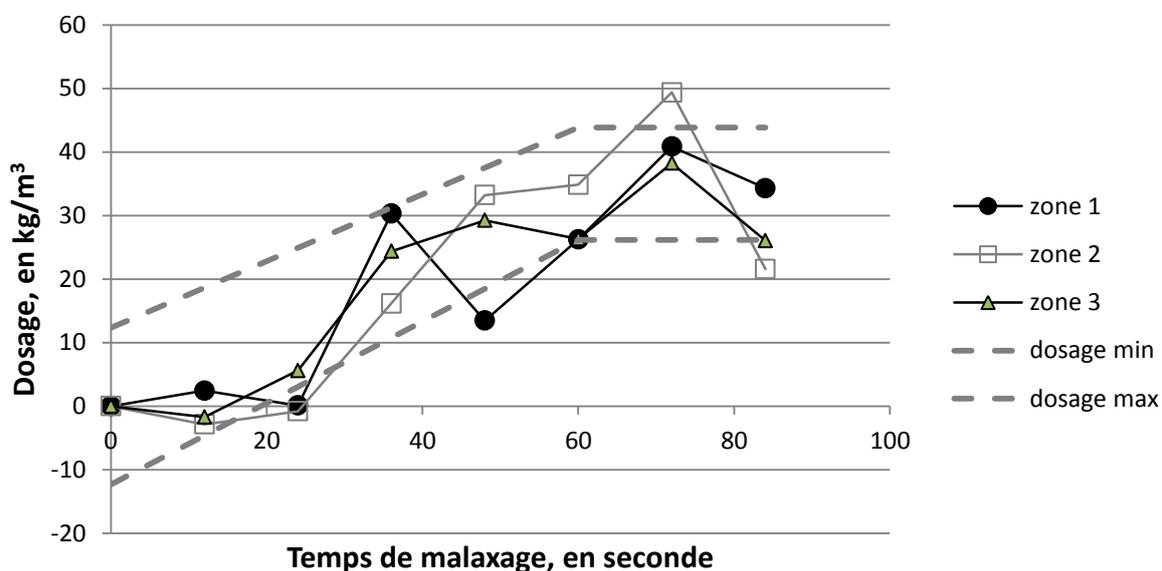


Figure 4.22 : Dispersion des fibres - Introduction en cinq fois

Ces essais permettent de montrer qu'une introduction fractionnée de fibre ne conduit pas nécessairement à une atteinte de l'homogénéité plus rapide. En revanche, la répartition globale des fibres est meilleure, avec des oursins moins volumineux dans les premiers instants du malaxage, et des écarts avec le dosage visé plus faibles. Ce type d'introduction prend néanmoins du temps et les meilleurs résultats constatés le sont en augmentant considérablement le temps de malaxage.

L'introduction fractionnée des fibres n'apparaît donc pas comme une solution pour une dispersion plus rapide des fibres au sein du béton. Une introduction continue des fibres est susceptible de donner des résultats différents, mais cette variante du paramètre d'étude n'a pas pu être testée.

4.5. Influence du malaxeur

Les paramètres liés aux fibres, au béton et au cycle de malaxage ont été abordé dans les paragraphes précédents. Les résultats obtenus expérimentalement confirment que le temps de dispersion des fibres s'exprime selon (4.28) :

$$t_{diff} \sim \left(\frac{1}{\emptyset_f a_f} \right)^{2/3} \frac{L^{2/3}}{\dot{\gamma}} \sim f(\text{fibres})g(\text{malaxeur}) \quad (4.28)$$

Les paramètres liés au malaxeur sont L , la distance sur laquelle la fibre doit se disperser et $\dot{\gamma}$ le cisaillement. Le chapitre 2 a montré que l'intensité de cisaillement d'un malaxeur pouvait être estimée à partir du diamètre moyen des granulés formés dans ce malaxeur, comme le rappelle l'expression (2.24).

$$D_G \sim \frac{1}{\dot{\gamma}^{2/3}} \rightarrow \dot{\gamma} \sim \frac{1}{D_G^{3/2}} \quad (4.33)$$

Dans le paragraphe 2.4.3.3 étaient présentés différentes valeurs de D_G pour cinq malaxeurs différents. La dispersion des fibres n'a pu être mesurée que dans les malaxeurs M_2 (un malaxeur à planétaire) et M_4 (un turbo-malaxeur).

4.5.1. Essais sur le malaxeur M_4

Le malaxeur M_4 ne dispose que d'une seule vitesse qui n'a pas été déterminée, les pales n'étant pas visibles lorsque l'appareil est en fonctionnement.

Son diamètre et sa contenance sont similaires à ceux du malaxeur M_2 , la grandeur L est donc considérée comme égale pour les deux malaxeurs. L'essai est réalisé avec le même dosage (35 kg/m^3) et les mêmes fibres ($r=64$), les paramètres liés aux fibres restent donc inchangés.

Il est donc possible d'écrire les relations (4.34) et (4.35) et d'en déduire (4.36).

$$t_{diff}(M_2) \sim g(M_2) \sim D_{G(M_2)}^{3/2} \quad (4.34)$$

$$t_{diff}(M_4) \sim g(M_4) \sim D_{G(M_4)}^{3/2} \quad (4.35)$$

$$t_{diff}(M_4) \sim \left(\frac{D_{G(M_4)}}{D_{G(M_2)}} \right)^{3/2} t_{diff}(M_2) \quad (4.36)$$

Les valeurs numériques indiquées dans le Tableau 2.22 sont utilisées pour l'application numérique et donnent un temps de dispersion dans le malaxeur M_4 de 74 s. Après introduction des fibres, le malaxage durera donc 75 secondes. Les résistivités électriques mesurées correspondent aux dosages indiqués dans la Figure 4.23. Après 75 s, les dosages dans les trois zones du malaxeur sont proches de ceux attendus, l'homogénéité est donc atteinte.

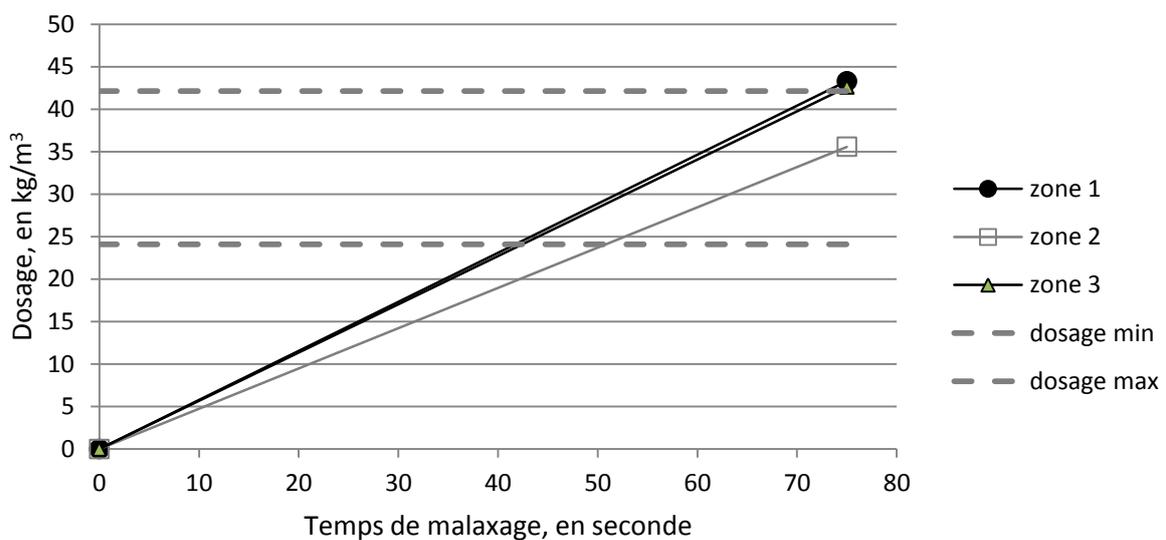
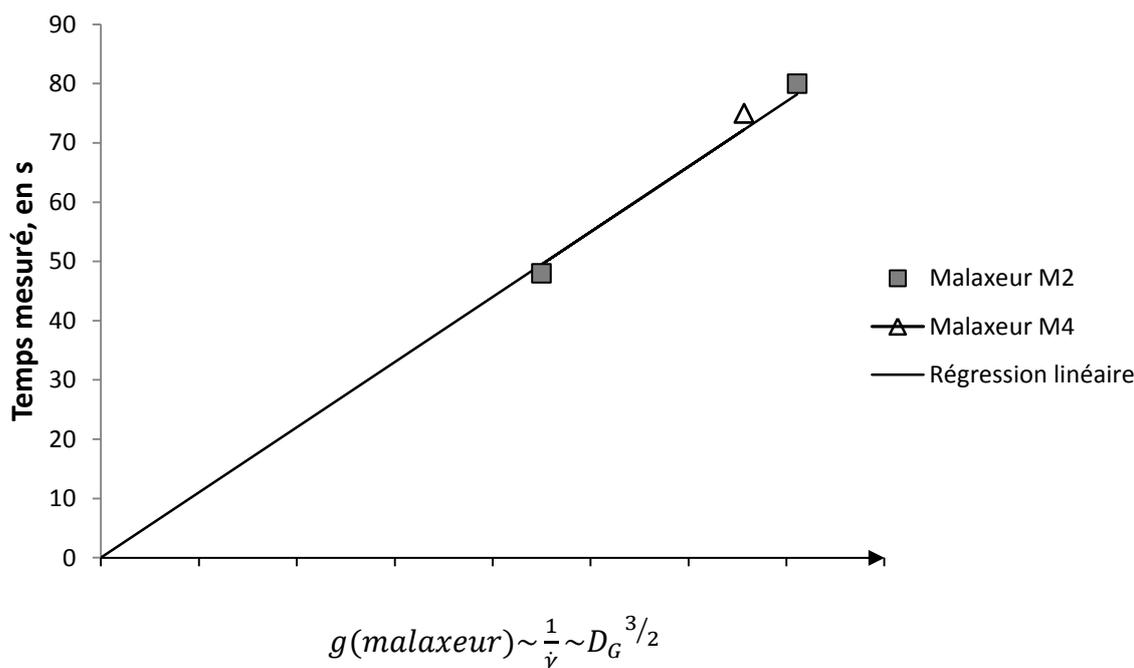


Figure 4.23 : Dispersion des fibres en fonction du temps - malaxeur M_4

4.5.2. Conclusion sur l'influence du malaxeur

Seuls deux malaxeurs ont été utilisés pour fabriquer des granulés et des bétons fibrés. Une corrélation a cependant pu être faite entre les temps de dispersion des fibres dans chacun des appareils et le diamètre des granulés formés, comme le montre la Figure 4.24.

Figure 4.24 : Temps de dispersion pour les malaxeurs M₂ et M₄

Le lien entre temps de dispersion, cisaillement et diamètre de granulé semble donc robuste et permet de prédire les temps nécessaires à l'homogénéisation des fibres dans le mélange en fonction du malaxeur et en l'absence d'information sur la cinétique de ces appareils.

4.6. Bilan de la campagne expérimentale

En conclusion sur ce chapitre, il est utile de rappeler que cette campagne expérimentale n'a été possible que grâce au dispositif expérimental développé dans le chapitre 3. Ces essais confirment la fiabilité et la facilité d'utilisation de la Rhobox. L'Annexe 6 propose une procédure de mesure établie à partir de ces deux chapitres.

La conductivité électrolytique influence légèrement les mesures mais cette influence peut être estimable, et donc ne pas gêner la compréhension des phénomènes de dispersion des fibres.

Différents paramètres ont été testés, concernant les fibres, le béton, le process de malaxage et le malaxeur utilisé. Les mesures faites ont permis de mettre en évidence l'influence des fibres, du malaxeur utilisé et de la vitesse de celui-ci. Ces résultats ont permis d'affirmer que la dispersion des fibres dépend principalement de l'association des mécanismes de convection et de diffusion (4.1.2.1), conformément à l'expression (4.28).

$$t_{diff} \sim \left(\frac{L}{\phi_f a_f} \right)^{2/3} \frac{1}{\dot{\gamma}} \sim f(\text{fibres})g(\text{malaxeur}) \quad (4.28)$$

Le paramètre a_f n'est pas connu pour une fibre mais il concerne vraisemblablement le facteur d'aspect r de la fibre (cf § 4.2.3). Davantage d'essais avec des fibres ayant d'autres facteurs d'aspect pourraient donc être menés pour déterminer l'expression de a_f dans le cas des fibres.

Le cisaillement $\dot{\gamma}$ dépend de la vitesse de malaxage mais aussi de la configuration géométrique du malaxeur. Le diamètre moyen des granulés permet de s'affranchir de ces aspects et d'estimer le temps de malaxage nécessaire à la bonne répartition des fibres.

Ce chapitre a été l'occasion de montrer que certains paramètres supposés comme ayant une influence importante sur la dispersion des fibres n'en ont finalement pas. La dispersion des fibres dépend uniquement du malaxeur et des fibres, or ces paramètres sont accessibles par les essais présentés dans ces travaux. Des tests réalisés dans d'autres malaxeurs et avec d'autres fibres permettraient de valider définitivement les mécanismes de répartition des fibres pendant le malaxage.

Conclusion générale

L'étude de la littérature existante et des textes normatifs concernant le malaxage des bétons fibrés a mis en évidence des lacunes qui ne permettent donc pas de valider le lien empirique établi entre efficacité de malaxage et qualité du produit final. Ce constat a mis en évidence trois problématiques auxquelles nous avons tenté de répondre.

1) Comment évaluer l'efficacité d'un malaxeur ?

2) Comment connaître la dispersion des fibres pendant le malaxage ?

3) Le lien entre efficacité de malaxeur et homogénéité de dispersion est-il avéré ?

Le deuxième chapitre est dédié à l'estimation de l'efficacité du malaxeur. Inspiré des techniques de granulation humide qui mettent en compétition agglomération des poudres grâce à un liquide et abrasion de ces agglomérats causée par la capacité de cisaillement du mélangeur pour créer des granulés d'une taille donnée, ce chapitre propose d'établir un parallèle avec des matériaux cimentaires. Plusieurs coulis en phase pendulaire ont donc été fabriqués, avec un faible rapport E/C, afin de rester dans un état pendulaire. Plusieurs paramètres ont été testés, en termes de formulation comme en termes de procédé. L'analyse granulométrique de l'ensemble des coulis a révélé la légitimité du diamètre moyen à représenter un coulis en phase pendulaire donné. Cette simplification des résultats a permis de mettre en évidence que ce diamètre moyen correspondait à un équilibre entre les énergies de cohésion et l'énergie cinétique. Des essais réalisés dans d'autres malaxeurs ont permis une comparaison de ces mélangeurs grâce au diamètre moyen des granulés formés. L'étude de certains paramètres mériterait d'être approfondie mais l'application des principes de la granulation humide sur des matériaux cimentaires fournit de bonnes indications concernant la hiérarchisation de l'intensité de cisaillement des malaxeurs.

Le troisième chapitre est consacré au développement de la méthode de mesure de dispersion de fibres. Basé sur une mesure de résistivité électrique, le dispositif retenu a été adapté pour convenir à des mesures dans les bétons pendant le malaxage. Une boîte d'isolation des mesures a ainsi été créée et pourrait être améliorée pour être utilisable dans des malaxeurs aux géométries plus complexes (cuve conique par exemple). La relation entre

teneur en fibres et résistivité électrique a été établie et des artefacts de mesure liés à l'évolution de la résistivité électrique du béton pendant la phase d'hydratation ont été révélés et pris en compte. Enfin, un test réalisé dans un contexte industriel a permis de valider cette méthode et la possibilité de son utilisation par les fabricants de béton.

Le dernier chapitre consiste en des mesures de dispersion de fibres dans des gâchées de béton ayant été fabriquées selon différents paramètres. Un rappel concernant les mécanismes de mélange de diffusion et de convection permet de mettre en évidence l'importance des fibres et du malaxeur utilisé dans la dispersion des fibres. Les résultats obtenus dans le chapitre 2 ont permis d'estimer le temps nécessaire à la dispersion des fibres en fonction du cisaillement du malaxeur, via le diamètre moyen obtenu dans les malaxeurs concernés. Les essais présentés dans ce chapitre ont permis de montrer que la convection et la diffusion étaient à l'origine de la dispersion des fibres. Des essais complémentaires, avec d'autres fibres et dans d'autres malaxeurs permettraient de renforcer les conclusions tirées de cette campagne expérimentale.

Ce travail est à considérer comme une étape dans la compréhension du malaxage des bétons. Des analyses dimensionnelles ont permis de mettre en évidence l'intervention de phénomènes physiques. Ainsi, la cohésion capillaire et le cisaillement sont à l'origine de granulés aux dimensions caractéristiques. La répartition des fibres est dictée par des mécanismes de convection et de diffusion, mécanismes étudiés et connus dans le cadre d'applications différentes. Ces premières informations permettent de déterminer quel paramètre est susceptible d'avoir une influence et dans quel sens cette influence conditionnera le résultat final. Des essais supplémentaires seraient nécessaires pour obtenir des relations numériques et prédire de manière quantitative l'impact d'un paramètre sur le matériau.

Bibliographie

[AFGC '02] AFGC-SETRA. Bétons fibrés à ultra hautes performances, recommandations provisoires. 2002, disponible sur (consulté le 19/05/2011) : <http://www.afgc.asso.fr/images/stories/pub/Betons_fibres.pdf>

[BOUBAKI'13] : BOUBAKI N. Détection de cavités par deux méthodes géophysiques : radar de sol et mesures de résistivités électriques. Géophysique. Université Paris-Est, 2013, 153p.

[BRACHET'76] : BRACHET M. Vers un contrôle de qualité non conventionnel des bétons hydrauliques : Introduction. Annales de l'institut Technique du bâtiment et des travaux publics, 1976, Vol 336, pp 95-96.

[BRESSION'06] : BRESSION A. Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge. Génie civil. Université de Laval, 2006

[CAZACLIU'06] : CAZACLIU B, LOUKILI A, ABDI B, LE ROY R. Malaxage d'un béton fibré à ultra hautes performances. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2006, n° 261-262, pp 107-120

[CAZACLIU'13] : CAZACLIU B. Mixing self compacting concrete : mixers, mixing methods, mixing time. In : RILEM. Rheology and Processing of Construction Materials, 2 au 4 septembre 2013, Paris, FRANCE. RILEM Publications, 2013,396p.

[CEREZO'05] : CEREZO V. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique. Génie civil. Lyon. Ecole nationale des travaux publics de l'état, 2005, 240 pages.

[CHARONNAT'03] : CHARONNAT Y, BEITZEL H., BEITZEL M. RILEM TC 150 ECM : Efficiency of concrete mixers. Assessment and classification of performance mixers – Final report. Materials and Structures, 2003, Vol 36, pp 250-264.

[CHARONNAT'76] : CHARONNAT Y. Vers un contrôle de qualité non conventionnel des bétons hydrauliques : L'enregistrement des paramètres de fabrication du béton, matériel utilisé et interprétation des résultats. Annales de l'institut Technique du bâtiment et des travaux publics, 1976, Vol 336, pp 95-96.

[CHARONNAT'91] : CHARONNAT Y., TEILLET R. BRUNEAUD S. Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges. Une nouvelle jeunesse pour le wattmètre différentiel. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. 1991, Vol 174, pp 5-16.

[CHEFDEBIEN'13] : CHEFDEBIEN A. BERNARDI S. ROBERT F. ROUGEAU P. Réalisation d'éléments minces précontraints en BFUP. 277P. CERIB, 2013, 34p.

[CHEN'93] : CHEN P-W, CHUNG DDL. Concrete Reinforced with up to 0,2 vol % of short carbon fibres. Composites, 1993, vol. 24, n°1, pp 33-52.

[CHITU'09] : CHITU T-M. Granulation humide des poudres cohesive : Rhéologie, mécanismes de croissance et tenue mécanique des granules. Génie des procédés. Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2009, 228p.

[CHOPIN'02] : CHOPIN D. Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants. Optimisation du temps de fabrication. Génie civil. Nantes : Ecole Centrale de Nantes, 2002, 207p.

[CHUNG'01] : CHUNG.D; CAO.J Improving the dispersion of steel fibers in cement mortar by the addition of silane, Cement and Concrete Research, 2001, n°31, pp 309-311.

[CHUNG'05] : CHUNG D.D.L. Dispersion of Short Fibers in Cement. Journal of materials in civil engineering, Juillet/Août 2005. pp 379-383

[COLLET'10] : COLLET R. Critères de malaxabilité des mélanges granulaires humides. Génie des procédés. Toulouse. Université de toulouse, 2010, 172 p.

[DE LARRARD'94] : DE LARRARD, F., SEDRAN, T. (1994). Optimization of ultra-high performance concrete by using a packing model, Cement and Concrete Research, vol. 24, n°6, pp. 997-1009.

[DE LARRARD'98] : DE LARRARD F., FERRARIS C., SEDRAN T. Fresh concrete : a Herschel-Bulkley Material. Materials and Structures, vol 31, 1998, pp 494-498.

[DEHAUDT'08] : DEHAUDT S. Bétons frais et bétons durcis : Bétons de fibres métalliques et de polymères In : CERIB Memento Production, 2008

[DEHAUDT'10] : DEHAUDT S. Intérêt des fibres autres que métalliques. MA019. CERIB, 2010, 64 pages

[DEMEYRE'07] : DEMEYRE J-F. Caractérisation de l'homogénéité de mélange de poudre et de l'agitation en mélangeur triaxe ®. Génie des Procédés et de l'environnement. Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007, 168p.

[EMBORG'99] : EMBORG Rheology tests for self-compacting concrete-How useful are they for the design of concrete mix for full-scale production, In Proceedings of the 1st international RILEM Symposium, 1999, Stockholm, pp95-105.

[ENNIS'91] : ENNIS J. TARDOS G. PFEFFER R.A micro-level based characterization of granulation phenomena. Powder Technology. 1991. Vol 65. pp 257-272.

-
- [ESTELLE'08]** : ESTELLE P., LANOS C., PERROT A. et al. Processing the vane shear flow data from Couette analogy. *In*: Applied Rheology. Vol 18. N°3. 2008. 14p.
- [EUROCODE'04]** Norme Européenne. Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : règles générales – Calcul du comportement au feu. En 1992-1-2, 2004, 104 pages.
- [FERRARIS'00]** : BANFILL P., BEAUPRE D., CHAPDELAIN F., DE LARRARD F., DOMONE P., NACHBAUR L., SEDRAN T., WALLEVIK O., WALLEVIK J-E. Comparison of concrete rheometers : International test at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. Edité par Chiara FERRARIS et Lynn BROWER, 147 pages.
- [FERRARIS'01]** : FERRARIS C. Concrete mixing methods and concrete mixers : State of the art. Journal of Research of the Institute of Standards and Technology, 2001, n°106, pp 391-399
- [FLATT'08]** : FLATT R.J, SHOBER I, RAPHAEL E. Conformation of Adsorbed Comb copolymer Dispersants. Langmuir, 2009, vol 25, pp 845-855
- [GAWESKA'04]** : GAWESKA I. Comportement à haute température des BHP – Evolution des principales propriétés mécaniques. Structures et Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004, 183 pages.
- [GRÜNEWALD'04]** : GRÜNEWALD S. Performance-based design of Self Compacting Fibered Reinforced Concrete. Université de Delft, 2004.
- [HANSSON'83]** : HANSSON I. Electrical resistivity measurements of Portland cement based material. Cement and Concrete Research, 1983, Vol 13, pp 675-683
- [IVESON'01]** : IVESON S , LISTER J, HAPGOOD K. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review. Powder technology, 2001, n° 117, pp 3-39
- [JCSE'08]** : JSCE (Japan Society Civil Engineers) Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. 2008, disponible sur http://www.ductal-lafarge.com/Reco_hpfrcc_JSCE_sep08.pdf (consulté le 19 mai 2011)
- [KALIFA'00]** : KALIFA P, MENNETEAU F-D, QUENARD D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cement and Concrete Research. 2000, vol 30, pp 1915-1927
- [KALIFA'01]** : KALIFA P, CHENE G, GALLE C. High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure. Cement and Concrete Research, 2001, 31, pp1487-1499
- [KASPERKIEWICS'77]** : KASPERKIEWICS J .Fibre spacing in steel fibre reinforced composites. Matériaux et Construction, 1977.v.10, n°55, pp 25-31
- [KIRBY'09]** : KIRBY B.J. Passive scalar transport: dispersion, patterning, and mixing *In*: Micro and Nanoscale Fluid mechanics transport in microfluidic devices , 2009,
-

<http://www.kirbyresearch.com/index.cfm/wrap/textbook/microfluidicsnanofluidics.html>

(consulté le 13.01.2014)

[KNACK'09] : KNACK I. Nouvelle fibre PP aux propriétés exceptionnelles de fonte pour une meilleure protection contre l'incendie dans la construction en béton. Préfa Béton International, 2009, vol n° 5, pp 56-61

[KNIGHT'93] : KNIGHT P. An investigation of the kinetics of granulation using a high shear mixer. Powder technology. 1993. Vol 77. Pp 159-169

[KRAUSE'10] : KRAUSE M. HAUSHERR J-M. BURGETH B. Determination of the fibre orientation in composites using the structure tensor and local X-ray transform. Journal of Material Science. 2010, vol n°45, pp 888-896

[LATASTE'02] : LATASTE J-F. Évaluation non destructive de l'état d'endommagement des ouvrages en béton armé par mesures de résistivité électrique. Mécanique. Université de Bordeaux, 2002.

[LATASTE'07] : LATASTE J-F., BEHLOUL M., BREYSSE.D Caractérisation d'un béton fibré par méthode non destructive. In : 25° rencontre de l'Association Universitaire du Génie civil, 23-25 mai 2007, Bordeaux

[LE'07] : LE N-D. Amélioration de la régularité du béton en production. Structures et Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007, 247 p.

[LEIGTON'87] : LEIGTON D., ACRIVOS A., "Measurement of shear-induced self-diffusion in concentrated suspensions of spheres," J. Fluid Mech, 1987, vol n° 177, pp 109-131.

[LEKMINE'11] : LEKMINE G., 2011, Quantification des paramètres de transport des solutés en milieux poreux par tomographie de résistivité électrique : développements méthodologiques et expérimentaux : Ph.D. thesis, Université Paris Sud.

[LIAN'93] : LIAN G., Thornton C., ADAMS M-J. A theoretical study of the liquid bridge force between two rigid spherical bodies. Journal of Colloid and Interface Science, 1993, Vol 161, pp 138-147.

[MARTINIE'10] : MARTINIE L. Comportement rhéologique et mise en œuvre des matériaux cimentaires fibrés. Structure et matériaux. Université Paris Est, 2010, 193 p.

[McCARTER'84] : McCARTER W., CURRAN P, The Electrical Response Characteristics of Setting Cement Paste, Magazine of Concrete Research, 1984,V. 36, No. 126, p42

[MINES d'ALBI'08] : Sciences et Technologies des Poudres. Disponible sur <http://nte.mines-albi.fr/STP/co/STP_web.html> (consulté le 14/05/2014)

[NF EN 1170-2'98] : AFNOR Produits préfabriqués en béton – Méthode d'essai des composites ciment-verre : Partie 2 : Mesure de la teneur en fibres du CCV frais, méthode dite « Séparation par lavage ». NF EN 1170-2, 1998, 10p

[NF EN 12350-2'10] : AFNOR. Essais pour béton frais : Partie 2 : Essai d'affaissement. NF EN 12350-2, 2010, 13p.

[NF EN 12350-8'10] : AFNOR. Essai pour béton frais : Partie 8 : Béton auto-plaçant — Essai d'étalement au cône d'Abrams. NF EN 12350-8,2010, 10p.

[NF EN 12350-9'10] : AFNOR. Essai pour béton frais : Partie 9 : Béton auto-plaçant — Essai d'écoulement à l'entonnoir en V. NF EN 12350-9, 2010, 9p.

[NF EN 14650 '05] : AFNOR Produits préfabriqués en béton – Règles générales pour le contrôle de la production en usine de béton de fibres métalliques. NF EN 14650. 2005, 9p.

[NF EN 14651'05] : AFNOR Méthode d'essai du béton de fibres métalliques – Mesurage de la résistance à la traction par flexion (limite de proportionnalité (LOP), résistance résiduelle). NF EN 14651, 2005 , 17p.

[NF EN 14651'05] : AFNOR Méthode d'essai du béton de fibres métalliques – Mesurage de la teneur en fibres du béton frais ou durci. NF EN 14721, 2005, 10p

[NF EN 14845-1'07] : AFNOR Méthodes d'essais des fibres dans le béton – Partie 1 : Bétons de référence. NF EN 14845-1, 2007, 12p

[NF EN 14845-2'07] : AFNOR Méthodes d'essais des fibres dans le béton – Partie 2 : Effets sur le béton. NF EN 14845-2, 2007, 7p

[NF EN 14887-2 '07] : AFNOR Béton projeté – Partie 2 : Exécution. NF EN 14487-2, 2007, 19p.

[NF EN 14889-1'06] : AFNOR Fibres pour béton – Partie 1 : Fibres d'acier – Définition, spécifications et conformité. NF EN 14889-1, 2006, 23p.

[NF EN 14889-2'06] : AFNOR Fibres pour béton – Partie 2 : Fibres de polymère – Définition, spécification et conformité. NF EN 14889-2, 2006, 24p

[NF EN 15422'08] : AFNOR Produits préfabriqués en béton – Spécification des fibres de verre destinées au renforcement des mortiers et des bétons. NF EN 15422, 2008, 10p.

[NF EN 18650-2'06] : AFNOR Machines et matériels pour la construction de bâtiments. Malaxeurs de béton. Partie 2 – Mode opératoire pour la détermination de l'efficacité de malaxage. NF EN 18650-2, 2006, 27p.

[NF EN 934-2'09] : AFNOR Adjuvants pour béton, mortier et coulis. Partie 2 : Adjuvants pour bétons — Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage. NF EN 934-2, 2009, 24p.

[NF T 25-003'92] : AFNOR Fibres de renfort. Fibres de verre, de carbone et d'aramide. NF T 25-003, 1992, 12p.

[NGUYEN'10] : NGUYEN. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre. Génie civil. Lorient. Université Bretagne Sud, 2010, 168 pages.

[OVARLEZ'05] : OVARLEZ G., BERTRAND F., RODTS F. Local determination of the constitutive law of a dense suspension of non-colloidal particules through MRI. Journal of Rheology, vol 50, 2006, pp 259-292

[PARANT'03] : PARANT E Mécaniques d'endommagement et comportements mécaniques d'un composite cimentaire fibré multi-échelle sous sollicitations sévères : fatigue, choc, corrosion . Structure et matériaux. Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 2003 248 p

[PIETSCH'08] : PIETSCH W. Agglomeration Processes, Phenomena, Technologies, Equipment. WILEY, 2008, 622 p.

[POWERS'48] POWERS T, BROWNYARD T, Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, Research Laboratories of the Portland Cement Association, Chicago, Bulletin, vol. 22, 1948.

[RAMAKER'98] RAMAKER J. ALBADA JEGERSMA M. VONK P. et al. Scale down of a high shear palletisation process : Flow profil and growth kinetics. International Journal of Pharmaceutics. 1998. Vol 166. pp89-97.

[REGULIER'03] REGULIER E. Application de la stéréologie aux neurosciences. <http://ditwww.epfl.ch/SIC/SA/publications/FI03/fi-sp-3/sp-3-page43.html>, consulté le 12/05/2011

[REY'05] : REY E. Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques Géophysique appliquée – Géotechnique L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1, 2005, 254 pages

[RICHARD'95] Richard, P., Cheyrezy, M. (1995) – Les bétons de poudres réactives, Annales de l'ITBTP, 532, pp. 85-102

[ROSSI'09] ROSSI P. Fibres d'acier ou fibres synthétiques ? Préfa Béton International, 2009, n°5, pp 52-61.

[ROUSSEL'06] : ROUSSEL N. , COUSSOT P.. Ecoulement d'affaissement et d'étalement : modélisation, analyse et limites pratiques. In : Revue Européenne de Génie Civil. Volume X. n°1. 2006. 21p.

[SALEH'09a] : SALEH K. GUIGON P. Mise en oeuvre des poudres – Granulation humide : bases et théorie. In : Techniques de l'ingénieur. Principes de Formulation. J2253. 2009. 18 pages.

[SALEH'09b] : SALEH K. GUIGON P. Mise en oeuvre des poudres – Technique de granulation humide et liant. In : Techniques de l'ingénieur. Principes de Formulation. J2254. 2009. 24 pages.

[SCHOFIELD'71] : SCHOFIELD C. Assessing mixtures by autocorrelation, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 1971, vol 48, pp28-34.

[SEVILLE et al'00] : SEVILLE J.P.K. WILLET C.D.KNIGHT P.C. Interparticles forces in fluidisation : a review. Powder technology, 2000, vol 113, n°3, pp 261-268

[SMIRANI'06] : SMIRANI N. Etude cinétique du procédé de granulation humide en mélangeur à haut cisaillement. Génie des procédés et des produits, Institut national polytechnique de Lorraine, 2006, 175p.

[SOULIE'05] : SOULIE F. Cohésion par capillarité et comportement mécanique de milieux granulaires. Mécanique, Génie Mécanique et Génie civil, Montpellier. Université de Montpellier II, 2005, 139p.

[STROEVEN'78a] : STROEVEN P. Use of radiography-image analysis for steel fibre reinforced concrete In : Proceedings RILEM, 1978, p875-898

[STROEVEN'78b] : STROEVEN P Morphometry of fibre reinforced cementitious materials. Part I : efficiency and spacing in idealized structures. Materials and Structures. 1978, vol 11, n°1, pp31-38

[TAMAS'82] : TAMAS F. Electrical conductivity of cement pastes. Cement and Concrete Research, 1982, Vol 12, pp 115-120.

[TAMAS'87] : TAMAS F, FARKAS E. VOROS M. Low-frequency electrical conductivity of cement, clinker and clinker mineral pastes. Cement and Concrete Research, 1987, Vol 17, pp 340-348

[TATERSALL'83] : TATERSALL G, BANFILL P. The rheology of fresh concrete. Pitman, London, 356, 1983

[TELFORD'90] : TELFORD W.M., GELDART L.P., SHERIFF R.E. Applied geophysics, second edition. Press syndicate of the University of Cambridge, 1990, 760 pages.

[TOPÇU'12] : TOPÇU I B. UYGUNOGLU T. HOCAOGLU I. Electrical conductivity of setting cement paste with different mineral admixtures. Construction and Building Materials, 2012, vol 28, pp414–420

[UTSI'03] : UTSI S., EMBORG M., CARLSWARDJ. Relation between workability and rheological parameters, In : Proceedings RILEM. Self Compacting Concrete, août 2003, Reykjavik, ISLANDE. RILEM Publications, 2003,pp 154-164.

[WATANABE'02] : WATANABE T. Evaluation of fiber orientation in ferromagnetic short-fiber reinforced composites by Magnetic Anisotropy. Journal of Composites material, 2002,vol 36, n°8, p.915-923

[ZAK'00] : ZAK G. HABERER M. PARK C.B. Estimation of average fibre length in short-fiber composites by a two-section method. Composites Science and Technology , 2000, vol 60 pp 1763-1772.

Annexes

Annexe 1 Les matériaux	3
Annexe 1.1 Les liants	3
Annexe 1.1.1 Ciment CEM I 52,5 N CE CP2NF Blanc.....	3
Annexe 1.1.1.1 Fiche technique	3
Annexe 1.1.1.2. Granulométrie ciment blanc	4
Annexe 1.1.2. Ciment gris CEM I 52,5 N CE PM ES CP2 NF.....	10
Annexe 1.1.2.1 Fiche technique	10
Annexe 1.1.2.2 Granulométrie	11
Annexe 1.1.3 Fiche technique du ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF « couvrot ».....	17
Annexe 1.1.4 Fiche technique du filler calcaire betocarb P2	18
Annexe 1.2 Les granulats	19
Annexe 1.2.1 Granulométrie du Silicieux roulé loire 0-5.....	19
Annexe 1.2.2 Granulométrie du Silicieux roulé loire 5-12	19
Annexe 1.2.3 Granulométrie du Calcaire concassé 0-4.....	20
Annexe 1.2.4 Granulométrie du Calcaire concassé 5-12	20
Annexe 1.3 Les adjuvants	21
Annexe 1.3.1 Fiche technique du Glenium ACE 43.....	21
Annexe 1.3.2 Fiche technique du Glenium Sky 537.....	23
Annexe 1.4 Les fibres.....	25
Annexe 1.4.1 Fiche technique des fibres Sika fibre force viscochape ®(Sika)	25
Annexe 1.4.2 Fiche technique BarChip 48 (Elasto Plastic Concrete)	27
Annexe 1.4.3 Fiche technique des fibres Fibrin 1950 D (Chryso)	29
Annexe 1.4.4 Fiche technique des fibres Chryso ® Fibre S50 (Chryso)	31

Annexe 1.4.5 Fiche technique des fibres Dramix [®] (Bekaert).....	33
Annexe 1.4.6 Fiche technique des fibres Dramix [®] 80/60GG (Bekaert)	34
Annexe 1.4.7 Fiche technique des fibres HE 55/35 (Arcelor Mittal)	35
Annexe 1.4.8 Fiche technique des fibres Medafac (Granitex).....	36
Annexe 2 Empilement granulaire.....	39
Annexe 2.1 Empilement théorique	39
Annexe 2.1.1 Empilement des sphères G	39
Annexe 2.1.2 Dimension et positionnement des sphères M^+ :	41
Annexe 2.1.3 Dimension et positionnement des sphères M^- :	43
Annexe 2.1.4 Empilement des sphères F.....	47
Annexe 2.2 Empilement granulaire réel.....	49
Annexe 3 Détermination de la compacité de l'empilement granulaire	55
Annexe 4 Détermination de la masse volumique des coulis en phase pendulaire	57
Annexe 5 Détermination des vitesses linéaires en bout de pale	61
Annexe 6 Estimation de la teneur en fibre d'un béton dans le malaxeur	63
Annexe 7 Comparaison d'intensité de cisaillement de malaxeur.....	65

Annexe 1 Les matériaux

Annexe 1.1 Les liants

Annexe 1.1.1 Ciment CEM I 52,5 N CE CP2NF Blanc

Annexe 1.1.1.1 Fiche technique



CEM I 52,5 N CE CP2 NF «blanc»

NF EN 197-1 NF P 15-318

NF EN 196-10

Fiche produit
techniqueN° de certificat CE :
0333-CPD-1202

• Constituants et composition du ciment

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs (g/t)	
Clinker	95	Calcaire (LL)	5	Plâtre	2,9	Agent de mouture	AMA14 1530
C3S	67,2	C4AF	0,7				
C3A	6,27	C2S	21,1				

• Caractéristiques physiques et mécaniques

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1)		Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002)	
		minimum	maximum	minimum	maximum
■ Résistance à la compression 1 jour (MPa)	23,0				
■ Résistance à la compression 2 jours (MPa)	32	18,0		18	
■ Résistance à la compression 28 jours (MPa)	61,7	50			
■ Retrait à 28 jours (µm/m)	694				
■ Début de prise (min)	101	40		60	
■ Stabilité (mm)	0,7		10		10
■ Masse volumique (g/cm ³)	3,12				
■ Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4220				
■ Q12h (J/g)	238				
■ Teinte (L')	93,3				

• Caractéristiques chimiques (%)

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
■ SiO ₂	23,90		S-	0,10	0,20	■ Insolubles	0,11	5,00
■ Al ₂ O ₃	2,34		Cl-	0,10	0,10	■ CO ₂	0,72	
■ Fe ₂ O ₃	0,24		Perte au feu	1,72	5,00	■ CaO libre	1,55	
■ CaO	68,10		TiO ₂	0,02			Valeur usine moyenne	Coef var
■ MgO	0,52		Cr VI	2 PPM	2 PPM	■ Alcalins actifs	0,59	0,19
■ K ₂ O	0,55		P ₂ O ₅	ND		■ Na ₂ OEq	0,59	
■ Na ₂ O	0,22		Non dosé	0,27				
■ SO ₃	2,12	4,00						
Total : 100,2								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ Caractéristique modifiée / fiche précédente ND : non dosé Révision N° : 19 du 15/03/2010

Le Teil : livraison en Sac et en Vrac
Dépôt de Bonneuil : Livraison en vrac

Annexe 1.1.1.2. Granulométrie ciment blanc

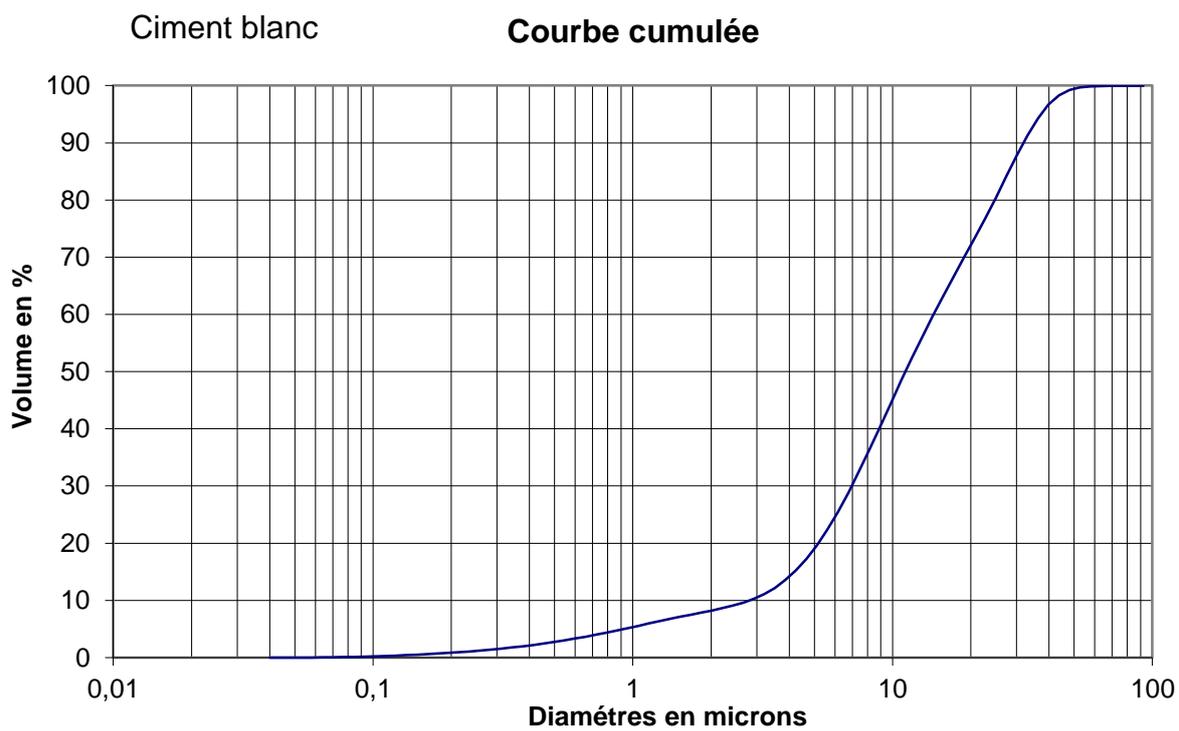
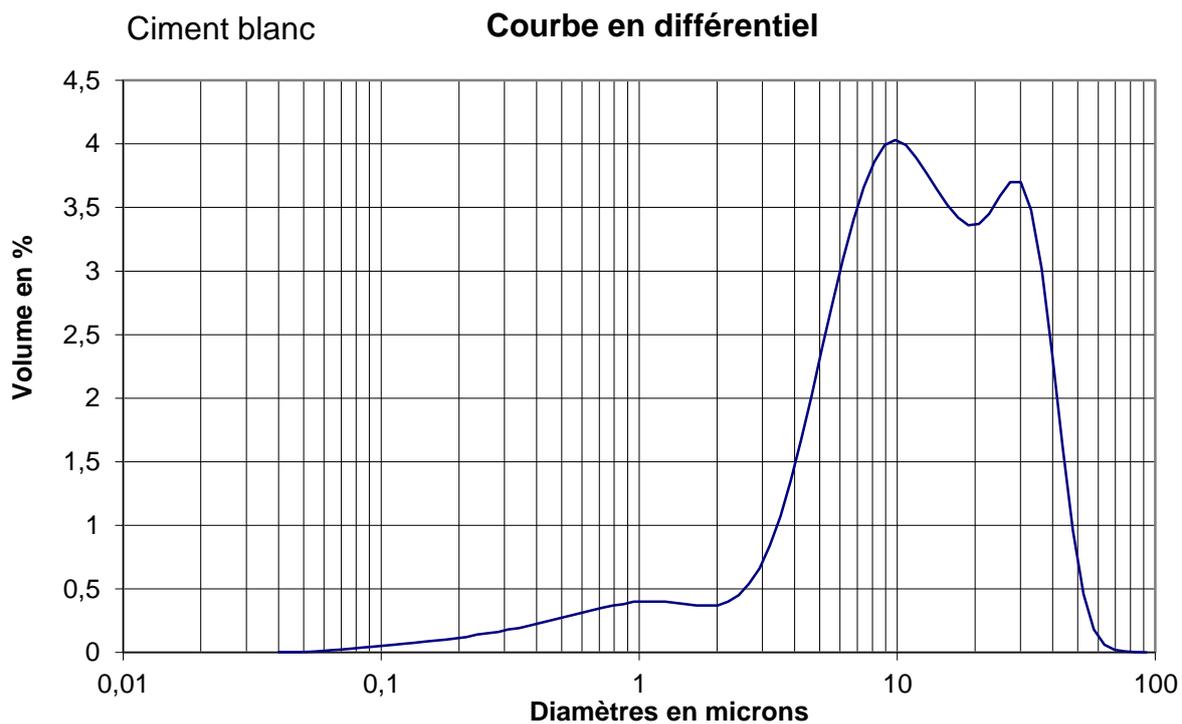
ANALYSE GRANULOMETRIQUE LASER

Dossier : CERIB
 Ciment blanc CEM I 52,5 N CE CP2
 Echantillon : NF
 Provenance : Prélèvement n°1
 Nos réf : D-11.32
 Date : 15-juin-11

Echantillon mis en suspension dans de l'éthanol

Particules Diamètre en μm	Volume Différentiel en %	Volume Cumulé en %	Volume en %	Particules Diamètre en $\mu\text{m} <$
0,04	0,00085	0,001	10	3,08 μm
0,044	0,0012	0,002	25	6,67 μm
0,048	0,0021	0,004	50	12,30 μm
0,053	0,0044	0,009	75	23,77 μm
0,058	0,0091	0,018	90	35,03 μm
0,064	0,016	0,034		
0,07	0,023	0,057		
0,077	0,03	0,087		
0,084	0,037	0,124	Moyenne	16,11 μm
0,093	0,045	0,169	Médiane	12,30 μm
0,102	0,053	0,222	Mode	10,29 μm
0,112	0,06	0,282		
0,122	0,068	0,350		
0,134	0,076	0,426		
0,148	0,085	0,511		
0,162	0,093	0,604		
0,178	0,1	0,704		
0,195	0,11	0,814		
0,214	0,12	0,934		
0,235	0,14	1,074		
0,258	0,15	1,224		
0,284	0,16	1,384		
0,311	0,18	1,564		
0,342	0,19	1,754		
0,375	0,21	1,964		
0,412	0,23	2,194		
0,452	0,25	2,444		
0,496	0,27	2,714		
0,545	0,29	3,004		
0,598	0,31	3,314		
0,656	0,33	3,644		
0,721	0,35	3,994		
0,791	0,37	4,364		
0,868	0,38	4,744		
0,953	0,4	5,144		
1,047	0,4	5,544		
1,149	0,4	5,944		
1,261	0,4	6,344		
1,384	0,39	6,734		

1,52	0,38	7,114
1,668	0,37	7,484
1,832	0,37	7,854
2,011	0,37	8,224
2,207	0,4	8,624
2,423	0,45	9,074
2,66	0,54	9,614
2,92	0,66	10,274
3,205	0,84	11,114
3,519	1,07	12,184
3,863	1,35	13,534
4,24	1,67	15,204
4,655	2,02	17,224
5,11	2,39	19,614
5,61	2,75	22,364
6,158	3,09	25,454
6,76	3,4	28,854
7,421	3,66	32,514
8,147	3,86	36,374
8,943	3,99	40,364
9,818	4,03	44,394
10,78	3,99	48,384
11,83	3,89	52,274
12,99	3,77	56,044
14,26	3,64	59,684
15,65	3,52	63,204
17,18	3,42	66,624
18,86	3,36	69,984
20,71	3,37	73,354
22,73	3,45	76,804
24,95	3,59	80,394
27,39	3,7	84,094
30,07	3,7	87,794
33,01	3,48	91,274
36,24	3,02	94,294
39,78	2,36	96,654
43,67	1,62	98,274
47,94	0,96	99,234
52,62	0,46	99,694
57,77	0,18	99,874
63,41	0,061	99,935
69,61	0,019	99,954
76,42	0,0059	99,960
83,89	0,0012	99,961
92,09	0,00011	99,961



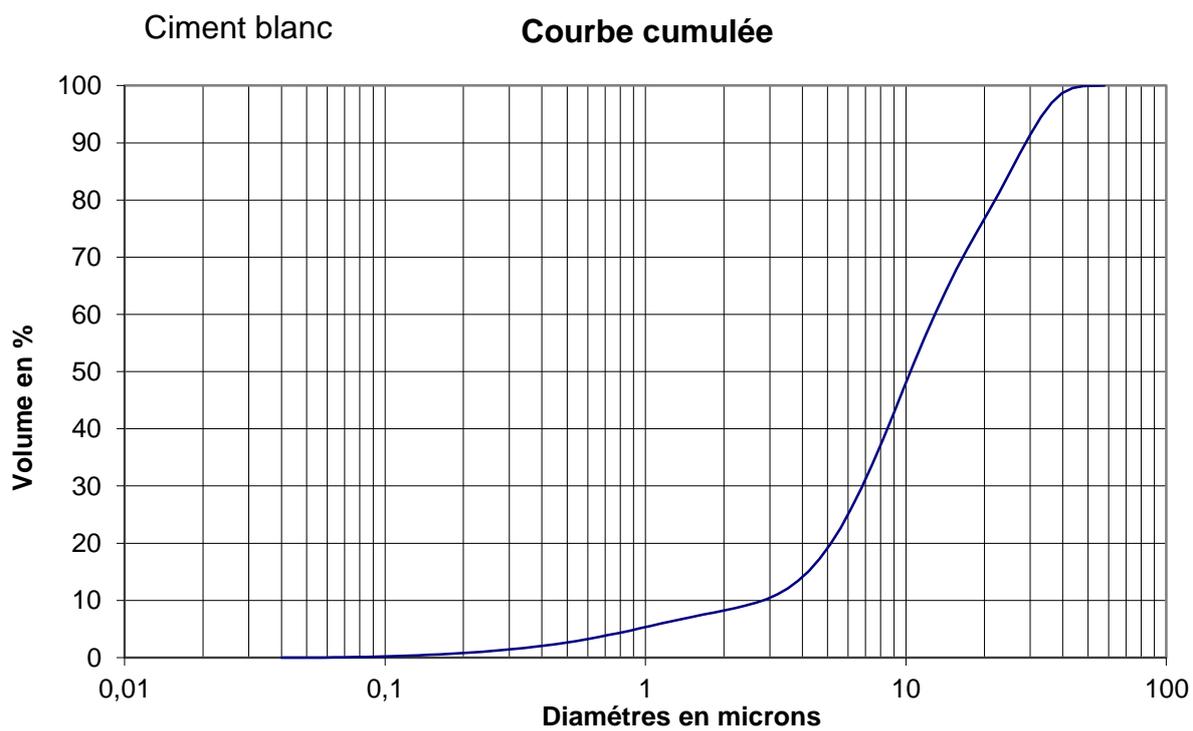
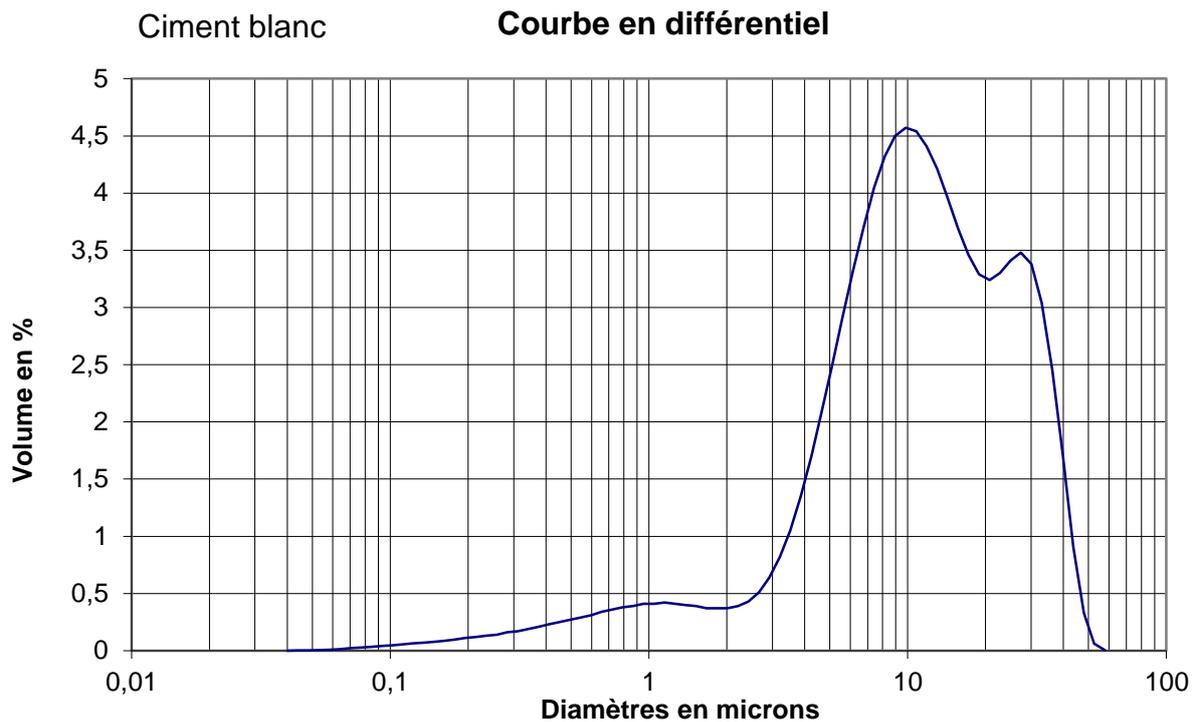
ANALYSE GRANULOMETRIQUE LASER

Dossier : CERIB
Ciment blanc CEM I 52,5 N CE CP2
Echantillon : NF
Provenance : Prélèvement n°2
Nos réf : D-11.32
Date : 15-juin-11

Echantillon mis en suspension dans de l'éthanol

Particules Diamètre en μm	Volume Différentiel en %	Volume Cumulé en %	Volume en %	Particules Diamètre en $\mu\text{m} <$
0,04	0,00075	0,001	10	3,11 μm
0,044	0,0011	0,002	25	6,58 μm
0,048	0,0019	0,004	50	11,44 μm
0,053	0,0039	0,008	75	20,89 μm
0,058	0,0081	0,016	90	31,70 μm
0,064	0,014	0,030		
0,07	0,021	0,051		
0,077	0,027	0,078		
0,084	0,033	0,111	Moyenne	14,64 μm
0,093	0,04	0,151	Médiane	11,44 μm
0,102	0,048	0,199	Mode	10,29 μm
0,112	0,055	0,254		
0,122	0,063	0,317		
0,134	0,07	0,387		
0,148	0,079	0,466		
0,162	0,087	0,553		
0,178	0,097	0,650		
0,195	0,11	0,760		
0,214	0,12	0,880		
0,235	0,13	1,010		
0,258	0,14	1,150		
0,284	0,16	1,310		
0,311	0,17	1,480		
0,342	0,19	1,670		
0,375	0,21	1,880		
0,412	0,23	2,110		
0,452	0,25	2,360		
0,496	0,27	2,630		
0,545	0,29	2,920		
0,598	0,31	3,230		
0,656	0,34	3,570		
0,721	0,36	3,930		
0,791	0,38	4,310		
0,868	0,39	4,700		
0,953	0,41	5,110		
1,047	0,41	5,520		
1,149	0,42	5,940		
1,261	0,41	6,350		
1,384	0,4	6,750		
1,52	0,39	7,140		

1,668	0,37	7,510
1,832	0,37	7,880
2,011	0,37	8,250
2,207	0,39	8,640
2,423	0,43	9,070
2,66	0,51	9,580
2,92	0,64	10,220
3,205	0,82	11,040
3,519	1,05	12,090
3,863	1,35	13,440
4,24	1,7	15,140
4,655	2,09	17,230
5,11	2,5	19,730
5,61	2,92	22,650
6,158	3,33	25,980
6,76	3,71	29,690
7,421	4,05	33,740
8,147	4,32	38,060
8,943	4,5	42,560
9,818	4,57	47,130
10,78	4,54	51,670
11,83	4,41	56,080
12,99	4,21	60,290
14,26	3,96	64,250
15,65	3,69	67,940
17,18	3,46	71,400
18,86	3,29	74,690
20,71	3,24	77,930
22,73	3,3	81,230
24,95	3,41	84,640
27,39	3,48	88,120
30,07	3,38	91,500
33,01	3,04	94,540
36,24	2,45	96,990
39,78	1,7	98,690
43,67	0,91	99,600
47,94	0,33	99,930
52,62	0,062	99,992
57,77	0,0046	99,996



Annexe 1.1.2. Ciment gris CEM I 52,5 N CE PM ES CP2 NF

Annexe 1.1.2.1 Fiche technique



CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF

Usine du TEIL

NF EN 197-1 NF P 15-317 XP P15-319 NF P 15-318

NF EN 196-10

Fiche produit
techniqueN° de certificat CE :
0333-CPD-1203

• Constituants et composition du ciment

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs (g/t)	
Clinker	97	Calcaire (LL)	3	Gypse	2,7	Agent de mouture	AMA 14 1300
■ C3S	65,3	■ C4AF	7,14				
■ C3A	4,35	■ C2S	18,6				

• Caractéristiques physiques et mécaniques

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1)		Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002)	
		minimum	maximum	minimum	maximum
■ Résistance à la compression 1 jour (MPa)	19,6				
■ Résistance à la compression 2 jours (MPa)	31,9	18		18	
■ Résistance à la compression 28 jours (MPa)	66,0	50		50	
Retrait à 28 jours (µm/m)	560				
Début de prise (min)	175	40		60	
Stabilité (mm)	0,5		5		5
■ Masse volumique (g/cm ³)	3,16				
■ Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	3590				
■ Q12h (J/g)	183				
■ Q41h (J/g)	288				
■ L*	61,7				

• Caractéristiques chimiques (%)

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318, NF P 15-317, XP P 15-319)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
■ SiO ₂	22,40		S--	< 0,10	0,20	■ Insolubles	0,20	0,75
■ Al ₂ O ₃	2,96	8,00	Cl-	< 0,10	0,10	■ CO ₂	1,00	
■ Fe ₂ O ₃	2,33		Perte au feu	1,59	3,00	■ CaO libre	0,50	
■ CaO	66,60		TiO ₂	ND			Valeur usine moyenne	Coef var (%)
■ MgO	0,95	3,00	Cr VI	< 2 PPM	2 PPM			
■ K ₂ O	0,15		P ₂ O ₅	0,20		■ Alcalins actifs	0,20	0,1
■ Na ₂ O	0,10		Non dosé	0,39		■ Na ₂ OEq	0,20	
■ SO ₃	2,13	2,50	IS	< 23,5	23,50			
Total : 100								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ Caractéristique modifiée / fiche précédente ND : non dosé Révision N° : 17 du 15/03/2010

Le Teil : livraison en sac et en vrac

Annexe 1.1.2.2 Granulométrie

ANALYSE GRANULOMETRIQUE LASER

Dossier : CERIB
Echantillon : Ciment gris CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF
Provenance : Prélèvement n°1
Nos réf : D-11.32
Date : 15-juin-11

Echantillon mis en suspension dans de l'éthanol

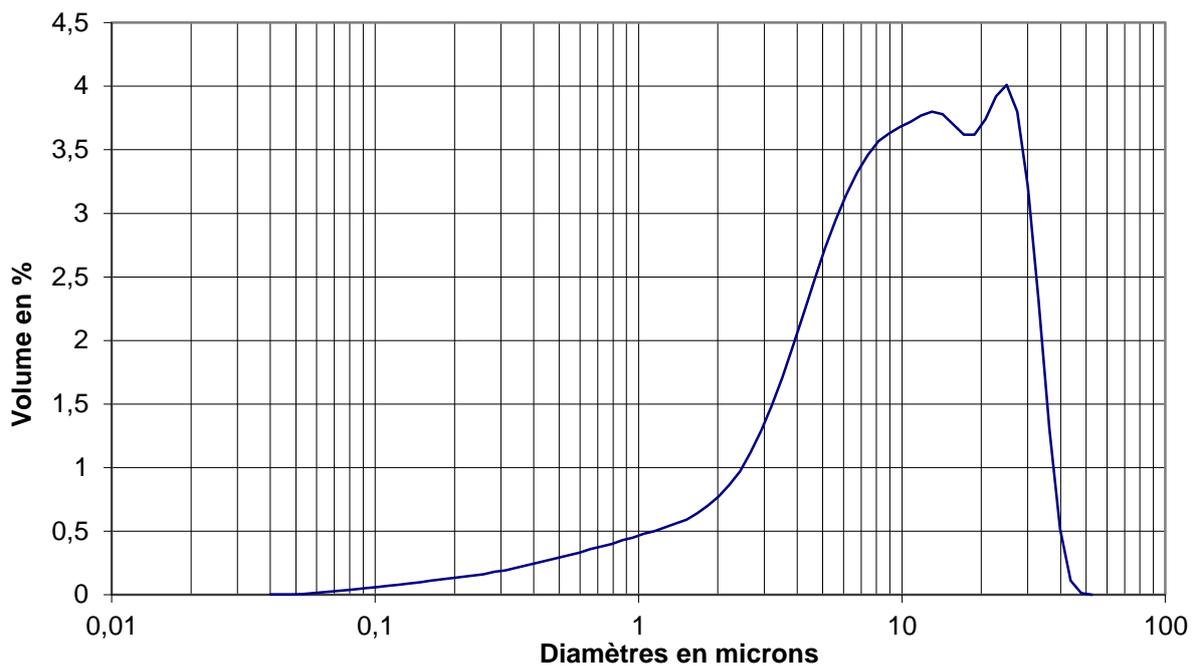
Particules Diamètre en μm	Volume Différentiel en %	Volume Cumulé en %	Volume en %	Particules Diamètre en $\mu\text{m} <$
0,04	0,001	0,001	10	2,095 μm
0,044	0,0014	0,002	25	5,193 μm
0,048	0,0025	0,005	50	10,51 μm
0,053	0,0052	0,010	75	19,66 μm
0,058	0,011	0,021	90	28,29 μm
0,064	0,019	0,040		
0,07	0,027	0,067		
0,077	0,035	0,102		
0,084	0,043	0,145	Moyenne	13,09 μm
0,093	0,052	0,197	Médiane	10,51 μm
0,102	0,061	0,258	Mode	26,14 μm
0,112	0,069	0,327		
0,122	0,078	0,405		
0,134	0,088	0,493		
0,148	0,097	0,590		
0,162	0,11	0,700		
0,178	0,12	0,820		
0,195	0,13	0,950		
0,214	0,14	1,090		
0,235	0,15	1,240		
0,258	0,16	1,400		
0,284	0,18	1,580		
0,311	0,19	1,770		
0,342	0,21	1,980		
0,375	0,23	2,210		
0,412	0,25	2,460		
0,452	0,27	2,730		
0,496	0,29	3,020		
0,545	0,31	3,330		
0,598	0,33	3,660		
0,656	0,36	4,020		
0,721	0,38	4,400		
0,791	0,4	4,800		
0,868	0,43	5,230		
0,953	0,45	5,680		
1,047	0,48	6,160		
1,149	0,5	6,660		
1,261	0,53	7,190		
1,384	0,56	7,750		

Annexes

1,52	0,59	8,340
1,668	0,64	8,980
1,832	0,7	9,680
2,011	0,77	10,450
2,207	0,86	11,310
2,423	0,97	12,280
2,66	1,12	13,400
2,92	1,29	14,690
3,205	1,49	16,180
3,519	1,71	17,890
3,863	1,96	19,850
4,24	2,22	22,070
4,655	2,48	24,550
5,11	2,73	27,280
5,61	2,95	30,230
6,158	3,15	33,380
6,76	3,32	36,700
7,421	3,46	40,160
8,147	3,57	43,730
8,943	3,63	47,360
9,818	3,68	51,040
10,78	3,72	54,760
11,83	3,77	58,530
12,99	3,8	62,330
14,26	3,78	66,110
15,65	3,7	69,810
17,18	3,62	73,430
18,86	3,62	77,050
20,71	3,74	80,790
22,73	3,92	84,710
24,95	4,01	88,720
27,39	3,8	92,520
30,07	3,21	95,730
33,01	2,32	98,050
36,24	1,3	99,350
39,78	0,52	99,870
43,67	0,11	99,980
47,94	0,011	99,991
52,62	0,00008	99,991

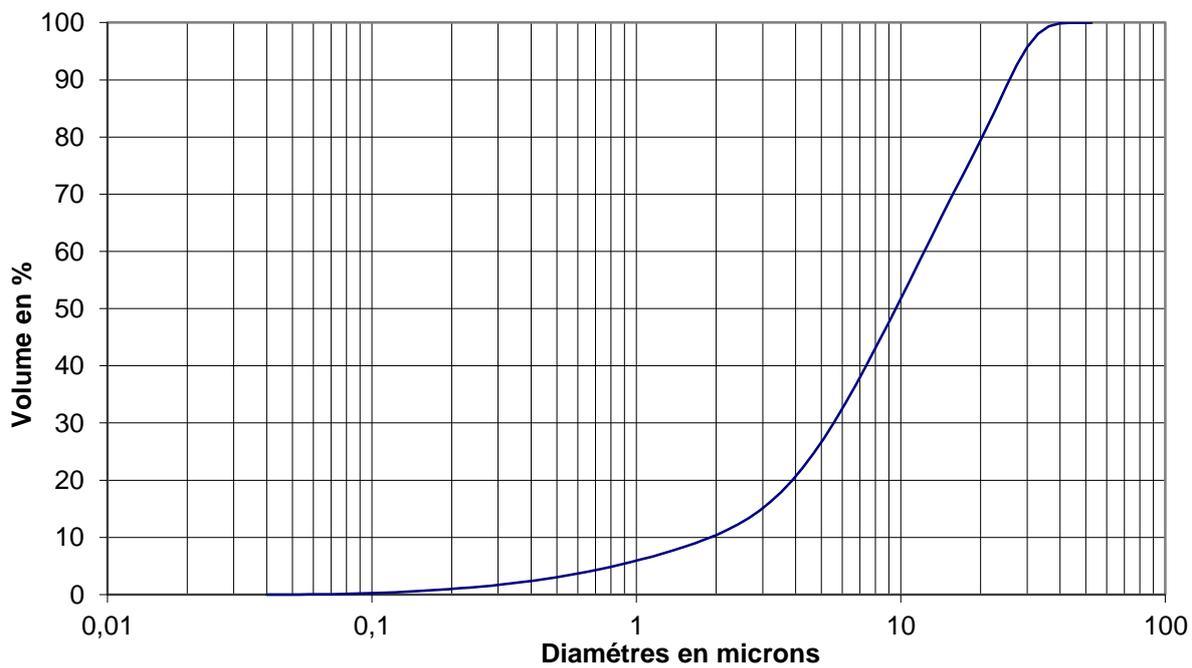
Ciment gris

Courbe en différentiel



Ciment gris

Courbe cumulée



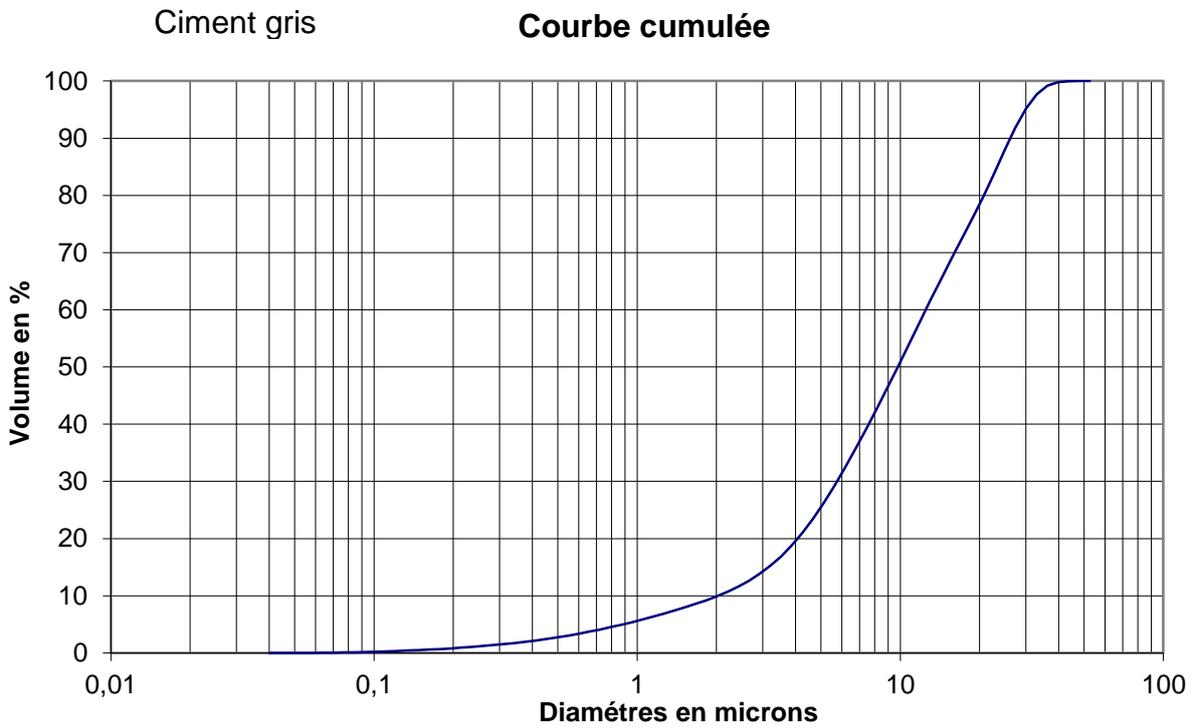
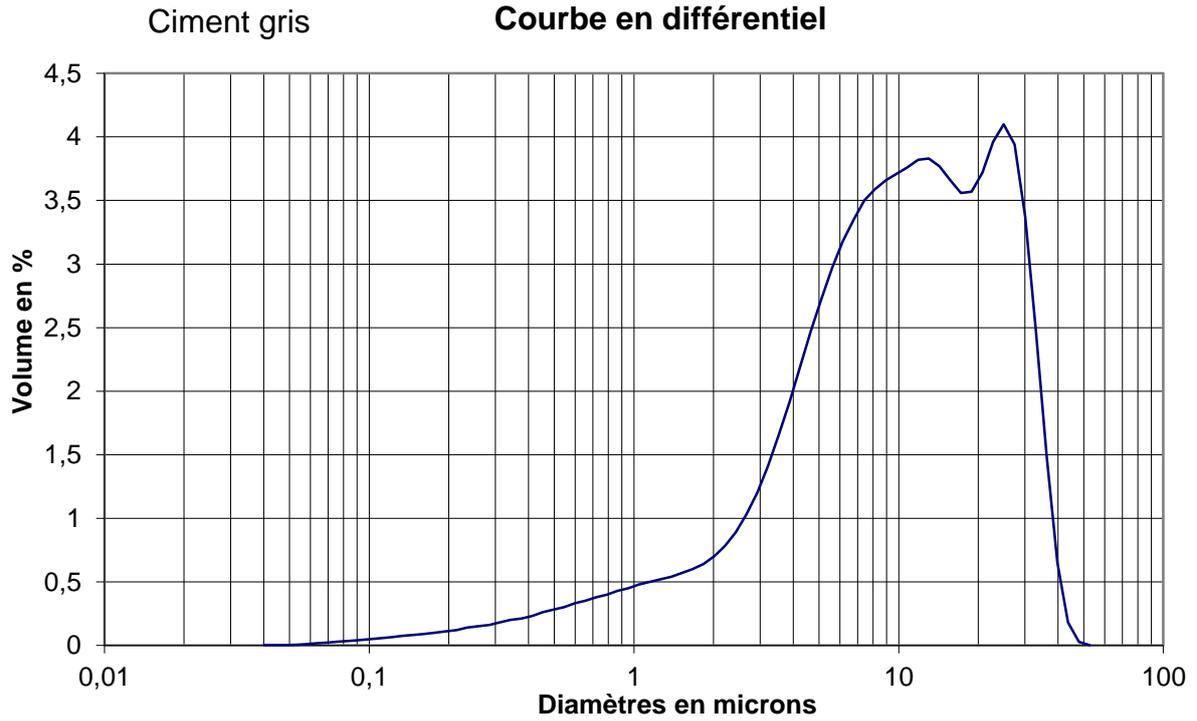
ANALYSE GRANULOMETRIQUE LASER

Dossier : CERIB
Echantillon : Ciment gris CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF
Provenance : Prélèvement n°2
Nos réf : D-11.32
Date : 15-juin-11

Echantillon mis en suspension dans de l'éthanol

Particules Diamètre en μm	Volume Différentiel en %	Volume Cumulé en %	Volume en %	Particules Diamètre en μm <
0,04	0,00082	0,001	10	2,229 μm
0,044	0,0012	0,002	25	5,394 μm
0,048	0,002	0,004	50	10,74 μm
0,053	0,0042	0,008	75	20,14 μm
0,058	0,0088	0,017	90	28,84 μm
0,064	0,016	0,033		
0,07	0,022	0,055		
0,077	0,029	0,084		
0,084	0,035	0,119	Moyenne	13,41 μm
0,093	0,043	0,162	Médiane	10,74 μm
0,102	0,051	0,213	Mode	26,14 μm
0,112	0,058	0,271		
0,122	0,066	0,337		
0,134	0,074	0,411		
0,148	0,083	0,494		
0,162	0,091	0,585		
0,178	0,1	0,685		
0,195	0,11	0,795		
0,214	0,12	0,915		
0,235	0,14	1,055		
0,258	0,15	1,205		
0,284	0,16	1,365		
0,311	0,18	1,545		
0,342	0,2	1,745		
0,375	0,21	1,955		
0,412	0,23	2,185		
0,452	0,26	2,445		
0,496	0,28	2,725		
0,545	0,3	3,025		
0,598	0,33	3,355		
0,656	0,35	3,705		
0,721	0,38	4,085		
0,791	0,4	4,485		
0,868	0,43	4,915		
0,953	0,45	5,365		
1,047	0,48	5,845		
1,149	0,5	6,345		
1,261	0,52	6,865		
1,384	0,54	7,405		
1,52	0,57	7,975		
1,668	0,6	8,575		

1,832	0,64	9,215
2,011	0,7	9,915
2,207	0,78	10,695
2,423	0,89	11,585
2,66	1,03	12,615
2,92	1,2	13,815
3,205	1,41	15,225
3,519	1,65	16,875
3,863	1,91	18,785
4,24	2,19	20,975
4,655	2,47	23,445
5,11	2,73	26,175
5,61	2,97	29,145
6,158	3,18	32,325
6,76	3,35	35,675
7,421	3,5	39,175
8,147	3,59	42,765
8,943	3,66	46,425
9,818	3,71	50,135
10,78	3,76	53,895
11,83	3,82	57,715
12,99	3,83	61,545
14,26	3,77	65,315
15,65	3,66	68,975
17,18	3,56	72,535
18,86	3,57	76,105
20,71	3,72	79,825
22,73	3,96	83,785
24,95	4,1	87,885
27,39	3,94	91,825
30,07	3,37	95,195
33,01	2,48	97,675
36,24	1,48	99,155
39,78	0,65	99,805
43,67	0,18	99,985
47,94	0,026	100,011
52,62	0,0011	100,012



Annexe 1.1.3 Fiche technique du ciment CEM I 52,5 N CE CP2 NF « couvrot »



Ciments Calcia
Italcementi Group

Direction Industrielle
et Technique
Les Technodes
B.P. 01
78931 Guerville cedex

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél. : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50

Version du : 24/01/2011

N° certificat CE : 0333-CPD-2102

Fiche produit de

Couvrot
CEM I 52,5 N CE CP2 NF

Caractéristiques physiques et mécaniques									
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn à 20 °C	Chaleur en J/g à 41h	Masse volumique en g/cm ³	Surface Blaine en cm ² /g	Stabilité en mm
1j	2j	7j	28j						
25	39	54	63	29.5	170	385	3.08	3950	1

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants		
Perte au feu	2.3	Principaux		Nature	Caractéristiques	
SiO ₂	19.5	Clinker (K) de	98.0	<u>Clinker (K)</u>	CaO/SiO ₂	3.1
Al ₂ O ₃	5.2	<i>Couvrot</i>		<u>Couvrot</u>	C3S+C2S	79
Fe ₂ O ₃	2.3	Laitier (S)			MgO (%)	1.0
TiO ₂	0.3	Cendres (V)			C3S (%)	67
MnO	0.1	Calcaire (L ou LL)			C2S (%)	12
CaO	64.6	Fumées de silice (D)			C3A (%)	11
MgO	0.9				C4AF (%)	7
SO ₃	3.5	Secondaires		<u>Laitier (S)</u>	Laitier vitreux (%)	
K ₂ O	1.07	Calcaire (L ou LL)	2.0		(CaO+MgO)/SiO ₂	
N ₂ O	0.06			<u>Cendres (V)</u>	CaO+MgO+SiO ₂ (%)	
P ₂ O ₅	0.2	Total	100.0		PF (%)	
S ⁻	0.02	Sulfate de calcium		<u>Calcaire</u>	CaO réactive (%)	
Cl ⁻	0.01	Gypse	6.0	<u>(L ou LL)</u>	SiO ₂ réactive (%)	
Insoluble CEN	0.1	Additifs			CaCO ₃ (%)	99.7
Na ₂ O éq. actif	0.74	Agent de mouture	0.046	<u>Fumées de silice (D)</u>	Adsorption bleu méthylène (g/100g)	0.2
		<i>Cloter F5903 (AXIM)</i>			TOC (%)	0.09
Colorimétrie (L*)	66	Agent réducteur	0.20		SiO ₂ amorphe (%)	
		<i>Sulfate de fer</i>			PF (%)	
					Aire massique BET (m ² /kg)	

Mouture	
Broyeur(s)	2 et 1

Stockage	
Silo(s)	cf plan de silotage

Etablissement	Vrac	Ensachage
Usine de Couvrot	Oui	Non
Dépôt de Tolbiac	Oui	Non
Dépôt de Strasbourg	Oui	Non

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande à la Direction Commerciale Assistance et Prescription Clients



Siège social :
Rue des Technodes
78930 Guerville
Tél. : 01 34 77 78 00
Fax : 01 34 77 79 06

SAS au capital de 593 836 525 €
Siren 654 800 689 RCS Versailles

Annexe 1.1.4 Fiche technique du filler calcaire betocarb P2

 	35, Quai André Citroën 75725 Paris Cedex 15 Tél : 01 40 58 44 00 Fax : 01 40 58 44 38	Fiche technique produit du 01/01/2001 au 31/12/2001 Page 1/1, imprimé le samedi 28 janvier 2002
---	--	--

BETOCARB P2

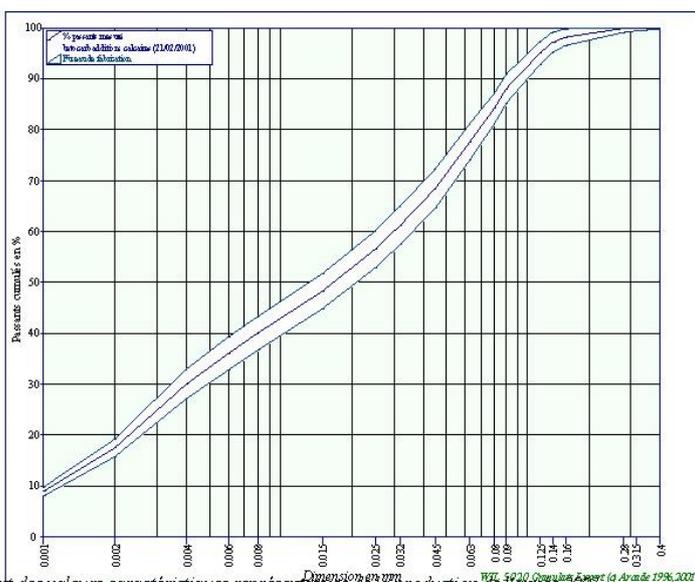
Origine : B E T C GANNAT
Forme géologique : Calcaire tendre
Aspect : Blanc cassé

Contrôleur : Laboratoire central 28150 VILLEAU

Application ADDITION CALCAIRE
 Application : Addition calcaire NF P 18 508.

ESSAIS	Minimum	Valeur	Maximum	Norme
Caractéristiques chimiques du BETOCARB				
Teneur en eau (%)			0.4	
Teneur en carbonates totaux (%)	90		91.6	
Teneur en carbonate de calcium (%)	85		90.2	
Valeur au bleu (g/kg)			6.2	10
Teneur en alcalins equiv. Na ₂ O (%)			0.003	
Teneur en matières organiques (%)			0.090	0.2
Teneur en chlorures (%)			0.001	0.1
Réactivité aux alcalins			NR	
Teneur en sulfates (%)			0.002	0.15
Teneur en soufre total (%)			0.008	0.4
Teneur en silice totale (%)			2.9	
Caractéristiques physiques du BETOCARB				
Masse Volumique absolue (Kg/m ³)			2688	
Masse Volumique apparente (Kg/m ³)			873	
Surface massique Blaine (m ² /Kg)	220		465	
Coefficient de variation (%)			8	
Indice activité i 28	0.71		0.74	
Références internationales				
Code tarif douanier	Code européen EINECS		N° d'enregistrement CAS	
283850000000 J	215-279-6		01317-65-3	
Conditionnement standard				
			Sac papier 50 kg	Big Bag
			PP 1150*1150 1400Kg	800 Kg

Tamis	Minimum	%tamisat	Maximum
0.001		8.90	
0.002		17.50	
0.004		29.98	
0.006		35.97	
0.008		39.96	
0.015		48.22	
0.025		56.40	
0.032		61.07	
0.045		68.41	
0.063	70.00	77.53	
0.080		84.11	
0.090		87.98	
0.125		95.04	
0.140		97.10	
0.160		98.18	
0.280		99.87	
0.315		99.90	
0.400		99.96	



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques représentatives de la production de l'année 2001. Elles sont données de toute bonne foi, mais ne sauraient servir de base à des applications industrielles sans des essais préalables.

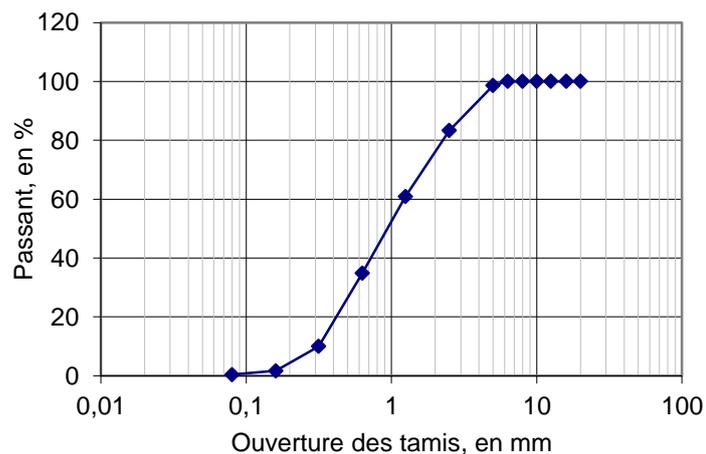
Stocker à l'abri de l'humidité. Le carbonate est un produit non dangereux (fiche de données de sécurité sur demande).

Annexe 1.2 Les granulats

Annexe 1.2.1 Granulométrie du Silicieux roulé loire 0-5

- Mv, en kg/m^3 2600
- Absorption d'eau 1,20

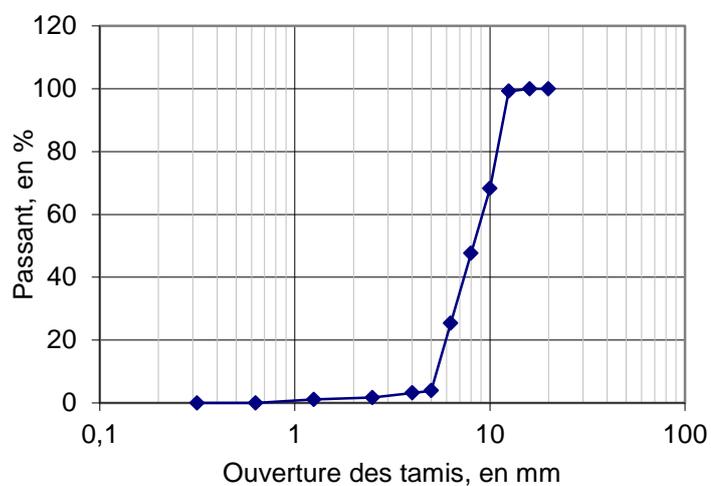
Tamis (mm)	Passant (%)
0,08	0,4
0,16	1,7
0,315	10
0,63	34,9
1,25	60,9
2,5	83,3
5	98,6
6,3	100
8	100
10	100
12,5	100
16	100
20	100



Annexe 1.2.2 Granulométrie du Silicieux roulé loire 5-12

- Mv, en kg/m^3 2560
- Absorption d'eau 1

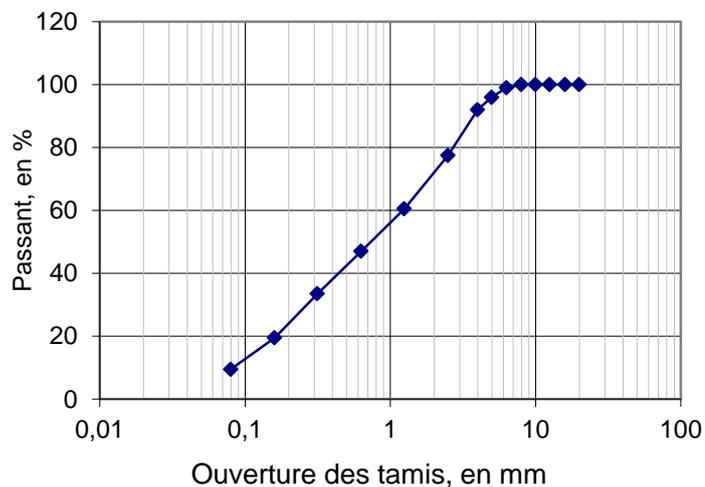
Tamis (mm)	Passant (%)
0,315	0
0,63	0
1,25	1,1
2,5	1,7
4	3,19
5	3,9
6,3	25,37
8	47,57
10	68,3
12,5	99,2
16	100
20	100



Annexe 1.2.3 Granulométrie du Calcaire concassé 0-4

- Mv, en kg/m³ 2680
- Absorption d'eau 0,42

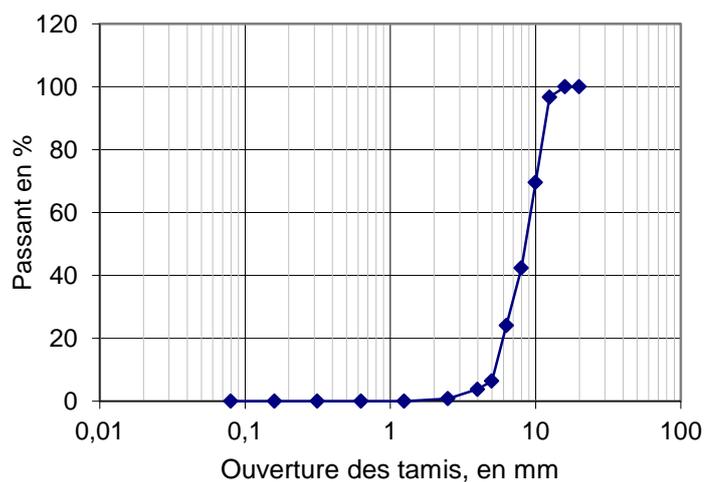
Tamis (mm)	Passant (%)
0,08	9,5
0,16	19,5
0,315	33,5
0,63	47
1,25	60,5
2,5	77,5
4	92
5	96
6,3	99
8	100
10	100
12,5	100
16	100
20	100



Annexe 1.2.4 Granulométrie du Calcaire concassé 5-12

- Mv, en kg/m³ 2680
- Absorption d'eau 0,47

Tamis (mm)	Passant (%)
0,08	0
0,16	0
0,315	0
0,63	0
1,25	0
2,5	0,8
4	3,8
5	6,4
6,3	24,1
8	42,4
10	69,6
12,5	96,7
16	100
20	100



Annexe 1.3 Les adjuvants

Annexe 1.3.1 Fiche technique du Glenium ACE 43



The Chemical Company

GLENIUM® ACE 43



Adjuvant pour le Contrôle de l'Energie. Composant essentiel du Zero Energy System.
Nouvelle génération de polycarboxylates pour bétons préfabriqués à long maintien de maniabilité.

Description

Le GLENIUM® ACE 43 est un adjuvant non chloré issu des nouvelles générations de polycarboxylates.

Le GLENIUM® ACE 43 est un superplastifiant haut réducteur d'eau particulièrement recommandé pour l'industrie de la préfabrication dans le cadre du Zero Energy System.

La nouvelle chimie des GLENIUM ACE

La configuration particulière des molécules des GLENIUM® ACE accélère les processus d'hydratation à très jeune âge.

Les nouveaux principes d'adsorption du polymère combiné à un effet puissant de dispersion permettent d'obtenir une défloculation forte des grains de ciment et une surface de contact avec l'eau plus grande pour chaque grain.

Cette nouvelle action permet ainsi d'obtenir des réactions "ciment/eau" et une exothermie rapides, donc des développements de performances mécaniques à très jeune âge.

Zero Energy System

Le concept du Zero Energy System est basé sur la combinaison des technologies de pointe en terme d'adjuvantation des bétons de l'industrie de la préfabrication.

Les performances du GLENIUM® ACE 43 dans des bétons fermes, fluides ou autoplaçants permettent à l'industriel de la préfabrication d'optimiser la formule et les énergies nécessaires à la fabrication des éléments en béton : vibration et étuvage.

Domaines d'application

Le GLENIUM® ACE 43 est recommandé dans des bétons préfabriqués, amés ou précontraints, où des performances mécaniques élevées à très jeune âge sont recherchées.

Propriétés

Le GLENIUM® ACE 43 offre les avantages suivants, au niveau de la mise en place, des performances et de la durabilité du béton :

- Fabrication de bétons fermes à fluides à faible E/C
- Obtention de bétons souples faciles à mettre en oeuvre
- Fabrication de BAP et élimination de la vibration
- Optimisation des cycles d'étuvage par réduction du temps ou de l'énergie de chauffe
- Elimination possible de l'étuvage
- Elimination possible de l'énergie nécessaire à la mise en place et à l'étuvage (= Zero Energy)
- Augmentation de la productivité
- Amélioration de la durabilité liée au faible E/C et à la diminution, voire la suppression de l'étuvage
- Maintien de la maniabilité du béton à faible E/C : de consistance ferme au BAP

Caractéristiques

• Aspect	liquide
• Couleur	brun
• Masse volumique	1,05 +/- 0,02 g/cm ³
• Extrait sec	27 ± 1,3 %
• Na ₂ O _{eq}	< 2,0 %
• pH	7 +/- 1
• Teneur en chlore	< 0,1 %
• Transport	non classé
• Etiquetage	pas de symbole exigé

Mode d'emploi

Le GLENIUM® ACE 43 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément.

L'effet optimal est généralement obtenu par incorporation du GLENIUM® ACE 43 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois, il est possible d'incorporer le GLENIUM® ACE 43 dans l'eau de gâchage. Eviter d'ajouter le GLENIUM® ACE 43 sur les granulats.



The Chemical Company

GLENIUM® ACE 43

Recommandation

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30° C, et agiter mécaniquement.

Avant le réemploi, il est recommandé de tester l'efficacité du produit gelé.

Compatibilité

Le GLENIUM® ACE 43 n'est pas compatible avec la gamme des RHEOBUILD®.

Le GLENIUM® ACE 43 est compatible avec le RHEOMAC® 885 F et RHEOMAC® 890 F pour la fabrication de BAP/BAN.

Dosage

Plage normale d'utilisation : 0,2 à 2,0 % du poids de ciment, soit 0,19 à 1,9 l pour 100 Kg de ciment.

(Pour d'autres utilisations, nous consulter.)

Conditionnement

Bidon de 10 litres, fût de 210 litres, container de 1.000 litres et vrac.

Stockage

Il est recommandé de stocker le GLENIUM® ACE 43 dans des conditions de températures supérieures à + 5° C.

BASF Construction Chemicals France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie GERLING FRANCE. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société suisse d'assurances GERLING KONZERN de Zürich.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF Construction Chemicals France.

Nos fiches de données de sécurité sont disponibles sur internet : www.basf-cc.fr et sur simple demande au 01.69.47.50.00.



BASF Construction Chemicals France

Z.I. Petite Montagne Sud 10, rue des Cévennes Lisses 91017 Evry Cedex
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86 06 32 <http://www.basf-cc.fr>

Annexe 1.3.2 Fiche technique du Glenium Sky 537



The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537



Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM®

Le GLENIUM® se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette structure chimique nouvelle et originale agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM® dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive. L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Particularités du GLENIUM® SKY 537

Le GLENIUM® SKY 537 permet de diminuer sensiblement la viscosité des bétons caractérisée par des quantités de fines importantes et/ou des rapports eau/ciment bas.

Domaines d'application

Le GLENIUM® SKY 537 est particulièrement recommandé pour l'élaboration de béton nécessitant un long maintien d'ouvrabilité et des performances mécaniques initiales élevées.

Le GLENIUM® SKY 537 est donc adapté à l'industrie du béton prêt-à-l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Propriétés

L'excellent effet de dispersion du GLENIUM® SKY 537 permet de conserver une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 1 heure 30 avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Le GLENIUM® SKY 537 apporte les avantages suivants au niveau de la mise en place, des performances et de la qualité intrinsèque du béton :

améliore

- la résistance à la compression à jeune âge et à long terme,
- la résistance à la flexion à jeune âge et à long terme,
- le module d'élasticité,
- l'adhérence sur les aciers,
- la résistance à la carbonatation,
- l'imperméabilité,
- la résistance aux agressions atmosphériques,
- la qualité des parements et de la texture du béton.

diminue

- la viscosité,
- la vibration,
- le retrait,
- le risque de fissuration,
- le fluage.

Caractéristiques

• Aspect	liquide
• Couleur	brun
• Masse volumique (MA 002)	1,05 ± 0,02 g/cm ³
• pH (MA003)	6,0 ± 2
• Teneur en chlorures (MA 004)	< 0,1 %
• Extrait sec	19,9 % ± 2
• Na2O eq	≤ 2 %
• Transport	non classé
• Etiquetage	pas de symbole exigé

Mode d'emploi

Le GLENIUM® SKY 537 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® SKY 537 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70 % de l'eau de gâchage dans le malaxeur.



The Chemical Company

GLENIUM® SKY 537

Toutefois, il est possible d'incorporer le GLENIUM® SKY 537 dans l'eau de gâchage.
Eviter d'ajouter le GLENIUM® SKY 537 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement .

Compatibilité

Le GLENIUM® SKY 537 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM® SKY 537 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC France pour toute synergie.

Dosage

Plage normale d'utilisation :

0,2 à 3,0 % du poids du ciment, soit 0,19 à 2,86 L pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC France.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 210 L, bidon de 10 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM® SKY 537 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

Le GLENIUM® SKY 537 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

BASF Construction Chemicals France SAS a couvert sa responsabilité civile tant en exploitation qu'après livraison de ses produits par une police d'assurance souscrite auprès de la Compagnie HDI Gerling France. Les garanties de cette police sont complétées par la police "parapluie" responsabilité civile du Groupe souscrite auprès de la société d'assurances HDI Gerling Allemagne.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci.

L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec l'une de nos agences BASF Construction Chemicals France.

Conformément à la réglementation en vigueur, nos Fiches de Données de Sécurité (FDS) sont transmises automatiquement (par courrier postal ou électronique) aux clients livrés.

En dehors de cette situation, contactez votre Chargé de Clientèle pour tout autre besoin de FDS



BASF Construction Chemicals France SAS

Z.I. Petite Montagne Sud - 10, rue des Cévennes - Lisses - 91017 Evry Cedex
Tél. : 01 69 47 50 00 Fax : 01 60 86 06 32 <http://www.basf-cc.fr>

Annexe 1.4 Les fibres

Annexe 1.4.1 Fiche technique des fibres Sika fibre force viscochape[®] (Sika)

Construction

Notice technique
Edition 02/2010
Numéro 225
Version no. 2010.046
SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE

CE

SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE
Fibres structurales macro synthétiques pour la
SIKA VISCOCHAPE[®].

Présentation	SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE est une fibre macro synthétique. SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE est spécialement traitée et conditionnée pour faciliter la dispersion au malaxage et éviter la formation d'oursins.
Domaines d'application	<p>Les fibres SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE sont utilisées exclusivement dans la chape autonivelante SIKA[®] VISCOCHAPE[®].</p> <p>Elles sont destinées à remplacer le treillis anti-fissuration et les armatures périphériques éventuelles (cas des planchers rayonnants électriques) dans les cas suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Chape désolidarisée sur polyane pour les locaux P4, ■ Chape sur isolant de classe SC2, ■ Planchers chauffants à eau basse température, ■ Planchers réversibles, ■ Planchers rayonnants électriques. <p>Les fibres SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE peuvent être utilisées avec des tuyaux chauffants en plastique.</p>
Caractères généraux	<p>Les fibres se dispersent très facilement dans les formules de SIKA[®] VISCOCHAPE[®] et créent un réseau fibré haute densité qui a pour conséquence :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ L'augmentation de la ductilité, ■ L'augmentation de la résistance aux chocs, ■ L'amélioration de la résistance à l'abrasion.
Caractéristiques	
Coloris	Gris
Conditionnement	Sacs papier pulpable de 1 kg, palette de 144 sacs (144 kg)
Stockage	Conserver à l'abri de l'humidité.
Conservation	3 ans dans son emballage intact.
Données techniques	
densité	0,92
Nature	Copolymère
Longueur	38 mm
Module d'élasticité	4,7 GPa
Résistance à la traction	580 MPa
Absorption	aucune
Température de fusion	150°C
Résistance chimique (alcalins, acides, ...)	Elevée



Construction

Caractéristiques Consommation / Dosage	Dans la SIKA® VISCOCHAPE®, les SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE se substituent aux treillis anti-fissuration et armatures périphériques éventuelles pour un dosage de 3 kg/m ³ de chape.
Mise en œuvre Préparation du mélange	Il est recommandé d'ajouter les SIKAFIBRE FORCE VISCOCHAPE directement dans le malaxeur de la centrale à béton simultanément au sable. Malaxer le mélange (sable, ciment, filler et fibres) pendant 15 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 90 secondes.
Précautions d'emploi	Consulter la fiche de données de sécurité accessible par Minitel 3613, code SIKASECUR ou 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 45
Fax : 01 49 92 81 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Annexe 1.4.2 Fiche technique BarChip 48 (Elasto Plastic Concrete)

Product Data Sheet

BarChip⁴⁸

Description

EPC's BarChip48, a Structural Synthetic Fibre from Elasto Plastic Concrete's range of copolymer fibres, evolved from EPC's "Future Fibre" research and development program. The aim of this program is to develop a range of fibres that achieve the highest performance levels ever seen in structural synthetic fibre reinforcement systems. The latest advances in polymer technology, engineering design and manufacturing techniques have been incorporated into EPC's BarChip48 to deliver a fibre that is unequalled in usability, durability and service performance. BarChip48 is suitable for use in concrete applications with concrete strengths of 35 MPa or less.

Close up of EPC's BarChip48 Fibre



Product Features

Characteristic	Material Property
Base Resin	Modified Olefin
Length	48mm
Tensile Strength	640 MPa
Surface Texture	Continuously embossed
No. fibres per kg	59,500
Specific Gravity	0.90 - 0.92
Youngs Modulus	10 GPa
Melting Point	159°C - 179°C
Ignition Point	Greater than 450°C

Benefits

- Up to 50% price reduction vs traditional steel mesh
- Post crack load capacity equivalent to SL82 steel mesh at regular dosage rates
- Long term durability ~ corrosion free
- Delivered to site ready-mixed and ready-reinforced
- Eliminates cutting and placing of steel mesh, increasing efficiency and productivity
- Safer and lighter to handle than steel
- Reduced fire damage ~ anti-spalling

Dosage

EPC's BarChip48 has an effective dose range of 2.5kg to 10kg per cubic metre. Dose rates should be selected based on performance requirements. The typical dose rate for general concrete applications is 2.5kg/m³. For engineered applications, such as housing slabs and commercial flooring, dose rates typically range from 2.5kg/m³ to 5kg/m³. For assistance in specifying a dose rate for your project please contact an EPC representative.

Mixing

To achieve optimum fibre distribution during mixing it is recommended the total fibre requirement is added first "bags and all" to the mixer with the initial batch water. From this point normal loading procedures can be used. The mulchable bag will release the fibres which will be homogenously distributed throughout the mix after 5 minutes of mixing. 6kg of EPC's BarChip48 may reduce measured slump by between 10mm and 20mm dependent on mix design. For more detailed instructions please refer to EPC's Technical Sheet: "Batching and Mixing", available for download at <http://www.elastoplastic.com>.

Pumping

EPC's BarChip48 fibre can be pumped through 50mm rubber hoses without difficulty. Precaution should be taken to ensure the fibres can pass freely through the pump hopper grate.

Handling and Storage

- 2.5kg mulchable paper bag/440Kgs per pallet
- UV stabilized modified olefin fibre
- Shipped on durable plastic pallets
- Weather proof tarpee pallet covers
- Bulk bags available on request

EPC's UV stabilized BarChip48 fibre is supplied on durable recyclable plastic pallets with a fitted rain hood to allow storage outdoors with no environmental deterioration of product or packaging. Bags of EPC's BarChip48 stored individually must be protected from water damage to prevent bag deterioration.

For safety please refer to EPC's BarChip48 MSDS available for download at <http://www.elastoplastic.com>.

Product Data Sheet



Re₃ Value

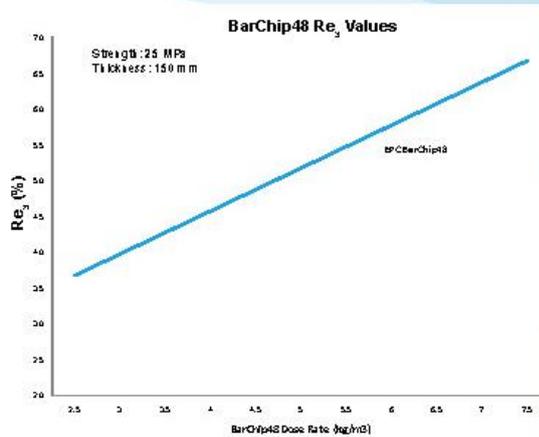
EPC has conducted extensive ASTM 1609 Beam testing of BarChip48 to determine Re₃ values.

'Concrete Society Technical Report 34' states that, "The Re₃ value, a measure of ductility, is the average load applied as the beam deflects to 3mm expressed as a ratio of the load to first crack. This measure is also commonly known as the equivalent flexural strength".

"The equivalent flexural strength ratio, Re₃, for fibre reinforced concretes, is mainly dependent on fibre type and dosage. The fibre dosage should be sufficient to give a value of Re₃ of at least 0.3 (30%)". Contact EPC for more information on TR34 design standards.

Results

At 2.5kg/m³ BarChip48 has an Re₃ value of 36%, easily meeting the minimum required Re₃ percentage as outlined in Concrete Society Technical Report 34. At 5.0kg/m³ BarChip48 has an Re₃ value of 55%. For more information on Re₃ testing contact EPC.



BarChip48 is suitable for use in;

- Roadways
- Footpaths and Shared Pathways
- Precast Applications
- Hard Stands
- Industrial Floors
- Commercial Developments
- Tunnel Support
- Shotcrete Applications
- Residential Housing Slabs



Roadway



Housing Slab



Warehouse Floor



Public Railway



www.elastoplastic.com

Disclaimer

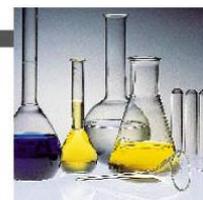
This information has been provided as a guide to performance only, for specific and supervised conditions. The user is advised to undertake their own evaluation and use the services of professionals to determine the product's suitability for any particular project or application prior to commercial use.

ISO 9001:2000 PS2313 © Elasto Plastic Concrete 2009

EPC Australia	call +61 1300 131 158	email austral@elastoplastic.com
EPC Europe	call +44(0) 77 8070 2642	email europa@elastoplastic.com
EPC Asia	call +65 6835 7716	email asia@elastoplastic.com
EPC N. America	call +1 704 848 8401	email nage@elastoplastic.com
EPC S. America	call +56 32 271 5118	email sage@elastoplastic.com

Distributors are located in other regions. For contact details speak to your nearest regional office listed above.

Annexe 1.4.3 Fiche technique des fibres Fibrin 1950 D (Chryso)



4.1-15

FIBRIN 1950 D**Micro-fibre synthétique fibrillée****Descriptif**

FIBRIN 1950 D est une fibre synthétique fibrillée.

FIBRIN 1950 D est fibrillée, son adhérence à la pâte de ciment est bonne et permet d'obtenir une très bonne résistance à l'arrachement.

FIBRIN 1950 D se disperse très rapidement et se répartit uniformément dans le volume de béton.

FIBRIN 1950 D s'oppose à la fissuration de retrait grâce à sa résistance à la traction, ralentit le ressuage, réduit la perméabilité et évite les épaufrures au décoffrage.

FIBRIN 1950 D améliore la résistance des ouvrages à l'abrasion, aux chocs (surface, joints et arêtes), aux cycles gel-dégel et leur durabilité en milieu agressif (industrie chimique, bâtiment...).

FIBRIN 1950 D ne constitue pas un renforcement structurel du béton.

Caractéristiques

- ♦ Couleur : blanche
- ♦ Densité : 0,91 environ
- ♦ Longueur : 12 mm
- ♦ Diamètre nominal : 18 microns
- ♦ Résistance à la traction : 557 MPa
- ♦ Module de Young : 4148 MPa
- ♦ Résistance chimique : forte
- ♦ Point de fusion : 160° C

Conditionnement

- Sachets-doses de 600 g
- Cartons de 18 sachets
- Palettes de 40 cartons soit 720 doses ou
- Sachets-doses de 900 g :
- Cartons de 12 sachets
- Palettes de 40 cartons soit 480 doses

Applications**Domaines d'application**

- Dallages
- Sols industriels
- Chapes
- Préfabrication
- Cuves, réservoirs silos
- Bétons pompés
- Bétons projetés
- Enduits

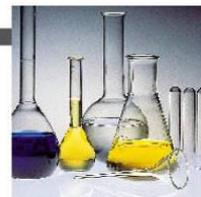
Mode d'emploi

FIBRIN 1950 D se dose à raison d'un sachet-dose par m³ de béton à fibrer.

Cela représente environ 180 millions de fibres/m³ pour **FIBRIN 1950 D** en dose de 600 g et environ 273 millions de fibres/m³ pour **FIBRIN 1950 D** en dose de 910 g.

FIBRIN 1950 D s'incorpore au béton à n'importe quelle phase du processus de malaxage, sans avoir à modifier les temps de malaxage, ni la quantité initialement prévue d'eau de gâchage.

FIBRIN 1950 D peut être ajoutée directement dans les camions toupies moyennant un malaxage rapide de 5 minutes à compter de leur introduction.



4.1-15

FIBRIN 1950 D

Micro-fibre synthétique fibrillée

SECURITE

FIBRIN 1950 D est un produit "sans danger". Le port d'équipements de protection individuelle est recommandé.

Pour plus d'informations consulter la fiche de données de sécurité sur www.chryso-online.com

Les informations contenues dans la présente notice sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un souci constant d'objectivité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application défectueuse. Des essais préalables à chaque utilisation permettront de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application du produit sont satisfaisants. Nos spécialistes sont à la disposition des utilisateurs pour les aider à résoudre au mieux leurs problèmes.

« Se renseigner sur la dernière mise à jour »

Dernière modification : 03/06

CHRYSO : 19, place de la Résistance - 92446 Issy les Moulineaux cedex France - Tél. : 01 41 17 18 19 - Fax : 01 41 17 18 80



Annexe 1.4.4 Fiche technique des fibres Chryso® Fibre S50 (Chryso)



4.1-12

CHRYSO® Fibre S50**Macro-fibre synthétique de renforcement dite "structurale"****Descriptif**

CHRYSO® Fibre S50 est une fibre synthétique fabriquée à partir d'un mélange de matières premières à haute résistance mécanique.

CHRYSO® Fibre S50 améliore les propriétés suivantes du béton :

- ductilité après fissuration, tenacité,
- résistance à l'impact, à la fatigue,
- résistance à la fissuration de retrait, à la ségrégation.

CHRYSO® Fibre S50 a une très haute adhérence qui provient de sa capacité à se "fibriller" aux extrémités lors du malaxage.

CHRYSO® Fibre S50 permet de réduire les coûts de fabrication et de temps de pose du treillis soudé dans de nombreux cas.

CHRYSO® Fibre S50 se répartit uniformément dans le béton formant un réseau de renforcement multidirectionnel, sans corrosion en surface contrairement aux fibres métalliques.

Caractéristiques

- Mélange de polypropylène et polyéthylène
- Couleur : blanche
- Densité : 0,92 (920 kg/m³)
- Longueur : 50 mm
- Résistance à la traction : 600 MPa
- Module de Young : 5 GPa
- Résistance chimique (alcalins,...) : élevée
- Point de fusion : 160 °C
- Point d'inflammation : 590 °C

Conditionnement

- Sachets-doses de 1 kg
- Palettes de 25 cartons de 15 kg

Application**Domaines d'application**

CHRYSO® Fibre S50 se substitue dans de nombreux cas, au treillis soudé ou à des fibres métalliques :

- Préfabrication
- Caveaux, regards,...
- Dallages
- Bétons projetés
- Dallages de terre plein
- Bétons pompés

Mode d'emploi

CHRYSO® Fibre S50 s'incorpore au béton à raison de 1 à 8 kg/m³ selon l'utilisation, le type de béton et le dosage prescrit par **CHRYSO**.

Malaxeur :

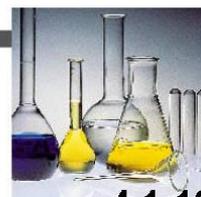
CHRYSO® Fibre S50 s'incorpore avec les granulats pendant un temps de malaxage à sec de 30 secondes.

Camion toupie :

CHRYSO® Fibre S50 s'incorpore dans le béton avec un temps de malaxage de 10 minutes environ.

CHRYSO® Fibre S50 peut provoquer une perte de l'ouvrabilité qu'il conviendra de compenser par l'utilisation d'un plastifiant ou superplastifiant. Consulter **CHRYSO** selon le type de béton et d'ouvrage.

CHRYSO® Fibre S50 est compatible avec tout adjuvant **CHRYSO®**.



CHRYSO® Fibre S50

Macro-fibre synthétique de renforcement dite "structurale"

Sécurité

CHRYSO® Fibre S50 est un produit "sans danger". Le port d'équipements de protection individuelle est recommandé.

Pour plus d'informations, consulter la fiche de données de sécurité sur le site internet www.chryso.com.

Les informations contenues dans la présente notice sont l'expression de nos connaissances et de résultats d'essais effectués dans un souci constant d'objectivité. Elles ne peuvent cependant, en aucun cas, être considérées comme apportant une garantie ni comme engageant notre responsabilité en cas d'application défectueuse. Des essais préalables à chaque utilisation permettront de vérifier que les modes d'emploi et les conditions d'application du produit sont satisfaisants. Nos spécialistes sont à la disposition des utilisateurs pour les aider à résoudre au mieux leurs problèmes.

* Se renseigner sur la dernière mise à jour *

Dernière modification : 01/06

CHRYSO : 19, place de la Résistance - 92446 Issy les Moulineaux cedex France - Tél. : 01 41 17 18 19 - Fax : 01 41 17 18 80



Annexe 1.4.5 Fiche technique des fibres Dramix® (Bekaert)

		Dramix®	Dramix® Easy Dose
		  Glued Loose	
HANDLING		- Gloves and eye protection must be used - Keep dry  - No stacking	- Gloves and eye protection must be used - Keep dry  - No stacking
BEFORE ADDING FIBRES	 	Maximum dosage depends on: - Concrete composition - Placing method - Type of application Bekaert recommendations: - Preferably use a central batching plant mixer - A continuous grading and sieve curve - Sufficient fines and mortar content - Optimum slump before fibre addition-12 cm Note: - Depending on dosage and fibre type, fibres reduce the slump - Adjust required consistency only with (super) plasticizers	Maximum dosage depends on: - Concrete composition - Placing method - Type of application Bekaert recommendations: - Preferably use a central batching plant mixer - A continuous grading and sieve curve - Sufficient fines and mortar content - Optimum slump before fibre addition-12 cm Note: - Depending on dosage and fibre type, fibres reduce the slump - Adjust required consistency only with (super) plasticizers
DOSING	 Plant mixer  Truck mixer		
		- Bags are non degradable ✓ Introduce fibres with sand and aggregates ✓ Add fibres to fresh mixed concrete ✗ Never add fibres as a first component	✓ Introduce fibres with sand and aggregates ✓ Add fibres to fresh mixed concrete ✗ Never add fibres as a first component
		✗ Never add fibres as a first component ✗ Never fill drum completely with concrete in order to achieve even fibre distribution ✓ Add fibres continuously at a maximum of 40 kg/min If blower blast equipments are used (not needed for Dramix® fibres) the suitability should be tested on beforehand	✗ Never add fibres as a first component ✗ Never fill drum completely with concrete in order to achieve even fibre distribution Speed Dramix® Easy Dose fibres (FB types) can be dosed continuously at a maximum of 60 kg/min
MIXING	  	Mixing time depends on the efficiency of the mixing equipment ✓ DO: drum rotation speed > 12 rpm - Mixing time: after adding all fibres, mix 1 minute/m ³ concrete and not less than 5 min	Mixing time depends on the efficiency of the mixing equipment ✓ DO: drum rotation speed > 12 rpm - Mixing time: after adding all fibres, mix 1 minute/m ³ concrete and not less than 5 min
QUALITY CONTROL		 Before using fibre concrete, a preliminary test must be done - Workability - Air content - Separation of fibre bundles when using glued fibres - Homogenous fibre distribution in the concrete	 Before using fibre concrete, a preliminary test must be done - Workability - Air content - Homogenous fibre distribution in the concrete
PUMPING		Hose diameter > 1,5 x fibre length For complicated pump lines or concrete compositions, a trial is recommended prior to execution	Hose diameter > 1,5 x fibre length For complicated pump lines or concrete compositions, a trial is recommended prior to execution

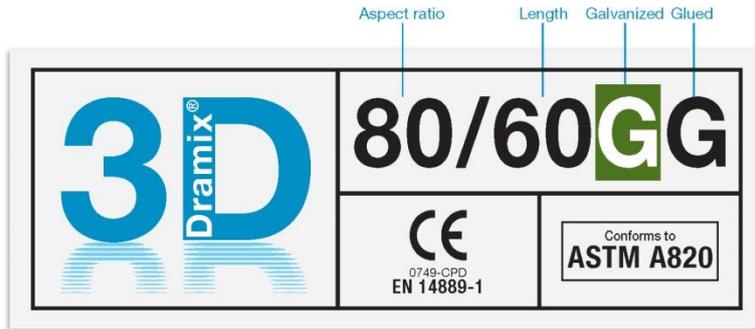
Annexe 1.4.6 Fiche technique des fibres Dramix® 80/60GG (Bekaert)

Dramix®

 **BEKAERT**

better together

Data Sheet



DRAMIX® 3D



Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to www.bekaert.com/dosingdramix for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.
All details describe our products in general form only.
For detailed information, product specifications available on request.

PERFORMANCE

Material properties

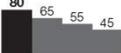
Tensile strength: $R_{m, nom}$: 1.350 N/mm²
Tolerances: ± 7,5% Avg
Young's Modulus: ± 210.000 N/mm²

Geometry

Fibre family  

Length (l) 60 mm 

Diameter (d) 0,75 mm 

Aspect ratio (l/d) 80 

Fibre network

2,9 km per m³ (for 10 kg/m³)
4.584 fibres/kg
Minimum dosage:
10 kg per m³ (according to CE)

Dramix® range

	5R	4R	3D
Tensile strength			
Wire ductility			
Anchorage strength			

PRODUCT CERTIFICATES



Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

SYSTEM CERTIFICATES



All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

PACKAGING



BAGS 20 kg

BIG BAG 1100 kg

STORAGE



71.30.05 - 09/2012

Annexe 1.4.7 Fiche technique des fibres HE 55/35 (Arcelor Mittal)

Distribution Solutions
WireSolutions

Fiche technique

Fibres en acier à crochets

HE 55/35

Dimensions

Diamètre de la fibre (d)	0.55 mm (± 0.04 mm)
Longueur de la fibre (L)	35.0 mm (+2/-3 mm)
Longueur des extrémités (l et l')	1 – 4
Amplitude (h et h')	1.80 mm (+1/-0 mm)
Angle de pliage (α et α')	45° (min. 30°)
Rapport (L/d)	64
Flèche de la fibre	max. 5% de L'
Angle de torsion de la fibre	< 30°
Nombre de fibres par kg	15300
Longueur des fibres par 10 kg	5365 m

Conditionnement

Boîtes en carton recyclable	
Contenu/boîte	25 kg
Boîtes/palette	48
Poids/palette	1200 kg
Fibres rangées parallèlement dans la boîte	
Palettes soudées dans une feuille de plastique rétractée ou emballées dans une feuille hi-stretch	
Également livrable en Big Bag de 500 kg	

Divers

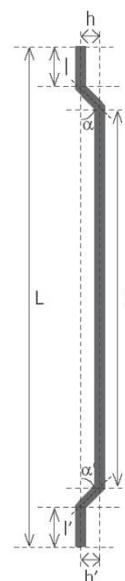
La fibre décrite est conforme aux standards suivants :

- EN 14889-1 type 1 (fibres en fil d'acier tréfilé à froid),
- ASTM A820/A820M-04 type 1 (fibres en fil d'acier tréfilé à froid).

Document non contractuel. Les produits présentés sont susceptibles d'évoluer, voire d'être supprimés sans préavis ni obligations.
Copyright ArcelorMittal – Juin 2011.

Caractéristiques physiques

- Résistance à la traction typique du fil : 1200 N/mm²



ArcelorMittal Bissen & Bettembourg
Route de Finsterthal - BP 16
L-7703 Bissen
T +352 83 57 72 1
F +352 83 56 98

www.arcelormittal.com/steelfibres



Annexe 1.4.8 Fiche technique des fibres Medafac (Granitex)

NOTICE TECHNIQUE

2 1 1 6

MEDAFAC**Fibres d'acier pour béton****DESCRIPTION**

MEDAFAC est une fibre d'acier ondulée ses caractéristiques techniques lui permettent d'améliorer les résistances mécanique du béton

DOMAINES D'APPLICATION

- Dallage industriel
- Parking
- Atelier mécanique

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFAC** permet :

- D'augmenter les résistances mécaniques surtout en flexion
- Très bonne résistance à l'abrasion

CARACTÉRISTIQUES

- Longueur 50 mm
- Largeur 2 mm
- Densité (apparente) 1,05

MODE D'EMPLOI

L'introduction des fibres **MEDAFAC** se fait :

- Soit à la centrale à béton avec les agrégats ou en fin de mélange
- Soit dans le camion malaxeur sur chantier avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes à grande vitesse.
- Soit dans la bétonnière sur chantier, avec un malaxage supplémentaire de quelques minutes.

Dans tous les cas veiller à garantir une parfaite homogénéité du mélange béton - fibres.

Mise en place du béton :

Une bonne homogénéité du matériau est nécessaire

pour lui garantir son efficacité et le mode de vibration dépend essentiellement du type de béton utilisé.

Finition :

Dans le cas où la surface du béton reste brute, une attention particulière sera portée au talochage manuel ou mécanique afin que toutes les fibres soient réintégrées dans la matrice béton.

Les autres finitions traditionnelles (saupoudrage, chape incorporée ou rapportée) ne nécessitent aucune précaution particulière.

Un produit de cure **MEDACURE** doit être appliqué sur la surface finie du dallage afin d'éviter un séchage trop rapide du matériau.

DOSAGE

Le dosage de fibres **MEDAFAC** à utiliser peut varier de 20 à 40 kg/m³.

Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Les fibres d'acier **MEDAFAC** sont conditionnées en cartons de 20 ou 25 kg et se conservent environ trois années à l'abri de l'humidité.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
 Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
 Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Annexe 1.4.9 Fiche technique des fibres RC 80-60 BP



PRODUCT DATA SHEET 

Dramix®

R

C

-80/60-

B

P




$\frac{80}{45}$
 l/d



Bright

High Carbon

- Description:** Dramix® fibres are filaments of wire, deformed and cut to lengths, for reinforcement of concrete, mortar and other composite materials. Dramix® RC-80/60-BP is a high carbon wire fibre, with hooked ends, and glued in bundles.



Applications:
 recommended in applications with concrete strength > C50/60

- segmental linings
- precast panels
- prestressed beams
- military structures
- vaults
- self levelling high strength concrete
- pavements

- Geometry:**



Length (l)
60 mm



Diameter (d)
0.71 mm

80 Performance class: 80

Aspect ratio (= l/d): 85

5 000 fibres/kg

- Tensile strength:**
 - on the wire: minimum 2300 N/mm²
- Coating:** None
- Approvals:**

Conforms to
ASTM A820

Product
Germany
Z-3.71-1745

Czech Republic
C.070-021415

Quality System in
Belgian, Brazilian, Czech,
Turkish and Chinese plants



Product
Romania
007-01/068-2003

Slovak Republic
1402A/02/0771/1/C/C04

Recommendations - mixing

- 1. General**
 - ✓ preferably use a central batching plant mixer
 - ✓ recommended maximum dosage:

Max. aggregate size (mm)	Dosage (kg/m ³)	
	pour	pump
8	60	45
16	50	35
32	35	30
 - ✓ a continuous grading is preferred
 - ✓ mix until all glued fibres are separated into individual fibres. Fibres don't increase mixing time significantly.
 - ✓ if special cements or admixtures are used, a preliminary test is recommended
- 2. Fibre addition**



Bags are non-degradable and may not be thrown into the concrete.

 - 2.1. In batching plant mixer**
 - ✓ never add fibres as first component in the mixer
 - ✓ fibres can be introduced together with sand and aggregates, or can be added in freshly mixed concrete
 - 2.2. Truckmixer**
 - ✓ run mixer at drum speed: 12-18 rpm
 - ✓ adjust slump to a min. of 12 cm (preferably with water reducing agents or high water reducing agents)
 - ✓ add fibres with maximum speed of 40 kg/min
 - ✓ optional equipment: belt-hoist elevator
 - ✓ after adding the fibres, continue mixing at highest speed for 4-5 min. (± 70 rotations)
 - 2.3. Automatic dosing**
 - ✓ Fibres can be dosed from bulk at rates from 0 up to 3,5 kg/sec with a specially developed dosing equipment

Recommendations - storage



Protect the pallets against rain



Do not stack the pallets on top of each other



Delivered in

non water-soluble bags of 20 kg on pallet 1200 kg

big bag 1100 kg

.N.V. Bekaert S.A. - Bekaertstraat 2 - 8550 Zwevegem - Belgium
 Tel. +32 (0) 56 / 76 69 86 - Fax +32 (0) 56 / 76 79 47
 Internet: <http://www.bekaert.com/building>

Values are indicative only. Modifications reserved. All details describe our products in general form only. For ordering and design only use official specifications and documents. N.V. Bekaert S.A. 2006

Annexe 2 Empilement granulaire

Les coulis en phase pendulaire se présentent sous la forme d'agglomérats sphériques dont trois catégories de taille se distinguent : les petites sphères (sphères F), dont le diamètre est inférieur à 0,25 mm, des sphères de taille moyenne (sphères M), ayant un diamètre compris entre 0,25 mm et 4 mm et enfin les plus gros agglomérats (sphères G) dont le diamètre est supérieur à 4 mm. L'hypothèse est faite que l'empilement est régi par les sphères G.

L'objectif de cette annexe est de définir les relations existant entre les sphères G et les sphères de taille inférieure susceptible de faire diminuer la porosité du système. La confrontation entre la théorie et les résultats expérimentaux est faite dans le § 2.3.5. L'Annexe 2.1 présente les empilements granulaires et l'Annexe 2.2 confronte les résultats théoriques aux mesures expérimentales.

Annexe 2.1 Empilement théorique

Annexe 2.1.1 Empilement des sphères G

L'empilement des sphères peut prendre plusieurs formes. Dans le cas d'un empilement de sphères de tailles égales, les couches peuvent prendre une configuration carrée ou triangulaire (respectivement cas 1-2-3 et 4-5-6 sur la Figure A - 1). Les pointillés représentent les contours des sphères de la seconde couche, parfaitement superposée dans les cas 1 et 4.

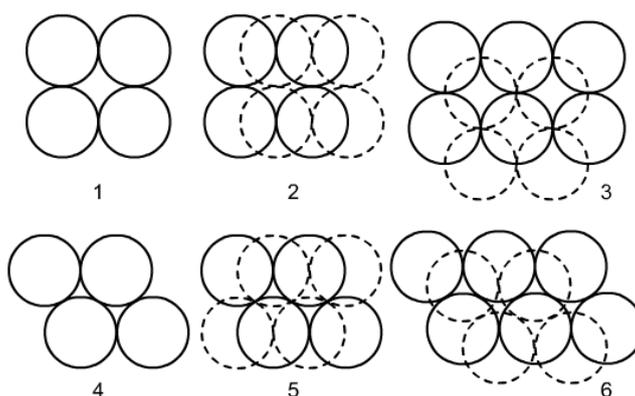


Figure A - 1 : Possibilités d'arrangement de sphères de tailles égales [MINES D'ALBI'08]

Le Tableau A - 1 présente les caractéristiques de chacun des cas apparaissant dans la Figure A - 1.

Cas n°	Nom de l'empilement	Porosité	Cas n°	Nom de l'empilement	Porosité
1	Cubique	0,48	4	Tétraédrique	0,4
2	Orthorhombique	0,4	5	Sphénoïdal	0,3
3	Cubique décalé	0,26	6	Tétraédrique décalé	0,26

Tableau A - 1 : Possibilités d'empilement granulaire

Un empilement est optimal quand sa porosité est la plus faible possible. Deux configurations conviennent, l'empilement cubique décalé et l'empilement tétraédrique décalé (cas n°3 et n°6 dans le Tableau A - 1). Seule l'étude du cas n°6 sera ici présentée, car elle a mené à des résultats cohérents avec les mesures expérimentales.

Dans le cas n°6, quatre sphères G forment un tétraèdre, dont le centre est le centre du repère orthonormé (0,x,y,z). Les coordonnées des centres de ces quatre sphères apparaissent dans le Tableau A - 2.

X centre	Y centre	Z centre	Rayon de la sphère
0	$-\frac{2}{3}R_G\sqrt{3}$	$-\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$	R_G
$-R_G$	$\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$	$-\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$	R_G
R_G	$\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$	$-\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$	R_G
0	0	$\frac{2}{3}R_G\sqrt{3}$	R_G

Tableau A - 2 : Coordonnées des centres des sphères G dans une configuration tétraédrique décalé

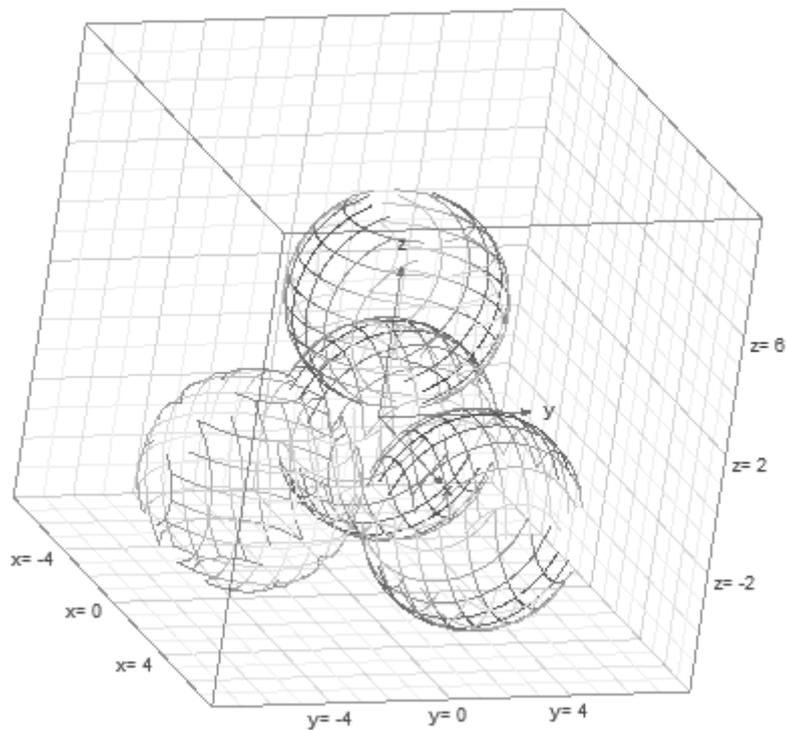


Figure A - 2 : Empilement de quatre sphères G

Dans un empilement composé de sphères G de rayon R_G , des sphères plus petites peuvent venir s'intercaler dans les interstices, M^+ dans les vides et M^- dans les cols, réduisant ainsi la porosité du système.

Annexe 2.1.2 Dimension et positionnement des sphères M^+ :

Les centres des sphères G forment un tétraèdre. Le centre de gravité du tétraèdre est le centre de la sphère inscrite M^+ .

Les coordonnées du centre de cette sphère sont donc :

$$x = 0$$

$$y = 0$$

$$z = z_{base\ tétraèdre} + \frac{hauteur\ tétraèdre}{4}$$

La base du tétraèdre a une coordonnée sur $z = -\frac{R_G}{3}\sqrt{3}$. La hauteur du tétraèdre est de $R_G\sqrt{3}$.

Le centre de la sphère M^+ a donc pour coordonnées :

$$x = 0$$

$$y = 0$$

$$z = -\frac{R_G \sqrt{3}}{12}.$$

La Figure A - 3 présente une des sphères G (celle alignée sur l'axe des z) et la sphère M⁺.

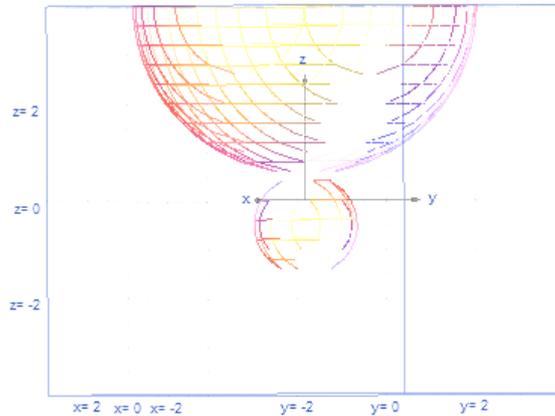


Figure A - 3 : Sphère G et sphère M+ alignées sur l'axe des z

Le rayon de la sphère inscrite est donc la distance entre le centre de la sphère inscrite et la sphère G dont le centre est également sur l'axe des z. Le calcul du rayon de la sphère M+ se fait alors facilement :

$$R_{M^+} = \text{distance entre les centres des deux sphères} - \text{rayon de la sphère G}$$

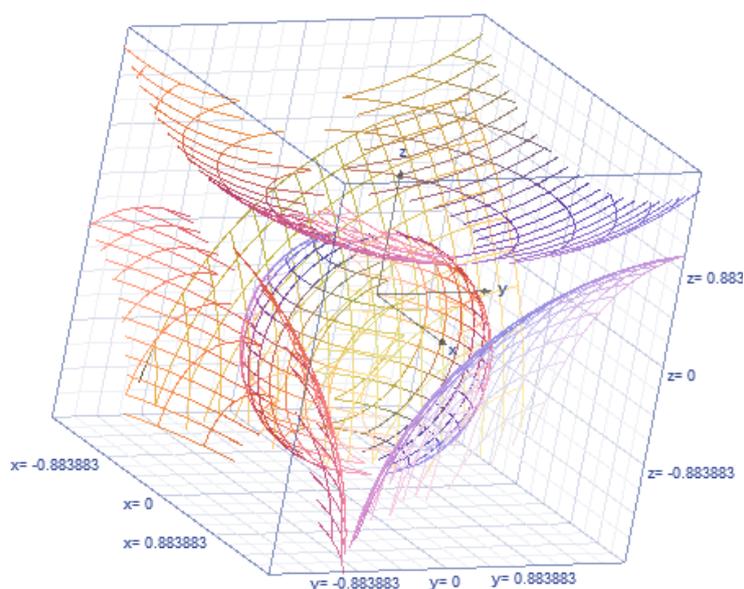
$$R_{M^+} = \frac{R_G}{12} \sqrt{3} + \frac{2R_G}{3} \sqrt{3} - R_G = R_G \left(\frac{3}{4} \sqrt{3} - 1 \right) = 0,299 R_G$$

La sphère M⁺ peut ainsi être décrite par (A - 1):

$$x_{M^+} = 0 ; y_{M^+} = 0 ; z_{M^+} = -\frac{R_G}{12} \sqrt{3} ; R_{M^+} = 0,299 R_G$$

(A - 1)

La Figure A - 4 confirme visuellement ces indications :

Figure A - 4 : Sphère M^+ dans l'empilement formé par les sphères G

Annexe 2.1.3 Dimension et positionnement des sphères M^- :

Les sphères G autorisent aussi le placement de sphères M^- dans les « cols » de l'empilement, comme le montre la Figure A - 5.

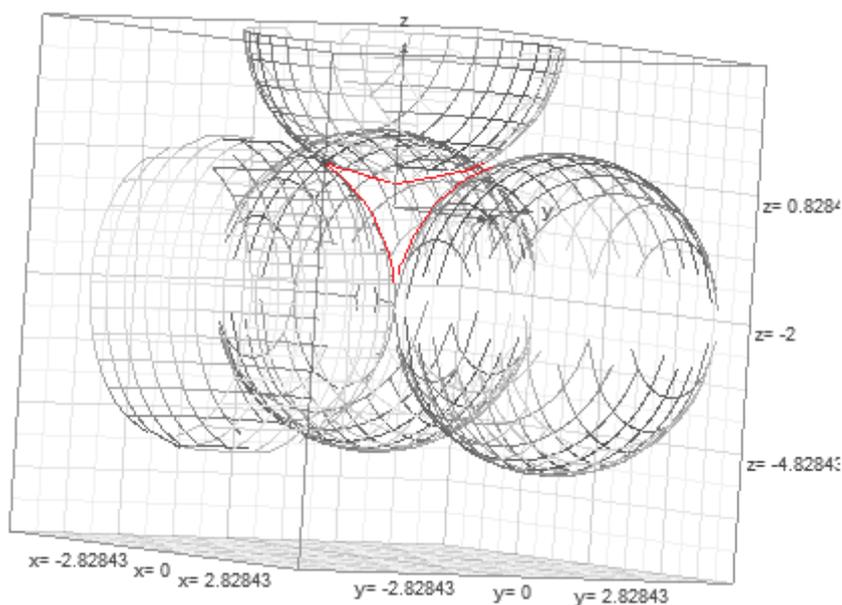


Figure A - 5 : Emplacement des sphères dans les cols de l'empilement granulaire formé par les sphères G

Le rayon de cette sphère est celui du cercle inscrit dans la configuration de la Figure A - 6.

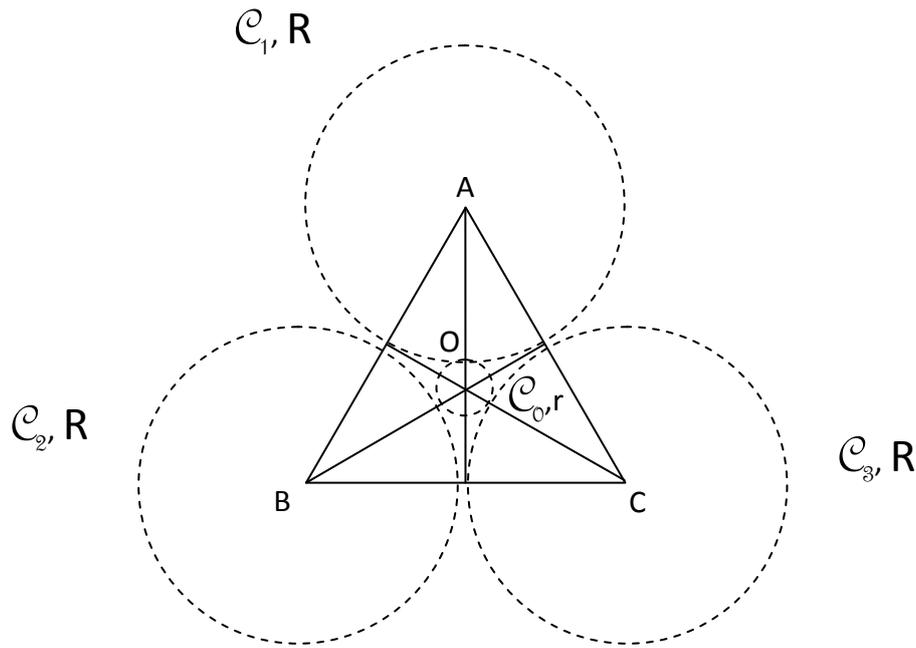


Figure A - 6 : Cercle inscrit entre trois cercles

Avec quelques notions de géométrie, il est possible d'écrire :

$$R_{M^-} = OA - R_G$$

$$R_{M^-} = \frac{2}{3}h - R_G$$

$$R_{M^-} = \frac{2}{3}\sqrt{(2R_G)^2 - R_G^2} - R_G$$

$$R_{M^-} = R_G \left(\frac{2\sqrt{3} - 3}{3} \right)$$

$$R_{M^-} = 0,1547 R_G \quad (\text{A - 2})$$

Les sphères M^- ont un rayon $R_{M^-} = 0,1547 R_G$. Cherchons à présent les coordonnées de leur centre.

Coordonnées des centres des sphères M^- :

La Figure A - 7 montre que les centres de trois des quatre sphères M^- situées dans les cols de l'empilement généré par les sphères G sont sur $z = 0$. Le centre de la quatrième sphère est quant à lui sur l'axe des z .

Commençons par déterminer les coordonnées de centres des sphères situées sur $z = 0$.

Dans le plan $z = \frac{-R}{3}\sqrt{3}$ (Figure A - 7), les trois sphères se touchent.

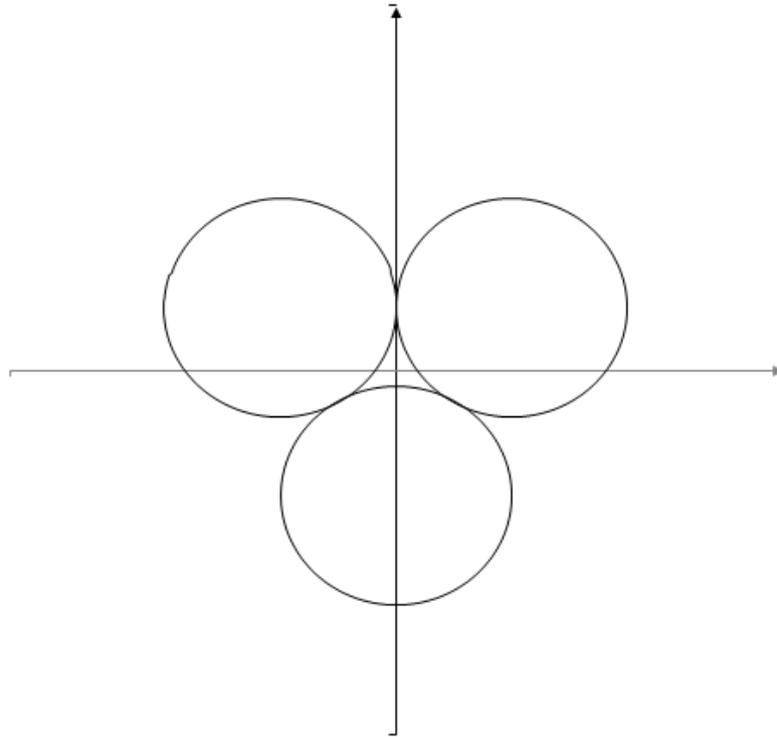


Figure A - 7 : section de l'empilement granulaire en $z = -\frac{R}{3}\sqrt{3}$

Dans le plan $z = 0$, la configuration change et la section des sphères devient un disque de rayon plus petit. Ce nouveau rayon est égal à $R_G - R_{M^-}$.

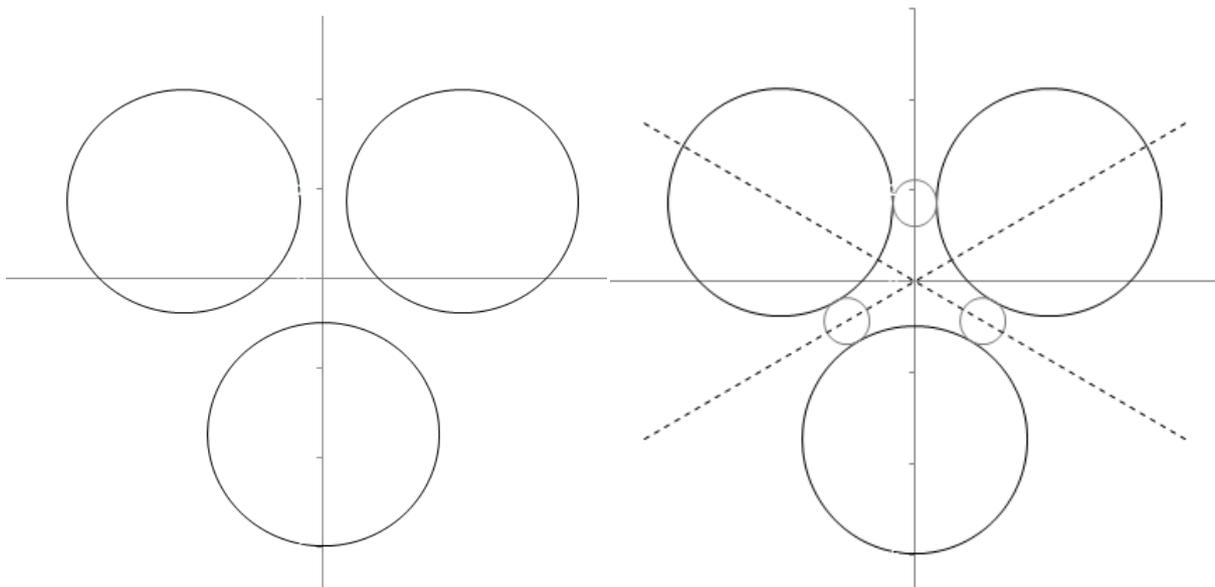


Figure A - 8 : Positionnement des sphères M^- dans l'empilement des sphères G , $z=0$

Les centres des sphères M^- sont à égale distance du centre du repère orthonormé. Cherchons cette distance dans le cas le plus facile représenté sur la Figure A - 8. Il s'agit de

chercher pour quel y l'équation du cercle de centre $x = R_G$ et $y = \frac{\sqrt{3}}{3}R_G$ et de rayon $(R_G - R_{M^-})$ est vérifiée.

$$(x - R_G)^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}}{3}R_G\right)^2 = (R_G - R_{M^-})^2$$

Cette équation est vérifiée pour $x = -R_{M^-}$:

$$\begin{aligned} ((-R_{M^-}) - R_G)^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}}{3}R_G\right)^2 &= \left(R_G - R_G \frac{2 - \sqrt{3}}{3}\right)^2 \\ \left(\frac{2\sqrt{3} - 3}{3}R_G - R_G\right)^2 + \left(y - \frac{\sqrt{3}}{3}R_G\right)^2 &= \left(R_G - R_G \frac{2 - \sqrt{3}}{3}\right)^2 \end{aligned}$$

Les termes de gauche et de droite s'annulent, ce qui donne $y = \frac{\sqrt{3}}{3}R_G$.

Les centres des autres sphères M^- se trouvent à une distance égale à $\frac{\sqrt{3}}{3}R_G$ du centre du repère. Ils sont situés sur les droites de coefficients directeurs $\pm \frac{\sqrt{3}}{3}R_G$ qui forment un angle de $\frac{\pi}{6}$ avec l'axe des abscisses, comme le montre la Figure A - 8.

Les coordonnées des centres des deux autres sphères M^- dans cette couche sont donc :

$$\left(\pm \frac{\sqrt{3}}{3}R_G \cos \frac{\pi}{6}; -\frac{\sqrt{3}}{3}R_G \sin \frac{\pi}{6}\right) = \left(\pm \frac{R_G}{2}; -\frac{\sqrt{3}}{6}R_G\right)$$

La dernière des sphères M^- est située sous la sphère M^+ . Son centre est lui aussi sur z et la coordonnée peut être ainsi calculée :

$$\begin{aligned} z &= \text{centre sphère } M^+ - R_{M^+} - R_{M^-} \\ z &= -\frac{\sqrt{3}}{12}R_G - \left(\frac{3}{4}\sqrt{3} - 1\right)R_G - \left(\frac{2\sqrt{3} - 3}{3}\right)R_G \\ z &= \left(\frac{4 - 3\sqrt{3}}{2}\right)R_G \end{aligned}$$

Il est à présent possible de rassembler l'ensemble des résultats dans le Tableau A - 3 et d'observer l'empilement sur la Figure A - 9.

X centre	Y centre	Z centre	R_{M^-}
0	$\frac{\sqrt{3}}{3} R_G$	0	$R_{M^-} = 0,1547 R_G$
$\frac{R_G}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6} R_G$	0	$R_{M^-} = 0,1547 R_G$
$-\frac{R_G}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{6} R_G$	0	$R_{M^-} = 0,1547 R_G$
0	0	$\left(\frac{4 - 3\sqrt{3}}{2}\right) R_G$	$R_{M^-} = 0,1547 R_G$

Tableau A - 3 : Synthèse des coordonnées des centres des sphères M-

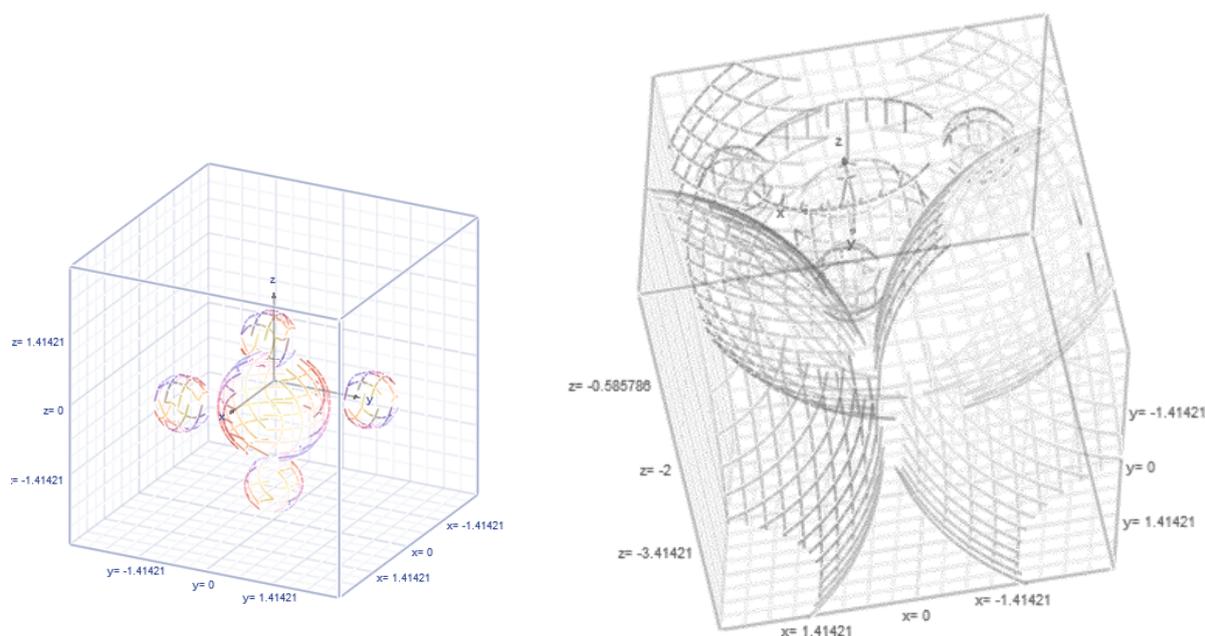
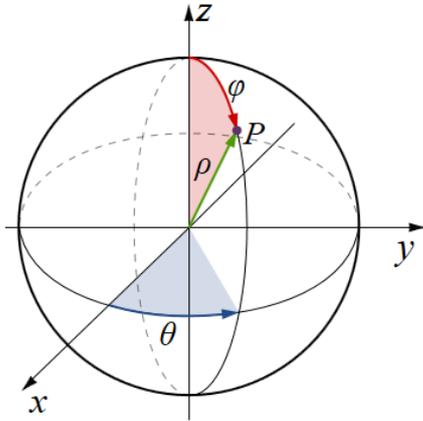


Figure A - 9: Empilement granulaire constitué de sphères G, M+ et M-

Annexe 2.1.4 Empilement des sphères F

Les centres des sphères G créent un tétraèdre qui abrite les sphères de taille inférieure, 1 sphère M^+ et 4 sphères M^- . A partir du volume de ce tétraèdre et des sphères qu'il contient, il est possible de connaître le volume non occupé de l'empilement.

Pour ce faire, il est nécessaire de connaître les portions de sphères G comprises dans le tétraèdre. Le volume d'une portion de sphère se calcule facilement en coordonnées sphériques (Figure A - 10).



$$V_{\text{sphère}} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^R \rho^2 d\rho$$

Figure A - 10 : Coordonnées sphériques

Dans notre cas, le volume de la portion de sphère est donc:

$$V = \int_0^{\pi/3} d\phi \int_0^{\pi/3} \sin \theta d\theta \int_0^{R_G} \rho^2 d\rho$$

$$V = \frac{\pi}{3} \frac{R_G^3}{3} [-\cos \theta]_0^{\pi/3}$$

$$V = \frac{1}{18} \pi R_G^3 = \frac{1}{24} \frac{4}{3} \pi R_G^3 = \frac{1}{24} \text{Volume sphère } G$$

Le volume non occupé dans l'empilement est donc :

$$V = V_{\text{tétraèdre}} - 4 * \frac{1}{24} V_{\text{sphère } G} - V_{\text{sphère } M+} - 4 V_{\text{sphère } M-}$$

Tout le volume non occupé n'est pas disponible. En effet, la compacité d'un milieu granulaire est systématiquement inférieure à 1. Le volume disponible pour des sphères plus petites, les sphères F, peut être calculé en connaissant la compacité de l'empilement (cf Annexe 3).

Annexe 2.2 Empilement granulaire réel

Comme le montre la Figure A - 11, l'empilement théorique permet à des sphères M^+ et des sphères M^- de s'intercaler entre les sphères G, positionnées en tétraédrique décalé.

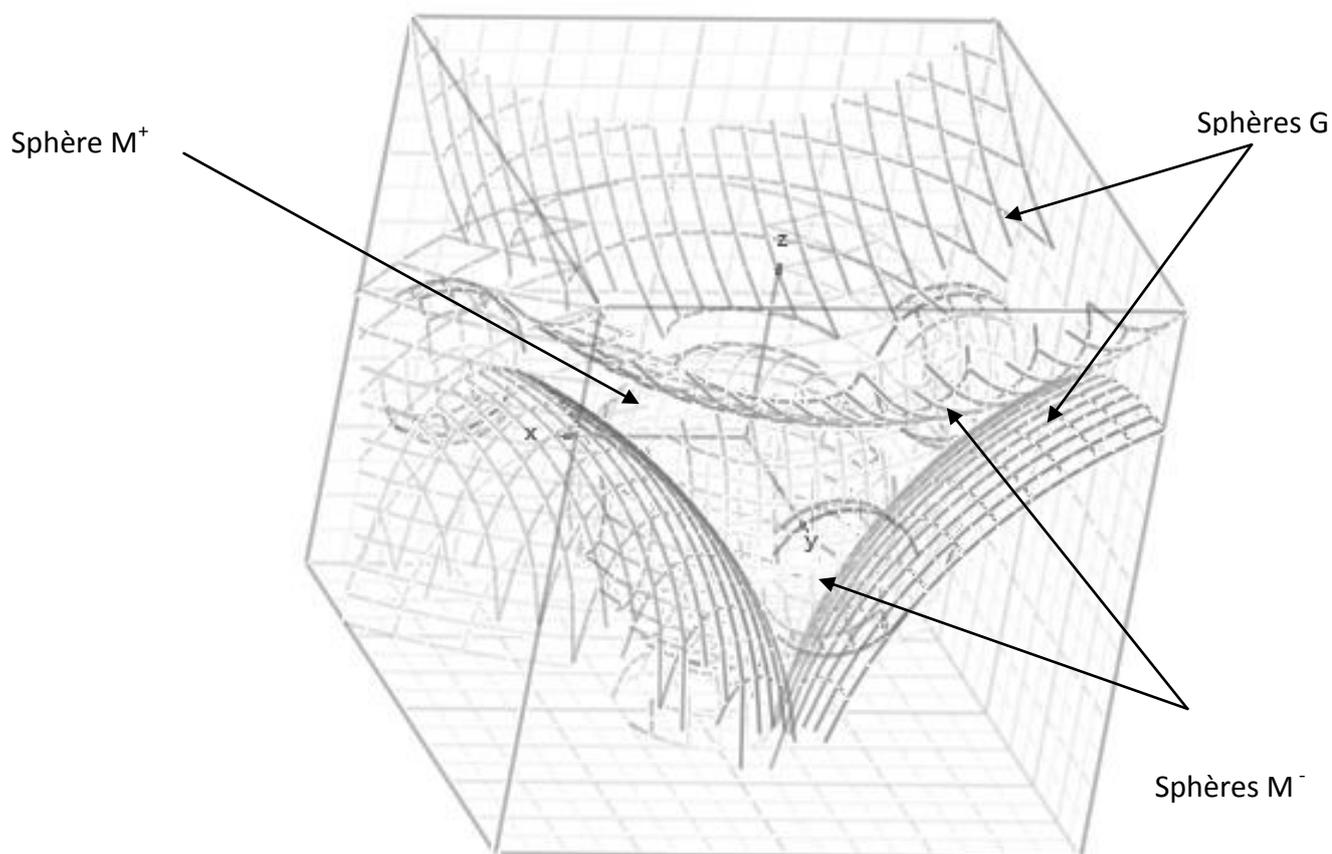


Figure A - 11 : Empilement de sphères

Vérifions à présent si le coulis de référence correspond à un tel empilement. La confrontation entre le réel et le théorique fait l'objet d'hypothèses : Les granulés de coulis formés sont considérés comme sphériques et indéformables et le coulis est scindé en différentes catégories représentatives de l'ensemble des granulés.

La taille des gros granulés est définie sur l'ensemble de la catégorie G. Un diamètre équivalent est calculé selon la relation (A - 3) à partir des valeurs indiquées dans Tableau A - 4. Le diamètre intermédiaire correspond au diamètre médian entre deux ouvertures de tamis consécutifs.

$$D_G = \frac{\sum_{i=4,8}^{10} P_i \cdot D_i}{\sum_{i=4,8}^{10} P_i} \quad (\text{A-3})$$

Ouverture des tamis, mm	Pourcentage massique de refus P_i	Diamètre intermédiaire D_i , en mm	Diamètre équivalent de la catégorie, mm
4	12,40	4,8	7,06 (40,34 % du coulis)
5,6	16,97	6,8	
8	10,97	10	

Tableau A - 4 : Diamètre équivalent des gros granulés

L'ensemble de la catégorie des agglomérats de taille moyenne participe à l'empilement mais si les règles de l'empilement granulaire sont respectées, le diamètre des gros granulés fixe les diamètres inférieurs. Conformément aux résultats trouvés dans l'annexe 2.1, les sphères M ont donc les diamètres suivants :

$$D_{M^+} = 0,299 D_G = 2,11 \text{ mm} \quad (\text{A-1})$$

$$D_{M^-} = 0,1547 D_G = 1,09 \text{ mm} \quad (\text{A-2})$$

Les sphères M^+ peuvent être associées au refus du tamis de 2 mm et les sphères M^- à ceux du tamis d'ouverture 1 mm. Ces sphères représenteront donc la catégorie des granulés de taille moyenne dans l'empilement, à hauteur de 18 % pour les sphères M^+ et 27 % pour les sphères M^- . Les diamètres choisis pour ces sphères correspondent aux ouvertures intermédiaires de tamis, soit 1,5 mm pour les refus du tamis de 1 mm et 2,575 pour les refus du tamis de 2 mm.

Le Tableau A - 5 présente les trois grandeurs caractéristiques des coulis pouvant donc être utilisées pour confronter les coulis réel avec un empilement granulaire polydisperse calculé à partir des diamètres théoriques.

Granulés	Empilement théorique	Empilement réel		
	Diamètre, mm	Diamètre, mm	Volume unitaire, mm ³	Pourcentage massique ou volumique
G	7,06	7,06	184	40 %
M ⁺	=0,299.D _G = 2,11	2,575	8,9	18 %
M ⁻	= 0,1547.D _G = 1,09	1,5	1,8	27 %

Tableau A - 5 : Grandeurs caractéristiques du coulis de référence

Vérifions à présent que les pourcentages massiques mesurés correspondent également à un empilement théorique optimal, c'est-à-dire que pour 1 sphère G, il y a 6 sphères M⁺, 24 sphères M⁻ et une porosité encore suffisante pour les sphères F.

Les sphères G représentent 40 % de l'empilement, le volume total occupé par les granulés dans l'empilement, noté V_{total} , peut donc être déterminé par le calcul suivant :

$$V_{total} = \frac{V_G}{\% \text{ volumique occupé par } G} = \frac{184 * 100}{40} = 460 \text{ mm}^3$$

- Nombre de sphères M⁺ :

Les sphères M⁺ représentent 18 % du volume total. Le volume V_{M^+} occupé par ces sphères est donc :

$$V_{M^+} = \frac{18}{100} * V_{total} = 83 \text{ mm}^3$$

Soit un nombre de sphères M⁺ dans un empilement autour d'une sphère G égal à 9 :

$$nb_{M^+} = \frac{V_{M^+}}{V_{sphère M^+}} = \frac{83}{8,9} = 9 \text{ sphères } M^+$$

- Nombre de sphères M⁻ :

Les sphères M^- représentent 27 % du volume initial :

$$V_{M^-} = 27 \% \cdot V_{total} = 124 \text{ mm}^3$$

Soit un nombre de sphères M^- dans l'empilement construit autour de G de :

$$nb_{M^-} = \frac{V_{M^-}}{V_{sphère M^-}} = \frac{124}{1,8} = 69 \text{ sphères } M^-$$

Notre interprétation du coulis de référence suggère que 9 sphères M^+ et 69 sphères M^- viennent combler la porosité engendrée par une sphère G. Comme le montre le Tableau A - 6, ces résultats ne sont pas exactement les mêmes que ceux trouvés lors de l'étude d'un empilement théorique optimal mais les ordres de grandeurs restent satisfaisants. L'explication de cet écart peut trouver sa source dans la simplification du coulis en un mélange discret et dans l'ignorance du diamètre exact des granulés.

Empilement théorique		Empilement réel			
1/6 sphère G	1 M^+	1 sphère G	9 M^+	1/6 sphère G	1,5 M^+
	4 M^-		69 M^-		11,5 M^-

Tableau A - 6 : Confrontation coulis réel et empilement théorique

Concernant les granulés plus fins, il est possible de calculer D_F , le diamètre représentatif de l'ensemble des très petits granulés du système à partir des données fournies dans le Tableau A - 7

Ouverture des tamis, mm	Pourcentage massique de refus, Pi	Diamètre intermédiaire Di, en mm	Diamètre équivalent de la catégorie, mm
0,063	4,61	0,0715	0,116 (14,59 % du coulis)
0,08	7,46	0,115	
0,15	2,52	0,2	

Tableau A - 7 : Diamètre équivalent des granulés fins

Vérifions à présent si l'empilement définit plus haut accepte leurs présence pour diminuer sa porosité.

Cas des sphères F :

L'empilement est calculé théoriquement dans un tétraèdre formé par les centres des sphères G (voir annexe). Le volume disponible, noté V_{dispo} a été calculé dans l'Annexe 2.1 et est calculable selon :

$$V_{dispo} = V_{tétraèdre} - V_G - V_{M+} - V_{M-} = 49,6 \text{ mm}^3$$

Ce volume n'est pas entièrement disponible pour les sphères F puisque la porosité du système n'est pas nulle. La compacité du coulis a été déterminée expérimentalement (voir Annexe 3) et est de 59 %.

Le volume réellement occupé par les sphères F est donc de :

$$V_{dispo} = \text{Compacité} * V_{tétraèdre} - V_G - V_{M+} - V_{M-} = 13,6, \text{ mm}^3$$

Le nombre théorique de sphères F est donc de :

$$nb_F = \frac{V_{dispo}}{V_{unitaire}} = \frac{13,6}{0,000817} = 16649 \text{ sphères F}$$

Si cette même démarche est appliquée avec les résultats expérimentaux, le volume disponible est de 69 mm³.

$$V_{dispo} = V_{empilement} - V_G - V_{M+} - V_{M-}$$

$$V = 460 - 184 - 83 - 124 = 69 \text{ mm}^3$$

Dans ce cas, la compacité du système n'est pas à prendre en compte puisque le volume de l'empilement est déduit du pourcentage massique, il s'agit donc du volume « réel » et non du volume occupé.

Le nombre de sphères F pouvant combler l'empilement formé par une sphère G est donc de:

$$nb_F = \frac{V_{dispo}}{V_{unitaire}} = \frac{69}{0,000817} = 84455 \text{ sphères } F$$

La confrontation complète entre le coulis de référence et l'empilement théorique apparaît dans le Tableau A - 8. Tout comme dans le cas des sphères M⁺ et M⁻, l'ordre de grandeur obtenu expérimentalement concernant les sphères F est compatible avec l'empilement théorique.

	Empilement théorique		Empilement réel	
	Nombre de granulé	En % volumique	Nombre de granulé	En % volumique
G	1	59	1	41
M ⁺	6	10	9	17
M ⁻	24	5	69	27
F	99894	26	84455	15

Tableau A - 8 : Confrontation entre le coulis de référence et l'empilement optimal théorique

Ce tableau permet de constater que le coulis de référence présente des pourcentages massiques pour des granulés de différentes tailles proche d'un empilement granulaire optimal gouverné par la taille des plus gros granulés.

Annexe 3 Détermination de la compacité de l'empilement granulaire

La compacité de l'empilement granulaire a été estimée par des mesures successives de volume avant et après vibration (Figure A - 12).

Avant la première vibration, le bécher est progressivement rempli avec des sphères de diamètre décroissant. Le volume mesuré mène à une compacité de 0,4. Quelques secondes de vibration entraînent une migration des sphères les plus fines dans le fond du bécher. La compacité est alors de 0,46.

Avant vibration, compacité 0,4



Après vibration, compacité 0,46



Figure A - 12 : Détermination de la compacité de l'empilement granulaire

Un mélange manuel des sphères est alors effectué, la compacité augmente à 0,49. Ce mélange est ensuite vibré pour atteindre la compacité de 0,59.

Cette valeur sera retenue comme étant la compacité du mélange.

La compacité du mélange est calculée ainsi

$$\text{compacité} = \frac{\text{Volume des sphères}}{\text{Volume occupé par les sphères}}$$

Le volume occupé par les sphères est accessible via la mesure de la hauteur d'occupation du bécher.

Le volume des sphères est déduit de la masse introduite dans le bécher et de la masse volumique du coulis en phase pendulaire. Cette dernière a été déterminée expérimentalement (*cf* Annexe 4).

Annexe 4 Détermination de la masse volumique des coulis en phase pendulaire

La masse volumique des coulis a été déterminée en introduisant une masse connue de coulis sous forme pendulaire dans une fiole contenant un liquide ne mouillant pas le ciment, le tétrachlorure de carbone.

L'essai se déroule ainsi :

- Fabrication du coulis en phase pendulaire
- Pesée du coulis en phase pendulaire
- Introduction de la totalité du coulis dans une fiole
- Pesée de la fiole
- Tare de la balance
- Remplissage de la fiole avec du tétrachlorure de carbone jusqu'au trait de jauge
- Pesée de la fiole
- Déduction du volume introduit de tétrachlorure de carbone (masse volumique connue)
- Déduction du volume de coulis présent dans la fiole
- Calcul de la masse volumique du coulis

Cet essai a été réalisé sur des coulis ayant des rapports E/C différents. Les résultats apparaissent sur la Figure A - 13.

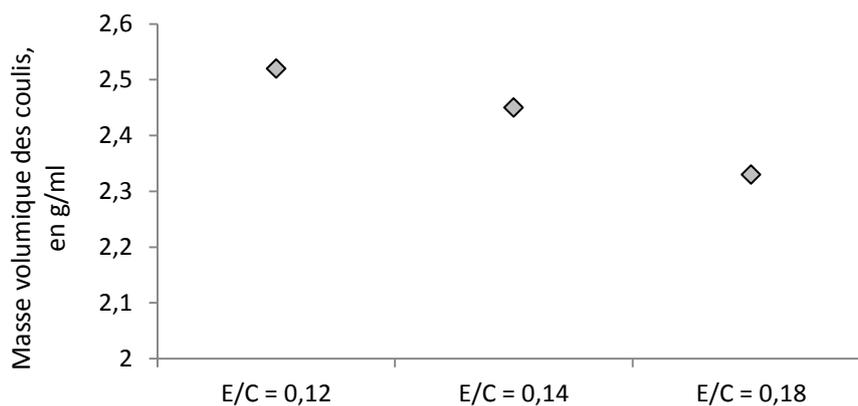


Figure A - 13 : Masses volumiques des coulis déterminées expérimentalement

Ces mesures expérimentales peuvent à présent être confrontées aux masses volumiques théoriques calculées selon cette relation :

$$Mv_{coulis} = \frac{V_{ciment}}{V_{total}} Mv_{ciment} + \frac{V_{eau}}{V_{total}} Mv_{eau}$$

Le volume de ciment est déduit à partir de sa masse (mesurée) et de sa masse volumique (fournie par le constructeur, voir fiche technique du ciment en Annexe 1.1.1).

Les résultats théoriques et expérimentaux apparaissent sur la Figure A - 14.

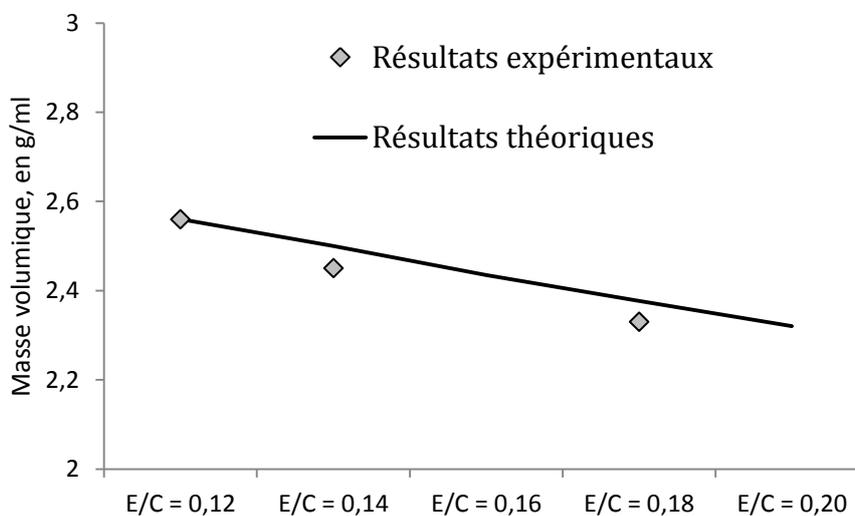


Figure A - 14 : Résultats théoriques et expérimentaux concernant la masse volumique des coulis

La superposition des résultats expérimentaux et théoriques est correcte et la relation suivante est vérifiée dans le cas de coulis en phase pendulaire.

$$Mv_{coulis} = \frac{V_{ciment}}{V_{total}} Mv_{ciment} + \frac{V_{eau}}{V_{total}} Mv_{eau}$$

La masse volumique utilisée dans le chapitre 2 est calculée à partir de la formule ci-dessus pour un E/C égal à 0,16, correspondant au coulis de référence étudié.

Annexe 5 Détermination des vitesses linéaires en bout de pale

Les malaxeurs utilisés sont des malaxeurs à planétaires pouvant être schématisés ainsi :

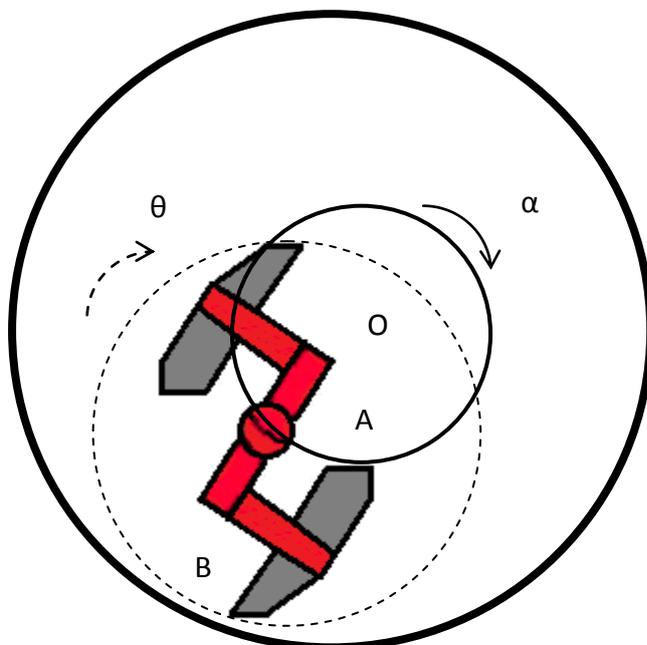


Figure A - 15 : Schéma d'un malaxeur à planétaire

OA est la distance entre le centre des pales et le centre du malaxeur. $OA = d$

α est la rotation du bras de malaxage dans le repère centré en O. N_b est la vitesse du bras de malaxage en tr/min

$$\alpha(t) = \frac{2\pi}{60} N_b t$$

AB est la distance entre le centre des pales et l'extrémité d'une pale. $AB = r$

θ est la rotation des pales dans le repère centré en A. N_p est la vitesse des pales en tr/min.

$$\theta(t) = \frac{2\pi}{60} N_p t$$

Pour connaître la vitesse du point B dans un repère lié au malaxeur centré en O, il convient d'abord d'exprimer le vecteur position \overrightarrow{OB} .

$$\overrightarrow{OB} = [d \cos \alpha + r \cos(\alpha + \theta)] \vec{x} + [d \sin \alpha + r \sin(\alpha + \theta)] \vec{y}$$

En dérivant le vecteur position, le vecteur vitesse du point B dans le repère $(0, \vec{x}, \vec{y})$ s'écrit ainsi :

$$\vec{V}_B = [-\dot{\alpha} d \sin \alpha - r(\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \sin(\alpha + \theta)] \vec{x} + [\dot{\alpha} d \cos \alpha + r(\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \cos(\alpha + \theta)] \vec{y}$$

$\dot{\alpha}$ et $\dot{\theta}$ s'expriment ainsi :

$$\dot{\alpha} = \frac{2\pi}{60} N_b \text{ et } \dot{\theta} = \frac{2\pi}{60} N_p$$

La vitesse linéaire est calculée ensuite comme le module du vecteur vitesse défini ci-dessus.

Annexe 6 Estimation de la teneur en fibre d'un béton dans le malaxeur

Il est possible de détecter la présence de fibres conductrices dans le béton frais en utilisant une méthode basée sur les mesures de résistivité électrique. Cette méthode et une interprétation des résultats obtenus sont proposés dans les chapitres 3 et 4 de ce manuscrit.

Pour ce faire, il est nécessaire de disposer :

- d'un appareil de mesure électrique
- d'un dispositif d'isolation des mesures
- d'un malaxeur permettant l'introduction du dispositif de mesure

L'interprétation des mesures nécessite de connaître :

- l'évolution de la résistivité électrique d'un béton frais non fibré au cours du temps
- le facteur d'aspect, la masse volumique et la fraction volumique des fibres introduites

A partir de ces informations, il est possible de déduire les données suivantes :

- La résistivité correspondant à une dispersion optimale des fibres
- La tolérance sur cette résistivité correspondant à la tolérance du dosage en fibres (+/- 5% d'après la norme EN 206-1, norme en vigueur en 2014)

L'essai consiste en deux phases de mesure :

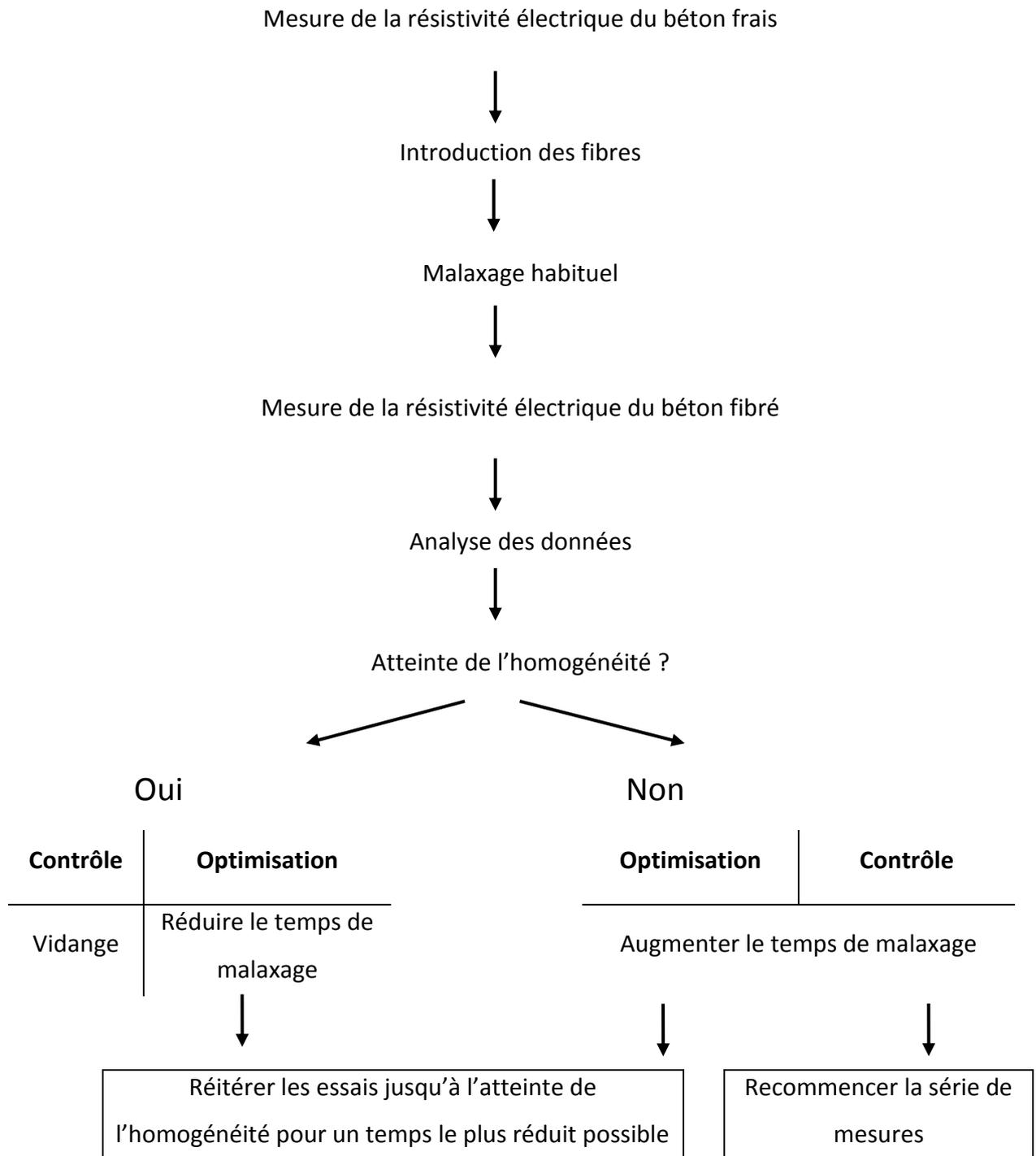
- Mesure de la résistivité électrique du béton frais, non fibré
- Mesure de la résistivité électrique du béton fibré

Nota : Cet essai implique une introduction des fibres en phase humide. Il est possible d'adapter la méthode proposée à une introduction des fibres en phase sèche, sous réserve d'avoir mesuré auparavant la résistivité électrique d'un béton non fibré de même composition.

Nota : Pendant ces mesures, l'observation visuelle est également requise, notamment pour constater la présence d'oursins, qui se trouvent parfois hors des zones de mesure (derrière les pales par exemple).

La procédure à suivre varie selon l'objectif de la démarche :

- **Optimisation d'un processus de fabrication** : L'objectif est de connaître le temps minimum nécessaire à la dispersion des fibres à une vitesse de malaxage donnée.
- **Contrôle en fin de fabrication** : L'objectif est de contrôler la dispersion des fibres à la fin d'une gâchée.



Annexe 7 Comparaison d'intensité de cisaillement de malaxeur

Il est possible de comparer l'efficacité de deux malaxeurs en étudiant la répartition granulométrique d'agglomérats formés dans ces appareils. L'expérience doit alors être réalisée dans les conditions habituelles de fabrication des malaxeurs (taux de remplissage, vitesse utilisée).

Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir :

- Du ciment
- De l'eau
- Deux malaxeurs

L'essai se déroule ainsi :

- Préparation de deux coulis de même formulation dans les malaxeurs. Veiller à conserver le même temps de malaxage
- Séchage des coulis en phase pendulaire obtenus pendant une journée
- Tamisage des coulis. Le choix des tamis est laissé à l'appréciation de l'utilisateur. Rappelons que les gros granulés sont également représentatifs du coulis, il n'est donc pas forcément nécessaire d'accomplir la granulométrie sur l'ensemble du coulis.

L'analyse des résultats consiste à :

- Calculer le diamètre moyen des coulis, D_m
- Comparer les diamètres moyens obtenus sur différents malaxeurs : Les diamètres moyens faibles sont synonymes de cisaillement important (cf Chapitre 2).

Afin d'augmenter la fiabilité de ces mesures, il est recommandé de réitérer ces essais plusieurs fois.

