



Modeling tools for concrete casting

Thi Lien Huong Nguyen

► To cite this version:

Thi Lien Huong Nguyen. Modeling tools for concrete casting. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2007. English. NNT : . pastel-00004048

HAL Id: pastel-00004048

<https://pastel.hal.science/pastel-00004048>

Submitted on 18 Aug 2008

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 pour l'obtention du diplôme de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité : *Structures et matériaux*

par

Thi Lien Huong NGUYEN

Sujet de thèse:

Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons

Soutenue le 13 décembre 2007 devant le Jury composé de:

Président :	M.Christophe LANOS	LGCGM, INSA Rennes
Rapporteur :	M. Sofiane AMZIANE	Université de Bretagne Sud
Examineurs :	M. François DE LARRARD	Direction Scientifique, LCPC
	M. Mohend CHAOUCHE	Ecole Normale Supérieure de Cachan
Directeur de thèse :	M. Philippe COUSSOT	Université Paris-Est, Navier
Conseiller d'études:	M. Nicolas ROUSSEL	BCC, LCPC Paris

Remerciements

Ce travail de thèse, réalisé au laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (LMSGC) et à la division Bétons et Composites cimentaires (BCC) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris (LCPC), n'aurait pu être mené à bien sans l'aide des personnes à qui je voudrais adresser toute mon remerciement.

Mes premiers remerciements vont à mon conseiller d'étude, Monsieur Nicolas ROUSSEL, qui m'a dirigé tout au long de ces trois années de thèse dans la continuité de mon stage de D.E.A., avec beaucoup de compétence, d'enthousiasme et de disponibilité. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans lui. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie chaleureusement mon directeur de thèse, Monsieur Philippe COUSSOT. Ses connaissances de rhéologie, rhéométrie et rhéophysique des pâtes ont été précieuses. Il a en plus consacré une partie de son temps pour établir le modèle probabiliste pour la prédiction du blocage granulaire au passage d'un obstacle. Je lui adresse ma sincère gratitude.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur M. Christophe LANOS, Professeur à INSA Rennes, pour avoir présidé mon jury de thèse et pour avoir accepté de rapporter mon mémoire. Je lui suis particulièrement reconnaissante de m'avoir prodigué ses conseils lors des réunions d'opération quand je présentais l'avancement des travaux de thèse.

Mes vifs remerciements sont adressés à Monsieur Sofiane AMZIANE, chercheur l'Université de Bretagne Sud, également rapporteur de ma thèse, pour les commentaires sur le mémoire et ses discussions lors de la soutenance qui ont été constructifs. Je suis également très reconnaissante à Monsieur François DE LARRARD, Directeur de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, qui m'a fait l'honneur de s'intéresser à ce travail malgré ses lourdes charges. Mes remerciements vont aussi à Monsieur Mohend CHAUCHE, Directeur de recherche à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Je souhaite remercier Thao HUYNH, chercheur de la division BCC, avec qui j'ai beaucoup appris et qui m'a assuré ses conseils et sa disponibilité. Les discussions que nous avons eues au cours de ces trois années ont été particulièrement enrichissantes.

La qualité et la continuité des données présentées ici sont le fruit d'un travail d'équipe. J'ai pour cela pleinement profité de la présence et de l'efficacité de l'Equipe de formulation et de fabrication du béton : Jérôme CARRIAT, Jean-Daniel SIMITAMBE, Frank GUIRADO. Merci vivement pour leurs gentilles, leur soutien et leur bonne humeur qui ont assuré le bon déroulement de ce travail.

Un grand merci à Alain DROUET du Service de la Documentation, pour son aide indispensable lors de ma recherche bibliographique. Je n'oublierai pas les aides permanentes reçues de Jean-Luc BACHELIER et Maurice SEVERIN de la Section Conception et Systèmes physiques, Division Métrologie et Instrumentation. Les dispositifs d'essai utilisés dans la thèse ont été parfaitement réalisés par eux.

À ces remerciements, je souhaite associer François MARTINEAU de la Division Mécanique des Sols, des Roches et Géologie de l'Ingénieur pour ses précieux conseils techniques et son aide concernant la modification de l'état de surface des inclusions. Merci aussi à Ludovic ROUTHÉ pour ses magnifiques photos au microscope électronique à balayage. J'exprime également ma sympathie à Hugues DELAHOUSSE, Jean-François BOUTELOUP, Patricia DELAUNAY, et les autres membres de la Division Béton et Composites Cimentaires.

Une pensée émue pour la troupe du convivial Laboratoire Central des Ponts et Chaussées avec qui j'ai passé trois années de thèse.

En fin, j'adresse un immense merci à ma grande famille, surtout mes parents et ma fille pour leur soutien inconditionnel et leur présence, malgré la distance qui nous séparait. Merci tout particulièrement mon mari Quang d'avoir si bien su m'encourager avant, pendant, et après ces années, qui, ne furent pas toujours des plus faciles.

A mes parents, ma fille et mon mari

Résumé

Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons

Thi Lien Huong NGUYEN

Que ce soit sur chantier ou en usine de préfabrication, de nombreux incidents de mise en œuvre apparaissent encore régulièrement malgré l'utilisation industrielle de bétons de plus en plus fluides : le béton mis en œuvre n'atteint pas les zones les plus difficiles d'accès ou ne remplit les zones les plus ferraillées. La vibration qui suit la mise en œuvre n'est pas toujours capable de rattraper ces défauts. Les Bétons Auto-Plaçant (BAP) ont bien sûr repoussé les limites traditionnelles de densité de ferraillement ou de forme des coffrages mais leur grande fluidité peut les rendre potentiellement sensibles à une ségrégation partielle de leurs composants en écoulement ou sous l'effet de la gravité. Finalement, pour un ouvrage et une technique de mise en œuvre donnés, le béton idéal serait un béton présentant une fluidité suffisante pour assurer un bon remplissage du coffrage mais sans tomber dans l'excès. Comme tout problème d'optimisation, un tel questionnement nécessite une connaissance solide des phénomènes physiques mis en jeu.

Grâce aux avancées récentes dans le domaine de la rhéologie des matériaux cimentaires, les travaux existants permettent de caractériser la capacité à s'écouler d'un mélange à l'état frais. L'objectif de cette thèse est de développer des techniques de prédiction de la mise en œuvre du matériau en fonction des mesures rhéologiques, des caractéristiques de l'élément à réaliser et du processus de mise en œuvre retenu. La méthodologie adoptée consiste à isoler et à traiter séparément chacun des problèmes évoqués dans une configuration simplifiée puis de combiner ensuite graduellement les phénomènes mis en jeu.

Un matériau modèle simple similaire au béton réel et pouvant reproduire les principaux traits du comportement rhéologique du béton est d'abord mis au point à partir de billes de verre mono-disperses de rugosité contrôlée mélangées dans une suspension de Carbopol, fluide à seuil, stable, transparent et non thixotrope.

Une série d'essais sur ce matériau modèle en canal horizontal non ferraillé ou ferraillé, permet alors l'étude des phénomènes suivants :

- L'arrêt de l'écoulement sous l'influence du seuil d'écoulement du matériau et des caractéristiques du coffrage.
- L'arrêt de l'écoulement sous l'influence d'un ferraillement élémentaire.
- Le blocage des granulats au droit des armatures.

Ces expériences de laboratoire sont menées en parallèle avec des approches analytiques et des simulations numériques. Une corrélation analytique entre les propriétés rhéologiques du matériau et l'arrêt de l'écoulement est proposée et comparée aux simulations numériques et aux mesures expérimentales. De plus, un modèle probabiliste permettant de prédire l'apparition du blocage des granulats au passage d'un ferraillement en fonction de la taille des grains, de leur concentration, du volume de matériau traversant et de la géométrie de l'obstacle est construit à partir des expériences sur fluides modèles et ensuite validé sur des bétons réels.

Il est cependant montré au vu des temps de calcul extrapolés que les simulations numériques utilisées dans cette thèse prenant en compte chacune des barres d'acier ne peuvent constituer un outil d'ingénierie utilisable dans la pratique. Une analogie entre zone ferraillée et milieu poreux est alors proposée en considérant le coulage d'un béton comme la propagation d'un fluide à seuil dans un milieu poreux hétérogène et anisotrope. Il devient alors possible d'associer à un plan de ferraillement donné une cartographie de perméabilité et ainsi se passer du maillage de chacune des barres d'acier. Cette technique est validée dans le cas d'écoulements simples de bétons réels dans des coffrages de laboratoire.

Mots clefs : Rhéologie, béton frais, matériau modèle, mise en œuvre, blocage granulaire.

Abstract

Modelling tools for concrete casting

Thi Lien Huong NGUYEN

Whether on site or in prefabrication factory, numerous incidents related to formwork filling still appear regularly despite the industrial use of concrete increasingly fluid : the concrete may not cross strongly reinforced or confined zones.

The Self Compacting Concrete (SCC), obviously has pushed back the traditional limits of steel bars density or complexity of the formwork, but its high fluidity makes them potentially more sensitive to segregation at rest or during flow. Finally, for a given work and casting process, the most suitable concrete would be the one having a fluidity enough to ensure a good formwork filling. As any optimization problem, such a question requires a solid knowledge of the involved physical phenomena.

Thanks to the recent advances in the cementitious materials rheology field, existing works make possible to physically quantify the workability of a fresh concrete. The objective of this thesis is to develop techniques for predicting the material casting according to these rheological measurements, the geometry of the element to be cast and the selected casting process. The methodology adopted is to isolate and treat each of the involved problems in a simpler configuration and then to gradually combine the phenomena involved.

A simple model material similar to the real concrete which could reproduce the main features of the rheological behavior of concrete was first developed on the basis of glass beads of uniform diameter and roughness controlled mixed in a suspension of Carbopol (yield stress fluid which is stable, transparent and non-thixotropic).

A series of tests on the model material in a bounded horizontal channel with or without steel bars allows the following studies :

- The flow stoppage under the influence of the material's yield stress as well as the geometrical characteristics of the formwork.
- The flow stoppage under the influence of steel bars.
- The particle blockings into the steel bars.

These laboratory tests have been investigated in conjunction with analytical approaches and numerical simulation. A correlation analysis between the rheological properties of the material and the flow stoppage is proposed and compared with numerical simulations and experimental measurements. In addition, a probabilistic approach able to predict the blockage of particles into the steel bars according to basic variables such as the size of the grains, their concentration, the volume of material and the geometrical characteristics of the steel bars is proposed based on the experiences of model material and then tested on real concrete.

However, it is shown in the light of computation time extrapolated that the numerical simulations used in this thesis taking into account each of steel bars might not be an engineering tool usable in practice. An analogy between reinforced zone and porous media is proposed considering concrete casting as the flow of a yield stress fluid into an anisotropic heterogeneous porous medium. It becomes thus possible to associate a given plan of reinforcement in a graph of permeability. This technique has been validated in the case of simple flows of real concrete in laboratory formwork.

Keywords : rheology, fresh concrete, model material, concrete casting, blockage.

Principales notations

a	diamètre d'une barre d'acier de l'obstacle
C	coefficient de géométrie
d	ouverture d'un tamis
d_0	diamètre d'une particule
d_c	diamètre critique d'une particule
$d_{\max}$	diamètre de la particule la plus grosse
D	rapport ouverture de tamis/diamètre d'une particule (d/d_0)
d_{cyl}	diamètre d'un cylindre
e	écartement de deux barres d'acier
g	gravité
k	perméabilité intrinsèque d'un milieu poreux
K	perméabilité d'un milieu poreux
h	épaisseur de l'écoulement au moment de l'arrêt
$h(x)$	épaisseur du matériau au moment de l'arrêt de l'écoulement à une abscisse x
H	longueur du milieu poreux dans le sens d'écoulement.
I	inertie
l	diamètre d'un fil du tamis
l_0	largeur du canal
L	longueur de l'écoulement au moment de l'arrêt
L_0	longueur du canal
m	masse des particules restés sur le tamis
m_{in}	masse initiale des particules dans la suspension
M	distance caractéristique d'un milieu poreux
n	nombre de particules dans une voûte
n_{bar}	nombre de barres d'acier dans un ferrailage élémentaire
N	nombre total des particules la suspension
N_e	nombre moyen des particules qui arrivent à chaque maille (N/N_0)
N_e^{FE}	nombre moyen des particules qui arrivent à chaque case (N/N_0^{FE})
N_0	nombre des mailles du tamis
p	pression au sein de la suspension
$P_{blocage}$	probabilité globale d'apparition de blocage
$P_{contact}$	probabilité d'avoir une particule qui arrive au contact d'un fil du tamis
$P_{contact}^{FE}$	probabilité d'avoir une particule qui arrive sur une barre du ferrailage
P_{bloc}^{FE}	la probabilité globale d'apparition de blocage à un ferrailage
$P_{blocage}^{simp}$	probabilité d'apparition de blocage simplifiée
P_0	probabilité de la formation d'un pont sur une particule arrivant sur le tamis
P_0^{FE}	probabilité de la formation d'une voûte sur une particule arrivant sur le ferrailage

r coefficient de remplissement
 R résidu (m/m_{in})
 R_{exp} résidu mesuré expérimentalement
 $R_{théo}$ résidu prédit théoriquement
 R^{FE} résidu sur un ferrailage
 R_g rayon de la galette formée par le matériau au moment de l'arrêt
 q quantité physique
 S_0 surface latérale du canal
 S_{obs} surface des obstacles
 t temps
 u probabilité d'une particule atteint le tamis
 V vitesse moyenne de la suspension
 V_0 vitesse réelle d'une particule
 x coordonnée dans le sens d'écoulement
 z écartement de deux ferrailages dans la direction de l'écoulement
 $\dot{\gamma}$ gradient de vitesse
 ϕ concentration volumique solide
 ϕ_{max} concentration d'entassement maximal
 μ viscosité apparente ($\tau/\dot{\gamma}$)
 μ_f viscosité du fluide porteur
 μ^{hom} la viscosité d'un mélange
 ρ masse volumique
 τ contrainte de cisaillement
 τ_0 seuil d'écoulement
 τ_c seuil d'écoulement critique
 $\tau_0^{mél}$ seuil d'écoulement du mélange
 τ_0^f seuil d'écoulement du fluide porteur
 η_{pl} viscosité plastique
 $[\eta]$ viscosité «intrinsèque» de la suspension
 β coefficient dépendant de la forme exacte de la conduite
 θ temps de contact entre la particule et la surface solide
 ε porosité
 λ coefficient d'adhérence à la paroi
 ν vitesse de Darcy
 ω facteur indépendant de la taille des particules ainsi que de l'ouverture du tamis ($\omega = n/D^2$)
 ϑ angle de mouillage au point de contact des trois milieux solide/liquide/gaz
 ζ_{LG} tension interfaciale aux frontières entre le matériau et l'air ambiant
 ψ charge hydraulique

Ω volume

Ω^* volume adimensionnel ($\Omega^* = \Omega / (L_0 l_0^2)$)

Δh perte de niveau de l'écoulement au moment de l'arrêt, due à la présence des obstacles

Δh_{FE} perte de niveau de l'écoulement au moment de l'arrêt, due à la présence d'un ferrailage élémentaire

$\Delta h_{FE}^{expé}$ perte de niveau expérimentale de l'écoulement au moment de l'arrêt, due à la présence d'un ferrailage élémentaire

Δh_{nat} perte de niveau naturelle de l'écoulement au moment de l'arrêt

ΔP gradient de pression local au sein de l'écoulement

Table des matières

1	Introduction générale	1
2	Bibliographie et contexte	5
2.1	Rhéologie et rhéométrie	5
2.1.1	Rhéologie	6
2.1.2	Rhéométrie	7
2.2	Matériau béton	8
2.2.1	Compositions de béton	8
2.2.2	Comportement des bétons frais	11
2.2.3	Problématiques de la mise en œuvre des bétons	15
2.2.4	Rhéométrie des matériaux cimentaires	17
3	Un béton de laboratoire	23
3.1	Echelle d'observation et taille des composants	23
3.2	Système modèle	24
3.2.1	Coffrage réduit	25
3.2.2	Propriétés prérequis du matériau "modèle"	26
3.3	Matériau modèle	27
3.3.1	Pâte modèle : suspension de Carbopol	27
3.3.2	Inclusions	30
3.3.3	Sédimentation des inclusions	35
3.3.4	Seuil d'écoulement du mélange	37
4	Mise en œuvre du béton : Ecoulement d'un fluide à seuil homogène	43
4.1	Fluide à seuil homogène en canal horizontal	44
4.1.1	Écoulement d'étalement d'un fluide à seuil	44
4.1.2	Étude analytique de l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil en canal	44
4.1.3	Influences de l'inertie et de la tension superficielle	48
4.2	Simulations numériques	49
4.2.1	Méthodes existantes	49
4.2.2	Simulations par FLOW3D [®]	49

4.3	Etudes expérimentales	50
4.3.1	Matériaux et matériels	50
4.3.2	Protocoles d'essai	50
4.4	Résultats et discussions	51
5	Fluide à seuil homogène à travers un ferrailage élémentaire vertical	55
5.1	Etudes expérimentales	55
5.1.1	Procédure d'essai	55
5.1.2	Résultats expérimentaux	57
5.2	Analyses et discussions	60
5.2.1	Approche analytique de prédiction l'influence d'un ferrailage élémentaire . .	60
5.2.2	Analogie avec un écoulement d'extrusion	63
5.3	Simulations numériques	65
5.4	Extension à un assemblage de deux ferrailages élémentaires	67
5.4.1	Etude expérimentale	67
5.4.2	Résultats	68
5.4.3	Analyses et discussions	68
5.4.4	Conséquence sur la modélisation numérique	71
6	Remplissage d'un coffrage ferrillé - Approche homogénéisée	72
6.1	Etudes expérimentales sur matériau modèle	72
6.1.1	Procédé d'essai	72
6.1.2	Résultats expérimentaux	73
6.2	Analogie avec un milieu poreux	74
6.3	Etudes sur matériaux réels	78
6.3.1	Etudes expérimentales sur mortiers et bétons	78
6.3.2	Analyse	80
6.4	Application de l'approche du milieu poreux équivalent	84
7	Prise en compte des inclusions	88
7.1	Filtration d'un mélange granulaire dans un milieu poreux	89
7.2	Prédiction du blocage des particules sur tamis	90
7.2.1	Etudes expérimentales	90
7.2.2	Modèle probabiliste	92
7.2.3	Probabilité de blocage	101
7.2.4	Application à un milieu poreux	103
7.3	Prédiction du blocage des particules au passage d'un ferrailage horizontal	104
7.3.1	Etudes expérimentales	104
7.3.2	Extension du modèle probabiliste à la géométrie du ferrailage	104
7.3.3	Résultats	106

7.4	Etudes sur matériaux réels	106
7.4.1	Matériaux	106
7.4.2	Protocole d'essai	108
7.4.3	Résultats	108
7.5	Application du modèle pour prédire le blocage	110
8	Conclusions générales	112

Table des figures

1.1	Nombre d'articles dont un des mots clés est "rhéologie" dans les principales revues de ce domaine (Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composite, RILEM materials and Structure et ACI Materials) depuis 1980	2
1.2	Mise en oeuvre du béton sur le chantier de l'institut national d'astrophysique italien (INAF) en 2004	2
2.1	Principales lois de comportement	7
2.2	Etendue de taille des grains des composants granulaires à la matrice cimentaire. . . .	11
2.3	Exemples de mauvaises mises en oeuvres du béton. a) Mauvais remplissage d'une colonne ; b) Ségrégation des granulats	17
2.4	Géométrie Vane	18
2.5	Essai d'étalement	18
2.6	Essai à la boîte en U avec les obstacles R1 et R2 [1]	19
2.7	a) L-Box ; b) V-funnel ; c) Orimet	20
2.8	a) J-ring ; b) J-ring et cône d'Abrams, c) J-ring et Orimet	20
2.9	Schéma du "Filling test"	21
2.10	Contrôle de réception sur chantier au Japon [2]	22
3.1	Variation d'une propriété physique moyennée sur un volume donné de matériau en fonction de la taille de ce volume [3]	24
3.2	Exemple d'une "galette" de béton au cône d'Abrams	25
3.3	Analogie avec un système modèle	28
3.4	Désenchevêtrement des chaînes macromoléculaires de Carbopol après neutralisation .	29
3.5	Courbes d'écoulement à taux de cisaillement imposé en balayage croissant et décroissant	31
3.6	Courbes d'écoulement à différentes échéances	31
3.7	Écoulement d'étalement du fluide modèle chargé de bille de verre de 2mm	32
3.8	Surface d'un granulats concassé vue au MEB-Echelle d'observation 50 μ m	33
3.9	Surface d'un granulats roulé vue au MEB-Echelle d'observation 50 μ m	34
3.10	Surface d'une bille lisse observée au MEB à l'échelle d'observation 50 μ m	34
3.11	Surface d'une bille après différents processus d'abrasion. a) $d_{carbure} = 2mm$, $r_{ab} = m_{carbure}/m_{bille} = 0,1$, $t_{abrasion} = 2h$; b) $d_{carbure} = 37\mu m$, $r_{ab} = 0,1$, $t_{abrasion} = 2h$; c) $d_{carbure} = 2mm$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$; d) $d_{carbure} = 37\mu m$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$	35

3.12	Surface d'une bille après abrasion de double processus avec $d_{carbure} = 37\mu m$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$ puis $d_{carbure} = 2mm$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 1h$. Vue au MEB à l'échelle d'observation de $50\mu m$	36
3.13	Relief d'une bille après abrasion de double processus avec $d_{carbure} = 37\mu m$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$ puis $d_{carbure} = 2mm$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 1h$. Vue au MEB à l'échelle d'observation de $50\mu m$ vue au MEB-Echelle d'observation $50\mu m$	36
3.14	Evolution des rhéogrammes "contrainte de cisaillement-temps" en fonction de la concentration volumique en bille des mélanges.	40
3.15	Influence de l'état de surface des inclusions sur le seuil du mélange	41
3.16	Influence du seuil du fluide suspendant sur le seuil du mélange	42
3.17	Influence de la taille (donc de la surface spécifique) des inclusions sur le seuil du mélange	42
4.1	Elément de matériau à l'équilibre. Les surfaces ADHE et BCGF sont en contact avec les parois latérales et la surface EFGH est en contact avec le fond rugueux du canal.	45
4.2	Ecoulement en canal; a) Cas $L < L_0$; b) Cas $L = L_0$	45
4.3	Influence du degré d'adhérence du matériau aux parois latérales sur la valeur de seuil prédite théoriquement.	47
4.4	Ecoulements des mélanges de filler calcaire en canal horizontal non ferrailé	51
4.5	Comparaison des profils expérimentaux (symboles) et théoriques (lignes continues) de différents écoulements de Carbopol au moment d'arrêt en canal non ferrailé dans le cas $L < L_0$	52
4.6	Comparaison des profils expérimentaux (symboles) et théoriques (lignes continues) de différents écoulements de Carbopol au moment d'arrêt en canal non ferrailé dans le cas $L = L_0$	52
4.7	Comparaison entre mesures expérimentales et solutions théoriques sur différents écoulements en canal non ferrailé au moment d'arrêt dans le cas $L < L_0$	53
4.8	Comparaison entre mesures expérimentales et solutions théoriques sur différents écoulements en canal non ferrailé au moment d'arrêt dans le cas $L = L_0$	53
4.9	Profils expérimental, analytique et numérique d'une suspension de Carbopol en canal horizontal non ferrailé	54
5.1	Etudes expérimentales de l'influence de chacun des paramètres sur la perte de niveau locale due à un ferrailage élémentaire	56
5.2	Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 37 Pa passant par différents ferrailages élémentaires.	57
5.3	Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 80 Pa passant par différents ferrailages élémentaires.	58
5.4	Profils expérimentaux de différentes suspensions de Carbopol passant par le ferrailage élémentaire FE a10e16.	58
5.5	Forme à l'arrêt de différents volumes de l'échantillon testé. Ferrailage Fa14e16. De haut en bas : $V=4, 6; 8$ et $10 l$	59
5.6	Forme à l'arrêt de différents volumes de l'échantillon testé. Ferrailage FE a14e16. De haut en bas : $V= 6; 8$ et $10 l$	60
5.7	Perte de niveau mesurée expérimentalement en fonction de la surface relative d'obstacle	61

5.8	Perte de niveau locale expérimentale en fonction du rapport seuil d'écoulement/poids volumique du matériau	61
5.9	Perte de niveau locale multipliée par l'écartement entre deux barres en fonction du rapport seuil d'écoulement/poids volumique du matériau	62
5.10	Variation de $f(a)$ en fonction du diamètre des barres d'acier	63
5.11	Perte de niveau locale de l'écoulement à l'arrêt due à un ferrailage élémentaire. Comparaison entre solution théorique et mesures expérimentales	64
5.12	Écoulement de Carbopol à travers un ferrailage élémentaire (FE a14e18,5).	64
5.13	Restriction de la section d'écoulement - analogie avec un processus d'extrusion.	65
5.14	Perte de niveau locale due à un ferrailage élémentaire. Comparaison entre solution de la théorie d'extrusion ($C=7,3$) et mesures expérimentales	66
5.15	Profil à l'arrêt d'un échantillon de 6 l de Carbopol (seuil d'écoulement = $51Pa$) passant par le ferrailage élémentaire FE a14e25. Comparaison entre solution théorique, mesure expérimentale et simulation numérique par le code Flow-3D	66
5.16	Système expérimentale pour les essais d'assemblage de deux ferrailages	67
5.17	Écoulement à travers un assemblage de deux ferrailages élémentaires verticaux. Seuil d'écoulement du matériau 40 Pa. Ecartement longitudinal entre deux ferrailages est de 19 mm (a) et de 74 mm (b)	68
5.18	Profil expérimentaux des suspensions de Carbopol de 40 Pa dûs à la présence de deux ferrailages élémentaires FE a3e8 d'écartement (z) variable.	69
5.19	Profil expérimentaux des suspensions de Carbopol de 22 Pa dûs à la présence de deux ferrailages élémentaires FE a3e8 d'écartement (z) variable.	69
5.20	Profil expérimentaux des suspensions de Carbopol de 40 Pa dûs à la présence d'un FE ou d'un assemblage de deux FE d'écartement $z = 200$ mm.	70
5.21	Profil expérimentaux des suspensions de Carbopol de 22 Pa dûs à la présence d'un FE ou d'un assemblage de deux FE d'écartement $z = 200$ mm.	70
5.22	Rapport de la perte de niveau due à un assemblage de 2 FE sur celle due à un autre assemblage de 2 FE dont $z = 200$ mm en fonction de l'écartement relatif	71
6.1	Écoulement d'une suspension de Carbopol passant à travers une zone ferrillée en canal horizontal	73
6.2	Forme à l'arrêt d'un écoulement d'une suspension de Carbopol de 40Pa passant par une zone très ferrillée désignée C e8z8	73
6.3	Forme à l'arrêt d'un écoulement d'une suspension de Carbopol de 22 Pa passant par une zone très ferrillée désignée C e19z8	74
6.4	Profil expérimentaux des écoulements de Carbopol de 40 Pa passant par une zone ferrillée de configuration variable	75
6.5	Profil expérimentaux des écoulements de Carbopol de 22 Pa passant par une zone ferrillée de configuration variable	75
6.6	Perte de niveau mesurée expérimentalement sur des écoulements de Carbopol passant par différentes zones ferrillées en fonction de leur dimension caractéristique M	77
6.7	Evolution de la perméabilité d'un milieu poreux équivalent en fonction de sa distance caractéristique	78
6.8	Essai d'étalement pour mesurer le seuil d'écoulement d'un mortier	79

6.9	Essai d'étalement en canal pour mesurer le seuil d'écoulement d'un béton	80
6.10	Blocage granulaire de l'écoulement d'un BAP de 26 Pa au passage à travers une zone ferraillée de configuration C e19z19	81
6.11	Essai du béton passant par une zone ferraillée	81
6.12	Blocage dû au seuil d'un BAP de 149 Pa au passage d'une zone ferraillée C e41z30	82
6.13	Profils expérimentaux des écoulements de mortier passant par une zone ferraillée de configuration variable	82
6.14	Profils expérimentaux des écoulements de béton passant par une zone ferraillée de configuration variable	83
6.15	Perte de niveau due au milieu poreux équivalent mesurée expérimentalement sur différents matériaux en fonction de la distance caractéristique	83
6.16	Perméabilité intrinsèque mesurée expérimentalement sur différents matériaux en fonction de la distance caractéristique	84
6.17	Plan de ferrailage d'un voile	85
6.18	Cartographie de perméabilité proposée par l'approche de milieu poreux pour le ferrailage du voile	85
6.19	Simulation numérique de la propagation d'un fluide à seuil homogène dans le voile	87
7.1	Effet de voûte au niveau des armatures	89
7.2	Blocage granulaire d'un béton au passage des barres d'acier.	89
7.3	Essai de blocage au tamis	90
7.4	a) Essai de passage des suspensions de glycérol chargées en particules de $500 \mu\text{m}$ à travers un tamis b) Résidu sur le tamis	91
7.5	Résidu d'un mélange granulaire de billes 5 mm à concentration en solide $\phi = 30\%$ sur tamis d'ouverture 6,3 mm	91
7.6	Résidu d'un mélange granulaire de billes 3 mm à concentration en solide $\phi = 25\%$ sur tamis d'ouverture 5 mm	92
7.7	Blocage d'un écoulement de grains secs ($d_0 = 3 \text{ mm}$) sur un tamis ($d = 5 \text{ mm}$) à la fin de l'essai de filtration.	93
7.8	Residus mesurés dans différents essais avec les mêmes conditions : ouverture du tamis 8mm, diamètre des particules 5mm, $\phi = 10\%$, seuil du fluide porteur 33Pa.	93
7.9	Résidu (R) en fonction du rapport ouverture de tamis/diamètre des particules (D) pour des suspensions de différentes fractions solides et pour un mélange de particules sèches de fraction 60%	95
7.10	Résidus mesurés sur un même volume de suspension ($\Omega = 0,7 \text{ l}$) en fonction de la fraction solide (suspensions contenant des billes de 5mm à travers un tamis de mailles de 8mm).	95
7.11	Résidus mesurés en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.	96
7.12	Formation des voûtes de particules sur les mailles d'un tamis. Le nombre moyen des particules présentes dans les voûte est $n = 2,34$	97

7.13 Résidus mesurés (points) et prédits (courbe continue) en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.	99
7.14 Résidus mesurés (points) et prédits (courbe continue) en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.	100
7.15 Résidu en fonction du rapport ouverture du tamis/diamètre des particules pour différentes fractions solides avec $\alpha = 0,65$. La courbe continue correspond à $N_e = 1000$ et la courbe discontinue convient à $N_e = 10^{10}$ et $\phi = 0,1$	100
7.16 Résidu prédit théoriquement en fonction du résidu mesuré expérimentalement dans différents essais : suspensions des particules de différentes fractions volumiques dans un gel Carbopol (symbols vides) ou une solution glycérol (symbols remplis)	101
7.17 Résidu de différentes suspensions granulaires obtenus expérimentalement pour différents tamis en fonction du paramètre adimensionnel de blocage	102
7.18 Prédiction de l'apparition de blocage à un tamis en fonction du paramètre de blocage	103
7.19 Résidu d'un mélange granulaire de billes 5 mm à concentration en solide $\phi = 30\%$ sur ferrailage horizontal FE a5e6,3	105
7.20 Résidu d'un mélange granulaire de billes 3 mm à concentration en solide $\phi = 25\%$ sur ferrailage horizontal FE a2e4	105
7.21 Comparaison des résidus au ferrailage horizontal mesurés expérimentalement et prédits théoriquement	107
7.22 Résidu de différentes suspensions granulaires obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage	107
7.23 Résidu binaire obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage	108
7.24 Blocage dû au seuil d'un BAP ($d_{max}=12,5$ mm) de 51 Pa au droit d'un ferrailage d'écartement $e = 19$ mm	109
7.25 Blocage granulaire d'un béton autoplaçant ($d_{max}=20$ mm) au droit d'un ferrailage d'écartement $e=30$ mm	109
7.26 Résidu de différents matériaux obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage	110
7.27 Résidu binaire de différents matériaux obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage	111

Liste des tableaux

2.1	Dimensions caractéristiques des additions	10
2.2	Propriétés rhéologiques principales des matériaux cimentaires	13

Chapitre 1

Introduction générale

Avec soixante millions de mètres cubes mis en œuvre chaque année en France, soit approximativement un mètre cube par habitant, le béton est le produit manufacturé le plus consommé. Il est utilisé dans de nombreux domaines : bâtiment, route, ouvrages d'art et aménagement intérieur. Même si les volumes impliqués ne sont pas les plus élevés, c'est dans le domaine des ouvrages d'art que le besoin de compréhension et d'outils de modélisation a toujours été le plus marqué.

Les recherches sur ce matériau lorsqu'il joue son rôle structurel ont ainsi énormément progressées au cours des dernières décennies (déformations différées, fissuration, durabilité...). Cependant, lorsque le matériau n'est encore qu'un liquide pendant les phases de mise en œuvre, il est possible de constater que la compréhension de son comportement est encore majoritairement empirique et qu'il n'existe pas d'outils de modélisation de niveau comparable à ceux de l'ingénierie des structures en béton armé. Or, la phase de mise en œuvre du matériau conditionne totalement l'état du matériau durci. Sans progrès dans ce domaine, les efforts sur les performances mécaniques et de durabilité des matériaux cimentaires ne pouvaient être transposés du laboratoire au chantier.

La caractérisation de la capacité à s'écouler des bétons à l'état frais afin de prédire la mise en œuvre du matériau sur chantier ou en usine de préfabrication a ainsi fait l'objet de nombreuses études durant la dernière décennie. La figure 1 illustre le nombre d'articles dont un des mots clés est "rhéologie" dans les principales revues de ce domaine (Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composite, RILEM Materials and Structure et ACI Materials) depuis 1980.

Les difficultés à résoudre dans le domaine de la prédiction de la mise en œuvre sont nombreuses : nous sommes faces à un écoulement tridimensionnel à surface libre d'un fluide à seuil au sein d'obstacles constitués par les barres d'acier du ferraillage. Dans un premier temps, une mauvaise mise en œuvre peut ainsi être causée par le comportement rhéologique du béton en tant que fluide homogène : celui-ci peut s'arrêter de s'écouler dans le coffrage avant qu'un remplissage correct n'ait eu lieu. Ce phénomène peut être aggravé par une densité plus ou moins forte d'armatures dans le coffrage : le béton risque de ne pas franchir certaines zones ferraillées et ne pas enrober totalement les armatures et laisser des vides dans le matériau. Dans un second temps, la mise en œuvre peut être contrariée par le phénomène de blocage des plus gros granulats au passage des armatures.

De tels problèmes ont des conséquences particulièrement coûteuses mais leur prédiction est actuellement impossible. La caractérisation du comportement rhéologique du matériau reste souvent empirique, les recherches sur les effets du ferraillage et de la formulation du matériau sur les écoulements sont peu nombreuses. Il existe de manière générale un manque incontestable d'outils de prédiction de la mise en œuvre des bétons. Face à ce vide, la profession, désireuse de garantir la qualité de la mise en œuvre sur chantier dans le cas de coulages particulièrement délicats (cf. Fig.1.2), se tourne vers de coûteux essais de convenance.

L'objectif de ce travail est de fournir des outils de prédiction prenant en compte les propriétés du béton, les caractéristiques de l'élément de structure à réaliser ainsi que le processus de mise en

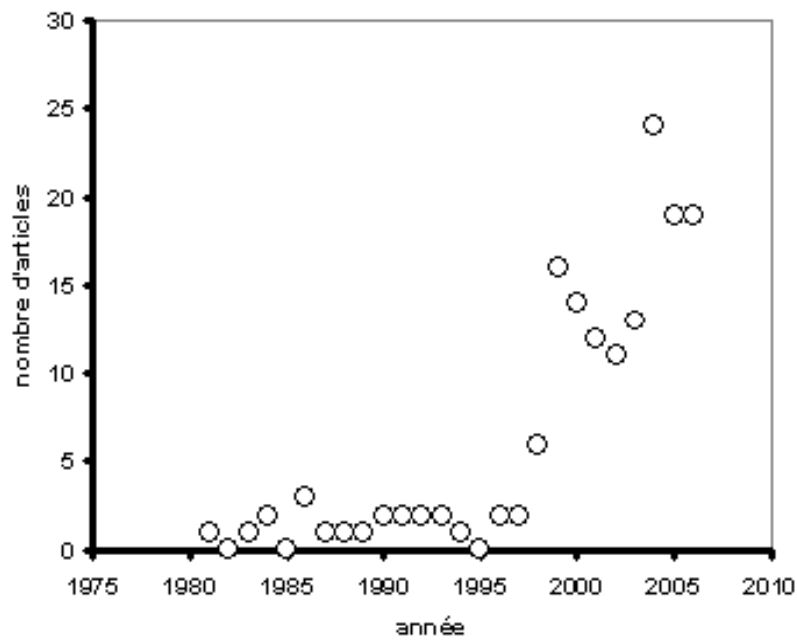


Figure 1.1: Nombre d'articles dont un des mots clés est "rhéologie" dans les principales revues de ce domaine (*Cement and Concrete Research*, *Cement and Concrete Composite*, *RILEM materials and Structure* et *ACI Materials*) depuis 1980



Figure 1.2: Mise en oeuvre du béton sur le chantier de l'institut national d'astrophysique italien (INAF) en 2004

œuvre retenu et de répondre, par une approche scientifique, à la question pratique centrale qui se pose : pour un béton donné, pour un processus de mise en œuvre donné et pour un coffrage donné, la mise en œuvre aura-t-elle lieu sans difficultés ?

Pour atteindre nos objectifs, nous allons étudier les phénomènes suivants : l'origine de l'arrêt de l'écoulement, l'influence du ferrailage sur la forme à l'arrêt de l'écoulement et le phénomène de blocage des granulats au droit des armatures. Nous mènerons en parallèle des expériences de laboratoire, des approches analytiques et des simulations numériques pour aboutir à un outil de calcul utilisable dans les applications pratiques ou au moins, dans le cas des phénomènes les plus complexes, une piste de développement prometteuse d'un tel outil.

Dans le chapitre 1, nous commençons par poser les bases de la rhéologie et de la rhéométrie et montrons qu'ils constituent des outils particulièrement précieux pour comprendre et quantifier le comportement des bétons à l'état frais. Cette présentation est loin d'être exhaustive et nous nous limitons aux phénomènes et aux outils qui nous seront les plus utiles. Nous rassemblons ensuite des informations générales sur le matériau béton : les composants et leur rôle dans le mélange. Nous tentons de construire une vue d'ensemble des connaissances acquises au cours des années sur le comportement des bétons à l'état frais. Nous rassemblons ensuite les informations de la littérature traitant de la mise en œuvre des bétons. Nous faisons enfin le point sur des outils empiriques disponibles dans la pratique pour caractériser le comportement rhéologique des bétons frais.

Afin d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent l'écoulement des bétons dans les coffrages, nous proposons d'isoler et de traiter séparément chaque problème dans une configuration simplifiée et de fournir ainsi les outils de base nécessaires à la modélisation de la mise en œuvre dans l'optique d'introduire et de combiner ensuite graduellement les phénomènes mis en jeu. Ainsi, nous choisissons de mettre en place un système modèle simple consistant en un écoulement d'étalement dans un canal horizontal. De plus, le béton à l'état frais étant un matériau difficile à caractériser et dont la fabrication est coûteuse (coût économique et main d'œuvre), nous choisissons d'utiliser un matériau modèle simple et bien caractérisé. La mise au point de ce matériau modèle et la démonstration de sa capacité à reproduire les principaux traits du comportement rhéologique du béton sont décrits dans le chapitre 2.

S'il n'y a pas de ferrailage dans le coffrage, l'écoulement des bétons frais dans un coffrage horizontal peut être considéré comme un écoulement d'étalement. Le chapitre 3 vise à proposer une corrélation analytique entre les propriétés d'un fluide à seuil homogène et sa forme à l'arrêt de l'écoulement dans un canal horizontal non ferrillé, puis de l'utiliser pour prédire le remplissage du matériau dans ce canal. Les différents phénomènes physiques mis en jeu sont successivement analysés et une description analytique de l'arrêt de l'écoulement est proposée. Ces solutions sont comparées à des résultats expérimentaux et à des simulations numériques.

Le chapitre 4 vise à étudier l'écoulement et l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil homogène passant au travers de grilles constituées de barres d'acier. Nous cherchons, dans ce chapitre, à décomposer le ferrailage d'un coffrage (qui est souvent complexe) en ferrillages élémentaires, comprendre l'influence de ces ferrillages élémentaires sur l'écoulement en espérant pouvoir après revenir à l'écoulement réel par un réassemblage de ces ferrillages élémentaires. Nous nous focalisons, ainsi, dans un premier temps sur l'étude d'un système modèle simple consistant en un fluide à seuil homogène passant par un ferrillage élémentaire en canal horizontal. Dans ce cadre, une corrélation entre la variation de la forme du matériau à l'arrêt de l'écoulement et les propriétés du matériau et du ferrillage élémentaire est proposée. L'étape suivante est d'étudier le retour vers des ferrillages réels. L'effet d'un tel ensemble pourrait-il être simplement l'addition des effets individuels de tous les ferrillages élémentaires ? Pour répondre à ce questionnement, nous étudions la forme à l'arrêt des écoulements passant par des assemblages de deux ferrillages élémentaires.

Nous montrons ensuite dans le chapitre 5 que, pour des raisons pratiques de coût en calcul numérique, il semble plus adéquat de considérer un ferrillage comme un milieu poreux équivalent.

L'écoulement du béton dans un tel milieu serait alors décrit par la propagation d'un fluide non Newtonien dans un milieu poreux. Nous présentons une étude expérimentale de l'évolution de la variation de la forme du matériau au passage de ce milieu poreux en fonction des propriétés du matériau ainsi que de la dimension caractéristique du milieu poreux équivalent. Nous proposons une corrélation entre la forme à l'arrêt du fluide avec les propriétés du matériau, la perméabilité intrinsèque et la géométrie de ce milieu poreux. Cette corrélation est particulièrement prometteuse d'un point de vue industrielle. Elle permet, en effet, la construction d'une cartographie de perméabilité du coffrage à partir d'un plan de ferrailage donné. D'un point de vue expérimental, des mortiers et bétons sont ensuite étudiés en vue de révéler l'effet de la présence de particules de taille importante sur la propagation du matériau dans le milieu poreux.

Dans le chapitre 6, nous prenons en compte le fait que les bétons sont des matériaux multiphasiques présentant une large étendue granulaire. Lors du passage du béton à travers des armatures, les plus gros granulats, généralement plus petits que l'écartement entre les barres, peuvent former des voûtes au niveau de ces barres et donner lieu à un blocage granulaire. A partir d'expériences simples sur des suspensions de particules non-colloïdales en suspension dans différents fluides qui s'écoulent sous l'effet de la gravité à travers un tamis, nous montrons que le blocage est un problème de probabilité, *i.e.* un nombre suffisant de particules doit être présent en même temps dans une certaine configuration pour qu'un blocage ait lieu. Un modèle probabiliste pour prédire le résidu à partir des propriétés du mélange granulaire et du tamis est proposé. La comparaison des solutions de ce modèle à des résultats expérimentaux nous permet de vérifier la validité des hypothèses utilisées. Pour une application pratique du modèle, nous proposons d'utiliser un paramètre probabiliste adimensionnel simplifié calculé en fonction des propriétés du matériau et de l'obstacle.

Chapitre 2

Bibliographie et contexte

Sommaire

2.1 Rhéologie et rhéométrie	5
2.1.1 Rhéologie	6
2.1.2 Rhéométrie	7
2.2 Matériau béton	8
2.2.1 Compositions de béton	8
2.2.1.1 Pâte de ciment	9
2.2.1.2 Granulats	10
2.2.2 Comportement des bétons frais	11
2.2.2.1 La pâte de ciment : une suspension thixotrope	12
2.2.2.2 Le béton : un fluide à seuil biphasique complexe	13
2.2.3 Problématiques de la mise en œuvre des bétons	15
2.2.3.1 Corrélation entre la rhéologie du béton et sa mise en œuvre	15
2.2.3.2 Phénomènes perturbateurs dans la mise en œuvre	16
2.2.4 Rhéométrie des matériaux cimentaires	17
2.2.4.1 Rhéométrie des pâtes de ciment	17
2.2.4.2 Rhéométrie des bétons frais et essais empiriques du génie civil	18

Nous montrons dans ce chapitre que la rhéologie est un outil particulièrement précieux pour comprendre et quantifier le comportement des bétons à l'état frais. Nous présentons ensuite les approches de la littérature permettant de prédire le comportement rhéologique des bétons. Ces approches sont pour la plupart biphasiques. Le béton est considéré comme un mélange de particules immergées dans un fluide porteur. Les phases liquides et solides changent selon les auteurs : la phase liquide peut ainsi être l'eau, la pâte de ciment ou le mortier. L'objet principal de ce chapitre réside cependant dans l'étude de la mise en œuvre des bétons sur chantier. Nous montrons que les raisons pour lesquelles des problèmes de mise en œuvre peuvent apparaître résident dans la nature même du matériau : le béton est un fluide à seuil et il contient des particules de tailles et de formes variables. Sachant que la rhéologie est utilisée sur chantier non pas sous une forme physique mais empirique, nous listons des essais rhéologiques empiriques et nous tentons d'identifier l'aspect du comportement du matériau qu'ils visent à qualifier.

2.1 Rhéologie et rhéométrie

Nous avons choisi de nous focaliser uniquement sur les aspects nécessaires à la présentation de ce travail de thèse. La rhéologie est en effet un sujet particulièrement vaste. Pour plus d'informations,

le lecteur pourra se référer à [4].

2.1.1 Rhéologie

La rhéologie est la science de la déformation et de l'écoulement de la matière, elle est concernée par les rapports entre la contrainte, la déformation, la vitesse de déformation et le temps. Un écoulement se manifeste par le mouvement relatif des éléments adjacents du liquide. Dans un écoulement de cisaillement, des couches parallèles imaginaires se déplacent sous l'effet d'une contrainte de cisaillement τ et engendrent un gradient de vitesse $\dot{\gamma}$, qui est désigné sous le nom de taux de cisaillement et est équivalent à la vitesse de variation de la déformation du fluide. Le comportement d'un matériau peut être caractérisé de différentes manières, le plus souvent par des courbes d'écoulement qui montrent comment la contrainte de cisaillement est liée au taux de cisaillement. Des données peuvent également être présentées sous la forme de variation de la viscosité apparente (le rapport de la contrainte de cisaillement au taux de cisaillement) en fonction du taux de cisaillement ou du temps.

De nombreux modèles ou lois de comportement, reliant la contrainte de cisaillement τ au gradient de vitesse $\dot{\gamma}$, ont été développés afin de décrire les comportements rhéologiques les plus couramment rencontrés. La loi de comportement la plus simple est celle obtenue pour un fluide Newtonien :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

où μ représente la viscosité du fluide. Pour ce type d'écoulement, il y a écoulement dès qu'une contrainte, même de valeur très faible, est appliquée au matériau.

Les fluides à seuil sont, eux, caractérisés par un seuil de contrainte τ_0 en deçà duquel aucun mouvement ne se manifeste et au delà duquel ils s'écoulent. Ce seuil d'écoulement représente la contrainte minimale pour briser une structure interne [4]. Le modèle le plus simple pour décrire le comportement d'un fluide à seuil est celui de Bingham : au delà du seuil d'écoulement, le fluide s'écoule comme un fluide Newtonien :

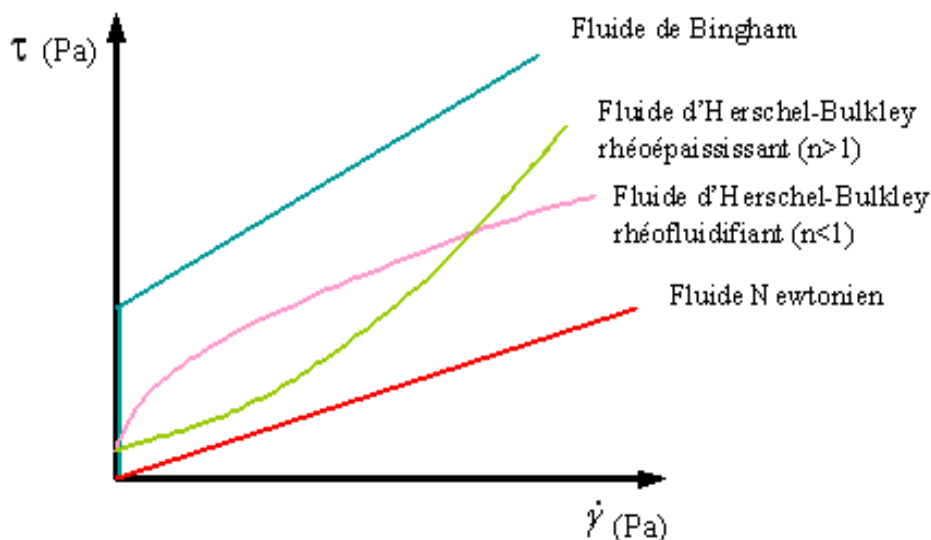
$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta_{pl} \dot{\gamma} & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

où τ_0 est le seuil d'écoulement, η_{pl} la viscosité plastique et $\dot{\gamma}$ le gradient de vitesse. Pour rendre compte de la nature non linéaire du comportement au-delà du seuil tout en conservant le comportement rigide du modèle Binghamien sous le seuil, le modèle de Herschel-Bulkley a été proposé :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n & \text{si } \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

où K et n sont des constantes du modèle. La puissance n reflète une augmentation ou une réduction de la viscosité à mesure que la vitesse de cisaillement augmente mais n'a aucun sens physique. Lorsque la viscosité apparente ($\mu = \tau / \dot{\gamma}$) croît avec le gradient de vitesse $\dot{\gamma}$, ce qui correspond à $n > 1$, le fluide est dit rhéoépaississant. Dans le cas contraire ($n < 1$), il s'agit d'un fluide dit rhéofluidifiant.

Les courbes d'écoulement correspondant à ces lois de comportement sont représentées sur la figure 2.1. Pour les autres modèles rhéologiques, le lecteur pourra se référer à [4]. Il peut être noté que ces courbes représentent l'écoulement en régime permanent ou établi de ces fluides. Dans le cas

Figure 2.1: *Principales lois de comportement*

d'écoulement transitoires, ces modèles peuvent ne plus convenir à la description de l'écoulement car le comportement rhéologique du matériau évolue au cours du temps. Ceci a lieu par exemple pour des fluides thixotropes. La thixotropie peut être définie de la manière suivante :

- La viscosité apparente d'un matériau thixotrope est une fonction décroissante de la durée d'écoulement pour une sollicitation donnée, maintenue constante dans le temps.
- Le matériau retrouve son état initial après un temps de repos suffisamment long.

De nombreux modèles ont été développés au cours de ces dernières années pour décrire ce phénomène. Des revues très complètes ont été réalisées par Mewis [5] et Barnes [6].

La rhéologie est indispensable pour comprendre les propriétés des bétons frais. Lors de la formulation du béton en laboratoire, les essais rhéologiques empiriques du génie civil permettent de prédire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la stabilité du béton frais sur chantier (nous reviendrons plus loin sur ces points). Optimiser les conditions de mise en œuvre des bétons fluides (écoulement sous leur propre poids, remplissage d'un coffrage avec un fort ferrailage...) tout en conservant leur homogénéité (sans ségrégation, sans ressuage...) nécessite aussi la rhéologie. De plus, il peut être intéressant de noter que, au moment de la confection de l'ouvrage, les essais rhéologiques servent au contrôle-qualité avant la mise en place du béton. Autrement dit, la maîtrise du comportement rhéologique dans le cas du béton frais est primordiale afin d'obtenir une bonne adéquation entre le matériau et la méthode de mise en œuvre. Dans le cas particulier de la rhéologie des matériaux cimentaires, à part des termes rhéologiques traditionnelles, on utilise aussi des termes issus de l'ingénierie de la construction comme l'ouvrabilité, la maniabilité, la consistance, la plasticité pour décrire l'aptitude du béton à l'écoulement. Ces termes seront détaillés dans la section 2.2.3.

2.1.2 Rhéométrie

L'objet de la rhéométrie est de déterminer expérimentalement des relations entre la contrainte et le gradient de vitesse ce qui constitue la loi de comportement rhéologique d'un matériau. Il faut pour cela effectuer des mesures au sein d'écoulement suffisamment proches des écoulements recherchés en théorie. Ces écoulements sont réalisés par l'intermédiaire de rhéomètres ou viscosimètres qui permettent, à partir de considérations géométriques et d'hypothèses sur l'écoulement, de relier

les paramètres macroscopiques aux paramètres régissant les lois de comportement. Les géométries rotatives (cylindres coaxiaux, cône plan, plan-plan) sont les plus souvent utilisées. Elles sont constituées de deux surfaces solides coaxiales et animées d'une vitesse de rotation différente autour de leur axe. Le fluide situé entre les deux surfaces solides est alors cisailé par le mouvement relatif de ces surfaces. On mesure la vitesse de rotation relative et le couple à appliquer sur l'axe pour engendrer le mouvement.

La détermination de la loi de comportement par ces méthodes de mesure n'est pas simple car les géométries et les matériaux ont des caractéristiques physiques et des propriétés mécaniques qui peuvent induire de nombreux effets perturbateurs. Pour les techniques de mesure ainsi que les effets perturbateurs des expériences de rhéométrie, le lecteur pourra se référer à [4].

Nous nous focalisons ici sur deux des phénomènes les plus perturbateurs dans le cas des matériaux cimentaires. Le premier est relatif à la taille de l'entrefer de la géométrie, c'est à dire l'espacement entre les deux surfaces solides. Il est évident qu'on ne peut pas déterminer le comportement à l'aide d'un appareil dont les dimensions sont de l'ordre de la taille des éléments constitutifs de ce matériau. La taille de l'entrefer doit donc, d'une part, être assez grande par rapport au diamètre moyen des particules dans la suspension testée (au moins 10 fois supérieure selon Coussot et Ancey [4]). Celle-ci doit, d'autre part, être aussi faible que possible afin de s'assurer que le matériau est cisailé dans toute son épaisseur et que le gradient de vitesse est homogène dans cet entrefer [4].

Le glissement aux parois est le deuxième problème dominant. Il s'agit d'un cisaillement préférentiel d'une très fine couche de matériau près de la paroi. Durant le mouvement de l'outil par rapport à la suspension, la fraction de suspension située près de la paroi, naturellement moins visqueuse que le reste du matériau, subit donc, à contrainte égale, un cisaillement plus intense. La conséquence de ce phénomène est en général un abaissement du niveau de contrainte mesuré pour une vitesse de cisaillement donnée, c'est à dire que l'on observe généralement une viscosité plus faible que la viscosité réelle.

Il peut être noté que ces deux difficultés, que nous évoquons ici pour la rhéométrie, réapparaîtront pour quasiment tous les écoulements que nous serons amenés à étudier dans ce travail.

2.2 Matériau béton

Bien que beaucoup de personnes se le représentent comme un solide banal, le béton est en fait un matériau composite complexe du fait de ses constituants, comme le ciment, l'eau et les granulats, et de leurs dosages respectifs. Malgré cette complexité, sa versatilité et son économie en font un des matériaux de construction les plus largement utilisés au monde. Le béton est un matériau particulièrement évolutif. En effet, il subit des transformations physico-chimiques et structurales, comme les réactions d'hydratation des constituants du ciment qui conduisent aux processus de prise et de durcissement. Les sollicitations pendant les phases d'écoulement (malaxage, pompage, coulage...) révèlent différents comportements rhéologiques comme nous allons le voir (fluide à seuil thixotrope, phénomène de ségrégation...). De plus, des transformations ont lieu tout au long de la vie du matériau telles que le vieillissement (ou la maturation). Il est donc indispensable de bien identifier tous les paramètres qui jouent un rôle dans le béton, pour pouvoir comprendre son comportement. Le but de cette partie est de donner des informations de base et une description qualitative du matériau.

2.2.1 Compositions de béton

Pour fabriquer un béton, il faut des granulats, du ciment, de l'eau et éventuellement des ajouts. Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton, ils confèrent au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique. Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est

composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutés dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants et réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à l'atteinte d'une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

D'un point de vue de fluidité, nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [2]. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes) même si cette appellation a disparu officiellement en France. Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plate-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts. Ces bétons sont élaborés selon une formulation spécifique : volume important de pâte (de 330 – 400 l/m³ selon [7] et 300 – 380 l/m³ selon [8] par rapport à 200 – 350 l/m³ pour des bétons courants), fort dosage en sable et en éléments fins (500 kg/m³ selon [7] et 380 – 600 kg/m³ selon [8]) en abaissant la proportion volumique des gravillons et le rapport gravillon sur sable (proche de 1), emploi de superplastifiants qui déflocculent les grains de ciment.

2.2.1.1 Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton joue à la fois le rôle de liant et de remplissage.

Ciment :

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. Il est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland car c'est lui qui assure la fonction liante mais, suivant leur type, ils peuvent aussi contenir des constituants secondaires tels que de la fumée silice, des cendres volantes ou encore des laitiers de haut fourneau. Le ciment se présente sous forme de grains qui présentent une grande dispersion de tailles (le diamètre varie de 1 à 100 μm) et de formes et dont le diamètre moyen est d'environ 10 μm . Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [9]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise.

Additions minérales :

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [9, 10, 11, 12]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulométrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 m (Norme NFEN 933 – 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des grains constitutifs (sable, gravier), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Pour les autres types d'ajout le lecteur pourra se référer à [10] et pour leurs effets sur la microstructure à [13]. D'un point de vue physique, les dimensions caractéristiques de ces additions sont reportées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: *Dimensions caractéristiques des additions*

Additions	Finesse	Proportion de remplacement du ciment
Filler	1 – 100 μm	< 5%
Fumée de silice	0,01 – 0,1 μm	< 12%
Cendres volantes	1 – 200 μm	20 – 25%

Eau :

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de la maniabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Adjuvants

La norme française NF P 18 – 103 définit un adjuvant comme un produit dont l'incorporation à faible dose dans le béton, le mortier ou le coulis, provoque les modifications recherchées pour obtenir des bétons répondant à certaines conditions de mise en œuvre. Ceci peut être interprété physiquement par des valeurs requises de paramètres rhéologiques tels qu'un seuil d'écoulement et une viscosité plastique. Les adjuvants peuvent être organiques ou inorganiques mais leur caractère chimique est essentiel. Selon leurs effets, ils peuvent être utilisés comme "agent viscosifiant" pour ralentir la sédimentation des grosses particules, soit comme "superplastifiant" (ou super-fluidifiant, super-réducteur d'eau, haut réducteur d'eau) pour augmenter la fraction volumique solide en diminuant la quantité d'eau d'ajout à fluidité constante ou améliorée. Nous nous focalisons sur les superplastifiants qui conditionnent l'ouvrabilité du béton. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longue chaîne de molécules de masses moléculaires élevées [14]. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [14]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

2.2.1.2 Granulats

Les granulats occupent 60 à 75% du volume de béton. Ils sont définis par la norme expérimentale P 18 – 101 comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, qui constitue un squelette inerte dispersé dans la pâte de ciment et destiné à la confection des mortiers, des bétons... Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique sur des tamis de contrôle à mailles carrées dans la série normalisée NF ISO 565. Les familles de granulats selon la norme P 18 – 540 sont :

- Sables : $d \leq 6,3$ mm (ramené à 4 mm pour le sable à béton)
- Sablons : $d \leq 1$ mm et contenant moins de 10% de passant à 0,063 mm
- Gravillons : $1 \text{ mm} \leq d \leq 31,5$ mm

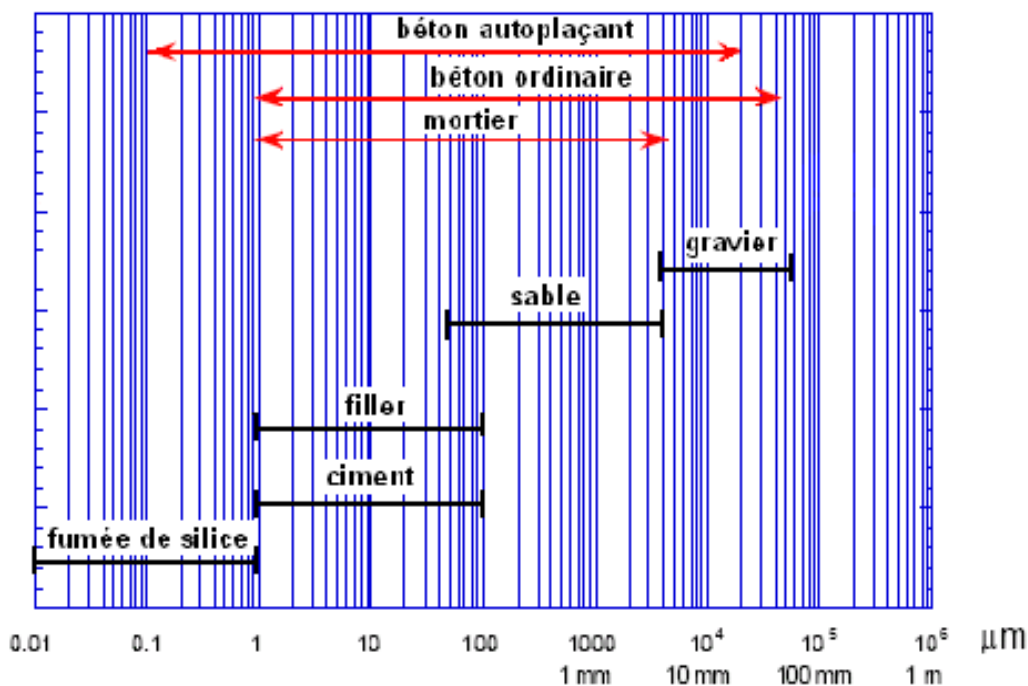


Figure 2.2: *Etendue de taille des grains des composants granulaires à la matrice cimentaire.*

- Cailloux : $20 \text{ mm} \leq d \leq 125 \text{ mm}$

L'étendue de taille des grains des bétons peut être illustrée dans la figure 2.2. Dans le cas des bétons autoplaçant, la présence des fines en substitution du ciment et l'absence des plus gros grains pour des raisons de stabilité du mélange décalent l'étendue granulaire vers de plus faibles granulométries.

Plusieurs auteurs ont étudié les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés rhéologiques des bétons frais [15, 16, 17, 18, 19]. Il n'est pas suffisant de choisir des granulats de bonne qualité, mais il faut aussi une granulométrie appropriée (*i.e.* la distribution de taille des particules doit conduire à une réduction du volume des vides et à une optimisation de la compacité du béton). L'obtention d'un spectre granulométrique continu et étendu permet d'améliorer la compacité et l'ouvrabilité du béton. En effet, de manière générale, la viscosité d'une suspension est d'autant plus faible que la distribution granulométrique des particules solides est étalée, c'est à dire s'étend sur une large gamme de diamètre en conservant une équiprobabilité des différentes tailles. La granularité idéale serait donc celle d'un mélange contenant de très petites et très grosses particules. Il est cependant nécessaire de limiter le volume et le diamètre $d_{\max}$ des plus gros granulats puisqu'ils sont à l'origine de divers désordres survenant lors de la mise en œuvre du béton (blocage au droit des armatures, ségrégation...). La granularité des gravillons est fixée par le $d_{\max}$ prescrit ou admissible pour le béton à préparer en fonction de critères empiriques liés à la mise en œuvre, notamment la densité de ferrailage dans les coffrages (**BAEL et ECII**). Dans le cas des BAP, pour des raisons de stabilité, le $d_{\max}$ est normalement inférieur à 20 mm, il se situe le plus souvent entre 10 et 16 mm (cf. Fig. 2.2).

2.2.2 Comportement des bétons frais

L'étude du comportement du béton frais est complexe du fait qu'il est composé de particules de différentes tailles immergées dans l'eau : des particules éventuellement colloïdales (ciment, filler calcaire, fumée de silice, cendres volantes...) et des inclusions solides non colloïdales (graviers et

sable). Une première vision très simple consiste à considérer l'écoulement du béton frais comme résultant de l'interaction entre deux phénomènes liés d'une part aux frottements entre les granulats et d'autre part aux phénomènes rhéologiques dus à la pâte interstitielle :

- La pâte : elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses propriétés macroscopiques [4].
- La phase granulaire : elle résiste au cisaillement suivant un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains (loi de Coulomb). Ces processus dépendent à la fois des caractéristiques physiques des granulats (dimension, forme, masse, etc.) et de leur concentration dans le mélange [16]. Le seuil de cisaillement τ_0 du mélange est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

C'est une vision simplificatrice qui est plus adaptée aux bétons ordinaires qu'aux BAP, car, dans ces derniers, les gros grains sont moins nombreux et leur frottement ne joue qu'un faible rôle, le seuil d'écoulement de la pâte devient essentiel dans le comportement du matériau [20].

Le comportement de chacune de ces deux phases ainsi que leur contribution au comportement du mélange sont considérés séparément dans les paragraphes suivants :

2.2.2.1 La pâte de ciment : une suspension thixotrope

La pâte de ciment fraîche est une suspension chargée [21, 22]. Il existe, entre les grains de ciment, des forces d'interaction qui permettent la création de structures stables présentant des porosités importantes. La pâte de ciment non adjuvantée peut présenter une structure flocculée, c'est-à-dire composée de flocons jointifs formant un réseau continu. A l'échelle macroscopique, un écoulement correspond à des déplacements relatifs irréversibles des grains les uns par rapport aux autres. Cela n'est possible que si ces derniers sont libérés de toute attraction mutuelle. Pour qu'il y ait écoulement, il faut donc que les forces de cisaillement soient suffisamment élevées pour rompre les liaisons interparticulaires. Il existe donc, dans une pâte de ciment flocculée, un seuil de cisaillement en dessous duquel il n'y a pas d'écoulement. Une pâte de ciment est donc un fluide à seuil dont la viscosité apparente dépend du gradient de vitesse. Différents modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement des pâtes de ciment fraîches [23]. Cependant, pour des raisons pratiques, les modèles les plus couramment employés sont ceux de Bingham et d'Herchel Bulkley [9, 24, 25] en raison du faible nombre de paramètres nécessaires à leur utilisation.

Van Damme [26] et Mansoutre [27] ont mis en évidence le fait que l'augmentation de la fraction granulaire produit une augmentation du seuil de cisaillement. Ces auteurs montrent qu'il n'y a pas que les interactions physico-chimique (liées à la pâte) qui entrent en jeu mais qu'il faut également prendre en compte la contribution des frottements de contact (liés aux granulats) pour des concentrations granulaires suffisamment élevées.

La viscosité des pâtes de ciment dépend non seulement du gradient de vitesse, mais aussi de son temps d'application. Le comportement thixotrope des pâtes de ciment a été observé et a fait l'objet de nombreuses recherches depuis de nombreuses années [28, 29, 30, 31, 32]. Il se traduit par une évolution de la viscosité des matériaux cimentaires avec le temps et l'histoire de l'écoulement subi par le matériau. La diminution de la viscosité apparente en cours d'écoulement peut être expliquée par une diminution réversible de la floculation des particules de ciment (déstructuration). Au repos, cette floculation réapparaît et le matériau semble se figer (structuration). Ce comportement se superpose à une évolution irréversible (vieillessement) de la rhéologie du mélange qui est une spécificité des matériaux cimentaires et peut être attribuée au processus d'hydratation et parfois accentuée par une activation retardée des adjuvants.

Tableau 2.2: *Propriétés rhéologiques principales des matériaux cimentaires*

Matériau	Pâte de ciment	Mortier	Béton fluide	BAP	Béton ordinaire
Seuil d'écoulement (Pa)	10 – 100	80 – 400	400	50 – 200	500 – 2000
Viscosité plastique (Pa.s)	0,01 – 1	1 – 3	20	20 – 100	50 – 100

Récemment, Jarny *et al.* [32, 33] ont montré que la pâte de ciment présente (comme de nombreuses autres suspensions) un phénomène de bifurcation de viscosité : à l'approche d'une contrainte critique, il y a un changement abrupt de comportement, le matériau passe brutalement d'un état solide à un état liquide, ou inversement.

2.2.2.2 Le béton : un fluide à seuil biphasique complexe

Du point de vue de la loi de comportement, les bétons modernes à l'état frais peuvent être décrits par des modèles de type fluides à seuil comme celui de Bingham. Des modèles plus complexes tels que celui de Herschel-Bulkley existent essentiellement pour les bétons fluides [9, 34] qui présentent parfois un caractère rhéoépaississant. Comme les bétons contiennent une pâte de ciment thixotrope, ils présentent aussi un comportement thixotrope. Les modèles proposés pour décrire le comportement thixotrope des bétons frais ne sont pas nombreux, en effet seul un modèle est récemment proposé par Roussel [35]. Par ailleurs, Coussot et Roussel [31] ont montré que la thixotropie n'affecte pas l'étude du comportement en régime permanent, c'est à dire en écoulement établi des bétons (pompage, malaxage...) qui peut être décrit à l'aide de modèles de fluides à seuil. Elle doit cependant être prise en compte dans l'étude des régimes transitoires qui sont majoritaires lors des phases de mise en œuvre (remplissage d'un coffrage, coulage d'une dalle et même repos du matériau pendant lequel l'état de floculation augmente).

Banfill [25] a récapitulé dans le tableau 2.2 les plages des valeurs du seuil d'écoulement et de la viscosité plastique des matériaux cimentaires.

Un système biphasique

De Larrard [17, 36] et Ferraris [37] proposent une interprétation physique du modèle de Bingham en supposant que le béton est un mélange granulaire suspendu dans l'eau, donc tous les grains (granulats, sable, ciment) appartiennent à la phase solide. Le terme de seuil τ_0 apparaît comme étant la contribution de la phase solide et le terme $\mu\dot{\gamma}$ comme celle de la phase liquide. De Larrard a cependant évoqué la possibilité d'une autre distinction entre phase liquide et phase solide, qui peut être effectuée sur des considérations granulométriques (la séparation s'établissant aux alentours de 80 μm) ou sur l'évolution pendant la prise (qui n'affecte en principe que la pâte) [36, 17].

Plus récemment, Nielsen [38] et Geiker *et al.* [18] considèrent les BAP comme un système biphasique qui comprend une phase de mortier de type Bingham dans laquelle les gros granulats sont dispersés. Ce modèle est basé sur la concentration relative en granulats ϕ^G/ϕ_{max}^G , où ϕ^G est la concentration en volume des granulats dans la suspension et ϕ_{max}^G la concentration d'empilement maximale. Ainsi, Edamatsu *et al.* [39] ont utilisé un béton modèle composé de mortier et de billes de verre pour évaluer les interactions entre les gravillons et les particules du mortier (sable ou poudre).

D'autres auteurs [40, 16] considèrent les bétons à l'état frais comme un matériau biphasique consistant en un ensemble d'inclusions de taille millimétrique à centimétrique (sable + gravier) en suspension dans un fluide non Newtonien qui est la pâte de ciment.

Ces approches nécessitent la connaissance des interactions entre la phase granulaire et la phase fluide. En effet, lors des écoulements de telles suspensions, la pâte s'immisce dans les interstices entre les granulats, participe à la lubrification des granulats, favorisant ainsi l'écoulement en diminuant les frottements intergranulaires mis en jeu.

Comportement du béton : les facteurs influents

L'ouvrabilité d'un BAP est non seulement dépendante de la quantité de pâte qui permet de réduire les frottements entre les granulats, mais également de la fluidité de la pâte [41, 42], or la fluidité de la pâte est elle-même liée à des frottements intergranulaires. C'est par une méthode d'homogénéisation simple que Banfill [25] a tenté d'expliquer les évolutions des propriétés rhéologiques des matériaux cimentaires (cf. Tab. 2.2). D'après cet auteur, le seuil d'écoulement des bétons augmente avec la concentration des granulats car ces derniers sont incapables d'être cisailés : lorsqu'un taux de cisaillement total γ est appliqué à un béton imaginaire qui se compose de 50 : 50 de granulat et de pâte (en volume), le taux de cisaillement dans les granulats solides est zéro alors que celui dans la pâte est 5γ [25]. Il en résulte qu'il y a une contrainte de cisaillement et une résistance à l'écoulement plus élevés dans la pâte, ce qui explique l'augmentation de la viscosité plastique du matériau.

De la même manière, Jin [43] a comparé les comportements de BAP et ceux des mortiers directement issus de leur composition, c'est à dire formulés en n'enlevant que les gros granulats (5/20 mm). Il a trouvé une corrélation très faible entre le seuil d'écoulement du mortier et l'étalement du béton. Cette différence de comportement entre un béton et le mortier qui le compose montre que les gros granulats jouent un rôle dominant dans la réponse rhéologique du matériau.

L'augmentation de la viscosité plastique des matériaux est aussi due partiellement aux contacts interparticulaires, comme démontré par le fait que pour deux bétons ayant un même seuil d'écoulement mais contenant des gros granulats arrondis et angulaires, la viscosité plastique du dernier est remarquablement plus élevée [25, 44].

Les propriétés rhéologiques d'un béton dépendent donc de la forme des grains qui le constituent, de leur taille et distribution de tailles, de leur rugosité de surface et leur concentration et du comportement de la pâte de ciment. Il est cependant à noter que les exigences relatives à la maniabilité et à l'absence de ségrégation tendent partiellement à s'opposer.

Prédiction du comportement d'un béton : modèles existants

De Larrard [36] a développé un modèle d'empilement compressible pour prédire le seuil d'écoulement ou la viscosité plastique d'un béton ordinaire en fonction de paramètres caractérisant ses composants. Ce modèle est basé sur une approche granulaire où chaque particule même la plus petite affecte la compacité finale, ce qui conditionne les propriétés rhéologiques du mélange. Ce modèle est particulièrement adapté à l'étude des bétons ordinaires dont le comportement se rapproche de celui d'un matériau granulaire humide et dont le comportement est effectivement dominé par des contacts frictionnels entre grains. Cependant, dans le cas de bétons fluides ou de bétons auto-plaçants où le volume de particules fines est plus élevé et pour lesquelles le comportement est dominé par des interactions de type hydrodynamique, le modèle d'empilement compressible atteint ses limites. Il est alors possible, comme présenté ci-dessus, d'imaginer qu'ils peuvent, d'un point de vue théorique, être divisés en fluide porteur mélangé avec plus ou moins de grains. Etant donné que la plupart des phénomènes complexes ont lieu à l'échelle de la pâte de ciment, il serait naturel de prévoir le comportement rhéologique du béton à partir du comportement rhéologique de la pâte de ciment et de la distribution du squelette granulaire. En examinant la pâte de ciment seulement, l'ingénieur pourrait alors prévoir la rhéologie du béton frais ou examiner de nouveaux ajouts sans besoin d'essais en vraie échelle. Cette approche est une vieille question [14, 45, 42], mais elle devient valide seulement dans le cas des bétons fluides modernes, dans lesquels les phénomènes physiques liés à un comportement de suspension dominant les contacts directs entre grains.

Une telle approche, nommé «modèle de viscosité multi-échelle», a été très récemment proposée par Toutou *et al.* [46, 47], en se basant sur le modèle de Krieger-Dougherty [48]. La principale hypothèse de construction du modèle est de considérer, à une échelle d'observation donnée, la suspension polydisperse comme une suspension biphasique constituée d'une phase continue (fluide saturant) et d'une phase dispersée (unités structurales). Dans un tel mélange, ces auteurs ont distingué différentes échelles. Ces échelles sont associées à des classes de grains de tailles voisines pouvant

constituer, en présence de fluides, des suspensions qui seront considérées comme homogènes et monodisperses. L’auteur a réussi à relier la rhéologie d’une pâte à celle d’un micro-béton, obtenu en ajoutant à cette pâte des particules de classe granulaire supérieure [47, 49]. Oh *et al.* [50] et Wüstholtz [51] développent un modèle basé sur la quantité de pâte en excès, où les interactions solides-fluide et solides-solides sont contrôlées par l’épaisseur de pâte. Cette épaisseur correspond à la moitié de la distance entre deux particules voisines, en supposant que cette distance est indépendante du diamètre des particules.

L’idée de viscosité multi-échelle a été développée de façon plus ambitieuse par Ferraris *et al.* [52]. Ces auteurs, eux, ont proposé une simulation numérique pour, d’une part, prédire quantitativement la viscosité du béton à partir des mesures sur la pâte de ciment ou sur le mortier et d’autre part, déterminer les caractéristiques rhéologiques nécessaires pour la pâte et la proportion de granulats pour obtenir l’ouvrabilité requise sur béton. Beaucoup de travail reste à accomplir pour atteindre ces objectifs. La technique empirique du Mortier de Béton équivalent [53] apparaît comme une alternative expérimentale. Le principe est de considérer qu’il existe une corrélation simple entre les propriétés rhéologiques du béton et celles du mortier qui le compose. Il reste cependant certaines limites d’emploi pour lesquelles la méthode n’est plus valable ou pour lesquelles des études sont à poursuivre, notamment pour des bétons ayant un affaissement supérieur à 25 cm, ou pour des gravillons présentant une teneur en fine élevée [53]. En conclusion, la question de l’existence d’une méthode permettant de prédire le comportement d’un béton à partir d’une pâte de ciment ou d’un mortier ne semble pas résolue.

2.2.3 Problématiques de la mise en œuvre des bétons

La mise en œuvre du béton est une étape très importante dans la réalisation d’un béton performant : les pratiques de chantier ont des effets directs sur la qualité finale d’un ouvrage d’art. A la sortie du malaxeur des centrales à béton, le béton est généralement transporté par camions malaxeurs. Une fois sur le chantier, il est transféré soit dans des bennes à béton qui sont levées à la grue pour être ensuite vidées dans le coffrage, soit dans une pompe à béton qui est accouplée à un mât de distribution du béton. La principale différence entre un BAP et un béton traditionnel réside dans le comportement du matériau à l’état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d’un BAP est d’être extrêmement fluide, il se compacte sous l’effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. La durée de la phase de coulage peut être réduite dans le cas des BAP : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l’écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l’arase supérieure est plus facile à réaliser. De plus, si la méthode traditionnelle de remplissage des coffrages est basée sur une succession de vidanges de bennes par le haut du coffrage, il est possible, dans le cas des BAP, de les injecter par le pied du coffrage.

2.2.3.1 Corrélation entre la rhéologie du béton et sa mise en œuvre

Il semble naturel de tenter de relier la mise en œuvre du matériau étudié (béton) à ses propriétés rhéologiques. Les termes «ouvrabilité» et «maniabilité» sont utilisés comme une description générale de la nature des bétons à l’état frais par les industriels de la profession. La maniabilité ou l’ouvrabilité d’un béton frais représente sa capacité à se mettre en œuvre sous son propre poids avec ou sans l’aide d’une vibration. Ainsi, une ouvrabilité adéquate pour une mise en œuvre traditionnelle n’est pas nécessairement suffisante pour bétonner des pièces de sections minces ou très fortement ferraillées. Par conséquent, l’ouvrabilité semble correspondre à une propriété physique spécifique du béton qui ne tient pas compte des conditions particulières d’utilisation pour un type donné d’application.

D'autres termes empiriques décrivant le comportement rhéologique d'un béton frais sont ainsi utilisés, tels que "capacité de remplissage" (capacité de couler et de remplir complètement tous les espaces dans le coffrage sous son propre poids), "capacité de passage" (capacité de traverser des zones confinées telles que les espaces entre les barres d'acier tout en restant homogène et sans blocage) et "stabilité" (capacité d'empêcher la ségrégation et de rester homogène en composition pendant le transport et la mise en œuvre). La ségrégation est généralement associée à la ségrégation statique qui est en fait une sédimentation des granulats dans la pâte de ciment ou des grains de la pâte de ciment (ressuage). La ségrégation dynamique (*i.e.* en écoulement) est plus complexe. Elle est souvent attribuée au phénomène de blocage des plus gros grains dans des zones confinées ou dans des zones à forte densité d'armature.

Ainsi, une bonne mise en œuvre du béton dans les structures fortement ferraillées nécessite l'utilisation de bétons de grande "capacité de remplissage", de grande "capacité de passage" et de grande "stabilité".

2.2.3.2 Phénomènes perturbateurs dans la mise en œuvre

Il est aisé de relier la "capacité de remplissage" au comportement de fluide à seuil du béton frais : celui-ci ne s'écoule que si on lui applique une contrainte suffisamment forte. Si le phénomène de blocage des granulats au droit des armatures est écarté dans un premier temps, une mauvaise mise en œuvre peut ainsi être causée par le comportement de fluide à seuil du béton : le béton peut s'arrêter de s'écouler dans le coffrage au lieu de franchir le cheminement nécessaire. Ce phénomène peut être aggravé par une densité plus ou moins forte d'armatures dans le coffrage : le béton risque de ne pas enrober totalement les armatures et laisser des vides dans le matériau (cf. Fig. 2.3a). Dans un second temps, la mise en œuvre peut être contrariée par le phénomène de blocage : les gros granulats peuvent former des voûtes au passage des armatures. Il en résulte qu'il y a un drainage du matériau et l'écoulement de béton ne peut pas avoir lieu. Généralement, de tels problèmes ont des conséquences particulièrement coûteuses en temps et en argent.

Si les nouveaux bétons tels que BAP et BAN offrent de nouvelles possibilités pour le génie civil, ils entraînent également de nouveaux problèmes et interrogations au niveau fondamental. Ces bétons sont par exemple très sensibles aux phénomènes de ségrégation partielle de leurs composants, qui sont parfois à l'origine d'une mauvaise mise en œuvre de ces bétons sur chantier et en conséquence, d'effets nuisibles sur le comportement mécanique des éléments de structure. La figure 2.3b illustre un cas de ségrégation très remarquable des gros granulats. Ces bétons sont également sensibles à la ségrégation dynamique des constituants, comportements qui sont encore mal compris. Interviennent dans ce phénomène non pas seulement les caractéristiques intrinsèques du matériau mais aussi des géométries d'écoulement et des obstacles.

Le caractère plus ou moins thixotrope du béton se traduit par une évolution de la viscosité des bétons avec le temps et l'histoire de l'écoulement subi par le matériau. Le matériau se fige et sa viscosité apparente augmente lors des régimes transitoires qui sont majoritaires lors des phases de mise en œuvre (remplissage d'un coffrage, coulage d'une dalle ou repos du matériau). Ce comportement se superpose à des évolutions physico-chimique irréversibles dues au processus d'hydratation du ciment ou à l'effet d'une perte de l'efficacité d'un adjuvant. Les manifestations de la thixotropie sont particulièrement marquées dans le cas des BAP, par exemple la pression exercée sur les coffrages lors de leur coulage [54] ou le coulage multicouche [31].

Au vu de ces problématiques pendant la mise en œuvre ainsi de leurs conséquences sur l'ouvrage, il est primordial de prédire la capacité de remplissage, la capacité de passage et la stabilité des bétons frais sur chantier. Cet aspect fait l'objet de très nombreuses recherches. Dans la paragraphe suivante nous insistons sur la rhéométrie et une description générale des différentes techniques pour mesurer et prédire la mise en œuvre des bétons frais.

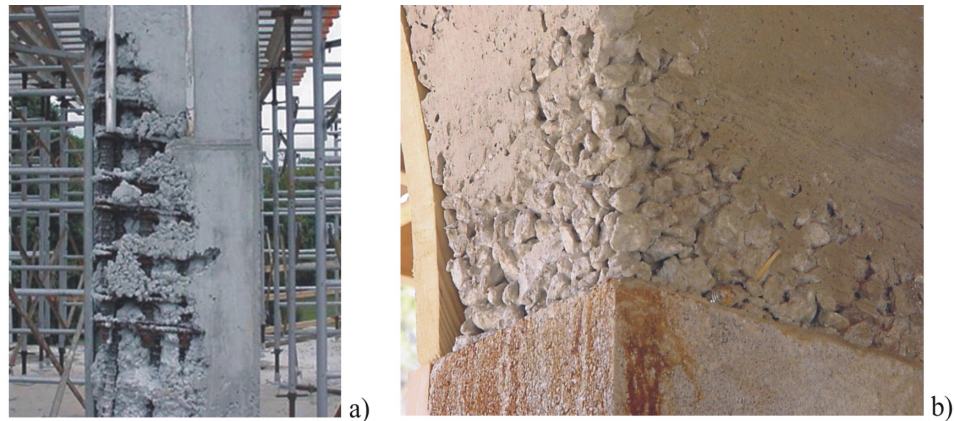


Figure 2.3: Exemples de mauvaises mises en oeuvre du béton. a) Mauvais remplissage d'une colonne ; b) Ségrégation des granulats

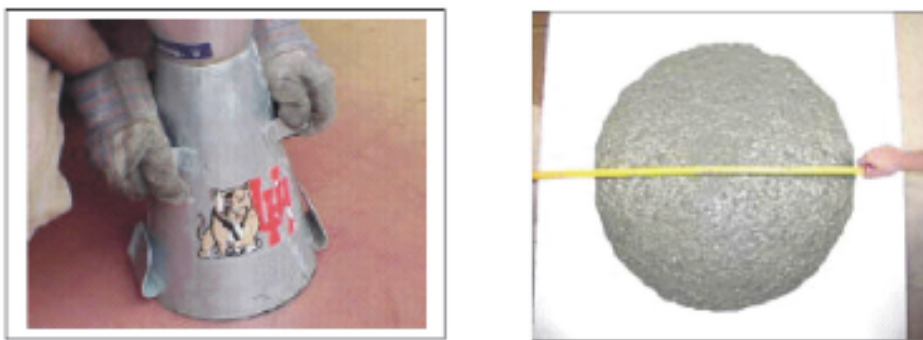
2.2.4 Rhéométrie des matériaux cimentaires

Le comportement rhéologique des matériaux cimentaires est étudié depuis de nombreuses années. Ceux-ci englobent les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons. Les techniques de mesure doivent être adaptées au type de matériau étudié et aux paramètres recherchés. Les bétons, du fait de leur large étendue granulométrique, nécessitent des outils spécifiques.

2.2.4.1 Rhéométrie des pâtes de ciment

Tattersall et Banfill [9], Lapasin *et al.* [29], puis Shaughnessy [55] ont fait un état de l'art très complet des méthodes utilisées dans l'étude des propriétés rhéologiques des pâtes de ciment fraîches. Le seuil d'écoulement peut être mesuré avec des mesures d'écoulement, en extrapolant la valeur de la contrainte à vitesse nulle [4]. Il existe plusieurs géométries dites conventionnelles pour des mesures rhéologiques sur des pâtes concentrées comme la pâte de ciment, telles que les géométries Couette, cône/plan ou plan/plan. Les géométries plan/plan et cône/plan ne sont pas utilisables pour des pâtes présentant du ressuage car on ne mesure plus que la viscosité de l'eau. La géométrie Couette nécessite un faible entrefer qui ne permet pas de tester des mélanges contenant des grosses particules.

Au vu de ces observations, nous avons choisi dans ce travail d'utiliser la géométrie Vane qui est constituée d'un croisillon (deux plaques perpendiculaires se croisant le long de l'axe sur lequel elles sont fixées) et qui est entraînée en rotation autour de son axe 2.4. L'énorme avantage de cette géométrie est qu'elle minimise le glissement le long des surfaces solides au contact de l'échantillon, puisque celles-ci ne sont plus situées le long des plans de glissement principaux des couches de matériau en écoulement mais dans des plans radiaux. Le cisaillement induit par le croisillon peut être en première approximation assimilé à celui résultant du mouvement d'un cylindre de diamètre égal à la largeur des pales du croisillon. Grâce à la minimisation de la surface solide au contact du matériau, la géométrie de croisillon permet de s'assurer un cisaillement plus homogène dans l'entrefer par rapport à d'autres géométries, en conséquence d'utiliser des entrefers plus larges pour étudier les suspensions plus grossières (*i.e.* des suspensions chargées en particules de taille centimétrique). Différentes dimensions du croisillon seront employées selon la consistance du matériau comme l'indique la figure 2.4.

Figure 2.4: *Géométrie Vane*Figure 2.5: *Essai d'étalement*

2.2.4.2 Rhéométrie des bétons frais et essais empiriques du génie civil

Il existe dans le monde plus de 120 essais [56, 57] pour quantifier ou au moins qualifier la maniabilité d'un béton à l'état frais. Ces essais peuvent être de façon générale séparés en trois catégories :

- les essais empiriques dont le résultat est une quantité géométrique liée à la forme de l'échantillon à l'arrêt de l'écoulement (affaissement, étalement, L-Box, table à choc).
- les essais empiriques dont le résultat est un temps nécessaire à l'écoulement d'une certaine quantité de matériau dans une géométrie donnée (Cône de Marsh [58], V-Funnel [56], maniabilimètre [59], cône modifié [60], etc.).
- les essais utilisant des «rhéomètres à bétons» qui permettent, pour certains d'entre eux, la mesure de grandeurs physiques intrinsèques représentatives du comportement rhéologique du matériau.

En France, l'essai le plus répandu pour quantifier l'ouvrabilité des bétons est l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (norme NF P 18 – 451) encore appelé slump-test (norme ISO 4109). En étant simple à mettre en œuvre, l'essai d'affaissement fait référence sur les chantiers pour évaluer la capacité de remplissage du béton en absence des obstacles. Cet essai juge la capacité du béton de déformer sous l'effet de son poids propre contre le frottement de la surface en absence de force externe. Pour réaliser l'essai, un cône conventionnel rempli de béton est soulevé laissant le matériau de s'écouler. A l'arrêt de l'écoulement, l'affaissement est mesuré. Lors des affaissements particulièrement élevés *i.e.* pour les BAP, le diamètre de la "galette" formée par le matériau semble être plus représentatif du comportement que l'affaissement. On mesure donc la moyenne des deux diamètres perpendiculaires de la galette obtenue en fin d'essai. Un étalement compris entre 600 et 750 mm signifie un béton conforme aux recommandations provisoires de l'AFGC [7].

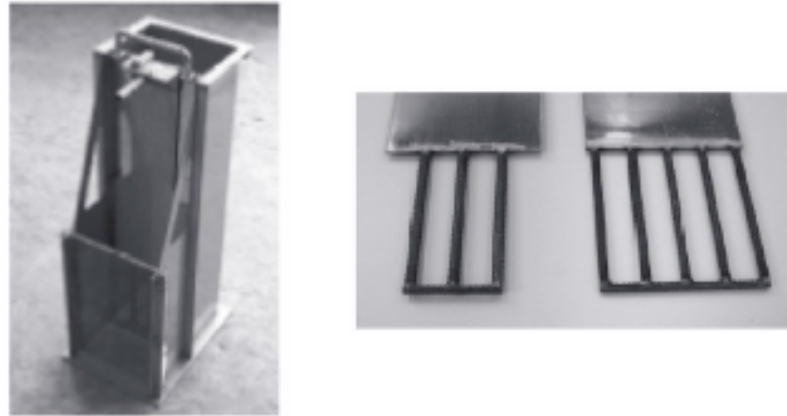


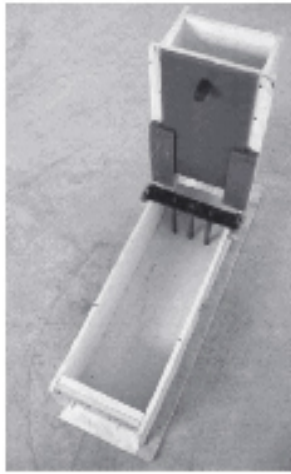
Figure 2.6: Essai à la boîte en U avec les obstacles R1 et R2 [1]

L'essai à la L-Box (cf. Fig. 2.7a) [56] permet de quantifier la "capacité de remplissage" et la "capacité de passage" des BAP. La méthode d'essai recrée les conditions de passage du béton à travers des armatures. La partie verticale de l'instrument est remplie du béton et lors de l'enlèvement de la trappe, le béton fuit sous l'effet de son propre poids à travers les barres de ferrailage pour s'écouler dans la partie horizontale. A l'arrêt de l'écoulement, le rapport entre les épaisseurs du matériau aux extrémités est enregistré. Ce rapport devrait être de 0,80 à 1 pour des bétons de bonne ouvrabilité. Bui *et al.* [41] propose d'évaluer la résistance à la ségrégation à l'aide de cet essai. En effet, un échantillon de BAP ayant les gros granulats qui atteignent l'extrémité la plus éloignée de la grille de la boîte représente une bonne résistance à la ségrégation.

L'essai à la U-Box [56] a pour but d'estimer la "capacité de remplissage" et est semblable à l'essai de l'L-Box. L'appareil se compose d'une boîte en U, le degré de l'ouvrabilité du béton peut être représenté par la hauteur que le béton atteint après avoir traversé un obstacle placé entre deux parties verticales de la boîte. Cette dernière devrait être au moins de 30 cm pour un béton de bonne capacité de remplissage. Un fluide véritablement auto-nivelant atteindra la même hauteur dans chaque partie de la boîte, ce qui n'arrive jamais dans la pratique. Okamura et Ouchi [1] ont constaté que les hauteurs à l'aval de l'écoulement correspondant à des obstacles R_1 et R_2 varient selon la teneur en gros granulats. Cette observation montre que l'influence des gros granulats sur l'ouvrabilité du béton dépend forcément du diamètre d'une barre et de l'espacement des barres composantes de l'obstacle. Il est cependant difficile de dire s'il s'agit d'un blocage ou d'une modification de la rhéologie du matériau.

L'essai de V-funnel (cf. Fig. 2.7b) et d'Orimet (cf. Fig. 2.7c) [56] s'inscrivent dans la deuxième catégorie d'essai, où le temps nécessaire à l'écoulement d'un béton dans respectivement un entonnoir ou un tube vertical est mesuré. Ce temps devrait être moins que 10 secondes. Un temps d'écoulement élevé peut être associé à une forte viscosité. Dans le cas du V-funnel, un BAP devrait ainsi présenter un temps inférieur à 10 secondes.

L'essai J-Ring [56] emploie un anneau en acier dont le diamètre est de 300 mm, auquel sont attachées des barres d'acier de 100 mm de hauteur. L'espacement des barres est réglable, bien que 3 fois la taille du plus gros grain soit une valeur recommandée. Le dispositif J-Ring peut être utilisé en combinaison avec l'essai d'étalement, l'Orimet test ou V-funnel test (Figure 2.8b et 2.8c). Diverses interprétations des résultats d'essai ont été suggérées mais les mesures de la capacité de passage et la capacité de remplissage ne sont pas indépendantes. La différence de l'épaisseur du béton juste avant et après des barres d'acier est mesurée. La capacité de passage du béton est d'autant plus grande que cette différence est faible. Un béton recommandé devrait présenter une valeur de J-ring de l'ordre 10 – 15 mm.



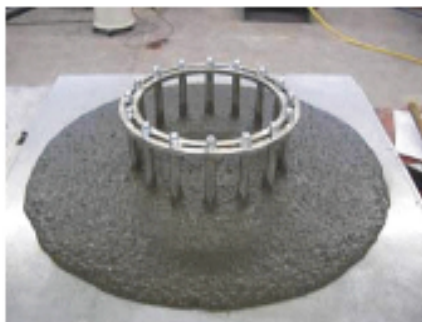
a)



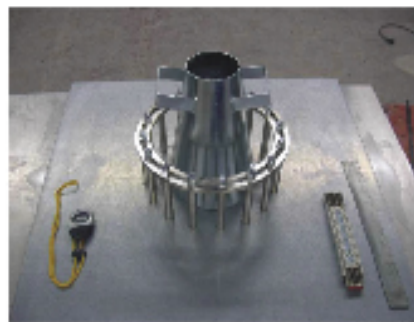
b)



c)

Figure 2.7: a) *L-Box*; b) *V-funnel*; c) *Orimet*

a)



b)



c)

Figure 2.8: a) *J-ring*; b) *J-ring et cône d'Abrams*, c) *J-ring et Orimet*

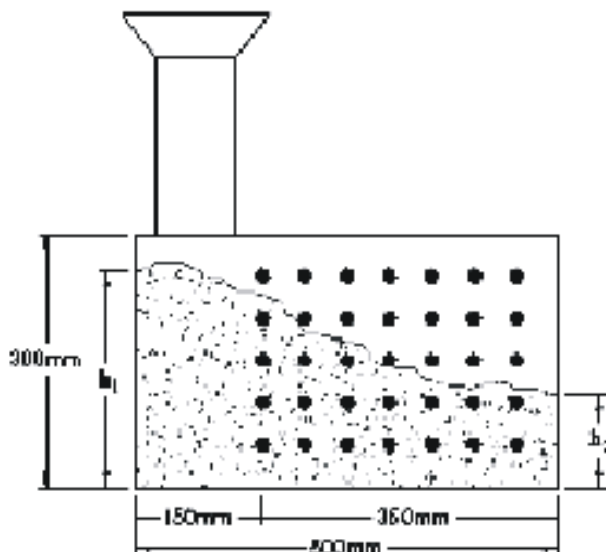


Figure 2.9: Schéma du "Filling test"

Nous pouvons aussi citer le "Filling test" [8], également connu sous le nom de «Kajima test», qui permet d'estimer la capacité de remplissage des BAP. Il s'agit d'une boîte contenant 35 barres d'acier horizontales de 20 mm de diamètre (cf. Fig. 2.9). 45 l de béton est déversé à une vitesse constante dans l'entonnoir, à l'arrêt de l'écoulement, l'épaisseur h_1 et h_2 du matériau est mesurée aux extrémités de la boîte comme l'indique la figure 2.9.

Le pourcentage de remplissage se calcule :

$$\text{Pourcentage de remplissage} = \frac{h_1 + h_2}{2h_1} 100\% \quad (2.4)$$

De façon évidente, la capacité de remplissage du béton est d'autant plus importante que le pourcentage de remplissage est élevé. Cet essai permet une bonne représentation des conditions pratiques de mise en œuvre. Il est cependant difficilement utilisable sur chantier à cause de son encombrement et de la nécessité d'une grande quantité de matériau.

Dans un essai similaire, Bartos *et al.* [61, 62] utilisent une boîte rectangulaire contenant des barres d'acier horizontales ou verticales. Les barres d'acier sont placées dans un arrangement qui simule des conditions réelles de mise en œuvre pour un élément donné. Une fois le béton est durci, la boîte est enlevée et l'éprouvette est en suite coupée à différents sections. Ceci permet de savoir à quel point le béton a rempli la boîte ferrillée et enrobé des barres d'acier. Puisque chaque appareil est fabriqué pour simuler une condition réelle de mise en œuvre, l'essai n'est pas normalisé et les résultats de différents appareils ne peuvent pas être directement comparés.

Ouchi *et al.* [2] ont constaté que l'ouvrabilité du béton devrait être vérifiée sur l'intégralité du béton livré sur chantier juste avant la mise en œuvre. Cependant, les méthodes d'essai conventionnelles pour les bétons frais exigent un prélèvement et ceci peut être extrêmement laborieux pour un contrôle de réception sur la quantité entière du matériau. Ces auteurs ont développé au Japon une méthode de contrôle de réception pour les BAP [2] utilisant un appareil spécial 2.10. Sur chantier, cet appareil d'essai est installé entre le camion et la pompe. A la sortie du camion, le béton est coulé entièrement à travers cet appareil avant d'être envoyé à la pompe. Un béton qui réussit à traverser l'appareil doit, d'une part, avoir un seuil d'écoulement suffisamment faible, et d'autre part, ne pas



Figure 2.10: *Contrôle de réception sur chantier au Japon [2]*

présenter un blocage des granulats au passage de la grille. Un tel béton peut être considéré comme ayant une bonne ouvrabilité et permettre une bonne mise en œuvre de la structure.

Faute d'avoir des bases théoriques, les essais empiriques exposés ci-dessus ne peuvent fournir que des estimations approximatives sur le comportement du béton frais, sous forme de plages recommandées de valeurs expérimentales. De plus, ils ne permettent pas d'avoir une mesure directe des caractéristiques intrinsèques des matériaux et donc une comparaison scientifique entre des bétons de compositions différentes. Un grand nombre de chercheurs [63, 64, 65, 66] ont alors travaillé sur le comportement du béton en écoulement et principalement soumis à des contraintes de cisaillement, à l'aide d'un "rhéomètre à béton" qui permet d'identifier les caractéristiques propres du matériau. En pratique cependant, même s'ils fournissent grossièrement la même classification des bétons testés en terme de fluidité, ces appareils ne donnent pas la même valeur absolue des paramètres physiques mesurés [67, 68]. La mesure du seuil reste ainsi un sujet particulièrement délicat. Comme les bétons contiennent des inclusions centimétriques, il est nécessaire d'utiliser des géométries d'écoulement spécifiques et des appareils sophistiqués (rhéomètre Cemagref [63], rhéomètre BML [64], rhéomètre BTRhéom [65, 66]) mais les mesures restent délicates, le coût prohibitif pour une majorité d'applications, et ces appareils ne sont pas tous adaptés à une utilisation sur chantier.

En conclusion, le béton à l'état frais est effectivement un matériau tellement compliqué qu'il est hors de notre portée d'interpréter correctement tous les phénomènes intervenant lors de la mise en œuvre des bétons. Nous nous sommes dirigés alors vers un matériau modèle simple et bien caractérisé. Comprendre ce qui se passe dans le cas le plus simple serait instructif vis-à-vis des expériences plus complexes. Ce sujet sera révélé dans le chapitre 2. De plus, nous avons montré qu'une mauvaise mise en œuvre provenait souvent du comportement d'un fluide à seuil du béton ou du phénomène de blocage des granulats au passage des armatures. Etudier le mécanisme de ces problèmes pour les prédire fera l'objet des chapitres suivants.

Chapitre 3

Un béton de laboratoire

Sommaire

3.1	Echelle d'observation et taille des composants	23
3.2	Système modèle	24
3.2.1	Coffrage réduit	25
3.2.1.1	Géométrie du coffrage	25
3.2.1.2	Ferraillage	25
3.2.2	Propriétés prérequis du matériau "modèle"	26
3.3	Matériau modèle	27
3.3.1	Pâte modèle : suspension de Carbopol	27
3.3.1.1	Nature du matériau	27
3.3.1.2	Procédé de fabrication	29
3.3.1.3	Caractéristiques rhéologiques	30
3.3.2	Inclusions	30
3.3.2.1	Fraction volumique au repos	30
3.3.2.2	Etat de surface	32
3.3.3	Sédimentation des inclusions	35
3.3.4	Seuil d'écoulement du mélange	37
3.3.4.1	Etat de l'art	38
3.3.4.2	Etudes expérimentales	39
3.3.4.3	Résultats et discussions	39

3.1 Echelle d'observation et taille des composants

La mise en œuvre du béton et les essais empiriques d'étalement ou d'écoulement à la boîte en L peuvent être décrits comme des écoulements à surface libre d'un fluide non Newtonien contenant des inclusions solides. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les modèles de Bingham ou d'Herschell Bulkley sont les lois de comportement les plus utilisées, mais, afin de choisir ce type de modèle, il est nécessaire de supposer que le béton peut être considéré comme un fluide continu et homogène. L'assimilation d'une suspension hétérogène à un fluide continu signifie que, dans deux parties quelconques du volume observé, nous devrions trouver un ensemble semblable de composants [3, 4]. Si une quantité physique q (par exemple la vitesse) est étudiée, l'échelle minimale à laquelle on peut observer raisonnablement le système et le considérer comme un fluide simple correspond au point au delà duquel la moyenne de q ne change plus lorsque cette échelle d'observation augmente (cf. Fig. 3.1). Le volume correspondant à cette échelle d'observation sera une partie élémentaire du

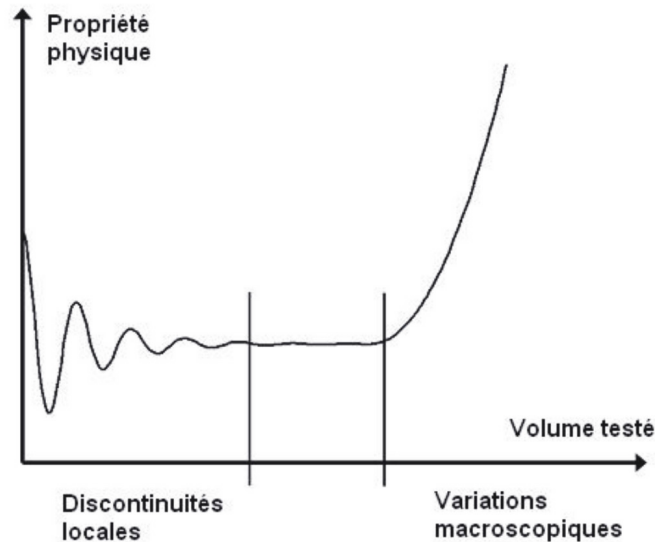


Figure 3.1: Variation d'une propriété physique moyennée sur un volume donné de matériau en fonction de la taille de ce volume [3]

matériau (par opposition à un composant). Il faut noter cependant que, si l'échelle d'observation continue à augmenter, les variations macroscopiques commencent à jouer un rôle (cf. Fig. 3.1). Ces variations sont précisément celles que nous voulons étudier. L'échelle d'observation appropriée est donc située entre la gamme des fluctuations rapides dues du phénomène de discontinuité (par exemple les variations de la vitesse entre les granulats et la pâte de ciment) et la gamme des variations macroscopiques (par exemple le gradient du champ de vitesse). Lorsque ces deux gammes coïncident, il n'est pas possible de considérer le système comme un fluide simple avec des hypothèses de continuité. L'écoulement est alors dans le régime «discret» [69] et l'assimilation du béton à un fluide homogène n'est pas possible.

De cette définition, il ressort que l'hypothèse du milieu continu est nécessairement associée à une gamme d'échelles d'observation, or cette dernière est naturellement associée aux dimensions des appareils de mesure rhéométrique, ou aux dimensions de l'échantillon dans le cas des écoulements à surface libre tels que essai d'étalement au cône d'Abrams ou essai L-box ou à la dimension caractéristique de l'écoulement (largeur du coffrage, épaisseur de la dalle...).

Considérons, à titre d'exemple, le cas de l'essai d'étalement au cône d'Abrams. Pour des affaissements supérieurs à 20 cm, l'épaisseur de la "galette" de matériau est souvent approximativement égale à la taille des particules maximales représentant dans le béton (cf. Fig. 3.2). Ceci signifie que l'échelle d'observation est de l'ordre de la taille des éléments constitutifs du matériau, l'hypothèse d'un milieu continu homogène est fortement compromise. Il n'existe malheureusement pas de règle systématique à respecter pour que l'hypothèse du milieu continu soit valide. Dans la littérature, un rapport de 10 entre la dimension caractéristique de l'écoulement et le diamètre des particules est souvent recommandé [4].

3.2 Système modèle

Afin d'avoir une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui régissent l'écoulement des bétons dans les coffrages, ce travail se propose d'isoler et de traiter séparément chaque problème dans une configuration simplifiée et de fournir ainsi les outils de base nécessaires à la modélisation de la mise en œuvre, puis d'introduire graduellement des éléments de complexité.



Figure 3.2: Exemple d'une "galette" de béton au cône d'Abrams

3.2.1 Coffrage réduit

3.2.1.1 Géométrie du coffrage

Concernant la géométrie d'écoulement, les coulages les plus couramment rencontrés dans la réalité sont horizontaux (principalement poutres et dalles) et verticaux (principalement poteaux et voiles). Si les coulages verticaux standards ne posent pas beaucoup de problèmes grâce à la grande hauteur de béton mis en œuvre qui génère des contraintes dues à la gravité supérieures au seuil d'écoulement du matériau, ce n'est pas le cas pour les coulages horizontaux. Pour ces raisons, nous avons choisi d'étudier une géométrie de type canal horizontal. Ce type de géométrie est similaire à l'essai à la boîte en L, qui est utilisé comme un essai de réception des bétons frais sur chantier [7].

L'étape suivante est le choix des dimensions du canal. Au vu du grand nombre d'essais visés, il convient de limiter les dimensions du canal pour réduire le volume nécessaire de matériau, tout en assurant une épaisseur suffisamment grande de l'écoulement pour respecter l'hypothèse d'un milieu continu et homogène (cf. section 3.1) et un volume d'échantillon représentatif du matériau. Il est raisonnable de prendre pour base, dans la phase de conception, des dimensions minimales du canal, par exemple de l'ordre de dix fois la taille des plus gros grains (cf. section 3.1). De plus, nous allons voir dans la section 3.3.2 que le diamètre des plus gros grains est de 7 mm. Nous sommes donc arrivés à une largeur de 0,2 m et une hauteur de 0,15 m pour le canal horizontal. Un matériau transparent (*i.e.* plexiglas) est préférable pour visualiser la forme de l'écoulement dans le canal.

3.2.1.2 Ferrailage

Nous avons vu dans le chapitre 1 que, plus la densité d'armatures dans le coffrage est importante, plus le risque de perturber le remplissage est élevé. Par conséquent, pour prédire la capacité à s'écouler des bétons dans une géométrie connue telle que celle de dalles ou de poutres ferrillées, il est nécessaire d'être capable de quantifier cet arrêt en fonction des caractéristiques géométriques des ferrillages. Nous avons donc choisi dans un premier temps de décomposer le ferrillage d'un coffrage réel qui est souvent complexe en ferrillages élémentaires, comprendre l'influence de ces ferrillages élémentaires sur l'écoulement puis revenir à l'écoulement réel par un ré-assemblage de ces ferrillages élémentaires. Nous avons aussi choisi d'isoler et de traiter séparément les ferrillages verticaux et horizontaux. Nous nous focalisons dans un premier temps sur l'étude d'un système

modèle simple consistant en un écoulement passant par une grille verticale en canal horizontal. La variation de la forme du matériau au moment de l'arrêt de l'écoulement en fonction de différents paramètres comme la contrainte seuil d'écoulement du matériau, la taille des barres d'acier et l'écartement entre les barres peuvent nous fournir de précieuses informations sur le meilleur moyen d'améliorer la mise en œuvre du béton.

3.2.2 Propriétés prérequis du matériau "modèle"

La même démarche de modélisation que dans la section précédente a été adoptée vis à vis du matériau. Le premier chapitre a évoqué la complexité du comportement des bétons frais. Il nous a semblé intéressant de simplifier ce matériau pour obtenir un milieu modèle étudiable expérimentalement et comparer de manière qualitative comment chacune des propriétés peut influencer sur le comportement du matériau. La méthodologie retenue est donc l'étude d'un matériau modèle simple et bien caractérisé qui permet une compréhension de tous les phénomènes physiques agissant dans le matériau. L'objectif de cette étude est de découpler les différents effets de seuil d'écoulement, de particules, de ferrailage etc., et, en multipliant les expériences, d'essayer de décrire le comportement du matériau modèle et de comprendre l'effet de certains paramètres afin de déduire quelques règles extrapolables au cas des bétons. Il se peut, naturellement, que la simplification élimine certains phénomènes importants dans le comportement des matériaux industriels. En tout cas, il est indispensable de comprendre ce qui se passe dans le matériau simplifié pour élaborer les outils de calcul qu'on pourra par la suite extrapoler au cas du système réel.

Comme ce qui a été vu précédemment, il est courant de considérer seulement deux phases principales des bétons [14, 45, 70, 71] : la pâte de ciment en tant que fluide suspendant et les plus gros granulats en tant qu'inclusions. Cette approche simplificatrice a été déjà évoquée dans la littérature [14, 45, 70, 71], surtout pour des bétons fluides dans lesquels les interactions de type frictionnelle granulaire ne dominent plus le comportement du matériau et ne nécessitent plus de prendre en compte des couplages entre toutes les tailles de grains. Nous allons donc orienter ce travail de recherche vers l'étude rhéologique d'un matériau modèle biphasique constitué de grains solides immergés dans un fluide à seuil homogène. Un tel système nous permet d'étudier et de prédire le comportement rhéologique du mélange en fonction des propriétés du fluide porteur et de ses inclusions et, plus concrètement la capacité à s'écouler du matériau ainsi que ses conditions de stabilité. De plus, l'avantage très important d'un tel système biphasique réside dans le fait qu'il nous permet de mener différentes recherches pour révéler différents phénomènes physiques qui agissent dans la phase de mise en œuvre. Par exemple, lors des expériences pour révéler l'influence du seuil d'écoulement de matériau (ou celle des caractéristiques géométriques d'un ferrailage élémentaire) sur la forme à l'arrêt de l'écoulement, la présence des inclusions ne sera pas nécessaire. Ces dernières seront par contre indispensables lors des essais expérimentaux sur le phénomène de blocage au droit des barres d'acier ou celui de ségrégation dynamique au cours de l'écoulement.

Selon leur origine, les granulats peuvent être roulés ou concassés, plats ou allongés. Dans le cas général, la forme (longueur, largeur et épaisseur), l'angularité et la rugosité des granulats ont une influence importante sur le frottement intergranulaire ou les effets hydrodynamiques et donc sur le comportement du béton à l'état frais. Nous avons choisi ici d'étudier des particules sphériques. De plus, nous avons aussi choisi d'étudier des particules monodisperses qui représentent les plus gros granulats.

Il est aussi nécessaire de préciser que nous avons décidé dans un premier temps d'écarter le caractère thixotrope du matériau. Cela nous permet de nous placer dans des conditions simplificatrices : matériau modèle stable, homogène ; variation contrôlée du seuil d'écoulement ; absence du caractère thixotrope, inclusions monodisperses sphériques de concentration et de rugosité contrôlée. Le matériau modèle ainsi mis au point est constitué de billes de verre immergées dans un fluide à seuil porteur. Les caractéristiques de ces deux phases seront évoquées dans les paragraphes suivants.

Nous nous trouvons donc à la frontière entre les recherches plus "amont" sur l'écoulement d'un matériau très complexe dans les coffrages ferrailés réels et les essais réalisables sur matériau modèle en configuration simplifié, qui nous permettent d'identifier et de mesurer les caractéristiques robustes et reproductibles et d'isoler les influences déterminantes. La figure 3.3 donne une vue schématique du passage entre recherche et problème réel.

3.3 Matériau modèle

Cette section consiste à mettre au point la formulation, le protocole de fabrication et à analyser le comportement du matériau modèle (l'évolution du seuil d'écoulement du mélange en fonction de la fraction volumique en inclusions ou la sédimentation des inclusions).

3.3.1 Pâte modèle : suspension de Carbopol

3.3.1.1 Nature du matériau

Des suspensions à base de polymère de Carbopol Ultrez 10 [72, 73] ont été utilisées comme fluides à seuil modèles non Newtoniens. Carbopol est un polymère carbomère d'acide acrylique réticulé avec éther de polyalkenyl ou glycol divinylque, qui forme des microgels hydrophiles dans la solution alcaline due à l'hydratation des groupes carboxyliques dans sa structure. Les solutions de Carbopol sont des suspensions de particules de polymère hydratées. Rhéologiquement, ce sont des fluides rhéofluidifiants dont la viscosité est une fonction croissante de la concentration et dépend fortement du pH de la solution. Les suspensions de Carbopol ont été utilisées comme des fluides modèles viscoplastiques ou matériaux de référence dans de nombreuses recherches expérimentales de mécanique des fluides complexes [74, 75, 76, 77, 78, 79]. Carbopol Ultrez 10 est une nouvelle version de polymère qui permet de fabriquer des suspensions transparentes et qui disperse beaucoup plus rapidement que d'autres versions dans la famille de Carbopol. Carbopol Ultrez 10 est livré sous forme de poudre sèche flocculée de diamètre moyen de 2 à 7 μm pour des particules primaires de polymère de 0,2 μm de diamètre environ. Chaque particule primaire peut contenir un réseau de chaînes de polymère reliées ensemble par des réticulations et gonflera jusqu'à 1000 fois leur volume en contact avec l'eau pour former un gel continu. Ces polymères sont des résines réticulées, c'est-à-dire il existe des liaisons covalentes entre les chaînes en plus des liaisons par enchevêtrement. Le polymère linéaire sera dissous dans l'eau alors que le polymère réticulé par des liaisons covalentes formera des microgels qui emprisonneront l'eau. La structure tridimensionnelle du réseau des microgels présente une résistance significative à l'écoulement, autrement dit une viscosité et un seuil d'écoulement.

Lorsque la poudre de Carbopol est incorporée dans de l'eau, le pH est d'environ 3. Les études dans la littérature montrent que les solutions non neutralisées ont des structures faibles construites par des liaisons d'hydrogène, qui peuvent être détruites facilement sous cisaillement [72, 80]. En effet, dans leur état initial, les molécules du Carbopol sont non ionisées, enroulées en forme de pelote. En solution et après avoir été neutralisé par une base minérale telle que la soude, il y a une ionisation. Cette ionisation amène au développement de charges négatives sur l'axe du polymère et à la dissociation de la solution. La répulsion entre les charges provoque un déroulement des molécules sous forme déployée et leur encombrement spatial devient très important (cf. Fig. 3.4). Cette répulsion rapide conduit à un épaississement instantané. On obtient alors une suspension de micro-gel qui peut être défini comme un réseau de polymères de tailles microscopiques beaucoup plus grandes que l'échelle moléculaire. En effet, la microstructure du Carbopol n'a jamais été clairement définie, les recherches dans la littérature divergent notamment sur la taille caractéristique de celle-ci, de quelques microns à près d'une centaine. Les observations récentes par microscopie électronique à balayage environnementale au LCPC suggère de considérer le Carbopol comme un

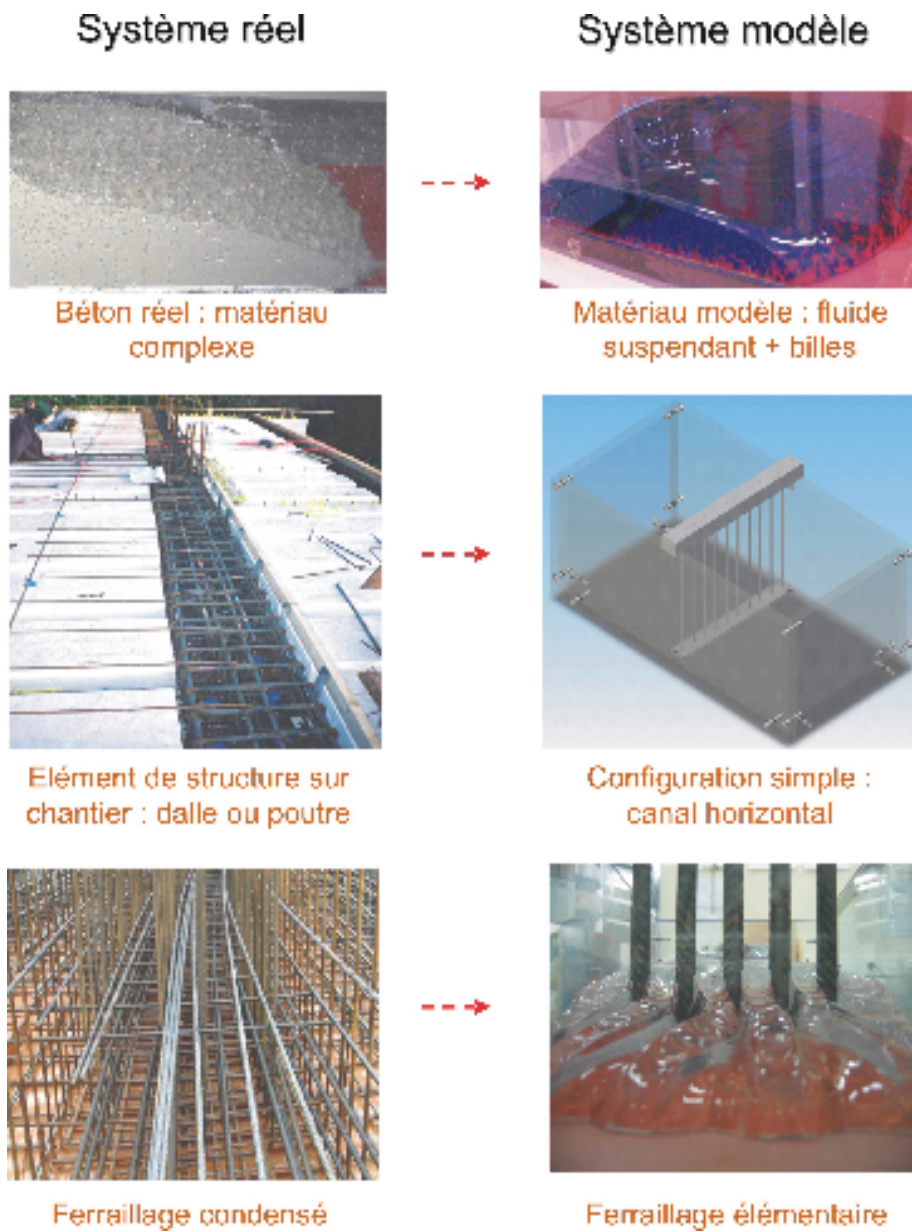


Figure 3.3: *Analogie avec un système modèle*

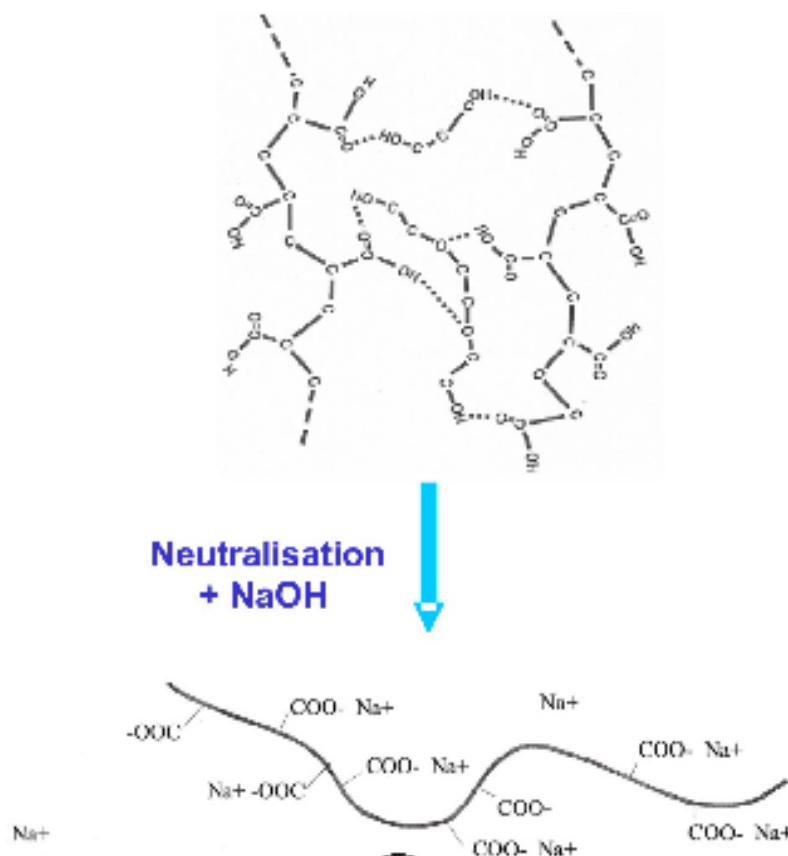


Figure 3.4: Désenchevêtrement des chaînes macromoléculaires de Carbopol après neutralisation

matériau homogène à une échelle supérieure à la dizaine de microns. On peut alors considérer que des inclusions de taille millimétrique y sont en interaction avec un milieu homogène.

3.3.1.2 Procédé de fabrication

Comme la rhéologie d'une solution de polymère est très sensible à la composition chimique du solvant correspondant [81], pour une meilleure reproductibilité des résultats, nous avons choisi de l'eau distillée pour le solvant. A la vue des données expérimentales dans la littérature, une concentration de 0,3% de Carbopol a été choisie afin d'obtenir un matériau stable, ayant un seuil d'écoulement suffisamment grand et évoluant peu au cours du temps [76].

Le procédé de fabrication des suspensions de Carbopol comprend deux étapes : la dispersion des poudres de polymère et la neutralisation de la solution obtenue. La poudre de Carbopol déshydratée est incorporée progressivement dans de l'eau distillée sous agitation pour assurer une bonne dispersion et un mouillage complet des particules de polymère. Un malaxeur à hélice contrôlé en puissance est utilisé dont la puissance maximale correspond à une vitesse de rotation maximale de 2800 tours/min. L'incorporation est réalisée à 1300 tours/min pour obtenir une dispersion translucide. Cette dispersion de polymère (non neutralisée, $\text{pH} \approx 3$) est immédiatement neutralisée par de la soude de sodium de 18% pour atteindre un pH de 6,5 mesuré au pHmètre. Une période d'agitation légère plus longue est exécutée après la neutralisation du polymère pour lisser la surface du gel et faire disparaître les bulles d'air. Une étude préliminaire [82] a montré que l'étape de neutralisation doit se limiter à une homogénéisation, avec une faible cisaillement de la suspension car la rhéologie des solutions de polymère est sensible à toute dégradation mécanique : la viscosité apparente dépend

au degré de neutralisation. Pour déterminer la vitesse d'agitation dans la phase de neutralisation optimale, quelques suspensions identiques ont été neutralisées sous différentes vitesses d'agitation puis leur comportement au cours du temps ont été étudié. Il est montré que l'agitation appropriée consiste à appliquer une vitesse d'agitation de 30% de la puissance maximale (soit 1120 tours/min) pendant 1 heure pour obtenir un gel homogène et transparent. Ces suspensions sont conservées à la température locale pendant 2 jours avant l'utilisation pour atteindre l'état d'équilibre. Des suspensions initiales ont été diluées dans de l'eau distillée à différentes fractions massique pour obtenir de nouvelles suspensions de seuils d'écoulement plus faibles, tout en respectant le seuil minimum prévenant la sédimentation des éventuelles inclusions [83].

3.3.1.3 Caractéristiques rhéologiques

Magnin *et al.* dans [77, 84] ont montré que le glissement au paroi apparaît comme le phénomène le plus caractéristique du comportement des gels de Carbopol aux faibles gradients de cisaillement. Ces auteurs ont réalisé des essais avec des outils lisses (rugosité d'environ $0,1 \mu\text{m}$) et rugueux (rugosité d'environ $100 \mu\text{m}$). La contrainte de cisaillement varie très peu pour les taux de cisaillement compris entre 10^{-5} s^{-1} et 10^{-2} s^{-1} . Les mesures effectuées avec le plan lisse montrent que le glissement induit des contraintes de cisaillement plus faible que lorsqu'il y a adhérence à la paroi. Dans le cas du glissement, la déformation est complètement ou en partie localisée dans une couche très fine près de la paroi [77]. Au delà de 10^{-2} s^{-1} , les niveaux de contraintes obtenus avec des outils lisses et rugueux se rapprochent, les effets visqueux deviennent prépondérants par rapport aux effets du seuil [77]. L'explication physique du glissement repose sur la structure micronique du gel Carbopol. L'ordre de grandeur caractéristique des micros-gels qui forment le Carbopol est le micron [85]. Le glissement apparaît lorsque l'ordre de grandeur des rugosités des parois est inférieur au micron.

Il est à noter que les suspensions de Carbopol Ultrez 10 utilisées dans cette étude ne présentent ni de caractère thixotrope ni d'évolution irréversible de leur comportement contrairement aux bétons. C'est un fluide transparent non-thixotrope avec des propriétés stables dans le temps. Cela est montré par la superposition des courbes de montée et de descente obtenues à l'aide d'un viscosimètre à cylindres coaxiaux ainsi que par la superposition des courbes d'écoulement à différentes échéances (cf. Fig. 3.6). Ces courbes ont été obtenues au viscosimètre HAAKE ViscoTester VT550 équipé de cylindres coaxiaux. Les surfaces des cylindres sont couvertes de papier rugueux pour éviter le glissement aux parois. Les seuils d'écoulement des matériaux préparés sont compris entre 27 et 85 Pa, plage de seuil similaire à celle des bétons fluides modernes [86].

3.3.2 Inclusions

Nous avons décidé d'utiliser des inclusions monodisperses sphériques de concentration et de rugosité contrôlée pour représenter les plus grosses particules dans les bétons. Des billes de verres ont été choisies et la pâte granulaire modèle consiste en un mélange de billes de verre dans une suspension de Carbopol (cf. Fig. 3.7). L'utilisation des particules monodisperses de billes de verre a pour avantage de connaître non seulement la forme, la taille des particules mais aussi d'avoir un meilleur contrôle de la texture de surface. Il s'agit de billes de verre (SiLibeads, Type M, Art 5000 déposé par Sigmund Linder GmbH et fourni par SILI FRANCE) de différents diamètres ($d = 2, 3, 5$ et 7 mm). La densité des billes de verre indiquée par le fournisseur est de 2500 kg/m^3 .

3.3.2.1 Fraction volumique au repos

Un tas de grains au repos est caractérisé par sa fraction d'empilement ϕ , qui est le rapport entre le volume de grains introduits et le volume occupé par ces grains. Elle dépend de la façon dont on prépare le tas : sous vibration, par pluviation... Pour des grains parfaitement monodisperses,

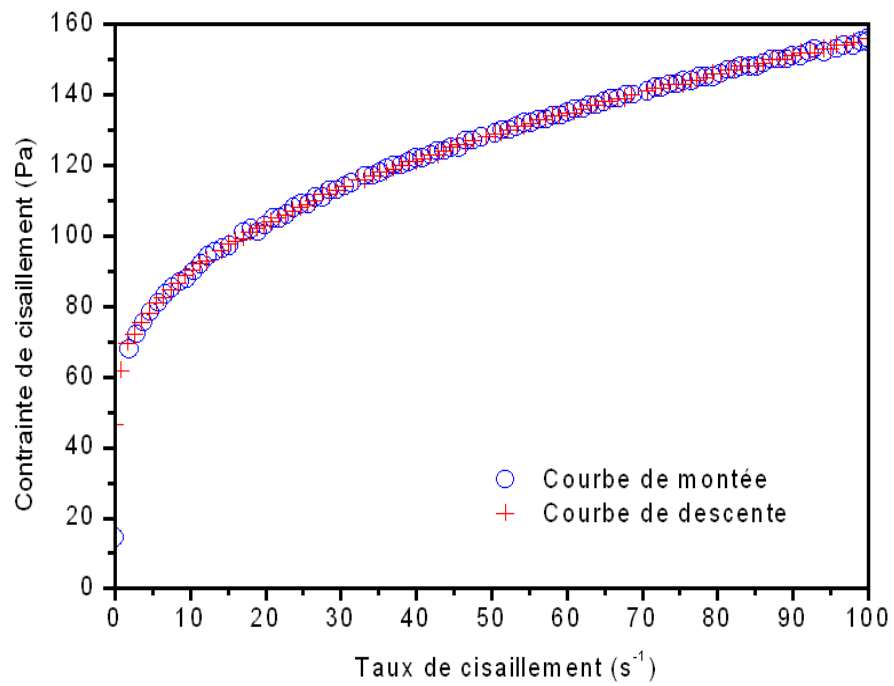


Figure 3.5: *Courbes d'écoulement à taux de cisaillement imposé en balayage croissant et décroissant*

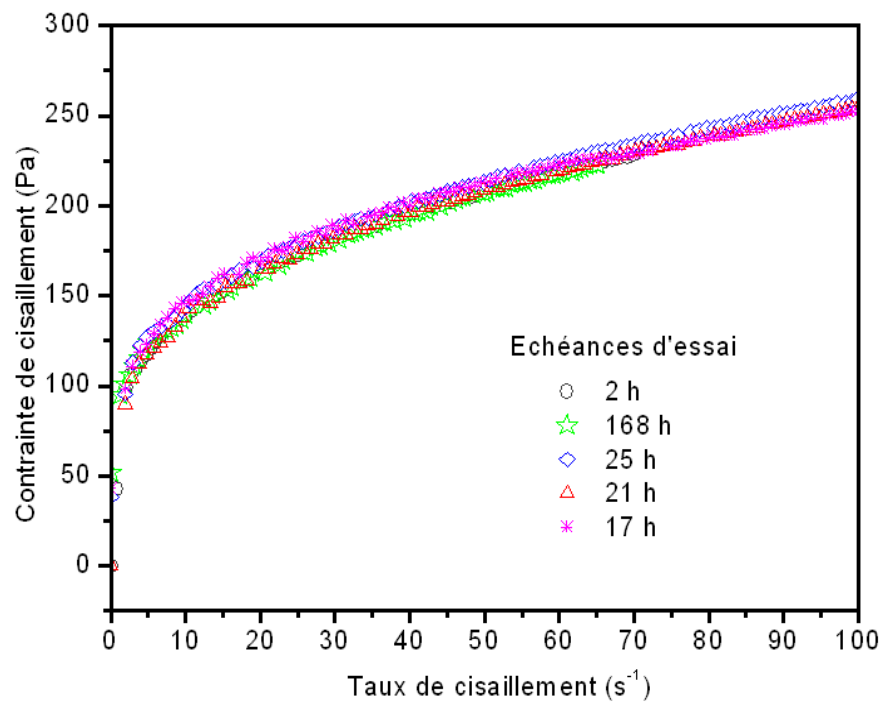


Figure 3.6: *Courbes d'écoulement à différentes échéances*

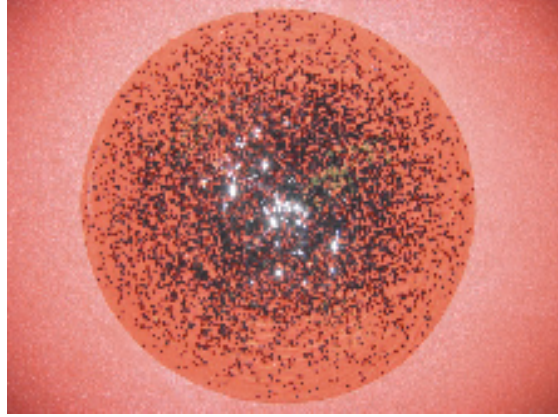


Figure 3.7: *Ecoulement d'étalement du fluide modèle chargé de bille de verre de 2mm*

l'empilement aléatoire le plus lâche qui puisse être réalisé a une fraction volumique $\phi^{\text{RLP}} \simeq 56\%$ ("random loose packing" en anglais) [87]. Si ce tas de grains est compacté, une fraction d'empilement dense aléatoire $\phi^{\text{RCP}} \simeq 64\%$ ("random close packing" en anglais) peut être atteinte [88]. De plus, à condition d'imposer une organisation aux grains par exemple l'empilement cristallin compact, cette fraction volumique peut atteindre $\phi_{\text{max}} \simeq 74\%$.

3.3.2.2 Etat de surface

Interaction pâte/granulat et Carbopol/inclusion

La pâte de ciment adhère-t-elle ou glisse-t-elle à la surface des granulats d'un béton frais ? Considérons les paramètres du problème. Concernant la pâte de ciment, le diamètre d'un grain de ciment s'étale dans la gamme de 0,4 à 100 μm pour un diamètre moyen est de l'ordre de 10 μm . Les textures d'un granulat roulé et d'un granulat concassé ont été visualisées au microscope électronique à balayage. Cette technique est utilisée couramment pour quantifier la rugosité à l'échelle du nanomètre. Nous nous sommes placés au sommet de la bille afin de mesurer la plus grande surface possible et nous permettre de caractériser de manière quantitative l'état de surface des billes. De façon générale, une texture peut être caractérisée par la répétition d'un motif avec des variations aléatoires. La taille des défauts (des motifs) identifiée est de l'ordre de 30 μm pour un granulat concassé (cf. Fig. 3.8) et de 10 à 20 μm pour un granulat roulé (cf. Fig. 3.9), donc de l'ordre de grandeur de la taille moyenne des grains de ciment. À cette échelle, en admettant que la pâte de ciment est homogène et que les grains de granulats sont immergés dans la pâte de ciment qui s'écoule et qui entraîne les grains à déplacer, une adhérence entre les éléments constitutifs de la pâte de ciment et la surface des granulats devrait avoir lieu selon les critères ci-dessus.

Rappelons que des mélanges de billes avec un fluide porteur de Carbopol ont été choisis pour étudier expérimentalement la ségrégation des bétons en écoulement et le blocage des granulats au passage des barres d'acier. En conséquence, il faut d'une part que les billes soient entraînées par la pâte comme le sont les granulats, ce qui implique que les billes doivent présenter une rugosité suffisante. D'autre part, le blocage dépend du coefficient de friction entre grains. Une augmentation de la rugosité de surface, qui se traduit d'un point de vue tribologique par une augmentation du coefficient de friction, entraîne une forte diminution de la contrainte critique d'encombrement et donc favorise le blocage de la suspension. Par ailleurs, du fait de la rugosité des particules, tout se passe comme s'il restait toujours sur la surface des billes au minimum une couche de fluide d'épaisseur de l'ordre de la rugosité moyenne des particules. La rugosité de surface ne modifie pas uniquement l'hydrodynamique du fluide l'entourant, mais peut aussi entraîner une asymétrie dans

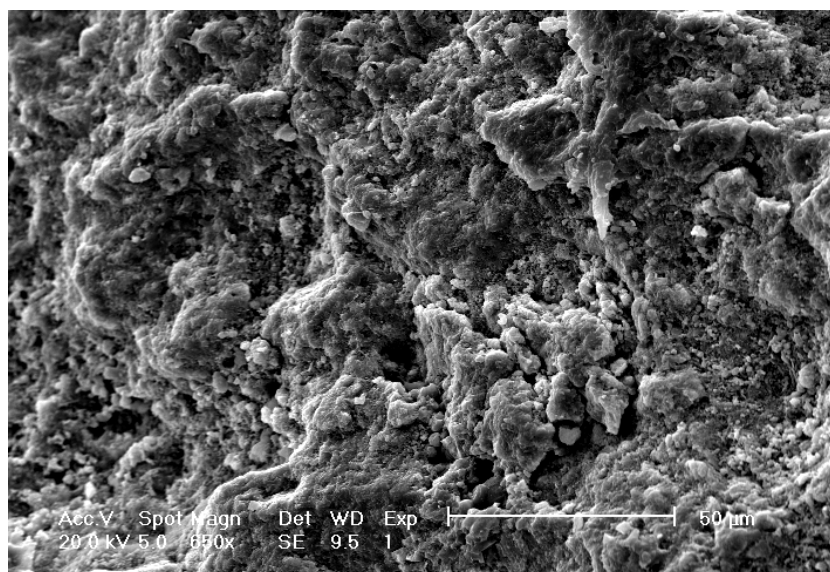


Figure 3.8: Surface d'un granulat concassé vue au MEB-Echelle d'observation 50 μ m

les interactions interparticulaires et mener à des pressions de contact local proches des aspérités, où la couche de fluide n'est pas assez épaisse pour séparer les surfaces en contact.

Revenons maintenant au matériau modèle, l'état de surface d'une bille de verre a été également étudié au microscope électronique à balayage. A une même échelle d'observation de 50 μ m, la bille est presque lisse sauf quelques défauts du vernis de protection (cf. Fig.3.10). Puisque la taille des éléments constitutifs des suspensions de Carbopol étant de l'ordre de la dizaine de microns (voir la section 3.3.1), il est légitime de, pour assurer une bonne adhérence bille-carbopol, de créer sur les billes de verre une texture suffisante.

Modification de l'état de surface des billes

Une technique d'abrasion utilisant poudres abrasives en carbure de silicium a été appliquée sur les billes lisses afin de modifier mécaniquement la rugosité de nos particules. Souvent appelé «carborundum», le carbure de silicium est un des abrasifs artificiels les plus durs. Le carbure de silicium appartient à la famille des abrasifs angulaires (sable de sablage/fine de verre/corindon/grenaille métallique etc.) : pour créer une rugosité, ces particules arrachent de la matière à la surface de la pièce traitée. La rugosité obtenue par abrasion est liée à la granulométrie de l'abrasif et aussi à la quantité de particules abrasives utilisées. Afin de trouver un processus approprié permettant une rugosité attendue, plusieurs essais ont été réalisés avec différentes tailles de poudres abrasives et différentes teneurs en poudres. Une quantité de billes lisses a été mélangée avec de l'eau et des poudres abrasives pour un certain rapport de masse. Le mélange a été mis en rotation pendant un temps variable puis les billes sont enlevées, séparées des poudres et lavées à l'ultrason puis séchées. Quelques billes ont ensuite été choisies pour une caractérisation de l'état de surface au microscope électronique à balayage. La figure 3.11 récapitule l'état de surface des billes abrasées selon différents processus d'abrasion. Nous voyons également que l'état de surface est plus "accidenté" après l'attaque mécanique. Les premières figures 3.11a (poudre abrasive de 2 mm) et 3.11b (poudre abrasive de 37 μ m) représentent le cas où une quantité de billes de 5 mm a été mise en présence de poudres abrasives dans un rapport massique abrasifs/billes de 1/10. L'état de surface de la bille n'est pas encore homogène dans ces deux cas, ou le nombre des grains de carbure de silicium n'est pas suffisamment nombreux pour assurer un attaque homogène. L'intensité des défauts de texture augmente visiblement avec la masse du carbure de silicium (cf. Fig. 3.11c et 3.11d), mais la taille moyenne des défauts est très différente dans les deux cas et dépendante de celle des grains abra-

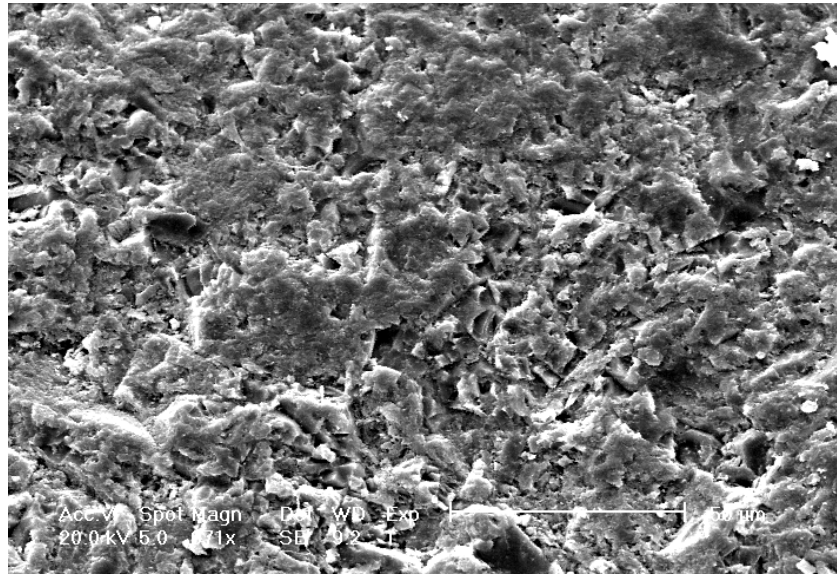


Figure 3.9: *Surface d'un granulat roulé vue au MEB-Echelle d'observation 50μm*

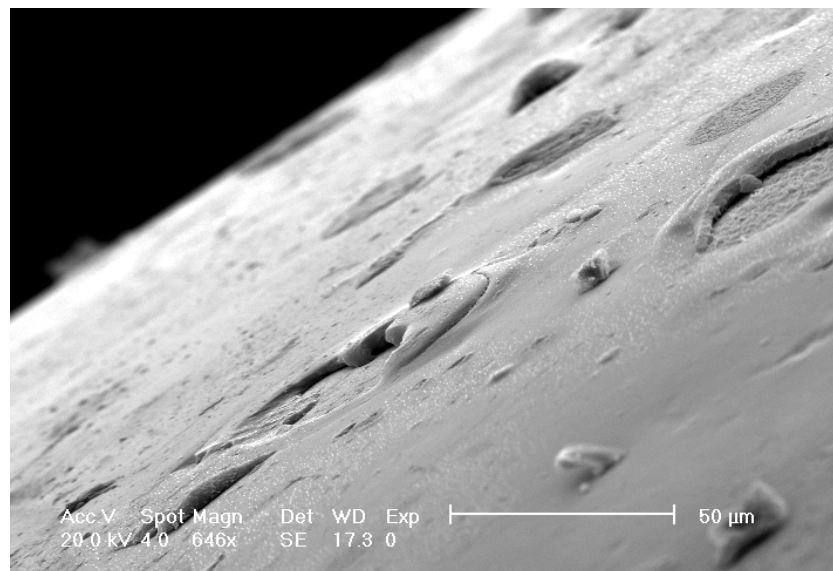


Figure 3.10: *Surface d'une bille lisse observée au MEB à l'échelle d'observation 50μm*

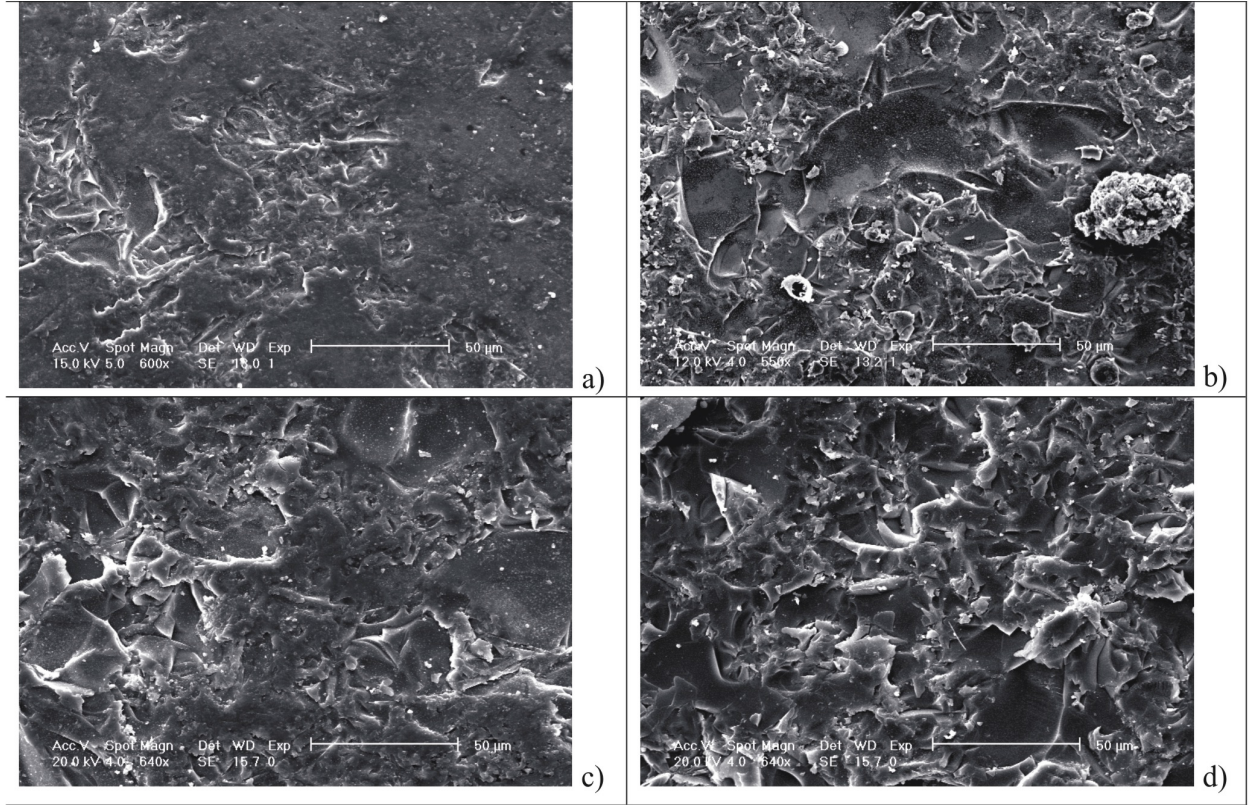


Figure 3.11: Surface d'une bille après différents processus d'abrasion. a) $d_{carbure} = 2\text{mm}$, $r_{ab} = m_{carbure}/m_{bille} = 0,1$, $t_{abrasion} = 2h$; b) $d_{carbure} = 37\mu\text{m}$, $r_{ab} = 0,1$, $t_{abrasion} = 2h$; c) $d_{carbure} = 2\text{mm}$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$; d) $d_{carbure} = 37\mu\text{m}$, $r_{ab} = 0,5$, $t_{abrasion} = 2h$

sifs. De plus, si les petits grains de $37\mu\text{m}$ donnent un état de surface plutôt homogène, les coups d'attaque provoqués par les gros grains de 2mm sont très aléatoires.

Deux traitements successifs avec deux tailles de poudres abrasives différentes ont donc été nécessaires pour produire un mariage de petits défauts homogènes avec de grands défauts aléatoires, ce qui s'approche le plus de l'état de surface des granulats réels des bétons (cf. Fig. 3.8 et 3.9). Nous avons ensuite testé un processus d'abrasion en deux étapes : attaque par petits grains ($r_{ab} = 0,5$) pendant 2h puis par gros grains ($r_{ab} = 0,5$) pendant 1h . Les figures 3.12 et 3.13 représentent l'état de surface et le relief d'une bille de 5mm après avoir été abrasées selon ce processus. La rugosité de la surface des billes abrasées caractérisée au microscope électrique est de l'ordre de $20 - 30\mu\text{m}$ ce qui permet l'adhérence de ces billes avec les suspensions de Carbopol.

3.3.3 Sédimentation des inclusions

Puisqu'il existe aucun outil de prédiction de l'ouvrabilité d'un béton frais en fonction des paramètres d'entrée tels que la forme de l'élément de structure, l'espacement des barres d'acier et la méthode de mise en œuvre retenue, la meilleure manière pour garantir un bon remplissage est d'utiliser un béton très fluide, ce qui revient à l'élaboration des BAP. Or, nous avons montré que le béton est un matériau multiphasique contenant des composants de différentes densités : la densité varie de 1000kg/m^3 (eau) à 3200kg/m^3 (ciment). Cette hétérogénéité induite par la densité implique de différentes résistances des composants à la gravité : les particules les plus grossières ($> 1\mu\text{m}$ selon [22]) peuvent sédimenter et accumuler dans la partie plus basse de la géométrie d'écoulement. La

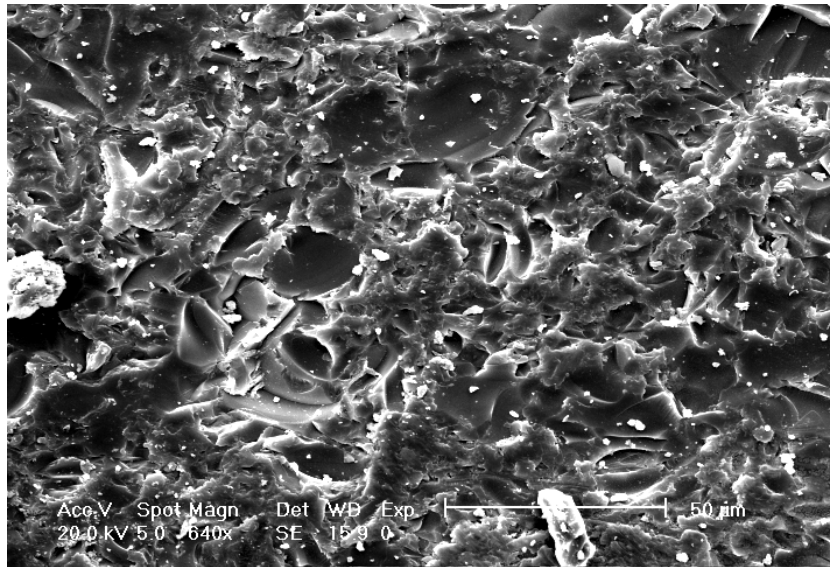


Figure 3.12: Surface d'une bille après abrasion de double processus avec $d_{\text{carbure}} = 37\mu\text{m}$, $r_{\text{ab}} = 0,5$, $t_{\text{abrasion}} = 2h$ puis $d_{\text{carbure}} = 2\text{mm}$, $r_{\text{ab}} = 0,5$, $t_{\text{abrasion}} = 1h$. Vue au MEB à 'échelle d'observation de $50\mu\text{m}$

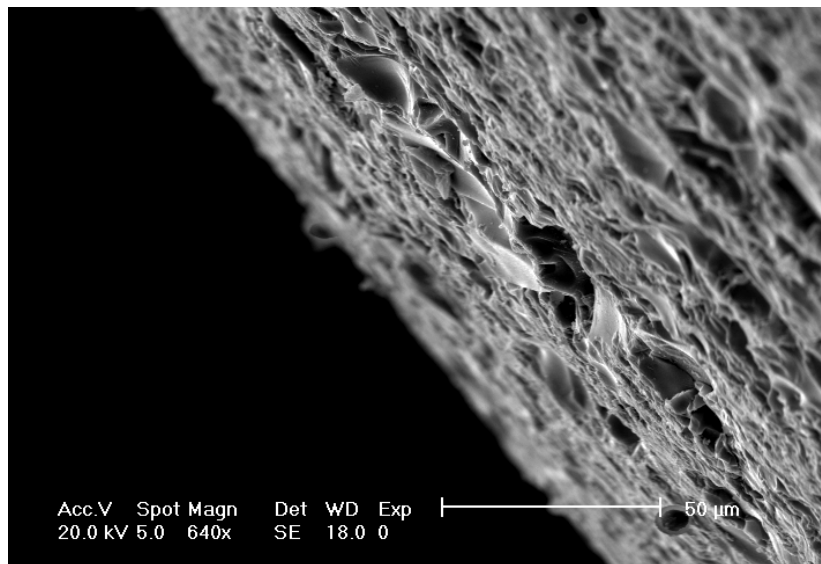


Figure 3.13: Relief d'une bille après abrasion de double processus avec $d_{\text{carbure}} = 37\mu\text{m}$, $r_{\text{ab}} = 0,5$, $t_{\text{abrasion}} = 2h$ puis $d_{\text{carbure}} = 2\text{mm}$, $r_{\text{ab}} = 0,5$, $t_{\text{abrasion}} = 1h$. Vue au MEB-Echelle d'observation $50\mu\text{m}$

vitesse de sédimentation dépend de la taille de la particule. La sédimentation est accentuée par un faible seuil d'écoulement de la pâte de ciment, d'où vient l'opposition de l'abaissement du seuil de la pâte et de la stabilité du mélange.

Il existe dans la littérature de nombreuses corrélation entre le comportement rhéologique du béton et sa stabilité [74, 75, 89, 90, 91, 92] dont la plupart des travaux est basée sur la considération d'un matériau biphasique constituant des particules immergées dans un fluide porteur (cf. section 2.2.2). Roussel a constaté dans [83] que le seuil du béton ne joue aucun rôle sur la stabilité des inclusions mais cette dernière est conditionnée par le comportement rhéologique du fluide portant et par les caractéristiques des inclusions. Il a proposé dans le même article deux critères de stabilité de sphères monodisperses non colloïdales dans un fluide à seuil devant la gravité, qui peuvent être appliqués pour étudier la stabilité du sable dans une pâte de ciment ou celle des granulats dans un mortier :

- Les particules doivent avoir un diamètre d_0 inférieur à un diamètre critique d_{0c} . Si $d_0 > d_{0c}$ ce diamètre critique a pour l'expression :

$$d_{0c} = \frac{18\tau_0}{|\rho_s - \rho_f|g} \quad (3.1)$$

où ρ_s et ρ_f sont respectivement la masse volumique du sphère et du fluide porteur. Cela signifie que pour une suspension donnée, si les interactions entre particules ou un effet réseau [86] sont négligés, des petites particules seront stables alors que celles plus grosses sédimenteront.

- La concentration des particules en solution doit être supérieure à une valeur critique ϕ_c . Il faut que leur concentration soit suffisante pour que les particules puissent former un réseau tridimensionnel rigide. Cette structure est stable si les forces visqueuses (régime de lubrification) entre les particules sont supérieures à la force de gravité qui s'exerce sur elles. Cette concentration critique est calculée selon la relation suivante :

$$\phi_c \geq \phi_{\max} \left(\frac{9\tau_0}{2|\rho_s - \rho_f|d_0g} + 1 \right)^{-3} \quad (3.2)$$

De nombreuses approches décrivant la sédimentation d'une sphère dans un fluide à seuil peuvent être trouvées dans la littérature. Des revues très complètes ainsi que leur comparaison avec le premier critère 3.1 ont été réalisées par Roussel [83]. Il est intéressant de noter que deuxième critère est l'approche analytique unique pour vérifier la stabilité d'une suspension contenant des inclusions.

Les critères 3.1 et 3.2 ont été validés par les résultats expérimentaux obtenus sur des mélanges de billes de polystyrènes dans des pâtes de ciment [83]. Il est donc possible d'éviter ou de limiter la sédimentation d'une suspension de particules non colloïdales en ajustant leur densité avec celle du milieu dispersant, en augmentant le seuil d'écoulement du fluide porteur ou en augmentant la concentration en particules. La construction d'un système modèle de particules de billes de verre sphériques, monodisperses, de la taille millimétrique dans suspension de Carbopol est donc viable pour la modélisation du comportement de bétons frais stables. Dans la suite de ce travail, dans les essais expérimentaux réalisés sur des matériaux contenant des inclusions, les critères de stabilité 3.1 et 3.2 seront vérifiés lors de la phase de formulation.

3.3.4 Seuil d'écoulement du mélange

Le seuil d'écoulement est une caractéristique intrinsèque prépondérante des mélanges. Comme nous avons vu dans la section 2.2.3, le comportement de fluide à seuil du béton peut entraîner des problèmes néfastes sur la mise en œuvre sur chantier. Dans la phase de caractérisation du matériau

modèle, nous nous intéressons à l'évolution du seuil d'écoulement des mélanges Carbopol - billes de verre en fonction des caractéristiques du fluide portant (seuil du Carbopol) et des inclusions (taille et concentration des billes).

3.3.4.1 Etat de l'art

Ces dernières années, des études sur l'évolution de la viscosité d'un mélange en fonction de ses composants ont été effectuées sur des matériaux modèles et réels [47]. Coussot et Ancey [4] ont montré comment évaluer la viscosité d'une suspension en fonction de la concentration et de la distribution granulométrique des inclusions. En pratique, si l'on a affaire à une suspension concentrée de particules de différentes tailles, les mouvements relatifs des particules induisent des écoulements locaux du fluide qui augmentent la dissipation énergétique et donc la viscosité de la suspension.

Lorsque la concentration solide est faible ($< 10\%$), les particules dans une suspension monodisperse sont éloignées les unes des autres. La viscosité effective d'une telle suspension obéit à la relation d'Einstein :

$$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + 2,5\phi \quad (3.3)$$

où μ_f est la viscosité du fluide porteur. L'expression d'Einstein n'est plus valable lorsque deux sphères sont assez proches pour que la traînée de l'une d'entre elles influence le mouvement de la sphère voisine. Ces interactions hydrodynamiques entre deux sphères sont responsables de la relation de proportionnalité de la viscosité avec le carré de la fraction volumique ϕ^2 . Des interactions hydrodynamiques à trois corps produisent un terme en ϕ^3 et ainsi de suite. Lorsque la concentration augmente, le terme de plus haut ordre devient important du fait des interactions à plusieurs particules. Batchelor [93] donne une expression de la viscosité relative qui est correcte pour des fractions volumiques inférieures à 10% :

$$\frac{\mu}{\mu_f} = 1 + 2,5\phi + 6,2\phi^2 \quad (3.4)$$

La viscosité diverge au fur et à mesure que ϕ se rapproche de la fraction volumique de l'empilement compact désordonné $\phi_{\max}$. L'expression empirique la plus utilisée pour la viscosité dans le cas de suspensions fortement concentrées est celle de Krieger-Dougherty [48] :

$$\frac{\mu}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\max}}\right)^{-[\eta]\phi_{\max}} \quad (3.5)$$

où $[\eta]$ est la viscosité «intrinsèque» de la suspension. Pour les sphères $[\eta] = 2,5$.

Cependant, l'influence de la composition de la suspension sur son seuil d'écoulement n'a pas encore fait l'objet d'études poussées. Ce sujet fait récemment l'objet d'une thèse au Laboratoire des Matériaux et des Structures du Génie Civil (LMSGC). Il s'agit d'étudier l'évolution du comportement de matériaux pâteux modèles (fluide à seuil, fluide thixotrope) en fonction de l'ajout de particules.

Une autre piste pour modéliser le comportement d'un mélange biphasique consiste à un raisonnement d'homogénéisation en calcul à la rupture, ce qui fait l'objet de la thèse de Kien LUU TRUNG au LMSGC. Cette approche [94] permet de caractériser les capacités de résistance macroscopique d'un matériau hétérogène à partir d'une description géométrique des inclusions (considérées infiniment résistants et indéformables), des caractéristiques mécaniques du fluide (seuil d'écoulement) et d'une caractérisation des interactions entre les différents constituants (frottement intergranulaire, capacité de résistance des interfaces fluide - particules). A l'échelle macroscopique, la suspension

se comporte comme un fluide d'Herschel-Bulkey de même indice que celui du fluide porteur et de contrainte seuil définie par :

$$\frac{\tau_0^{mél}}{\tau_0^f} = \sqrt{(1 - \phi) g(\phi)} \quad (3.6)$$

avec $\tau_0^{mél}$ et τ_0^f respectivement le seuil d'écoulement du mélange et du fluide porteur ; $g(\phi)$ une fonction de la concentration volumique en inclusions définie par :

$$\mu^{\text{hom}} = \mu_f g(\phi) \quad (3.7)$$

et μ^{hom} la viscosité d'un mélange constitué de particules sphériques monodisperses et d'un fluide visqueux Newtonien de viscosité μ_f . Pour des mélanges dilués, cette fonction peut être celle de la relation 3.3 d'Einstein. En reportant cette relation dans l'équation 3.6 et en ne conservant que les termes du premier ordre, l'expression du seuil d'écoulement du mélange devient :

$$\frac{\tau_0^{mél}}{\tau_0^f} = 1 + \frac{3}{4}\phi \quad (3.8)$$

Pour les mélanges plus concentrés en inclusions, la relation 3.5 de Krieger-Dougherty sera préférable, nous obtenons alors :

$$\frac{\tau_0^{mél}}{\tau_0^f} = \sqrt{(1 - \phi) \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{\text{max}}}\right)^{-2,5\phi_{\text{max}}}} \quad (3.9)$$

Pour plus de détails sur les procédures d'homogénéisation, le lecteur pourra se référer à [94].

3.3.4.2 Etudes expérimentales

Les billes abrasées sont soigneusement lavées dans un bain à ultrasons pour enlever les résidus de surfactant employés lors des processus de fabrication et d'abrasion et éviter des modifications physico-chimique du Carbopol lors des contacts bille - Carbopol. Le mélange est préparé par mélange manuel des billes et de la suspension de Carbopol. Les échantillons sont tous préparés de la même manière.

Le seuil d'écoulement de ces mélanges peut être mesuré expérimentalement au rhéomètre avec géométrie vane (la taille de la bille la plus grosse satisfait encore les conditions de continuité (concernant l'entrefer) et de représentativité). Le seuil d'écoulement est mesuré au viscosimètre à vitesse imposée (Haake VT550) équipé par une géométrie vane FL10 (diamètre = 40 mm, hauteur = 60 mm). Toutes les mesures rhéologiques ont été réalisées suivant la procédure décrite par Nguyen et Boger [95] avec une vitesse de rotation de 0,4 rad.min⁻¹.

Le seuil d'écoulement des mélanges granulaires modèles est affecté par la taille des billes, leur concentration volumique ainsi que le seuil du fluide suspendant. Le programme expérimental défini sur des mélanges granulaires doit en particulier permettre l'étude de l'influence de chacun de ces paramètres sur le seuil d'écoulement des mélanges. Les résultats obtenus sont présentés ici et l'influence de la fraction volumique solide en inclusions sur les propriétés rhéologiques est étudiée.

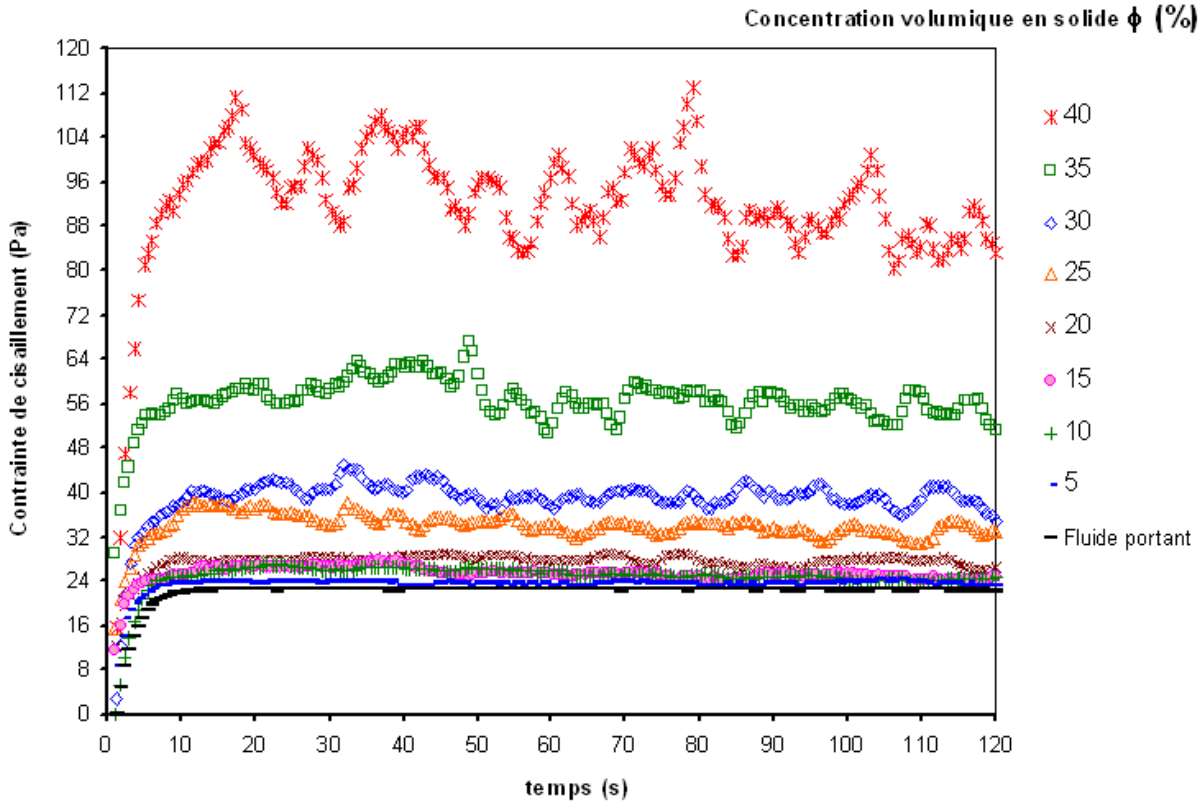


Figure 3.14: Evolution des rhéogrammes "contrainte de cisaillement-temps" en fonction de la concentration volumique en bille des mélanges.

3.3.4.3 Résultats et discussions

La figure 3.14 représente par exemple les rhéogrammes des essais réalisés sur différents mélanges dont le fluide suspendant présentait un seuil de 20 Pa, la concentration volumique en billes de 5 mm varie de 0 à 40% par incrément de 5%. Lorsque la concentration solide est faible (inférieure à environ 20%), les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres. Avec l'augmentation de la concentration en solides, les interactions hydrodynamiques se développent, les perturbations du champ des déformations induites par la présence d'une particule ne sont plus négligeables aux environs des particules voisines. Lorsque la concentration volumique en solides tend vers une valeur critique ($\phi_{\max} = 0,4$), de fortes perturbations peuvent être observées (cf. Fig.3.14), le comportement du mélange s'approche de celui d'un matériau granulaire. Les particules forment un réseau granulaire et se gênent, il n'est plus possible de déplacer une particule sans déplacer les autres.

L'influence de l'état de surface des inclusions sur le seuil d'écoulement du mélange peut être mise en évidence. Celle-ci est évaluée par l'intermédiaire d'un terme "seuil réduit" qui est le rapport du seuil d'écoulement du mélange granulaire sur celui du fluide suspendant. La figure 3.15 représente les valeurs de seuil réduit mesurées à conditions expérimentales identiques (même fluide suspendant, même taille de bille, même concentrations volumique) dans les cas de bille lisse et bille rugueuse. Pour une même fraction volumique, l'influence de la présence des billes rugueuses sur l'écoulement est beaucoup plus importante que celle des billes lisses. L'influence est d'autant plus évidente que la concentration volumique des billes est grande. L'état de surface des particules a donc des conséquences importantes sur le seuil d'écoulement. Nous pouvons donc nous intéresser de plus près à l'effet de l'état de surface sur les propriétés d'écoulement des suspensions.

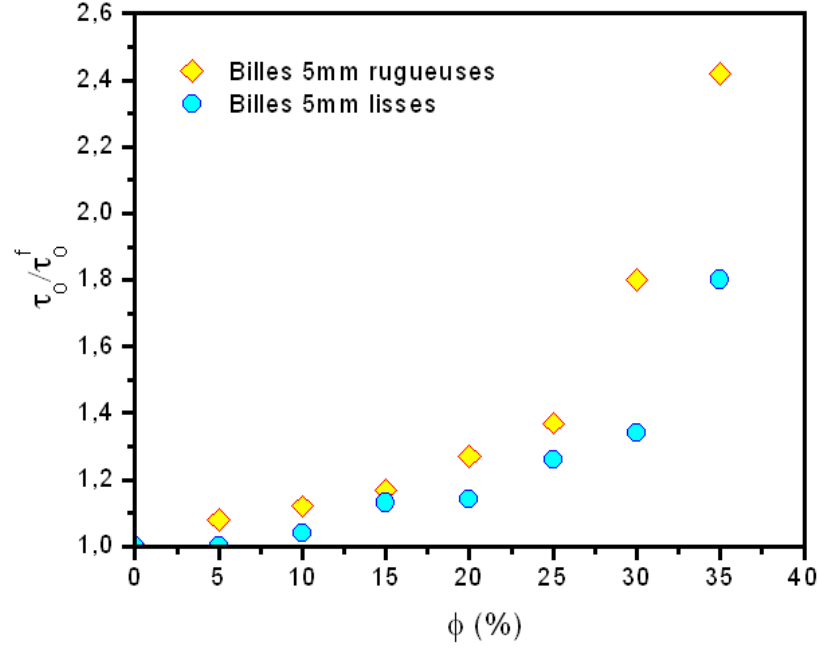


Figure 3.15: Influence de l'état de surface des inclusions sur le seuil du mélange

La figure 3.16 récapitule les valeurs de seuil réduit mesurées sur des mélanges granulaires chargés des billes de 5mm rugueuses à des valeurs de concentrations volumiques identiques mais pour un seuil de fluide suspendant variable. Il apparaît clairement sur cette figure que l'influence de la présence des inclusions sur le seuil du mélange est d'autant plus évidente que le fluide portant est fluide. Il est à noter que, dans tous les mesures expérimentales, aucune ségrégation n'apparaît, même dans les conditions expérimentales extrêmes (*i.e.* fluide suspendant de faible valeur de seuil avec concentration en particule faible).

L'effet de la taille des inclusions sur le seuil d'écoulement du mélange est illustré dans la figure 3.17. A titre d'exemple, la prédiction des équations 3.8 et 3.9 avec $\phi_{\max} = 60\%$ sont aussi représentée. Les billes rugueuses de 2, 3, 5 et 7 mm de diamètre ont été étudiées avec un même fluide suspendant de seuil d'écoulement 40 Pa. Le seuil d'écoulement des mélanges est modifié dans le sens attendu : une augmentation de la concentration volumique des inclusions provoque une évolution croissante du seuil du mélange. Cependant, il est incontestable que ces mélanges granulaires évoluent différemment, notamment dans les cas des grosses billes (5 et 7 mm). Plus étonnamment, les billes de 80 μm engendre une évolution complètement différente par rapport aux billes millimétriques : la présence de ces petites billes n'a une influence positive sur le seuil du mélange qu'au delà d'une concentration volumique de 25%.

Ce programme expérimental a permis d'identifier le lien entre le comportement rhéologique d'un mélange et celui de son fluide portant et de ses inclusions (non colloïdales). Nous avons mis en évidence que le seuil d'un mélange est une fonction croissante de la rugosité des inclusions (cf. Fig. 3.15), du seuil d'écoulement du fluide porteur (cf. Fig. 3.16) et de la fraction volumique solide d'inclusions (cf. Fig. 3.17). Il semble possible de prédire le seuil de tels mélanges mais nous nous sommes cependant limités ici à la présentation des principales tendances observées. Nous apercevons que l'emploi du modèle d'Einstein ne peut que prédire l'évolution du comportement des mélanges dilués ($\phi \leq 20\%$). L'approche d'homogénéisation utilisant le modèle Krieger-Dougherty permet de simuler des mélanges plus concentrés, elle est cependant incapable de tenir en compte de l'influence de la taille des particules.

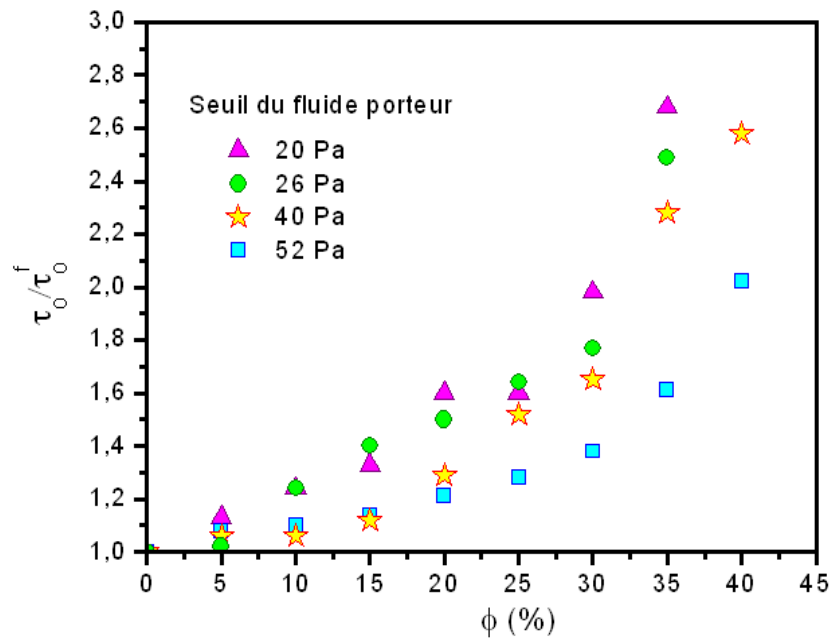


Figure 3.16: Influence du seuil du fluide suspendant sur le seuil du mélange

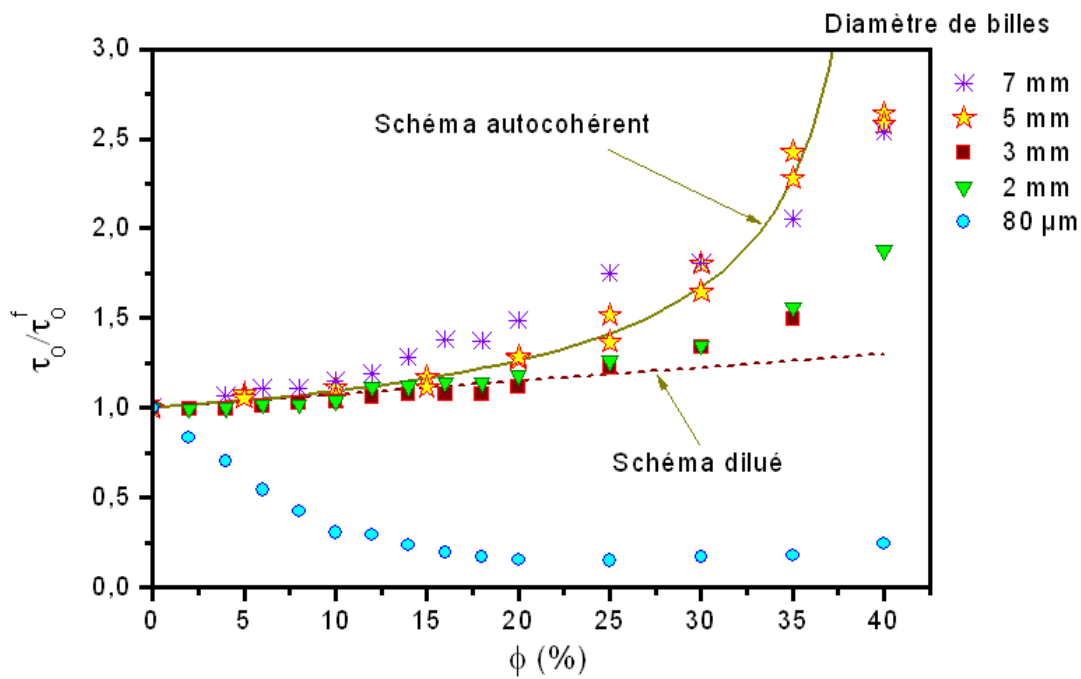


Figure 3.17: Influence de la taille (donc de la surface spécifique) des inclusions sur le seuil du mélange

Nous sommes désormais à même de connaître en toutes circonstances les caractéristiques du matériau modèle que nous utilisons par la suite qu'il contienne ou non des inclusions. Ceci nous permettra de faire la distinction entre l'effet du seuil du mélange et d'éventuels effets additionnels (ségrégation, blocage, etc.) dus aux particules.

Chapitre 4

Mise en œuvre du béton : Ecoulement d'un fluide à seuil homogène

Sommaire

4.1	Fluide à seuil homogène en canal horizontal	44
4.1.1	Ecoulement d'étalement d'un fluide à seuil	44
4.1.2	Etude analytique de l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil en canal	44
4.1.2.1	Cas a : $L < L_0$	45
4.1.2.2	Cas b : $L = L_0$	46
4.1.3	Influences de l'inertie et de la tension superficielle	48
4.1.3.1	Effet de l'inertie et vitesse de l'écoulement	48
4.1.3.2	Effet de la tension superficielle	48
4.2	Simulations numériques	49
4.2.1	Méthodes existantes	49
4.2.2	Simulations par FLOW3D [®]	49
4.3	Etudes expérimentales	50
4.3.1	Matériaux et matériels	50
4.3.2	Protocoles d'essai	50
4.4	Résultats et discussions	51

Nous avons vu précédemment (cf. section 2.2.3) que la mise en œuvre du béton dans un coffrage peut être décrit comme l'écoulement à surface libre d'un fluide à seuil contenant des inclusions solides passant à travers des barres d'acier. Nous écartons dans un premier temps la présence des inclusions et donc tout problème de sédimentation et de blocage au niveau des barres, nous cherchons à comprendre, dans ce chapitre, comment un béton frais peut s'arrêter de s'écouler dans le coffrage. A partir de là, nous cherchons à prédire cet arrêt en fonction de paramètres d'entrée concernant le matériau et la géométrie. Pour ce faire, nous proposons une corrélation théorique entre la forme à l'arrêt d'un fluide à seuil homogène en canal horizontal non ferrailé et les caractéristiques rhéologiques de ce dernier, *i.e.* le seuil d'écoulement, puis nous comparons cette solution théorique avec des mesures expérimentales. Ce travail a fait l'objet d'une publication [96] dont nous détaillons le contenu dans ce chapitre.

4.1 Fluide à seuil homogène en canal horizontal

4.1.1 Ecoulement d'étalement d'un fluide à seuil

Dans la phase de mise en œuvre dans un coffrage, le béton est soumis à son propre poids et peut s'écouler sous l'effet des contraintes résultantes. Lorsque la contrainte générée est supérieure au seuil, l'écoulement peut démarrer. Pendant la mise en œuvre, si nous supposons que l'inertie de l'écoulement est négligeable, l'épaisseur de matériau et donc la contrainte générée par la gravité diminuent. Si la contrainte générée par la gravité n'est plus suffisante pour dépasser le seuil de contrainte, l'écoulement s'arrête. Si la contrainte générée reste supérieure au seuil, l'écoulement se poursuit.

Il est nécessaire ici de rentrer plus en détail dans la notion de contrainte générée par la gravité. Celle-ci est liée à la hauteur de la colonne de matériau au dessus du point considéré. La contrainte utilisée pour décrire le démarrage ou l'arrêt de l'écoulement est la contrainte la plus élevée au sein de l'échantillon déformé et est donc située au fond du coffrage. Elle décroît avec l'altitude du point considéré pour atteindre une valeur nulle à la surface libre de l'écoulement. Ainsi, au fond du coffrage, l'écoulement peut avoir lieu si la contrainte y est supérieure au seuil de contrainte mais il peut exister toute une zone dans la partie supérieure de l'échantillon dans laquelle la contrainte générée, plus faible, reste inférieure au seuil du matériau et n'est donc pas déformée. C'est sur cette décomposition que s'est basé Murata [97] pour relier l'affaissement S dans l'essai d'affaissement (cf. section 2.2.4.2) au seuil du matériau τ_0 . Dans la partie cisailée, l'écoulement se poursuit jusqu'à ce que la contrainte de cisaillement y soit égale au seuil alors que la partie supérieure reste non déformée.

4.1.2 Etude analytique de l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil en canal

Considérons que le matériau testé est homogène et reste homogène au cours du temps. Il est à noter que nous nous intéressons seulement à l'état à l'arrêt de l'écoulement. Au contact avec les parois (le fond et les parois latérales), le tenseur des contraintes se simplifie en un scalaire : une contrainte de cisaillement. En supposant que le matériau adhère au fond du canal, au moment de l'arrêt, la contrainte de cisaillement exercée sur la couche limite atteint la valeur de seuil du matériau. Isolons un volume parallélépipédique (cf. Fig. 4.1). Le bilan de l'équilibre des forces peut être écrit. Il relie la masse volumique ρ , le seuil d'écoulement du matériau τ_0 , l'épaisseur $h(x)$ de l'écoulement à l'arrêt à une abscisse x et la largeur l_0 du canal :

$$\rho g h(x) \frac{dh(x)}{dx} = -\tau_0 - 2\lambda \tau_0 \frac{h(x)}{l_0} \quad (4.1)$$

où λ est un coefficient dépendant de l'adhérence du matériau aux parois latérales. λ tends vers zéro lorsque le matériau n'adhère pas aux parois, le bilan de forces 4.1 devient dans ce cas :

$$\rho g h(x) \frac{dh(x)}{dx} = -\tau_0 \quad (4.2)$$

Cette relation est similaire à la relation obtenue pour un écoulement d'étalement axisymétrique [98]. Pour simplifier la présentation, l'épaisseur de l'écoulement à l'arrêt à une abscisse x sera désormais désignée h au lieu de $h(x)$.

En posant $A = \frac{2\tau_0}{\rho g l_0}$ et $u = \frac{2h}{l_0}$, l'intégration de 4.2 nous donne :

$$\frac{u}{1 + \lambda u} \frac{du}{dx} = -\frac{2A}{l_0} \quad (4.3)$$

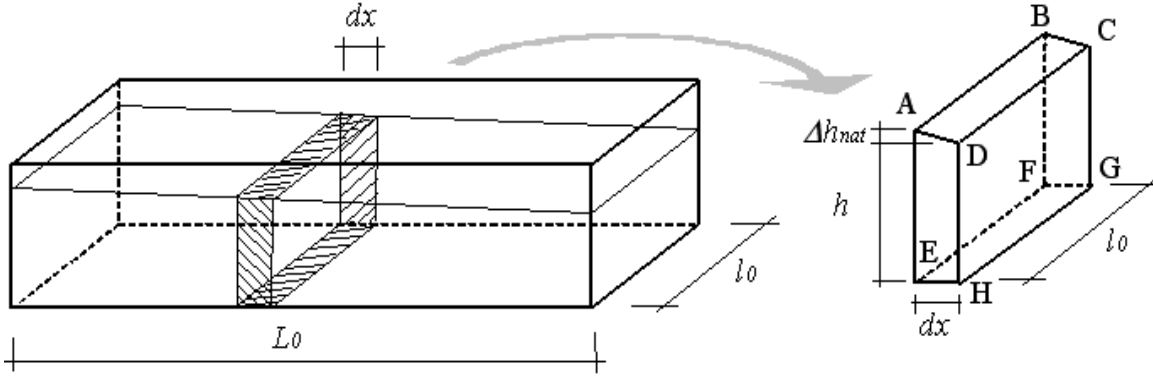


Figure 4.1: *Élément de matériau à l'équilibre. Les surfaces ADHE et BCGF sont en contact avec les parois latérales et la surface EFGH est en contact avec le fond rugueux du canal.*

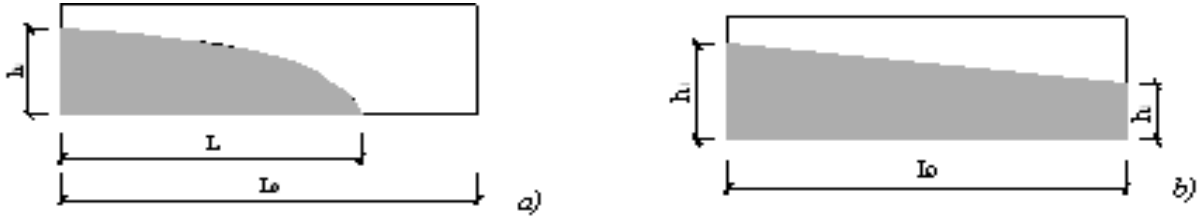


Figure 4.2: *Écoulement en canal ; a) Cas $L < L_0$; b) Cas $L = L_0$*

La solution de cette équation différentielle s'écrit :

$$u_1 - u + \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{1 + \lambda u}{1 + \lambda u_1} \right) = \frac{2A\lambda x}{l_0} \quad (4.4)$$

Elle peut plus préférentiellement être mises sous la forme :

$$h_1 - h + \frac{l_0}{2\lambda} \ln \left(\frac{l_0 + 2\lambda h}{l_0 + 2\lambda h_1} \right) = A\lambda x \quad (4.5)$$

où h_1 est l'épaisseur du matériau à l'arrêt à $x = 0$ et $u_1 = \frac{2h_1}{l_0}$.

Ici, selon le volume et le seuil d'écoulement du matériau testé, deux cas peuvent être observés : la longueur de l'écoulement peut être inférieure ($L < L_0$) (Fig. 4.2a) ou égale à la longueur du canal ($L = L_0$) (Fig. 4.2b).

4.1.2.1 Cas a : $L < L_0$

Le volume de l'échantillon se calcule :

$$\Omega = l_0 \int_0^{h_1} x dh = \frac{l_0^3}{4\lambda^2 A} \left[\frac{2h_1}{l_0} \left(\frac{\lambda h_1}{l_0} - 1 \right) + \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\lambda h_1}{l_0} \right) \right] \quad (4.6)$$

Cette équation permet de corréler le volume Ω de l'échantillon avec l'épaisseur h_1 du matériau à $x = 0$, ainsi qu'avec le seuil du matériau. Lorsque λ tend vers 0 (le matériau n'adhère pas aux parois), cette équation devient :

$$\Omega = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{l_0^3}{4\lambda^2 A} \left[\frac{2h_1}{l_0} \left(\frac{\lambda h_1}{l_0} - 1 \right) + \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\lambda h_1}{l_0} \right) \right] = \frac{2}{3} \frac{h_1^3}{A} \quad (4.7)$$

Sachant que nous avons dans ce cas $h_2 = 0$ pour $x = L$. En reportant dans l'équation 4.5, nous obtenons l'expression suivante pour calculer la longueur de l'écoulement à l'arrêt :

$$L = \frac{h_1}{\lambda A} + \frac{1}{\lambda^2} \frac{l_0}{2A} \ln \left(\frac{l_0}{l_0 + 2\lambda h_1} \right) \quad (4.8)$$

Les équations 4.6 et 4.8 permettent de prédire la longueur de cheminement qu'un fluide à seuil homogène peut atteindre dans un coffrage, en fonction de ses caractéristiques (seuil d'écoulement et masse volumique), du volume de matériau versé, de la géométrie du coffrage et du degré de l'adhérence du matériau aux parois latérales. Puisque cette dernière n'est pas facile à quantifier dans la pratique, il nous semble nécessaire d'étudier les deux cas limites : condition d'adhérence totale ($\lambda \rightarrow 1$) et condition de glissement total ($\lambda \rightarrow 0$). Dans le premier cas, la longueur de l'écoulement au moment de l'arrêt s'écrit :

$$L = \frac{h_1}{A} + \frac{l_0}{2A} \ln \left(\frac{l_0}{l_0 + 2h_1} \right) \quad (4.9)$$

Dans le deuxième cas, la longueur de l'écoulement est :

$$L = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \left[\frac{h_1}{\lambda A} + \frac{1}{\lambda^2} \frac{l_0}{2A} \ln \left(\frac{l_0}{l_0 + 2\lambda h_1} \right) \right] = \frac{h_1^2}{Al_0} \quad (4.10)$$

Le coefficient d'adhérence λ est difficile à déterminer quantitativement, nous pouvons seulement présumer que ce coefficient doit être plus important si le béton s'écoule dans un coffrage en bois que dans un canal en plexiglas. Il peut être intéressant d'évaluer la sensibilité de l'approche analytique proposée en fonction de l'adhérence du matériau aux parois. Nous avons donc choisi de considérer analytiquement différents fluides de très fluides à très fermes ($\tau_0 = 20$ à 100 Pa) et de prédire leur longueur de l'écoulement à l'arrêt en fonction de différents coefficients d'adhérence ($\lambda \rightarrow 0$, $\lambda = 0, 2$, $\lambda = 0, 6$ et $\lambda \rightarrow 1$) dans des conditions limites supposées identiques (même masse volumique, même volume de 6 l, même géométrie). L'approche proposée nous permet de prédire la longueur de cheminement de l'écoulement, si le matériau adhère parfaitement aux parois selon la relation 4.9, si le matériau n'adhère pas aux parois selon la relation 4.10 et selon l'équation 4.8 dans les cas intermédiaires.

La figure 4.3 présente des courbes de prédiction de l'arrêt de l'écoulement en fonction du seuil d'écoulement du matériau dans les quatre cas considérés. Un écart entre les deux cas extrêmes (adhérence parfaite aux parois et pas d'adhérence aux parois) peut être observé. Cet écart est d'autant plus important que le matériau est ferme. Considérons par exemple le cas d'un fluide de 50 Pa de seuil. Entre une condition d'adhérence totale et une condition de glissement total, la différence de la longueur de l'écoulement est de l'ordre de 7 cm, soit 12% (cf. Fig. 4.3). Cela signifie que, si la condition d'adhérence du matériau aux parois n'est pas connu, l'approche proposée peut permettre de prédire la longueur de cheminement de l'écoulement avec une incertitude de 12% . Dans le cas des bétons, l'adhérence sur les coffrages est a priori proche de 1 .

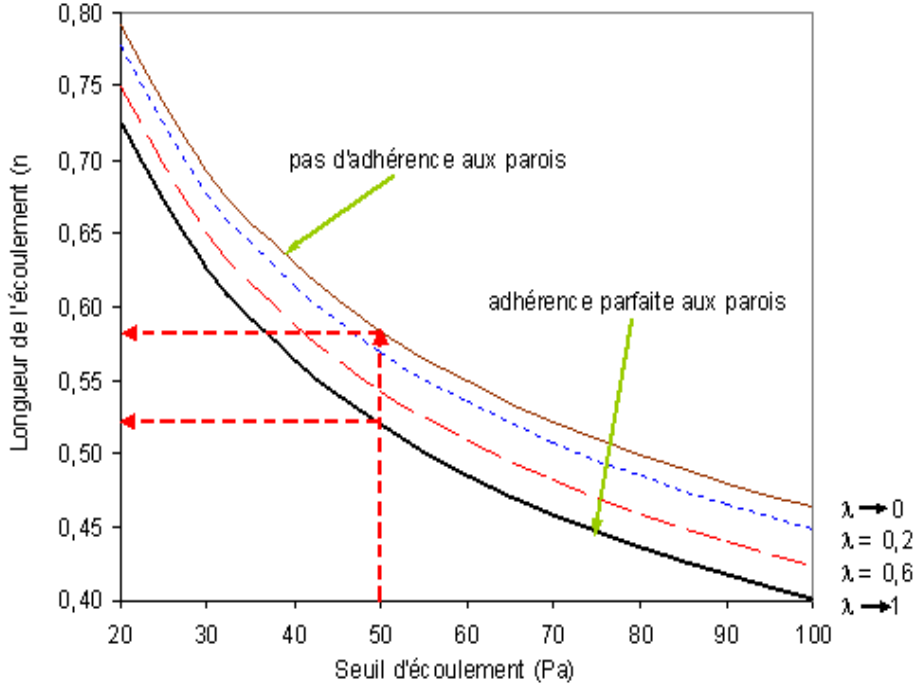


Figure 4.3: Influence du degré d'adhérence du matériau aux parois latérales sur la valeur de seuil prédite théoriquement.

4.1.2.2 Cas b : $L = L_0$

Nous nous sommes basés sur l'équation 4.5 pour établir l'expression reliant les épaisseurs de l'écoulement à l'arrêt (h_1 à $x = 0$ et h_2 à $x = L_0$) avec le seuil d'écoulement du matériau :

$$L_0 = \frac{h_1 - h_2}{\lambda A} + \frac{l_0}{2\lambda^2 A} \ln \left(\frac{l_0 + 2\lambda h_2}{l_0 + 2\lambda h_1} \right) \quad (4.11)$$

Comme nous avons vu dans le cas $L < L_0$, il est nécessaire d'étudier les deux cas limites : condition d'adhérence totale ($\lambda \rightarrow 1$) et condition de glissement total ($\lambda \rightarrow 0$). Dans le premier cas, la longueur de l'écoulement au moment de l'arrêt s'écrit :

$$L_0 = \frac{h_1 - h_2}{A} + \frac{l_0}{2A} \ln \left(\frac{l_0 + 2h_2}{l_0 + 2h_1} \right) \quad (4.12)$$

Dans le deuxième cas, cette longueur de l'écoulement est :

$$L_0 = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \left[\frac{h_1 - h_2}{\lambda A} + \frac{l_0}{2\lambda^2 A} \ln \left(\frac{l_0 + 2\lambda h_2}{l_0 + 2\lambda h_1} \right) \right] = \frac{h_1^2 - h_2^2}{Al_0} \quad (4.13)$$

Considérons des écoulements d'un même volume testé dans une même géométrie, plus le seuil d'écoulement du matériau est élevé, plus la différence entre les épaisseurs de l'écoulement à l'arrêt aux extrémités est importante. Rappelons que l'épaisseur d'un fluide Newtonien (de seuil nul) à l'arrêt est constante dans le coffrage.

En estimant approximativement le volume total de l'échantillon par $\Omega = L_0 l_0 (h_1 + h_2) / 2$ et en introduisant $r = h_2 / h_1$ et le volume adimensionnel $\Omega^* = \Omega / (L_0 l_0^2)$, nous obtenons cette équation addimensionnelle :

$$\frac{2AL_0}{l_0} = \frac{1-r}{1+r} \frac{4\Omega^*}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} \ln \left(\frac{1+r+4\lambda\Omega^*}{1+r+4r\lambda\Omega^*} \right) \quad (4.14)$$

Ces corrélations permettent de prédire le rapport r pour un fluide de seuil connu et donc le degré de remplissage du coffrage. L'approximation du volume de l'échantillon est licite car dans le cas $L = L_0$, l'épaisseur de l'échantillon à l'arrêt diminue presque linéairement en fonction de x comme nous pourrions le constater sur nos résultats expérimentaux.

Lorsque $\lambda \rightarrow 1$, l'équation 4.14 devient :

$$\frac{2AL_0}{l_0} = \frac{1-r}{1+r} 4\Omega^* - \ln \left(\frac{1+r+4\Omega^*}{1+r+4r\Omega^*} \right) \quad (4.15)$$

Elle est particulièrement atténuée en condition de glissement total ($\lambda \rightarrow 0$) :

$$r = \frac{4\Omega^{*2}l_0 - AL_0}{4\Omega^{*2}l_0 + AL_0} \quad (4.16)$$

4.1.3 Influences de l'inertie et de la tension superficielle

4.1.3.1 Effet de l'inertie et vitesse de l'écoulement

La description de l'écoulement d'étalement en canal du paragraphe précédent est basée sur l'hypothèse que l'écoulement a lieu suffisamment lentement pour que les effets d'inertie soient négligeables et que la forme finale ne dépende que du seuil. Tattersall [9], Murata [97] ainsi que Roussel [99] ont constaté, dans le cas de l'essai au cône d'Abrams, que la viscosité plastique du matériau n'avait pas d'influence sur l'affaissement. Cependant, il est possible d'imaginer que, si le matériau s'écoule très rapidement dans le canal et que sa viscosité plastique est faible, la forme finale du matériau après l'arrêt de l'écoulement pourrait ne pas dépendre uniquement du seuil. En effet, l'énergie cinétique de l'écoulement, si elle n'est pas absorbée par la dissipation visqueuse lors de l'écoulement, pourrait permettre au matériau de dépasser la position théorique d'arrêt décrite précédemment. Pour quantifier cet effet, considérons la contrainte due à l'inertie $I = \rho V^2$. Si un béton parcourt une distance de l'ordre de 60 cm en 10 secondes avant l'arrêt de l'écoulement, I est alors de l'ordre de 9 Pa, valeur largement inférieure aux seuils des bétons les plus fluides et aux matériaux modèles testés plus loin (cf. Tableau 2.2). Le fait que l'écoulement lent ne dépende pas de la viscosité plastique et de manière plus générale, de l'inertie de l'écoulement, est donc confirmé.

4.1.3.2 Effet de la tension superficielle

Si la forme à l'arrêt de l'écoulement d'un dépôt de matériau dépend du seuil, alors l'eau, fluide visqueux Newtonien par excellence, devrait s'étaler indéfiniment. Ce n'est bien sûr pas le cas. En fait, la tension superficielle conditionne l'arrêt de l'écoulement des matériaux à seuil nul ou faible. Celle-ci dépend du fluide testé et de la surface sur laquelle il s'écoule. Ce phénomène physique ne peut jouer un rôle significatif que pour des matériaux très fluides. Roussel et Coussot [99] ont traité ce problème vis-à-vis de l'étalement au cône en comparant la perte d'énergie par dissipation visqueuse avec la perte d'énergie de surface lors d'un incrément de rayon d'étalement dR . La variation de l'énergie de surface est la somme des variations des énergies interfaciales aux frontières entre la plaque (solide) et l'air ambiant (gaz), entre le matériau testé (liquide) et l'air ambiant et entre le matériau et la plaque. Ces variations d'énergie sont respectivement proportionnelles aux variations des surfaces de contact entre les différents milieux via des coefficients de tension interfaciale. Ces coefficients sont reliés entre eux par l'équation de Young via ϑ qui est l'angle de mouillage au point de contact des trois milieux.

L'influence de la tension de surface sur la forme finale du dépôt est négligeable si la perte d'énergie par dissipation visqueuse est beaucoup plus grande que la perte d'énergie de surface. La critère suivante a été ainsi proposée pour les écoulements d'étalement au cône [99] :

$$\tau_c \gg \frac{3(1 - \cos \vartheta) \zeta_{LG}}{R} \quad (4.17)$$

avec ζ_{LG} la tension interfaciale aux frontières entre le matériau et l'air ambiant.

En appliquant la relation 4.17 au cas d'un BAP présentant un étalement de 900 mm (limite supérieure de l'essai), nous obtenons que le béton doit présenter un seuil supérieur à 0,6 Pa pour que l'essai ne soit pas affecté par les effets de tension superficielle. Il est nécessaire de souligner que cet effet de la tension superficielle est encore atténuée dans le cas de l'écoulement bidimensionnel en canal. Nous pouvons donc conclure que la tension superficielle ne joue pas de rôle d'un point de vue théorique sur le résultat de l'essai (à la condition que le matériau puisse être considéré comme un matériau homogène mais nous y reviendrons plus loin).

4.2 Simulations numériques

4.2.1 Méthodes existantes

Plusieurs auteurs ont développé des simulations numériques de l'écoulement à surface libre d'un béton. Deux types de méthode ont été proposés. Le premier considère le matériau comme un fluide homogène alors que le deuxième prend en compte de la présence des inclusions. L'approche du fluide homogène est simple à réaliser, elle n'est cependant valable que si la plus petite dimension caractéristique de l'écoulement (épaisseur de l'écoulement, taille du cône ou du coffrage, espacement des barres d'acier...) est grande par rapport à la taille des particules maximales (cf. section 3.1) et si le matériau reste homogène. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, il est nécessaire de prendre en compte de la présence des inclusions [100, 101]. Cette approche est beaucoup plus complexe mais c'est la seule technique appropriée dans l'étude des écoulements en zones confinées (entre les barres d'acier par exemple).

Des simulations de l'écoulement des suspensions dans les zones confinées ont été entreprises au moyen de la méthode des éléments distincts [101, 102, 103]. Des simulations utilisant la méthode des éléments distincts ont été effectuées sur les écoulements de BAP dans la phase de mise en œuvre, par exemple dans la boîte en L [102]. Cet essai a été également simulé numériquement par Thrane *et al.* [104], en se basant sur la formulation Galerkin FEM de l'équation Navier-Stokes. Nous nous focalisons sur les simulations de fluide homogène. Les écoulements d'affaissement ont été simulés en utilisant l'analyse d'éléments finis viscoplastique par Tanigawa et Mori [105] ou l'analyse d'éléments finis élastoplastique par Hu [106].

4.2.2 Simulations par FLOW3D[®]

Un modèle 3D de Bingham a été utilisé pour décrire le comportement du fluide testé. De plus, pour que l'état de déformation soit déterminable même si le critère de seuil n'est pas satisfait, les simulations numériques présentées ici ont été conduites en supposant que le matériau se comporte comme un solide élastique incompressible jusqu'au seuil, au delà duquel le matériau se comporte comme un fluide de Bingham. D'autres méthodes existent au même titre telles que le modèle biviscosité de O'Donovan et Tanner [107] ou le modèle exponentiel proposé par Papanastasiou [108], mais il est particulièrement intéressant d'employer un type de modèle où une zone sans écoulement peut exister. Pour ce faire, le code numérique de mécanique des fluides Flow3D[®] [109]

a été choisi. Ce logiciel a été utilisé par Roussel [69, 110] pour simuler avec succès des écoulements d'étalement au cône d'Abrams et au mini cône.

La généralisation 3D d'un fluide de Bingham utilisée est basée sur le critère 3D de Von Mises :

$$\boldsymbol{\Sigma}^{(d)} = \left[\frac{\tau_0}{\left| \left(\frac{1}{2} \mathbf{d} : \mathbf{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right|} + \eta_{pl} \right] \mathbf{d}, \quad \frac{1}{2} \boldsymbol{\Sigma}^{(d)} : \boldsymbol{\Sigma}^{(d)} \geq \tau_0^2 \quad (4.18)$$

où $\mathbf{d}$ est le tenseur de vitesse de déformation. Lorsque l'écoulement est dominé par la contrainte de cisaillement et la vitesse de cisaillement, cette relation se simplifie en modèle scalaire de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \gamma, \quad \tau \geq \tau_0 \quad (4.19)$$

Une étude systématique [111] a montré que le module d'Young du matériau n'a pas d'influence sur le résultat du calcul aussi longtemps que les déformations élastiques sont négligeables devant les déformations dues à l'écoulement, une fois le seuil de contrainte atteint. Nous avons donc utilisé la valeur minimale de module permettant d'atteindre cette situation, toute valeur supérieure du module augmentant la durée des calculs. D'ailleurs, pour éviter une éventuelle influence des effets d'inertie de l'écoulement, nous avons utilisé dans les simulations des valeurs relativement élevées de viscosité plastique (50 Pa.s pour les bétons et 1 Pa.s pour la suspension modèle). Il convient de rappeler que, comme la forme finale ne dépend que du seuil une fois que l'effet inertiel est négligeable (ce qui est le cas de l'écoulement en canal horizontal), les valeurs choisies pour la viscosité plastique n'importent pas.

4.3 Etudes expérimentales

4.3.1 Matériaux et matériels

Dans le but de vérifier la validité de l'approche analytique proposée et des simulations numériques dans les deux cas de contact du matériau avec les parois du canal, deux matériaux modèles différents ont été utilisés : des mélanges de filler calcaire PIKETTY[®] (F) et d'eau et des suspensions de Carbopol. Ces dernières ont été décrites dans le chapitre 2. La fraction volumique solide des mélanges de filler calcaire varie entre 0,71 et 0,75 (F/E entre 0,33 et 0,45) de façon à générer un seuil compris entre 15 et 150 Pa. Pour la fabrication et la caractérisation de ce matériau, le lecteur pourra se référer à [112].

Les canaux utilisés (hauteur 15 cm) sont constitués de plexiglas transparent de façon à visualiser aisément la forme de l'écoulement. Une largeur de canal de 200 mm représente un compromis entre un écoulement suffisamment épais avec une largeur suffisamment importante. Le fond du canal est recouvert d'une toile abrasive étanche dont la taille des grains de cette toile se situent entre 300 et 600 μm , et leur densité est de 60 grains/ cm^2 . Le but recherché ici est de donner une rugosité suffisante au fond du canal pour obtenir un cisaillement au sein de l'écoulement.

4.3.2 Protocoles d'essai

Les expériences sont réalisées en canal horizontal non ferrailé pour différentes valeurs du seuil d'écoulement de matériau. Le protocole d'essai suivant est répété pour chaque mesure : Un volume de 6 l de matériau est prélevé dans un seau pré-marqué. Le contenu du seau est vidé lentement dans le canal horizontal. Deux minutes environ après l'arrêt de l'écoulement, des photos sont prises à travers une des parois latérales, un projecteur est posé de l'autre côté du canal pour obtenir de

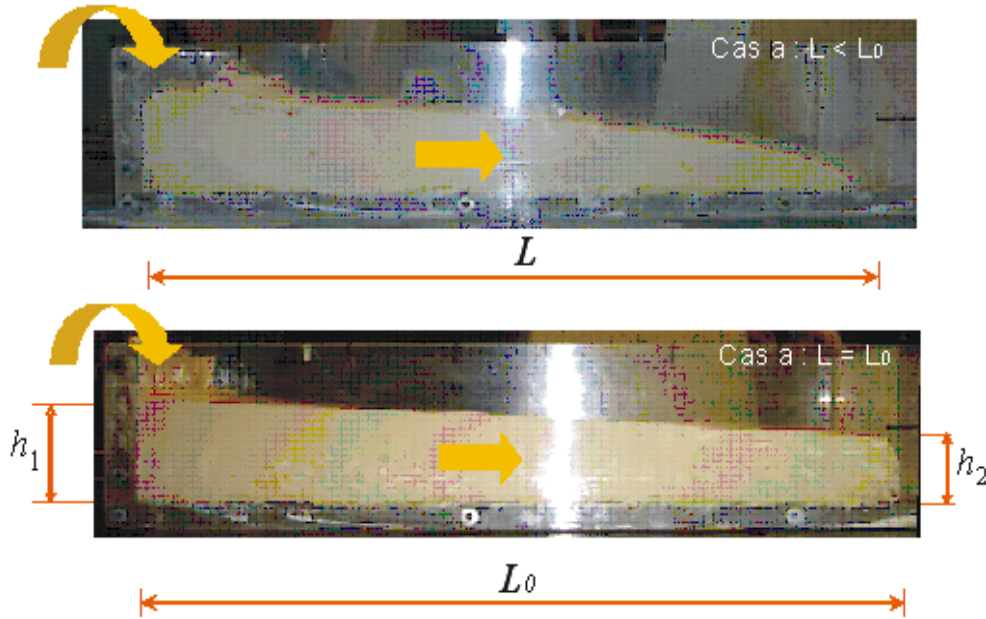


Figure 4.4: *Écoulements des mélanges de filler calcaire en canal horizontal non ferrailé*

façon net le profil réel (cf. Fig. 4.4). La quantité de pixels est comptée sur les photos numériques par une technique d'analyse d'image utilisant le logiciel "Image J". pour obtenir les valeurs d'épaisseur à une position quelconque.

Le seuil d'écoulement des matériaux modèles est mesuré expérimentalement à l'aide d'un viscosimètre HAAKE VT550 équipé d'une géométrie de type Vane (HAAKE FL10). La mesure suit la procédure décrite par [95] avec une vitesse de rotation de $0,4 \text{ rad.min}^{-1}$.

4.4 Résultats et discussions

Sur les figures 4.6 et 4.6, les profils de l'écoulement issus de l'approche analytique proposée précédemment sont comparés aux profils mesurés expérimentalement sur des suspensions de Carbopol. Le matériau s'écoule d'autant plus loin (cas $L < L_0$, cf. Fig. 4.5) ou est d'autant plus plat (cas $L = L_0$, cf. Fig. 4.6) que le matériau est fluide (faible seuil). Dans les deux cas présentés, nous pouvons constater que l'approche analytique reproduit correctement la forme de l'écoulement au moment de l'arrêt.

Les figures 4.7 et 4.8 représentent une autre comparaison entre des valeurs prédites théoriquement et des mesures expérimentales (obtenues sur des suspensions de Carbopol ainsi que sur des mélanges de filler calcaire) de la longueur L (cas $L < L_0$) ou du rapport des épaisseurs aux extrémités $r = h_2/h_1$ (cas $L = L_0$) de l'écoulement à l'arrêt. Il est montré que les résultats expérimentaux obtenus sur des fluides modèles de Carbopol et de filler calcaire sont en accord, et confirment les données prédites par les corrélations analytiques proposées. Cette cohérence confirme la pertinence des hypothèses de l'approche (inertie négligeable, adhérence au fond mais adhérence ou glissement sur parois latérales, forme à l'arrêt dépendant uniquement du seuil du matériau).

De plus, les simulations numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux 4.9. Nous disposons donc d'une corrélation quantitative très correcte entre la forme finale de l'écoulement et le seuil de contrainte du matériau. Il est dès lors possible de prédire la capacité d'un fluide à seuil homogène à remplir un coffrage horizontal non ferrailé.

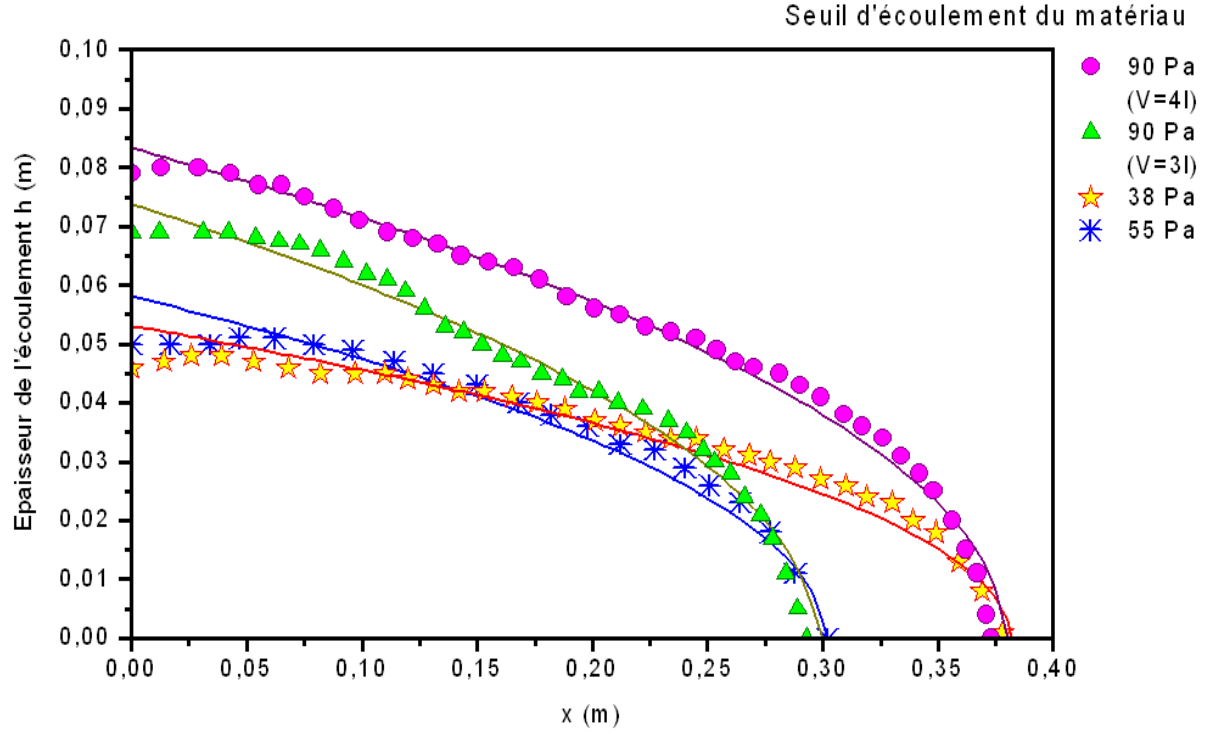


Figure 4.5: Comparaison des profils expérimentaux (symboles) et théoriques (lignes continues) de différents écoulements de Carbopol au moment d'arrêt en canal non ferrailé dans le cas $L < L_0$

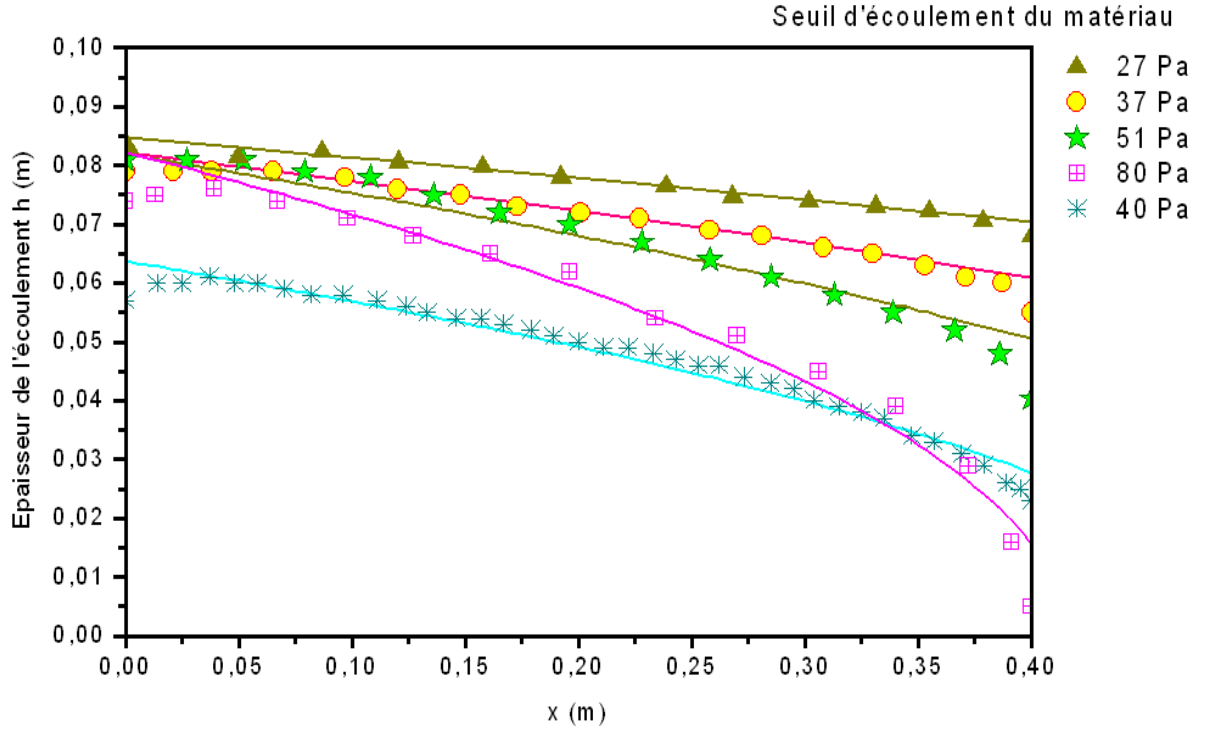


Figure 4.6: Comparaison des profils expérimentaux (symboles) et théoriques (lignes continues) de différents écoulements de Carbopol au moment d'arrêt en canal non ferrailé dans le cas $L = L_0$

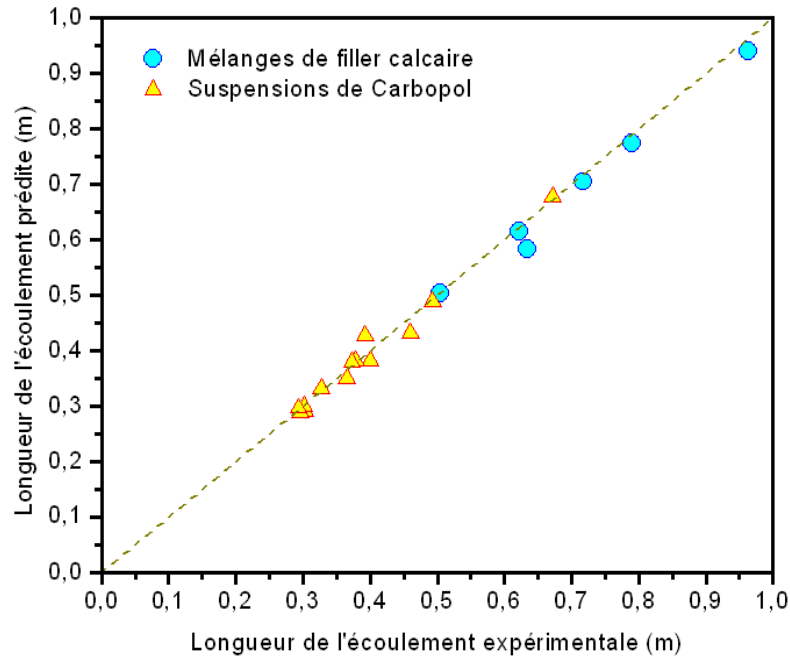


Figure 4.7: Comparaison entre mesures expérimentales et solutions théoriques sur différents écoulements en canal non ferrailé au moment d'arrêt dans le cas $L < L_0$

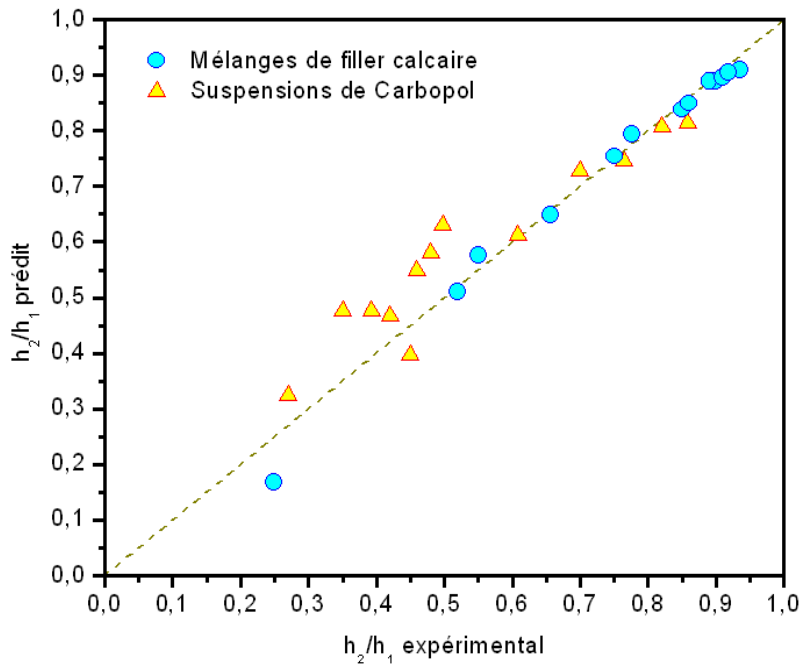


Figure 4.8: Comparaison entre mesures expérimentales et solutions théoriques sur différents écoulements en canal non ferrailé au moment d'arrêt dans le cas $L = L_0$

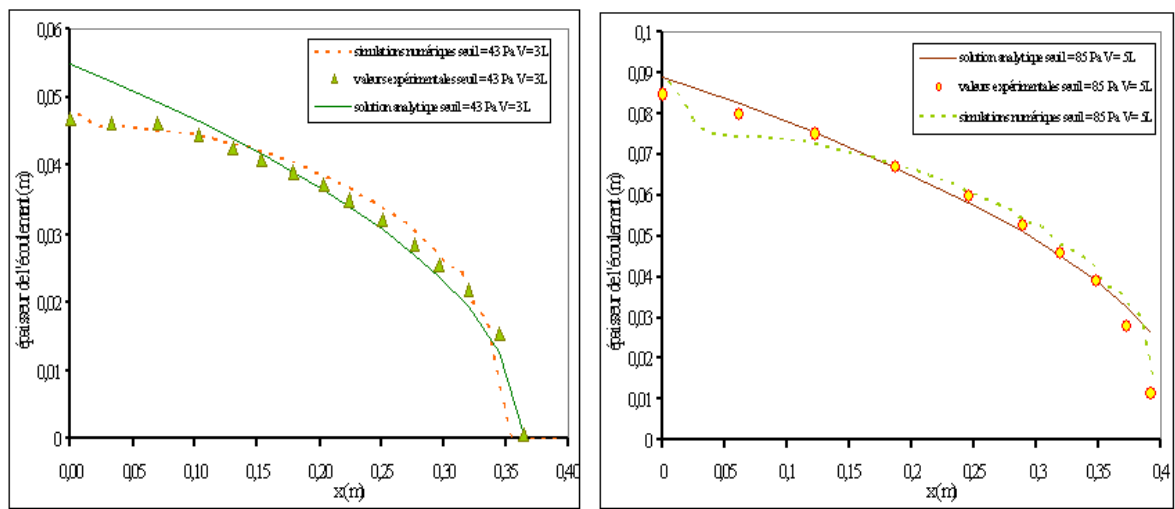


Figure 4.9: Profils expérimental, analytique et numérique d'une suspension de Carbopol en canal horizontal non ferrailé

Chapitre 5

Fluide à seuil homogène à travers un ferrailage élémentaire vertical

Sommaire

5.1	Etudes expérimentales	55
5.1.1	Procédure d'essai	55
5.1.2	Résultats expérimentaux	57
5.1.2.1	Profils obtenus	57
5.1.2.2	Calcul de la perte de niveau locale	57
5.1.2.3	Influence du volume testé sur la perte de niveau locale	59
5.1.2.4	Surface relative d'obstacle	59
5.2	Analyses et discussions	60
5.2.1	Approche analytique de prédiction l'influence d'un ferrailage élémentaire	60
5.2.2	Analogie avec un écoulement d'extrusion	63
5.3	Simulations numériques	65
5.4	Extension à un assemblage de deux ferrailages élémentaires	67
5.4.1	Etude expérimentale	67
5.4.2	Résultats	68
5.4.3	Analyses et discussions	68
5.4.4	Conséquence sur la modélisation numérique	71

Les effets d'un obstacle sur un écoulement sont complexes à étudier. En succédant au chapitre 3, ce chapitre vise à étudier l'écoulement et l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil homogène en canal horizontal passant à travers un ferrailage élémentaire vertical, puis à quantifier correctement les modifications de l'écoulement induites. La variation de la forme de l'écoulement au moment de l'arrêt en fonction de différents paramètres peuvent nous fournir de précieuses informations sur le meilleur moyen d'améliorer la mise en œuvre du béton.

5.1 Etudes expérimentales

5.1.1 Procédure d'essai

L'essai consiste à étudier l'influence de la présence d'un ferrailage élémentaire placé perpendiculairement à la direction de l'écoulement sur la forme à l'arrêt du matériau. Le ferrailage élémentaire, pouvant être désormais appelé "grille" pour simplifier l'écriture, est constitué d'un certain nombre

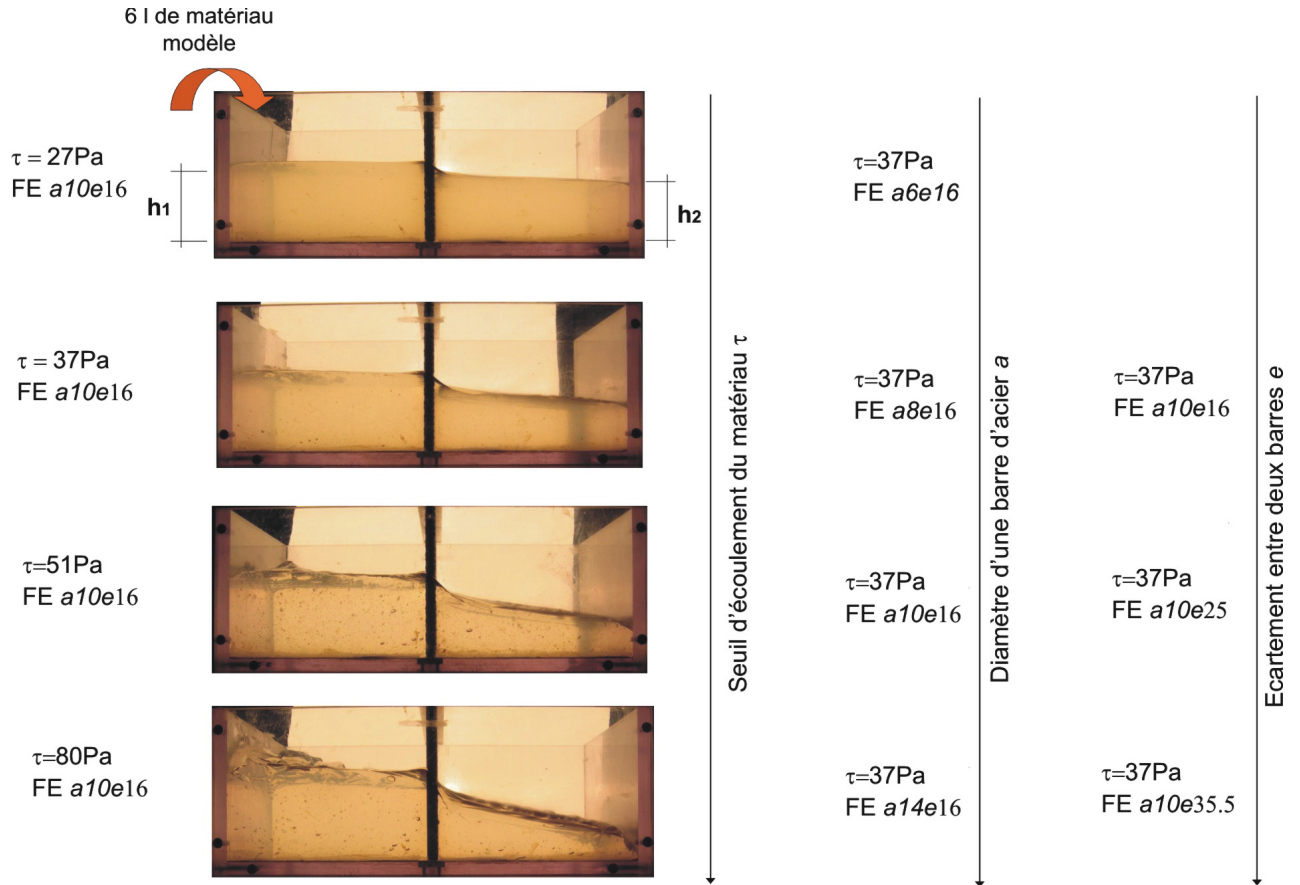


Figure 5.1: Etudes expérimentales de l'influence de chacun des paramètres sur la perte de niveau locale due à un ferraillage élémentaire

de barres d'acier identiques. Le même protocole que celui présenté dans le chapitre 4 a été appliqué dans cette campagne d'essai. Comme dans l'étude expérimentale pour le canal non ferraillé, la forme du matériau à l'arrêt de l'écoulement est mesurée expérimentalement sur le profil tiré de photographies numériques.

Lors des essais préliminaires, il est à noter qu'une perte de niveau (ou d'épaisseur) dans le profil à l'arrêt de l'échantillon est constatée systématiquement au voisinage de la grille. Cette perte de niveau locale varie selon le seuil d'écoulement du matériau testé ainsi que des caractéristiques géométriques de la grille (le diamètre a des barres d'acier constituant la grille, l'écartement e entre deux barres).

Au vu de ces observations, nous avons choisi d'établir un programme expérimental défini sur des suspensions de Carbopol qui permet l'étude de l'influence de chacun de ces paramètres sur la perte de niveau locale de l'écoulement à l'arrêt. Pour ce faire, des essais avec des grilles de différentes tailles de barre et de différents écartements entre deux barres ont été réalisés dans des conditions expérimentales identiques (même volume initial, même matériau) pour différents seuils d'écoulement. La figure 5.1 récapitule schématiquement l'ensemble des essais expérimentaux réalisés.

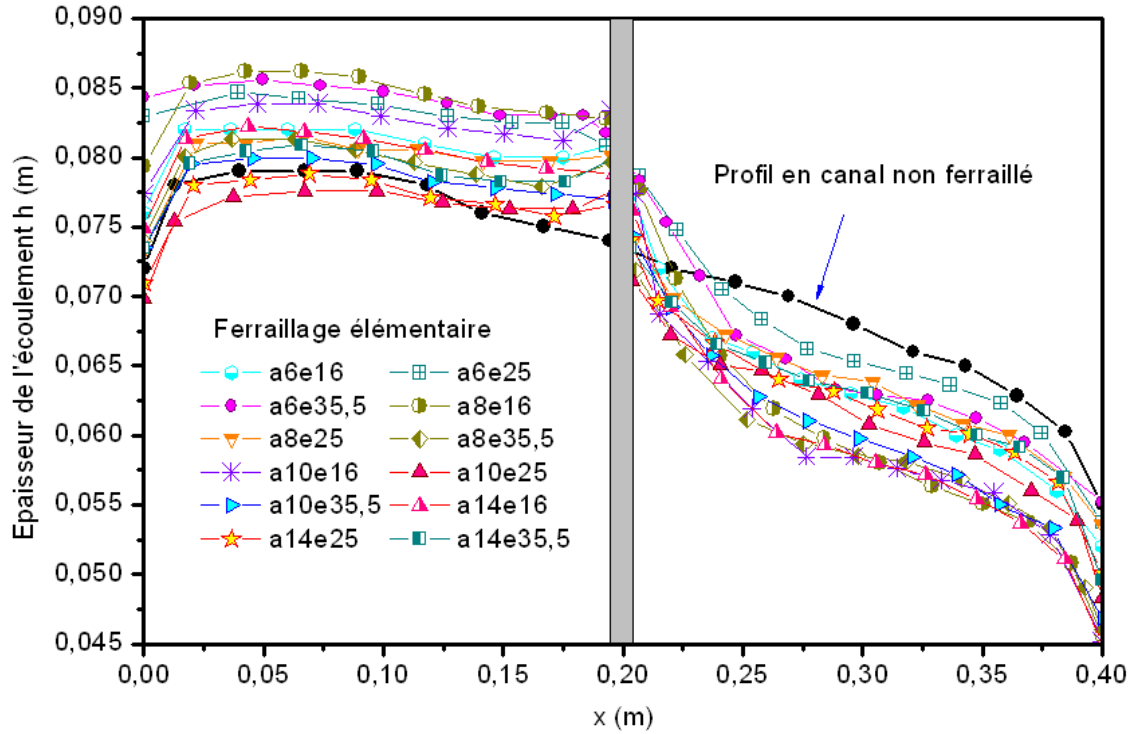


Figure 5.2: *Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 37 Pa passant par différents ferraillements élémentaires.*

5.1.2 Résultats expérimentaux

5.1.2.1 Profils obtenus

Les figures 5.2 et 5.3 représentent les profils expérimentaux des écoulements de Carbopol d'un même seuil d'écoulement (37 Pa et 80 Pa) passant par différents ferraillements élémentaires. Le cas du même matériau en canal non ferrailé a été aussi tracé, ce qui donne un profil expérimental de référence. Comme nous l'avons vu dans les essais préliminaires, une perte de niveau (ou d'épaisseur) de l'écoulement est observée systématiquement.

Ces résultats permettent d'interpréter l'effet du diamètre d'une barre d'acier et celui de l'écartement entre deux barres sur la forme à l'arrêt des écoulements : la perte de niveau apparente de l'écoulement est d'autant plus grande que le diamètre des barres est grand, ou que l'écartement entre deux barres est faible (cf. Fig. 5.2 et 5.3).

L'effet du seuil d'écoulement sur le profil à l'arrêt de l'écoulement est ensuite mis en évidence en considérant des arrêts d'écoulements pour différentes valeurs de seuil à travers un même ferraillement élémentaire (FE a10e16). La perte de niveau apparente de l'écoulement à l'arrêt est d'autant plus grande que le seuil d'écoulement du matériau est grand (cf. Fig. 5.4), autrement dit, la forme de l'échantillon à l'arrêt passant par la grille est d'autant plus plate que le matériau est fluide.

5.1.2.2 Calcul de la perte de niveau locale

La perte de niveau à l'arrêt de l'écoulement est difficile à mesurer précisément dans la pratique car elle se cumule avec la perte de niveau naturelle (cas du canal non ferrailé) et a lieu sur une distance de quelques centimètres autour de la grille. Sur une distance, le matériau va présenter une

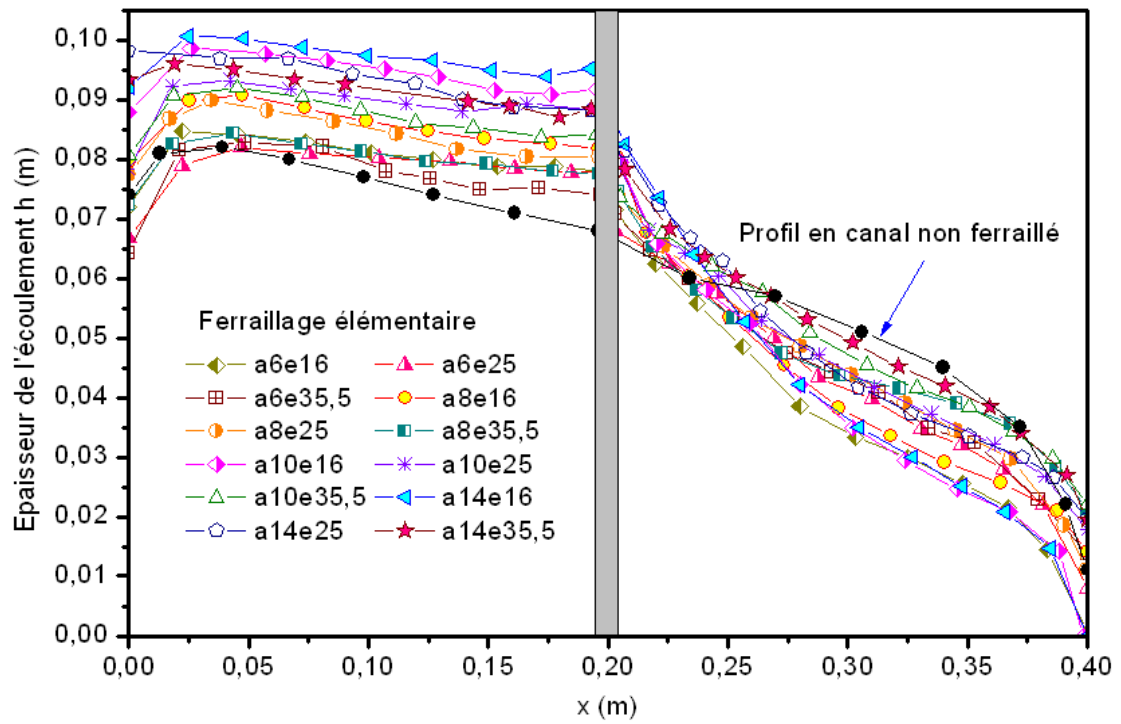


Figure 5.3: *Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 80 Pa passant par différents ferrailages élémentaires.*

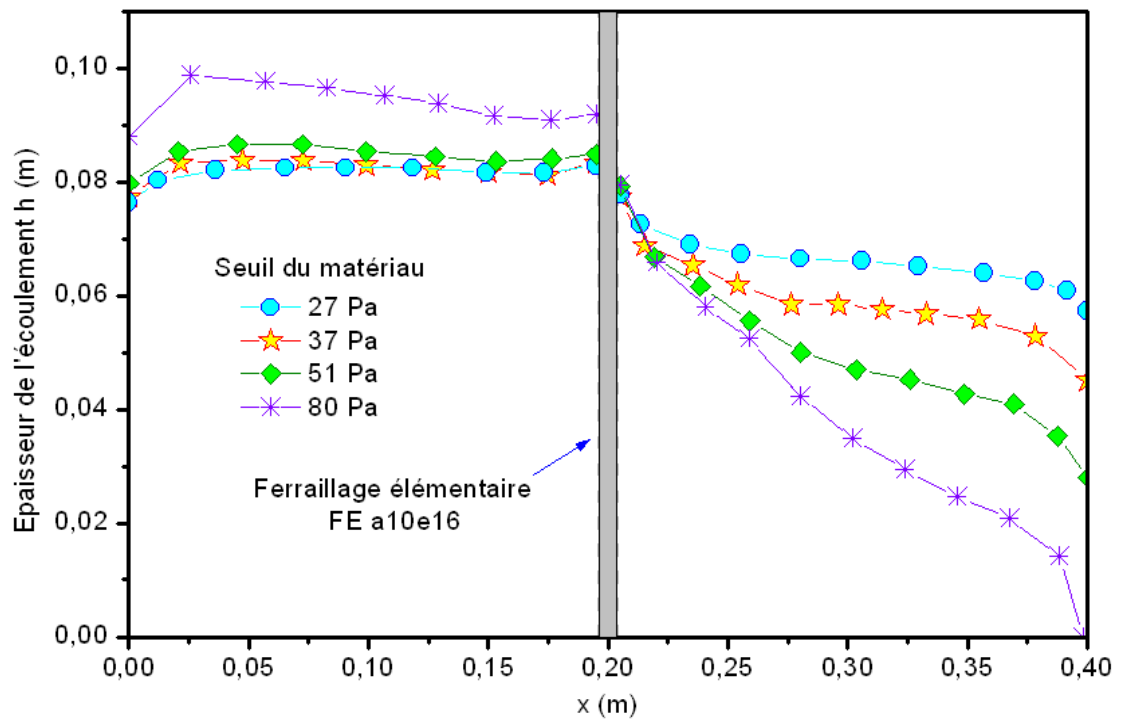


Figure 5.4: *Profils expérimentaux de différentes suspensions de Carbopol passant par le ferrailage élémentaire FE a10e16.*

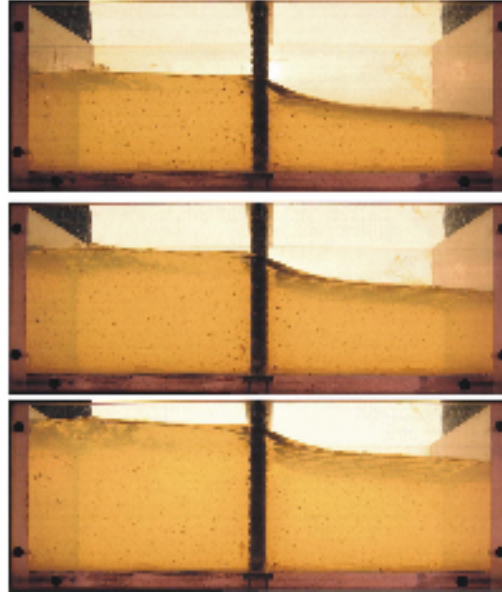


Figure 5.5: *Forme à l'arrêt de différents volumes de l'échantillon testé. Ferrailage Fa14e16. De haut en bas : $V=4, 6; 8$ et 10 l*

perte de niveau "naturelle" due à son seuil d'écoulement qui peut être calculée à l'aide de l'équation 4.1 ou 4.2. Dans la suite de ce travail, la perte de niveau locale due au ferrailage élémentaire est calculée en soustrayant la perte de niveau naturelle dans le cas sans grille de la perte de niveau totale mesurée expérimentalement dans le cas avec grille :

$$\Delta h_{FE}^{expé} = \Delta h^{expé} - \Delta h^{nat} \quad (5.1)$$

Ainsi, les mesures de la cote de la surface libre en amont et en aval nous ont permis, par différence, d'estimer cette perte de niveau locale due à un ferrailage élémentaire.

5.1.2.3 Influence du volume testé sur la perte de niveau locale

Il est difficile dans la pratique de verser exactement un volume de 6 l de matériau en canal comme il le fallait dans tous les essais. Afin d'étudier l'influence du volume de matériau testé, autrement dit de la hauteur d'immersion des barres d'acier sur la perte de niveau locale due à la présence desquelles, des essais avec différents volumes de l'échantillon (6, 8 et 10 l) ont été réalisés dans des conditions expérimentales identiques (même matériau de seuil 40 Pa, même ferrailage élémentaire FE a14e16) (cf. Fig.5.5).

Nous avons étudié l'influence du volume de l'échantillon testé sur la perte de niveau locale. Les mesures expérimentales dans les cas de 6, 8 et 10 l ne présentent qu'une différence maximale de quelques pourcents les uns par rapport aux autres, ce qui montre que le volume testé n'a pas d'influence sur la perte de niveau locale. Le problème de volume ne nous pose donc pas de problème au niveau du résultat de mesure.

5.1.2.4 Surface relative d'obstacle

La figure 5.7 récapitule les mesures expérimentales de perte de niveau locale obtenues sur différents écoulements de Carbopol passant par différents ferrailages élémentaires en fonction du rapport de

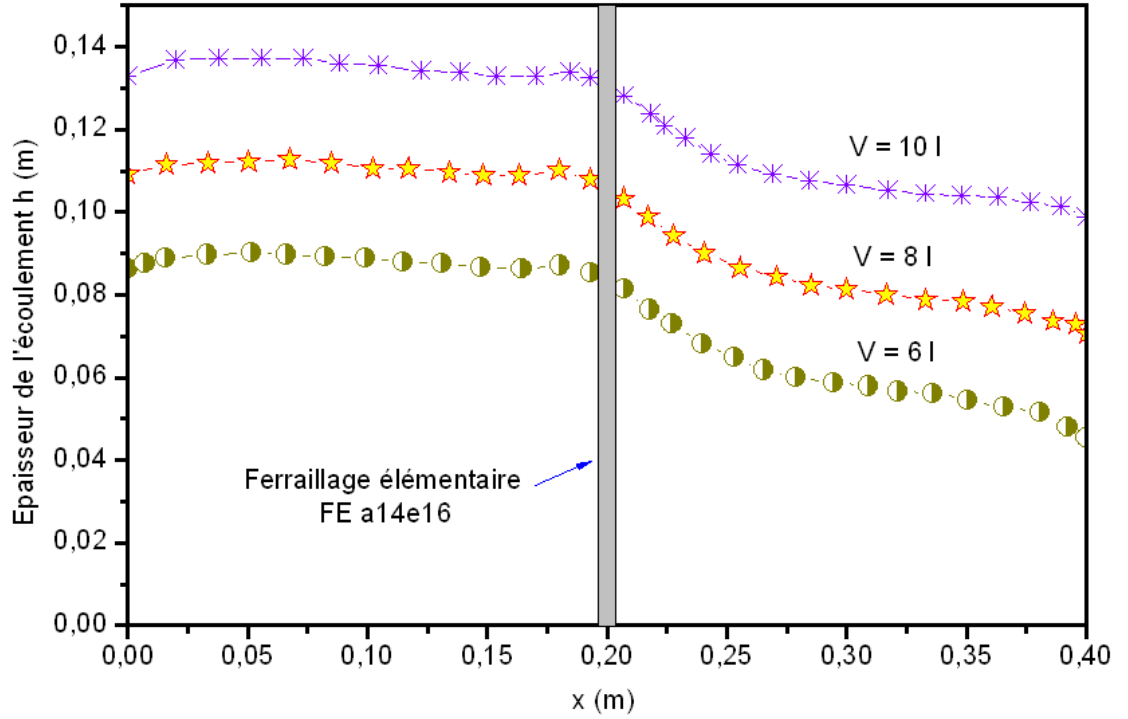


Figure 5.6: *Forme à l'arrêt de différents volumes de l'échantillon testé. Ferrailage FE a14e16. De haut en bas : V= 6 ; 8 et 10 l*

surface S_{obs}/S_0 . Cette présentation est souvent utilisée dans les études des obstacles de protection contre avalanche de neige [113]. Le rapport de surface se calcule comme suit :

$$\frac{S_{obs}}{S_0} = \frac{n_{bar}a}{l_0} \quad (5.2)$$

où n_{bar} est le nombre de barres d'acier dans un ferrailage élémentaire.

Nous apercevons que la perte de niveau locale due à un ferrailage élémentaire est une fonction croissante du seuil d'écoulement du matériau et de la surface relative d'obstacle. Dans la section suivante, nous cherchons à quantifier analytiquement ces corrélations.

5.2 Analyses et discussions

5.2.1 Approche analytique de prédiction l'influence d'un ferrailage élémentaire

La figure 5.8 rassemble les valeurs expérimentales de perte de niveau locale des écoulements ($\Delta h_{FE}^{expé}$) dues à différentes grilles. Les légendes à droite indiquent pour chaque point le diamètre a des barres et l'écartement e entre deux barres (en millimètre).

Nous pouvons rassembler nos constatations expérimentales : la variation locale de niveau augmente avec le seuil d'écoulement τ_0 du matériau. De plus, cette variation est d'autant plus grande que l'écartement entre les barres d'acier du ferrailage est faible et que le diamètre d'une barre est élevé (cf. Fig.5.8). Par ailleurs, une relation quasi linéaire entre la perte de niveau de l'écoulement due au ferrailage et le rapport du seuil sur le poids volumique ($\tau_0/\rho g$) du matériau peut être observée pour chacun des ferrillages.

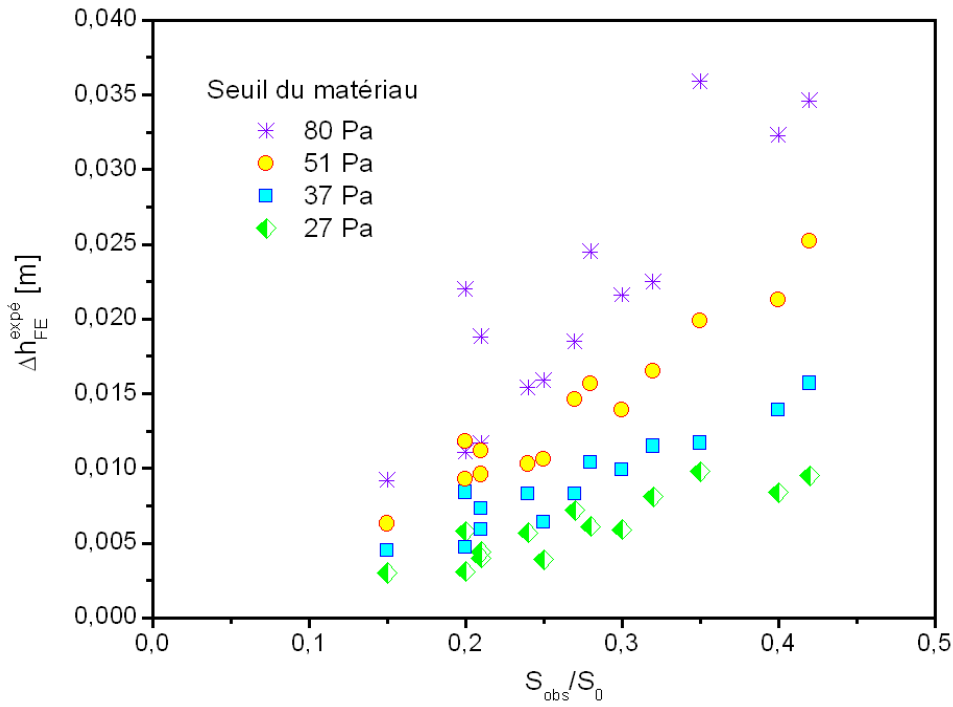


Figure 5.7: Perte de niveau mesurée expérimentalement en fonction de la surface relative d'obstacle

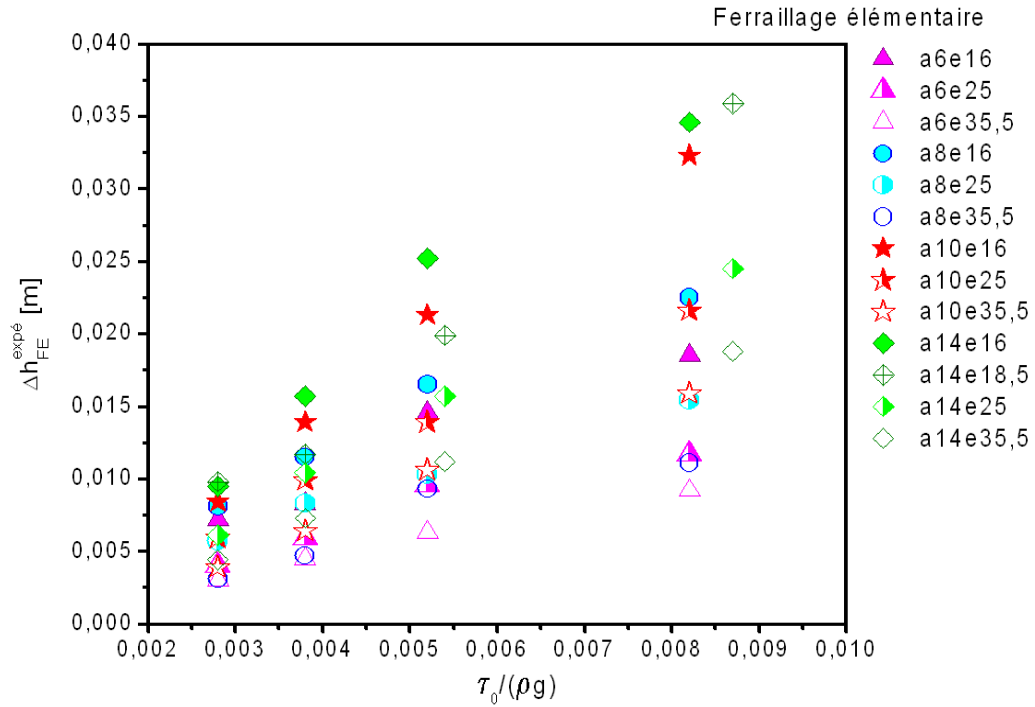


Figure 5.8: Perte de niveau locale expérimentale en fonction du rapport seuil d'écoulement/poids volumique du matériau

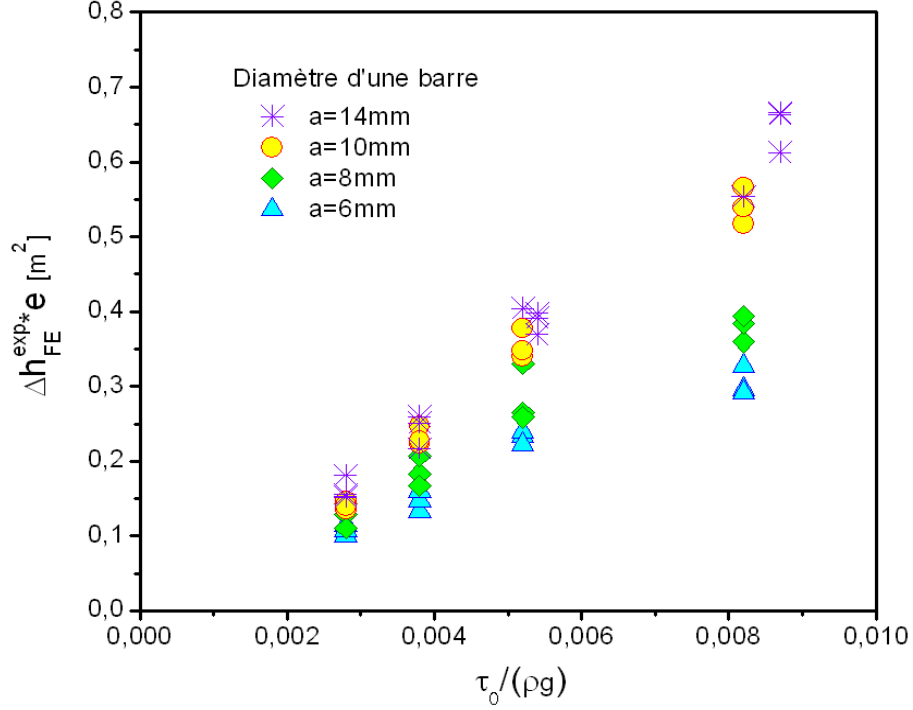


Figure 5.9: Perte de niveau locale multipliée par l'écartement entre deux barres en fonction du rapport seuil d'écoulement/poids volumique du matériau

Ceci n'est pas surprenant si l'on considère que la variation de niveau (ou d'épaisseur) de matériau au voisinage de la grille crée un gradient de pression local proportionnel à $\rho g \Delta h_{FE}$. Ce gradient de pression génère une contrainte de cisaillement entre les barres d'acier. En première approximation, nous pouvons considérer que la contrainte de cisaillement est, par analogie avec un écoulement entre deux plans parallèles infinis, de l'ordre de $\frac{e \rho g \Delta h_{FE}}{f(a)}$ avec $f(a)$ une fonction du diamètres des barres. Lorsque le matériau s'arrête de s'écouler, c'est parce que cette contrainte de cisaillement est devenue égale au seuil d'écoulement du matériau. Considérons un ferrailage de diamètre a et d'écartement entre les barres e ; à l'arrêt de l'écoulement, le bilan des forces exercées sur un élément de volume entre deux barres donne :

$$e \rho g \Delta h_{FE} = \tau_0 f(a) \quad (5.3)$$

avec Δh_{FE} et e en m, τ_0 en Pa, ρ en kg/m³ et $f(a)$ est une fonction du diamètre a des barres d'acier. Cette équation peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$e \Delta h_{FE} = \frac{\tau_0}{\rho g} f(a) \quad (5.4)$$

En gardant à l'esprit qu'un fluide Newtonien (de seuil nul) ne présente aucune perte de niveau, traçons maintenant les valeurs de $e \times \Delta h_{FE}$ en fonction de $\tau_0/(\rho g)$ (cf. Fig. ??). Une relation quasi linéaire pour chaque taille de barre d'acier constituant le ferrailage élémentaire est à noter, qui confirme la relation (5.4) et qui nous permet d'écrire : $f(a) = \omega a$, où ω est un facteur dépendant du contact entre le matériau et les barres d'acier. Les valeurs de la fonction $f(a)$ sont calculées à l'aide de la relation (5.4) à partir des résultats expérimentaux représentées sur la figure 5.9.

Les résultats représentés sur la figure 5.10 permettent d'approximer $f(a) = 5,4a$.

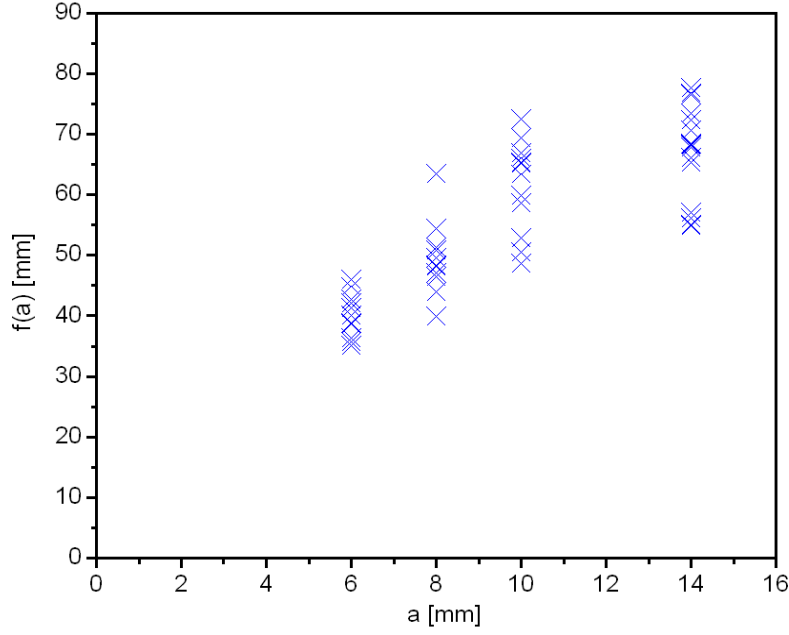


Figure 5.10: Variation de $f(a)$ en fonction du diamètre des barres d'acier

Sur la figure 5.11, les valeurs de perte de niveau locale issues de l'approche analytique sont comparées aux données obtenues expérimentalement sur différents matériaux de très fluide à très ferme à travers différents ferraillements. La corrélation est satisfaisante et confirme les hypothèses utilisées pour analyser le problème (inertie négligeable, tension superficielle négligeable, adhérence au fond et aux barres d'acier mais glissement sur parois latérales, forme finale uniquement dépendante du seuil).

5.2.2 Analogie avec un écoulement d'extrusion

L'image 5.12 illustre, à titre d'exemple, la forme à l'arrêt d'un écoulement de Carbopol passant par un ferraillement élémentaire. Au vu de cet image, il semble intéressant d'analyser les écoulements obtenus et leur arrêt par analogie avec un écoulement d'extrusion. Ce dernier est un procédé de mise en forme très répandu dans des industries variées telles que la plasturgie, la métallurgie, les céramiques ou encore l'industrie agroalimentaire. Ces matériaux sont soumis à des niveaux de pression et de contrainte élevés de façon à être extrudés à travers une filière à des débits suffisants. Les premières études au niveau international ont commencé il y a plus d'un demi siècle et plusieurs articles ont été écrits [114, 115, 116].

Le principe du procédé d'extrusion réside dans le fait qu'un fluide s'écoule dans une conduite dont la section est brusquement réduite (cf. Fig. 5.13). Ce changement de section crée un gradient de pression local au sein de l'écoulement. Ce dernier peut être calculé selon la formule suivante [114] :

$$\Delta P = \tau_0 \ln \left(\frac{S_0}{S} \right) \quad (5.5)$$

Revenons maintenant à notre cas dans lequel un fluide à seuil s'écoule à travers des barres d'acier de diamètre a et d'écartement e . Si nous appliquons la relation 5.5 à la configuration étudiée ici en considérant l'écoulement entre deux barres comme celui de filières d'extrusion disposées en parallèles, nous obtenons une relation de la forme suivante :

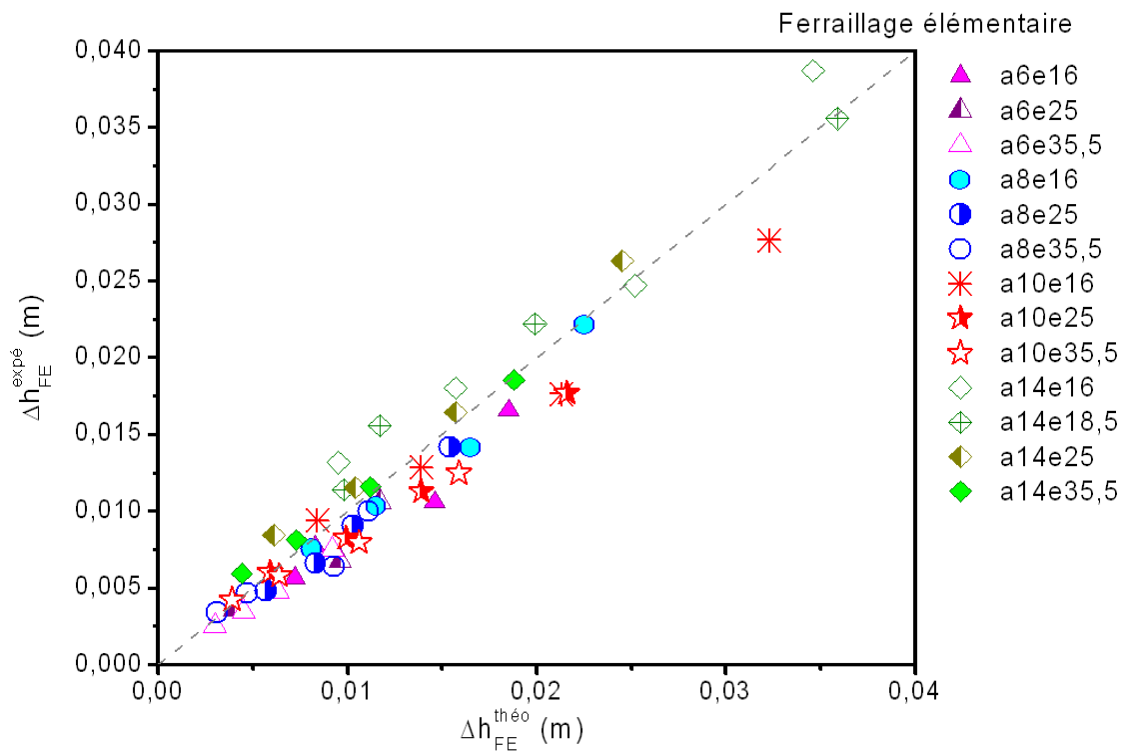


Figure 5.11: Perte de niveau locale de l'écoulement à l'arrêt due à un ferrailage élémentaire. Comparaison entre solution théorique et mesures expérimentales



Figure 5.12: Ecoulement de Carbopol à travers un ferrailage élémentaire (FE a14e18,5).

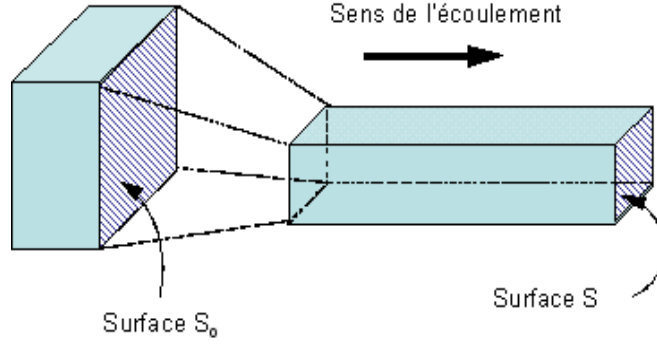


Figure 5.13: *Restriction de la section d'écoulement - analogie avec un processus d'extrusion.*

$$\Delta P = \tau_0 \ln \left(\frac{a+e}{e} \right) \quad (5.6)$$

Comme nous l'avons vu ci-dessus, la variation de niveau Δh_{FE} de matériau au voisinage du ferrailage crée un gradient de pression local proportionnel à $\rho g \Delta h_{FE}$. En le rapportant dans l'équation 5.6, nous pouvons calculer la perte de niveau locale Δh_{FE} :

$$\Delta h_{FE} = \frac{C\tau_0}{\rho g} \ln \left(\frac{a+e}{e} \right) \quad (5.7)$$

avec C un coefficient de géométrie. Sa valeur peut être identifiée à partir des résultats expérimentaux. Elle est de l'ordre de 7,3.

La figure 5.14 représente la comparaison des mesures expérimentales de la perte de niveau locale avec des solutions issues de la théorie d'extrusion. Une bonne cohérence est à noter.

En conclusion, nous disposons de deux approches permettant de faire le lien entre l'écoulement en amont et celui en aval d'un ferrailage élémentaire, autrement dit de prédire la perte de niveau de l'écoulement à l'arrêt due à la présence de ce ferrailage élémentaire.

5.3 Simulations numériques

Comme dans le cas du canal non ferrailé, la modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Flow-3D. Nous présentons dans la figure 5.15, à titre d'exemple, la confrontation des profils mesuré expérimentalement, prédit analytiquement et simulé numériquement d'une suspension de Carbopol de 51 Pa passant par un ferrailage élémentaire FE *a14e25*.

L'influence de la présence d'un ferrailage élémentaire vertical sur l'écoulement en canal a été étudiée dans ce chapitre. Différentes configurations d'obstacles ont été considérées et deux approches permettant de prédire la perte de niveau locale de l'écoulement en fonction des paramètres d'entrée tels que les caractéristiques intrinsèques du matériau (densité, seuil d'écoulement) ainsi que les caractéristiques géométriques du ferrailage (diamètre des barres d'acier et écartement entre deux barres) ont été proposées. Les valeurs de perte de niveau locale issues de l'approche analytique ont été comparées aux données obtenues expérimentalement sur des suspensions de Carbopol. La corrélation est bonne et confirme la pertinence des hypothèses des approches. Connaissant le seuil d'écoulement du matériau, il est dès lors possible de prédire la variation d'épaisseur de l'écoulement en passant une grille de caractéristiques géométriques connues et ainsi le remplissage

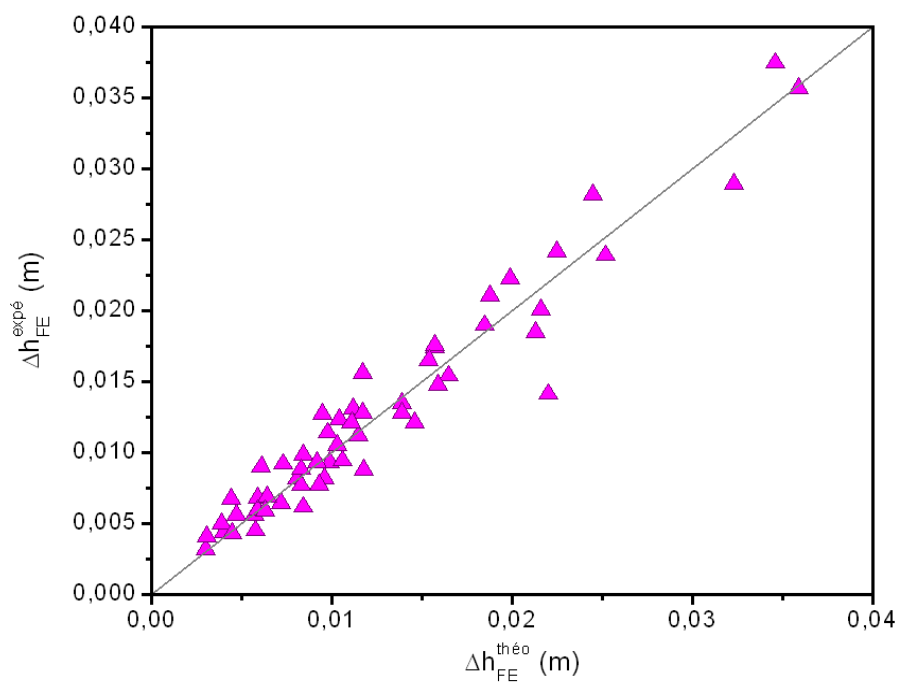


Figure 5.14: Perte de niveau locale due à un ferrailage élémentaire. Comparaison entre solution de la théorie d'extrusion ($C=7,3$) et mesures expérimentales

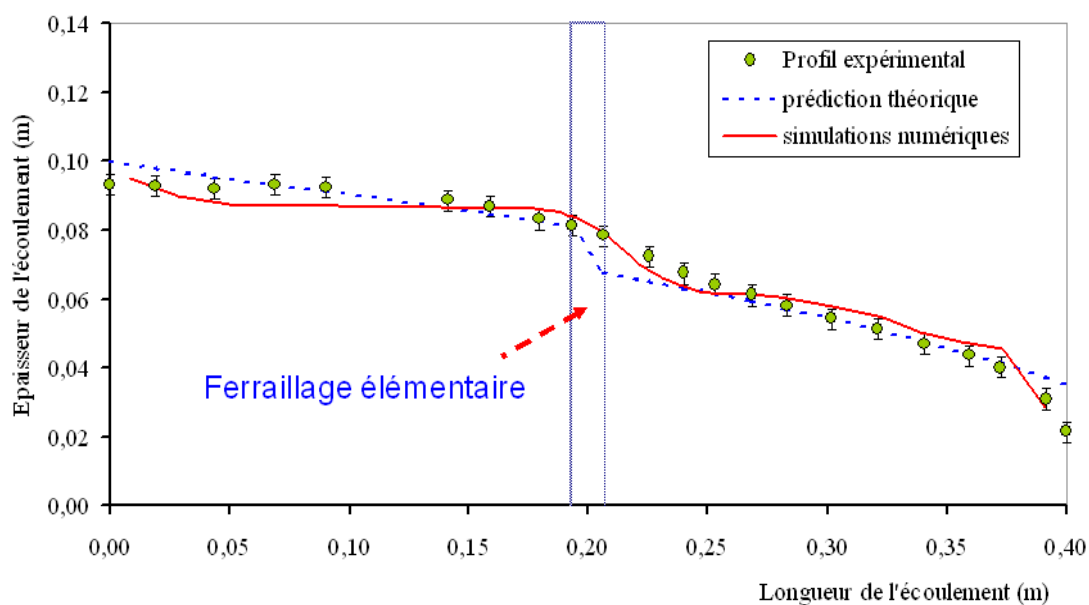


Figure 5.15: Profil à l'arrêt d'un échantillon de 6 l de Carbopol (seuil d'écoulement = 51 Pa) passant par le ferrailage élémentaire FE a14e25. Comparaison entre solution théorique, mesure expérimentale et simulation numérique par le code Flow-3D

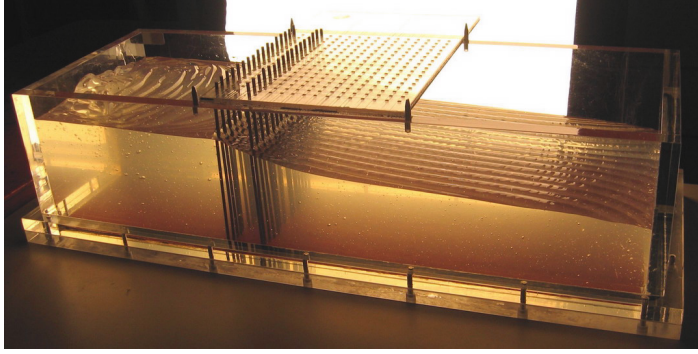


Figure 5.16: *Système expérimental pour les essais d'assemblage de deux ferraillements*

d'un coffrage. Dans la suite de ce chapitre, nous allons étudier l'extension du modèle proposé au cas d'assemblages de ferraillements élémentaires de façon à pouvoir réassembler les ferraillements élémentaires en un ferraillement réel.

5.4 Extension à un assemblage de deux ferraillements élémentaires

Nous avons proposé une expression de la perte de niveau locale due à la présence d'un ferraillement élémentaire en fonction des paramètres intrinsèques du fluide (τ_0 , ρ) et des caractéristiques géométriques du ferraillement (a , e). L'étape suivante est d'étudier le retour vers des ferraillements réels. Pour simplifier le problème, nous considérons tout d'abord uniquement des barres verticales. Mais l'effet d'un tel ensemble pourrait-il être simplement l'addition des effets individuels de tous les ferraillements élémentaires ? Pour répondre à ce questionnement, nous avons étudié la forme à l'arrêt des écoulements passant par des assemblages de deux ferraillements élémentaires d'écartement variable.

5.4.1 Etude expérimentale

L'objectif ici c'était que si on veut pouvoir réformer les ferraillements élémentaires, il faut pouvoir montrer que leur comportement fonctionnent de façon linéaire c'est-à-dire que la perte de niveau due au ferraillement élémentaire numéro 1 plus la perte de niveau due au ferraillement numéro 2 est égale à la perte de niveau due à l'assemblage du ferraillement composé par ces deux ferraillements. Pour ce faire, nous avons assemblé deux ferraillements élémentaires et étudié l'évolution de leur impact sur l'écoulement en fonction de leur écartement longitudinal.

Les ferraillements élémentaires considérés dans cette section sont constitués de 17 barres d'acier de 3 mm de diamètre espacées de 8 mm. Les barres d'acier sont fixées momentanément à une plaque perforée (cf. Fig.5.16). Le premier ferraillement élémentaire se trouve toujours au premier rang de la plaque tandis que le deuxième ferraillement est déplacé progressivement entre deux essais pour varier l'écartement longitudinal entre ferraillements : $z = 8$ à 173 mm.

Le protocole d'essai est similaire à celui utilisé dans le cas d'un unique ferraillement élémentaire : 12 l de matériau ont été vidés lentement dans le canal de 600 mm de longueur et 200 mm de largeur. Deux valeurs de seuil d'écoulement ont été étudiées, qui s'agissent de 22 et 40 Pa. La figure 5.17 représente, à titre d'illustration, 2 des essais réalisés.

Les essais similaires ont été également réalisés sur les ferraillements F a6δ16, F a10δ16 et F a14δ25. Dans ces cas, cependant, seul un écartement a été étudié ($z = 200$ mm).

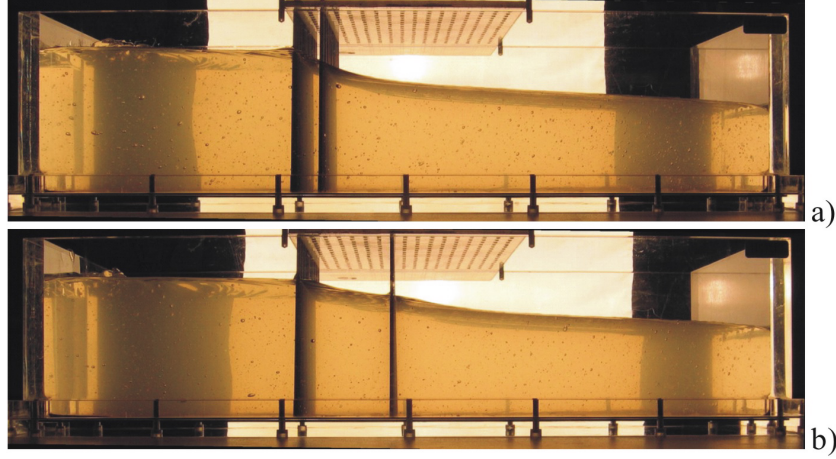


Figure 5.17: *Écoulement à travers un assemblage de deux ferraillements élémentaires verticaux. Seuil d'écoulement du matériau 40 Pa. Écartement longitudinal entre deux ferraillements est de 19 mm (a) et de 74 mm (b)*

5.4.2 Résultats

La figure 5.18 récapitule les profils expérimentaux des écoulements de Carbopol de 40 Pa passant par des assemblages de ferraillements élémentaires FE *a3e8* d'écartements z variables. Le cas de l'écoulement passant par un seul ferraillement élémentaire FE *a3e8* fournit un profil de référence.

5.4.3 Analyses et discussions

Les essais dans le cas d'un ferraillement élémentaire nous ont montré qu'il existe une zone de perturbation au voisinage des barres d'acier mais la taille de cette zone ne peut pas encore être identifiée. La perte de niveau locale due à un ferraillement élémentaire est calculée selon l'approche proposée (cf. Eq. 5.4 ou Eq. 5.7) en ne pas prenant compte cette zone de perturbation, ce qui amène au fait qu'une addition ne peut être réalisée lorsque les ferraillements élémentaires de l'assemblage s'écartent suffisamment loin les uns les autres en étant dehors des zones de perturbation. Afin d'identifier cet écartement critique, considérons maintenant l'évolution de la perte de niveau expérimentale des écoulements passant des assemblages de deux ferraillements élémentaires d'écartement variable.

Supposons maintenant qu'à un écartement de 200 mm, deux ferraillements se trouvent en dehors de la zone de perturbation l'un de l'autre. Imaginons un assemblage de deux ferraillements de l'écartement de 200 mm, la perte de niveau totale due à cet assemblage ($\Delta h_{2FE_z=200mm}^{expé}$) peut être calculée comme deux fois la perte de niveau due à la présence d'un seul ferraillement élémentaire de mêmes caractéristiques géométriques ($\Delta h_{FE}^{expé}$). Traçons maintenant dans la figure 5.22 le rapport de la perte de niveau due à un assemblage sur celle due à un autre assemblage de mêmes caractéristiques géométriques mais d'écartement de 200 mm ($\Delta h_{2FE}^{expé} / \Delta h_{2FE_z=200mm}^{expé}$) en fonction de l'écartement relatif entre deux ferraillements (z/a).

Il est montré que ce n'est à une distance supérieure à approximativement 50 fois le diamètre de la barre d'acier que deux ferraillements élémentaires puissent être considérés comme des obstacles indépendants l'un de l'autre à l'écoulement. Un écartement relatif minimum entre deux ferraillements élémentaires de l'ordre de 50 fois du diamètre de la barre d'acier ne peut pas être respecté dans la réalité, ce qui justifie que les armatures dans les coffrages influencent de manière dépendante les unes des autres sur l'écoulement de béton pendant la mise en œuvre. Il est donc impossible de

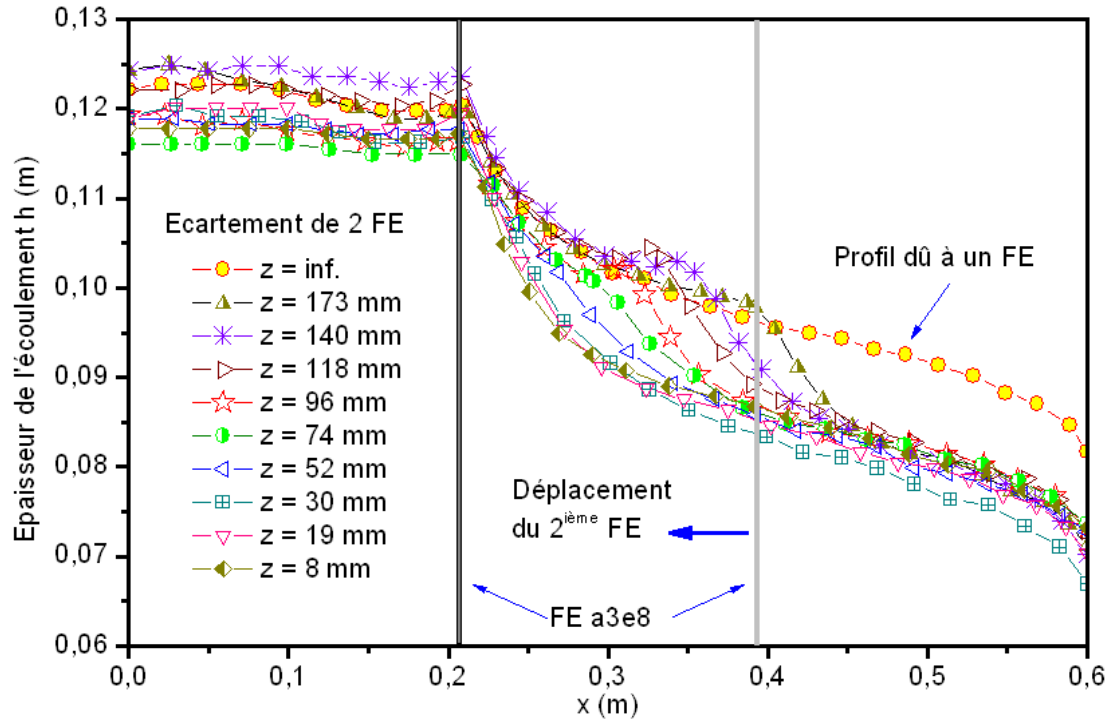


Figure 5.18: Profils expérimentaux des suspensions de Carbowol de 40 Pa dûs à la présence de deux ferraillements élémentaires FE a3e8 d'écartement (z) variable.

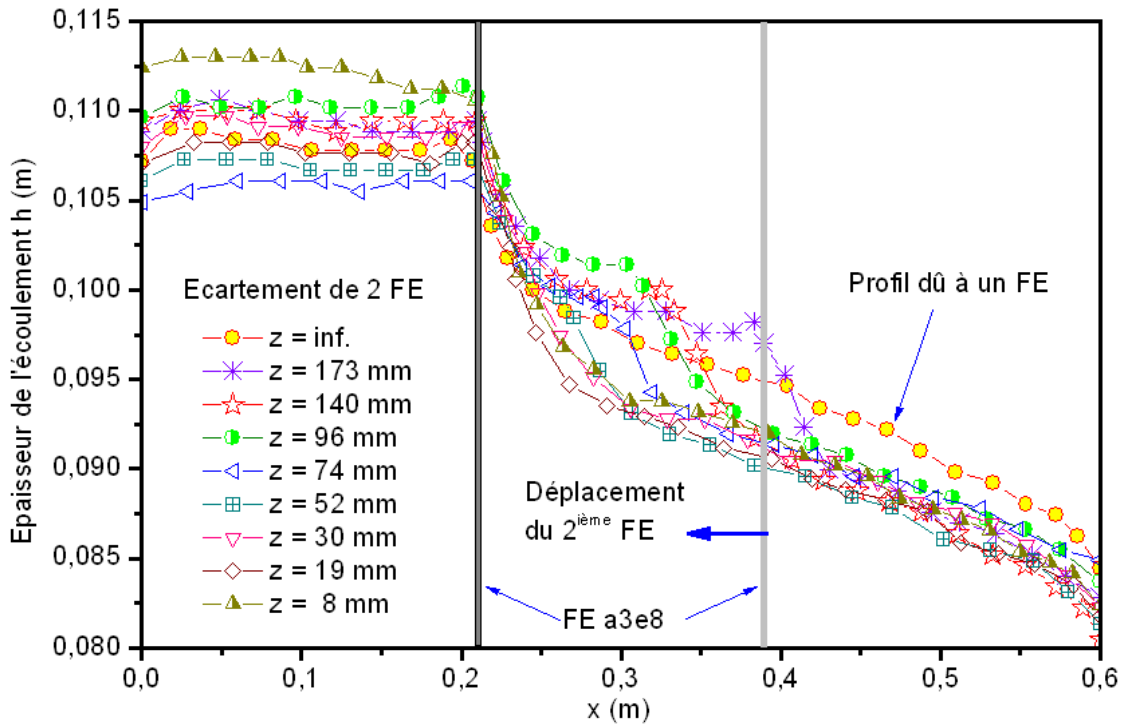


Figure 5.19: Profils expérimentaux des suspensions de Carbowol de 22 Pa dûs à la présence de deux ferraillements élémentaires FE a3e8 d'écartement (z) variable.

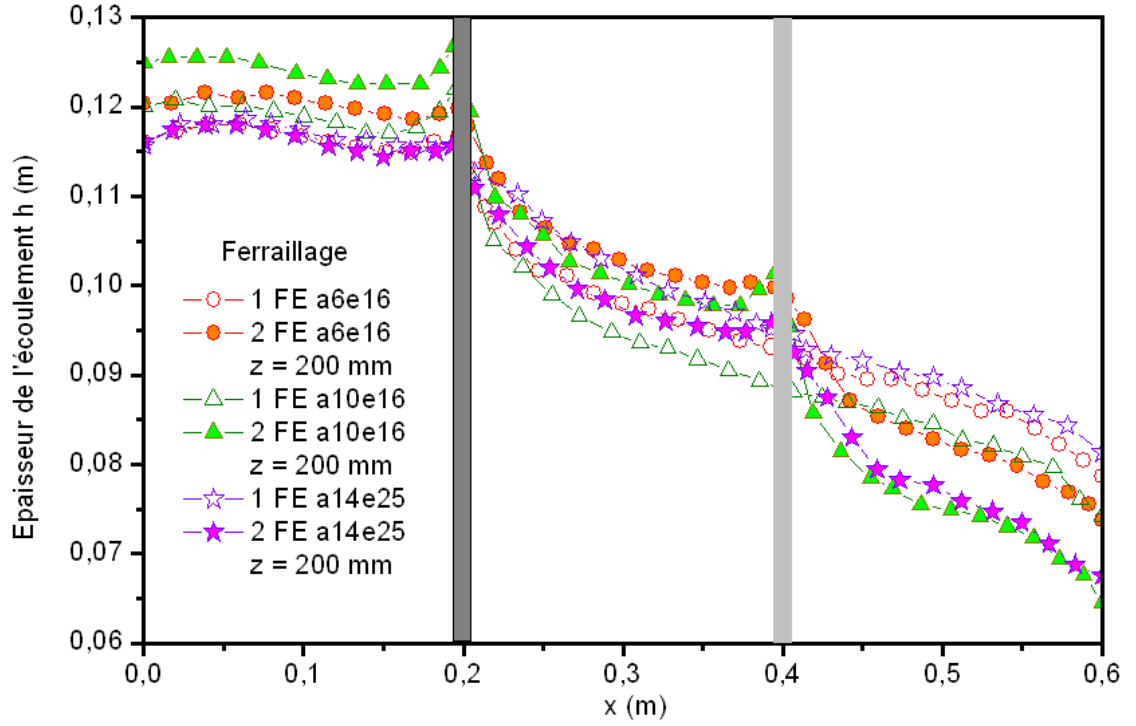


Figure 5.20: Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 40 Pa dûs à la présence d'un FE ou d'un assemblage de deux FE d'écartement $z = 200$ mm.

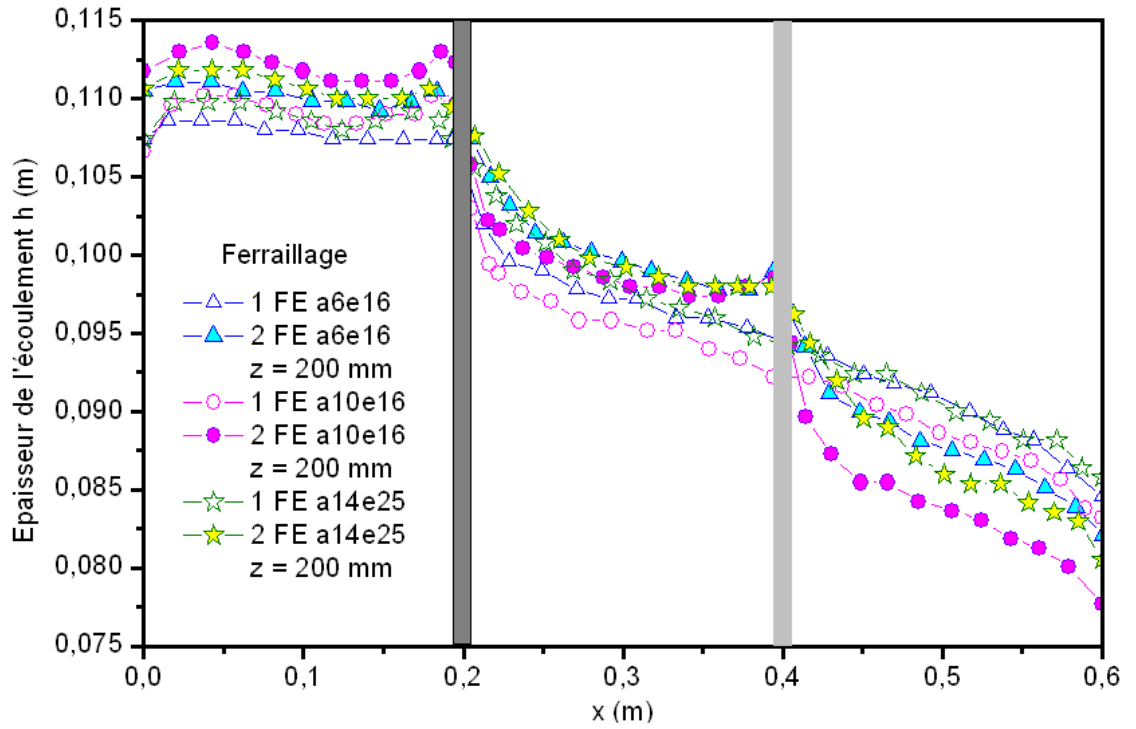


Figure 5.21: Profils expérimentaux des suspensions de Carbopol de 22 Pa dûs à la présence d'un FE ou d'un assemblage de deux FE d'écartement $z = 200$ mm.

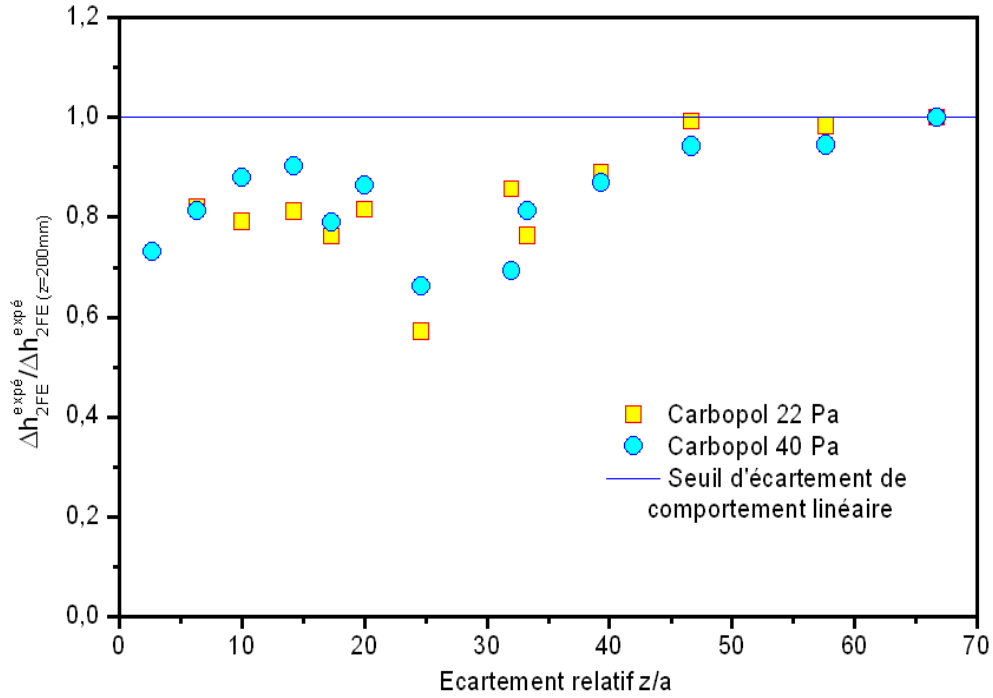


Figure 5.22: Rapport de la perte de niveau due à un assemblage de 2 FE sur celle due à un autre assemblage de 2 FE dont $z = 200$ mm en fonction de l'écartement relatif

prédire la perte de niveau des écoulements due à un assemblage de ferraillements réel en additionnant l'effet de chaque ferraillement élémentaire.

5.4.4 Conséquence sur la modélisation numérique

Comme nous venons de le voir, le comportement des ferraillements réels n'est pas linéaire. En conséquence, lors de leur modélisation numérique, il est impossible de déduire le comportement d'un ferraillement réel en modélisant celui d'un seul ferraillement élémentaire composant puis en déduisant l'effet du ferraillement réel à partir d'une bibliothèque de ferraillements élémentaires simulés numériquement. Il est donc nécessaire de modéliser barre par barre l'ensemble des armatures. Ceci implique un coût en temps de calcul très élevé. Au vu de cette conclusion, nous avons décidé de nous orienter vers une analogie ferraillement/milieu poreux. Ce sujet sera traité dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

Remplissage d'un coffrage ferraillé - Approche homogénéisée

Sommaire

6.1 Etudes expérimentales sur matériau modèle	72
6.1.1 Procédé d'essai	72
6.1.2 Résultats expérimentaux	73
6.2 Analogie avec un milieu poreux	74
6.3 Etudes sur matériaux réels	78
6.3.1 Etudes expérimentales sur mortiers et bétons	78
6.3.1.1 Matériau	78
6.3.1.2 Mesure du seuil des mortiers	79
6.3.1.3 Mesure du seuil des bétons	79
6.3.1.4 Essai de propagation dans un milieu poreux équivalent	80
6.3.1.5 Résultats	80
6.3.2 Analyse	80
6.4 Application de l'approche du milieu poreux équivalent	84

Le résultat du paragraphe précédent nous a montré qu'il n'est généralement pas possible d'additionner l'influence des ferraillements élémentaires pour en déduire l'effet d'un assemblage. Une piste alternative serait de considérer la zone ferraillée comme un milieu poreux dans lequel se propage le béton. Pour une bonne compréhension de ce phénomène (influence des caractéristiques intrinsèques du mélange et de la géométrie des obstacles), nous avons mené une étude expérimentale en assemblant des ferraillements élémentaires et étudiant l'évolution de la perte de niveau totale des écoulements passant par cet assemblage en fonction des configurations des ferraillements élémentaires.

6.1 Etudes expérimentales sur matériau modèle

6.1.1 Procédé d'essai

12 l de fluide modèle (de 22 ou 40 Pa) sont versés dans un canal ($L_0 = 600$ mm et $l_0 = 200$ mm) contenant une zone ferraillée occupant le tronçon de 200 mm au milieu du canal (cf. Fig. 6.1). Cet assemblage est constitué de barres d'acier de 3 mm de diamètre. Les barres d'acier sont fixées momentanément à une plaque perforée. Le diamètre des trous est de 3 mm ($\pm 0,1$ mm) et l'écartement entre deux trous est de 8 mm. Le nombre et la position relative des barres d'acier ont été

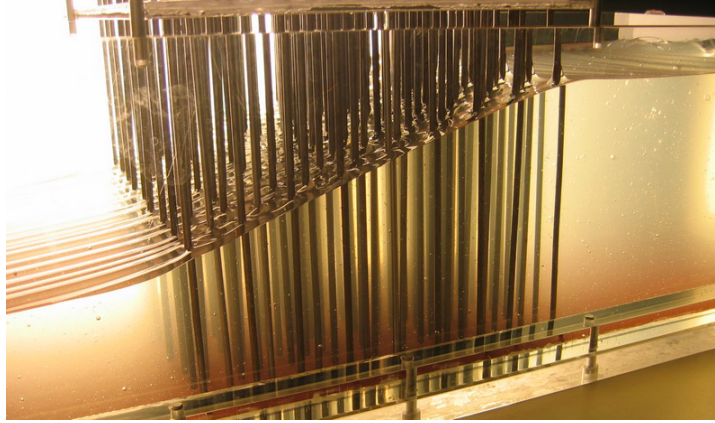


Figure 6.1: *Écoulement d'une suspension de Carbopol passant à travers une zone ferrailée en canal horizontal*

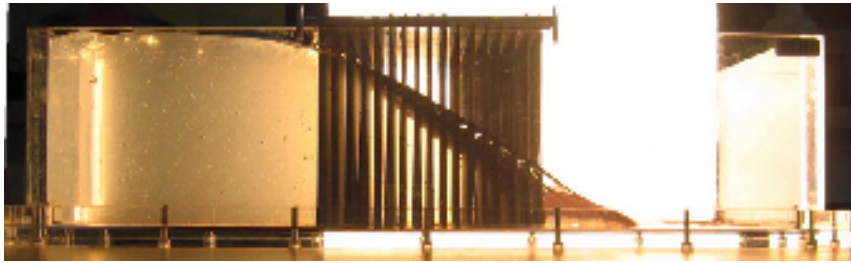


Figure 6.2: *Forme à l'arrêt d'un écoulement d'une suspension de Carbopol de 40Pa passant par une zone très ferrailée désignée C e8z8*

variés progressivement pour créer différentes configurations (désigné par C). Comme dans les essais d'assemblage de deux ferraillements élémentaires, nous désignons par e l'écartement entre deux barres dans la direction perpendiculaire à l'écoulement et par z celui dans la direction de l'écoulement. Une configuration est donc caractérisée par une dimension dans le sens de l'écoulement (z) et une autre dimension perpendiculaire à l'écoulement (e). Afin de déterminer le paramètre dominant du problème, nous avons étudié différentes configurations de caractéristiques géométriques isotropes ($e = z$) ou anisotropes ($e \neq z$).

Le protocole d'essai est similaire à celui utilisé dans les sections précédentes. Avant chaque essai, les barres d'aciers sont toutes enlevées, nettoyées et séchées puis mises en position.

6.1.2 Résultats expérimentaux

Pour toutes les configurations considérées dans ce chapitre, des pertes de niveau importantes entre les épaisseurs de matériau en amont et en aval de la zone ferrailée ont été observés (cf. Fig. 6.1).

Les figures 6.2 et 6.3 représentent respectivement, à titre d'exemple, la forme à l'arrêt d'une suspension de Carbopol de 40 Pa et 22 Pa passant par les configurations C e8z8 et C e19z8. Le matériau a beaucoup de difficultés à traverser le milieu ferrailé alors que la suspension de Carbopol de 22 Pa traverse plus aisément le milieu ferrailé pour atteindre l'extrémité du canal.

Le bilan des profils expérimentaux est présenté sur les figures 6.4 (Carbopol de 40 Pa) et 6.5 (Carbopol de 22 Pa). De façon évidente, la perte de niveau apparente de l'écoulement entre amont



Figure 6.3: *Forme à l'arrêt d'un écoulement d'une suspension de Carbopol de 22 Pa passant par une zone très ferrailée désignée C e19z8*

et aval du milieu ferrailé est d'autant plus marquée que le seuil est grand. D'ailleurs, pour un même seuil d'écoulement du matériau, la perte de niveau varie d'une configuration à l'autre.

6.2 Analogie avec un milieu poreux

Dans un fluide parfait incompressible en régime permanent laminaire, la charge hydraulique :

$$\psi = p + \rho_f g z \quad (6.1)$$

est constante le long des lignes de courant.

Les expériences effectuées par Darcy à partir de 1854 dans la cour de l'hôpital de Dijon ont montré que le flux apparent d'un fluide (appelée aussi vitesse de Darcy) est proportionnel au gradient de pression effectif dans un milieu poreux :

$$\underline{v} = \frac{\underline{w}_f}{\rho} = -\underline{K} \text{grad} \psi = -\underline{K} \text{grad} (p + \rho g h) \quad (6.2)$$

Cette relation fait intervenir le tenseur de perméabilité $\underline{K}$ du milieu. C'est une section efficace d'écoulement qui quantifie la propension du milieu à laisser passer plus ou moins facilement les fluides qui le traversent. Le tenseur des perméabilités est symétrique défini positif : $K_{ij} = K_{ji}$. Dans le cas des milieux poreux isotropes, K devient un scalaire et la loi de Darcy générale s'écrit :

$$v = -K \text{grad}_x \psi \quad (6.3)$$

Il est aussi courant de relier la perméabilité K d'un milieu poreux au fluide avec une perméabilité absolue ou intrinsèque k qui ne dépend que des caractéristiques géométriques du milieu poreux :

$$K = \frac{k}{\mu} \quad (6.4)$$

avec μ la viscosité apparente du fluide considéré.

Dans le cas de nos écoulements à surface libre, le gradient de pression est proportionnel à la perte de niveau (ou d'épaisseur) Δh de l'écoulement entre amont et aval du milieu poreux :

$$\text{grad}_x \psi = -\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \quad (6.5)$$

où Δx est la longueur dans la direction x de ce milieu poreux.

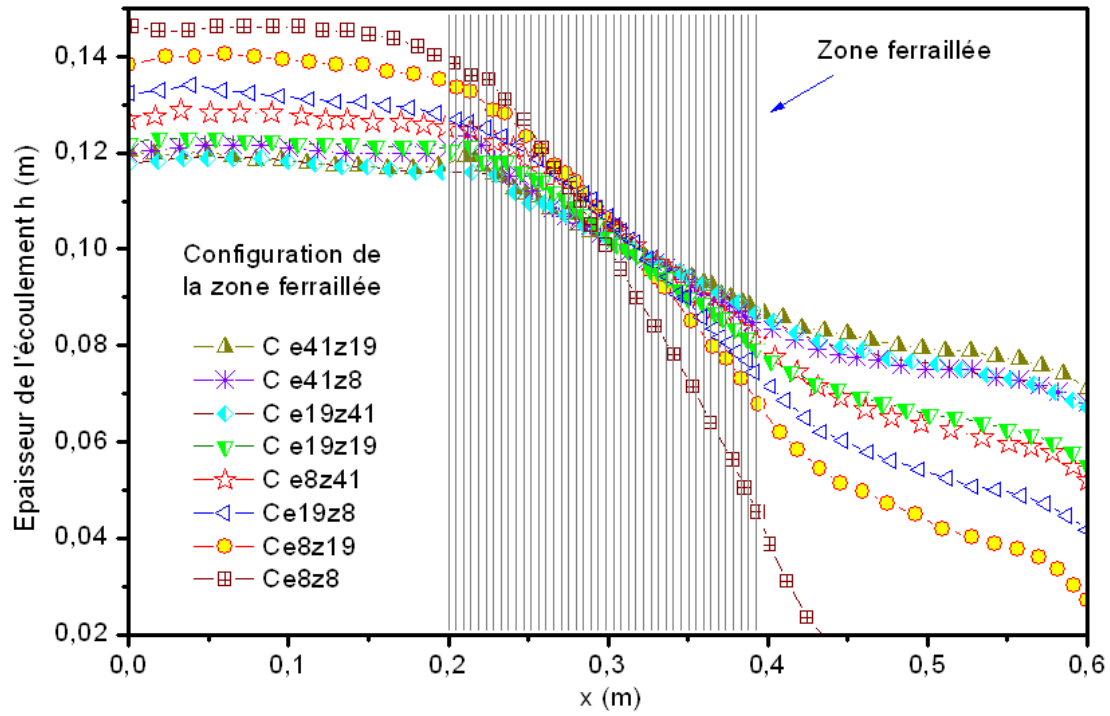


Figure 6.4: Profils expérimentaux des écoulements de Carbopol de 40 Pa passant par une zone ferrailée de configuration variable

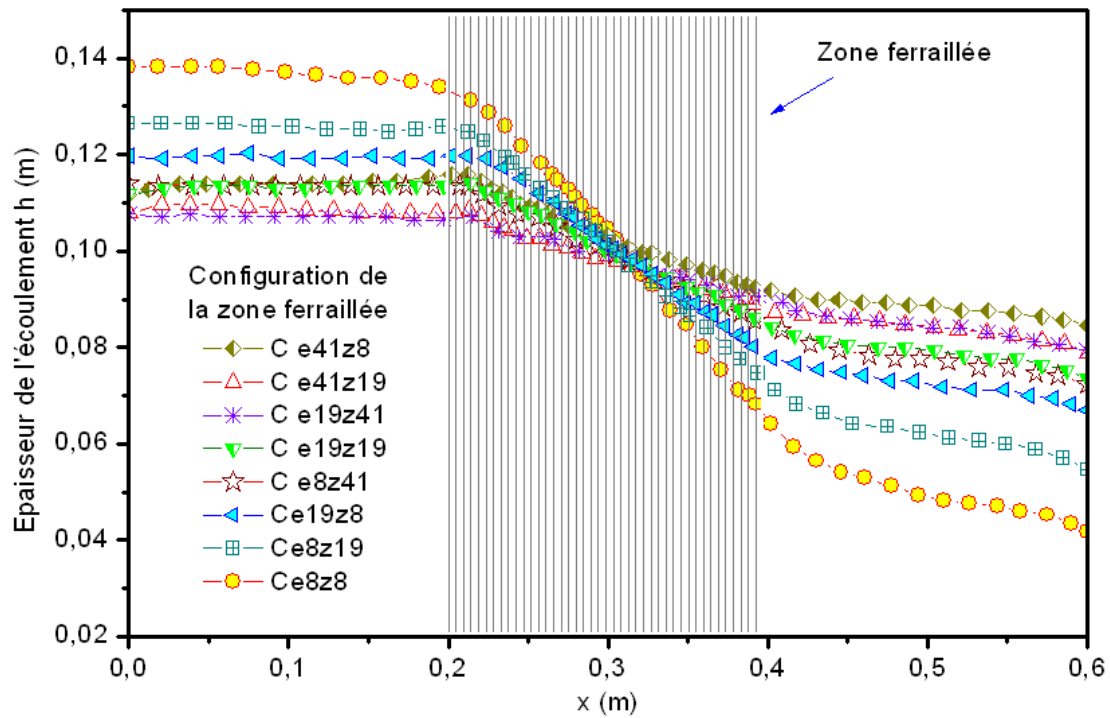


Figure 6.5: Profils expérimentaux des écoulements de Carbopol de 22 Pa passant par une zone ferrailée de configuration variable

Si nous considérons un milieu poreux composé de plans parallèles, le gradient de pression généré la propagation d'un fluide Newtonien dans ce milieu est lié avec la caractéristique géométrique du milieu comme suivant [117] :

$$\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} = -\frac{\mu}{k} v \quad (6.6)$$

avec $k = \frac{e_{plans}^2}{3}$. [117] dont e_{plans} est l'écartement entre deux plans parallèles.

Pour un fluide à seuil, l'écoulement à travers des plans parallèles ne peut avoir lieu que si le gradient de pression est supérieur à une valeur critique :

$$\left(\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \right)_c = -\frac{e_{plans}}{3} \frac{\tau_0}{k} = -\frac{M_{plans} \tau_0}{k} \quad (6.7)$$

avec $M_{plans} = \frac{e_{plans}}{3}$

Si nous considérons un milieu poreux composé de cylindres parallèles de rayon r_{cyl} , la vitesse d'écoulement d'un fluide dans un cylindre peut être écrit selon la loi de Beckingham Zeiner [58] :

$$v = \frac{\pi r_{cyl}^4}{8 \eta_{pl}} \frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{2 \tau_0}{\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} r_{cyl}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \tau_0}{\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} r_{cyl}} \right)^4 \right] \quad (6.8)$$

Dans le cas des fluides Newtoniens, $\tau_0 = 0$ et l'équation 6.8 est simplifiée à :

$$v = \frac{\pi r_{cyl}^4}{8 \eta_{pl}} \frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \quad (6.9)$$

Le gradient de pression généré la propagation d'un fluide Newtonien dans un milieu poreux composé de cylindres parallèles est lié avec la caractéristique géométrique du milieu de cette façon :

$$\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} = -\frac{\mu}{k} v \quad (6.10)$$

avec $k = \frac{r_{cyl}^2}{8}$. dont r_{cyl} est le rayon d'un cylindre.

L'écoulement d'un fluide à seuil ne peut avoir lieu que si le gradient de pression est supérieur à une valeur critique :

$$\left(\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \right)_c = -\frac{r_{cyl}}{4} \frac{\tau_0}{k} = -\frac{M_{cyl} \tau_0}{k} \quad (6.11)$$

avec $M_{cyl} = \frac{r_{cyl}}{4}$.

Les relations 6.7 et 6.11 permettent de corréler la perte de niveau d'un fluide à seuil traversant un milieu poreux avec les caractéristiques intrinsèques du matériau et de ce milieu poreux. Nous nous apercevons que, quel que soit la configuration du milieu, la propagation d'un fluide à seuil dans lequel est liée à la configuration géométrique représentée par une distance caractéristique M . L'écoulement d'un fluide à seuil ne peut avoir lieu que si le gradient de pression généré est supérieur à une valeur critique déterminée généralement selon cette relation :

$$\left(\frac{\rho g \Delta h}{\Delta x} \right)_c = -\frac{M \tau_0}{k} \quad (6.12)$$

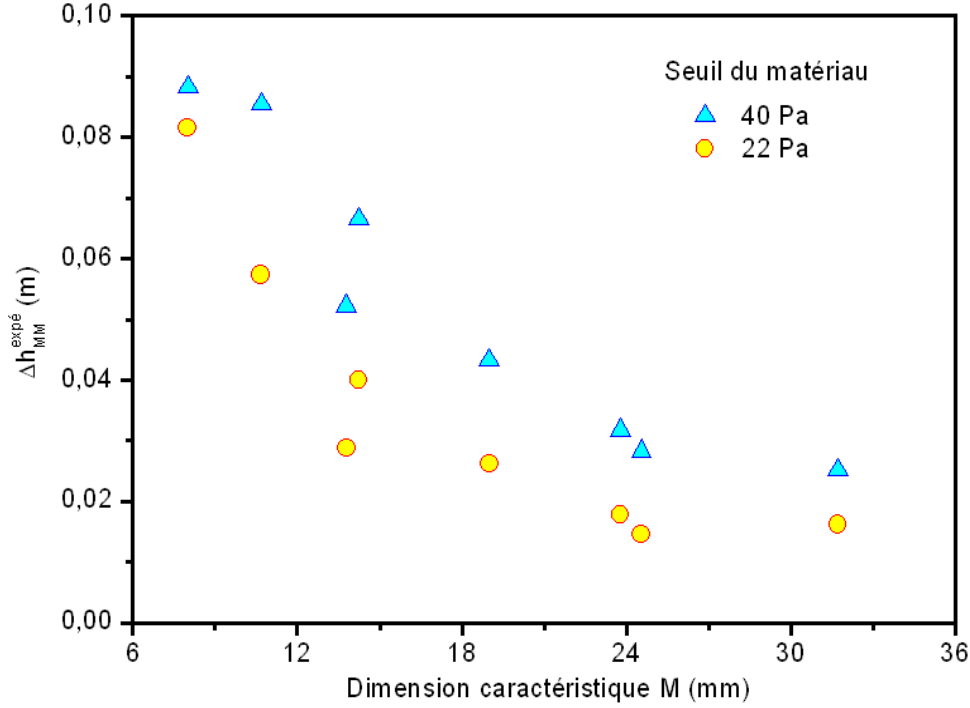


Figure 6.6: Perte de niveau mesurée expérimentalement sur des écoulements de Carbopol passant par différentes zones ferraiées en fonction de leur dimension caractéristique M

dans laquelle la distance caractéristique M dépend de la configuration géométrique du milieu poreux.

Nous avons adapté la corrélation 6.12 dans le cas de milieu poreux composé de barre d'acier verticale répartissant dans deux directions du plan de l'écoulement. La différence des configurations modèles de zones ferraiées, réside dans la variation bidirectionnelle des écartements entre deux barres d'acier (e et z) alors que l'écoulement est unidirectionnel. En conséquence, il y a sans aucun doute une direction plus privilégiée que l'autre. Concernant la distance caractéristique M du milieu poreux équivalent à la zone ferraiée, nous choisissons de considérer une valeur moyenne géométrique :

$$M = \sqrt[3]{e^2 z} \quad (6.13)$$

Traçons maintenant dans la figure 6.6 les valeurs mesurées expérimentalement de la perte de niveau due à différentes zones ferraiées en fonction de la dimension caractéristique M calculée selon l'équation 6.13. La perte de niveau est une fonction décroissante de M . Ceci est logique et explique le fait que la perte de niveau tendra vers l'infini lorsqu'un écartement entre barres devient infiniment petit d'une part, et que la perte de niveau due à un milieu poreux avoisine la perte de niveau naturelle du fluide à seuil lorsque les écartements tendent vers l'infini.

La perméabilité intrinsèque k calculée selon l'équation 6.12 est ensuite tracée en fonction de la distance caractéristique M (cf. Fig. 6.7). Il est intéressant de noter que la perméabilité intrinsèque ainsi présentée ne dépend pas du seuil d'écoulement mais seulement de la distance caractéristique, autrement dit des caractéristiques géométriques des zones ferraiées. Pour chaque valeur de M , différents écoulements de différentes valeurs de seuil fournissent une seule valeur de perméabilité k . Ceci confirme les arguments théoriques utilisés dans les calculs ci-dessus.

Nous disposons ainsi maintenant d'un outil à même de caractériser la capacité d'un milieu poreux à se laisser traverser par un fluide à seuil homogène à partir de ses caractéristiques géométriques.

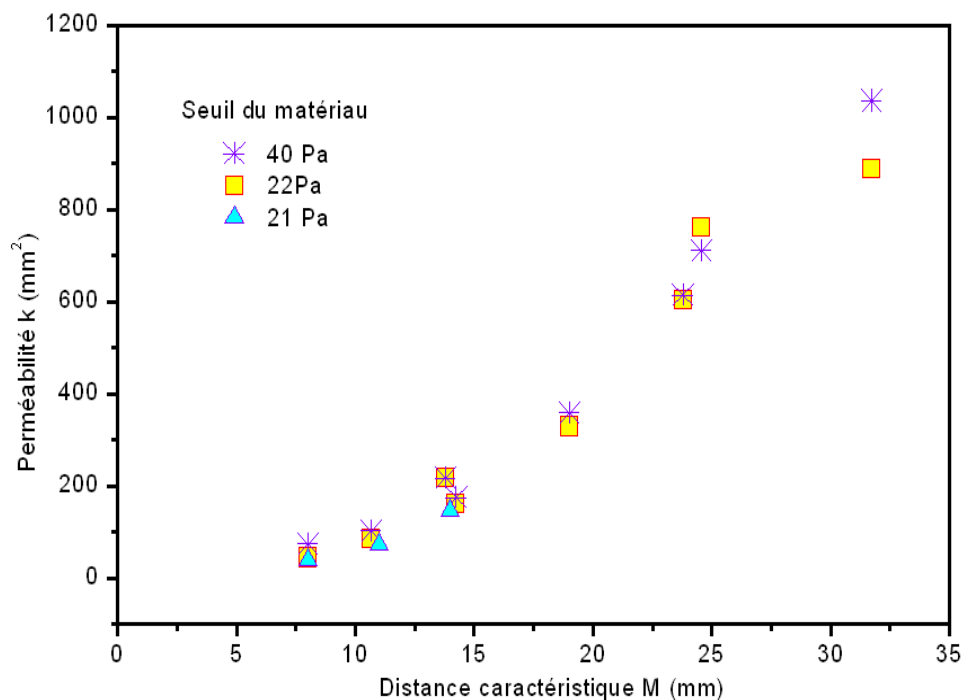


Figure 6.7: Evolution de la perméabilité d'un milieu poreux équivalent en fonction de sa distance caractéristique

Cependant, les ferraillements réels sont beaucoup plus compliqués que nos ferraillements modèles, et, afin de prédire la mise en œuvre des bétons, il nous faut encore généraliser l'application de cette approche.

6.3 Etudes sur matériaux réels

L'approche de prédiction de la propagation d'un fluide à seuil homogène dans un milieu poreux équivalent à une zone ferrillée a été proposée en se basant sur les résultats expérimentaux obtenus sur des suspensions de Carbopol, c'est à dire des fluides à seuil qui ne contient pas de particules. Dans l'étape suivante, nous avons décidé d'étudier les matériaux réels tels que mortiers et bétons en vue de révéler l'effet de la présence des particules de taille variable sur la propagation des écoulements.

6.3.1 Etudes expérimentales sur mortiers et bétons

6.3.1.1 Matériau

Nous avons étudié des BAP et des mortiers directement issus de leur composition, c'est à dire formulés en n'enlevant que les gros granulats (4/12, 5 mm). La composition des mortier comprend : du ciment CEMI 52, 5, du filler calcaire, du superplastifiant et de l'agent viscosant. L'objectif était d'obtenir des matériaux contenant des particules de taille variable et ayant des seuils d'écoulement couvrant une large gamme.

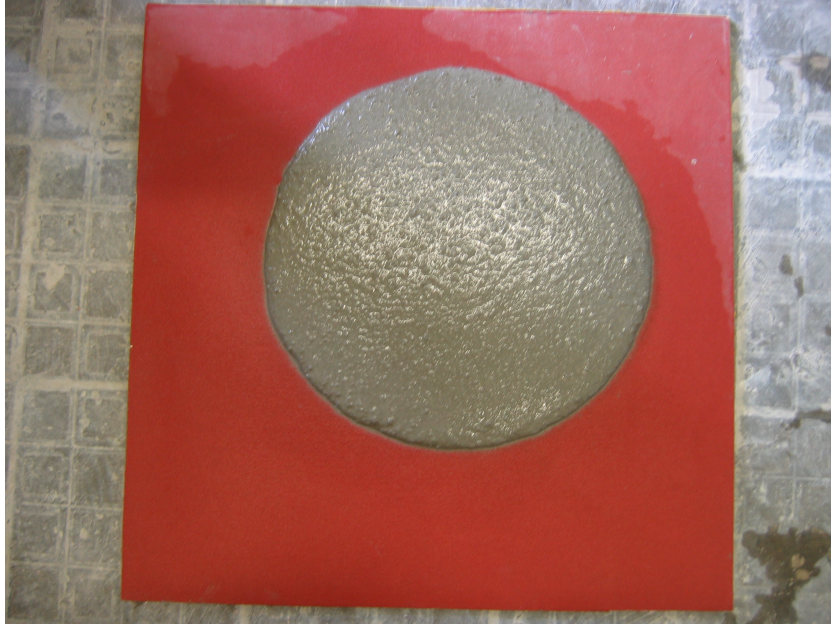


Figure 6.8: *Essai d'étalement pour mesurer le seuil d'écoulement d'un mortier*

6.3.1.2 Mesure du seuil des mortiers

Le seuil d'écoulement des mortiers a été mesuré grâce à l'essai d'étalement décrit dans [99]. Le protocole d'essai suivant est répété pour chaque mesure : Un volume Ω de 1 l de matériau est prélevé dans un récipient pré-marqué. Le contenu du récipient est vidé lentement sur une plaque horizontale couverte du papier verre. Après l'arrêt de l'écoulement, l'étalement (le diamètre) de la "galette" est mesuré (cf. Fig. 6.8) à partir duquel nous déduisons le rayon R . Le seuil d'écoulement du matériau est ensuite calculé selon la corrélation suivante [99] :

$$\tau_0 = \frac{225\rho g\Omega^2}{128\pi^2 R^5} \quad (6.14)$$

6.3.1.3 Mesure du seuil des bétons

L'approche proposée dans le chapitre 3 de ce travail permet de prédire la forme à l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil en canal horizontal non ferrailé dont le seuil est connu. Cette approche peut être aussi utilisée, à partir d'une méthode inverse, comme un essai pour quantifier le seuil d'écoulement à partir de mesures de la forme de l'échantillon à l'arrêt de l'écoulement [118]. En principe, ceci ressemble à l'essai d'étalement au cône [99]. Contrairement à l'essai d'étalement au cône, l'essai d'étalement en canal convient particulièrement à des matériaux contenant de grosses particules tels que le béton car la dimension caractéristique (*i.e.* l'épaisseur) de l'écoulement est grande devant la taille des particules et satisfait ainsi la condition d'un milieu homogène et continu (cf. section 3.1).

Le protocole d'essai suivant est répété pour chaque mesure : Un volume $\Omega = 6$ l de matériau est prélevé dans un seau pré-marqué. Le contenu du seau est vidé lentement dans un canal horizontal de largeur $l_0 = 0,2$ m et de longueur $L_0 = 0,9$ m. Après l'arrêt de l'écoulement, on mesure la longueur de l'écoulement L (cf. Fig. 6.9). Le seuil d'écoulement du matériau est ensuite calculé selon les équations 4.6 et 4.9.



Figure 6.9: *Essai d'étalement en canal pour mesurer le seuil d'écoulement d'un béton*

6.3.1.4 Essai de propagation dans un milieu poreux équivalent

Des écoulements de mortier ou de béton ont été réalisés à travers différents milieux poreux équivalents à des zones ferraillées (cf. Fig. 6.11). Le protocole d'essai est similaire à celui utilisé dans les essais sur des suspensions de Carbopol à travers des zones ferraillées.

Seuls les résultats des essais où le matériau reste homogène qui sont retenus. La figure 6.10 illustre par exemple l'hétérogénéité induite par l'écoulement d'un BAP de 26 Pa à travers un milieu poreux équivalent composé des barres d'acier espacées de 19 mm. Puisque les granulats sont bloqués au droit des armatures laissant couler la pâte de ciment, la propagation de l'écoulement dans le milieu penche plutôt vers une filtration du matériau. Ceci fera l'objet du chapitre 6.

Différents cas ont été observés : le matériau peut traverser le milieu poreux équivalent pour atteindre l'autre extrémité du canal (cf. Fig. 6.11) ou il peut ne pas traverser le milieu (cf. Fig. 6.12)

6.3.1.5 Résultats

Certains profils expérimentaux des écoulements de mortier et de béton passant par différents milieux poreux équivalents sont représentés, à titre d'exemple, sur les figures 6.13 et 6.14. De façon évidente, nous nous apercevons que la perte de niveau apparente due au milieu poreux équivalent est d'autant plus marquée que le seuil est grand.

6.3.2 Analyse

La figure 6.15 récapitule les valeurs de perte de niveau expérimentale de différents matériaux passant par différentes configurations du milieu poreux équivalent. Dans le cas des bétons, puisque ceux-ci présentent différentes valeurs de seuil d'écoulement, une grande dispersion de la perte de niveau a été observée.

Nous avons ensuite adapté les équations 6.12 et 6.13 dans le cas des mortiers et des bétons. La figure 6.16 représente les valeurs de la perméabilité intrinsèque k des matériaux en fonction de la

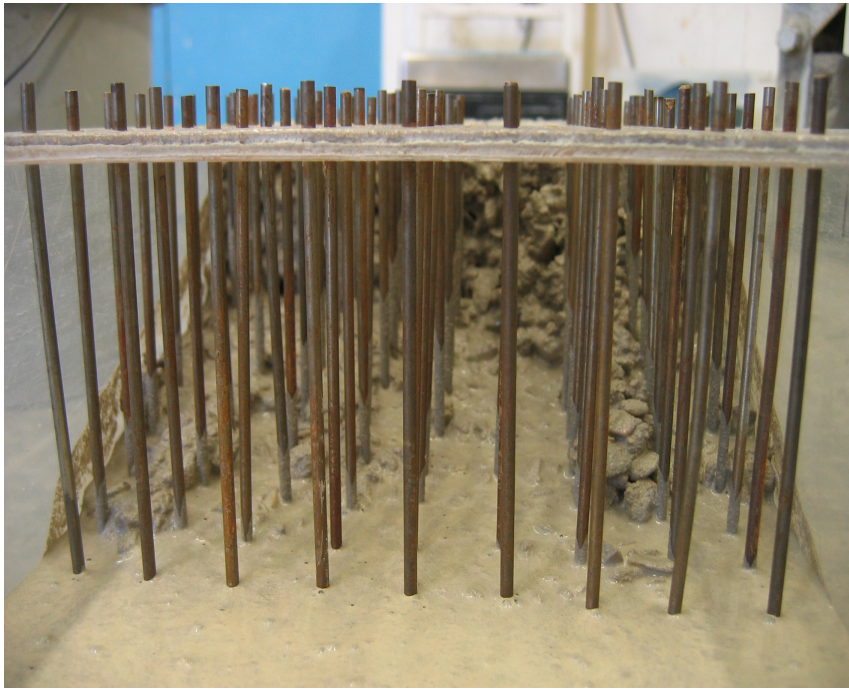


Figure 6.10: *Blocage granulaire de l'écoulement d'un BAP de 26 Pa au passage à travers une zone ferrailée de configuration C e19z19*

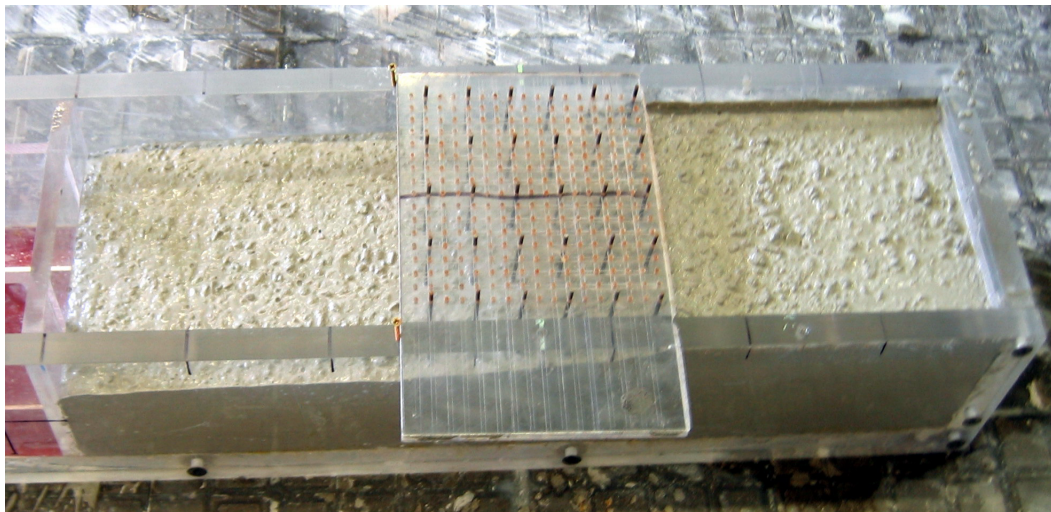


Figure 6.11: *Essai du béton passant par une zone ferrailée*

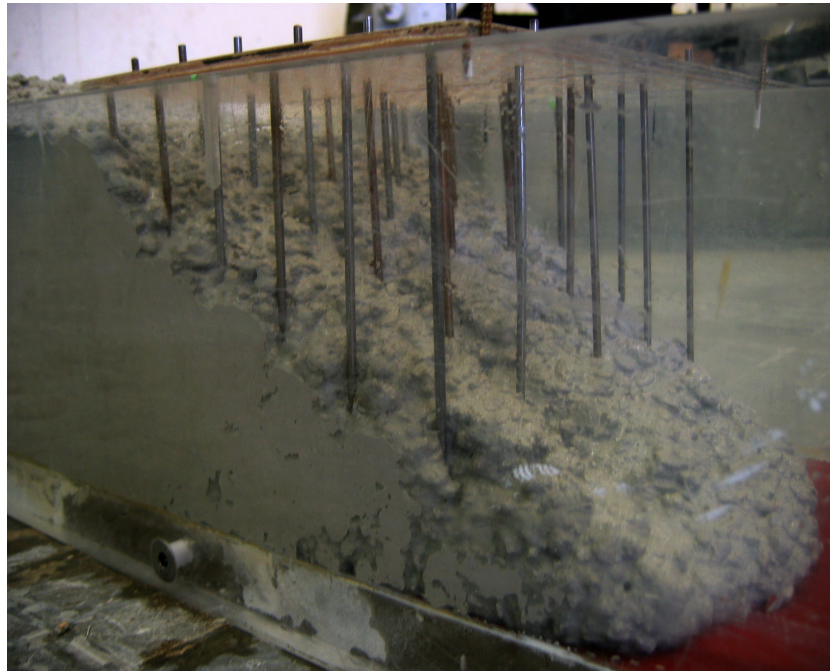


Figure 6.12: Blocage dû au seuil d'un BAP de 149 Pa au passage d'une zone ferrailée C e41z30

Seuil d'écoulement du mortier - Configuration de la zone ferrailée

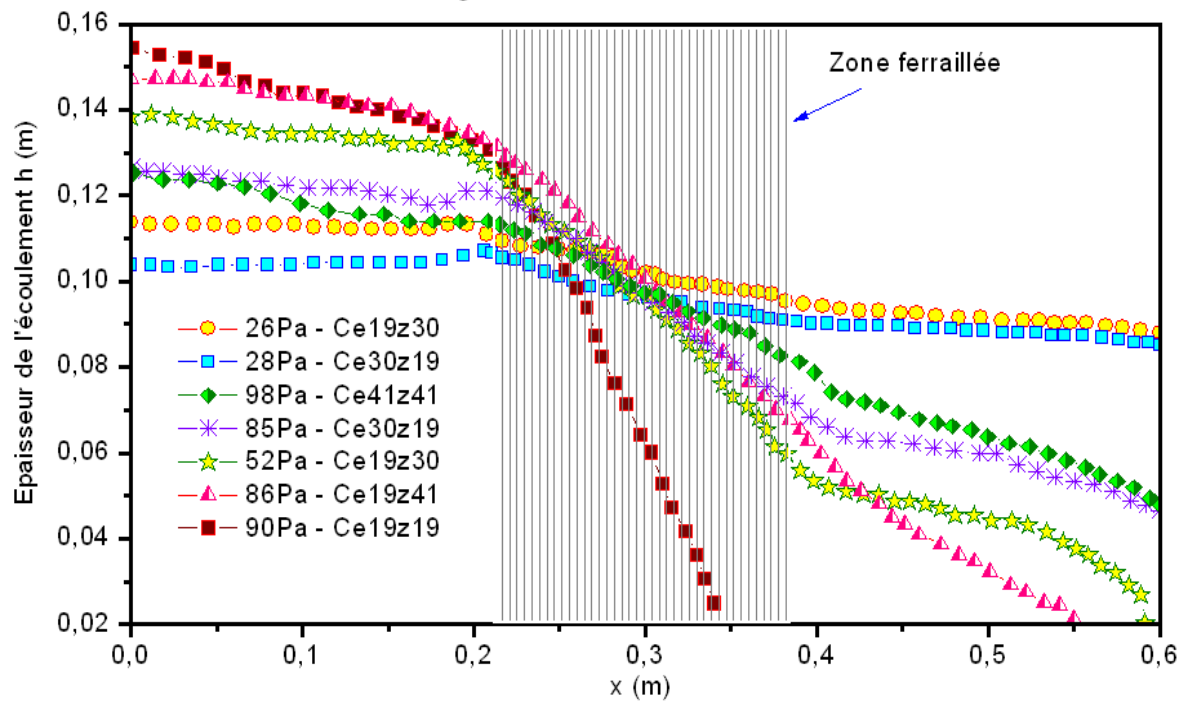


Figure 6.13: Profils expérimentaux des écoulements de mortier passant par une zone ferrailée de configuration variable

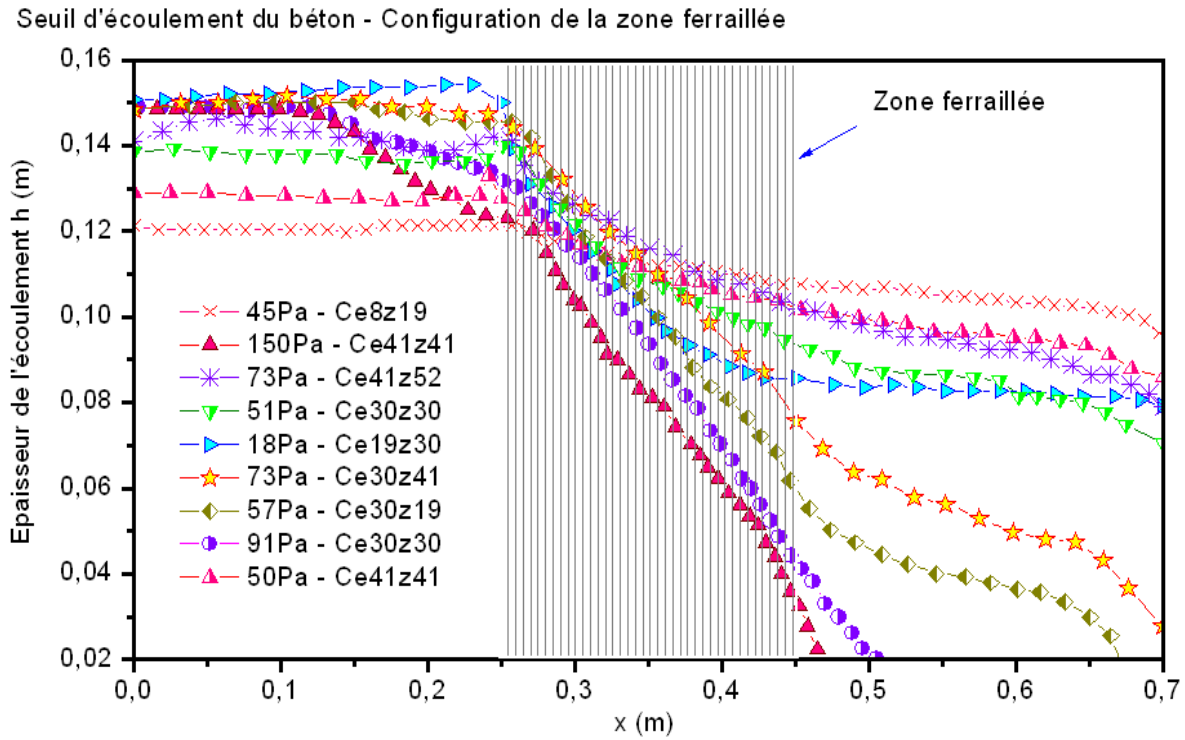


Figure 6.14: *Profils expérimentaux des écoulements de béton passant par une zone ferrailée de configuration variable*

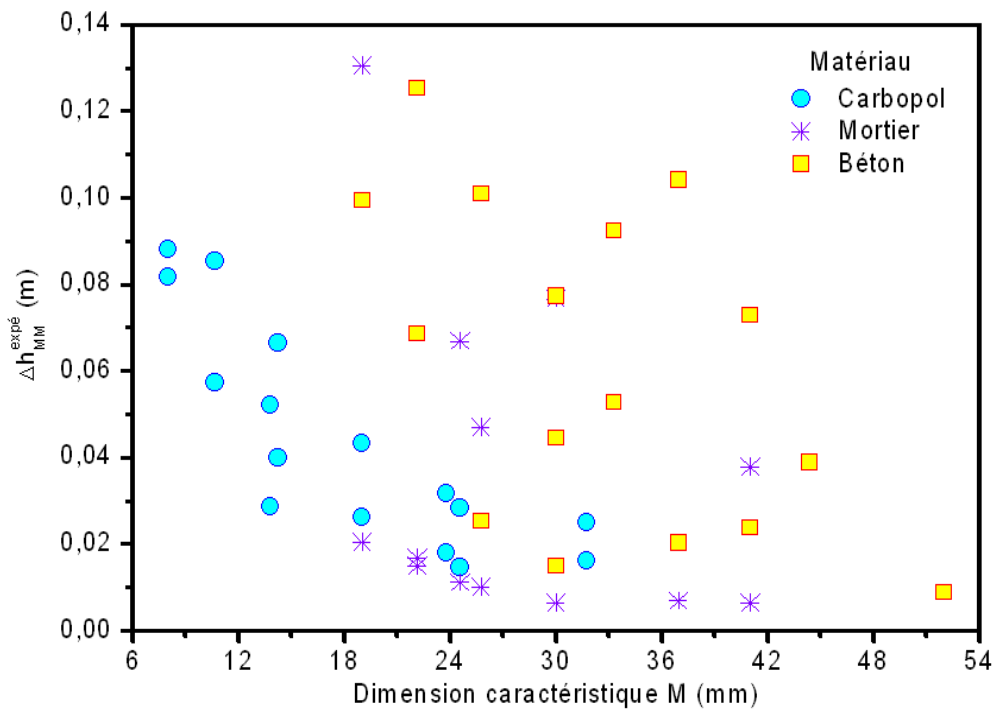


Figure 6.15: *Perte de niveau due au milieu poreux équivalent mesurée expérimentalement sur différents matériaux en fonction de la distance caractéristique*

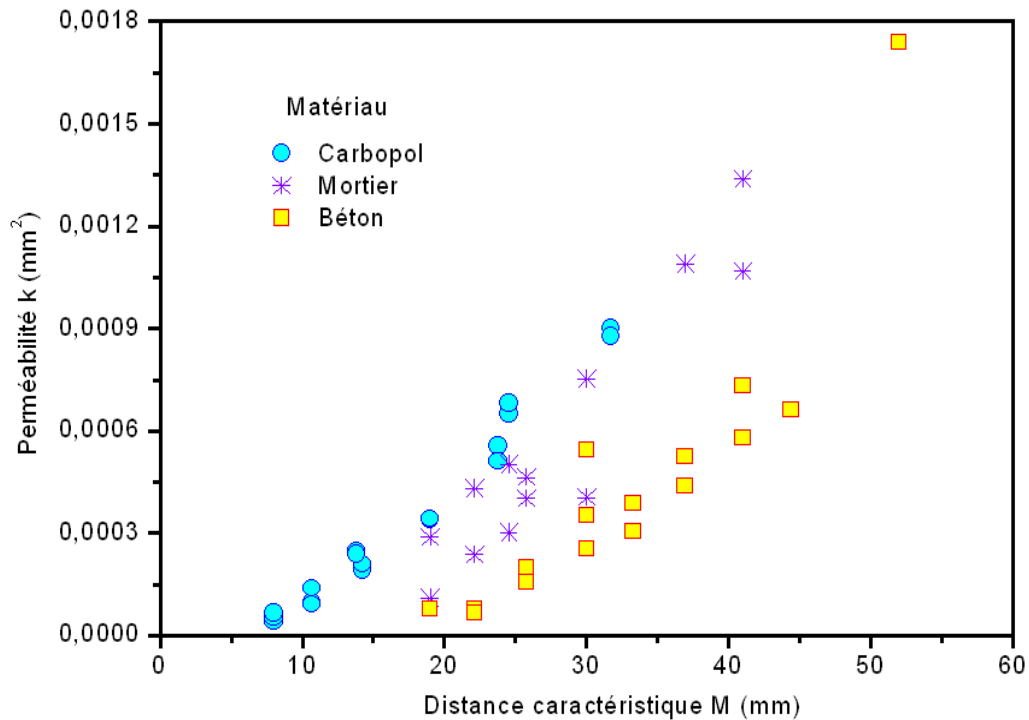


Figure 6.16: *Perméabilité intrinsèque mesurée expérimentalement sur différents matériaux en fonction de la distance caractéristique*

distance caractéristique M des milieux poreux équivalents. En effet, des remarques intéressantes peuvent être tirées.

Comme dans le cas des suspensions de Carbopol, pour les mortiers et les bétons étudiés, la relation 6.12 entre la perméabilité intrinsèque et la distance caractéristique est vérifiée. Cette relation est indépendante de la valeur de seuil du matériau, ce qui convient à l'approche proposée. Il existe cependant un écart entre les courbes obtenues pour ces trois matériaux : ce sont le sable 0/4 pour les mortiers et le graviers 4/12, 5 comblé par le sable 0/4 pour les bétons. Même si les écoulements de mortiers et de bétons testés sont homogènes, aucun phénomène de sédimentation ou de blocage n'est observé, les frottements granulat-granulat et granulat-barres d'acier induits par les inclusions peuvent impliquer des dissipations d'énergie importantes au sein du matériau. Ceci explique l'écart des courbes " $k - M$ " correspondant à différents matériaux comme l'indique la figure 6.16.

6.4 Application de l'approche du milieu poreux équivalent

Considérons par exemple le plan de ferrailage d'un voile. A partir de l'approche du milieu poreux équivalent proposée, nous pouvons obtenir une cartographie de perméabilité pour ce voile. En effet, à partir des écartements entre barres d'acier dans chaque zone ferrailée, nous pouvons calculer (cf. Eq. 6.13) la distance caractéristique M pour tout le plan de ferrailage, puis en déduire (cf. Fig. 6.7) la carte de perméabilité du voile.

Cela pourrait de prédire numériquement la propagation d'un fluide à seuil homogène dans un milieu poreux avec la forme de perméabilité qui varie dans l'espace. A titre d'exemple, considérons le remplissage par injection de ce voile par un béton frais donné. Lorsque le béton aborde une zone poreuse difficile à traverser, il va remonter plus vite dans une autre direction dans laquelle son

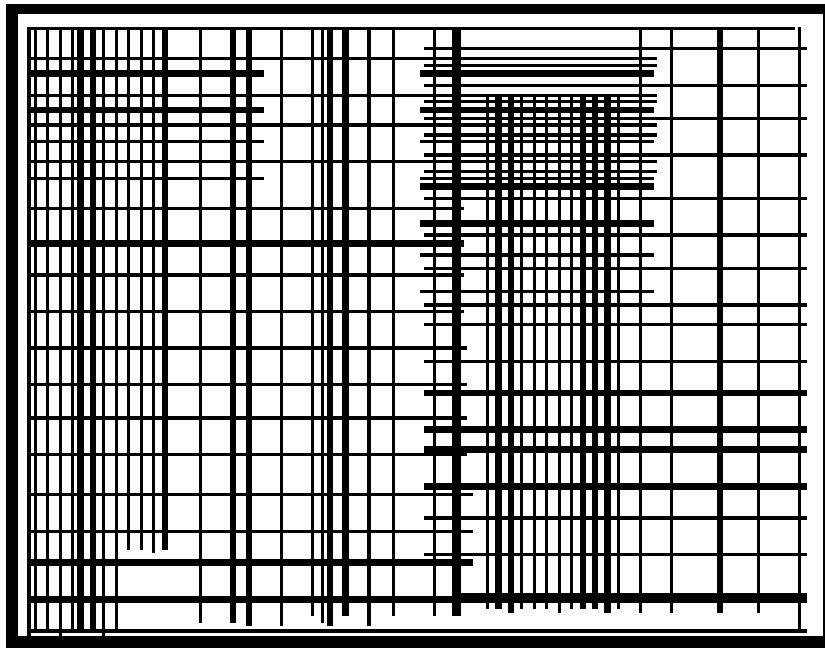


Figure 6.17: *Plan de ferrailage d'un voile*

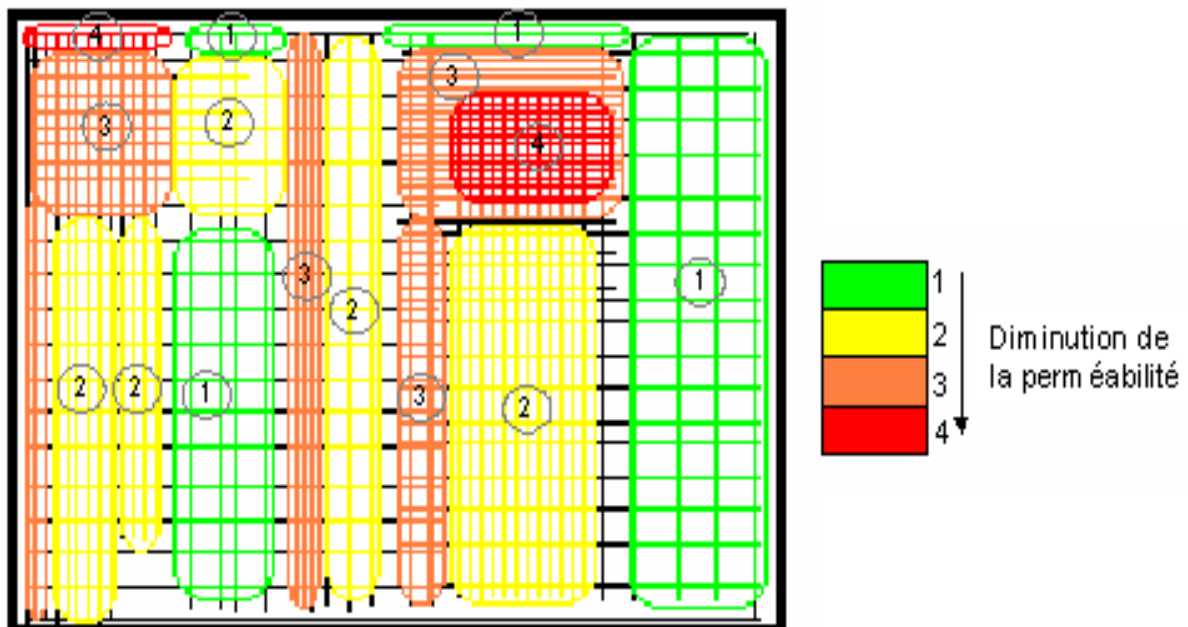


Figure 6.18: *Cartographie de perméabilité proposée par l'approche de milieu poreux pour le ferrailage du voile*

cheminement est plus aisé. A la fin de la mise en œuvre, nous pouvons observer des zones totalement remplies et des zones qui ne sont pas encore remplies où le béton n'a pas réussi de traverser les obstacles.

Cet exemple démontre l'intérêt de l'approche du milieu poreux équivalent, c'est aussi la dernière étape à franchir pour disposer d'un véritable outil d'ingénierie. Pour atteindre cet objectif, il reste à établir de véritables relations entre perméabilité et ferrailage quels que soient le diamètre et l'écartement des barres ainsi que, comme nous l'avons vu, le diamètre des plus gros granulats.

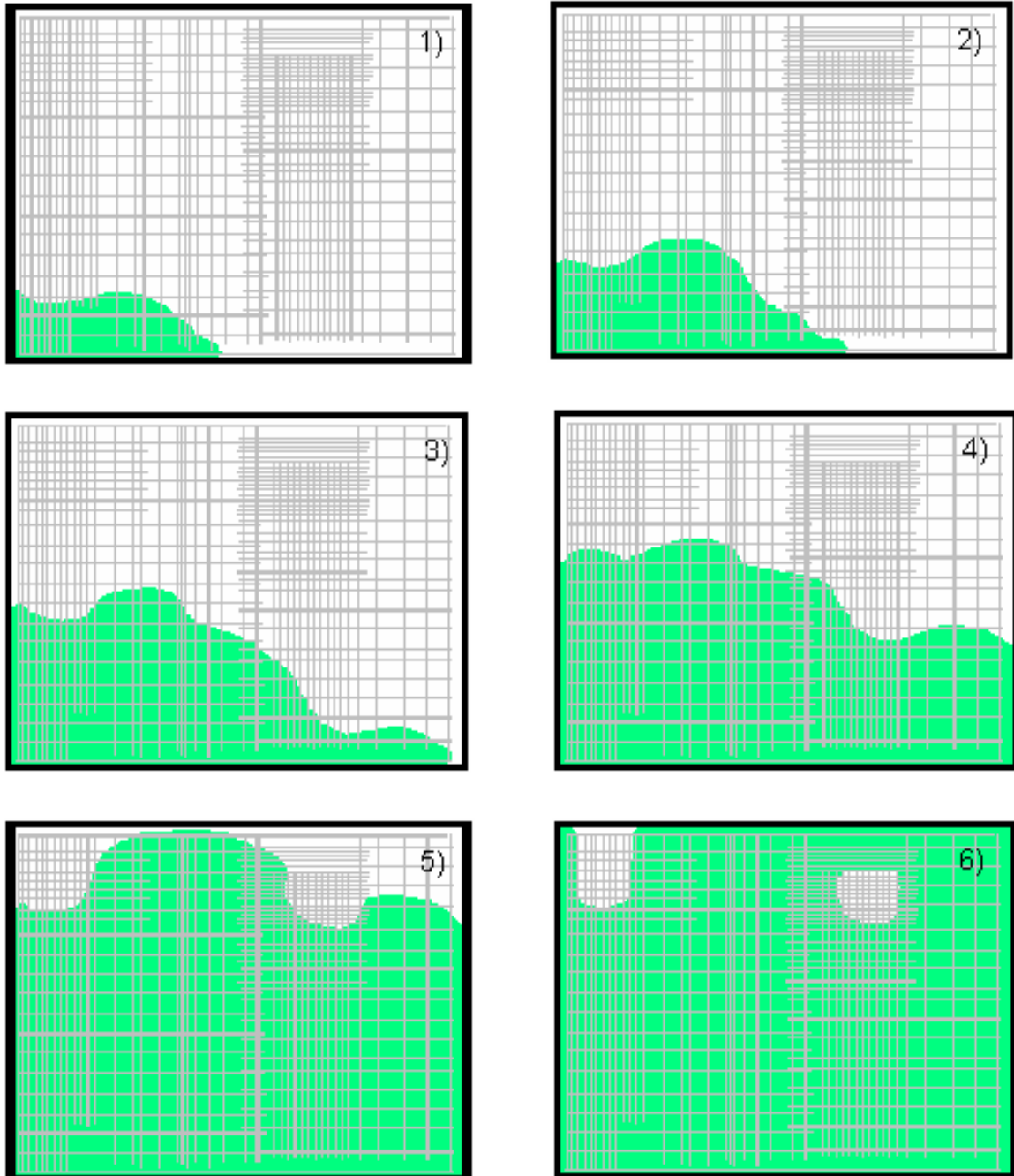


Figure 6.19: *Simulation numérique de la propagation d'un fluide à seuil homogène dans le voile*

Chapitre 7

Prise en compte des inclusions

Sommaire

7.1	Filtration d'un mélange granulaire dans un milieu poreux	89
7.2	Prédiction du blocage des particules sur tamis	90
7.2.1	Etudes expérimentales	90
7.2.1.1	Matériau	90
7.2.1.2	Protocole d'essai	90
7.2.1.3	Analyse	90
7.2.2	Modèle probabiliste	92
7.2.2.1	Paramètres de base	92
7.2.2.2	Un processus de filtration non binaire	94
7.2.2.3	Implication du concept de probabilité	94
7.2.2.4	Formation des voûtes	96
7.2.2.5	Prédiction de l'apparition du blocage	98
7.2.2.6	Validation de l'approche proposée	99
7.2.3	Probabilité de blocage	101
7.2.4	Application à un milieu poreux	103
7.3	Prédiction du blocage des particules au passage d'un ferrailage hori- zontal	104
7.3.1	Etudes expérimentales	104
7.3.2	Extension du modèle probabiliste à la géométrie du ferrailage	104
7.3.3	Résultats	106
7.4	Etudes sur matériaux réels	106
7.4.1	Matériaux	106
7.4.2	Protocole d'essai	108
7.4.3	Résultats	108
7.5	Application du modèle pour prédire le blocage	110

Jusqu'ici, nous avons étudié des écoulements et leur arrêt en canal non ferrailé (cf. chapitre 3) et ferrailé (cf. chapitre 4 et 5) en considérant que le béton était un fluide à seuil homogène. Or, le béton n'est pas uniquement un fluide à seuil mais aussi un fluide à seuil chargé en inclusions (granulats) qui peuvent se bloquer au droit des armatures pendant l'écoulement. Ce chapitre met en évidence ce phénomène et étudie l'influence de la composition du matériau et de la géométrie des obstacles sur ce phénomène. Une méthode probabiliste de prédiction du blocage granulaire est finalement proposée. Ce travail a fait l'objet d'une publication [119] dont nous détaillons le contenu dans ce chapitre.

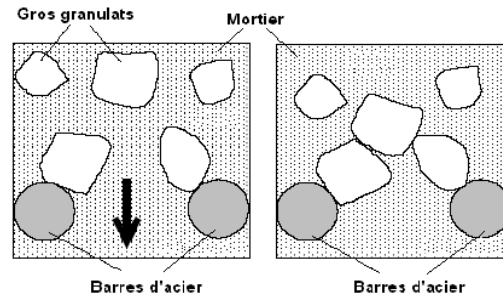


Figure 7.1: *Effet de voûte au niveau des armatures*



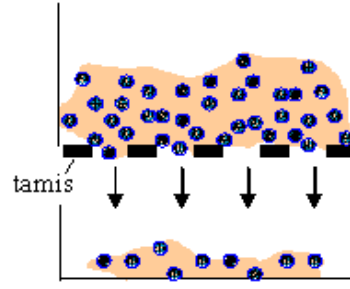
Figure 7.2: *Blocage granulaire d'un béton au passage des barres d'acier.*

7.1 Filtration d'un mélange granulaire dans un milieu poreux

Lors du passage du béton à travers des armatures, les plus gros granulats, généralement plus petits que l'écartement entre les barres, peuvent former des voûtes (cf. Fig. 7.1) au niveau de ces barres et donner lieu à un blocage granulaire (cf. Fig. 7.2). Ce phénomène rejoint la question de la filtration d'une suspension granulaire dans un milieu poreux. Celle-ci intervient dans de nombreux procédés industriels, depuis la pharmacie jusqu'à l'industrie pétrolière en passant par l'agroalimentaire, le traitement de l'eau, la chimie, le traitement des minerais, l'automobile et l'aéronautique. C'est un procédé qui permet de filtrer les particules présentes dans une suspension : les particules se coincent de façon définitive dans le milieu poreux. L'efficacité du procédé peut dépendre de plusieurs paramètres : le milieu poreux filtrant (*i.e.* la porosité, le diamètre des pores), les particules présentes dans la suspension (*i.e.* la concentration, la taille, la forme), les caractéristiques du fluide porteur (*i.e.* la viscosité apparente).

Le blocage peut se produire dans le cas de particules non colloïdales dont le diamètre est inférieur à la taille des pores, ce qui signifie que c'est essentiellement un effet collectif. En dépit de son importance pratique, peu d'études se sont concentrées sur les bases de ce phénomène [120, 121, 122, 123, 124, 125], et la plupart des approches précédentes étaient phénoménologiques [126, 127, 128, 129, 130].

Dans ce travail, à partir d'expériences simples sur des suspensions de particules non-colloïdales en suspension dans différents fluides qui s'écoulent sous l'effet de la gravité à travers un tamis (cf. Fig. 7.3), nous montrons que le blocage est un problème de probabilité, *i.e.* un nombre suffisant de particules doit être présent en même temps dans une certaine configuration. Nous décrivons ce processus à l'aide d'un modèle simple qui prédit nos données expérimentales et pourrait servir de base générale pour la modélisation de la filtration dans toutes les autres situations.

Figure 7.3: *Essai de blocage au tamis*

7.2 Prédiction du blocage des particules sur tamis

7.2.1 Etudes expérimentales

7.2.1.1 Matériau

L'essai consiste à verser une suspension contenant des billes de verre sphériques monodisperses de taille variable et en concentration volumique variable à travers un tamis dont la taille des mailles est elle-aussi variable. Nous nous plaçons dans des conditions simplificatrices : fluide viscoplastique non thixotrope, billes sphériques monodisperses, absence de sédimentation des billes, configuration d'obstacle simple et facile à caractériser (tamis). Les tamis sont constitués de mailles carrées dont l'ouverture d est dans la gamme 0,63 à 16 mm. Les fils du tamis sont d'épaisseur l . Les suspensions ont été fabriquées à partir des billes de verre de diamètre moyen d_0 ($\pm 3\%$) dans la gamme de 0,5 à 7 mm mélangées dans une suspension de Carbopol ou une suspension de glycérol Newtonienne (viscosité de 0,745 Pa.s). La fraction volumique ϕ (rapport du volume des particules solides à celui de l'échantillon) est inférieure à 40%. A une telle concentration, le comportement de la suspension est dicté principalement par celui de la phase liquide et non pas par celui du squelette granulaire [4]. Grâce à la viscosité des fluides (et au faible diamètre des particules (0,5 mm) utilisées dans le cas des suspensions de glycérol), la sédimentation des inclusions était négligeable durant nos essais (cf. section 3.3.3).

7.2.1.2 Protocole d'essai

Pour chaque essai, nous avons versé un volume constant ($\Omega = 0,7$ l) de mélange dans un cylindre (diamètre $d_{cyl} = 10$ cm) dont le fond était couvert par un film plastique très mince. L'ensemble est posé sur un tamis (cf. Fig. 7.4a). Le film est ensuite retiré laissant la suspension s'écouler à travers le tamis sous l'effet de la gravité. A la fin de l'écoulement, les billes qui n'arrivent pas à traverser le tamis (cf. Fig. 7.4b, 7.5, 7.6) sont rincées soigneusement puis séchées à l'étuve avant d'être pesées (m). Le résidu R qui est égal au rapport de ce refus et de la masse initiale m_{in} des billes dans la suspension ($R = m/m_{in}$) est ensuite calculé.

7.2.1.3 Analyse

Nous nous plaçons dans des conditions où la taille de l'ouverture est toujours supérieure à la taille des billes, c'est-à-dire que, en cas de vibration, l'intégralité des billes va passer à travers le tamis. La figure 7.7 illustre le blocage de billes de 3 mm sur un tamis d'ouverture 5 mm. Comme évoqué ci-dessus, ceci signifie que le blocage est essentiellement un effet collectif : pour qu'il apparaisse, il faut un certain nombre de billes qui arrive en même temps à un même endroit. De plus, la

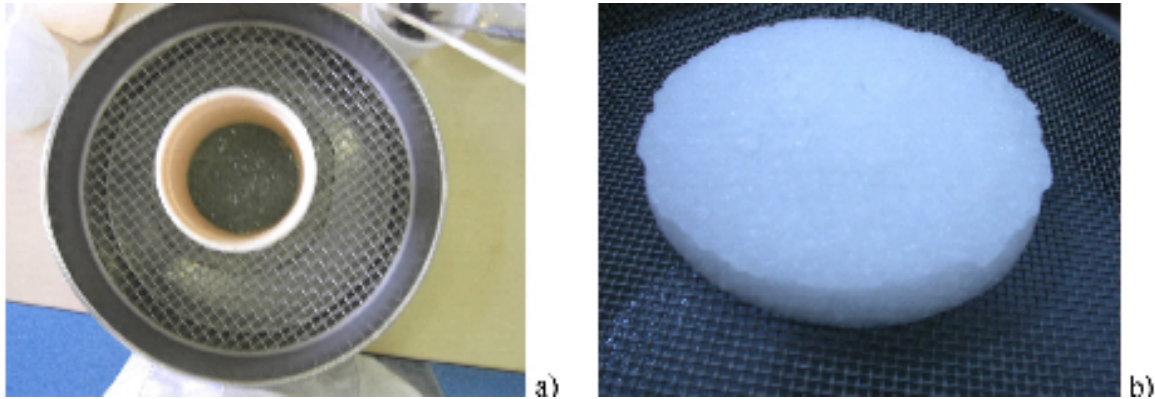


Figure 7.4: a) Essai de passage des suspensions de glycérol chargées en particules de $500\ \mu\text{m}$ à travers un tamis b) Résidu sur le tamis



Figure 7.5: Résidu d'un mélange granulaire de billes $5\ \text{mm}$ à concentration en solide $\phi = 30\%$ sur tamis d'ouverture $6,3\ \text{mm}$

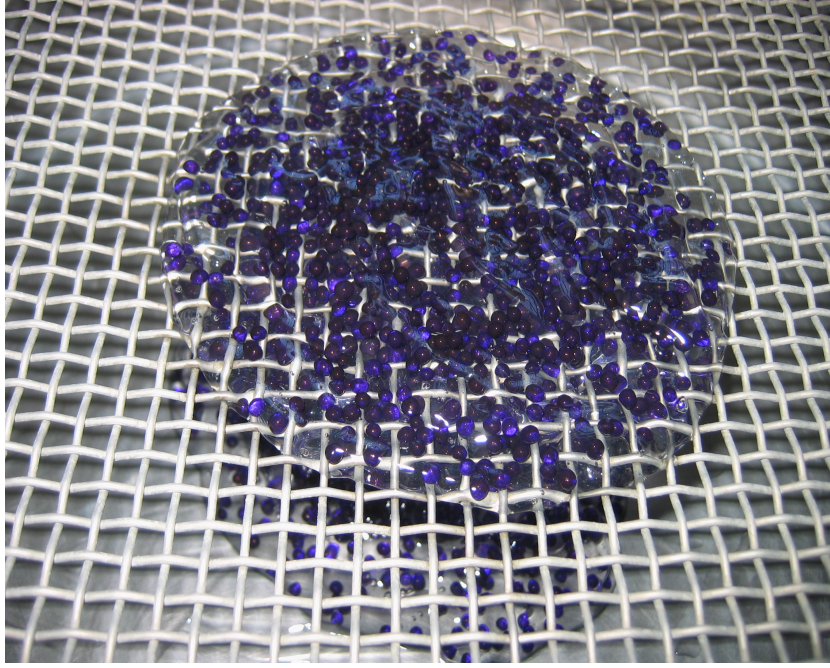


Figure 7.6: Résidu d'un mélange granulaire de billes 3 mm à concentration en solide $\phi = 25\%$ sur tamis d'ouverture 5 mm

reproductibilité des essais n'est pas très bonne : le résidu mesuré dans 30 essais dans les mêmes conditions expérimentales ($d = 8$ mm, $d_0 = 5$ mm, $\phi = 10\%$, seuil du fluide porteur $\tau_0^f = 33$ Pa) et varie entre 0,2 et 0,3 fluctue significativement autour d'une valeur moyenne (cf. Fig. 7.8). Ceci est étonnant car nous travaillons avec un écoulement dont les conditions initiales et conditions aux limites sont fixées, ce qui est normalement un processus très reproductible. Cependant, une définition exacte des conditions initiales implique une distribution précise des particules dans le fluide porteur et cette distribution conditionne la fluctuation des données. Le phénomène de blocage est donc fondamentalement un problème de probabilité.

Au vu de la fluctuation des résultats obtenus, nous avons réalisé chaque essai trois fois. Chaque résultat présenté dans la suite de ce chapitre correspond donc à une valeur moyenne obtenue sur trois essais.

Nous avons réalisé également des expériences similaires sur des grains secs à une fraction solide égale approximativement à 60%.

7.2.2 Modèle probabiliste

7.2.2.1 Paramètres de base

Un volume Ω de suspension chargée en particules du diamètre d_0 à une concentration ϕ contient un nombre total de billes égal à :

$$N = \frac{6\Omega\phi}{\pi d_0^3} \quad (7.1)$$

Considérons un tamis d'ouverture d composé de fils d'épaisseur l , le nombre de mailles présentes

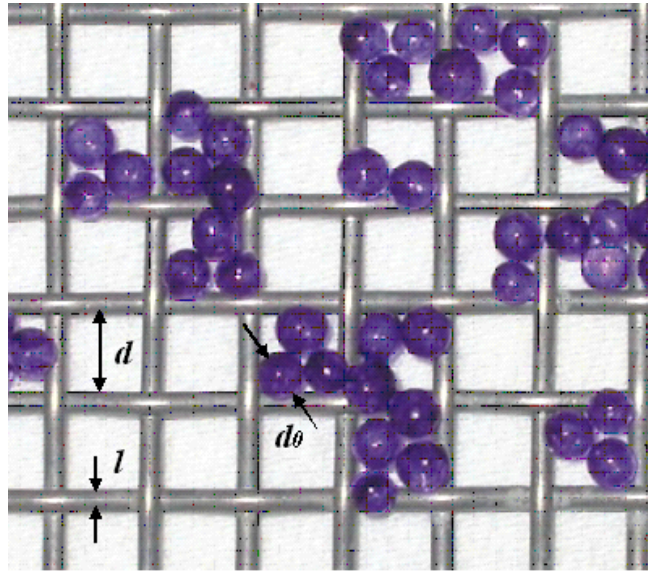


Figure 7.7: Blocage d'un écoulement de grains secs ($d_0 = 3 \text{ mm}$) sur un tamis ($d = 5 \text{ mm}$) à la fin de l'essai de filtration.

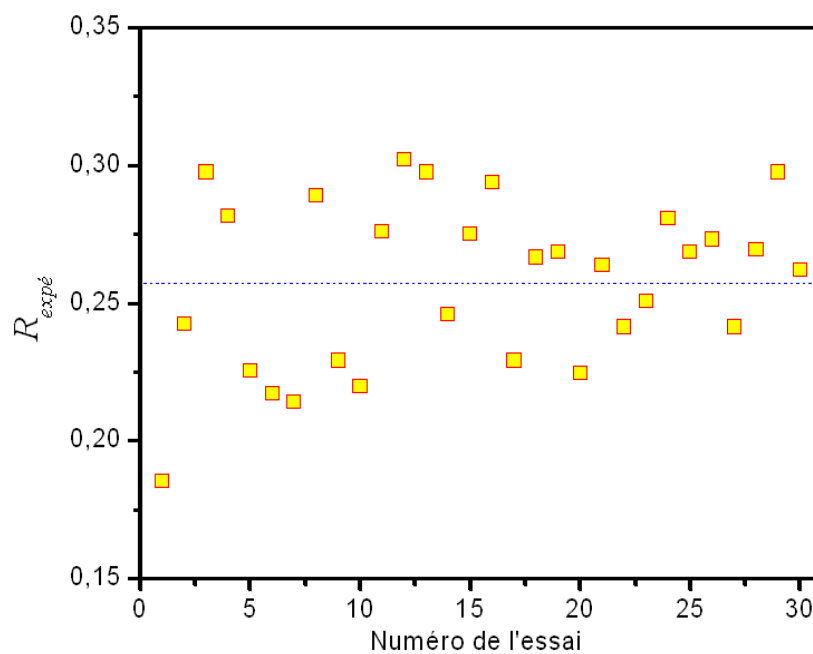


Figure 7.8: Residus mesurés dans différents essais avec les mêmes conditions : ouverture du tamis 8mm, diamètre des particules 5mm, $\phi = 10\%$, seuil du fluide porteur 33Pa.

dans une surface circulaire limitée par un cylindre du diamètre d_{cyl} est :

$$N_0 = \frac{\pi d_{cyl}^2}{4(d+l)^2} \quad (7.2)$$

D'où nous déduisons le nombre moyen de particules qui arrivent à chaque maille du tamis :

$$N_e = \frac{N}{N_0} \quad (7.3)$$

7.2.2.2 Un processus de filtration non binaire

Le point frappant de nos expériences est que le résultat du processus de filtration n'est pas binaire (*i.e.* pas d'accumulation de particule ou arrêt de toutes les particules sur le tamis pour, respectivement, une taille d_0 de particule plus faible ou plus grande que l'ouverture d du tamis). Afin d'étudier ce phénomène, nous avons considéré le rapport de l'ouverture du tamis sur la taille de particule $D = d/d_0$. Nos résultats montrent alors un résidu expérimental $R_{expé}$ variant de 0 à 1 lorsque la concentration volumique en solide ϕ augmente ou lorsque le rapport adimensionnel D diminue (cf. Fig. 7.9).

Considérons les variations du résidu R en fonction du rapport adimensionnel D pour un volume donné de suspension (cf. Fig. 7.9). Nous obtenons que, pour chaque concentration volumique en solide ϕ , il existe une région de résidu important ($R \approx 1$) et une autre région de résidu faible ($R \approx 0$) avec une transition autour d'un rapport critique $D_c = (d/d_0)_c$. D_c est supérieur à 1, ce qui confirme encore que les particules peuvent être arrêtées même si elles sont plus petites que l'ouverture du tamis.

De tels phénomènes ont été récemment observés pour des écoulements de matériaux granulaires ou de suspensions granulaires à travers des *distributeurs* [131, 132], un milieu poreux [133] ou des microtubes [125]. Dans ce cas, le fait que nous obtenons des valeurs du résidu R comprises entre 0 à 1 signifie que quelques particules sont capables de traverser le tamis tandis que les autres s'arrêtent. Ceci reflète l'aspect probabiliste du processus : certaines particules dans le fluide porteur traversent successivement des ouvertures du tamis alors que d'autres particules, à d'autres positions relatives près du tamis, sont bloqués et arrêtées.

Cette observation peut être vérifiée en versant une couche assez mince de grains secs sur un tamis (cf. Fig. 7.7). Le résultat ressemble à un tirage aléatoire avec une probabilité de blocage et certaines mailles sont vides alors que d'autres sont bloquées.

7.2.2.3 Implication du concept de probabilité

Le concept de probabilité a une implication critique : un événement de blocage exige que les particules soient suffisamment proches les unes des autres. Ainsi, plus la fraction solide ϕ est importante, plus la probabilité qu'un blocage ait lieu est forte. Pour un nombre total donné N_e de particules arrivant à chaque maille, le résidu R devrait augmenter avec ϕ . C'est effectivement ce que nous avons observé (cf. Fig. 7.10). De plus, en considérant les premiers résultats obtenus, nous nous apercevons aussi que le résidu R augmente avec le volume Ω de matériau versé (cf. Fig. 7.14). Ceci signifie que, si la quantité de béton à faire passer à travers un ferrailage est importante dans des conditions de blocage identiques, la probabilité d'apparition d'un blocage augmente.

Ce processus peut être décrit en se basant sur un modèle probabiliste simple qui prédit le résidu en fonction des variables du problème telles que D , ϕ et N_e . Nous faisons l'hypothèse que N_0 et N_e sont suffisamment grands pour que nous puissions réaliser des calculs statistiques et considérer des moyennes tirées d'un très grand nombre d'événements.

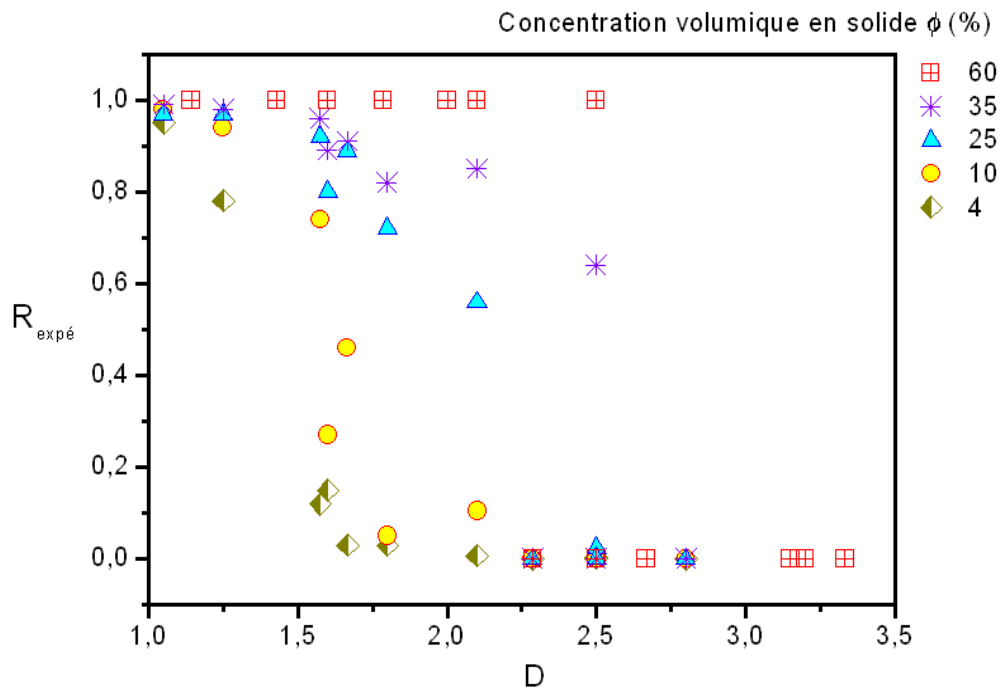


Figure 7.9: Résidu (R) en fonction du rapport ouverture de tamis/diamètre des particules (D) pour des suspensions de différentes fractions solides et pour un mélange de particules sèches de fraction 60%

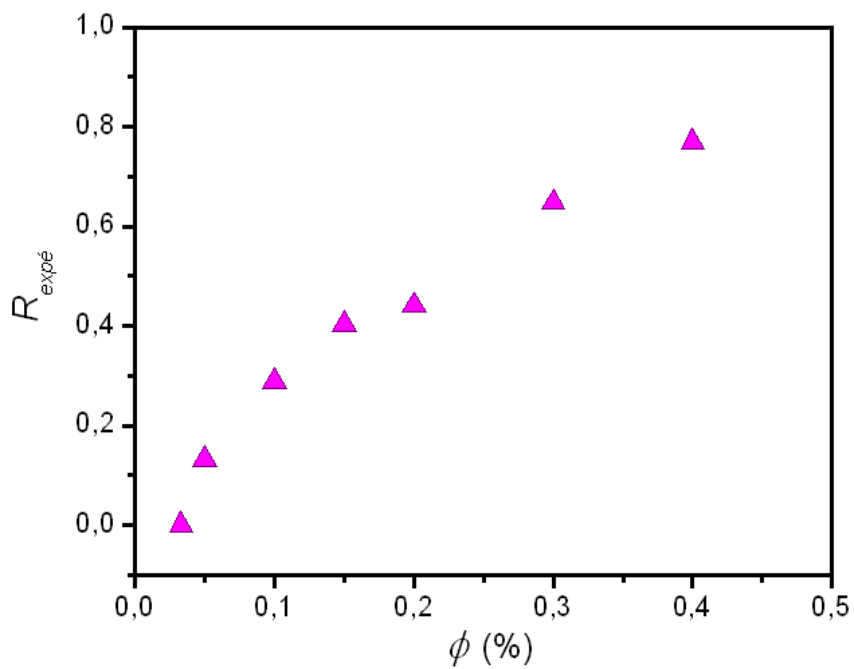


Figure 7.10: Résidus mesurés sur un même volume de suspension ($\Omega = 0,7$ l) en fonction de la fraction solide (suspensions contenant des billes de 5mm à travers un tamis de mailles de 8mm).

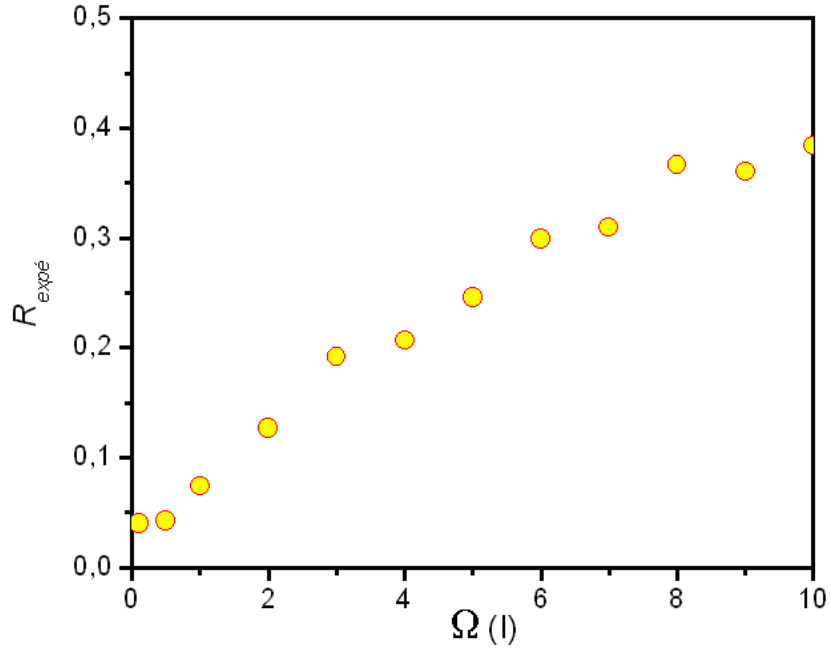


Figure 7.11: *Résidus mesurés en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.*

7.2.2.4 Formation des voûtes

Composition d'une voûte

Il convient de considérer les mailles d'un tamis comme un système de trous et de fil (surface solide). Loin du tamis, les particules se déplacent à une même vitesse V (la vitesse moyenne du fluide) dans le sens perpendiculaire au tamis (en supposant que les effets de bord qui causent éventuellement un profil de vitesse non uniforme sont négligeables). Près du tamis, un gradient de vitesse différent se développe : le fluide au-dessus des trous s'écoule rapidement alors que celui au-dessus des surfaces solides est progressivement ralenti puis peut être totalement arrêté par la formation des voûtes au dessus de certains trous. Comme nous l'avons vu expérimentalement dans la figure 7.12, une telle voûte peut contenir différents nombres de particules (2, 3 ou 4 particules).

Cependant, pour simplifier le problème, nous considérons que le nombre de particules dans chaque voûte est constant et égal à une valeur moyenne n . Puisque le nombre de grains dans une voûte est proportionnel à la surface à couvrir, nous pouvons écrire :

$$n = \gamma D^2 \quad (7.4)$$

où $D = d/d_0$ et γ est un facteur indépendant de la taille des particules ainsi que de l'ouverture du tamis (mais dépendant de la forme des particules et de la forme des mailles du tamis). A partir des résultats expérimentaux obtenus sur les billes de $d_0 = 3$ mm sur le tamis à maille carrée d'ouverture $d = 5$ mm (cf. Fig. 7.12) nous pouvons déduire $\gamma \approx 0,85$.

Probabilité qu'une particule arrive sur la surface solide du tamis

Une voûte se forme lorsque n particules se mettent en contact à l'approche du tamis. Ainsi, le processus de formation des voûtes consiste en une réaction en chaîne. Tout d'abord, il faut avoir une particule qui arrive au contact d'un des fils du tamis (cf. Fig. 7.12). La probabilité d'un tel

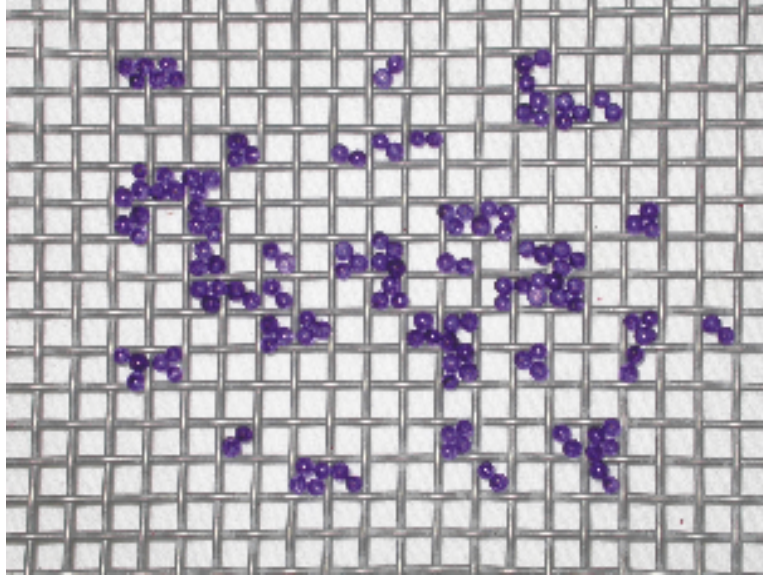


Figure 7.12: *Formation des voûtes de particules sur les mailles d'un tamis. Le nombre moyen des particules présentes dans les voûtes est $n = 2,34$.*

événement est que le centre de gravité de cette particule soit sur un fil constitutif (surface solide) du tamis. Cette probabilité est égale à :

$$P_{contact} = 1 - \left[\frac{(d - d_0)}{(d + l)} \right]^2 \quad (7.5)$$

Probabilité qu'une deuxième particule l'accompagne

Nous supposons qu'en moyenne, une particule se déplace d'une hauteur Qd_0 au dessus du tamis avec une vitesse réelle V_0 . Cette vitesse est généralement plus faible que la vitesse moyenne V du fluide car, à l'approche du tamis, l'écoulement devient plus difficile. En effet, cette particule doit contourner un fil pour passer dans le trou voisin. Le contact entre la particule et le fil dure un temps :

$$\theta = \frac{Qd_0}{V_0} \quad (7.6)$$

Afin de bloquer cette particule avant que celle-ci ne quitte définitivement le tamis, une deuxième particule doit arriver au contact de la première pendant le temps de contact bille-tamis θ . La probabilité d'un tel événement est égale à la probabilité d'avoir une particule au dessus de la première à une hauteur E :

$$E = (V - V_0) \theta \quad (7.7)$$

En reportant θ dans l'équation 7.6 dans cette équation, nous pouvons réécrire cette dernière plus simplement :

$$E = \frac{Q(V - V_0)d_0}{V_0} = id_0 \quad (7.8)$$

où i est un paramètre dépendant des caractéristiques du fluide.

Cette deuxième particule va rester en contact avec la première pendant approximativement un temps θ et, afin de construire une voûte, il faut avoir une troisième particule qui arrive pendant ce temps. La probabilité d'un tel événement est encore celle d'avoir une particule à une hauteur E dans une conduite verticale au dessus de la seconde particule. Une voûte a approximativement une forme pyramidale. Il existe donc plusieurs géométries possibles et une voûte peut contenir différents nombres de particules.

Finalement, une voûte est formée par un contact initial entre une particule avec la surface solide et $(n - 1)$ contacts intergranulaires qui apparaissent durant un temps θ . La forme de la voûte à prendre en compte dépend de la façon de couvrir la maille, elle varie donc pour chaque nouveau contact. Nous supposons simplement que sa taille caractéristique (dans le plan perpendiculaire à son axe) est constante et proportionnelle à d_0 .

Calculons maintenant la probabilité d'avoir une particule à une hauteur $E = yd_0$ du tamis dans une conduite de forme quelconque mais suffisamment mince pour éviter la présence de deux particules en un même temps dans une même section transversale. Nous pouvons commencer par une approche discrète considérant un système des cases de taille B vides ou remplies alignés le long une direction, avec lequel nous moyennons la concentration Ψ des cases remplies. La probabilité d'avoir aucune particule à travers c cases successives et donc à travers une distance cB est $(1 - \Psi)^c$.

Extrapolons ce résultat (qui est indépendant de la taille de l'élément) à une distribution plus complexe dans une conduite où la distance minimale entre deux particules successives est $B = i'd_0$, où $i' \approx 1$ est une fonction de la forme exacte de la conduite. La probabilité d'avoir au moins une particule à la hauteur $E = id_0 = \alpha B$ (où $\alpha = i/i'$) du tamis est donc :

$$P = 1 - (1 - \Psi)^\alpha \quad (7.9)$$

De façon évidente, la concentration des particules est proportionnelle à la fraction solide du volume testé par l'intermédiaire d'un paramètre β qui dépend de la forme exacte de la conduite : $\Psi = \beta\phi$. Comme $P \rightarrow 1$ lorsque ϕ tend vers la fraction d'empilement maximal ($\phi_{\max} \approx 74\%$), nous trouvons $\beta \approx 1/\phi_{\max} = 1,35$. Nous obtenons finalement la probabilité de la formation d'une voûte sur une particule arrivant sur le tamis comme suivant :

$$P_0 = P_{\text{contact}} [1 - (1 - \beta\phi)^\alpha]^{n-1} \quad (7.10)$$

où n et P_{contact} sont calculés respectivement selon les formules 7.4 et 7.5.

Puisqu'il y a N billes traversant le tamis, la probabilité globale d'apparition de blocage est :

$$P_{\text{blocage}} = NP_{\text{contact}} [1 - (1 - \beta\phi)^\alpha]^{n-1} \quad (7.11)$$

7.2.2.5 Prédiction de l'apparition du blocage

Lorsque la maille est bloquée, le nombre des particules arrivant à chaque maille ouverte augmente. Des effets de migration peuvent se produire vers des régions qui s'écoulent plus lentement. Pour prendre en compte ces effets, nous considérons simplement que toutes les particules qui se trouvent au-dessus des mailles bloquées sont déjà arrêtées alors que celles au-dessus des mailles ouvertes ne sont pas influencées. Cette approximation est sans doute valable pour de faibles valeurs de N_e . Ainsi, la première particule arrivant au tamis va bloquer et arrêter N_e grains dans son voisinage avec une probabilité P_0 . Le nombre moyen des particules qui sont arrêtés par la deuxième particule est donc $P_0(1 - P_0)(N_e - 1)$ et ainsi de suite avec $(N_e - 2)$ particules. Le nombre total des particules arrêtées s'écrit alors :

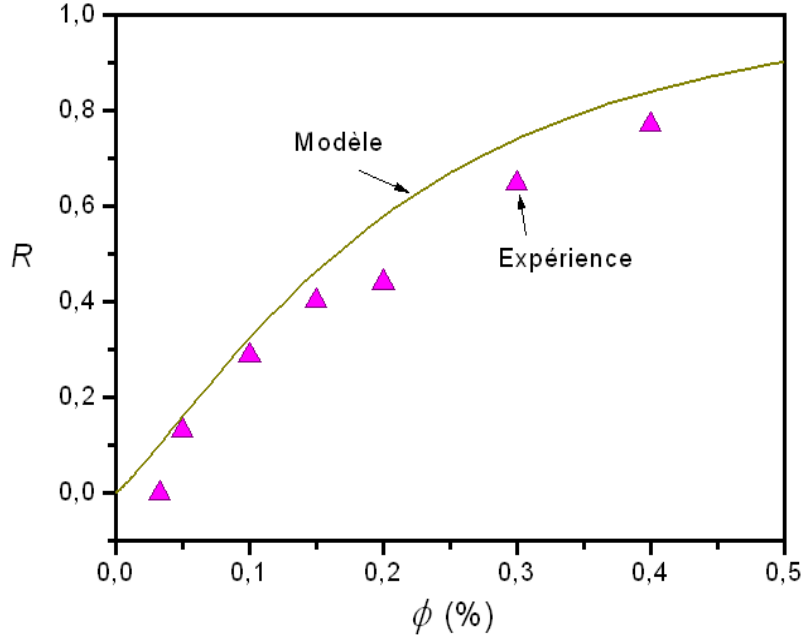


Figure 7.13: Résidus mesurés (points) et prédits (courbe continue) en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.

$$RN_e = \sum_{q=0}^{q=N_e-1} (1 - P_0)^q P_0 (N_e - q) \quad (7.12)$$

d'où nous déduisons :

$$R = 1 + \left(\frac{1 - P_0}{N_e P_0} \right) \left[(1 - P_0)^{N_e} - 1 \right] \quad (7.13)$$

La relation 7.13 permet de calculer le résidu resté sur un tamis à partir des propriétés du mélange granulaire (diamètre des particules, concentration volumique en solide) et du tamis (ouverture des mailles, diamètre des fils).

7.2.2.6 Validation de l'approche proposée

Les résultats expérimentaux présentés dans les figures 7.10 et 7.11 ont été comparés avec les solutions du modèle probabiliste proposé (cf. les Fig. 7.13 et 7.14). Une bonne cohérence est à noter.

Nous avons proposé une expression du résidu en fonction des variables fondamentales du problème D , ϕ et N_e avec seulement un paramètre inconnu α , qui est lié aux caractéristiques de l'écoulement. Cette approche peut prédire l'évolution rapide du résidu R de 0 à 1 lorsque D passe par une valeur critique D_c (cf. Fig. 7.15). L'approche peut aussi expliquer le fait que, pour un volume donné de particules (*i.e.* pour une valeur connue de N_e), nous pouvons diminuer cette valeur critique D_c en diluant la suspension (*i.e.* en diminuant ϕ) (cf. Fig. 7.15). De plus, lorsque $N_e \rightarrow \infty$, R tend vers 1 (cf. Fig. 7.15), ce qui signifie qu'en théorie aucun processus de filtration est parfaitement efficace après un temps d'écoulement infini.

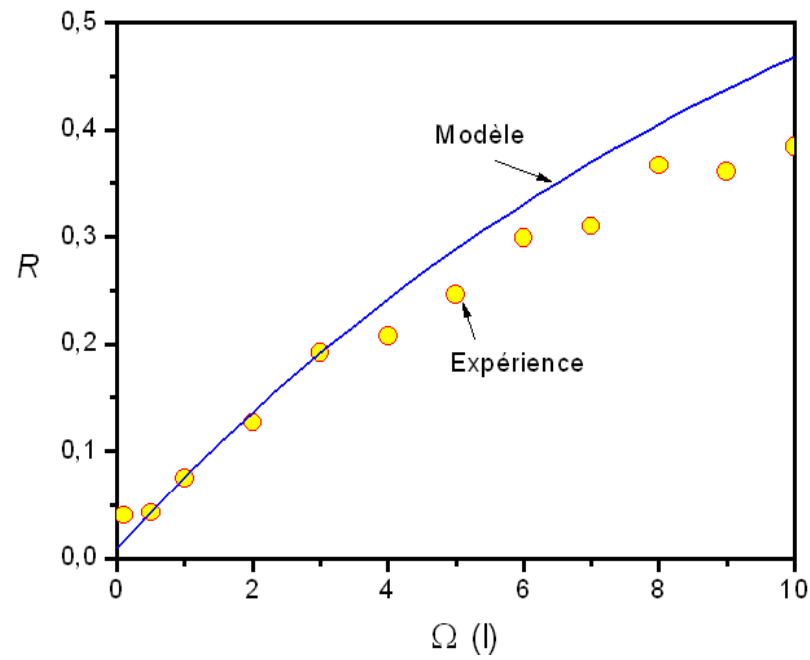


Figure 7.14: Résidus mesurés (points) et prédits (courbe continue) en fonction du volume de l'échantillon ayant une fraction solide volumique constante (4%). Des suspensions granulaires contenant des billes de 5mm s'écoulent à travers un tamis de mailles de 8mm.

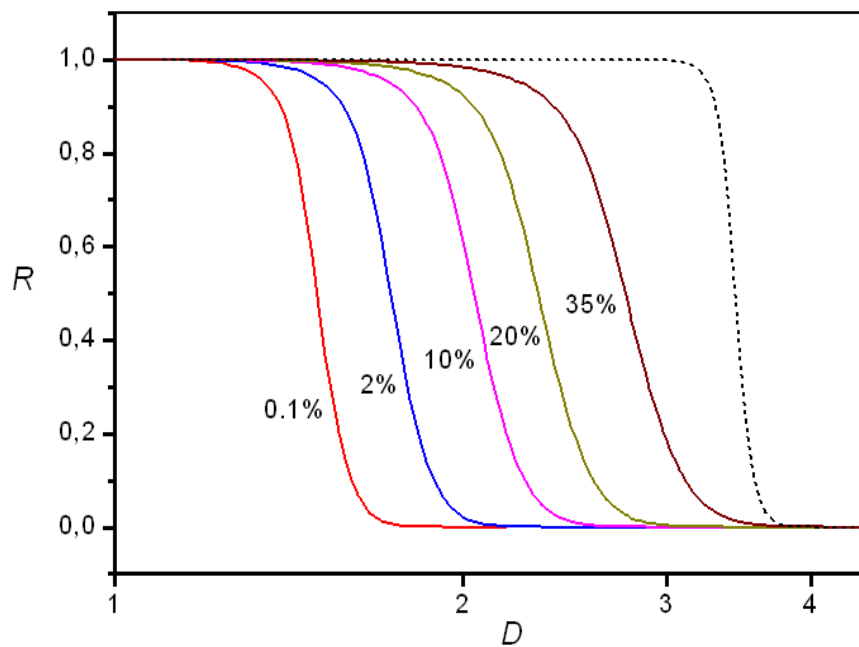


Figure 7.15: Résidu en fonction du rapport ouverture du tamis/diamètre des particules pour différentes fractions solides avec $\alpha = 0,65$. La courbe continue correspond à $N_e = 1000$ et la courbe discontinue convient à $N_e = 10^{10}$ et $\phi = 0,1$

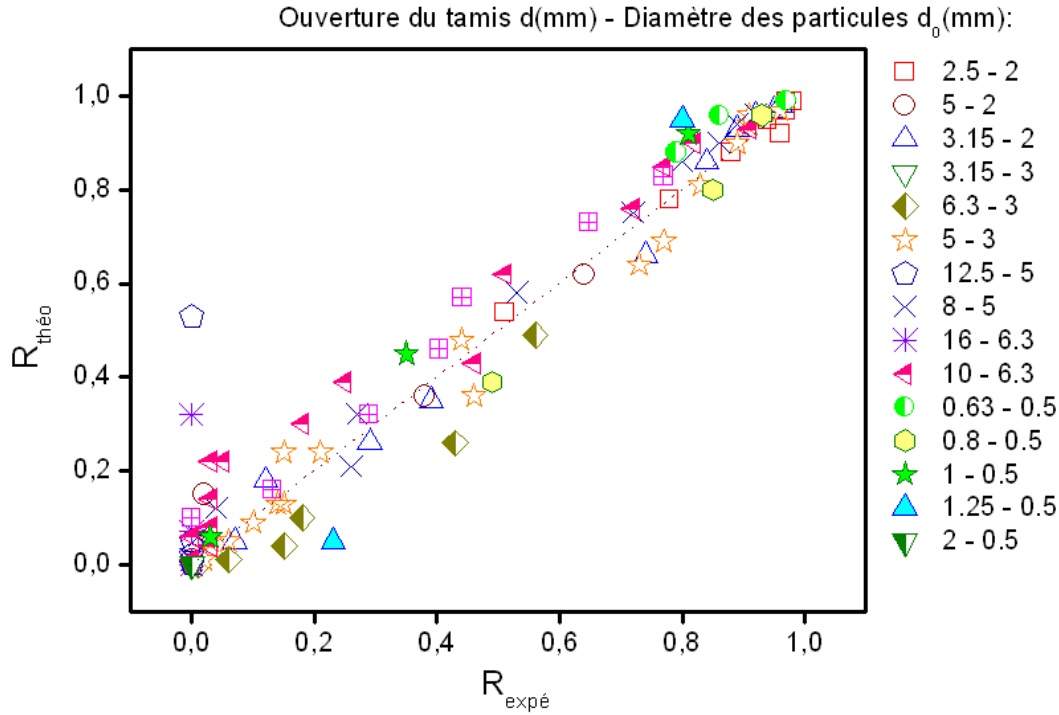


Figure 7.16: Résidu prédit théoriquement en fonction du résidu mesuré expérimentalement dans différents essais : suspensions des particules de différentes fractions volumiques dans un gel Carbopol (symbols vides) ou une solution glycérol (symbols remplis)

Sur la figure 7.16, les valeurs du résidu issues du modèle probabiliste sont comparées aux données obtenues expérimentalement sur différents mélanges granulaires de taille de particules et concentration en solide variable à travers différents tamis. Les prédictions du modèle sont cohérentes avec nos données expérimentales sur toute la plage considérée et confirme que le blocage granulaire des particules ne dépend pas du fluide porteur, que celui-ci soit un fluide à seuil viscoplastique ou un fluide newtonien purement visqueux.

De plus, il y a une accumulation de points autour de 0 et de 1, ce qui signifie que la théorie peut prédire une filtration complète ou nulle comme celles observées dans les expériences. Les points intermédiaires (blocage partiel) concordent bien avec les résultats expérimentaux bien qu'il y ait une certaine dispersion qui semble conforme au caractère probabiliste du processus.

7.2.3 Probabilité de blocage

Nous avons proposé un modèle probabiliste pour prédire quantitativement le résidu d'un mélange granulaire à travers un tamis. Pourtant, d'un point de vue pratique, la quantité précise du résidu ne semble pas apporter d'information intéressante. Pour un mélange granulaire et une configuration donnés, la question qui se pose est s'il y aura du blocage ou non. Nous nous intéressons alors ici à la prédiction de la probabilité du phénomène de blocage.

La probabilité globale calculée selon la relation 7.11 nous permet de prédire l'apparition de blocage. Néanmoins, certaines simplifications peuvent être apportées pour en rendre l'utilisation dans la pratique plus aisée.

La première simplification consiste à considérer que la probabilité P_n que n billes l'accompagnent dépend de la fraction volumique solide en inclusions ϕ et s'écrit :

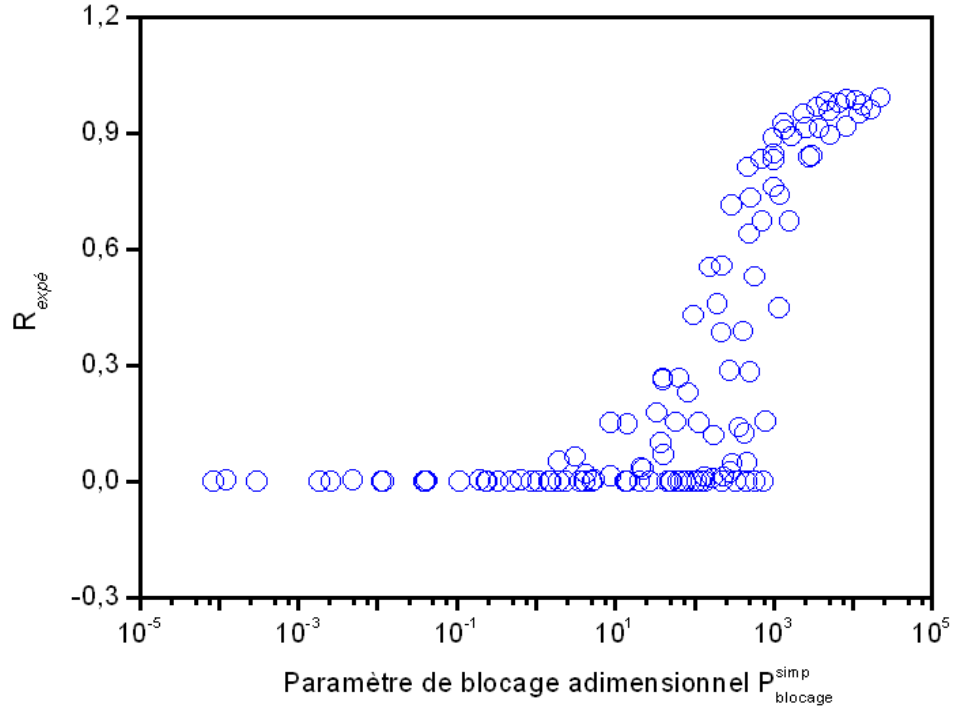


Figure 7.17: Résidu de différentes suspensions granulaires obtenus expérimentalement pour différents tamis en fonction du paramètre adimensionnel de blocage

$$P_n = \phi^n \quad (7.14)$$

De cette manière, la probabilité que $(n - 1)$ particules l'accompagnent est :

$$P_{n-1} = P_{contact} \phi^{n-1} \quad (7.15)$$

Puisqu'il y a N billes traversant le tamis, il est possible d'écrire, pour des valeurs de N limitées, la probabilité globale d'apparition de blocage de la façon suivante :

$$P_{blocage}^{simp} = P_{contact} N \phi^{n-1} \quad (7.16)$$

Les résultats expérimentaux obtenus ont été tracés dans la figure 7.17 en fonction de la probabilité de blocage ainsi calculée. Là encore, une zone de dispersion est observée.

Pour simplifier l'observation, nous proposons d'utiliser des valeurs de résidu binaires (cf. Fig. 7.18) où les résidus supérieurs à une valeur critique R_c (de 0,1 par exemple) sont considérés comme un blocage ($R = 1$) alors que les résidus inférieurs à R_c sont associés à un passage total ($R = 0$). De cette façon, les résultats obtenus présentent trois régions séparées comme l'indique la figure 7.18 :

- une région où $R = 0$: l'écoulement a lieu sans blocage
- une région où $R = 1$: l'écoulement est dominé par les blocages
- une région de transition dans laquelle il est possible d'avoir un blocage

Nous avons vu sur la figure 7.18 que la probabilité de blocage peut être prédite à partir d'un paramètre probabiliste adimensionnel P_{bloc}^{simp} calculé selon la formule 7.16. Cette figure récapitule des valeurs du résidu binaires R obtenues sur différents types de fluide portant, de fluide à seuil

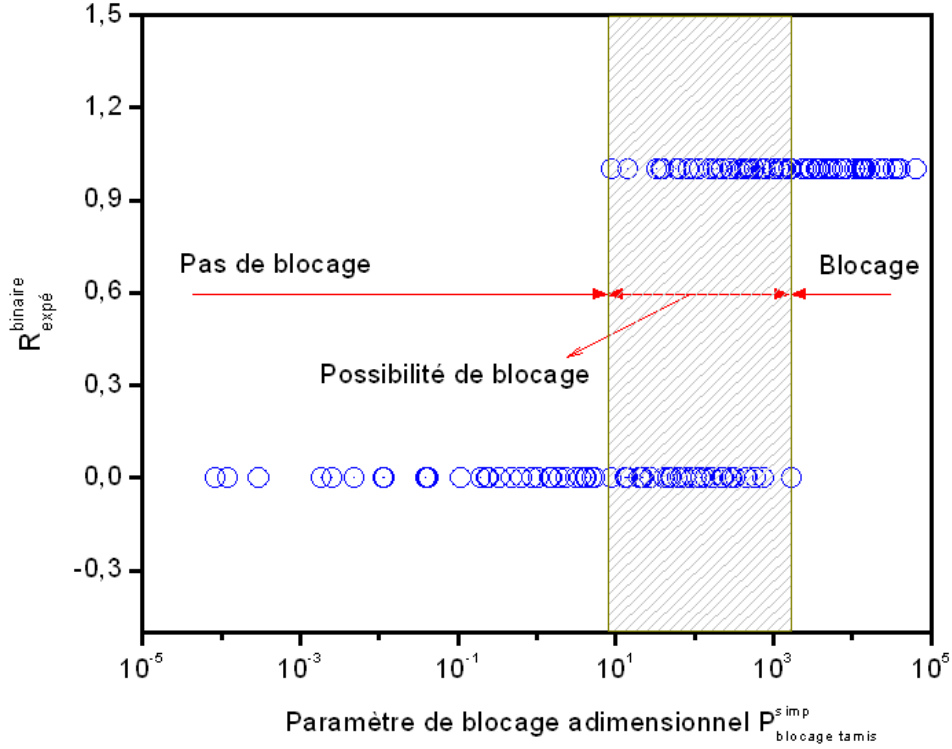


Figure 7.18: Prédiction de l'apparition de blocage à un tamis en fonction du paramètre de blocage

viscoplastique (Carbopol) à fluide newtonien purement visqueux (glycérol). Ceci signifie que ce graphique permet de prédire les probabilités du blocage d'un mélange granulaire quelconque à travers un tamis. C'est effectivement un point très intéressant de cette étude.

7.2.4 Application à un milieu poreux

Cette théorie peut être extrapolée à un milieu poreux en considérant ce dernier comme une série de tamis successifs pour qui d est maintenant la taille du pore typique et l l'épaisseur typique du squelette solide (qui peut être, par exemple, calculée à partir de la porosité $\varepsilon = \left(\frac{d}{d+l}\right)^3$). La suspension s'écoule successivement à travers des tamis. La probabilité d'avoir une particule arrivée à un tamis est R . Avec ces conditions, le résidu total obtenu au $Z^{ième}$ tamis est égal à :

$$R^*(Z) = 1 - (1 - R)^Z \quad (7.17)$$

où $(1 - R)^Z$ est la probabilité d'une particule d'être non bloquée jusqu'à cette position. Pour de faibles valeurs de R , (c'est généralement le cas dans la pratique), nous avons $R^* \approx ZR$ où $Z \approx \frac{X}{(d+l)}$ dont X est la longueur du milieu poreux dans le sens d'écoulement. Cela signifie qu'un milieu poreux peut filtrer entièrement une suspension si l'épaisseur de l'échantillon est suffisamment large.

Il est particulièrement intéressant d'examiner un cas général de très faible fraction volumique en solide ($\phi \ll 1$). Si α n'est pas trop grand, nous avons :

$$P_0 \approx (\alpha\beta\phi)^{n-1} \quad (7.18)$$

et si N_e n'est pas trop grand (*i.e.* $N_e P_0 \ll 1$), nous avons $R \approx P_0$, ce qui amène à :

$$R^* \approx Z (\alpha\beta\phi)^{n-1} \quad (7.19)$$

Cette approximation est valable seulement pour de faibles valeurs de R^* mais elle donne une possibilité de l'estimation de la longueur typique (sans dimension) de la filtration complète des particules dans un milieu poreux :

$$Z_c \approx \frac{1}{(\alpha\beta\phi)^{n-1}} \quad (7.20)$$

D'éventuelles forces d'attraction entre les particules et la surface solide du système poreux peuvent être prises en compte par cette théorie en utilisant simplement une valeur appropriée de α , plus grande que les valeurs trouvées dans cette étude, car, dans un tel cas, V_0 est beaucoup plus faible que V . Il est à noter que $V_0 = 0$ signifie que tout contact est définitif, ce qui implique que le blocage est extrêmement rapide et correspond à $\alpha \rightarrow \infty$ dans l'approche.

Les premières comparaisons entre prédiction théorique et données expérimentales sont encourageantes puisque le modèle probabiliste proposé reproduit assez bien la réalité. L'extension du modèle à la configuration de ferrailage fait l'objet de la section suivante.

7.3 Prédiction du blocage des particules au passage d'un ferrailage horizontal

Une fois que nous avons isolé les différents aspects du problème et les différents paramètres qui jouent un rôle, nous avons adapté la solution théorique de façon à prédire le blocage des particules au passage d'une grille qui est plus proche qu'un tamis de ce que nous pouvons trouver dans un ferrailage réel. Comme la configuration d'obstacle change, il convient de modifier certains paramètres dans le modèle probabiliste proposé pour le tamis.

7.3.1 Etudes expérimentales

L'essai consiste à verser une suspension contenant des billes de verre sphériques monodisperses de taille variable et en concentration volumique variable à travers un ferrailage élémentaire horizontal dont le diamètre a des barres et l'écartement e entre deux barres étaient aussi variables. Les ferrailages élémentaires horizontaux sont constitués de barres d'acier parallèles dont l'écartement est dans la gamme de 0,63 et 16 mm comme l'ouverture des tamis. Le matériau ainsi que le protocole d'essai sont similaires à ceux utilisés dans les essais aux tamis. Les figures 7.19 et 7.20 représentent respectivement, à titre d'exemple, le résidu des mélanges granulaires de bille 5 mm et bille 3 mm sur les ferrailages FE $a5e6,3$ et FE $a2e4$.

7.3.2 Extension du modèle probabiliste à la géométrie du ferrailage

Un ferrailage est constitué des barres parallèles de diamètre a et d'écartement e . Comme dans le cas des tamis, une voûte se forme au niveau des barres lorsqu'il y a n particules qui se mettent en contact. Tout d'abord, il faudrait avoir une particule qui arrive sur une barre du ferrailage. La probabilité d'un tel événement dans ce cas est :

$$P_{contact}^{FE} = 1 - \frac{(e - d_0)}{(e + a)} \quad (7.21)$$

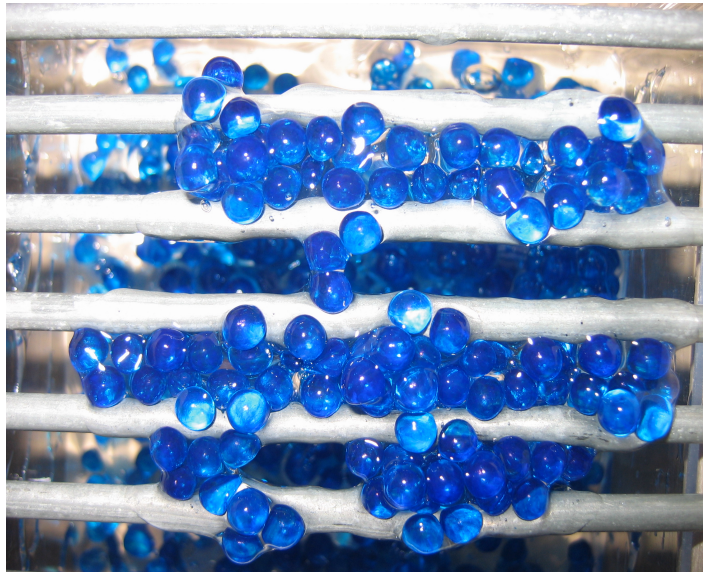


Figure 7.19: Résidu d'un mélange granulaire de billes 5 mm à concentration en solide $\phi = 30\%$ sur ferrailage horizontal FE a5e6,3

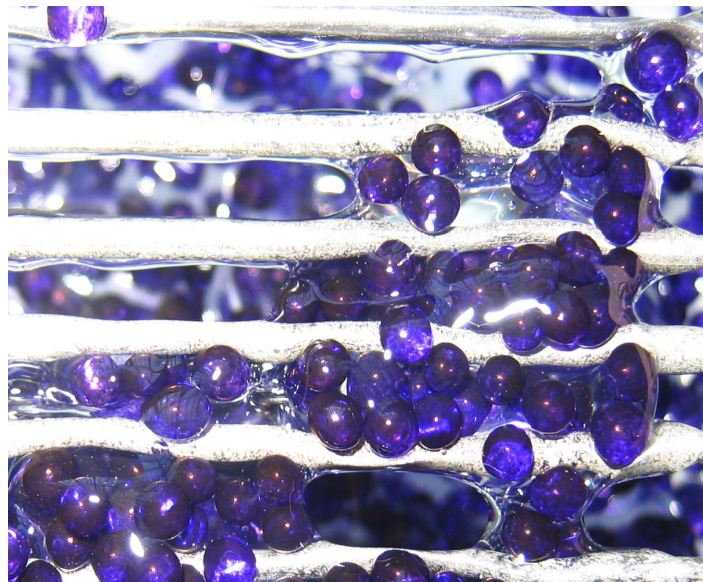


Figure 7.20: Résidu d'un mélange granulaire de billes 3 mm à concentration en solide $\phi = 25\%$ sur ferrailage horizontal FE a2e4

Nous avons aussi considéré que le nombre de particules dans chaque voûte est constant et égal à une valeur moyenne $n_{FE} = \gamma_{FE} D_{FE}^2$, où $D_{FE} = e/d_0$ et γ_{FE} est un facteur indépendant de la taille des particules ainsi que de l'écartement entre deux barres. A ce stade, l'observation expérimentale a indiqué qu'il existe trois types de voûte au niveau des ferrailages composée de 2, 3 ou 5 particules (cf. Fig. 7.19 et 7.20). Nous avons donc déduit $\gamma_{FE} \approx 3$.

Il semble raisonnable de considérer une bande entre deux barres comme un système successif de cases de dimensions $e \times 3d_0$. Si la surface circulaire limitée par un cylindre du diamètre d_{cyl} est calculée approximativement égale à celle du rectangle inscrit dans laquelle, le nombre des cases présentées dans cette surface est :

$$N_0^{FE} \approx \frac{d_{cyl}^2}{6d_0(a+e)} \quad (7.22)$$

Le nombre moyen des particules qui arrivent à chaque case est $N_e^{FE} = N/N_0^{FE}$

La probabilité de la formation d'une voûte sur une particule arrivant sur le ferrailage comme suivant :

$$P_0^{FE} = P_{contact}^{FE} [1 - (1 - \beta\phi)^\alpha]^{n-1} \quad (7.23)$$

où $P_{contact}^{FE}$ est calculé selon la formule 7.21, $\beta = 1, 35$ et $\alpha = 0, 45$.

Puisqu'il y a N billes traversant le ferrailage, la probabilité globale d'apparition de blocage est :

$$P_{bloc}^{FE} = NP_{contact}^{FE} [1 - (1 - \beta\phi)^\alpha]^{n-1} \quad (7.24)$$

Le résidu théorique peut être calculé selon la relation 7.13 comme suivant :

$$R^{FE} = 1 + \left(\frac{1 - P_0^{FE}}{N_e^{FE} P_0^{FE}} \right) \left[(1 - P_0^{FE})^{N_e^{FE}} - 1 \right] \quad (7.25)$$

Comme dans le cas du tamis, il est possible d'écrire de manière plus simple la probabilité globale d'apparition de blocage à un ferrailage :

$$P_{blocage}^{simp} = P_{contact} N \phi^{n-1} \quad (7.26)$$

7.3.3 Résultats

La figure 7.21 représente la comparaison des valeurs du résidu prédites théoriquement et mesurées expérimentalement pour différents mélanges à travers différents ferrailages horizontaux. La confrontation est satisfaisante et confirme les hypothèses de calcul employées. Nous disposons donc de la capacité pour prédire l'apparition de blocage des granulats au passage d'un ferrailage, en fonction de paramètres d'entrée tels que le diamètre et la concentration des particules, le diamètre d'une barre et l'écartement entre deux barres d'acier dans le ferrailage.

7.4 Etudes sur matériaux réels

7.4.1 Matériaux

Nous avons étudié des BAP contenant des gros granulats demi-concassés 4/12, 5 mm ou 6/20 mm. La composition des BAP comprend : des granulats, du ciment CEM I 52,5, du filler calcaire,

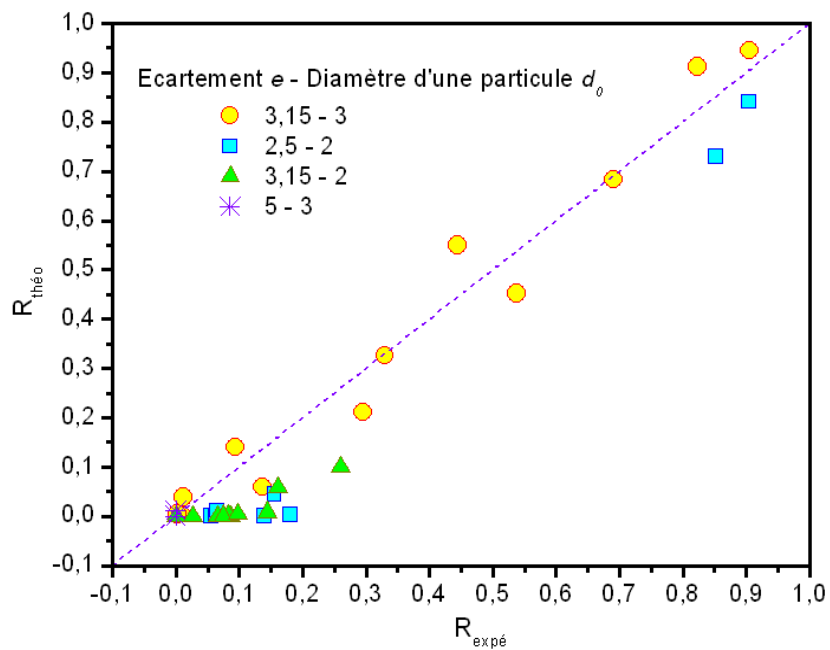


Figure 7.21: Comparaison des résidus au ferrailage horizontal mesurés expérimentalement et prédits théoriquement

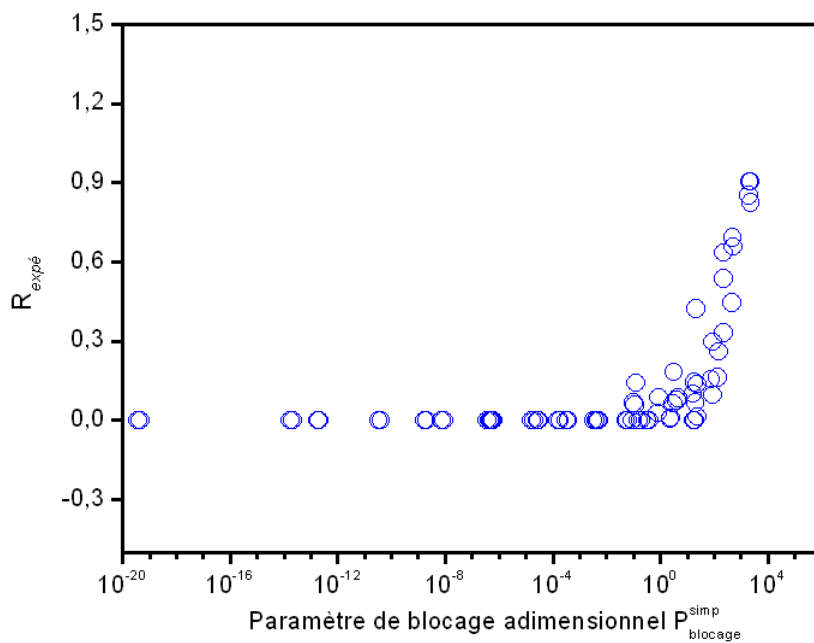


Figure 7.22: Résidu de différentes suspensions granulaires obtenus expérimentalement à de différents ferrillages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage

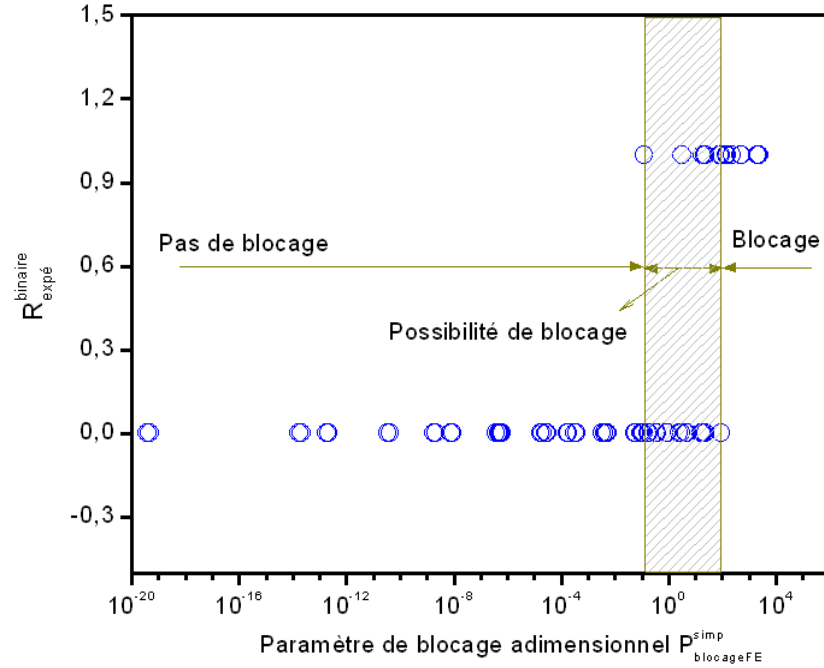


Figure 7.23: Résidu binaire obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage

du superplastifiant et de l'agent viscosant. L'objectif était d'obtenir des matériaux contenant des particules de $d_{\max}$ variable et ayant des seuils d'écoulement couvrant une large gamme.

7.4.2 Protocole d'essai

L'essai consiste à verser 9 l de béton dans un canal incliné (45°) pour faire couler le matériau à travers un ferrailage élémentaire d'écartement e variable. Comme nous l'avons vu précédemment, le phénomène de blocage des inclusions est effectivement un effet géométrique (*i.e.* le rapport du diamètre des inclusions et l'écartement de deux barres d'acier) mais non pas un effet de seuil du matériau. En conséquence, la position du canal n'a pas d'influence sur le résultat d'essai. Nous avons simplement utilisé le canal incliné dans le but d'augmenter le volume de matériau testé traversant le ferrailage élémentaire et ainsi de mieux voir l'effet du blocage granulaire au droit du ferrailage.

L'état du matériau au moment de l'arrêt de l'écoulement est observé. Si les matériaux en amont et en aval du ferrailage sont tous homogènes comme le matériau initial (cf. Fig. 7.24), il s'agit d'un blocage dû au seuil d'écoulement du matériau. Si la teneur en granulat (ou en pâte) est nettement différente entre l'amont et l'aval (cf. Fig. 7.25), le passage du béton ressemble à une filtration et le phénomène s'agit d'un blocage granulaire. En effet, seuls des cas du blocage granulaire ont été retenus. Dans ce cas-là, le matériau bloqué en amont du ferrailage est récupéré, rincé et tamisé. La masse des gros granulats bloqués est pesées (m^{gra}). Le résidu R qui est égal au rapport de ce refus et de la masse initiale m_{in}^{gra} des granulats dans le béton ($R = m^{gra}/m_{in}^{gra}$) est ensuite calculé.

7.4.3 Résultats

Nous reportons sur le graphique 7.26 des résultats obtenus sur des bétons réels considérés. Les points expérimentaux correspondant à ces derniers se trouvent dans l'ensemble des points obtenus sur des mélanges granulaires modèles. Ceci montre que les hypothèses utilisées dans le calcul du



Figure 7.24: *Blocage dû au seuil d'un BAP ($d_{max} = 12,5 \text{ mm}$) de 51 Pa au droit d'un ferrailage d'écartement $e = 19 \text{ mm}$*



Figure 7.25: *Blocage granulaire d'un béton autoplaçant ($d_{max} = 20 \text{ mm}$) au droit d'un ferrailage d'écartement $e = 30 \text{ mm}$*

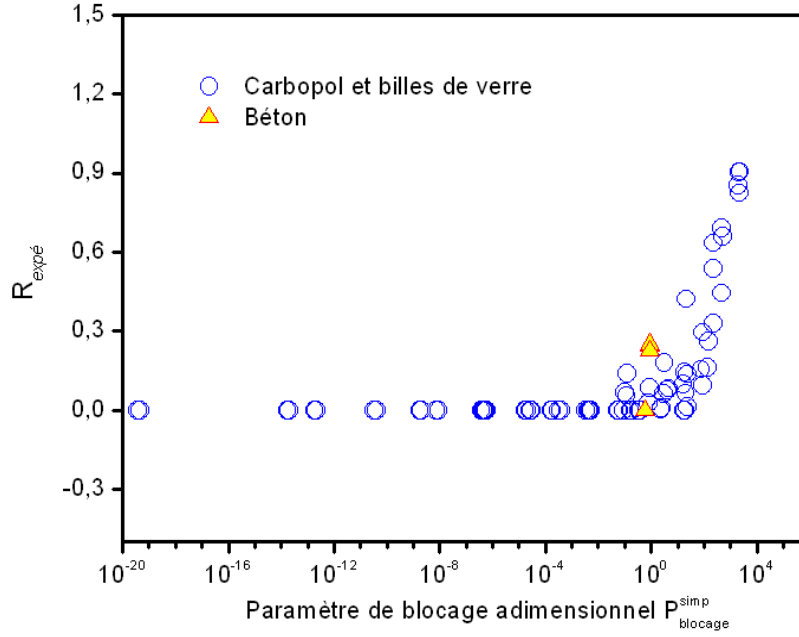


Figure 7.26: Résidu de différents matériaux obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage

paramètre de blocage adimensionnel sont validées dans tous les cas de matériau modèle et béton réel.

Nous reportons aussi les résultats expérimentaux sur béton réel dans le graphique des résidus binaires (cf. Fig. 7.27). Là encore, les points obtenus répartissent dans les trois régions de différentes probabilité de blocage.

En conclusion, dans ce chapitre, nous avons établi un modèle qui décrit bien le phénomène de blocage granulaire et qui permet de prédire le résidu théorique en fonctions des caractéristiques des billes et de l'obstacle, dans le cas d'un tamis et d'un ferrailage. L'approche a été aussi vérifiée par des résultats sur des bétons réels. Ceci confirme notre capacité de prédire l'apparition de blocage d'un béton traversant un ferrailage de caractéristique géométrique connue.

7.5 Application du modèle pour prédire le blocage

Comme dans le chapitre 5, en espérant pouvoir proposer une utilisation pratique du modèle de blocage, nous présentons un simple exemple de calcul.

Prenons par exemple un volume $\Omega = 0,5 \text{ m}^3$ d'un béton contenant une fraction $\phi = 20\%$ de gros granulats du diamètre $d_0 \geq 10 \text{ mm}$ et de la masse volumique $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$. Ce volume de béton est à faire couler à travers un ferrailage constitué des barres d'acier du diamètre $a = 10 \text{ mm}$ et d'écartement entre deux barres $e = 30 \text{ mm}$.

Le nombre des granulats de $d_0 \geq 10 \text{ mm}$ dans ce volume de béton est approximativement égal à :

$$N = \frac{\Omega \phi}{\frac{\pi d_0^3}{6}} = \frac{0,5 \times 0,2}{\frac{3,14 \times (10 \times 10^{-3})^3}{6}} \approx 190986 \quad (7.27)$$

La probabilité d'avoir un grains arrivant en contact avec une barre d'acier est calculée selon l'équation 7.21 :

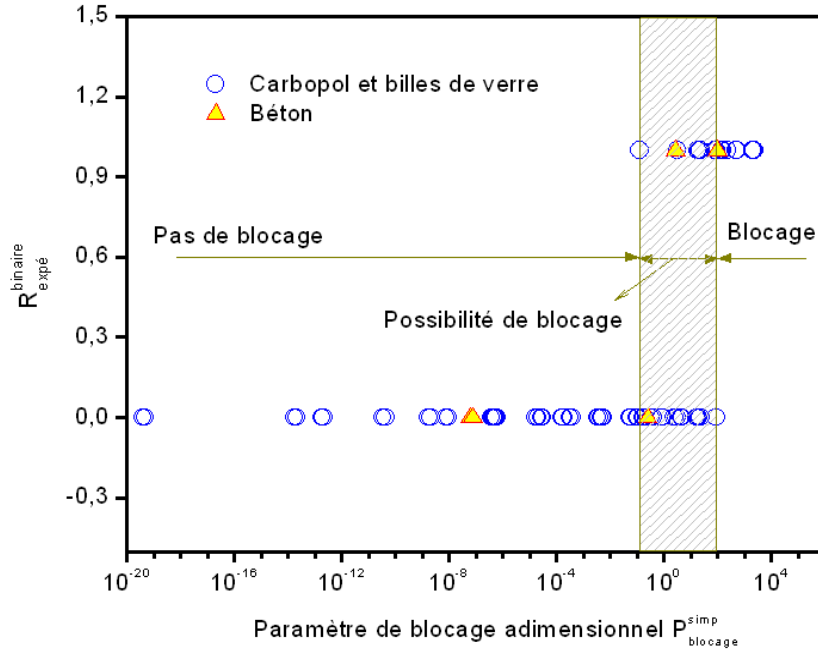


Figure 7.27: Résidu binaire de différents matériaux obtenus expérimentalement à de différents ferrailages élémentaires en fonction du paramètre adimensionnel de blocage

$$P_{contact}^{FE} = 1 - \frac{(e - d_0)}{(e + a)} = 1 - \frac{(30 - 10)}{(30 + 10)} = 0,5 \quad (7.28)$$

Le nombre de particules dans chaque voûte est égal à :

$$n_{FE} = \gamma_{FE} \left(\frac{e}{d_0} \right)^2 = 3 \times \left(\frac{30}{10} \right)^2 = 27 \quad (7.29)$$

La probabilité d'apparition de blocage se calcule selon l'équation 7.26 :

$$P_{blocage}^{simp} = P_{contact}^{FE} N \phi^{n-1} = 0,5 \times 190986 \times 0,2^{27-1} \approx 6,4 \times 10^{-14} \quad (7.30)$$

En rapportant cette valeur de probabilité sur la figure 7.27, nous pouvons prédire que ce volume de béton peut passer à travers ce ferrailage sans être bloqué.

Chapitre 8

Conclusions générales

Le travail de recherche exposé dans cette thèse traite des problématiques de la mise en œuvre des bétons sur chantier ou dans les usines de préfabrication. Les propriétés complexes du matériau et la géométrie des coffrage rendent difficile toute étude systématique de l'influence de ces paramètres sur matériau et coffrages réels. Nous avons donc choisi d'étudier un système modèle dans des configurations simplifiées. Nous avons ainsi isolé et traité séparément chaque problème puis construit les outils de base nécessaires à la prédiction de la mise en œuvre, en introduisant graduellement des éléments de complexité.

Nous avons tout d'abord élaboré un matériau modèle similaire au béton réel : c'est un matériau biphasique constitué de particules solides immergées dans un fluide porteur. Le matériau modèle est composé de billes de verre incompressives sphériques monodisperses à rugosité contrôlée mélangées dans une suspension de Carbopol qui est un fluide à seuil, stable, transparent et non thixotrope. Ce matériau modèle possède l'avantage, d'une part, de permettre de maîtriser les caractéristiques de ses composants (*i.e.* le seuil d'écoulement du fluide porteur, la taille, la concentration et la rugosité de surface des particules, etc.), et d'autre part, de permettre de traiter séparément les phénomènes physiques induits par ces caractéristiques (*i.e.* des suspensions de Carbopol ont été utilisées dans les essais nécessités un matériau homogène et des mélanges de billes de verre dans une suspension de Carbopol dans les essais sur le blocage ou la ségrégation des particules).

Le premier problème pouvant être à l'origine d'une mauvaise mise en œuvre (*i.e.* un remplissage incomplet) est dû au comportement de fluide à seuil du béton. Nous avons donc étudié la corrélation entre la forme du matériau à l'arrêt de l'écoulement et les propriétés intrinsèques du matériau ainsi que les caractéristiques géométriques du coffrage. Cette corrélation a été abordée par des simulations numériques avec le code numérique de mécanique des fluides Flow3D[®] ainsi que par des résultats expérimentaux obtenus sur différents écoulements à seuil homogène de seuil variable en canal horizontal non ferraillé. L'approche analytique proposée permet ainsi de prédire le remplissage d'un coffrage horizontal non ferraillé par un fluide à seuil homogène à partir du seuil d'écoulement du matériau et de la géométrie du coffrage.

Nous avons ensuite étudié l'écoulement et l'arrêt de l'écoulement d'un fluide à seuil homogène passant au travers de grilles constituées de barres d'acier. La présence des inclusions solides est écartée dans un premier temps et l'effet du ferraillement sur l'écoulement des fluides à seuil homogènes a été étudié. Nous avons décomposé le ferraillement d'un coffrage en ferraillements élémentaires pour étudier l'influence de ces ferraillements élémentaires sur l'écoulement en espérant pouvoir après revenir à l'écoulement réel par un ré-assemblage de ces ferraillements élémentaires. De cette manière, dans un premier temps, nous nous sommes attachés à déterminer l'effet de la présence d'un ferraillement élémentaire sur un écoulement. En effet, ceci se traduit par une perte de niveau (ou d'épaisseur) dans le profil de l'échantillon au moment de l'arrêt. Cette perte de niveau varie selon le seuil d'écoulement du matériau testé ainsi que des caractéristiques géométriques du ferraillement. Au vu

de ces observations, un programme expérimental a été réalisé pour révéler l'effet de chacun de ces paramètres. Sachant que la perte de niveau due à un ferrailage est proportionnelle au gradient de pression localisé au niveau de ce ferrailage, nous avons établi une corrélation entre la variation de la forme du matériau à l'arrêt et les propriétés du matériau et du ferrailage élémentaire. Nous avons aussi fait une analogie entre l'écoulement d'un fluide homogène au sein des barres d'acier et un écoulement d'extrusion. Dans les deux cas, des solutions théoriques ont été construites et comparées avec succès avec les résultats expérimentaux ainsi qu'avec les simulations numériques.

Dans un second temps, pour le premier pas du retour vers des ferrailages réels, nous avons mené une étude expérimentale sur des assemblages de deux ferrailages élémentaires. Nous avons montré que ce n'est qu'à une distance (entre deux ferrailages) supérieure à approximativement 50 fois le diamètre de la barre d'acier que l'effet d'un assemblage peut être calculé simplement comme l'addition des effets de deux ferrailages élémentaires. Un tel espacement ne peut pas être respecté dans la réalité, ce qui justifie que les armatures dans les coffrages influencent de manière dépendante les unes des autres sur l'écoulement de béton pendant la mise en œuvre. Il est donc impossible de prédire la perte de niveau des écoulements due à un assemblage de ferrailages réel en additionnant l'effet de chaque ferrailage élémentaire.

Au vu de cette observation, l'assemblage de ferrailages devrait plutôt être considéré comme un milieu poreux qui contient une série de ferrailages élémentaires successifs. De cette manière, le passage d'un écoulement de béton peut être considéré comme une propagation d'un fluide dans un milieu poreux équivalent à une zone ferrillée. Ainsi, nous avons d'une part mené une étude expérimentale en assemblant des ferrailages élémentaires et en étudiant l'évolution de la perte de niveau due à ces assemblages en fonction des propriétés du matériau et des configurations du milieu poreux équivalent. D'autre part, une analogie zone ferrillée/milieu poreux équivalent a été effectuée en se basant sur la loi générale de Darcy. Au cours de cette modélisation, nous avons proposé d'introduire une distance caractéristique qui représente les caractéristiques géométriques du milieu poreux équivalent.

Nous sommes arrivés à proposer une corrélation entre la forme à l'arrêt d'un fluide à seuil homogène traversant un milieu poreux équivalent avec les propriétés du matériau, la perméabilité intrinsèque et la distance caractéristique représentant la géométrie de ce milieu poreux. L'approche proposée a été vérifiée par les résultats expérimentaux. Nous disposons maintenant d'un outil permettant de caractériser la capacité d'un milieu poreux à transmettre un fluide à seuil homogène à partir de ses caractéristiques géométriques. Au point de vue pratique, l'approche du milieu poreux proposée permet la mise au point d'une cartographie de perméabilité pour les ferrailages réels. Nous avons alors accès aux applications à l'ingénierie.

Les mêmes essais expérimentaux ont été réalisés sur des mortiers et des bétons. Les résultats obtenus nous a montré l'effet de la présence des particules sur la propagation d'un fluide dans une zone ferrillée.

L'effet de la présence des inclusions dans le béton a été abordé dans le cadre d'un phénomène majeur sur chantier : le blocage. Nous ne nous sommes intéressés qu'aux granulats les plus gros dans le matériau car ce sont ceux-ci qui peuvent former des voûtes au niveau des armatures et donner lieu à un blocage granulaire. Par une étude expérimentale sur tamis, nous avons montré que le blocage est un problème de probabilité, *i.e.* un nombre suffisant de particules doit être présent en même temps dans une certaine configuration. Un modèle probabiliste pour prédire le résidu à partir des propriétés du mélange granulaire et du tamis a alors été proposé et validé. La solution a été ensuite adaptée de façon à prédire le blocage des particules au passage d'un ferrailage. D'un point de vue pratique, le modèle permet de prédire l'apparition du blocage des particules d'un mélange granulaire en passant un ferrailage de géométrie connue. Une exemple d'application a été présentée.

En conclusion, nous avons exposé dans ce mémoire une série de travaux sur un matériau modèle, qui est une version simplifiée de ce que sont les bétons. Il se peut que la simplification élimine

certains phénomènes dans le comportement des bétons réels mais celle-ci nous a permis de mettre en évidence les phénomènes physiques principaux et de fournir des outils nécessaires pour la prédiction de la mise en œuvre des bétons frais.

La plupart de nos résultats concernent de simples configurations. Nous avons abordé la propagation des bétons dans des zones ferraillées composées par des barres d'acier verticales. Or, les ferraillages réels sont généralement complexes à cause de différentes positions des barres. Il est donc très important aussi d'arriver, toujours sur la base des observations, à tenir compte des caractéristiques géométriques complexes des coffrages réels. Une première façon de le faire est d'étudier l'approche pour milieu poreux équivalent à une série des cylindres horizontaux parallèles.

Un autre sujet d'étude peut aussi être envisagé concernant le phénomène de ségrégation des granulats au cours de l'écoulement du béton. Le système biphasique modèle nous permet d'étudier l'influence des paramètres majeurs de ce problème tels que le seuil du fluide portant, la taille et la concentration volumique en solides etc., en vue d'établir des outils de la prédiction de la ségrégation sous écoulement.

Bibliographie

- [1] H. Okamura and M. Ouchi, “Self-compacting concrete”, *Journal of Advanced concrete Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 5–15, 2003.
- [2] M. Ouchi, “State-of-the-art report on self-compactability evaluation”, *Proceedings of the international workshop on Self-Compacting Concrete*, 1999.
- [3] P. Coussot, *Rheometry of Pastes, Suspensions, and Granular Materials. Applications in Industry and Environnement*, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [4] P. Coussot and C. Ancey, *Rhéophysique Des Pâtes et Des Suspensions*, EDP sciences, 1999.
- [5] J. Mewis and C.W. Macosko, “Suspension rheology”, *Rheology : principles, measurements and applications*, C.V. Macosko and R.G. Larson, vol. VCH, Newyork, 1993.
- [6] H.A. Barnes, “Thixotropy-a review”, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 70, pp. 1–33, 1997.
- [7] Association Française de Génie Civil, “Bétons auto-plaçants, recommandations provisoires”, 2002.
- [8] European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures, “Specification and guidelines for self-compacting concrete”, 2005.
- [9] G.H. Tattersall and P.G.F. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, London, 1983.
- [10] S. Caré, R. Linder, V. Baroghel-Bouny, F. De Larrard, and Y. Charonnat, *Effet Des Additions Minérales sur Les Propriétés D’usage Des Bétons. Plan D’expérience et Analyse Statistique*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, 2000.
- [11] H.M. Nehdi, M. Mindness, and C.M. Aitcin, “Rheology of high performance concrete : Effect of ultrafine particles”, *Cement and concrete research*, vol. 28, pp. 687 – 697, 1998.
- [12] M. Cyr, *Contribution À la Caractérisation Des Fines Minérales et À la Compréhension de Leur Rôle Joué Dans Le Comportement Réhologique Des Matrices Cimentaires*, PhD thesis, Institut national des sciences appliquées de Toulouse et Université de Sherbrooke, 1999.
- [13] K.L. Scrivener, “Microstructure of concrete”, *Materials Science of Concrete*, vol. 1, pp. 127–161, 1989.
- [14] R.J. Flatt, “Towards a prediction of superplasticized concrete rheology”, *Materials and Structures*, vol. 37, pp. 289–300, 2004.
- [15] M. Barrioulet and C. Legrand, “Mise en évidence expérimentale des inteactions entre pâte interstitielle et granulats dans l’écoulement du béton frais vibré”, *Materials and Structures/Matériaux et Construction*, vol. 19, no. 112, pp. 274–277, 1986.
- [16] M. Barrioulet and C. Legrand, “L’effet de masse des granulats dans l’écoulement du béton frais vibré”, *Materials and Structures*, vol. 20, pp. 196–201, 1987.
- [17] F. De Larrard, *Structures Granulaires et Formulation Des Bétons*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, ouvrage d’art oa 34 edition, 2000.
- [18] M.R. Geiker, M. Brandl, L.N. Thrane, and L.F. Nielsen, “On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete”, *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 24, no. 1, pp. 3–6, 2002.

- [19] N.R. Andriamanantsilavo, *Comportement Des Matériaux Cimentaires Dans un Coffrage : Expérimentation, Modélisation et Simulation de la Poussée et Du Processus de Maturation*, PhD thesis, Université de Bretagne Sud, 2003.
- [20] N. Roussel, R. Flatt, A. Lemaître, and P. Coussot, “Rheophysical classification of fresh cementitious materials”, *à soumettre*, 2007.
- [21] R.J. Flatt, “Dispersion forces in cement suspensions”, *Cement and concrete research*, vol. 34, no. 3, pp. 399–408, 2004.
- [22] Lootens D., *Ciments et Suspensions Concentrées Modèles. Écoulement, Encombrement et Flocculation*, PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2004.
- [23] A. Yahia and K.H. Khayat, “Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grouts”, *Cement and concrete research*, vol. 31, no. 5, pp. 731–738, 2001.
- [24] C. Atzeni, L. Massida, and U. Sanna, “Comparison between rheological models for portland cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, vol. 15, no. 3, pp. 511–519, 1985.
- [25] P.F.G. Banfill, “The rheology of fresh cement and concrete - a review”, *11th International Cement Chemistry Congress*, 2003.
- [26] H. Van Damme, “Pastes : Lubricated and cohesive granular media”, *Comptes Rendus Physique*, vol. 3, pp. 229–238, 2002.
- [27] S. Mansoutre, *Des Suspensions Concentrées Aux Milieux Granulaires Lubrifiés*, PhD thesis, Université d’Orléans, 2000.
- [28] R. Lapasin, V. Longo, and S. Rajgelj, “Thixotropic behaviour of cement pastes”, *Cement and concrete research*, vol. 9, no. 3, pp. 309–318, 1983.
- [29] R. Lapasin, A. Papo, and S. Rajgelj, “Flow behavior of fresh cement pastes. a comparison of different rheological instruments and techniques”, *Cement and Concrete Research*, vol. 13, no. 3, pp. 349–356, 1983.
- [30] N. Roussel, “Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes”, *Cement and concrete research*, vol. 35, pp. 1656–1664, 2005.
- [31] P. Coussot and N. Roussel, “Quantification de la thixotropie des matériaux cimentaires et de ses effets”, *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, no. 1, pp. 45–63, 2006.
- [32] S. Jarny, *Thixotropie Des Pâtes Cimentaires*, PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [33] S. Jarny and P. Coussot, “Caractérisation des écoulements de pâte dans une géométrie couette”, *Rhéologie*, vol. 2, pp. 52–63, 2002.
- [34] F. De Larrard, C.F. Ferraris, and T. Sedran, “Fresh concrete : A herschel-bulkley material”, *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, pp. 494–498, 1998.
- [35] N. Roussel, “A thixotropy model for fresh fluid concretes : Theory, validation and applications”, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 1797–1806, 2006.
- [36] F. De Larrard, *Concrete Mixture Proportioning*, E and FN Spon, London, 1999.
- [37] C.F. Ferraris and F. De Larrard, “Testing and modelling of fresh concrete rheology”, *National Institute of Standards and Technology, NIST-Report 6094*, 1998.
- [38] L.F. Nielsen, “Rheology of some fluid extreme composites”, *Reprint from the Nordic Concrete Research*, vol. 2, pp. 83–93, 2001.
- [39] Y. Edamatsu, N. Nishida, and M. Ouchi, “A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles”, *Proceedings of the 17th Nordic Concrete Research Symposium, Stockholm*, pp. 309–320, September 1999.
- [40] T.C. Power, *The Properties of Fresh Concrete*, J Wiley and Sons, New York, U.S.A, 1968.

- [41] V.K. Bui, Y. Akkaya, and S.P. Shah, "Rheological model for self-consolidating concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 99, no. 6, pp. 549–559, 2002.
- [42] B. Pedersen and S. Smeplass, "The relationship between the rheological properties if SCC and the corresponding matrix phase", *Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland*, 17-20 August 2003.
- [43] Jin J., *Properties of Mortar for Self-Compacting Concrete*, PhD thesis, University of Londres, 2002.
- [44] I. Tanaka, N. Suzuki, Y. Ono, and M. Koishi, "Fluidity of spherical and mechanism for creating high fluidity", *Cement and Concrete Research*, vol. 28, no. 1, pp. 63–74, 1997.
- [45] C.F. Ferraris and J.M. Gaidis, "Connection between the rheology of concrete and rheology of cement paste", *ACI Materials Journal*, vol. 88, no. 4, pp. 388–393, 1992.
- [46] Z. Toutou, C. Lanos, P. Monnet, and A. Pantet, "Rhéométrie des géosuspensions : De la pâte de ciment au micro-bétons", *Rhéologie*, vol. 4, pp. 18–31, 2003.
- [47] Z. Toutou, C. Lanos, Y. Mélinge, and N. Roussel, "Modèle de viscosité multi-échelle : De la pâte de ciment au micro-béton", *Rhéologie*, vol. 5, pp. 1–9, 2004.
- [48] I.M. Krieger and T.J. Dougherty, "A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres", *Transactions of the Society of Rheology*, vol. 3, pp. 137–152, 1959.
- [49] Z. Toutou and N. Roussel, "Multi scale experimental study of concrete rheology : From water scale to gravel scale", *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 5, pp. 1–9, 2005.
- [50] S. G. Oh, T. Noguchi, and F. Tomosawa, "Toward mix design for rheology of self-compacting concrete", *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm*, pp. 361–372, 1999.
- [51] T. Wüstholtz, "A model approach to describe the fresh properties of self-compacting concrete (SCC)", *Otto-Graf-Journal*, vol. 16, pp. 79–93, 2005.
- [52] C.F. Ferraris and N.S. Martys, "De la pâte de ciment au béton : Modélisation et mesures expérimentales des proprités rhéologiques", *Rhéologie - Génie Civil et Environnement. Proceeding. 36ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie*, vol. Marne la Vallée, pp. 226–230, 10-12 Octobre 2001.
- [53] Projet National Calibé-Fabrication Du Béton, "MBE, formulation et suivi rhéologique des bétons-la méthode MBE", 2001.
- [54] G. Ovarlez and N. Roussel, "A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork", *Materials and Structures*, vol. 39, no. 2, 2006.
- [55] R. Shaughnessy and P.E. Clark, "The rheological behavior of fresh cement pastes", *Cement and concrete research*, vol. 18, no. 3, pp. 327–341, 1988.
- [56] P.J.M. Bartos, M. Sonebi, and A.K. Tamimi, "Workability and rheology of fresh concrete : Compendium of tests", *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 145-WSM, RILEM Publications, France*, 2001.
- [57] E.P. Koehler, D. W. Fowler, and C. F. Ferraris, "Summary of concrete workability test methods", *Research Report (105-1) of the International Center for Aggregates Research - University of Texas at Austin*, 2003.
- [58] N. Roussel and R. Le Roy, "The marsh cone : A test or a rheological apparatus?", *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 823–830, 2005.
- [59] J. Baron and R. Lesage, "Pour une étude pratique de la maniabilité : Le maniabilimètre LCPC lesage", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 13, 1965.
- [60] F. De Larrard and C.F. Ferraris, "Rhéologie du béton frais remanié : III- l'essai au cône d'Abrams modifié", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 215, pp. 53–60, 1998.

- [61] P.J.M. Bartos and M. Sonebi, "Filling ability and plastic settlement of self-compacting concrete", *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 35, no. 252, pp. 462–469, 2002.
- [62] P.J.M. Bartos, M. Sonebi, and A.K. Tamimi, "Workability and rheology of fresh concrete : Compendium of tests", *Report rep024 RILEM*, p. 156p, 2002.
- [63] P. Coussot and J.M. Piau, "A large-scale field coaxial cylinder rheometer to study the rheology of natural coarse suspensions", *Journal of Rheology*, vol. 39, pp. 105–124, 1995.
- [64] J.H. Mork, "A presentation of a b.m.l. viscometer", *RILEM*, pp. 369–376, 1996.
- [65] F. De Larrard, J.C. Szitkar, and C. Hu, "Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides", *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 186, pp. 55–59, 1993.
- [66] C. Hu, F. De Larrard, T. Sedran, C. Boulay, F. Bosc, and F. Deflorenne, "Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete", *Matériaux et Structures/Materials and Structures*, vol. 29, pp. 194, 1996.
- [67] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of concrete rheometers : International tests at LCPC (nantes, france) in october, 2000", *National Institute of Standards and Technology Internal Report 6819*, 2001.
- [68] C.F. Ferraris and L.E. Brower, "Comparison of concrete rheometers : International tests at MB (cleveland OH, USA) in may, 2003", *National Institute of Standards and Technology Internal Report 7154*, 2004.
- [69] N. Roussel, M. R. Geiker, F. Dufour, L. N. Thrane, and P. Szabo, "Computational modeling of concrete flow : State of the art", *Cement and Concrete Research*, 2007, soumis.
- [70] A. Schwartzentruber and C. Catherine, "La méthode du mortier de béton équivalent (MBE). un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. method of the concrete equivalent mortar (CEM). a new tool to design concrete containing admixture", *Material and Structures/Matériaux et Constructions*, vol. 33, pp. 475–482, 2000.
- [71] P. Bård and S. Sverre, "The relationship between the rheological properties of SCC and the corresponding matrix phase", *Third International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland*, 17-20 August 2003.
- [72] B.F. Goodrich, "Carbopol, polymers for pharmaceutical applications", *Documentation technique, bulletin 1*, 1996.
- [73] Noveon Inc, ", 2001.
- [74] A. Mekhatria, *Stabilité et Sédimentation de Sphères Dans un Fluide À Seuil*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [75] L. Jossic and A. Magnin, "Trainée et stabilité d'objet en fluide à seuil", *Les Cahiers de Rhéologie*, vol. 18, pp. 55–64, 1998.
- [76] R.J. Ketz, R.K. Prud'homme, and W.W. Graessley, "Rheology of concentrated microgel solutions", *Rheologica Acta*, vol. 27, no. 5, 1988.
- [77] A. Magnin and J.M. Piau, "Cone and plate rheometry of yield stress fluids. study of an aqueous gel", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 36, pp. 85–108, 1990.
- [78] G. Gheissary and B.H.A.A. Van Den Brule, "Unexpected phenomena observed in particle settling in non-newtonian media", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 249, pp. 123–126, 1996.
- [79] J. Labanda, P. Marco, and J. Llorens, "Rheological model to predict the thixotropic behaviour of colloidal dispersion", *Colloids and surfaces A*, vol. 249, pp. 123–126, 2004.
- [80] B.W. Barry and M.C. Meyer, "The rheological properties of carbopol gels", *Int. J. Pharm.*, vol. 2, pp. 27–40, 1979.
- [81] Y.I. Cho and J.P. Hartnett, "Non-newtonian fluids in circular pipe flow", *Advance Heat Transfer*, vol. 15, pp. 59–141, 1982.

- [82] L. Baudonnet, P. Michaud, J.-L. Grossiord, and F. Rodriguez, "Influence du mode opératoire sur les caractéristiques rhéologiques des gels de carbopols", *Les cahiers de Rhéologie*, vol. 18, no. 1, 2001.
- [83] N. Roussel, "A theoretical frame to study stability of fresh concrete", *RILEM Materials and Structures*, vol. 39, no. 285, 2006.
- [84] A. Magnin and J.-M. Piau, "Shear rheometry of fluids with a yield stress", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 23, pp. 91–106, 1987.
- [85] M. Hariharaputhiran, R.S. Subramanian, G.A. Campbell, and R.P. Chhabra, "The settling of spheres in a viscoplastic fluid", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 79, pp. 87–97, 1998.
- [86] O. Wallevik, "Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete", *Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland*, pp. 23–31, 2003.
- [87] G.Y. Onoda and E.G. Liniger, "Random loose packings of uniform spheres and the dilatancy onset", *Physical Review Letters*, vol. 64, no. 22, pp. 2727–2730, 1990.
- [88] P. Philippe and D. Bideau, "Compaction dynamics of a granular medium under vertical tapping", *Europhysical Letters*, vol. 60, no. 5, pp. 677–683, 2002.
- [89] S Bethmont, *Mécanisme de Ségrégation Dans Les Bétons Autoplaçants (BAP) - Etudes Expérimentales Des Interactions Granulaires*, PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [90] A.W. Saak, H.M. Jennings, and S.P. Shah, "New methodology for designing self-compacting concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 98, no. 6, pp. 429–439, 2001.
- [91] Y.B. He, J.S. Laskowski, and B. Klein, "Particle movement in non-newtonian slurries : The effect of yield stress on dense medium separation", *Chemical Engineering Science*, vol. 56, pp. 2991–2998, 2001.
- [92] D.D. Attapattu, R.P. Chhabra, and P.H. T. Uhlherr, "Creeping sphere motion in herschel-buckley fluids : Flow field and drag", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 59, pp. 245–265, 1995.
- [93] G.K. Batchelor and J.T. Green, "A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres", *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 56, pp. 401, 1972.
- [94] "Approche par homogénéisation des caractéristiques rhéologiques d'une suspension de particules dans un fluide de herschel-bukley", Cherbourg, 18-20 Octobre 2006, 41ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie.
- [95] Q.D. Nguyen and D.V. Boger, "Direct yield stress measurement with the vane method", *Journal of Rheology*, vol. 29, pp. 335–347, 1985.
- [96] T.L.H. Nguyen, N. Roussel, and P. Coussot, "Correlation between l-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 10, pp. 1789–1796, 2006.
- [97] J. Murata, "Flow and deformation of fresh concrete", *RILEM Materials and Structures*, vol. 98, pp. 117–129, 1984.
- [98] N. Roussel and P. Coussot, "'fifty-cent rheometer" for yield stress measurements : From slump to spreading flow", *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 3, pp. 705–718, 2005.
- [99] N. Roussel and P. Coussot, "Ecoulements d'affaissement et d'étalement : Modélisation, analyse et limites pratiques", *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, no. 1, pp. 25–44, 2006.
- [100] N.S. Martys, "Study of a dissipative particle dynamics based approach for modeling suspensions", *Journal of Rheology*, vol. 49, no. 2, pp. 401–424, 2005.

- [101] O. Petersson, "Simulation of self-compacting concrete - laboratory experiments and numerical modelling of testing method, jring and l-box test", *Proceeding of the 3rd international RILEM symposium on Self-Compacting concrete, Reykjavik, Iceland*, pp. 202–207, 2003.
- [102] M.A. Noor and T. Uomoto, "Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete", *Proceeding of the first international RILEM symposium on SCC, Stockholm*, 1998.
- [103] C.F. Ferraris and N.S. Martys, "Simulation of SCC flow", *Proceedings of 1st North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Chicago*, pp. 21–26, 2002.
- [104] L.N. Thrane, P. Szabo, M. Geiker, M. Glavind, and H. Stang, "Simulation of the test method l-box for self-compacting concrete", *Annual transactions of the nordic rheology society*, vol. 12, pp. 48–54, 2003.
- [105] Y. Tanigawa and H. Mori, "Analytical study on deformation of fresh concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 115, no. 3, pp. 493–508, 1989.
- [106] Hu C., *Rhéologie Des Bétons Fluides*, PhD thesis, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- [107] E.J. O'Donovan and R.I. Tanner, "Numerical study of the bingham squeeze film problem", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 15, pp. 75–83, 1984.
- [108] Papanastasiou T.C., "Flow of materials with yield", *Journal of Rheology*, vol. 31, pp. 385–404, 1987.
- [109] Flow3D Version 8.1, "User's manual", vol. 1, 2004.
- [110] N. Roussel, "Correlation between yield stress and slump : Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results", *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 501–509, 2006.
- [111] N. Roussel, "Three dimensional numerical simulations of slump tests", *Annual Transactions of the Nordic Rheology Conference vol 12, The Nordic Rheology Conference, Reykjavik, Iceland*, 2004.
- [112] T.L.H. Nguyen, *Prise En Compte Du Comportement Complexe Des Matériaux Cimentaires Dans la Maîtrise de la Mise En Oeuvre*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004, Rapport de stage.
- [113] T. Faug, *Simulation sur Modèle Réduit de L'Influence D'un Obstacle sur un Écoulement À Surface Libre-Application Aux Ouvrages de Protection Contre Les Avalanches de Neige*, PhD thesis, Université Joseph Fourier, 2004.
- [114] J.J. Benbow, S.H. Jazayeri, and J. Bridgwater, "The flow of paste through dies of complicated geometry", *Powder technology*, vol. 65, pp. 393–401, 1991.
- [115] M.M. Denn, "Extrusion instabilities and wall slip", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 33, pp. 265–297, 2001.
- [116] J.M. Piau, N. El Kissi, F. Toussaint, and A. Mezghani, "Distortions of polymer melt extrudates and their elimination using slippery surfaces", *Rheology Acta*, vol. 34, pp. 40–57, 1995.
- [117] P. Coussot, "Saffman-taylor instability in yield stress fluids", *Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 380, pp. 363–376, 1999.
- [118] N. Roussel, "The LCPC BOX : A cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC", *RILEM Materials and Structures*, soumis.
- [119] N. Roussel, T.L.H. Nguyen, and P. Coussot, "General probabilistic approach to the filtration process", *Physical review letters*, vol. 98, no. 11, pp. 4502–4505, 2007.
- [120] C. Kaiser, "Directed percolation model for clogging in a porous medium with small inhomogeneities", *Transport in Porous Media*, vol. 26, no. 2, pp. 133–146, 1997.

- [121] G.H. Goldsztein and J.C. Santamarina, "Solute transport during cyclic flow in saturated porous media", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 12, pp. 2432–2434, 2004.
- [122] J. Lee and J. Koplik, "Simple model for deep bed filtration", *Physical Review E. Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, vol. 54, no. 4-B pt B, pp. 4011, 1996.
- [123] S. Datta and S. Redner, "Gradient clogging in depth filtration", *Physical Review E. Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, vol. 58, no. 2-A, pp. 1203, 1998.
- [124] V.B. Pandya, S. Bhuniya, and K.C. Khilar, "Existence of a critical particle concentration in plugging of a packed bed", *AIChE Journal*, vol. 44, no. 4, pp. 978–981, 1998.
- [125] K.V. Sharp and R.J. Adrian, "On flow-blocking particle structures in microtubes", *Microfluid. Nanofluid.*, vol. 1, no. 4, pp. 376–380, 2005.
- [126] Y.H. Faure, A. Baudoin, P. Pierson, and O. Ple, "A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids", *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 24, no. 1, pp. 11–20, 2006.
- [127] J.E. Altoe, P. Bedrikovetsky, A.G. Siqueira, A.L.S. de Souza, and F.S. Shecaira, "Correction of basic equations for deep bed filtration with dispersion", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 51, no. 1-2, pp. 68–84, 2006.
- [128] Y.I. Kapranov, "The filtering of a suspension of solid particles", *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 63, no. 4, pp. 595–602, 1999.
- [129] S. Kosvintsev, I. Cumming, R. Holdich, D. Lloyd, and V. Starov, "Sieve mechanism of micro-filtration separation", *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 230, no. 1-3, pp. 167–183, 2004.
- [130] J. Kocurek and M. Palica, "Simulation and experimental verification of the filtration and filter cake compression model", *Powder Technology*, vol. 159, no. 1, pp. 17–26, 2005.
- [131] K. To, P.Y. Lai, and H.K. Pak, "Jamming of granular flow in a two-dimensional hopper", *Physical Review Letters*, vol. 86, no. 1, pp. 71–74, 2001.
- [132] J.R. Valdes and J.C. Santamarina, ", *Soc. Pet. Eng.*, p. 88819, 2004.
- [133] R. Sakthivadivel and Einstein H.A., ", *J. Hydr. Div.*, vol. 96, pp. 461, 1970.