



HAL
open science

Rhéologie des bétons fluides

Chong Hu

► **To cite this version:**

Chong Hu. Rhéologie des bétons fluides. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995. Français. NNT: . tel-00523283

HAL Id: tel-00523283

<https://pastel.hal.science/tel-00523283>

Submitted on 4 Oct 2010

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.

NS 18 476 (4)

X

THESE

présentée par

HU Chong

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Spécialité : STRUCTURES ET MATERIAUX

RHEOLOGIE DES BETONS FLUIDES

Date de soutenance : 27 janvier 1995

Composition du jury :

M. CHEYREZY	président
M. BARTOS	rapporteur
M. LEGRAND	rapporteur
M. BEAUPRE	examineur
M. COUSSOT	examineur
M. DE LARRARD	examineur
M. MÄDER	examineur
M. ROLLET	examineur

14

14



SOMMAIRE

Avant-propos	4
Résumé	6
1) Introduction	8
2) Synthèse bibliographique	9
2.1) Introduction	9
2.2) Rhéologie générale	10
2.2.1) Equations générales	10
2.2.2) Thixotropie	14
2.2.3) Dilatance	14
2.3) Quelques essais rhéologiques existants	15
2.3.1) Essais empiriques à béton	15
2.3.2) Viscosimètre à cylindre coaxiaux	18
2.4) Rhéologie de la pâte de ciment et du béton	27
2.4.1) Pâte de ciment, béton ordinaire et béton fluide	27
2.4.2) Structure des suspensions de la pâte de ciment	28
2.4.3) Comportements rhéologiques	31
2.5) Conclusion	41
3) Un nouveau rhéomètre pour bétons fluides : BT RHEOM	42
3.1) Conception du BT RHEOM	42
3.2) Dépouillement et interprétation de l'essai	49
3.2.1) Bases théoriques pour le dépouillement	49
3.2.2) Simulation numérique de l'effet de frottement des parois verticales et corrections	51
3.3) Calibration métrologique	62
3.4) Mode d'emploi du rhéomètre	65

3.5) Protocole des essais	68
3.5.1) Approche du comportement thixotropique du béton	68
3.5.2) Mesure du comportement du béton remanié (avec et sans vibration)	69
3.5.3) Suivi de l'évolution rhéologique du béton	74
3.5.4) Mesure de la dilatance	74
3.6) Essais de répétabilité	77
3.7) Essais comparatifs	79
3.8) Conclusion	93
4) Etude expérimentale du comportement rhéologique de quelques bétons fluides	94
4.1) Loi de comportement des bétons fluides.....	94
4.2) Relation entre slump et seuil de cisaillement.....	99
4.3) Phénomène de thixotropie	104
4.4) Evolution des caractéristiques rhéologiques en fonction du temps — liens entre béton et coulis.....	106
4.5) Influence de la vibration sur le comportement rhéologique	115
4.6) Dilatance du béton	118
4.7) Influence des paramètres de composition sur le comportement rhéologique.....	120
4.7.1) Etudes qualitatives.....	120
4.7.2) Modèle quantitatif pour estimer la viscosité des BHP — modèle de Farris adapté	123
4.8) Conclusion	130
5) Applications pratiques :	131
5.1) Etude préliminaire de la pompabilité du béton	131
5.1.1) Considération théorique	131
5.1.2) Expérimentation, résultats, et discussion	136
5.2) Application à la mise au point de formulations de bétons.....	142
5.3) Conclusion	145

6) Conclusion générale et perspectives	146
<u>Bibliographique</u>	149
<u>Annexes</u>.....	157
A. Des modèles pour décrire les lois de comportement.....	157
B. Quelques viscosimètres.....	159
C. Logiciel ADRHEO et son mode d'emploi.....	162
C.1) Présentation du logiciel ADRHEO.....	162
C.2) Utilisation du logiciel ADRHEO.....	173
C.3) Exemple des mesures des caractéristiques	186
D. Composition des bétons testés	191
E. Mesures brutes des essais de répétabilité	196

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été réalisé au sein de la division Bétons et Ciments pour Ouvrages d'Art du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, auquel j'adresse mes remerciements pour m'avoir accordé une bourse pour ce travail.

Je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance et tous mes remerciements à mon Directeur de thèse, Monsieur F. de LARRARD, chef de la section Formulation et Mise en oeuvre des Bétons, pour sa supervision efficace et éclairée, et ses conseils précieux tout au long de ce travail, ainsi que pour tous les soins prodigués.

Je rends hommage à Monsieur C. SZITKAR, qui a assuré la conception mécanique et l'assemblage du rhéomètre BT RHEOM. Je remercie également Messieurs M. JOLY et F. CLAUDX, qui ont assuré le fonctionnement de la partie électronique du BT RHEOM. Sans leurs efforts constants, ce travail n'aurait pu être réalisé.

Je remercie Monsieur M. CHEYREZY, Professeur associé à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie Monsieur C. LEGRAND, Professeur à l'Université Paul Sabatier, et Monsieur P.J.M. BARTOS, Professeur à l'Université de Paisley (Grande Bretagne), d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse et de participer au Jury.

Je remercie Monsieur P. COUSSOT, chercheur à CEMAGREF, de l'intérêt qu'il a porté à ce travail, de sa collaboration pour les essais comparatifs de nos rhéomètres, ainsi que pour avoir accepté de faire partie du Jury.

Je suis reconnaissant à Messieurs M. ROLLET de l'Association Technique des Liants Hydrauliques, U. MÄDER du Centre de Recherche de SIKA (Suisse), et D. BEAUPRE, Professeur à l'Université Laval (Québec), pour avoir accepté de faire partie du Jury.

J'exprime ma gratitude envers M. O.E. GJØRV, Professeur de l'Institut de Technologie de Norvège (The Norwegian Institute of Technology), M. MILLARD, Ingénieur du Commissariat à l'Energie Atomique, MM. SIGRIST, PAINT et COURTEIX de l'Aménagement EDF de Civaux, MM. NECTOUX et NIQUET de l'entreprise FOUGEROLLE FRANCE, l'équipe MATEBET des Ciments Lafarge à Viviers, l'équipe Béton — Ouvrage d'Art du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Blois, les Projets Nationaux SABLOCRETE et Voies Nouvelles pour le Matériau Béton, pour leur contribution matérielle ou financière à la présente recherche.

J'exprime également ma profonde gratitude à Monsieur P. ACKER, Chef de la division Bétons et Ciments pour Ouvrages d'Art du LCPC, pour son accueil au sein de son équipe dynamique et aimable.

J'adresse mes remerciements aux ingénieurs, techniciens et personnels administratifs du LCPC, qui m'ont aidé dans ce travail par leur collaboration, leurs conseils, et leur expérience, en particulier à Mme N. TCHANG, Mlle M.L. LEMESLE, MM. C. VINAMBRES, T.

SEDRAN, A. BELLOC et toute son équipe, C. BOULAY, F. GUERRIER, R. LEROY, P. ROUSSEL ... J'exprime également mes profonds sentiments amicaux à tous mes compagnons de stages d'hier et d'aujourd'hui, P. CASANOVA, D. CUSSON, Y. GAO, M. GOSSELIN, L. GRANGER, I. GUENOT, L. JIANG, T. LASSABATERE, Y. LEE, P. MARCHETT, V. WALLER ...

Enfin, je n'oublie pas de remercier les personnes qui me sont les plus chères: ma femme, mon père, mes soeurs et mes beaux frères. J'ai une pensée toute particulière pour ma mère, qui repose dans la paix éternelle.

RESUME

Ce travail est consacré à l'étude de la rhéologie des bétons fluides.

On relate le développement d'un rhéomètre à béton prototype de conception nouvelle, BT RHEOM. Le principe et la mise au point de l'appareil, ainsi que les différentes conduites des essais rhéologiques, sont décrits. Des études visant à estimer l'objectivité des mesures sont présentées.

On envisage ensuite quelques études expérimentales avec le BT RHEOM. Les comportements des bétons frais, sans et avec vibration, sont étudiés. Dans la plage de gradient de vitesse étudiée, ils respectent en général le modèle de Bingham, sous réserve que la consistance des bétons satisfasse certaines conditions, et que l'homogénéité des bétons soit acceptable. Les phénomènes de thixotropie et de dilatance des bétons sont ensuite discutés. On s'intéresse également à l'influence des paramètres de composition du béton sur le comportement rhéologique de ce dernier. On établit ainsi un modèle ayant pour objet l'estimation de la viscosité plastique des bétons à hautes performances, fournissant une aide à la formulation du béton.

Enfin, avec les caractéristiques intrinsèques d'un béton mesurées au BT RHEOM, on tente de modéliser un problème de chantier: le pompage du béton. On montre également une autre application de ce rhéomètre: la mise au point des formulations de BHP.

Mots clés : bétons à hautes performances, bétons fluides, bétons frais, calibration, comportement rhéologique, dilatance, éléments finis, formulation de bétons, fumée de silice, maniabilité, métrologie, modèle de Bingham, modèle de viscosité, perte de maniabilité, pilotage automatique, pompage, protocole des essais, rhéologie, rhéométrie, seuil de cisaillement, superplastifiant, thixotropie, vibration, viscosité plastique.

ABSTRACT

This research is devoted to the study of the rheology of fresh concrete.

We relate the development of a new prototype rheometer for concrete: BT RHEOM. The principle, the adjustments of the apparatus, and the procedures for different tests are described. Some studies for estimating the objectivity of the measures are also presented.

Later, we try to realise some experimental works with the BT RHEOM. The behaviours of the fresh concrete, with or without vibration, are studied. In the range of strain rate investigated, it is found that they follow generally the Bingham model, with some conditions about the consistency and the homogeneity of the concrete. The phenomena of thixotropy and dilatancy are discussed. We investigate also the influence of the parameters of the composition of concrete. A model is then established for estimating the plastic viscosity of high-performance concretes, which could give an aid to concrete mix-design.

Finally, with the intrinsic characteristics of a concrete measured with the BT RHEOM, we try to simulate a practice problem: the pumping of fresh concrete. We show also another application of this rheometer: the mix-design of a high-performance concrete.

Key words : *automatic control, Bingham model, calibration, dilatancy, finite elements, fluid concrete, fresh concrete, high-performance concrete, metrology, mix-design, plastic viscosity, pumping, rheology, rheological behaviour, rheometer, silica fume, slump loss, superplasticizer, testing procedures, thixotropy, vibration, viscosity model, workability, yield stress.*

1. INTRODUCTION

Le temps pendant lequel le béton reste frais est insignifiant par rapport à sa durée de vie totale. Pourtant, au cours de ce temps, beaucoup d'opérations s'effectuent: malaxage, transport, mise en place, serrage, etc. Ces opérations, dépendant notamment du comportement rhéologique des bétons, influencent en fait la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, apparence des parements, étanchéité, etc. Ainsi, l'étude du comportement rhéologique des bétons présente un grand intérêt industriel.

Malgré toute son importance, l'étude du comportement rhéologique des bétons est peu avancée aujourd'hui; cela est dû en grande partie à la complexité de ce matériau, qui présente une forte hétérogénéité. La caractérisation rhéologique des bétons frais reste donc toujours au niveau empirique. Avec l'apparition des nouveaux bétons fluides, l'insuffisance des moyens existants pour caractériser les bétons frais devient manifeste. De nouvelles caractérisations adéquates sont donc fortement demandées.

En 1973, TATTERSALL a développé un appareil d'essai rhéologique (appareil "Two-point test"), en adaptant le viscosimètre à cylindres coaxiaux au béton. Ses essais montraient que les bétons doivent être caractérisés par deux grandeurs, comme pour les matériaux de Bingham. Il a donc supposé que le comportement rhéologique du béton suivait le modèle de Bingham. Depuis lors, un certain nombre d'études ont été effectuées avec ce type d'appareil. Or, certains problèmes (tels que l'écoulement piston, l'inconnu sur le champ de vitesse, etc.) dans cet essai empêchent de remonter au comportement du matériau à partir des mesures macroscopiques. On ne peut donc déduire les caractéristiques intrinsèques du matériau. Le fait que le béton soit un matériau de Bingham demeure ainsi une assertion. Malgré tout, la nouvelle conception de TATTERSALL a tout de même indiqué un nouveau chemin pour la caractérisation du béton frais, et a ainsi ouvert une nouvelle époque dans ce domaine.

Dans ce travail, on effectuera d'abord une synthèse des connaissances actuelles de la rhéologie dans le domaine de génie civil (chapitre 2). On s'intéressera, en particulier, aux moyens d'essai et aux propriétés des pâtes de ciment et des bétons. La nécessité d'un nouvel essai rigoureux pour les bétons fluides nous conduit ainsi à développer un appareil prototype de conception nouvelle, le rhéomètre à béton BT RHEOM, dont le principe et la mise au point seront relatés au chapitre 3. Au même chapitre, on décrira des études relatives à l'objectivité de l'appareil; les différents protocoles d'essais rhéologiques seront également définis. Ensuite, on envisagera quelques études expérimentales avec le rhéomètre BT RHEOM (chapitre 4). La recherche des comportements de bétons frais, sans et sous vibration, sera le premier objet. Les études de la thixotropie et de la dilatance des bétons seront également au programme. On présentera ensuite l'influence rhéologique des paramètres de composition du béton. On construira ainsi un modèle ayant pour objet l'estimation de la viscosité plastique des bétons à hautes performances, et fournissant une aide à la formulation du béton. Au chapitre 5, on montrera deux applications pratiques du BT RHEOM. On s'intéressera d'abord au pompage du béton, lequel pose parfois des problèmes et provoque des pertes économiques importantes, en particulier dans les cas des BHP. La deuxième application sera la mise au point des formulations de BHP. Enfin, on conclura au dernier chapitre et on indiquera les perspectives de développement de la rhéologie des bétons fluides.

2. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1) Introduction

Ce n'est que depuis peu de temps que les ingénieurs se familiarisent avec le mot *rhéologie*. Un grand nombre de travaux ont été effectués dans le passé sur la rhéologie des matériaux, tels que polymères, huiles multigrades, peintures, adhésifs, produits agro-alimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, ou encore pâtes de ciment. Ceci résulte évidemment de la facilité d'étude autorisée par les petites tailles des particules de ces matériaux. Les diamètres des grains de ciment, par exemple, sont inférieurs à une centaine de microns. Cependant, la rhéologie des bétons est un domaine relativement vierge. Les difficultés viennent d'une part de la complexité de ces matériaux, constitués de plusieurs composants de nature différente: granulats, ciment, eau, air, éventuellement adjuvants et ajouts, d'autre part de leur grande étendue granulométrique, particules de dimension inférieure au micron jusqu'aux grains de quelques centimètres. Cette dernière difficulté impose un échantillon représentatif d'étude de dimension importante, et provoque parfois des problèmes de ségrégation et de dilatation pendant l'écoulement. Les essais rhéologiques des bétons sont ainsi rendus difficiles. Néanmoins, toutes ces difficultés n'ont pas pu empêcher de nombreux chercheurs, tels que L'HERMITE [1], BOMBLED [2], LESAGE [3], TATTERSALL [4], etc, de s'aventurer dans ce domaine et d'accumuler ainsi des connaissances. C'est grâce à eux que la rhéologie du béton frais progresse toujours. C'est également eux qui nous encouragent à continuer la recherche dans ce domaine.

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord les théories et quelques notions de bases de la rhéologie. Nous discutons ensuite de quelques moyens existants d'étudier la rhéologie des bétons, en particulier le viscosimètre à cylindres coaxiaux. Les connaissances dans le domaine de la rhéologie du béton sont résumées, et comparées avec celles de la pâte de ciment, matériau mieux connu, présentant certaines similitudes avec le béton, dont elle est une partie très importante.

2.2) Rhéologie générale [5,6]

Dans cette partie, on désire rappeler les bases de la science rhéologique, sans référence particulière au béton.

2.2.1) Equations générales

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées. La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres. Dans le cadre des matériaux fluides, on s'intéresse plus particulièrement à leur écoulement.

Généralement, en termes mécaniques, la grandeur cinématique correspondant à l'écoulement est le tenseur de gradient de vitesse $\dot{\underline{\underline{\epsilon}}}$. En coordonnées cartésiennes, on suppose que la vitesse \bar{v} d'un élément représentatif se situant à (x,y,z) à l'instant t est la suivante :

$$\bar{v} = v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y + v_z \bar{e}_z \quad (2-1)$$

$\dot{\underline{\underline{\epsilon}}}$ s'écrit :

$$\dot{\underline{\underline{\epsilon}}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} & \dot{\epsilon}_{yy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xz} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} & \dot{\epsilon}_{zz} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

Une autre grandeur correspondant à la force appliquée à l'élément est le tenseur de contrainte $\underline{\underline{\sigma}}$, exprimé sous la forme suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

Les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z = \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2-4)$$

où

$$\vec{f} = f_x \vec{e}_x + f_y \vec{e}_y + f_z \vec{e}_z \quad (2-5)$$

\vec{f} est le vecteur de force volumique, et ρ est la masse volumique du matériau. Généralement, on connaît \vec{f} . Il reste donc 10 inconnues dans l'équation (2-4) : σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} , v_x , v_y , v_z , ρ .

L'écriture de la conservation de la masse fournit une équation supplémentaire :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (2-6)$$

Pour résoudre un problème d'écoulement, il manque encore six équations. Ces dernières sont en fait fournies par la relation entre $\underline{\underline{\sigma}}$ et $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$, autrement dit la loi de comportement du matériau. On peut l'exprimer sous la forme suivante :

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}) = 0 \quad (2-7)$$

On définit la *viscosité absolue* μ_{abs} par le rapport de la contrainte de cisaillement, divisée par le gradient de vitesse. Les fluides peuvent avoir des comportements très différents. Une première catégorie de comportement regroupe les fluides qui s'écoulent à une vitesse proportionnelle à la contrainte de cisaillement appliquée, même si cette dernière est infinitésimale. Ces fluides sont dits *exclusivement visqueux* (voir Figure 2-1). Parmi ces fluides, les plus simples sont certainement ceux de Newton, caractérisés par une relation linéaire entre la contrainte de cisaillement τ et le gradient de vitesse $\dot{\gamma}$ pour un écoulement unidimensionnel. Pour ces matériaux, la viscosité absolue est constante:

$$\tau = \mu_{abs} \dot{\gamma} \quad (2-8)$$

μ_{abs} est alors simplement appelée *viscosité*, et s'exprime en Pa.s.

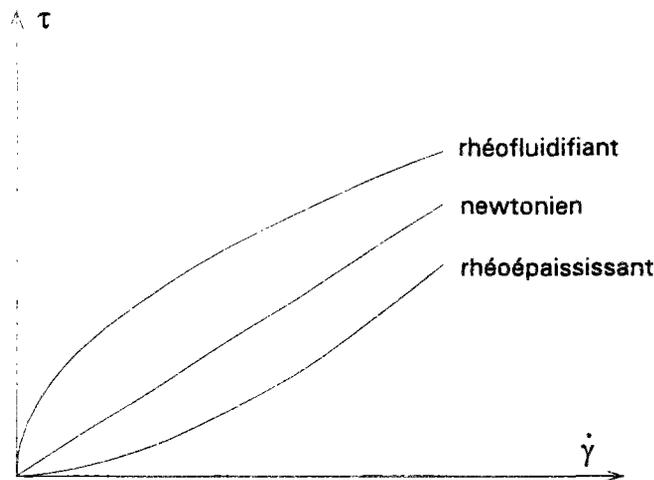


Figure 2-1 : Quelques courbes d'écoulement caractéristiques des fluides exclusivement visqueux.

Il existe une autre catégorie de fluides, pour lesquels une contrainte minimale est nécessaire afin de provoquer leur écoulement. Cette contrainte est appelée *seuil de cisaillement* τ_0 (en Pa). Les fluides de cette catégorie sont alors dits *viscoplastiques* (voir Figure 2-2). Parmi eux, les plus connus sont ceux de Bingham. La loi de comportement des fluides binghamiens s'écrit :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2-9)$$

où μ est la viscosité plastique (en Pa.s). Nous remarquons que les fluides newtoniens sont en fait un cas particulier des fluides binghamiens, pour lequel le seuil de cisaillement τ_0 est nul. Lorsque τ_0 est non nul, la viscosité absolue est différente de la viscosité plastique, et varie avec le gradient de vitesse.

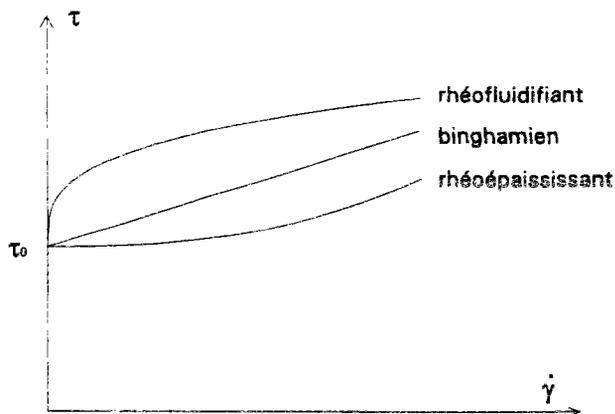


Figure 2-2 : Quelques courbes d'écoulement caractéristiques des fluides viscoplastiques.

Afin de modéliser des comportements qui ne sont ni linéaires ni affines, de type *rhéoépaississant* ou *rhéofluidifiant* (voir Figure 2-1 et 2-2), un certain nombre de modèles plus ou moins compliqués peuvent être trouvés dans la littérature. Nous en avons présenté quelques uns dans l'annexe A.

Prenons les fluides newtoniens, i.e. le cas le plus simple; l'équation (2-7) est concrétisée par les six équations suivantes :

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ \tau_{xy} = \mu \dot{\gamma}_{xy} \\ \tau_{xz} = \mu \dot{\gamma}_{xz} \\ \tau_{yz} = \mu \dot{\gamma}_{yz} \end{cases} \quad (2-10)$$

où

$$p = -\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3} \quad (2-11)$$

En reportant les équations (2-10) à (2-4), nous obtenons les fameuses équations de Navier-Stokes :

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x + \mu \nabla^2 v_x + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\text{div } \bar{v}) = \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y + \mu \nabla^2 v_y + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\text{div } \bar{v}) = \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z + \mu \nabla^2 v_z + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\text{div } \bar{v}) = \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2-12)$$

avec les opérateurs suivants :

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2-13)$$

$$\text{div} = \frac{\partial}{\partial x} \bar{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \bar{e}_y + \frac{\partial}{\partial z} \bar{e}_z \quad (2-14)$$

Vu la complexité de l'équation (2-12), on doit toujours simplifier le problème dans les cas particuliers. Par exemple, considérer que le mouvement du fluide est en *régime permanent** si l'écoulement change peu avec temps; prendre le fluide comme incompressible si son volume varie très peu en cours d'écoulement, négliger les efforts d'inertie (les termes des membres de droite du système) pour le mouvement d'un sphère, etc. Malgré tout, il y a en fait très peu de problèmes d'écoulement pour lesquels on puisse trouver des solutions analytiques.

2.2.2) Thixotropie

Après avoir dépassé le seuil de cisaillement, le matériau commence à s'écouler. Si l'effort nécessaire pour maintenir un écoulement constant diminue en fonction du temps (ou si l'écoulement s'accélère en fonction du temps à effort constant), on dit que ce matériau est *thixotrope*. Dans le cas contraire, on dit qu'il est *antithixotrope*. Ces deux phénomènes sont caractérisés dans la figure 2-3. Il faut noter que la thixotropie, ainsi que l'antithixotropie, sont définies comme étant des phénomènes réversibles.

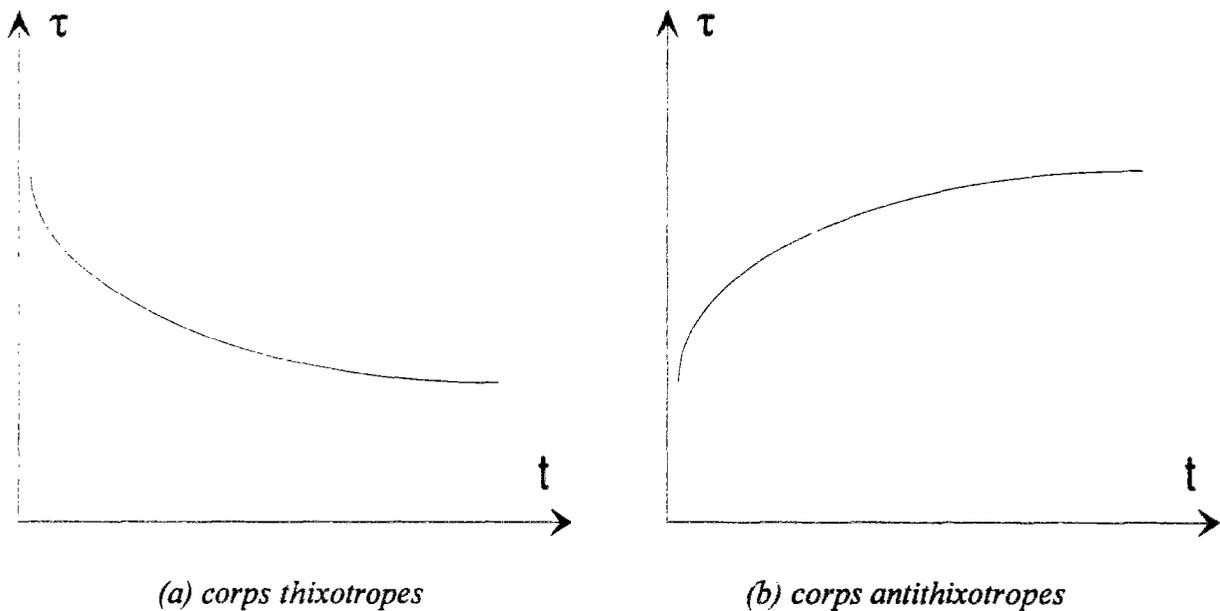


Figure 2-3 Phénomènes thixotrope et antithixotrope

2.2.3) Dilatance

La dilatance est la propriété que certains matériaux ont d'augmenter de volume lorsqu'ils se déforment. En fait, il s'agit particulièrement des matériaux bien compactés, dont la compacité diminue sous cisaillement afin de permettre une déformation ou un écoulement. Le phénomène contraire est la contractance. Il concerne certains matériaux, par exemple, certains sables, mais rarement les bétons.

* On dit qu'un écoulement est en *régime permanent* si ses variables ne dépendent pas du temps. Les termes liés au temps dans l'équation (2-12) peuvent ainsi être éliminés. Dans le cas contraire, l'écoulement est en *régime transitoire*.

2.3) Quelques essais rhéologiques existants

Dans le domaine des bétons frais, on a surtout étudié l'*ouvrabilité* (ou la *maniabilité*). Selon la définition de l'ASTM C 125, l'ouvrabilité d'un béton est la propriété déterminant l'effort demandé pour manipuler une certaine quantité du béton frais avec un minimum de perte d'homogénéité [7]. Pour décrire cette propriété du béton frais, on utilise également souvent les termes *consistance* et *cohésion*. Le premier est un indice de la mobilité (capacité de s'écouler) du béton frais, le seconde un indice de sa stabilité (capacité d'empêcher la ségrégation). Ce n'est que depuis quelques dizaines d'années qu'apparaissent des caractérisations plus précises, visant à déterminer des grandeurs apparentées aux paramètres de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité plastique).

L'essai rhéologique est toujours indispensable pour réaliser un ouvrage. Lors de la formulation du béton en laboratoire, il permet de prédire l'ouvrabilité du béton sur chantier. Au moment de la confection de l'ouvrage, il sert au contrôle-qualité, ce qui permet de prendre des mesures nécessaires avant la mise en place du béton, au cas où un accident aurait eu lieu en cours de fabrication. L'essai permet donc d'éviter ou de limiter au minimum la perte économique. On a inventé depuis longtemps de nombreux essais, essentiellement empiriques, pour évaluer l'ouvrabilité des bétons.

2.3.1) Essais empiriques pour béton

En développant un système de métrologie rhéologique adapté à différentes sortes de bétons, plus de cent types d'appareils ont été inventés dans le monde [8], dont seulement quelques-uns, les plus utilisés, seront présentés ci-après. Parmi les appareils d'essai rhéologique empiriques, les plus connus au niveau international sont le cône d'Abrams et l'appareil V.B. . En France, on utilise surtout, outre le cône, le maniabilimètre L.C.L. . En Allemagne, c'est la table à secousses qui est l'essai le plus courant.

- Le cône d'Abrams [9]

L'essai au cône d'Abrams est un essai normalisé (ASTM C 143 ou NFP 18-451). On remplit un moule tronconique de 300 mm de hauteur en trois couches successives de béton (6 litres environ au total), piquée chacune 25 fois; puis on démoule le cône et on mesure l'affaissement au centre original de la surface supérieure de l'échantillon (cf. Figure 2-4). Celui-ci varie de quelques millimètres, voire même zéro pour les bétons très secs (tel un béton routier) à une vingtaine de centimètres pour les bétons très fluides. En raison d'une sensibilité et d'une répétabilité mauvaises pour des bétons très secs et très fluides, cet essai ne convient a priori qu'aux bétons fermes à fluides. Sa superbe simplicité fournissant une certaine qualité est toujours très appréciée jusqu'à aujourd'hui sur chantier comme dans les laboratoires. Cependant, le grand défaut de cet essai est que des bétons ayant les mêmes affaissements peuvent présenter des comportements rhéologiques très différents. Autrement dit, la relation entre l'affaissement au cône et l'ouvrabilité n'est pas toujours univoque. Ceci crée des problèmes plus ou moins graves sur chantier. Actuellement, cet essai est beaucoup utilisé pour contrôler la qualité du béton, d'une gâchée à l'autre et avec une formulation fixée. Une variation anormale de l'affaissement peut être causée par un changement inattendu de formulation ou de matériaux. Néanmoins, pour les travaux de techniques très avancées, il apparaît que la mesure de l'affaissement n'est pas suffisamment sensibles. Quant à l'analyse des causes de variation, cet essai montre encore une fois ses limites.



Figure 2-4 : Le cône d'Abrams

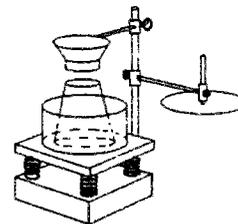


Figure 2-5 : L'appareil V.B.

- L'appareil V.B. [9]

Sous le nom "Vebe test", l'essai avec cet appareil est normalisé dans l'ACI Standard 211.3-75. Le schéma de l'appareil est présenté en figure 2-5. Un cône d'Abrams standard est placé dans un cylindre. Le cône est rempli de béton comme évoqué plus haut, puis le béton est démoulé. Un couvercle en verre de surface légèrement inférieure à celle du cylindre est ensuite placé au-dessus du béton. On applique une vibration de fréquence 50 Hz, d'accélération maximale égale à 3 à 4 fois celle de la pesanteur. Le temps pour que le béton soit remoulé de sa forme tronconique affaissée à la forme du cylindre est mesuré. Ce temps est considéré comme l'indication de la consistance du béton. Dans le cas où le volume du béton est changé de V_1 à V_2 , le temps doit être corrigé en le multipliant par un facteur V_1 / V_2 . Par rapport aux autres appareils, cet appareil de laboratoire convient particulièrement aux bétons secs.

- La table à secousses allemande [9]

L'essai de la table à secousses est normalisé dans la norme allemande DIN 1048 : TOME I. Une table de 700 mm de côté, composée d'une plaque en bois recouverte par une autre plaque en acier, dont la masse totale est de 16 kg, est articulée le long d'un côté avec une autre table de même dimension, servant de socle. Tout en basculant autour du côté articulé, la table supérieure peut être soulevée d'au maximum 40 mm, mise en butée par un système: elle tombe et frappe le socle quand elle est lâchée. Un cône de 200 mm de hauteur, 200 mm de diamètre en bas et 130 mm de diamètre en haut (volume 4,3 litres), est mis au milieu de la table, rempli de béton et puis retiré. Après 15 secondes d'attente, la table est soulevée, puis lâchée. Elle tombe alors librement. Cette procédure est effectuée 15 fois en 15 secondes. Les étalements maximaux parallèles aux deux côtés de la table sont ensuite mesurés. La valeur moyenne de ces deux mesures est considérée comme représentative de l'ouvrabilité du béton. La simplicité de cet essai lui permet d'être utilisé sur chantier. Parmi les appareils de chantier, l'avantage de celui-ci est son aspect dynamique, ce qui convient particulièrement aux bétons relativement visqueux, comme le sont souvent les BHP. Notons que cet essai a été utilisé dans le cadre du contrôle qualité pendant la construction du Pont de Normandie.

- Le maniabilimètre L.C.L. [3]

L'essai au maniabilimètre est normalisé dans la norme NFP 18-452. Une caisse métallique parallélépipédique à l'extrémité de laquelle est fixé un vibreur, est séparée en deux

compartiments par une trappe mobile. 30 litres du béton sont versés dans le compartiment le plus éloigné du vibreur (notons qu'il existe encore une "version mortier" ayant un volume de 1 litre pour les mortiers et bétons dont les dimensions des granulats sont inférieures à 15 mm). L'enlèvement de la trappe met automatiquement en route le vibreur. Le béton s'écoule sous l'effet de la vibration, et le temps nécessaire pour que le béton atteigne un repère tracé sur la paroi, côté vibreur, est considéré comme l'indication de la maniabilité (Figure 2-6). Il varie de quelques secondes à une minute. Cet appareil convient surtout aux bétons relativement secs du fait qu'il s'agit d'un essai dynamique. La taille considérable de l'appareil (version béton) garantit une excellente répétabilité. Le mode d'emploi est simple. Apprécié pour ses avantages, le maniabilimètre L.C.L. est souvent utilisé dans les laboratoires en France. Cependant, pour les bétons fluides, les temps d'écoulement ne sont pas très significatifs. Par ailleurs, son encombrement l'empêche d'être largement utilisé sur chantiers.

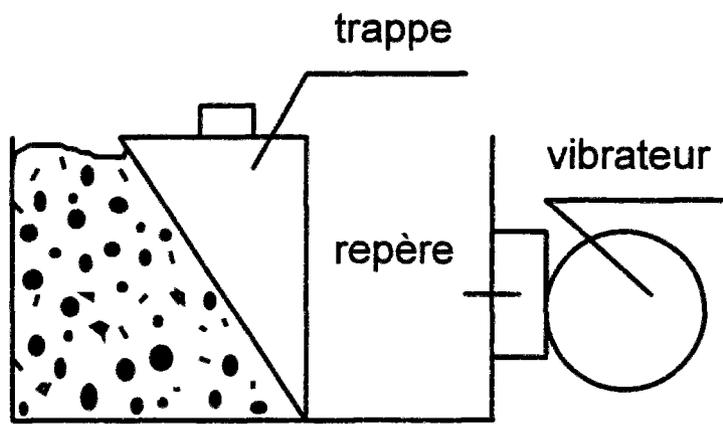


Figure 2-6 : Le maniabilimètre L.C.L.

- Le wattmètre [10]

Le wattmètre est plutôt un moyen d'apprécier l'ouvrabilité des bétons qu'un essai rhéologique. Dans certaines centrales à béton, on ajuste parfois le dosage en eau pendant la fabrication pour que la puissance dissipée par le moteur, mesurée par le wattmètre, soit la même que celle fixée comme objectif, correspondant à un béton ayant une ouvrabilité demandée. En admettant que le malaxeur fonctionne à vitesse imposée, pour des bétons ayant un comportement linéaire, comme celui des fluides newtoniens, la puissance est une indication directe du comportement des matériaux. Plus le béton est fluide, plus le malaxage est facile. Par contre, pour des bétons ayant des comportements différents de celui des fluides newtoniens, la même puissance exigée par différents bétons n'implique pas forcément que ces derniers aient des caractéristiques rhéologiques identiques.

- L'Orimet test [11]

C'est un essai conçu spécialement pour des bétons qui doivent rester stables sous l'eau. Ces bétons sont un peu particuliers: ils ont d'une part des valeurs de slump très élevées; d'autre part, ils ont une cohésion beaucoup plus élevée que des bétons ordinaires ayant également des valeurs de slump élevées. Ce dernier caractère provient de l'utilisation d'adjuvants chimiques spécifiques, afin d'éviter le délavage du béton. BARTOS [11] a mis au point cet essai, utilisable sur chantier, en vue de distinguer les bétons stables sous l'eau des bétons fluides

ordinaires. L'équipement comprend un tube vertical de 7,5 litres environ de volume, dans lequel on met du béton sans aucun compactage. Il y a un ajutage, interchangeable, en bas du tube. Une plaque mobile servant de porte est bloquée avant l'essai afin de boucher l'ajutage. Le tube est supporté par un tripode, lequel est installé sous le corps du tube, et abattable pendant le transport. Un récipient du 10 litres environ de volume est mis au-dessous de l'ajutage pour récupérer le béton écoulé. L'essai commence par l'ouverture rapide de la porte, en même temps que l'on déclenche un chronomètre de précision 0,2 seconde. On mesure le temps jusqu'auquel on voit la lumière à travers le tube. Ce temps d'écoulement est un indice rhéologique de l'essai. Il peut varier de 5 secondes à l'infini (écoulement partiel). Dans la pratique, on considère comme écoulement partiel ceux donnant des temps d'écoulement au-dessus de 60 secondes. On répète en général 2 à 3 fois l'essai, avec des échantillons différents, pour caractériser chaque béton. Les résultats de l'auteur montrent que cet essai est sensible et pratique pour identifier les bétons stables sous l'eau.

2.3.2) Viscosimètres à cylindres coaxiaux

Les essais empiriques, offrant très généralement une seule grandeur, ne peuvent traduire, à leur manière, qu'une seule facette du comportement rhéologique du béton frais [12]. Ces indices ne sont souvent pas liés directement aux caractéristiques intrinsèques des matériaux. Néanmoins, il existe un certain nombre d'essais qui visent à mesurer ces dernières. On utilise beaucoup les viscosimètres capillaires pour des fluides très peu visqueux. Pour des produits un peu plus visqueux, on utilise plutôt des viscosimètres à rotation. Pour ces derniers, différents types existent: écoulement entre deux plans horizontaux, entre un plan horizontal et un cône perpendiculaire, et entre deux cylindres coaxiaux. Les deux premiers types n'ont en principe pas de parois latérales. Cela ne pose pas trop de problème pour des matériaux de particules extrêmement fines dont l'effet de paroi est mis hors de question, ce qui permet d'utiliser un entrefer assez petit. Quant aux matériaux de particules plus grosses, comme la pâte de ciment, l'utilisation obligatoire d'un grand entrefer rend difficile le maintien de l'éprouvette dans l'espace. Dans ce cas, on utilise le viscosimètre à cylindres coaxiaux. Par ailleurs, ce dernier appareil est le seul type, jusqu'à aujourd'hui, qui ait été appliqué au béton. Nous allons donc décrire un peu plus en détail ce type d'essai. Les descriptions de quelques autres types d'appareil peuvent être trouvés dans l'annexe B.

i) Bases théoriques

Le principe du viscosimètre à cylindres coaxiaux est de forcer le fluide à s'écouler dans l'espace annulaire compris entre deux cylindres coaxiaux dont l'un tourne, et l'autre est fixe. La figure 2-7 schématise un viscosimètre à cylindres coaxiaux. On impose des vitesses de rotation constantes et on mesure les couples correspondants: on travaille à "*gradient de vitesse imposé*", ou l'inverse: on travaille à "*contrainte imposée*". Le grand intérêt de cet appareil est qu'avec plusieurs mesures, on peut tenter de déterminer des paramètres intrinsèques au matériau.

Si l'écoulement est laminaire et permanent, et s'il n'y a pas de glissement entre le béton et les parois verticales, la contrainte de cisaillement d'une surface cylindrique du rayon r dans l'échantillon peut être calculée par :

$$\tau = \frac{\Gamma}{2\pi hr^2} \quad (2-15)$$

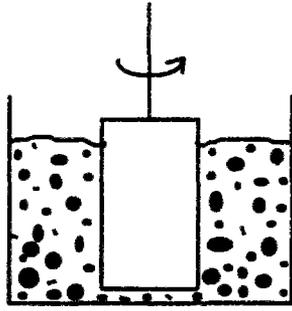


Figure 2-7 : Viscosimètre à cylindres coaxiaux.

où h est la hauteur de l'échantillon, et Γ le couple entraînant la rotation du cylindre. Théoriquement, pour un échantillon de matériau binghamien, et pour un couple donné, il existe un rayon critique r_c au-dessus duquel le matériau cesse de s'écouler ou s'écoule en bloc: on parle d'*écoulement piston* ("plug flow" en anglais). Ce rayon critique s'exprime sous la forme :

$$r_c = \sqrt{\frac{\Gamma}{2\pi h \tau_0}} \quad (2-16)$$

Au cas où l'écoulement a lieu dans tout le volume de l'échantillon, c'est-à-dire le rayon du cylindre extérieur R_2 est inférieur à r_c , on obtient pour un matériau binghamien l'équation de Reiner-Rivlin suivante [14] :

$$\Omega = \frac{\Gamma}{4\pi h \mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (2-17)$$

où Ω est la vitesse angulaire du cylindre, et R_1 le rayon du cylindre intérieur. Par contre, dans le cas $R_2 > r_c$, une autre équation doit être obtenue :

$$\Omega = \frac{\Gamma}{4\pi h R_1^2 \mu} - \frac{\tau_0}{2\mu} \left(1 + \ln \frac{\Gamma}{2\pi h R_1^2 \tau_0} \right) \quad (2-18)$$

La figure 2-8 montre la relation entre Ω et Γ dans toute la gamme de vitesse angulaire. Alors que le segment de droite AB est décrit par l'équation de Reiner-Rivlin, le segment courbe BC est caractérisé par l'équation (2-18). Sur cette figure, Γ_{r0} est le couple minimal pour démarrer la rotation du cylindre, dit *couple au démarrage*; Γ_0 le couple obtenu par l'extrapolation du segment droit AB vers l'axe du couple, c'est par ailleurs à partir de ce couple qu'on calcule le seuil régressé; Γ_c le couple minimal pour supprimer l'écoulement piston. Ces trois couples sont exprimés par les équations suivantes :

$$\Gamma_{r0} = 2\pi h R_1^2 \tau_0 \quad (2-19)$$

$$\Gamma_0 = \frac{4\pi h R_1^2 R_2^2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{(R_2^2 - R_1^2)} \tau_0 \quad (2-20)$$

$$\Gamma_c = 2\pi h R_2^2 \tau_0 \quad (2-21)$$

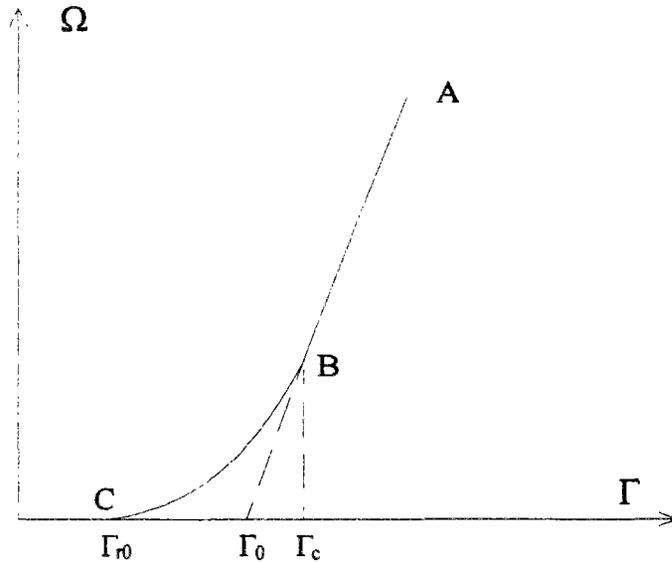


Figure 2-8 : Relation entre vitesse angulaire et couple exercé dans un viscosimètre pour un corps binghamien.

Nous notons que pour des fluides newtoniens, n'ayant donc pas de seuil de cisaillement, une seule équation régit tout le domaine des mesures élimine toute ambiguïté :

$$\Omega = \frac{\Gamma}{4\pi h \mu} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \quad (2-22)$$

Cela nous permet de trouver la viscosité du matériau. C'est par ailleurs la raison pour laquelle on appelle ce type d'appareil "viscosimètre".

- Si la distance e entre les deux cylindres est suffisamment petite pour que :

$$\frac{R_2}{R_1} \approx 1 \quad (2-23)$$

on peut considérer approximativement que la contrainte et le gradient de vitesse sont homogènes dans tout le corps, et valent en moyenne τ_m et $\dot{\gamma}_m$ calculées par les formules suivantes :

$$\tau_m = \frac{\Gamma}{2\pi h R_m^2} \quad (2-24)$$

$$\dot{\gamma}_m = \frac{\Omega R_m}{e} \quad (2-25)$$

où R_m est le rayon moyen des deux cylindres. Ceci permet donc d'obtenir directement le *rhéogramme* (courbe liant la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse).

En fait, la distance e doit être déterminée en prenant en compte l'effet de paroi¹, ce qui impose une dimension minimale d'éprouvette, en général d'au moins cinq fois le diamètre de la plus grosse particule Φ_{\max} [13] :

$$e = R_2 - R_1 \geq 5\Phi_{\max} \quad (2-26)$$

La condition (2-26) n'est pas très critique pour des suspensions de particules très fines, comme celles des pâtes de ciment. Ainsi un grand nombre d'appareils a été développé pour la pâte de ciment, comme les appareils BOMBLED en France, MERRIL-BROOKFIELD en Grande-Bretagne, AGFA en Allemagne, DRAGE en Suisse, POLARAD, STORMER, FANN aux Etats-Unis. Certains appareils ont même été normalisés [14].

Pour des suspensions de particules un peu plus grosses, il est très difficile de satisfaire en même temps les équations (2-23) et (2-26). Dans la pratique, on néglige le problème d'écoulement piston si les rayons de deux cylindres sont assez proches. BANFILL [15] a proposé la condition suivante sur la valeur du rapport des deux rayons :

$$R_2 / R_1 \leq 1,2 \quad (2-27)$$

Dans ce cas, on se trouve en figure 2-8 sur le segment droit AB. En ajustant une droite Γ en fonction de Ω , l'équation (2-17) nous permet de calculer les deux paramètres τ_0 et μ . C'est par ailleurs le protocole le plus pratiqué pour mesurer le seuil et la viscosité des matériaux dans les viscosimètres à cylindres coaxiaux [16].

- Si la distance e devient grande devant les rayons des cylindres, l'écoulement piston peut apparaître manifestement si bien que les mesures se situent toutes dans la partie BC sur la figure 2-8. Néanmoins, il est possible de retrouver les deux constantes caractéristiques dans ce cas [17]. En effet, l'équation (2-18) peut être écrite sous la forme :

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\tau_0}{2\mu} \left(\frac{\Gamma}{2\pi h R_1^2 \tau_0} - 1 - \ln \frac{\Gamma}{2\pi h R_1^2 \tau_0} \right) \\ &= \zeta \left(\frac{\Gamma}{\Gamma_{r0}} - 1 - \ln \frac{\Gamma}{\Gamma_{r0}} \right) \end{aligned} \quad (2-28)$$

¹L'effet de paroi, tel que défini à l'origine par Caquot [92], consiste en l'augmentation de porosité d'un mélange granulaire au voisinage de sa frontière avec une paroi. Cependant, si on admet que le comportement rhéologique d'un béton est fortement lié à la différence entre son dosage en eau et la porosité de son squelette granulaire, on voit que la paroi aura pour effet de diminuer l'aptitude du mélange à l'écoulement, par rapport aux propriétés rhéologiques du même béton en milieu infini.

Cet effet ne doit pas être confondu avec le *frottement de la paroi verticale* (lisse) sur le béton, qui perturbe son écoulement, par rapport au champ de vitesse théorique (cf. § 3.2.2).

avec :

$$\zeta = \frac{\tau_0}{2\mu} \quad (2-29)$$

En ajustant l'équation (2-28) avec les mesures, on obtient les deux constantes ζ et Γ_{r0} . Ces dernières nous permettent de calculer τ_0 et μ en utilisant (2-19) et (2-29).

Cependant, si les mesures apparaissent à la fois sur les deux segments AB et BC, il est difficile de distinguer les mesures dominées par l'équation (2-17) de celles dominées par l'équation (2-18). La difficulté sera encore accentuée au cas où peu de points de mesure sont disponibles.

Les méthodes de dépouillement décrites plus haut ne fonctionnent que pour des matériaux de Bingham. Récemment, COUSSOT [18] a proposé la théorie de dépouillement décrite plus bas, avec laquelle on peut identifier la loi de comportement quelconque de l'éprouvette, sans faire aucune hypothèse sur le comportement.

Soit la loi de comportement exprimée par :

$$\dot{\gamma} = \lambda(\tau) \quad (2-30)$$

Dans un viscosimètre à cylindres coaxiaux, la contrainte peut être calculée par :

$$\tau = \frac{\Gamma}{2\pi hr^2} \quad (2-31)$$

Pour des matériaux présentant un seuil de cisaillement, nous avons :

$$\lambda = 0 \quad \text{si} \quad \frac{\Gamma}{2\pi hr^2} \leq \tau_0 \quad (2-32)$$

Selon la définition, le gradient de vitesse s'écrit :

$$\dot{\gamma} = r \frac{\partial \omega}{\partial r} \quad (2-33)$$

où ω est la vitesse angulaire du fluide. Il vient alors :

$$\Omega = \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{r} \lambda \left(\frac{\Gamma}{2\pi hr^2} \right) d\lambda \quad (2-34)$$

En dérivant l'équation (2-34) par rapport à Γ , nous obtenons :

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \Gamma} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\dot{\lambda}}{2\pi hr^3} dr \quad (2-35)$$

Or, nous savons que :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \tau} = -\frac{\Gamma}{\pi h r^3} \dot{\lambda} \quad (2-36)$$

ce qui, implanté dans l'équation (2-35), nous permet d'arriver à :

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \Gamma} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} -\frac{1}{2\Gamma} d\tau \quad (2-37)$$

d'où :

$$\begin{aligned} 2\Gamma \frac{\partial \Omega}{\partial \Gamma} &= \lambda(\tau_1) - \lambda(\tau_2) \\ &= \lambda(\tau_1) - \lambda\left(\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \tau_1\right) \end{aligned} \quad (2-38)$$

soit en posant :

$$Y(\Gamma) = 2\Gamma \frac{\partial \Omega}{\partial \Gamma} \quad (2-39)$$

nous obtenons finalement :

$$\lambda(\tau_1) = \sum_{n=0}^{\infty} Y\left(\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{2n} \Gamma_1\right) \quad (2-40)$$

En général, le terme $(R_1/R_2)^{2n}$ décroît assez vite en fonction du pas d'itération n , et la dérivée $\partial \Omega / \partial \Gamma$ tend vers 0 quand Ω tend vers 0. La série converge donc assez rapidement.

ii) Adaptation à la suspension granulaire

A partir des années 70, certains chercheurs comme UZOMAKA [19], MURATA et KIKUKAWA [20], ont commencé à appliquer le principe du viscosimètre à cylindres coaxiaux au béton. Ces auteurs annonçaient que, selon leurs mesures, le comportement des bétons suit le modèle de Bingham. Mais les courbes d'écoulement n'ont pas été publiées. Leurs résultats sont très divers. Les valeurs de seuil de cisaillement et de viscosité plastique publiées par MURATA et KIKUKAWA sont respectivement 0,03 fois et 0,1 fois celles publiées par UZOMAKA, pour des formulations des bétons similaires [21]. On ne sera pas étonné de cette discordance, connaissant les dimensions de ces appareils: pour celui d'UZOMAKA, l'espace n'était que de $1,6 \varnothing_{\max}$; pour l'autre, $2,25 \varnothing_{\max}$, alors que R_2 / R_1 était égal à 1,6. Il semble donc que l'effet de paroi était important, et l'écoulement piston loin d'être négligeable.

Considérant que la difficulté liée à l'écoulement piston était presque infranchissable, TATTERSALL [4,12,21] a proposé des appareils de type malaxeur. Le premier appareil était un malaxeur HOBART avec un wattmètre. Une tige en forme de crochet tourne planétairement dans une cuve contenant du béton. Il y a 3 paliers de vitesse de rotation

possibles. Le wattmètre permet de mesurer la puissance (comme décrit dans la section précédente), et donc de calculer le couple en connaissant la vitesse constante imposée.

Plus tard, l'appareil a été modifié. La tige en forme de crochet a été remplacée par un cylindre garni de pales arrangées sous une forme hélicoïdale interrompue (voir Figure 2-9). Le nombre des paliers de vitesse de rotation a été augmenté. Par ailleurs, il y a eu également des changements technologiques. La précision de la mesure du couple a été accrue en utilisant la transmission hydraulique, plutôt que le wattmètre, comme auparavant.

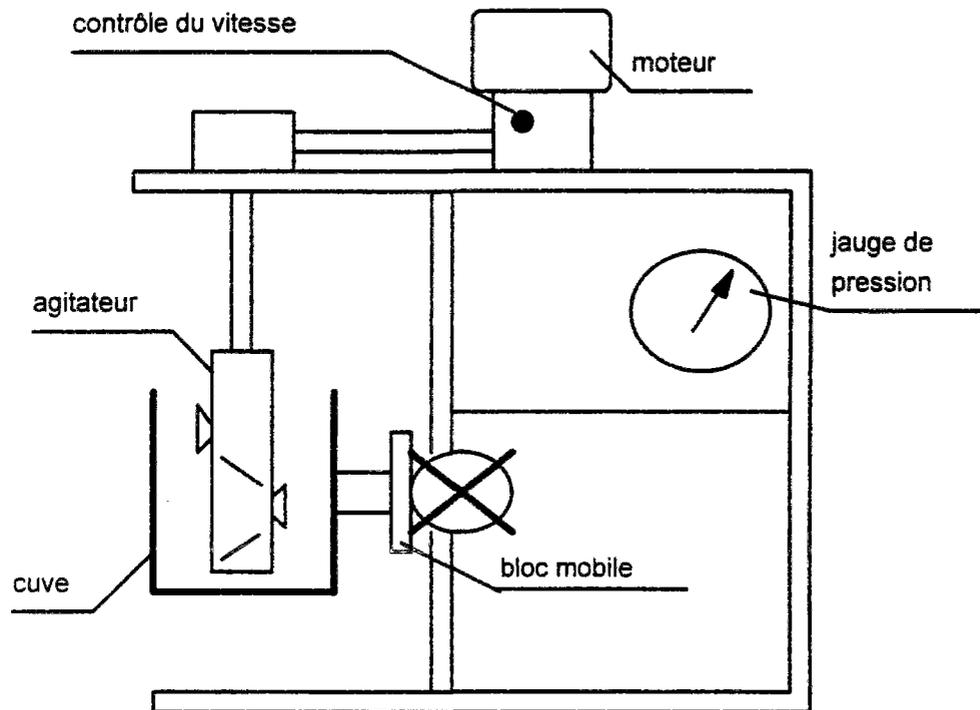


Figure 2-9 : L'appareil "Two-point test".

TATTERSALL [4,12] a également mentionné que les bétons sont des matériaux binghamiens. Il a trouvé, bien que la condition (2-27) ne soit pas satisfaite avec son appareil, une relation affine entre le couple mesuré et la vitesse angulaire imposé, comme celle qui doit être trouvée dans un viscosimètre à cylindres coaxiaux pour les matériaux binghamiens :

$$\Gamma = g + h\Omega \quad (2-41)$$

g et h sont deux constantes. Selon une analyse dimensionnelle en prenant des grandeurs P , Ω , μ , ρ et D qui représentent respectivement la puissance, la vitesse de rotation, la viscosité plastique, la masse volumique et le diamètre d'agitateur, l'auteur a montré que, pour les écoulements laminaires des fluides newtoniens, la relation qui suit existe dans cet appareil :

$$N_p = BR_e^{-1} \quad (2-42)$$

B est une constante de l'appareil, N_p et R_e le nombre de puissance et le nombre de Reynolds, exprimés par :

$$N_p = \frac{P}{\Omega^3 D^5 \rho} \quad (2-43)$$

$$R_e = \frac{D^2 \Omega \rho}{\mu} \quad (2-44)$$

Puis, l'équation (2-42) est généralisée aux fluides binghamiens en supposant :

$$\gamma = K\Omega \quad (2-45)$$

K étant une constante, et en substituant la viscosité μ par la viscosité absolue μ_{abs} définie par :

$$\mu_{abs} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2-46)$$

En remplaçant la puissance P par $2\pi\Gamma N$, l'auteur est arrivé à l'équation suivante :

$$\Gamma = \frac{BD^3}{K} \tau_0 + BD^3 \mu \Omega \quad (2-47)$$

où les constantes B et K sont calibrées expérimentalement avec des fluides newtoniens et des fluides non-newtoniens connus. Ainsi, les deux constantes g et h seraient liées au seuil de cisaillement et à la viscosité plastique à des constantes près.

Cependant, il est loin d'être évident que l'écoulement entraîné dans cet appareil soit laminaire, étant donné la forme de son agitateur. D'ailleurs, il apparaît que les dimensions de l'échantillon réel, définissant la partie de l'échantillon qui subit l'écoulement, sont des facteurs tellement importants qu'elles doivent être introduites comme des grandeurs dans l'analyse dimensionnelle. Pour les fluides newtoniens, on devrait prendre en compte l'espace entre le cylindre intérieur et la cuve. Quant aux matériaux ayant un seuil de cisaillement, on ne peut pas a priori exclure que l'écoulement piston ait lieu dans certaine partie de l'échantillon pour certains états de cisaillement. Cela provoque une grande difficulté pour bien définir cette grandeur, parce qu'elle est liée à l'une des caractéristiques du matériau: le seuil de cisaillement. La simplification consistant à prendre des géométries constantes risque de conduire à ce que des constantes calibrées pour des équations adimensionnelles dépendent finalement des caractéristiques des matériaux de l'échantillon. Quant à l'hypothèse que le gradient de vitesse effectif de l'échantillon est proportionnel à la vitesse de rotation de l'agitateur (équation (2-45)), ce qui implique que l'échantillon est sous un cisaillement simple, elle semble trop forte.

Malgré tous les inconvénients de l'appareil, TATTERSALL et al. ont effectué un nombre d'essais considérable, et ont offert ainsi des références très riches sur certains aspects rhéologiques des bétons. Plus récemment, avec une version automatisé de ce type d'appareil, BEAUPRE [22, 23] a essayé de caractériser les bétons projetés (par voie mouillée), dont la consistance varie en général de ferme à très ferme. Cet auteur a trouvé que les deux constantes données par l'appareil caractérisent assez bien ce type de bétons. En particulier, le paramètre g est bien relié à l'adhérence du béton projeté avec son support [23].

Pendant cette dernière dizaine d'années, beaucoup d'efforts ont été consacrés au développement d'appareils du type viscosimètre à cylindres coaxiaux [15,24,25]. Parmi les appareils existants, il semble que celui de WALLEVIK et GJØRV soit le plus connu.

Se basant sur le "two-point test" appareil, WALLEVIK et GJØRV [24,26] ont développé un appareil ("Viscometer BML"), qui s'approche davantage du viscosimètre à cylindres coaxiaux. La figure 2-10 schématise cet appareil. Les deux cylindres sont garnis de pales verticales pour empêcher les glissements entre les parois et le béton. C'est le cylindre extérieur qui tourne à des paliers de vitesse de rotation différents pouvant varier de 0,05 à 0,6 tours/seconde. Un grand avantage de cet appareil est que l'essai est automatisé; les acquisitions et le pilotage de l'essai sont tous contrôlés par un micro-ordinateur. Par ailleurs, le volume de l'éprouvette est important (18 litres environ). Tout cela permet a priori d'améliorer la répétabilité de l'essai. Selon les résultats publiés de six essais sur des bétons de même formulation, le coefficient de variation est de l'ordre de 20% [26].

Les dimensions (0,1m et 0,2 m des rayons intérieur et extérieur, et 0,2 m de hauteur) de cet appareil semblent satisfaisantes du point de vue de l'effet de paroi. Cependant, le rapport R_2/R_1 est un peu élevé. L'expérience de HU et al. [17] a montré que l'écoulement piston apparaît systématiquement pendant l'essai pour des bétons plastiques jusqu'à très plastiques.

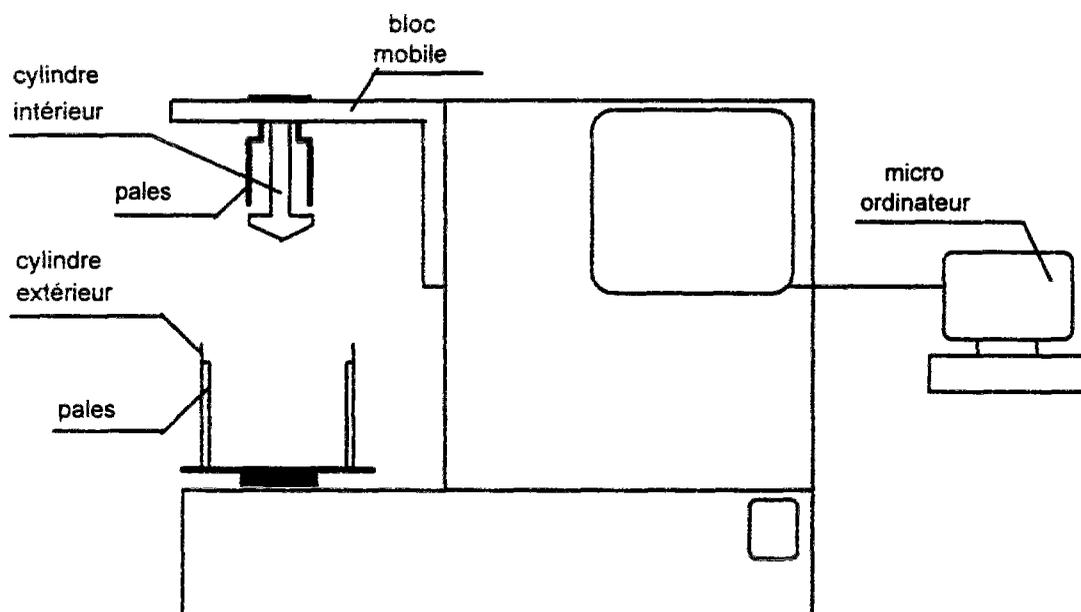


Figure 2-10 : Le Viscosimètre BML.

Examinant les viscosimètres à béton développés, on constate presque toujours qu'ils ne peuvent satisfaire à la fois les conditions (2-23) et (2-27). La raison en est évidente: prenons le cas où le diamètre maximal des gravillons est 20 mm. Les conditions (2-23) et (2-27) conduisent aux rayons intérieur et extérieur minimaux de 40 cm et 50 cm respectivement. Avec 10 cm de hauteur, on aura un volume d'échantillon de 20 litres et un poids de 45 kg environ (sans compter le poids de l'appareil lui-même). Un appareil si encombrant est évidemment peu envisageable du point de vue pratique.

2.4) Rhéologie de la pâte de ciment et du béton

2.4.1) Pâte de ciment, béton ordinaire et béton fluide

La pâte de ciment est un mélange relativement simple, composé de grains de ciment et d'eau. L'étendue granulaire de ciment varie de quelques unités à une centaine de microns. La gamme courante du rapport eau sur ciment E/C est de 0,30 à 0,85 environ [25]. Par ailleurs, on peut mettre dans la pâte certains ajouts minéraux comme des fillers, des cendres volantes, des fumées de silice, etc., afin d'obtenir des propriétés spécifiques. Ces produits finaux sont aussi appelés *coulis*.

Le béton est cependant un matériau plus complexe. Il est constitué de plusieurs composants, dont les principaux sont ciment, granulats et eau. Le rapport E/C du béton ordinaire peut varier de 0,4 à 0,8 [27]. Les ajouts minéraux décrits plus haut peuvent également être utilisés dans le béton pour le même objet que celui de la pâte. Il arrive aussi parfois qu'on ajoute des adjuvants chimiques pour améliorer l'ouvrabilité ou modifier les durées de différentes périodes de l'évolution chimique des bétons. Le béton ordinaire est souvent assez ferme. L'affaissement au cône est généralement inférieur à 15 cm, voire nul pour certains bétons.

L'augmentation continue du coût de la main d'oeuvre à notre époque crée une demande de plus en plus forte d'amélioration de l'ouvrabilité des bétons pour les ouvrages d'art. Ainsi est apparue récemment une nouvelle gamme de bétons fluides: les bétons à hautes performances (BHP). Ces bétons présentent beaucoup d'avantages: haute résistance, haut module d'élasticité, peu de ressuage, peu de fluage, haute durabilité, etc [28]. L'affaissement au cône de ce type de bétons est en général supérieur à 15 cm. La spécificité la plus importante de la formulation de ces bétons est sans doute l'utilisation de superplastifiant. Ceci conduit à un rapport E/C très faible, variant de 0,3 à 0,4, parfois moins [27]. Par ailleurs, on emploie fréquemment un ajout minéral: la fumée de silice. Malgré l'affaissement élevé des BHP, ces derniers présentent un aspect visqueux, qui provoquent parfois de mauvaises performances au pompage sur chantier. A l'heure actuelle, la difficulté de maîtriser la rhéologie des BHP semble être une des limitations quant à leur utilisation.

Actuellement, les bétons "autonivelants" sont en développement [29]. L'un des avantages importants de ce type de bétons serait de permettre de supprimer la vibration pendant la mise en place des bétons frais, même si les armatures dans les coffrages sont assez serrées. Par ailleurs, ces bétons devraient permettre de produire de très bons parements. L'essai au cône n'a plus de sens pour ces bétons, parce que ces derniers s'effondrent complètement après le soulèvement du cône. Certains problèmes rhéologiques liés à ce type de bétons restent encore à solutionner. Néanmoins, on n'y portera a priori pas d'attention particulière dans cette thèse.

VERNET et CADORET [30] ont présenté récemment les résultats d'une étude sur l'évolution chimique du ciment. Dès les premières minutes après le contact entre le ciment et l'eau, il se forme deux hydrates à germination rapide: l'un est le silicate de calcium hydraté (CSH), formé par combinaison des ions Ca^{2+} , SiO_4^{2-} et OH^- provenant des silicates de calcium du clinker; l'autre est l'ettringite, trisulfoaluminate de calcium hydraté formé par combinaison des ions Ca^{2+} , SiO_4^{2-} , AlO_2^- , et OH^- , provenant des aluminates du clinker et des régulateurs de prise (gypse, semi-hydrate, anhydrite). Suit alors une période dormante qui varie de quelques dizaines à une centaine de minutes, pendant laquelle la formation de CSH et d'ettringite se poursuivent lentement, et la phase aqueuse devient sursaturée en chaux. Puis, c'est la période de prise. Celle-ci intervient dès que le niveau de concentration en silicates de la phase aqueuse est descendu au-dessous d'un seuil voisin de quelques micromoles par litre. La consommation rapide d'ions Ca^{2+} et OH^- par la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ accélère la dissolution de tous les constituants du clinker. L'hydratation reprend rapidement. La prise peut durer quelques heures. Vient ensuite la période de durcissement pendant laquelle le matériau obtient sa résistance. L'hydratation progresse très vite pendant les premiers jours et devient lente après quelques

mois. Cependant, elle peut continuer plus de cent ans. D'un point de vue rhéologique restreint, nous ne nous intéressons qu'aux propriétés des bétons avant leurs prise.

La complexité du béton rend difficile l'étude rhéologique de ce matériau. Une simplification, considérant le béton frais comme un matériau à deux phases (la pâte de ciment et l'ensemble des granulats) a été proposée par certains auteurs [31,32]. Néanmoins, l'interaction entre ces deux phases ne consiste pas en une simple lubrification entre pâte et granulats, mais est une combinaison compliquée de l'effet visqueux de la pâte et de la masse des granulats [33,34]. Il est cependant utile de comprendre la rhéologie de la pâte de ciment, laquelle présente par ailleurs beaucoup de points communs avec celle du béton.

2.4.2) Structure des suspensions de la pâte de ciment [35]

Généralement, les grains de ciment anhydre sont chargés électriquement à leur surface, du fait de la rupture de liaisons électriques entre les cations et les anions pendant le broyage. Il est observé que les grains de ciment sont plus chargés négativement que positivement à la sortie des broyeurs. Cela provient notamment du fait qu'il existe plus de surfaces pour les sites négatifs que pour les sites positifs.

Quand un grain de ciment est mis en contact avec l'eau, les produits les plus solubles se dissolvent rapidement dans l'eau. La phase aqueuse est alors pratiquement saturée en ions (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , SiO_4^{2-} , OH^- , etc). Comme la surface du grain est dominée par des charges négatives, on peut penser que des ions positifs saturent la surface en formant une couche mono-ionique autour du grain. En fait, bien que plongé dans un liquide ionisé, le grain de ciment pourra présenter, notamment sur certaines zones anguleuses, des charges électriquement non saturées. Les anions s'empilent d'une façon instable sur ces aspérités. En ajoutant l'effet de l'agitation thermo-moléculaire, les ions se répartissent donc en une couche plus étendue, dite *couche diffuse de GOUY-CHAPMANN*. Les répartitions des concentrations ioniques dans cette couche diffuse est montrée en Figure 2-11.

Les ions entourant le grain forment alors un réseau dans lequel la mobilité des molécules d'eau diminue d'autant plus qu'elles approchent le grain. La diminution de la mobilité d'un liquide provoque évidemment un changement des propriétés physiques du corps, par exemple, une augmentation de la viscosité.

Outre les forces électrostatiques, les forces non-électriques entre toutes les particules participent également à la création d'une couche d'eau liée au grain de ciment. Parmi elles, les plus significatives sont les forces d'attraction de Van der Waals f_a et les forces de répulsion f_r , exprimées par :

$$f_a = \frac{\chi_1}{d^7} \quad (2-48)$$

$$f_r = -\frac{\chi_2}{d^{13}} \quad (2-49)$$

où d est la distance interparticulaire, χ_1 et χ_2 deux constantes. La résultante des deux forces est donc :

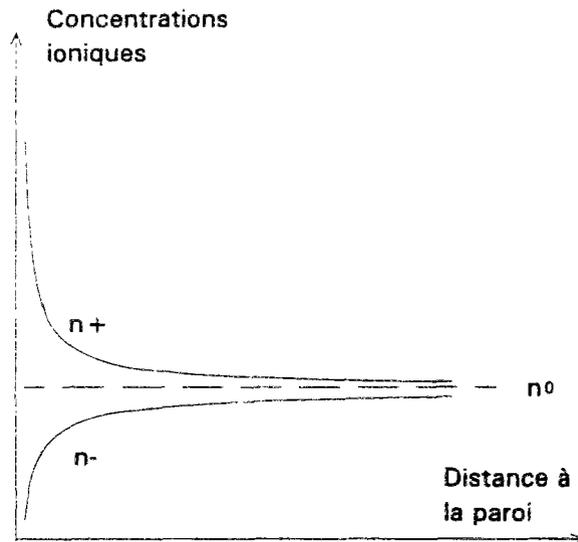


Figure 2-11 : Répartition des concentrations cationiques et anioniques en fonction de la distance à la paroi dans une couche diffuse de GOUY-CHAPMANN. n_0 est la concentration moyenne dans le liquide.

$$f = \frac{\chi_1}{d^7} - \frac{\chi_2}{d^{13}} \quad (2-50)$$

Selon cette équation, nous pouvons imaginer qu'il existe une distance d_0 du grain où la force résultante est nulle. A cette distance, un effort de compression (respectivement de traction) est nécessaire pour rapprocher (respectivement éloigner) les particules de la solution du grain. Au-delà de d_0 , les particules de l'eau sont attirées par le grain en formant une couche, dite *couche adsorbée*, dans laquelle la mobilité des molécules d'eau est plus faible que celle de l'eau libre. Néanmoins, en s'éloignant du grain, la force d'attraction disparaîtra très rapidement. L'épaisseur effective de cette couche est beaucoup moins grande que celle de GOUY-CHAPMANN (de l'ordre de 12,5 Å pour la première et 500 Å pour la seconde [35]).

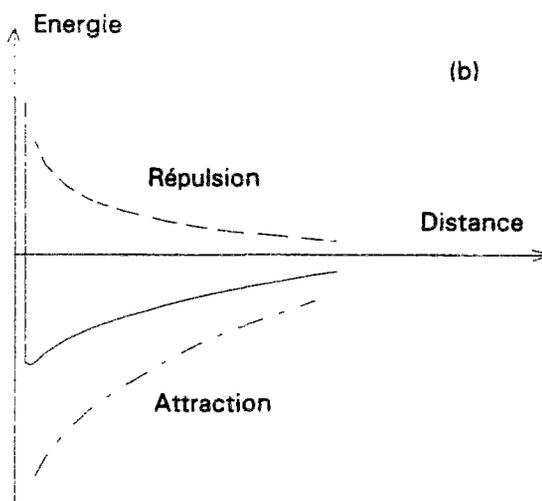
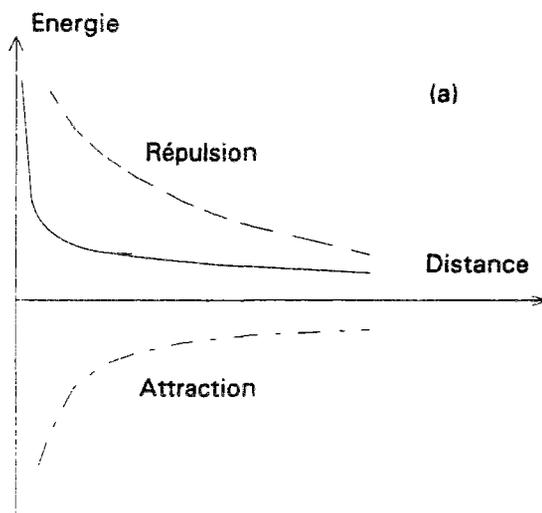
Comme c'est le cas entre un grain et des particules d'eau, il existe entre des grains des forces électrostatiques et des forces non-électriques: forces d'attraction de Van der Waals et forces de répulsion. Les forces de Van der Waals dépendent de la taille des particules. Elles ne deviennent significatives que pour des particules inférieures au micron. Les forces de répulsion, ainsi que les forces électrostatiques, ne dépendent elles guère de la taille des particules [27].

Enfin, notons qu'il y a également l'effort de pesanteur, qui fait descendre les grains vers le fond du récipient.

La figure 2-12 (a) représente le cas où l'énergie de répulsion est prépondérante dans une suspension de granulats sphériques. Quand la concentration en solide est faible, les grains descendent sous l'effet de la pesanteur jusqu'à ce que leurs distances mutuelles soient telles que les forces de répulsion apparaissent. Les grains se repoussent les uns les autres pour former un mélange dit *dispersé*. En augmentant la concentration en solide, tout le système sera

dispersé et en équilibre sous l'effet de la pesanteur et des réactions aux parois. Au-delà de cette concentration, il faudra exercer une compression pour s'opposer à la résultante de répulsion des grains.

Dans le cas où l'énergie d'attraction est prépondérante, cas représenté par la figure 2-12 (b), les grains, en faible concentration, descendent sous l'effet de la pesanteur jusqu'à ce qu'ils soient suffisamment près les uns des autres. Alors, les forces d'attraction apparaissent, et forment des flocons indépendants (le mélange est dit *floculé*). Si la concentration en solide arrive à une certaine limite, tous les flocons seront jointifs (le mélange est dit *floculent*), et puis la structure atteint l'état floculé le plus dense possible, ce qui correspond à l'état le plus compact du mélange (sans sollicitation externe).



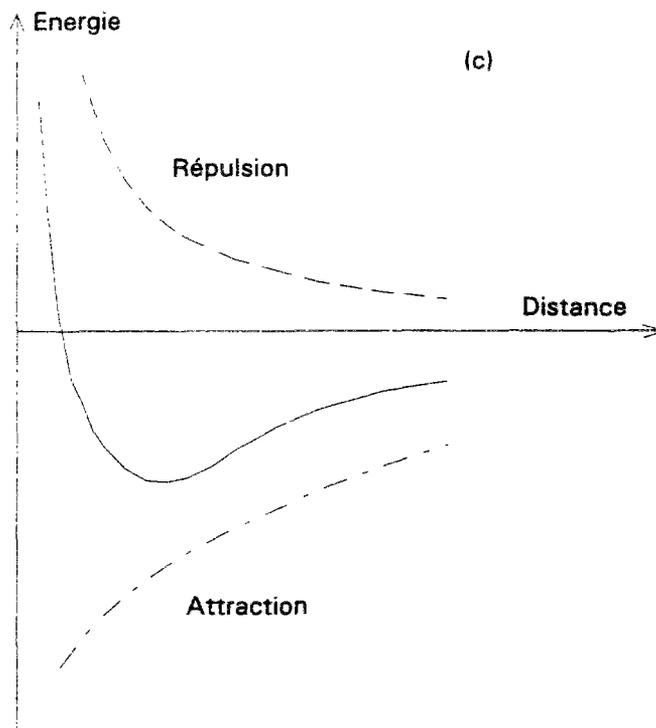


Figure 2-12 : Bilan énergétique entre deux grains.

Outre les deux cas extrêmes précédents, on peut rencontrer aussi le cas intermédiaire, montré à la figure 2-12 (c), où des suspensions floculées et dispersées existent en même temps.

Il semble que la résultante de toutes les forces dans la pâte de ciment amène à une structure stable, de type floculée. Les particules de taille inférieure au micron d'un ciment normal n'occupent que quelques pourcents en poids; cependant, leur nombre est considérable. STRUBLE [27] a rapporté que, pour un ciment de granulométrie normale, les grains de taille inférieure à $2 \mu\text{m}$ représentaient 3% en poids, mais 20% en nombre. Les forces de Van der Waals pourraient alors être plus importantes qu'on l'imagine. En plus des forces d'attraction électrostatique, l'énergie d'attraction domine la suspension. Cependant, pour les pâtes adjuvantées de fluidifiants ou superplastifiants, leurs structures sont plutôt de type dispersé [27].

2.4.3) Comportements rhéologiques

Ayant des particules assez fines, la pâte de ciment a pu être beaucoup étudiée avec des rhéométries habituelles, comme le viscosimètre à cylindres coaxiaux présenté au chapitre 2.3. Beaucoup de progrès ont alors été réalisés [36,37]. Par contre, nous avons vu qu'aucune rhéométrie existante n'est bien adaptée au béton. Les appareils plus ou moins simplifiés donnent soit des résultats qualitatifs, soit des résultats quantitatifs mais parfois très diversifiés. Malgré la grande incertitude sur certains aspects de la rhéologie du béton, la connaissance

actuelle, qui sera présentée dans les paragraphes ci-dessous, est très utile pour la continuation de la recherche dans ce domaine.

i) Thixotropie

Si l'on prend en compte l'effet d'hydratation du ciment, la thixotropie de la pâte de ciment, ou du béton, est masquée par l'irréversibilité de l'évolution du matériau. Cependant, si l'hydratation ne se produit pas trop rapidement pendant la période dormante, les matériaux à base de ciment présentent des aspects thixotropes sur un intervalle de temps assez court.

Les mouvements relatifs des particules rompent certaines liaisons de la structure. Alors, bien qu'elle apparaisse pendant l'écoulement des interpénétrations des couches diffuses, ainsi que des frottements et des chocs désordonnés entre les grains, la résistance à l'écoulement de la structure apparaît diminuée par rapport à l'état initial. La rupture des liaisons ne s'est pas faite d'un coup, mais progressivement. Certains auteurs [38,39] ont trouvé qu'elle nécessite une centaine de secondes pour des pâtes de ciment. En fait, ce temps dépend du cisaillement appliqué. D'ailleurs, LEGRAND [35] pense que les cisaillements faibles n'ont pas autant d'effets que les cisaillements forts, même au bout d'un temps très long. Après un certain temps de repos, les liaisons rompues de la structure du béton s'établissent à nouveau.

PAPO [40] a trouvé que pour certaines pâtes de ciment, la courbe de contrainte en fonction du temps à gradient de vitesse constant remonte après avoir atteint le minimum, en raison des nouvelles liaisons qui s'établissent au cours du temps et construisent ainsi une nouvelle structure. Puis, la courbe redescend à nouveau, toujours sous cisaillement continu. En fait, en tenant compte de l'hydratation du ciment, il n'est pas étonnant qu'une telle structure s'établisse au cours d'une certaine durée. Pour la première dégradation de contrainte (avant que la courbe ne remonte), POPO a tenté de la décrire par l'équation suivante :

$$\tau = \tau_2 + (\tau_1 - \tau_2) \exp(kt) \quad (2-51)$$

où τ_1 et τ_2 sont respectivement la contrainte maximale (initiale) et la contrainte minimale (la valeur du premier plateau au cas où il en existe plusieurs), k un paramètre dépendant du gradient de vitesse, et t le temps.

ii) Dilatance

Lorsqu'on cherche la caractérisation rhéologique d'un matériau granulaire, il est important de savoir si l'on est capable de conserver un échantillon homogène pendant la durée de l'essai. Ceci renvoie à la question difficile de la sédimentation des suspensions [41]. La concentration volumique en phase granulaire dans un mélange est limitée par la compacité à sec de cette même phase [42]. Cependant, en phase de cisaillement, la concentration maximale est plus faible, pour permettre à des plans de gravillons de glisser les uns sur les autres. Dans certaines formulations de béton, cette teneur critique peut être dépassée. Il s'ensuit que toute tentative de cisaillement du matériau se solde par une expansion spontanée de la phase granulaire, c'est-à-dire, une dilatance. Il s'agit bien ici d'un phénomène *intrinsèque au matériau*, et non imputable au moyen d'essai. Ce dernier ne peut alors que caractériser le comportement d'un béton modifié par le cisaillement, de teneur en gravillons plus faible. On constate ainsi souvent sur les chantiers l'existence d'une phase "caillouteuse" surnageant à la surface du béton frais en cours d'écoulement. Ce phénomène est encore plus manifeste dans les cas des laves torrentielles [18].

UKRAINCIIK [43] a constaté que la dilatace de bétons est liée à la contrainte de cisaillement. L'auteur a observé que le phénomène de dilatace est moins manifeste pour les mortiers, et qu'il est quasiment absent pour les pâtes de ciment.

iii) Loi de comportement

On s'intéresse ici au comportement des matériaux en régime permanent, qui n'interfère pas, en principe, avec la thixotropie. LEGRAND [44] a montré qu'il existe toujours un seuil pour les pâtes de ciment ayant des valeurs du rapport E/C élevées, jusqu'à 0,5. Leur comportement passe du type rhéoépaississant à binghamien (ou légèrement rhéofluidifiant) quand le rapport E/C augmente. La zone de transition, dans laquelle le comportement est instable, se situe dans la fourchette de valeurs du rapport E/C comprise entre 0,24 et 0,30. BARKAT et al. [38] a obtenu un seuil de 5 Pa pour une pâte de ciment de E/C = 0,38.

Les résultats des études effectuées avec les appareils de la famille du viscosimètre à cylindres coaxiaux sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle le comportement des bétons frais suit approximativement le modèle de Bingham [12,15,23,25,26,45]. Les auteurs donnent rarement les valeurs des caractéristiques intrinsèques. Ils utilisent plus souvent des mesures brutes, supposées liées aux caractéristiques intrinsèques.

iv) Influence de la vibration

Un rapport du "ACI Committee 309" [46] a indiqué que la vibration commence à produire un effet sur béton à une accélération de 0,5 g* environ. Dans la plage des accélérations comprises entre 1 et 4 g, l'effet de la vibration est proportionnel à son accélération, et dépend de la consistance de béton. Cependant, des accélérations plus élevées ne produisent pas plus d'effet. Le même rapport a proposé que pour une table vibrante, la gamme de fréquence convenable est comprise entre 50 et 100 Hz.

Un certain nombre d'études plus ou moins simplifiées ont été effectuées sur ce sujet. Il apparaît que l'influence de la vibration est notamment de réduire, voire de supprimer le seuil de cisaillement des pâtes de ciment. Ceci provient probablement du fait que les mouvements alternatifs et désordonnés des grains ont pour effet de rompre complètement les structures floculentes des pâtes. Les lois de comportement sont donc essentiellement visqueuses pour des pâtes sous vibration.

LEGRAND [14] a trouvé que les influences du rapport E/C sur la forme de la courbe d'écoulement sont analogues à celles obtenues sans vibration. Cependant, les courbes ne s'obtiennent pas par simple translation de celles sans vibration. Elles restent de type rhéoépaississant pour des E/C faibles, rhéofluidifiant pour des E/C élevés, et deviennent instables pour les valeurs intermédiaires de E/C. Pour avoir des vibrations efficaces, l'accélération doit être supérieure à celle de la pesanteur, avec des fréquences pas trop faibles (donc des amplitudes pas trop élevées afin d'éviter des agitations trop fortes du milieu), ni trop élevées (donc des amplitudes pas trop faibles afin d'obtenir des déplacements relatifs des grains suffisants). Par ailleurs, il faut éviter les fréquences de résonance du volume considéré.

Les études expérimentales de BARRIOULET et LEGRAND [47,48] ont montré que la masse des granulats a un effet important sur l'écoulement du béton frais vibré. L'écoulement

* g : accélération de la pesanteur (9,81 m/s²).

est d'autant facile que la masse des granulats est plus élevée. Par contre, l'influence de la forme des granulats n'est que secondaire par rapport à la précédente.

TATTERSALL, BORGESSION et KAKUTA [49,50,51] ont trouvé que la vibration supprime totalement le seuil des bétons, et que le comportement des bétons sous vibration suit le modèle de puissance (sans seuil dans le modèle de Herschel-Bulkley, cf. annexe A) sous la forme :

$$\tau = a \dot{\gamma}^b \quad (2-52)$$

a et b étant deux paramètres. La constante b s'approche de 1, notamment dans la gamme des faibles gradients de vitesse. Selon ces auteurs, faibles fréquences et amplitudes élevées sont plus efficaces. Ainsi, il vaut mieux que la fréquence ne dépasse pas, par exemple, 300 Hz.

v) Influence de la composition des bétons

Le béton est constitué de différents composants, chacun jouant un rôle différent dans le comportement rhéologique du béton. Il existe d'ailleurs des interactions entre certains composants. La difficulté de mettre tout cela en lumière est majeure. Néanmoins, certains résultats, lesquels nous résumons ci-après, ont été obtenus par certains chercheurs.

Eau

Il est connu que l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. En augmentant la quantité d'eau, la concentration en solide diminue, et le béton devient fluide: son seuil de cisaillement et sa viscosité plastique diminuent [52]. Cependant, en plus de diminuer la résistance mécanique du béton mature, l'introduction excessive d'eau provoque des problèmes de ségrégation.

Ciment

Etant un matériau réactif dans un milieu où l'eau est présente, la quantité de ciment joue un rôle très important du point de vue de la résistance mécanique du béton. Cependant, son rôle rhéologique est moins remarquable qu'on l'imagine, si on demeure dans la plage courante des dosages en ciment. DE LARRARD [53] a montré que, pour un béton ordinaire, à dosage en eau constante, la variation de la quantité de ciment sur une très large gamme n'a pas beaucoup d'effet sur le slump (voir figure 2-13). Il y existe par ailleurs un dosage optimal en ciment.

Par contre, des changements de composition chimique du ciment, en particulier la teneur en C_3A , peuvent avoir des effets spectaculaires. BACKES et VOM BERG [54] ont trouvé que, pour les pâtes de ciment, le seuil augmente brutalement en fonction de la teneur en C_3A quand cette dernière varie de 7,5% à 9,5% environ. En dehors de cette zone, le seuil ne dépend pratiquement pas de la teneur en C_3A . Quant à la viscosité, elle augmente régulièrement en fonction de la teneur en C_3A . Cependant, il apparaît que ce n'est pas la teneur totale, mais plutôt la quantité de C_3A dissous dans la solution pendant les premières minutes de contact avec l'eau, qui influence le plus les propriétés rhéologiques [54,55]. La finesse du ciment est également un facteur important. VOM BERG [56] montre que, à poids constant, les caractéristiques rhéologiques sont fonction croissante de la surface spécifique du ciment.

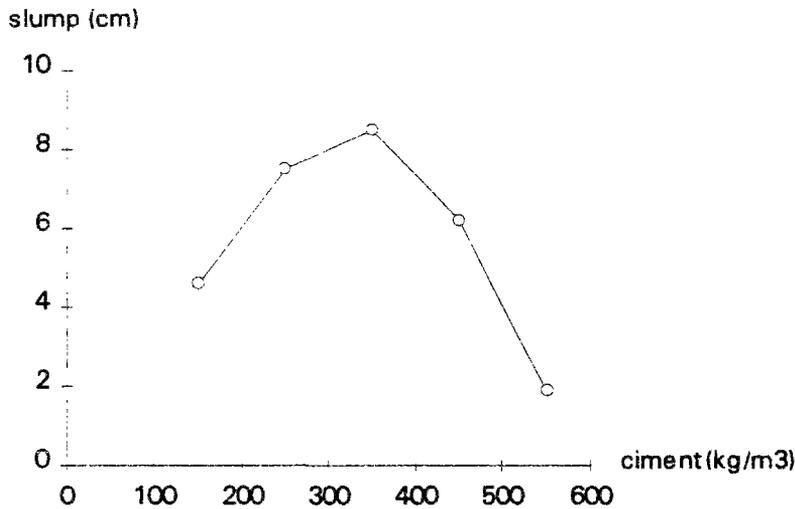


Figure 2-13 : Slump en fonction de la teneur en ciment pour un béton ordinaire.

Superplastifiant [57,58,59]

Les superplastifiants (ou fluidifiants) sont des molécules polaires. Ces dernières présentent une extrémité fortement chargée qui vient neutraliser un site opposé sur les grains de ciment. Il existe même des produits de nature non-ionique. Dans ce cas, les molécules agissent comme des dipôles qui viennent se fixer sur les grains de ciment. Les superplastifiants dispersent alors les flocons des pâtes de ciment et permettent ainsi une réduction d'eau.

Les superplastifiants sont des produits à base de résine de synthèse à masses moléculaires élevées (plusieurs milliers). Ils donnent des effets de dispersion beaucoup plus efficaces que les plastifiants classiques. Cependant, ces produits présentent souvent un inconvénient, à savoir une perte rapide de maniabilité. Les facteurs peuvent être nombreux: type de superplastifiant, dosage, type de ciment, compatibilité superplastifiant/ciment, etc. En ce qui concerne l'action du superplastifiant, il semble que les molécules s'adsorbent préférentiellement et solidement sur les aluminates tricalciques et silicates bi- et tricalciques, et en contrôlent efficacement l'hydratation. Or, la quantité de superplastifiant adsorbée sur les C_3A est abondante, même pendant les premières secondes. Les molécules sur-adsorbées perdent alors leur rôle dispersant. C'est la raison pour laquelle on obtient souvent une meilleure maniabilité par un retard de 0,5 à 3 minutes à l'introduction de superplastifiant, après que la plupart des C_3A ont été enveloppés par de l'ettringite. Les natures chimiques des superplastifiants du commerce les plus répandus sont le condensat de naphthalène sulfoné et de formaldéhyde et le condensat de mélamine sulfonée et de formaldéhyde.

BANFILL [52,60] a constaté que les fluidifiants, ainsi que les superplastifiants, ont pour effet de diminuer fortement le seuil, mais ils ne modifient guère la viscosité plastique.

Entraîneur d'air

Selon les études sur mortiers de BANFILL [52,60], l'entraîneur d'air diminue la viscosité, mais influence peu le seuil. Pourtant, BEAUPRE [23] a trouvé des résultats inverses pour ses bétons.

Granulats

Cet élément, tout comme le ciment, n'a qu'un effet secondaire du point de vue rhéologique. Cependant, BARON et LESAGE [61] ont montré que l'optimum de compacité du mélange granulaire sec correspond à l'optimum de fluidité du béton à teneur en eau constante. On peut voir, en figure 2-14, qu'il existe un rapport gravillon/sable optimal vis-à-vis du slump.

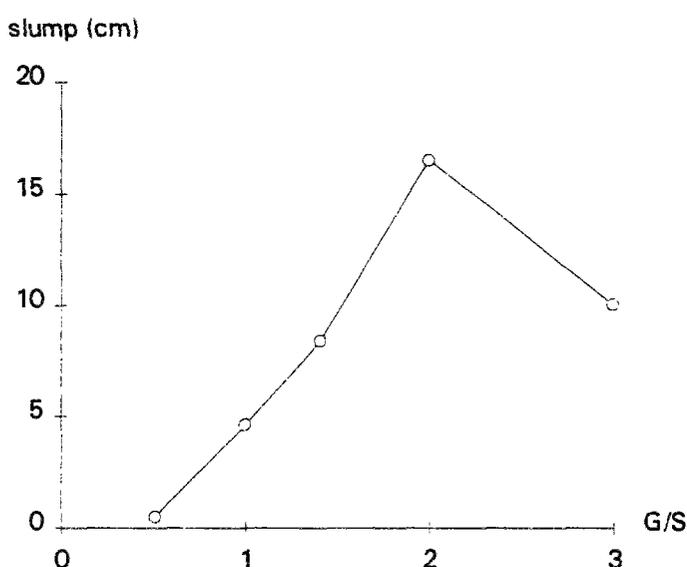


Figure 2-14 : Slump en fonction du rapport G/S (gravillon/sable) pour un béton ordinaire [53].

Fumée de silice

La fumée de silice présente un effet pouzzolanique. Néanmoins, c'est à court terme un matériau inerte. Les tailles très petites de ses grains, $0,2 \mu\text{m}$ en moyenne, lui fournissent pourtant un rôle rhéologique particulier. D'après certaines publications [23,45,62], pour les bétons, en restant à faible pourcentage, l'augmentation du dosage en fumée de silice diminue la pseudo-viscosité, mais n'influence pas le pseudo-seuil. Au-dessus d'un certain dosage critique, le pseudo-seuil augmente et la pseudo-viscosité remonte. Selon les résultats sur coulis publiés par AÏTCIN et al. [63], sans superplastifiant, la viscosité augmente rapidement en fonction du dosage en fumée de silice. Cependant, le superplastifiant étant dosé à saturation, l'introduction de fumée de silice n'augmente que légèrement la viscosité. Par ailleurs, les viscosités des coulis contenant de la fumée de silice montent beaucoup plus rapidement avec le temps que celles des coulis sans fumée de silice, à moins que les viscosités initiales des coulis avec fumée de silice ne soient assez faibles, à savoir environ 30% de celles

des coulis sans fumée de silice, auquel cas leurs évolutions sont comparables. La granulométrie de la fumée de silice semblent avoir également une influence rhéologique. BUIL et al. [64] ont trouvé que les fumées de silice de granulométrie plus étendue sont plus favorables au maintien de la maniabilité des bétons.

Fillers

Pour de faibles pourcentages, il semble que le filler ne modifie pas l'aspect rhéologique des pâtes. BUIL et PAILLÈRE [65] ont montré que, pour un volume de filler inférieur à 10% de celui de ciment, la viscosité des pâtes ne change pratiquement pas à même E/C.

Hormis la composition du béton, certains autres facteurs peuvent avoir une influence rhéologique. Parmi eux, la température est l'un des plus importants. En général, l'ouvrabilité diminue quand la température monte, sauf pour certains ciments particuliers [66]. L'évolution est de toute façon plus rapide.

vi) Estimation des caractéristiques

Un certain nombre de chercheurs ont tenté d'établir des modèles plus ou moins empiriques pour estimer quantitativement le seuil de cisaillement et la viscosité plastique à partir de la formulation du mélange. Nous en présentons quelques-uns dans les paragraphes suivants.

Modèle de Legrand [67]

La formule suivante a été proposée par LEGRAND pour estimer le seuil de cisaillement de la pâte de ciment :

$$\tau_0 = a e^{b(\Phi-0.5)} \quad (2-53)$$

Φ est la concentration en ciment. a et b sont deux paramètres à fixer, dépendants de la granulométrie et de la surface spécifique du ciment. Ce modèle donne une évolution très rapide du seuil suivant la variation de la concentration en solide.

Modèles de Hobbs [32]

L'idée de ces modèles est de considérer le béton comme un matériau composite constitué de deux phases: pâte de ciment et granulats. L'auteur essaie de prédire les propriétés du béton en fonction de celles de la pâte de ciment.

Les lois de comportement de la pâte et du béton peuvent être écrites de la façon suivante :

$$\tau_p = \tau_{0p} + \mu_p \dot{\gamma}_p \quad (2-54)$$

$$\tau_b = \tau_{0b} + \mu_b \dot{\gamma}_b \quad (2-55)$$

où les indices p et b représentent respectivement la pâte et le béton. La contrainte moyenne et le seuil dans un volume élémentaire représentatif du béton s'écrivent :

$$\tau_b = (1 - \Phi_g) \tau_p + \Phi_g \tau_g \quad (2-56)$$

$$\tau_{0b} = (1 - \Phi_g)\tau_{0p} + \Phi_g\tau_{0g} \quad (2-57)$$

où τ_g est la contrainte exercée sur le granulat, τ_{0g} la contribution du granulat au seuil de cisaillement du béton, et Φ_g la concentration volumique en granulats, définie par :

$$\Phi_g = \frac{V_g}{V_T} \quad (2-58)$$

V_g et V_T étant le volume de granulats et le volume total du mélange. Les équations (2-56) et (2-57) donnent :

$$(\tau_b - \tau_{0b}) = (1 - \Phi_g)(\tau_p - \tau_{0p}) + \Phi_g(\tau_g - \tau_{0g}) \quad (2-59)$$

En considérant que seule la pâte est déformable (les granulats eux sont rigides), le gradient de vitesse moyen dans le même volume élémentaire représentatif peut être écrit sous la forme :

$$\dot{\gamma}_b = \dot{\gamma}_p(1 - \Phi_g) \quad (2-60)$$

d'où :

$$\frac{(\tau_b - \tau_{0b})}{\mu_b} = \frac{(\tau_p - \tau_{0p})(1 - \Phi_g)}{\mu_p} \quad (2-61)$$

Les deux hypothèses suivantes ont été émises :

$$\tau_{0g} = k\tau_{0p} \quad (2-62)$$

$$\tau_g = k\tau_p \quad (2-63)$$

k est une constante dépendant de la concentration en granulats, constante déterminée par l'expérience. L'auteur a donné la relation suivante :

$$k = \frac{2,5\Phi_{\max}}{\Phi_{\max} - \Phi_g} \quad (2-64)$$

Les équations précédentes conduisent finalement aux formules suivantes :

$$\tau_{0b} = \tau_{0p} \left(1 + \frac{1,5\Phi_{\max}\Phi_g + \Phi_g^2}{\Phi_{\max} - \Phi_g}\right) \quad (2-65)$$

$$\mu_b = \mu_p \left(1 + \frac{2,5\Phi_{\max}\Phi_g}{(1 - \Phi_g)(\Phi_{\max} - \Phi_g)}\right) \quad (2-66)$$

La confrontation du modèle de la viscosité avec les mesures de deux séries de bétons, présentée par l'auteur, est bonne pour une série et mauvaise pour l'autre. A noter que, dans ces modèles, certaines hypothèses semblent trop fortes et arbitraires, et restent à être justifiées.

Modèle de Kikukawa-Murata [24,82]

Dans ce modèle, les auteurs considèrent qu'un mélange est constitué de deux phases: solvant et soluté. Pour la pâte de ciment, l'eau est le solvant, le ciment le soluté; pour le mortier, la pâte est le solvant et le sable le soluté; et pour le béton, le mortier est le solvant et le gravillon le soluté. De nombreuses mesures effectuées par ces auteurs leur permettent de proposer l'équation suivante, qui permet d'estimer la viscosité relative μ_r , par rapport à celle du solvant :

$$\mu_r = \left(1 - \frac{\Phi_s}{\Phi}\right)^{-K} \quad (2-67)$$

où Φ_s et Φ sont respectivement la concentration volumique et la compacité maximale du soluté, K est une constante liée aux formes des solutés.

Pour les pâtes de ciment courantes, les auteurs ont trouvé que la constante K est approximativement une fonction affine de la concentration volumique en soluté :

$$K = -15,6\Phi_s + 11,2 \quad (2-68)$$

Pourtant, pour les mortiers, la constante K dépend du module de finesse F du sable et est exprimée par :

$$K = -0,57F + 3,40 \quad (2-69)$$

De même, pour le calcul de K dans le cas des bétons, les auteurs ont donné une formule similaire à celle des mortiers :

$$K = -0,89F + 9,31 \quad (2-70)$$

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité; d'autre part, il prend en compte l'influence des propriétés "géométriques" des matériaux, ce qui lui donne plus de sens physiques et permet d'espérer plus de précision.

vii) Evolution des caractéristiques des bétons

En ce qui concerne ce sujet, on s'intéresse à la *durée pratique d'utilisation* (DPU) du béton, en particulier celle des BHP, pour lesquels on rencontre souvent des problèmes de perte rapide de l'ouvrabilité. Nous en avons évoqué les causes plus haut dans ce chapitre. Par ailleurs, il semble que l'interaction entre la fumée de silice et le C_3A ait également une influence. PAILLÈRE et al. [68] ont constaté qu'à forte teneur en C_3A , les BHP sans fumée de silice ont un meilleur maintien de maniabilité, tandis que ceux avec fumée de silice en ont un pire. Le rapport E/C est très important pour la maniabilité initiale. Pourtant, CHAPPUIS [69] a montré que le taux d'augmentation de la contrainte de cisaillement par rapport au temps ne dépend pas du E/C.

Il y a malheureusement peu de travaux effectués en termes de caractéristiques intrinsèques. Il paraît clair que le seuil du béton augmente en fonction du temps. Quant à la viscosité, cela est moins net. BANFILL [60] a constaté que, pour les mortiers, les viscosités

diminuent en fonction du temps, particulièrement pendant les 15 premières minutes qui suivent la fabrication. Au contraire, selon les résultats de BEAUPRE [23], les pseudo-viscosités des bétons ne changent guère au cours du temps.

2.5) Conclusion

Nous avons vu que la nécessité de maîtriser la rhéologie du béton dans la pratique fait apparaître des travaux de recherche de plus en plus nombreux sur ce sujet. Des acquisitions considérables de différents aspects des bétons frais ont ainsi été obtenues, ce qui nous permet déjà de comprendre certains phénomènes, lesquels étaient difficiles à expliquer auparavant. Un progrès fondamental réside certainement en la mise en évidence du fait qu'une seule grandeur ne suffise pas à caractériser le comportement rhéologique des bétons fluides, tels que les BHP. Ces matériaux, semblant plus stables par rapport aux bétons ordinaires classiques, doivent pouvoir être caractérisés mieux et plus facilement. Cependant, jusqu'à aujourd'hui, faute d'appareils d'essai rhéologique bien adaptés à ces bétons, leur comportement, ainsi que leurs caractéristiques intrinsèques, restent toujours mystérieux. Afin de les mettre en lumière, un appareil de conception nouvelle est indispensable. C'est dans ce contexte que nous avons construit un nouveau rhéomètre: BT RHEOM, que nous présenterons dans le chapitre suivant.

3. UN NOUVEAU RHEOMETRE POUR BETONS FLUIDES : BT RHEOM

Cet appareil a été conçu par une équipe pluridisciplinaire, comprenant, outre la "Section formulation et mise en oeuvre des bétons", le "Service d'études et de construction de prototypes", ainsi que la "Section électronique" du LCPC.

3.1) Conception du BT RHEOM [13,70,71]

On vise ici à l'élaboration d'un rhéomètre pour bétons fluides. Il devra être capable d'identifier le comportement rhéologique des bétons et de mesurer leurs caractéristiques intrinsèques. Cette caractérisation du béton devrait permettre d'effectuer des calculs simplifiés ou des simulations numériques plus raffinées afin de déterminer les caractéristiques suivantes:

- l'énergie nécessaire pour le malaxage;
- la pompabilité du béton, et les débits à attendre en fonction des installations de pompage et des pressions de travail;
- la vitesse d'écoulement du béton sous l'effet de la gravité seule ou sous l'effet combiné de la gravité et de la vibration (lors des vidanges de malaxeur et de bennes de transport, lors du coulage, etc);
- la durée, à compter de la fabrication, pendant laquelle le béton pourra être mis en oeuvre (appelée *durée pratique d'utilisation*, ou DPU);
- la pente maximale des surfaces libres en béton frais au-delà de laquelle des problèmes de stabilité apparaîtront;
- etc.

L'analyse de ces besoins et la considération de l'utilisation pratique de l'appareil nous ont amenés au cahier des charges suivant :

- les mesures doivent pouvoir être prises en régime permanent, de façon à éliminer l'influence de la thixotropie du béton et obtenir ainsi une meilleure répétabilité;
- la plage du gradient de vitesse est fixée a priori entre 2 et 40 s⁻¹. Ceci nous permettra donc d'étudier le comportement des bétons dans une gamme de vitesse de cisaillement suffisamment large, recouvrant des opérations allant du coulage au pompage;
- il doit être possible de travailler à vitesse imposée comme à contrainte imposée. Cette dernière nous permettra en particulier de mesurer une caractéristique des bétons: le seuil au repos.
- une vibration mécanique d'accélération de l'ordre de 4 fois celle de la pesanteur doit pouvoir être appliquée sur l'échantillon sans interférer avec les mesures de contrainte et du gradient de vitesse;

- il doit être possible de contrôler le volume de l'échantillon en cours d'essai, afin de vérifier que la teneur en air occlus n'évolue pas trop pour que la tentative de caractérisation rhéologique ait bien un sens. Ce contrôle est d'ailleurs un moyen d'apercevoir le cas échéant le comportement dilatant de certains bétons;

- l'essai doit être automatisé au maximum en vue de simplifier son utilisation, de diminuer le temps d'un essai, et d'augmenter la répétabilité de l'essai;

- les paramètres régissant la conduite des essais doivent être assez souples (au moins à l'étape du développement du prototype), afin de permettre d'enrichir la recherche dans le domaine de la rhéologie du béton;

- enfin, pour que l'appareil soit utilisable sur chantier aussi bien qu'en laboratoire, l'appareil doit être robuste, assez léger (portable par une seule personne) et le moins encombrant possible.

Nous avons vu à la section 2.3 l'inadaptation au béton du viscosimètre à cylindres coaxiaux, lequel convient pourtant à un certain nombre de fluides et de suspensions de particules fines. Le problème majeur y est l'existence de l'écoulement piston pour les matériaux ayant un seuil de cisaillement. En fait, ceci est théoriquement inévitable si le champ de contrainte est hétérogène et le cisaillement différent d'une section à l'autre. Dans ce cas, l'écoulement commence toujours dans la partie la plus cisailée et se propage au fur et à mesure de l'augmentation du couple exercé. Une théorie de dépouillement sans aucune hypothèse sur le comportement et sans avoir à connaître l'écoulement piston a été présentée au §2.3.2 (équation 2-30 à 2-40). Le développement de cette théorie est certainement une grande contribution pour l'essai au viscosimètre à cylindres coaxiaux. Néanmoins, certains obstacles existent encore, en particulier pour les matériaux riches en grosses particules comme le béton. Premièrement, cette méthode de dépouillement nécessite la connaissance du seuil de cisaillement et les informations aux faibles vitesses angulaires. Théoriquement, le seuil peut être facilement mesuré en augmentant le couple progressivement. Cependant, compte tenu de l'écoulement piston, quand les cisaillements sont faibles, la distance de la zone cisailée peut être plus petite que la taille des grosses particules. Cette zone, contenant plus, voire même majoritairement, de particules fines (coulis) pourrait alors être très différente de l'échantillon homogène que l'on veut mesurer a priori (béton). Ceci risque de fournir des mesures plus faibles (mesures concernant particulièrement le coulis) pour des faibles vitesses, et conduit à un comportement de type rhéofluidifiant (par exemple, comportement Herschel-Bulkley) pour des matériaux binghamiens. Par conséquent, pour l'essai sur béton, il semble qu'on doive utiliser la méthode de régression non-linéaire présentée au §2.3.2 (équation 2-28 à 2-29) comme méthode de dépouillement, tout en vérifiant que les mesures sont prises aux moments où la zone cisailée est suffisamment grande (par exemple, au moins supérieure à la taille maximale de gros grains).

Un autre problème pour l'essai au viscosimètre à cylindres coaxiaux est que la ségrégation due à la dilatance est accentuée par l'écoulement piston. Pour un échantillon totalement cisailé, on peut imaginer que la dilatance serait homogène. L'échantillon reste donc encore homogène, bien qu'il soit différent de celui à l'état compact. Cependant, s'il existe une partie non cisailée dans l'échantillon, les gros grains dans la partie cisailée auront tendance à partir vers celle non cisailée et à s'y accumuler. Ceci a déjà été observé dans certains essais (cf. § 3.7). Par ailleurs, sans parler de la ségrégation horizontale, la sédimentation des gros grains peut être également importante pour certains bétons dans ce type d'appareil.

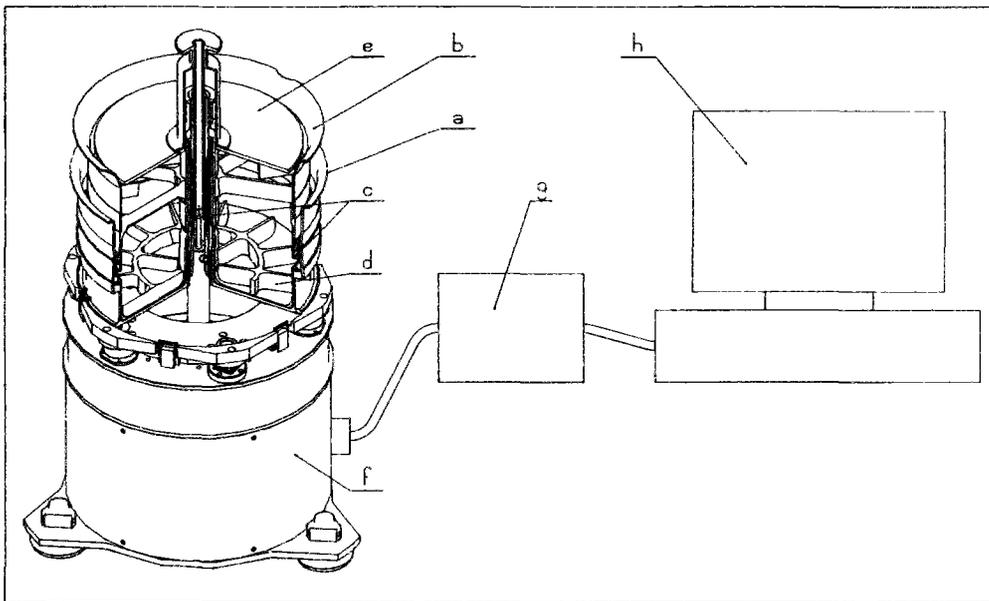
Pour vaincre le problème de l'écoulement piston, nous envisageons un autre type de rhéomètre: plan/plan dans lequel le cisaillement se fait entre deux plans horizontaux. La géométrie de l'appareil, nommé BT RHEOM, a été choisie de façon à ce qu'une couronne de béton d'axe perpendiculaire soit cisailée, sa section inférieure étant fixe, et sa section supérieure en rotation autour de l'axe (cf. fig. 3-1). L'essentiel de l'essai au BT RHEOM, tout comme dans l'essai au viscosimètre, consiste à mesurer les couples à différentes valeurs de vitesses angulaires, ce qui nous permet de déduire des propriétés du matériau (voir § 3.2). Le champ de vitesse de l'échantillon est schématisé en figure 3-2. Bien que ni le gradient de vitesse ni la contrainte de cisaillement ne soient homogènes dans une section cisailée, le cisaillement est le même dans toutes les sections horizontales. Par conséquent, une fois que le couple est suffisamment élevé pour que l'écoulement puisse avoir lieu dans une section (ceci se manifeste par rotation de la section supérieure), théoriquement, cet écoulement doit également se reproduire dans toutes les autres sections. L'écoulement piston est donc en principe évité dans cet appareil, contrairement à ce qui se produit dans le viscosimètre à cylindres coaxiaux. En ce qui concerne la sédimentation des gravillons, la conception du BT RHEOM présente également un avantage. Nous observons que la ségrégation relative à la dilataance est plutôt dirigée dans la direction perpendiculaire au plan de cisaillement, lequel est horizontal. La direction de ségrégation est alors verticale. La tendance des cailloux à remonter peut donc équilibrer plus ou moins la sédimentation due à la pesanteur. Par conséquent, la conception de l'essai minimise les problèmes de perte d'homogénéité.

L'encombrement de l'appareil est limité par l'effet de paroi. Comme dit plus haut, pour que l'influence de ce dernier ne soit pas trop perturbante, la dimension minimale de l'échantillon doit être au moins 5 fois la taille du plus gros grain. Basée sur une taille maximale de granulats de 20 mm, la dimension minimale de l'échantillon serait ainsi de 10 cm. Ceci a conduit aux dimensions de l'échantillon suivantes: 2 cm de rayon intérieur, 12 cm de rayon extérieur, et 10 cm de hauteur effective (la partie cisailée). Nous obtenons ainsi un volume d'échantillon de l'ordre de 7 litres, dont 6 litres se trouvent dans la zone cisailée. Rappelons que 6 litres est à peu près la contenance du cône d'Abrams, dont l'expérience a montré qu'il avait une représentativité statistique suffisante du béton. Les dimensions principales du rhéomètre sont indiquées en figure 3-1. Sur la même figure, nous pouvons voir les 8 parties indépendantes de l'appareil :

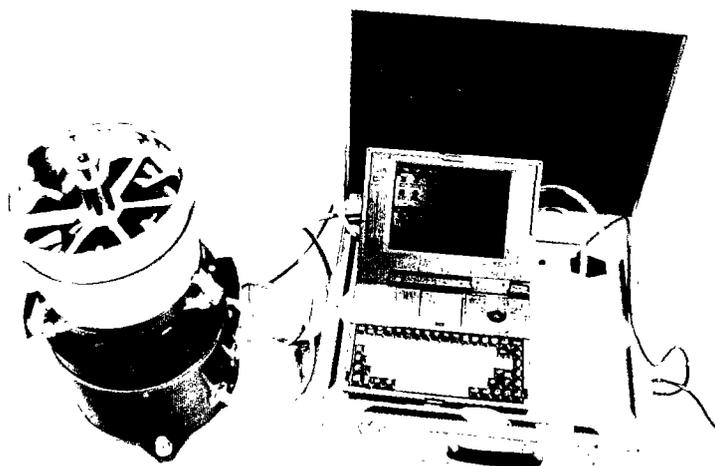
- un récipient (a) dont le volume intérieur est un cylindre creux, contenant l'échantillon de béton;

- une pièce tournante (b) permettant de mettre la section supérieure de l'échantillon en rotation. Cette pièce est constituée de trois parties: des pales supérieures de 20 mm de profondeur (ce qui correspond à la taille maximale du plus gros grain), ayant la forme d'une roue à rayons; une jupe interne (celle-ci est en fait un axe creux) de 2 cm de rayon; une jupe externe cylindrique de 12 cm de rayon. Ces trois parties sont solidaires les unes des autres. La jupe externe cylindrique permet de garder une configuration symétrique par rapport au plan médian horizontal de l'échantillon;

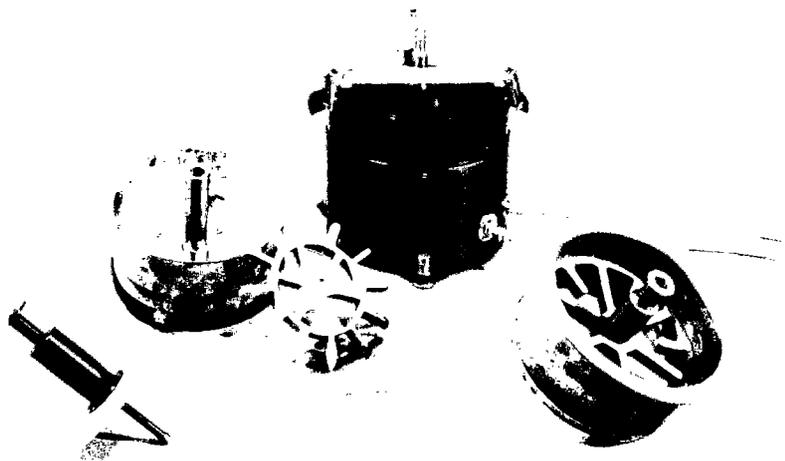
- un système de joints de feutre (c), dont l'un est posé dans une gorge située sur l'extérieur de la jupe de la pièce tournante; l'autre, de type autocollant, est collé sur la paroi intérieure de l'axe creux de la même pièce, dans le plan médian de l'échantillon. Ce système est destiné à limiter les remontées de matériau entre la paroi extérieure de la pièce tournante et la paroi intérieure du récipient;



(1)



(2)



(3)

Figure 3-1 : Plan et photo du prototype du rhéomètre BT RHEOM (dimensions du récipient : hauteur 24 cm × diamètre 27 cm; dimensions du corps: hauteur 30 cm × diamètre 30 cm).

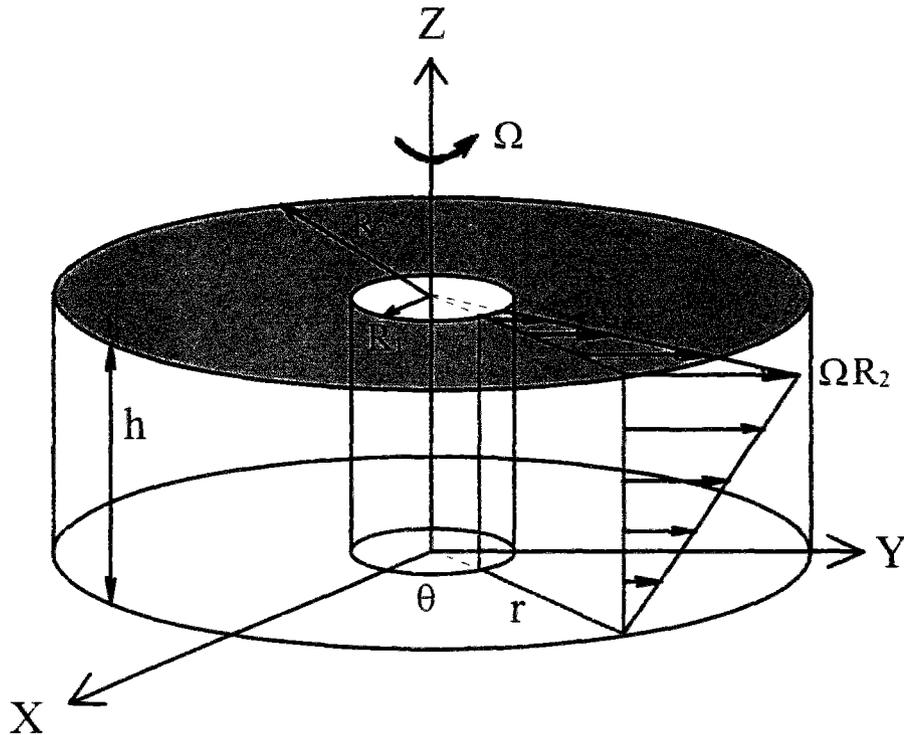


Figure 3-2 : Champ de vitesse théorique dans le rhéomètre BT RHEOM.

- un système de pales de blocage (d), de même forme et taille que les pales de la pièce tournante, placées au fond du récipient, pour empêcher la rotation de la section inférieure de l'échantillon;
- un disque (e) solidaire d'un axe, posé à la surface de l'échantillon en cours d'essai, capable de mesurer la hauteur de ce dernier;
- le corps de l'appareil (f), de forme cylindrique, coiffé par un plateau supportant le récipient. Il contient les deux moteurs à courant continu du rhéomètre, le premier servant à mettre le système de pales supérieures en rotation, et le deuxième permettant d'appliquer une vibration (maximum 50 Hz, 4 g*) verticale sur le plateau, indépendamment du reste du corps;
- une boîte d'alimentation (g);
- enfin, un micro-ordinateur (h), avec lequel nous réalisons le pilotage des essais et l'acquisition des mesures.

La mise au point du prototype BT RHEOM a été longue. Nous signalons ici quelques problèmes techniques rencontrés pendant le développement de l'appareil, espérant que cette expérience soit utile pour d'autres personnes qui envisageraient également de développer un rhéomètre.

* g : accélération de la pesanteur.

Le premier problème rencontré était relatif à la vibration. Au lieu d'avoir 50 Hz de fréquence maximale prévue, on n'en avait obtenu qu'une trentaine. En même temps, on s'était aperçu que, en plus de la vibration verticale du plateau (y compris le récipient et le béton contenu à l'intérieur) prévue, il apparaissait également une vibration horizontale inattendue du corps; et le rhéomètre se déplaçait sous l'effet de la vibration.

En ce qui concerne le problème de fréquence, on a trouvé qu'en fait, les ressorts supportant le plateau étaient trop raides et transmettaient ainsi une partie importante d'énergie. Ceci a été résolu en utilisant des ressorts plus souples, tout en tenant en compte du poids qu'ils doivent soutenir. Ensuite, pour supprimer la vibration horizontale, on a été obligé de rajouter un système de rail horizontal sur lequel on pose l'embase du vibreur. Notons que la vibration est produite par rotation d'une masselotte autour d'un axe horizontal. La rotation de la masselotte crée également une force horizontale périodique, qui était à l'origine de la vibration horizontale. Sur le rail, l'embase peut se mouvoir librement dans le sens horizontal (en réalité, il y a des ressorts horizontaux dans le rail, entre l'embase et les deux extrêmes fermés du rail, afin d'amortir le mouvement de l'embase); le vibreur ne provoque donc plus de vibration horizontale du corps.

Un autre problème majeur était l'étanchéité. La conception originale avait laissé 3 mm dans l'entrefer entre la jupe externe de la pièce tournante et la paroi du récipient, et 1 mm de jeu entre le bas de la pièce tournante et un petit escalier (5 mm de largeur) du récipient (voir figure 3-3). Ces jeux avaient été conçus pour que la pièce tournante puisse tourner et que le récipient puisse vibrer sans perturber la pièce tournante. Avec l'esprit que le coulis et les sables fins ne poserait pas trop de problèmes, aucun joint d'étanchéité n'était prévu. Le premier essai avec l'appareil fut bien surprenant. La pièce tournante se coinça rapidement par des grains du sable passés dans l'entrefer.

En vue de résoudre ce problème, on a essayé une série de joints d'étanchéité différents, en testant leur efficacité et le frottement qu'ils provoquaient. Le premier joint était une jupe en plastique (suffisamment épaisse pour résister au frottement du béton), rallongeant du bas de la pièce tournante et en contact avec le coin extérieur de l'escalier du récipient. On a remarqué tout de suite qu'avec une petite épaisseur, la jupe en forme circulaire devient trop raide pour la mise en place. Or, en remplaçant le plastique par du tissu, le joint ne résistait pas du tout au cisaillement, bien qu'il reçoive une pression contre la paroi du récipient. Un autre système avait été essayé. C'était un anneau de plaque en p.v.c. lisse (remplacé par de l'acier pour résister mieux au frottement), mis au-dessus d'un autre anneau de tuyau en caoutchouc élastique. Le système était posé sur l'escalier du récipient, et en contact avec le bas de la pièce tournante, ce qui empêchait la fuite des grains. Le caoutchouc permettait d'adapter la légère variation de position dû au différent chargement de l'échantillon, et de garder toujours un contact avec le bas de la pièce tournante. Le frottement contre la plaque était largement plus faible que celui contre le caoutchouc. Malheureusement, si ce système était assez satisfaisant pour l'essai sans vibration, il n'assurait plus l'étanchéité sous vibration, du fait que l'alternance entre compression et décompression du caoutchouc n'arrivait pas à suivre la fréquence élevée de vibration. Parmi d'autres techniques essayées, il serait peut-être intéressant de mentionner celle avec du bromoforme, produit de densité à peu près égale à celle du béton [72]. On a versé du bromoforme dans l'entrefer avant le démarrage de la rotation, espérant qu'il pourrait résister l'envahissement du béton. Le mouvement de la pièce tournante était parfait pendant les premières secondes. Mais le bromoforme pénétra ensuite rapidement dans le béton, très probablement dû à la dilatance du béton. Et l'essai se termina comme si aucun joint n'avait été mis.

Après tous ces échecs, on est arrivé à la solution actuelle: joint de feutre, placé latéralement sur la pièce tournante, et en contact avec la paroi du récipient. Afin d'éviter des perturbations, voire le coincement provoqué par des grains situés entre le bas de la pièce tournante et l'escalier du récipient (en particulier dans le cas sous vibration), on a remplacé l'escalier par une pente suffisamment raide pour que les grains s'en étant approchés puissent être chassés facilement. Avec ce joint, on n'a plus de problème de coincement. Très souvent, le joint est juste mouillé par le coulis après un essai. Le frottement du joint reste dans la gamme acceptable. Par ailleurs, le coulis lubrifie bien le joint et diminue considérablement son frottement. Par contre, le frottement du joint génère un couple non négligeable, qui doit être mesuré avant tout essai (cf. §3.5.2). Ceci est défavorable si on tient compte de la capacité du couple du moteur, assez limitée dans cet appareil. D'autre part, pour des bétons de faible seuil, l'imprécision sur la mesure du frottement du joint peut provoquer des erreurs importantes. Certes, ce joint n'est pas encore parfait, il apparaît néanmoins le meilleur à l'heure actuelle. Des améliorations sur ce point sont encore attendues.

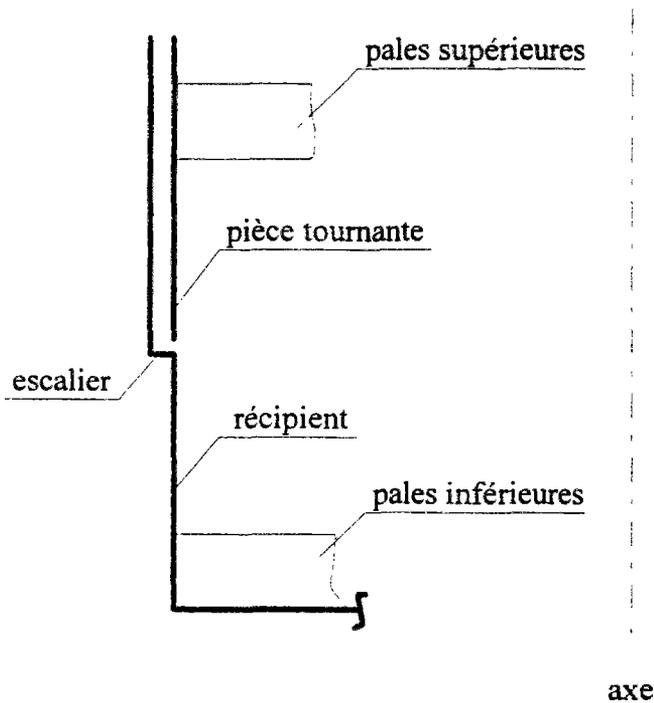


Figure 3-3 : Schéma local du récipient et de la pièce tournante.

3.2) Dépouillement et interprétation de l'essai

3.2.1) Bases théoriques pour le dépouillement

Pour le rhéomètre BT RHEOM, lequel est en fait un rhéomètre de torsion, les forces exercées créent dans l'échantillon un champ de vitesse indépendant de la loi de comportement du matériau (voir figure 3-2), grâce à la géométrie de l'échantillon choisie. Nous pouvons exprimer, en coordonnées cylindriques, le champ de vitesse par :

$$\vec{v} = v_{\theta} \vec{e}_{\theta} = \omega(z) r \vec{e}_{\theta} = \frac{\Omega}{h} z r \vec{e}_{\theta} \quad (3-1)$$

$\omega(z)$ est la vitesse angulaire de la section de coordonnée verticale z , Ω la vitesse angulaire de la surface supérieure de l'échantillon, et h la hauteur de l'échantillon. Il n'y a alors qu'une seule composante pour le tenseur de gradient de vitesse à savoir :

$$\dot{\gamma}_{\theta z} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z} = \frac{\Omega}{h} r \quad (3-2)$$

La seule composante du tenseur de contrainte est donc $\tau_{\theta z}$ (en négligeant les contraintes normales).

Supposons que la loi de comportement s'écrive de la façon suivante :

$$\tau = \varphi(\dot{\gamma}) \quad (3-3)$$

φ étant une fonction quelconque. Le couple de torsion s'obtient alors en intégrant les contraintes de cisaillement sur une section horizontale quelconque :

$$\begin{aligned} \Gamma &= \iint_S \tau r dS \\ &= \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r^2 \varphi dr \\ &= 2\pi \left(\frac{1}{3} [r^3 \varphi]_{R_1}^{R_2} - \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{3} r^3 \frac{\partial \varphi}{\partial r} dr \right) \end{aligned} \quad (3-4)$$

Or, nous pouvons écrire la dérivée du couple par rapport à la vitesse angulaire :

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega} = \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r^2 \frac{\partial \varphi\left(\frac{\Omega}{h} r\right)}{\partial \Omega} dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{2\pi}{h} r^3 \varphi' dr \quad (3-5)$$

En reportant (3-5) dans (3-4), nous obtenons :

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{1}{3} \left[\Gamma^3 \varphi \right]_{R_1}^{R_2} - \frac{\Omega}{6\pi} \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega} \right) \quad (3-6)$$

Construisons une fonction $F(\Omega)$ comme suit :

$$\begin{aligned} F(\Omega) &= \frac{3}{2\pi} \Gamma(\Omega) + \frac{\Omega}{2\pi} \frac{\partial \Gamma}{\partial \Omega} \\ &= R_2^3 \varphi \left(\frac{\Omega}{h} R_2 \right) - R_1^3 \varphi \left(\frac{\Omega}{h} R_1 \right) \\ &= R_2^3 \varphi(\dot{\gamma}_{R_2}) - R_1^3 \varphi(\lambda \dot{\gamma}_{R_2}) \end{aligned} \quad (3-7)$$

où :

$$\lambda = \frac{R_1}{R_2} \quad (3-8)$$

et

$$\dot{\gamma}_{R_2} = \frac{\Omega}{h} R_2 \quad (3-9)$$

Nous pouvons finalement obtenir l'équation suivante permettant de déduire le comportement :

$$\varphi(\dot{\gamma}_{R_2}) = \frac{\Omega}{2\pi R_2^3} \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^{4i} F(\lambda^i \Omega) \quad (3-10)$$

La méthode générale de dépouillement consiste donc à réaliser un lissage des valeurs expérimentales du couple en fonction de la vitesse angulaire, puis à en déduire la fonction $\varphi(\dot{\gamma}_{R_2})$, par application des équations (3-7), (3-8) et (3-10). $\dot{\gamma}_{R_2}$ peut être calculé facilement par l'équation (3-9). Nous obtenons ainsi le rhéogramme de l'échantillon. Remarquons que la convergence de la série dans l'équation (3-10) est très rapide, du fait du terme en $(R_1/R_2)^{4i}$.

Si l'on se restreint aux matériaux de comportement binghamien, le dépouillement du rhéomètre se simplifie considérablement. L'équation (3-3) devient :

$$\tau_{\theta z} = \tau_0 + \mu \frac{\Omega}{h} r \quad (3-11)$$

Rappelons que τ_0 et μ sont respectivement le seuil de cisaillement et la viscosité *plastique*. Dans toute la suite, et par souci de simplification, μ sera généralement appelée *viscosité* (car on s'intéressera prioritairement aux bétons qui se conforment au modèle de Bingham). L'équation (3-4) donne alors :

$$\begin{aligned}\Gamma &= \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r^2 \left(\tau_0 + \mu \frac{\Omega}{h} r \right) dr \\ &= \frac{2\pi}{3} (R_2^3 - R_1^3) \tau_0 + \frac{\pi}{2h} (R_2^4 - R_1^4) \mu \Omega\end{aligned}\quad (3-12)$$

Si l'on travaille avec la vitesse de rotation N (en tours/seconde), cette équation peut être écrite sous la forme :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{3} (R_2^3 - R_1^3) \tau_0 + \frac{\pi^2}{h} (R_2^4 - R_1^4) \mu N \quad (3-12b)$$

Nous voyons que la relation entre le couple et la vitesse angulaire est affine pour les matériaux binghamiens. Par conséquent, après avoir obtenu la droite expérimentale $\Gamma(\Omega)$, dont l'ordonnée à l'origine et la pente sont nommées respectivement Γ_0 et $\partial\Gamma/\partial\Omega$, les caractéristiques du matériau peuvent être calculées facilement par les équations suivantes :

$$\tau_0 = \frac{3\Gamma_0}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (3-13)$$

$$\mu = \frac{2h \frac{\partial\Gamma}{\partial\Omega}}{\pi(R_2^4 - R_1^4)} \quad (3-14)$$

Jusqu'à maintenant, nous supposons toujours implicitement que les parois verticales de l'échantillon sont libres. Cependant, il n'en est pas de même en réalité. En effet, on sait que dans un fluide visqueux, il y a continuité du champ de vitesse au voisinage de la paroi. Il est alors technologiquement impossible d'imposer le champ de vitesse schématisé en figure 3-2. Le frottement du béton sur les parois perturbe certainement l'écoulement du béton par rapport à la configuration idéale de la figure 3-2. Ce point sera discuté dans le paragraphe suivant.

3.2.2) Simulation numérique de l'effet de frottement des parois verticales et corrections

Dans le cas général (régime transitoire, frontières libres), la résolution analytique de problèmes d'écoulement des fluides est impossible. Profitant du développement des méthodes de calculs, beaucoup de problèmes peuvent être résolus, avec des approximations plus ou moins grossières. La méthode des éléments finis est l'une des plus utilisées. En utilisant cette méthode, Tanigawa et al. [73,74,75,76,77] ont tenté de modéliser certains problèmes tels que: l'essai au cône d'Abrams, le mouvement du béton sans et avec vibration dans un récipient rectangulaire, l'essai au viscosimètre à cylindres coaxiaux, le coulage dans un moule rectangulaire sans ou avec armatures, etc. Pour la modélisation numérique de l'écoulement du béton frais, il se pose en fait une autre question particulièrement difficile concernant les interfaces du béton avec les parois. Les auteurs cités plus haut ont proposé dans leurs simulations, pour décrire le frottement entre béton et paroi, une loi en fonction de la vitesse relative et de la pression au niveau de l'interface. Cependant, à supposer que cette loi reflète la

réalité, son identification expérimentale est délicate. Nous préférons donc une approche plus simple du problème.

Dans ce travail, nous nous contentons d'étudier l'influence des parois dans le seul cas où l'échantillon est un matériau binghamien. On verra en effet que le modèle de Bingham s'applique très bien à la quasi-totalité des bétons que nous avons testés. Remarquons d'abord qu'il existe une analogie formelle entre un fluide de Bingham en régime permanent et un solide rigide-plastique écrouissable de loi d'écrouissage cinématique linéaire. La liste suivante montre quelques éléments analogues :

Fluides binghamiens	Solides rigides-plastiques écrouissables
vitesse \bar{v}	déplacement \bar{u}
tenseur de gradient de vitesse $\underline{\dot{\epsilon}}$	tenseur de gradient de déplacement $\underline{\epsilon}$
tenseur de contrainte $\underline{\sigma}$	tenseur de contrainte $\underline{\sigma}$
loi de comportement : $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$ τ_0 : seuil de cisaillement μ : viscosité plastique	loi de comportement : $\sigma = \sigma_y + C \epsilon$ σ_y : seuil de plasticité C : module d'écrouissage

Nous pouvons alors modéliser notre problème par des calculs en plasticité pure. Cependant, limité par l'outil de calcul, les calculs ont été réalisés en fait en élasto-plasticité, avec un passage en phase élastique très rapide (en prenant un module d'élasticité très élevé), afin d'éviter la singularité dans les calculs. Le logiciel employé est CASTEM 2000, développé par le Commissariat à l'Energie Atomique (C.E.A.) *.

Pour modéliser les frottements entre le béton et les parois verticales dans le rhéomètre BT RHEOM, nous avons essayé trois types de calcul: glissements parfaits (ou sans frottement), sans glissement (ou frottements parfaits) et glissements partiels (ou frottements partiels). Le premier type est le cas idéal du calcul analytique présenté au §3.2.1, très probablement non réaliste. Le deuxième semble pourtant trop pessimiste. Nous notons en effet qu'il s'agit de parois métalliques très lisses, alors que le mouvement de rotation est imposé au béton par l'intermédiaire de pales d'une profondeur de 20 mm, égale à la taille du plus gros granulats visé. En conséquence, il est évident que les conditions aux limites de l'échantillon cisailé ne sont pas les mêmes sur les frontières horizontales et verticales. Le cas réel, semblant vraisemblablement encadré par les deux premiers cas, a été modélisé par le troisième type de simulation.

Le premier type de calcul ne pose pas de problèmes particuliers. Par ailleurs, il existe pour ce type de calcul une solution analytique, exposée au chapitre précédent.

Dans le deuxième type de calcul, les jupes externe et interne, avec les pales supérieures, imposent une rotation de vitesse angulaire Ω à la surface de la moitié supérieure de

* Note : à l'époque où ces calculs ont été effectués, le code CESAR-LCPC ne pouvait pas traiter notre problème, dans l'impossibilité qu'il était de résoudre des problèmes de plasticité à déplacements quelconques imposés.

l'échantillon, tandis que la surface de la moitié inférieure reste immobile. Pour assurer la continuité de la vitesse angulaire entre les parties supérieure et inférieure, nous avons procédé à un raccordement linéaire entre les cotes ± 1 cm (nous rappelons que les dimensions de l'échantillon sont les suivantes: $R_1=2$ cm, $R_2=12$ cm, $h=10$ cm), l'origine des hauteurs étant prise dans le plan de symétrie de l'échantillon.

Dans le troisième type de calcul, nous avons introduit deux minces couches de matériau (correspondant au mélange coulis + sable fin) intermédiaires entre l'échantillon de béton et les parois (côté extérieur et intérieur), comme ce que nous schématisons en figure 3-4. Les champs de vitesse restent continus aux deux types d'interface (béton/coulis et coulis/paroi). Cependant, du fait de la plus grande fluidité du coulis, dont nous désignons le seuil et la viscosité par τ_{0h} et μ_h , une grande partie du gradient de vitesse devrait se concentrer dans ces couches. Macroscopiquement, ceci correspond à un "glissement" relatif béton/paroi.

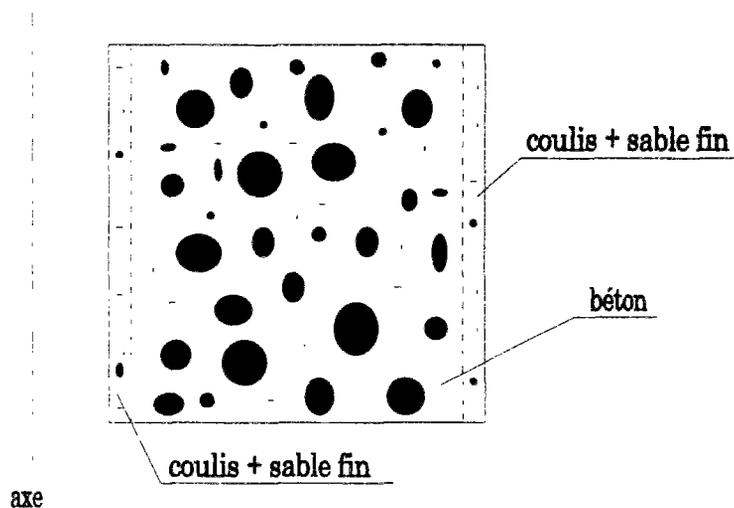


Figure 3-4 : Schéma de l'échantillon pour le troisième type de calcul.

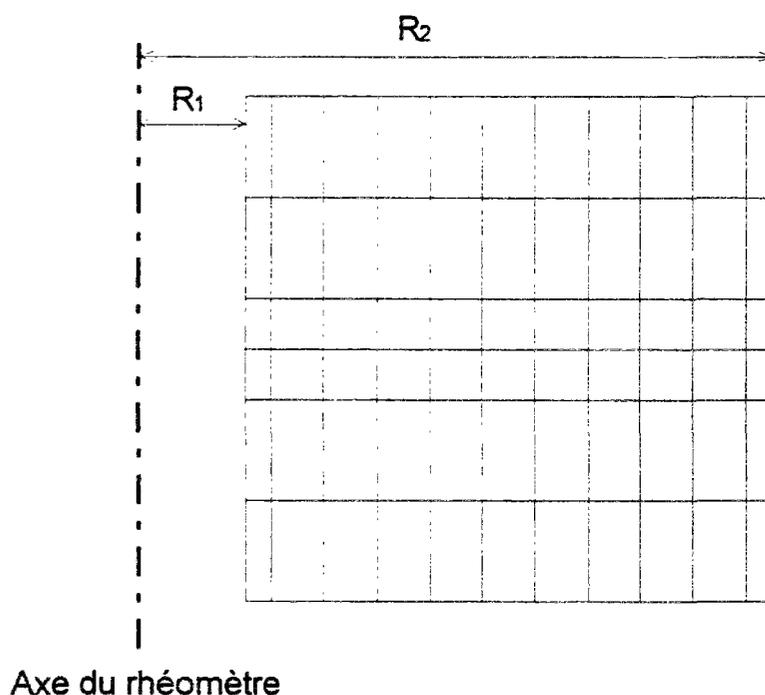
Dans une simulation, nous injectons les caractéristiques du matériau τ_0 et μ , lesquelles correspondent aux propriétés réelles de l'échantillon. Nous introduisons également les caractéristiques des couches de coulis τ_{0h} et μ_h pour les calculs dans le cas de glissements partiels. En faisant varier les valeurs de vitesse angulaire imposée, le calcul donne les différents couples correspondants. Ceci nous permet de constituer une pseudo-courbe expérimentale liant le couple et la vitesse. Cette courbe peut à son tour, en utilisant la théorie du dépouillement présentée au chapitre précédent, donner les constantes de Bingham *apparentes* τ_0' et μ' , qui simulent en fait les mesures brutes expérimentales obtenues au rhéomètre. La comparaison entre ces grandeurs et les caractéristiques injectées fournit alors une quantification directe de l'erreur expérimentale due au frottement des parois.

On peut voir à la figure 3-5 les maillages adoptés pour les calculs. Le maillage pour les deux derniers types de calcul a été raffiné de telle sorte que son influence sur la précision des calculs soit négligeable. Par rapport à ce maillage, celui pour le premier type de calcul est un peu plus grossier, en raison de la simplicité du problème. La figure 3-6 montre un exemple des champs de contraintes obtenus dans les trois types de calculs, pour une même vitesse

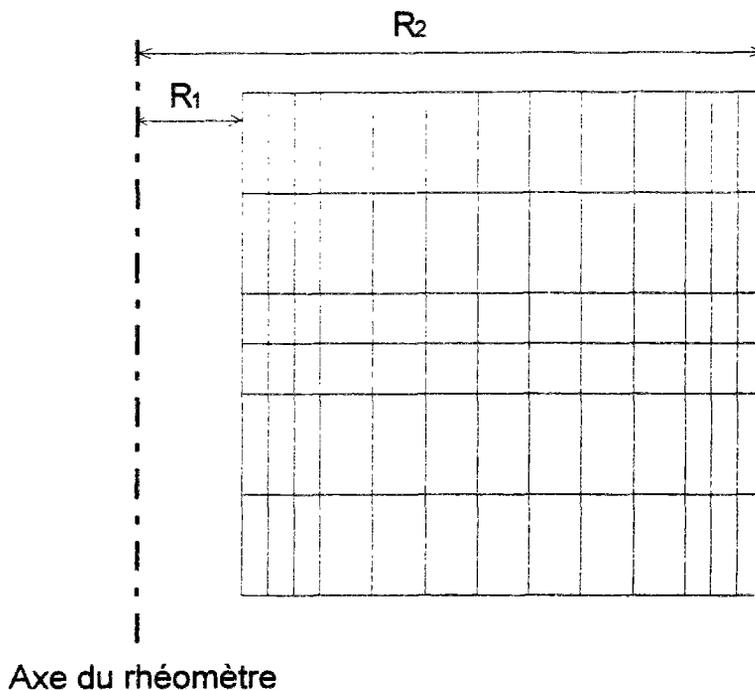
angulaire imposée. On constate que ces champs sont très sensibles aux conditions aux limites. De même pour les champs de gradients de vitesse, présentés en figure 3-7. De plus, on observe que, pour les deux derniers types de calculs, le cisaillement a tendance à se concentrer dans le voisinage du plan horizontal de symétrie de l'échantillon. Un processus de *localisation* est alors à craindre, lequel pourrait gravement perturber le résultat de l'essai.

La figure 3-8 montre un exemple des courbes pseudo-expérimentales à partir du même échantillon sous trois hypothèses différentes, ainsi que les caractéristiques apparentes obtenues dans chaque cas. Pour les valeurs de vitesse angulaire Ω très faibles, autour de 0, les courbes présentent une concavité vers l'axe des Ω . Ceci est dû à la phase élastique que nous avons introduite. Par conséquent, nous négligeons cette partie lors de la déduction des caractéristiques apparentes, en extrapolant la droite vers l'axe du couple.

Dans les calculs de glissements parfaits, c'est sans surprise que nous retrouvons exactement les solutions analytiques. Les résultats de deux derniers types de calculs, avec différentes combinaisons des caractéristiques des matériaux, sont donnés aux tableaux 3-1 et 3-2. Dans les calculs "sans glissement", il apparaît une sous-estimation du seuil de 0 à 6% (à l'exception d'un calcul, dans lequel nous trouvons une sous-estimation de 22%), et une surestimation de la viscosité de 22 à 48%. L'erreur relative est d'autant plus importante que le rapport τ_0/μ est grand. Cependant, dans les 21 calculs réalisés avec l'hypothèse de glissements partiels, à part deux cas de surestimation de 1% et 5%, les seuils sont sous-estimés de 2 à 13%; quant à la surestimation de la viscosité, elle est limitée à une plage comprise entre 6 et 18%.



(a) maillage pour les calculs de glissements parfaits

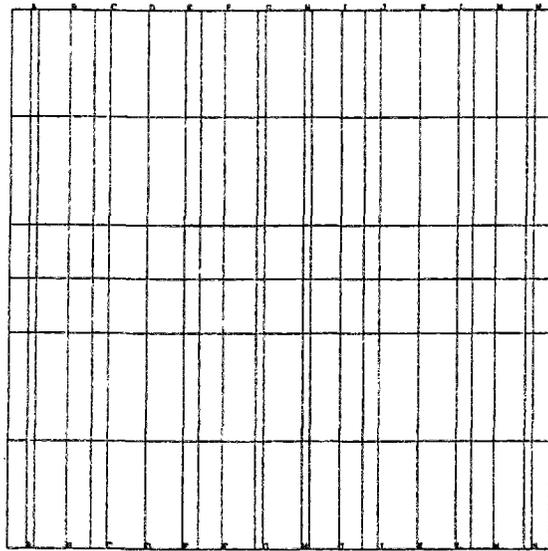


(b) maillage pour les calculs sans glissement et glissements partiels

Figure 3-5 : Maillage de la section de révolution de l'échantillon utilisé dans les simulations de l'écoulement du béton par éléments finis.

Ces résultats sont alors rassurants. Quelles que soient les hypothèses relatives à la modélisation du frottement de la paroi, les erreurs faites sur les caractéristiques de Bingham n'ont pas le caractère dramatique que l'on pouvait craindre à l'examen des champs de contraintes et de gradients de vitesse.

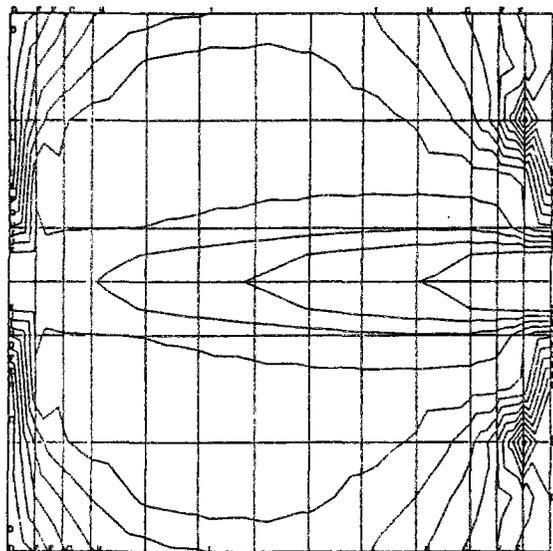
La question suivante est de savoir où se situe la réalité par rapport aux trois types d'interfaces modélisées. A cette fin, nous avons réalisé des *essais sous pales*, dans lesquels le récipient du rhéomètre était incomplètement rempli, le béton affleurant juste sous le niveau des pales supérieures (voir figure 3-9). Le couple mesuré est, par conséquent, une manifestation directe de l'effet du frottement béton/parois. L'essai peut être simulé numériquement avec les mêmes outils que l'essai normal. Nous avons montré en figure 3-10 les mesures à la fois d'un essai sous pales et d'un essai normal, avec le même matériau (béton b1, cf. annexe C). Les résultats de modélisations de ces essais, avec deux types d'interface béton/paroi: sans glissement et glissements partiels, ont été également présentés sur cette même figure. Nous constatons que le calcul avec glissements partiels permet d'approcher les deux courbes expérimentales (essai normal et essai sous pales). Par contre, le calcul sans glissement conduit à une surestimation grossière du couple dans l'essai sous pales. Ces essais ont montré dès lors que l'hypothèse de glissements partiels semble la plus réaliste.



VAL - 180
 A 2.05E+02
 B 2.06E+02
 C 2.08E+02
 D 2.09E+02
 E 2.10E+02
 F 2.12E+02
 G 2.13E+02
 H 2.15E+02
 I 2.16E+02
 J 2.19E+02
 K 2.20E+02
 L 2.22E+02
 M 2.23E+02

(a)

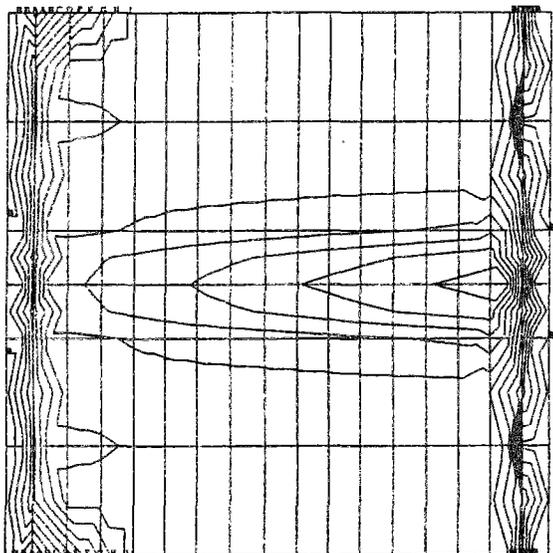
ISO CONTRAINTE SIGET AU PAS 16



VAL - 180
 A -82.
 B -82.
 C -32.
 D -1.3
 E 29.
 F 60.
 G 91.
 H 1.71E+02
 I 1.52E+02
 J 1.42E+02
 K 1.33E+02
 L 1.14E+02
 M 7.74E+01
 N 3.95E+01

(b)

ISO CONTRAINTE SIGET AU PAS 16



VAL - 180
 A -17.
 B 0.5
 C 24.
 D 59.
 E 85.
 F 1.10E+02
 G 1.36E+02
 H 1.61E+02
 I 1.97E+02
 J 2.22E+02
 K 2.36E+02
 L 2.62E+02
 M 2.89E+02
 N 3.14E+02

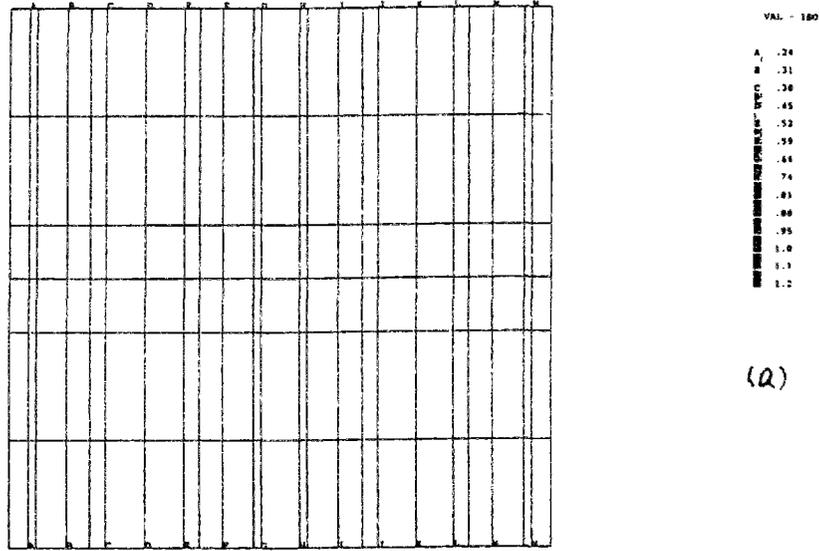
(c)

ISO CONTRAINTE SIGET AU PAS 16

a) glissements parfaits; b) sans glissement; c) glissements partiels
 (propriétés de l'éprouvette : $\tau_0 = 200 \text{ Pa}$, $\mu = 20 \text{ Pa.s}$;).

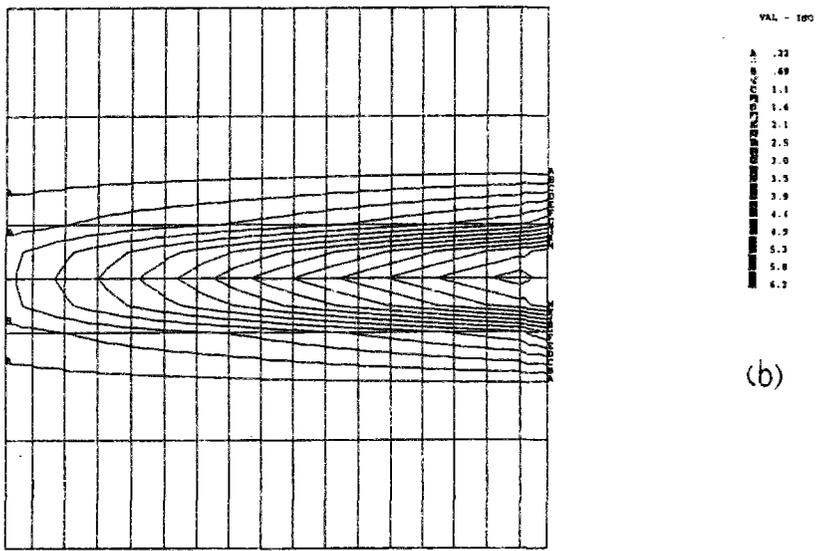
Figure 3-6 : Courbes d'iso-valeurs de contrainte dans les simulations aux éléments

finis.



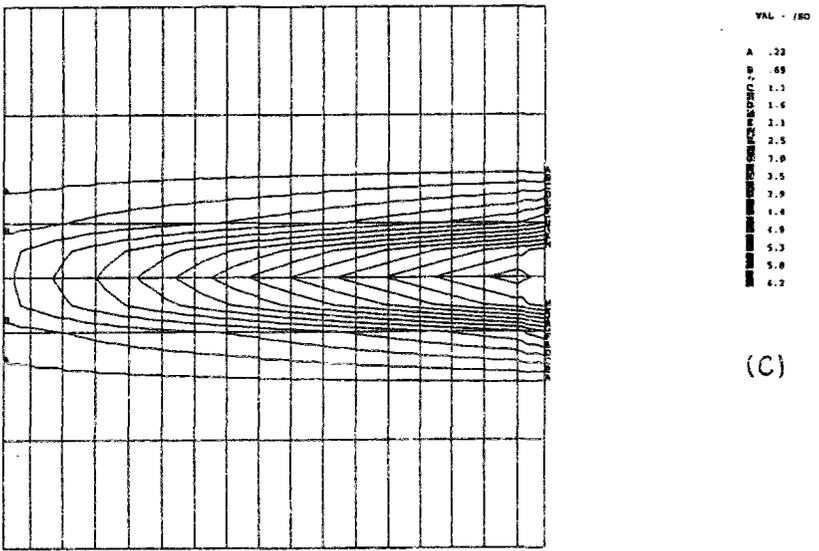
(a)

ISO -GM ET AU PAS 14



(b)

ISO -GM ET AU PAS 14

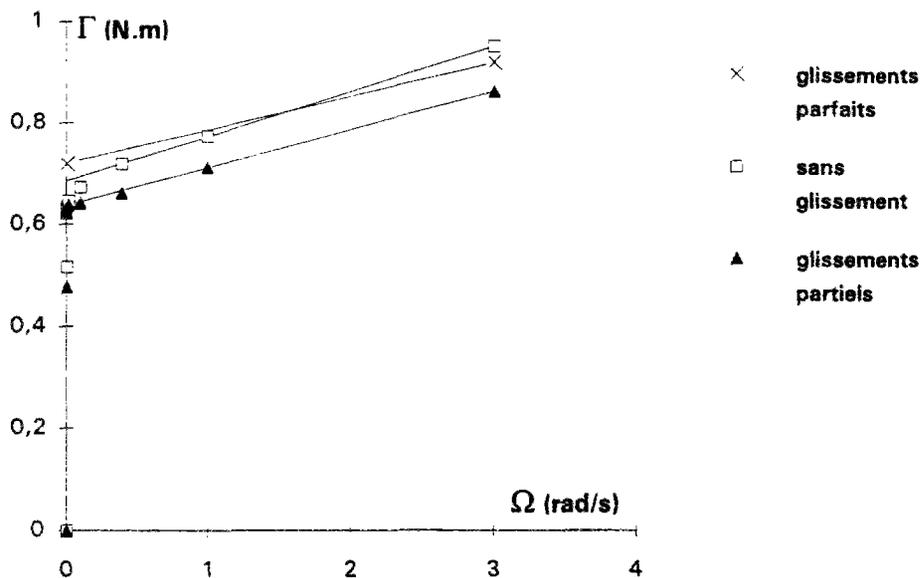


(c)

ISO -GM ET AU PAS 14

a) glissements parfaits; b) sans glissement; c) glissements partiels
(propriétés de l'éprouvette : $\tau_0 = 200 \text{ Pa}$, $\mu = 20 \text{ Pa.s}$;).

Figure 3-7 : Courbes d'iso-valeurs de gradient de vitesse dans les simulations aux éléments finis.



caractéristiques de l'échantillon : $\tau_0 = 200 \text{ Pa}$, $\mu = 20 \text{ Pa.s}$;
cas glissements parfaits : $\tau_0' = 200 \text{ Pa}$, $\mu' = 20 \text{ Pa.s}$;
cas sans glissement : $\tau_0' = 190 \text{ Pa}$, $\mu' = 27 \text{ Pa.s}$;
cas glissements partiels ($\tau_{0h} / \tau_0 = 1/10$; $\mu_h = 0$) : $\tau_0' = 177 \text{ Pa}$, $\mu' = 22,9 \text{ Pa.s}$.

Figure 3-8 : Relations couple-vitesse angulaire issues des calculs aux éléments finis dans les différents cas.

τ_0 (Pa)	50	200	800	50	200	800	1600	50	200	800	1600
μ (Pa.s)	20	20	20	100	100	100	100	200	200	200	200
τ_0' (Pa)	48,5	190	752	39,2	197	765	1500	50,1	196	760	1510
erreur(%)	-3	-5	-6	-22	-2	-4	-6	0	-2	-5	-6
μ' (Pa.s)	24,8	27,0	27,4	122	121	132	148	244	244	246	250
erreur(%)	24	35	37	22	21	32	48	22	22	23	25

Tableau 3-1 : Résultats des simulations numériques d'écoulement du béton dans le rhéomètre, dans l'hypothèse "sans glissement" à l'interface béton/paroi. Caractéristiques rhéologiques apparentes (τ_0', μ') pour différentes combinaisons des paramètres (τ_0, μ).

τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_{0h} (Pa)	μ_h (Pa.s)	τ_0' (Pa)	erreur(%)	μ' (Pa.s)	erreur(%)
1600	20	200	0	1415	-12	23,5	+18
800	20	200	0	719	-10	23,6	+18
1600	100	200	0	1415	-12	117	+17
800	100	200	0	728	-9	115	+15
200	100	200	0	201	+1	114	+14
800	20	100	0	706	-12	21,4	+7
200	20	100	0	184	-8	23,1	+16
800	100	100	0	707	-12	114	+14
200	100	100	0	188	-6	111	+11
800	20	20	0	702	-12	23,3	+17
200	20	20	0	177	-12	22,9	+15
50	20	20	0	47,2	-6	22,4	+12
800	100	20	0	706	-12	112	+12
200	100	20	0	178	-11	112	+12
50	100	20	0	50,8	-2	108	+8
1600	200	20	0	1405	-12	212	+6
800	100	20	50	707	-12	117	+17
200	100	20	50	179	-11	117	+17
50	100	20	50	49,1	-2	115	+15
200	200	20	50	175	-13	217	+9
50	200	20	50	52,4	+5	211	+6

Tableau 3-2 : Résultats des simulations numériques d'écoulement dans le rhéomètre, dans l'hypothèse "glissements partiels" à l'interface béton/paroi. Caractéristiques rhéologiques apparentes (τ_0', μ') pour différentes combinaisons des paramètres ($\tau_0, \mu, \tau_{0h}, \mu_h$).

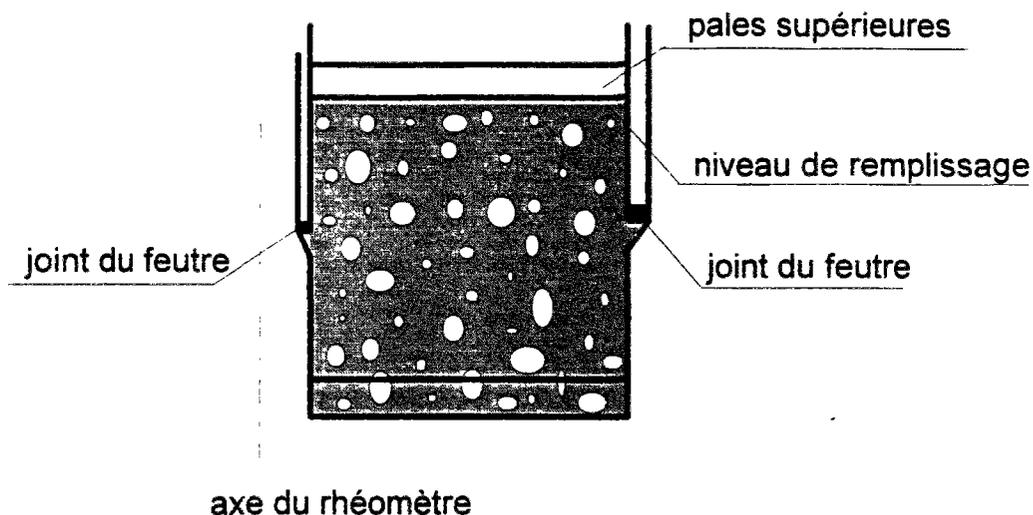
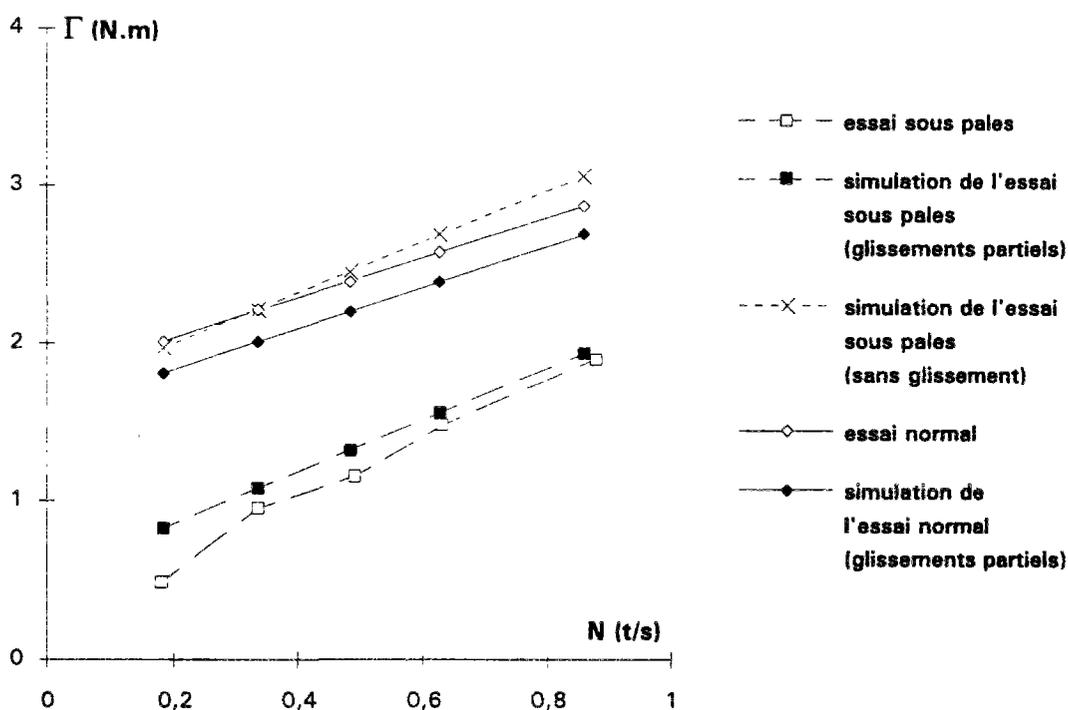


Figure 3-9 : Schéma du remplissage de l'échantillon pour l'essai sous pales.



caractéristiques :

échantillon (béton b1) : $\tau_0 = 494 \text{ Pa}$, $\mu = 62 \text{ Pa.s}$;

coulis pour la simulation de l'essai sous pales : $\tau_{0h} = 30 \text{ Pa}$, $\mu_h = 10 \text{ Pa.s}$;

coulis pour la simulation de l'essai normal : $\tau_{0h} = 60 \text{ Pa}$, $\mu_h = 0$.

Figure 3-10 : Comparaison des relations couple/vitesse pour différents niveaux de remplissage du rhéomètre et de leurs simulations numériques.

On en déduit, en conséquence, une proposition de correction à apporter sur les caractéristiques de Bingham issues du dépouillement analytique, pour estimer les caractéristiques vraies du béton testé :

- le seuil ne nous paraît pas devoir être modifié, dans la mesure où l'erreur due au frottement latéral est inférieure à l'erreur de répétabilité (voir §3.6);

- par contre, on gagnera sur la qualité de l'estimation de la viscosité plastique en lui appliquant une diminution forfaitaire de 10% (écart moyen entre μ et μ' dans les simulations effectuées, cf. tableau 3-2).

Dans les chapitres suivants, sans autre précision, toutes les valeurs des caractéristiques présentées sont les valeurs obtenues après correction.

3.3) Calibration métrologique

Afin de décrire la précision d'un instrument (ou d'un modèle, problème que nous aurons l'occasion de traiter plus loin), nous définissons les notions suivantes :

$$\text{erreur (ou écart) absolue : } \sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n-1}} \quad (3-15)$$

$$\text{erreur (ou écart) relative : } \sigma_{er} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - x_i}{x_i}\right)^2}{n-1}} \quad (3-16)$$

y_i et x_i sont respectivement la valeur supposée vraie et la valeur à comparer, et n le nombre total des valeurs comparées.

i) Mesure du couple

Lors du fonctionnement du rhéomètre, le rotor du moteur principal est solidaire de la pièce tournante, ce qui entraîne la rotation de cette dernière. Une butée empêche pourtant le stator du moteur de tourner, en prenant appui sur le corps du rhéomètre par l'intermédiaire d'un capteur de force. La valeur indiquée par ce capteur, multipliée par la longueur du bras de levier, est la valeur du couple.

Un couple-mètre externe spécialement réalisé, capable de mesurer de façon plus précise le couple, permet de calibrer la mesure dans le domaine statique. La comparaison des mesures du couple nécessaire pour empêcher la rotation de l'axe du rotor par le couple-mètre et par le capteur interne conduit à une correction cinétique de l'indication du capteur interne sous la forme suivante :

$$\Gamma_1 = \Gamma_0 + 0,11 \text{ N.m} \quad (3-17)$$

où Γ_0 et Γ_1 sont respectivement le couple indiqué par capteur interne et le couple corrigé et pris en compte. L'origine de cette faible erreur peut être imputable au réglage électronique du capteur et au montage mécanique du système de mesure. Après cette correction, la correspondance entre les mesures fournies par couplemètre et celles fournies par capteur interne est très satisfaisante (voir figure 3-11). L'erreur relative est de l'ordre de 0,7%.

ii) Mesure de la vitesse de rotation et calibration de la vibration

Le rotor du moteur principal comporte des trous répartis régulièrement le long de sa périphérie. Les trous sont détectés lorsqu'ils passent devant un capteur électromagnétique fixe. La vitesse de rotation est mesurée par comptage des impulsions provoquées par le passage des trous. La précision de la mesure est donc conditionnée par celle de l'implantation des trous, et par celle de l'horloge interne. L'erreur est certainement plus faible que 1%.

Rappelons que la vibration est appliquée par rotation d'une masselotte. Cette dernière est entraînée par un deuxième moteur, qui impose la fréquence de vibration. La mesure de vitesse repose sur le même principe que celle du moteur principal. Avec un capteur en U, système mis au point par TOUTLEMONDE et al. [78], adapté à la mesure des déplacements à haute fréquence, on a enregistré le déplacement (par rapport à un point fixe) du récipient en fonction du temps en cours de vibration. Les résultats présentés à la figure 3-12 montrent que la vibration est stable et la mesure de fréquence correcte.

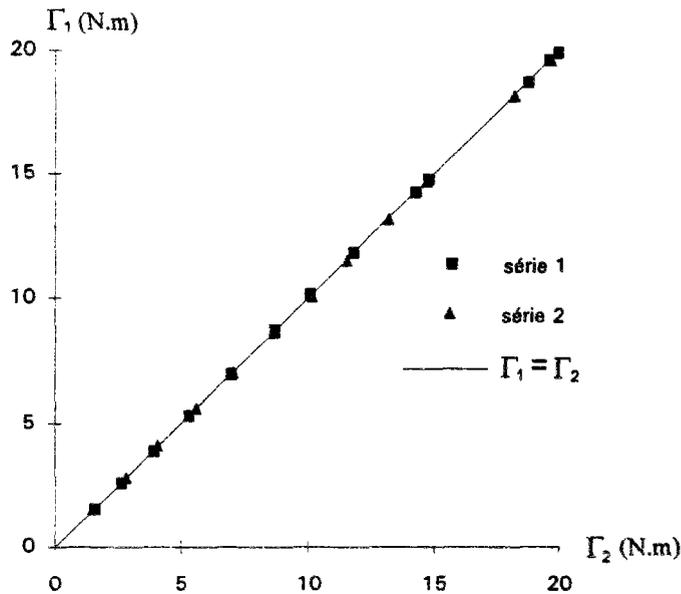
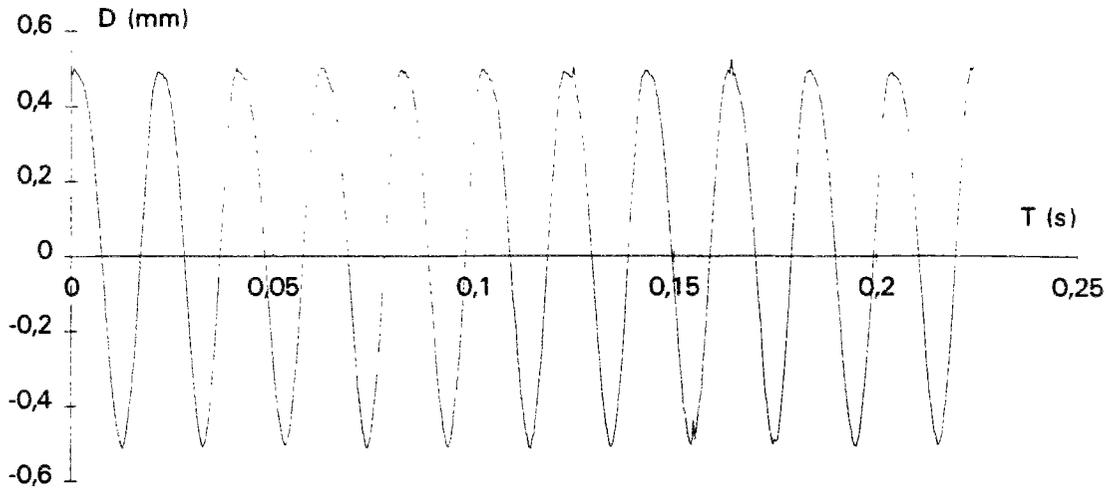


Figure 3-11 : Comparaison des couples mesurés (corrigés) par le capteur interne Γ_1 et par un couple-mètre externe Γ_2 .

iii) Mesure de la hauteur de l'échantillon

L'axe du disque (voir figure 3-1 (b)) vient reposer sur une tige liée à un capteur de déplacement. Ce dernier se situe dans l'axe et à l'intérieur du corps du rhéomètre. L'erreur relative de la mesure est conditionnée d'abord par la précision du capteur, qui est de l'ordre de 0,3% (cf. figure 3-13). Cependant, la principale source d'erreur est constituée par la qualité du contact du béton avec le disque. Il apparaît notamment que, pour des vitesses de rotation supérieures à 60 tours/minute, la surface libre du béton prend une forme de parabolôïde de révolution. L'indication du disque est alors assez différente de la hauteur moyenne. Cette mesure est donc délicate à interpréter, et devrait être utilisée surtout dans le domaine des faibles vitesses de rotation, sans vibration.

Enfin, à noter que, la prise des acquisitions est commandée par un micro-ordinateur, qui les récupère par l'intermédiaire d'une carte électronique de type analogique-numérique.



fréquence mesurée par le capteur du rhéomètre : 50,0 Hz
 fréquence mesurée par le capteur U : 49,3 Hz

Figure 3-12 : Enregistrement du déplacement du récipient contenant 7 litres de béton, en cours de vibration.

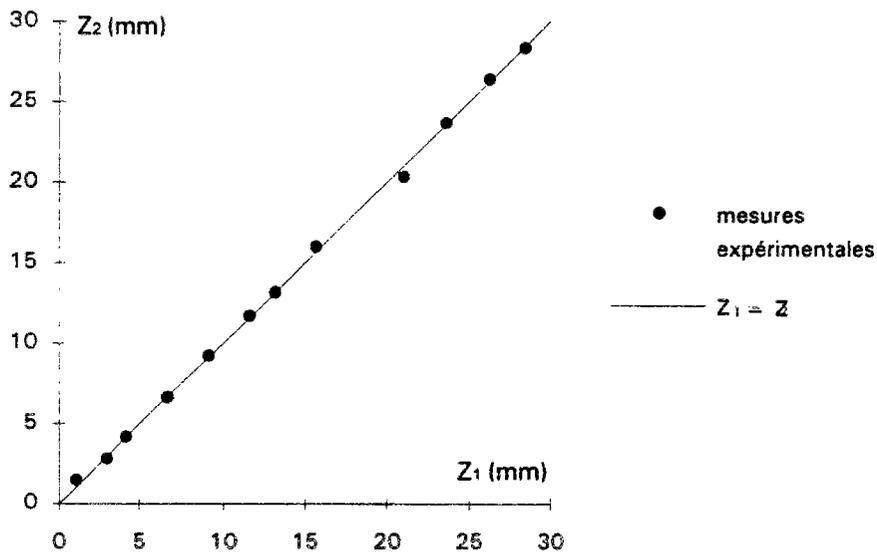


Figure 3-13 : Calibration du capteur de déplacement. Comparaison des déplacements mesurés par le capteur interne Z_1 et par un outil externe Z_2 .

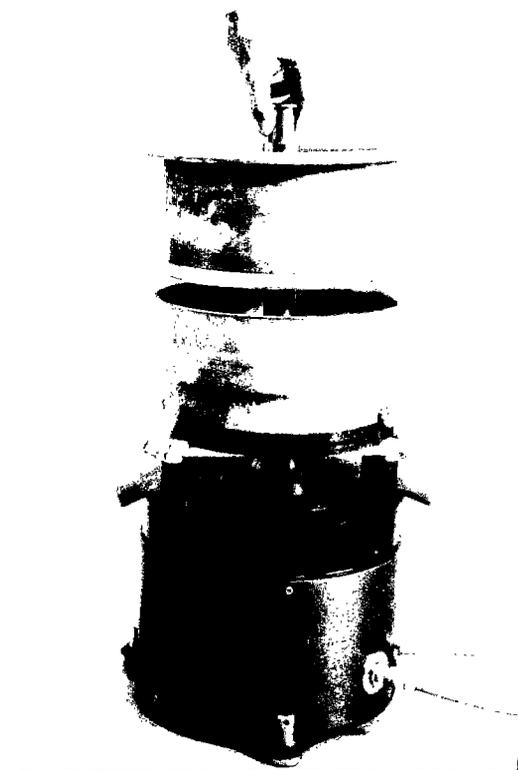
3.4) Mode d'emploi du BT RHEOM

Nous avons programmé un logiciel, dit ADRHEO, servant à piloter les essais (différents protocoles d'essai seront présentés au §3.5). Il suffit de choisir le programme correspondant à l'essai désiré et de le lancer quand tout est prêt. Nous trouvons une description du logiciel ADRHEO et son mode d'emploi en annexe C. Dans cette partie, nous nous intéressons en particulier aux opérations mécaniques.

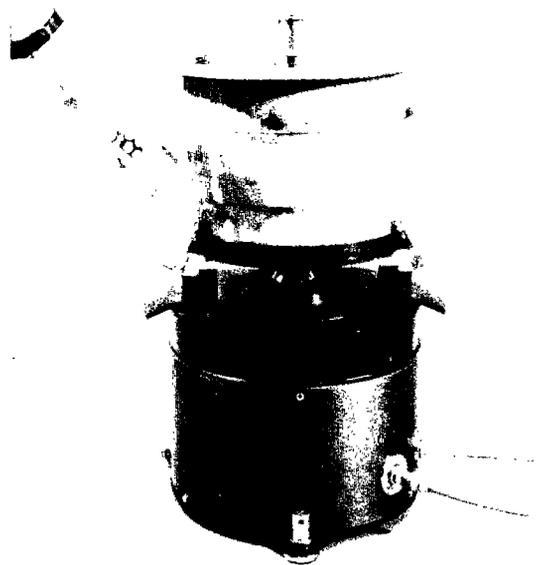
Partant d'une configuration dans laquelle le rhéomètre est démonté en six parties (non comprise la boîte d'alimentation et le micro-ordinateur) à savoir: corps, récipient, pièce tournante, pales de blocage, disque et des joints de feutre (voir figure 3-1-3), nous procédons successivement selon les étapes suivantes :

- mettre en place un joint de feutre dans la gorge située sur l'extérieur de la jupe externe de la pièce tournante et coller un autre joint autocollant sur la paroi intérieure de la jupe interne (axe creux) de cette même pièce;
- poser le système de pales de blocage au fond du récipient;
- loger la pièce tournante, équipée des joints, dans le récipient en faisant coïncider son axe avec celui du moteur (figure 3-14-1);
- attacher le récipient sur le plateau du corps du rhéomètre par des crochets;
- effectuer une mesure du frottement du joint (figure 3-14-2): humidifier le joint en versant de l'eau dans l'espace entre la jupe et le récipient, lancer le programme correspondant (voir le chapitre suivant), puis détacher le récipient du plateau et le vider de son eau;
- remplir le récipient de béton, de façon à ce que le niveau du matériau après consolidation dépasse le niveau supérieur des pales (figure 3-14-3);
- attacher le récipient sur le plateau du corps du rhéomètre;
- introduire l'axe du disque dans celui de la pièce tournante (le disque repose alors sur la surface libre du béton, cf. figure 3-14-4), puis lancer le programme désiré (voir §3.5 et annexe C);
- désolidariser le disque, puis le récipient du plateau, retirer la pièce tournante du béton frais, et vider le contenu du récipient;
- retirer les joints usés, nettoyer à l'eau les quatre pièces (récipient, pièce tournante, pales de blocage et disque).

Non compris le temps de l'essai proprement dit (pendant lequel le béton est cisailé), la durée nécessaire à la mise en oeuvre du mode opératoire précédent est d'environ 20 minutes. L'essai "standard" (mesure des caractéristiques rhéologiques instantanées du béton frais, avec et sans vibration) prend environ 4 minutes.



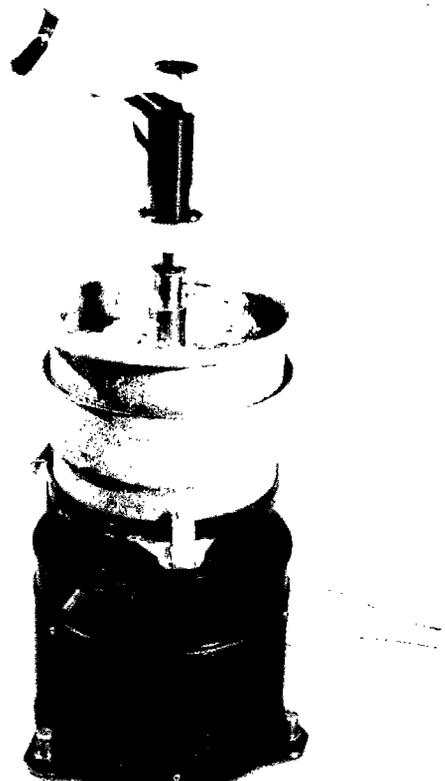
(1)



(2)



(3)



(4)

Figure 3-14 : Quelques photos sur différentes étapes de la préparation de l'essai.

Un point à signaler particulièrement est le remplissage du récipient. Le niveau supérieur des pales peut servir de repère de chargement. Il est important de charger assez de béton pour que l'échantillon dépasse à peine le niveau supérieur des pales, afin d'obtenir une bonne continuité de vitesse entre les pales et la surface supérieure de l'échantillon cisailé. Par ailleurs, la bonne régularité du volume de béton dans le rhéomètre va dans le sens de l'amélioration de la répétabilité de l'essai, mais surtout assurera un bon fonctionnement de la vibration. En effet, le plateau supportant le récipient est monté sur des appuis à ressorts, dont le mouvement vertical est limité par des butées. La masse de béton doit donc être égale à 16 ± 2 kg, afin d'éviter le contact de ces butées, qui modifierait la vibration appliquée à l'échantillon.

3.5) Protocoles d'essai

Tous les protocoles d'essai présentés dans ce paragraphe ont été programmés dans le logiciel ADRHEO. On peut trouver des informations complémentaires en annexe C.

3.5.1) Approche du comportement thixotropique du béton

Le béton est un matériau réputé thixotrope. Pour observer ce phénomène, il suffit d'imposer une vitesse de rotation constante, et de mesurer la variation du couple au cours du temps. Dans le programme de pilotage des essais, il existe un menu dans lequel on peut imposer la vitesse de rotation et le temps d'observation (voir annexe C). En tout cas, on peut arrêter l'observation de cet essai à tout moment, avant que le temps désigné ne soit atteint. La figure 3-15 donne un exemple de cette mesure.

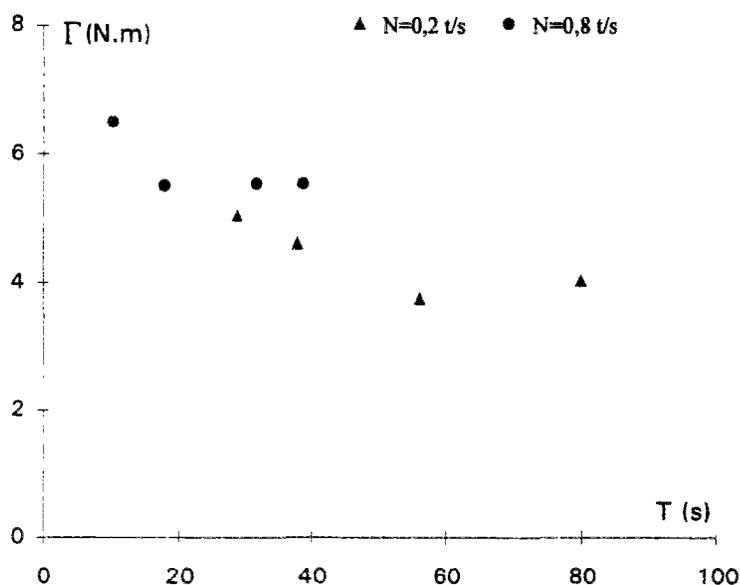


Figure 3-15 : Enregistrement des couples en fonction du temps. Un échantillon (béton b4, cf. annexe D) au repos est soumis à un échelon de vitesse de rotation (qui demeure constante pendant l'essai).

Nous notons que la figure 3-15 n'est qu'une mesure brute concernant l'échantillon, avec laquelle nous n'obtenons pas l'évolution de contrainte proprement dite. En effet, l'hétérogénéité du champ de contrainte plus le régime transitoire interdisent ici de remonter à la loi de comportement. Néanmoins, nous pouvons procéder à une autre mesure: nous soumettons l'échantillon à un programme à couple imposé; ce dernier parcourt une rampe linéaire temporelle. Lorsque le rhéomètre commence à tourner à une vitesse très faible donnée, par exemple 2 tours/minute, instant que nous considérons comme étant le commencement de l'écoulement de l'échantillon, le couple correspondant est dit alors *couple au démarrage* Γ_{t_0} . Cette mesure peut être réalisée avec ou sans vibration, selon les cas. Ce

couple au démarrage nous permet donc, en appliquant l'équation (3-13), de déterminer le *seuil de cisaillement au repos* τ_{r0} :

$$\tau_{r0} = \frac{3\Gamma_{r0}}{2\pi(R_2^3 - R_1^3)} \quad (3-18)$$

Cette grandeur semble bien décrire l'état initial du béton après une période de repos de ce dernier. Ceci permet d'estimer la réponse du béton, lors d'opérations de chantier du type "mariage" de couches horizontales successives, ou encore talochage différé de dalles.

3.5.2) Mesure du comportement du béton remanié (avec et sans vibration)

D'un point de vue pratique, on cherche généralement à simuler le comportement du béton à la sortie de la bétonnière. Lors de la vidange, cette dernière est mise en rotation rapide, d'où un cisaillement relativement important appliqué au béton frais. Les liaisons entre particules liées à la thixotropie devraient être, au moins en partie, détruites. Le comportement du béton *remanié*, qui nous intéresse pour la plupart des phases critiques de mise en oeuvre, sera donc obtenu par des mesures en régime permanent.

Cependant, comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe 2.4.3, la continuation de la mesure de la figure 3-15 pendant plusieurs dizaines de minutes montrerait une croissance irréversible du couple, liée à la réaction chimique du ciment¹. Le terme de régime permanent n'est donc, dans le cas du béton frais, qu'une commodité de langage.

Après remplissage du récipient, le béton est soumis à une vibration de 15 secondes afin de réaliser une mise en place répétable du matériau. Ensuite, la pièce tournante est mise en rotation, selon une rampe temporelle linéaire, jusqu'à une vitesse maximale de 50 tours/minute environ. Cette dernière a été choisie de façon à ce que la force centrifuge ne soit pas trop forte et n'entraîne pas une ségrégation visible des gravillons vers la périphérie de l'échantillon. Puis la vitesse suit une histoire en "marches d'escalier", telle que décrite à la figure 3-16. Chaque palier dure environ 20 secondes; à la fin de ce laps de temps, 30 mesures du couple sont prises. Après avoir enlevé les 5 mesures supérieures et les 5 inférieures, la valeur moyenne des 20 mesures restantes est enregistrée. En effet, du fait de la nature hétérogène du béton, le couple instantané présente des fluctuations, que l'on cherche à éliminer par ce traitement. En figure 3-15, nous pouvons observer que le cisaillement s'est stabilisé autant plus rapidement que la vitesse de rotation est élevée. Autrement dit, les structures liées au comportement thixotrope sont détruites plus facilement sous fort cisaillement. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi un protocole tel que la vitesse maximale est atteinte peu après le début de l'essai.

L'influence de la thixotropie n'est probablement pas totalement éliminée dans ce protocole expérimental. Cependant, il constitue un compromis acceptable, compte tenu de la durée de l'essai par rapport à la vitesse d'évolution physico-chimique du matériau.

Ce chargement, correspondant à ce que nous appelons "essai normal", peut être appliqué avec ou sans vibration, suivant le désir de l'expérimentateur. Nous nommons les caractéristiques sous vibration par τ_{v0} et μ_v .

¹Voir par exemple l'essai relatif au béton b27 de la figure 4-13, dans lequel le rhéomètre a tourné continûment pendant 30 minutes, enregistrant une augmentation de seuil de 500 à près de 2000 Pa.

Cependant, comme évoqué au paragraphe 3.1, nous avons installé un système de joints de feutre entre les jupes et les parois du récipient pour limiter les remontées du béton. Le joint situé à l'extérieur consomme, par frottement, un couple non négligeable. Les couples réels des essais doivent donc être obtenus en retranchant la partie consommée par ce joint.

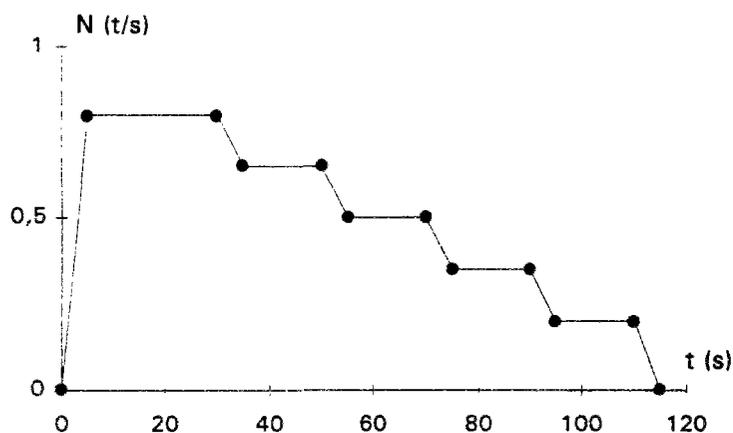


Figure 3-16 : Schéma du protocole de mesure du comportement du béton remanié.

Le couple dû au frottement varie d'un joint à l'autre et dépend du serrement du joint. Nous procédons alors avant le remplissage du béton à une évaluation de ce couple par un essai de mesure du frottement du joint, comme évoqué au paragraphe 3.4. Cet essai est pratiqué suivant le même programme que celui d'essai normal (sans vibration), en humidifiant le joint afin de diminuer le frottement. L'expérience montre que le couple dû au frottement du joint de feutre ne dépend pratiquement pas de la vitesse de rotation, au moins dans la gamme des vitesses utilisées (voir figure 3-17). Cependant, pendant un essai sur béton, c'est plutôt le coulis passant par le feutre (ou absorbé dans le feutre) qui lubrifie le joint. Nous avons remarqué que le coulis lubrifie le feutre mieux que l'eau. Ceci signifie que le coefficient de frottement feutre/acier en présence de coulis f_2 est plus faible que celui en présence d'eau f_1 . Si l'on pouvait obtenir le rapport f_2/f_1 , qui devrait d'ailleurs être constant d'un joint à l'autre, on pourrait évaluer le vrai couple consommé par le joint pendant l'essai sur béton, par l'intermédiaire des mesures en présence d'eau, ce qui simplifierait grandement le travail. A cette fin, nous avons réalisé des essais suivants. On a fabriqué un coulis assez fluide, dont les constantes binghamiennes n'étaient pas mesurables au BT RHEOM. Après une mesure du frottement du joint humidifié par l'eau, on a chargé le récipient du coulis jusqu'à un niveau juste sous pales (cf. figure 3-9). Puis, on a lancé un essai de mesure du frottement du joint. La figure 3-18 montre un exemple de tels mesures. Admettant que la seule différence entre ces deux essais soit le coefficient du frottement, on peut écrire :

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\bar{\Gamma}_2}{\bar{\Gamma}_1} \quad (3-19)$$

où $\bar{\Gamma}_1$ et $\bar{\Gamma}_2$ sont respectivement les valeurs moyennes des couples consommés par le joint lubrifié par l'eau et par le coulis. Selon les résultats présentés au tableau 3-3, on constate que le rapport f_2/f_1 est à peu près constant ($\approx 0,6$) pour différents serrements de joint. Par

conséquent, on ne prend en compte que 60% de couple dû au frottement du joint lubrifié par l'eau comme vrai couple dû au frottement du joint dans un essai normal sans vibration. Cette correction est encore plus importante dans le cas de la vibration: 40% au lieu de 60% (voir tableau 3-3). Pour mesurer le frottement du joint lubrifié par le coulis sous vibration, on a mis dans le récipient des billes en acier jusqu'à ce que le poids total (coulis + billes) équivaille à celui d'un échantillon de béton, afin que la vibration fonctionne correctement.

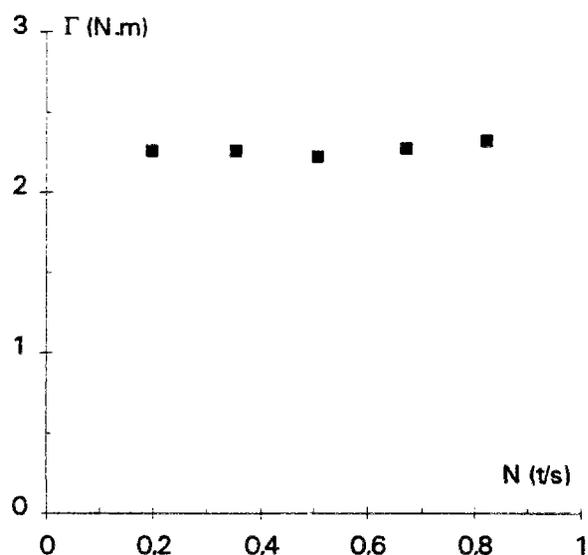


Figure 3-17 : Résultat d'un essai de mesure du couple dû au frottement du joint d'étanchéité (joint extérieur).

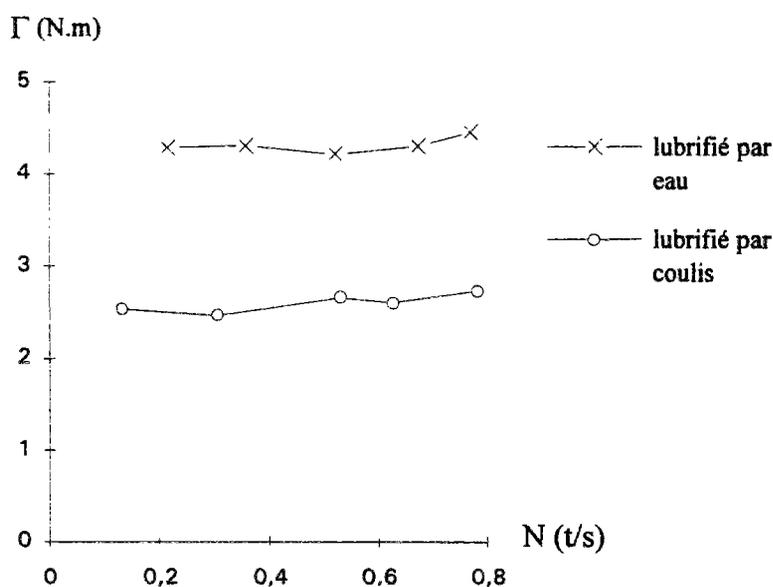


Figure 3-18 : Comparaison des frottements du joint lubrifié par eau et par coulis.

	essai 1	essai 2	essai 3	essai 4	essai 5
$\bar{\Gamma}_1$	4,316	3,063	2,347	4,177	3,283
$\bar{\Gamma}_2$	2,600	1,872	1,453	2,663	2,066
$\bar{\Gamma}_2'$ (avec vibration)	1,718	1,174	0,972	1,882	1,445
f_2/f_1	0,602	0,611	0,619	0,638	0,629
f_2'/f_1 (avec vibration)	0,398	0,383	0,414	0,451	0,440

Tableau 3-3 : Mesures du frottement du joint lubrifié par eau et par coulis.

Pour les essais visant à connaître l'évolution des caractéristiques rhéologiques du béton dans le temps, il est nécessaire de prendre en compte une usure du joint, laquelle entraîne une diminution du frottement. Cette diminution peut être très forte si le frottement continue longtemps. Par exemple, la continuation du frottement à une vitesse faible (0,25 tr/s) pendant une heure peut faire descendre le couple de 3 N.m à 1 N.m. Par contre, la diminution du couple après un essai normal n'est que de 0,15 N.m environ (voir tableau 3-4). C'est de cette façon que l'on prend en compte l'évolution du frottement du joint pour l'essai du suivi de l'évolution rhéologique du béton (cf. §3.5.3).

	mesure 1	mesure 2	mesure 3	mesure 4
coulis 1 (sans vibration)	2,600	2,439	2,293	-
coulis 1 (avec vibration)	1,718	1,566	1,419	-
coulis 2 (sans vibration)	1,453	1,294	1,155	1,054
coulis 2 (avec vibration)	0,972	0,825	0,684	0,568
coulis 3 (sans vibration)	2,663	2,469	2,339	-
coulis 4 (sans vibration)	2,066	1,891	1,747	-

Tableau 3-4 : Evolution du frottement du joint dû à l'usure. Les mesures ont été prises périodiquement (toutes les 20 minutes environ).

Dans le programme de pilotage (voir annexe C), il y a une fonction permettant de définir un fichier modèle qui détermine l'accélération de la vibration (4 g au maximum) et les vitesses de rotation à chaque palier. On peut également rappeler un fichier modèle existant dans le logiciel, dans lequel nous avons défini des paramètres pour deux essais successifs: un essai sous vibration (4 g d'accélération), suite d'un essai sans vibration (ce dernier commence environ 30 secondes après l'arrêt de vibration, tout en maintenant un cisaillement). Ce protocole nous permet d'obtenir à la fois les caractéristiques avec et sans vibration, pour une durée d'essai de 4 minutes environ. Ainsi, c'est le protocole que nous avons utilisé le plus souvent. La figure 3-19 présente un exemple de résultats expérimentaux bruts.

Cependant, pour le protocole modèle décrit plus haut, on peut se demander si la vibration produite lors du premier essai a un effet sur les mesures du deuxième essai sans vibration. Afin de vérifier ce point, nous avons effectué dans un premier lieu un essai selon le protocole modèle, puis, après environ 3 minutes d'arrêt, nous avons refait un essai sans vibration. La comparaison des mesures sans vibration de deux protocoles est présentée en figure 3-20. Nous pouvons observer que la différence est négligeable.

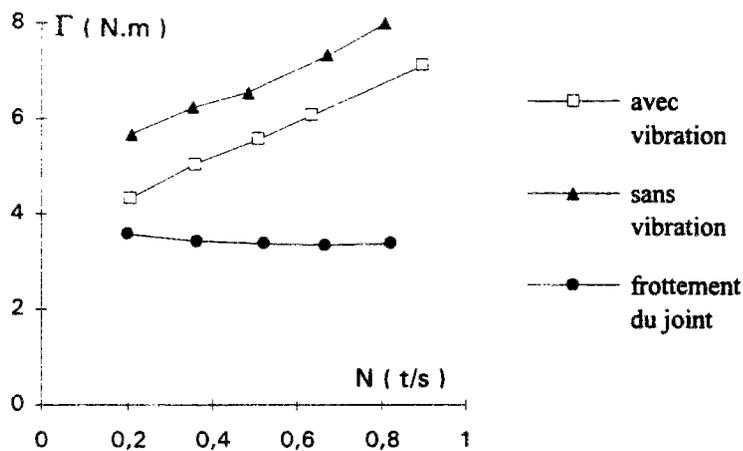
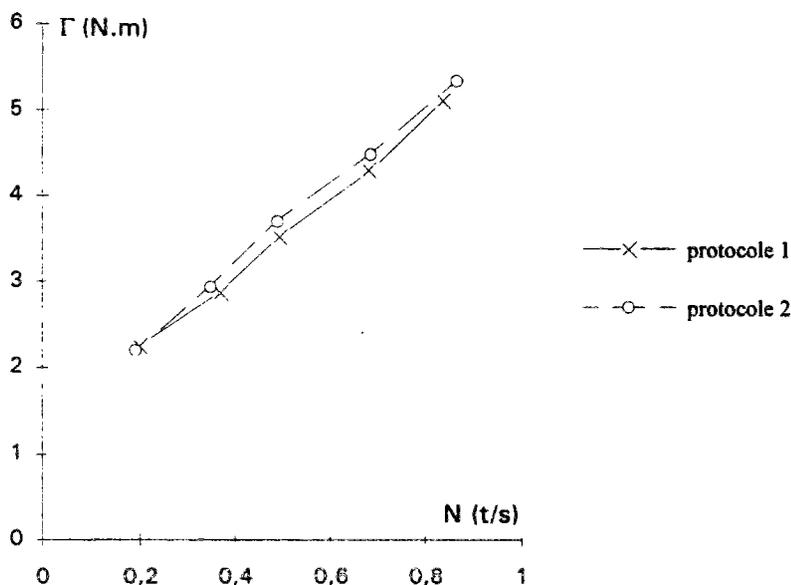


Figure 3-19 : Résultat brut du protocole modèle, accompagné par celui de l'essai de mesure du frottement du joint (béton b4, voir annexe D).



caractéristiques obtenues

protocole 1 : $\tau_0 = 361$ Pa , $\mu = 196$ Pa.s

protocole 2 : $\tau_0 = 373$ Pa , $\mu = 203$ Pa.s

Figure 3-20 : Comparaison des mesures des essais sans vibration avec deux protocoles différents (béton b46, voir annexe D).

L'analyse du comportement du béton soumis à ces différents protocoles sera approfondie au chapitre 4.

3.5.3) Suivi de l'évolution rhéologique du béton

La caractérisation de l'évolution rhéologique du béton est importante, car elle conditionne la durée pratique d'utilisation (DPU) du béton. Ceci conduit, en laboratoire, à des essais particulièrement lourds: il faut conserver une gâchée de volume important dans le malaxeur, et prélever à intervalles réguliers des échantillons afin de réaliser des essais rhéologiques. Avec le rhéomètre BT RHEOM, cette opération est grandement simplifiée. Il suffit en effet de prélever un seul échantillon, et le conserver dans le récipient pour le soumettre périodiquement au chargement décrit au paragraphe précédent. On exerce une phase de consolidation (une vibration de 15 secondes) avant et après un chargement. Entre deux chargements, on laisse s'écouler un temps dépendant de la phase de mise en oeuvre que l'on cherche à simuler (par exemple 30 minutes), temps pendant lequel l'échantillon de béton demeure au repos dans le rhéomètre. A l'issue de ce temps d'attente, on relance le même programme. Les caractéristiques obtenues à chaque chargement nous permettent, par conséquent, de suivre l'évolution de comportement du béton.

Dans le programme de pilotage (voir logiciel ADRHEO, annexe C), nous déterminons pour cet essai les paramètres d'un chargement, le temps d'attente entre deux chargements, et le temps total du suivi. Il y a un fichier modèle pour ce type d'essai dans le logiciel.

Cependant, on peut se demander si le cisaillement répété dans le rhéomètre ne modifie pas l'évolution de la microstructure du matériau, et, partant de là, son comportement rhéologique. Nous avons vérifié ce point par l'expérience suivante. Tout d'abord, une gâchée de béton (b4, voir annexe D) a été préparée, et un prélèvement placé dans le rhéomètre afin de suivre l'évolution de son comportement selon le protocole détaillé plus haut. Ensuite, une deuxième gâchée de composition et de volume identiques a été fabriquée, et des échantillons successifs ont été prélevés toutes les 20 minutes environ. Après chaque prélèvement, un essai au cône d'Abrams a été pratiqué, ainsi qu'un essai au rhéomètre. Les résultats sont présentés en figures 3-21 et 3-22. Nous voyons que les deux expériences donnent des caractéristiques rhéologiques identiques, à la répétabilité des essais près.

3.5.4) Mesure de la dilatance

Dans le rhéomètre BT RHEOM, on constate parfois un amoncellement de gravillons dans la partie supérieure (voir figure 3-23). Comme évoqué au chapitre 2.4.3, le phénomène de dilatance sous cisaillement ne peut être évité pour les mélanges granulaires. Par contre, si l'on désire répéter des mesures sur un même échantillon (par exemple, pour le suivi de l'évolution de comportement du béton), il importe de le réhomogénéiser entre les chargements successifs. Il suffit pour cela d'utiliser la vibration sans rotation de la pièce tournante, ce qui a pour effet de faire redescendre les gravillons dans la partie cisailée du béton.

En vue de caractériser la dilatance, on cherche à mesurer la différence de volume total du béton entre l'état remanié et l'état consolidé. Pour ce faire, on peut commencer par cisailier le béton à une vitesse de 30 tours/minute, puis on fait suivre à cette vitesse une rampe descendante, pendant laquelle on enregistre la hauteur H du disque. Lorsque la rotation est

arrêtée, on vibre l'échantillon pendant 15 secondes; enfin, on enregistre la hauteur finale H_f du disque après vibration. La variation du volume, nommée ϵ_v , est alors calculée par :

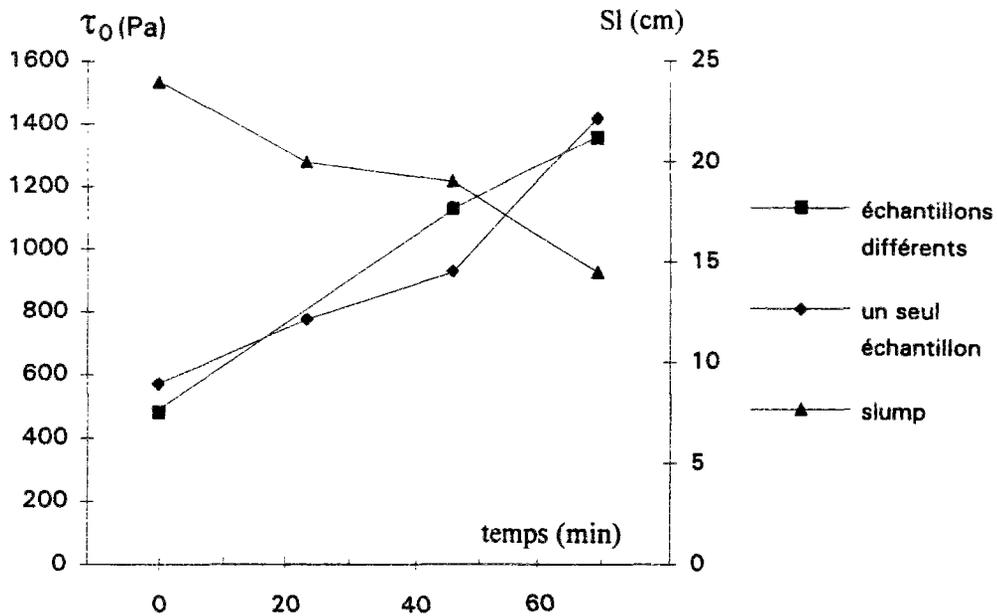


Figure 3-21 : Evolution des seuils et slumps en fonction du temps (b4).

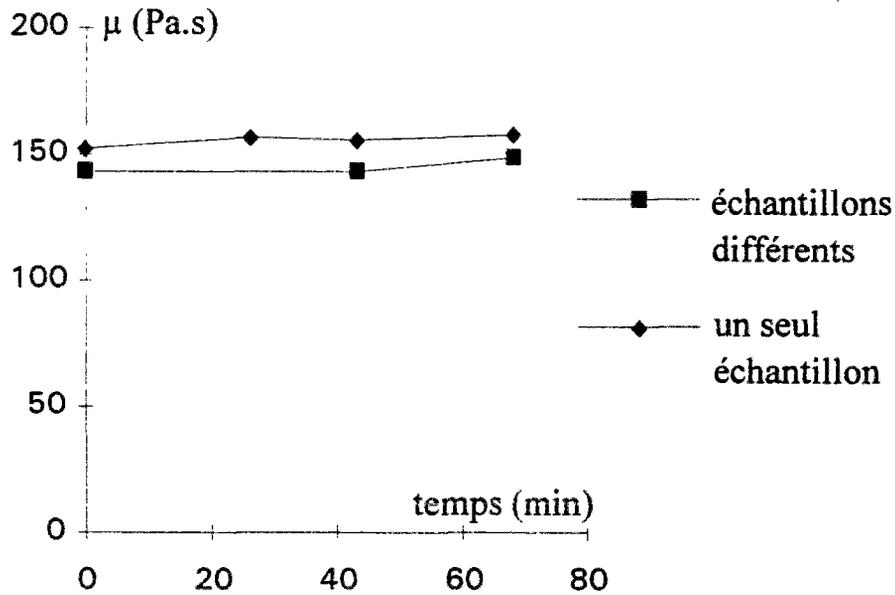


Figure 3-22 : Evolution des viscosités en fonction du temps (b4).

$$\epsilon_v = \frac{H - H_f}{H_f} \quad (3-20)$$

On peut voir en figure 3-24 un exemple d'une telle mesure. En fait, la mesure de la dilatance est prise systématiquement pour tous les protocoles présentés. Cependant, comme évoqué au §3.3, c'est surtout les enregistrements sans vibration à faible vitesse de rotation qui doivent être exploités.

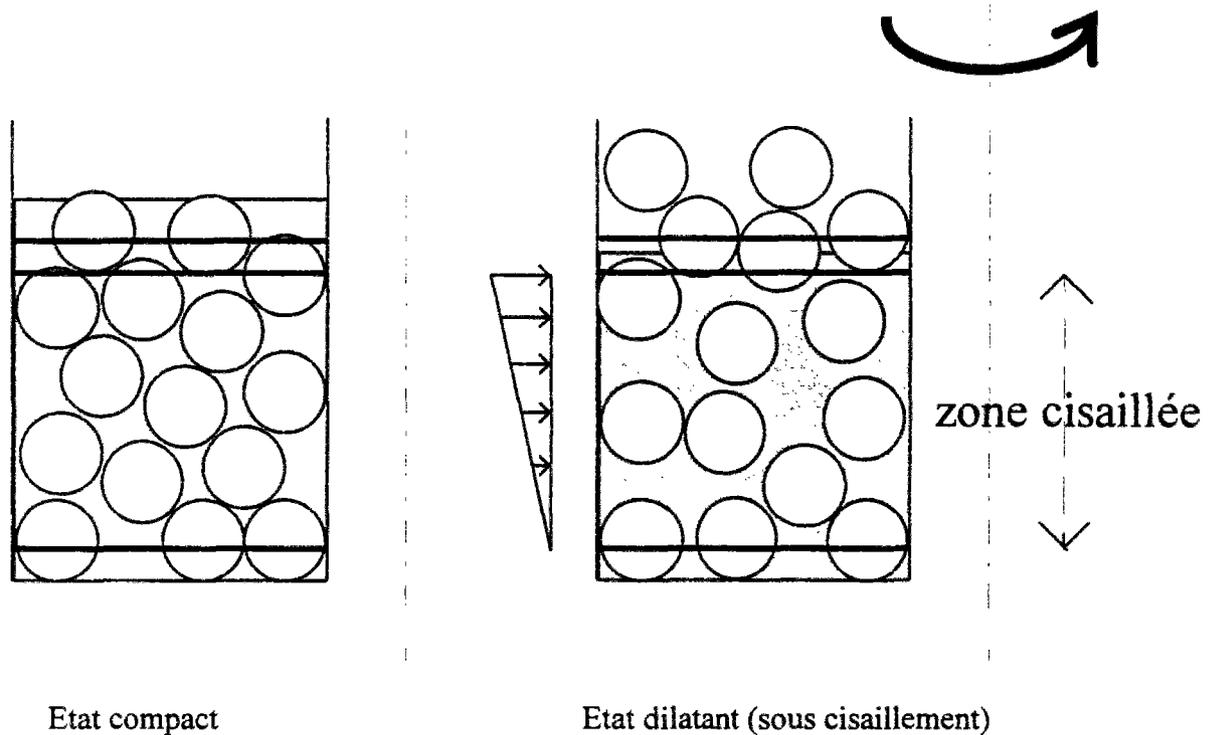


Figure 3-23 : Phénomène de ségrégation par dilatance de la structure des gravillons dans certains bétons.

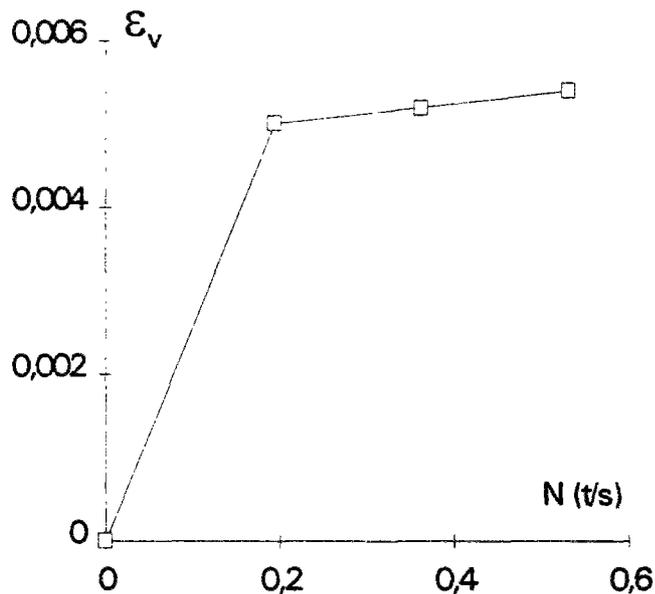


Figure 3-24 : Résultat d'un essai de dilatance (béton b2, voir annexe D)

3.6) Essais de répétabilité

3 séries d'essais sur béton remanié (compositions b2, b3 et b4) ont été entreprises, afin d'évaluer la répétabilité des mesures rhéologiques fournies par le rhéomètre. Pour chaque série, des gâchées successives de 15 litres ont été réalisées avec les mêmes lots de matériaux. La série d'essais sur béton b2 était effectuée avec un récipient d'un modèle préliminaire, tandis que ceux sur bétons b3 et b4 étaient réalisés avec un récipient amélioré. Nous signalons également que les compositions des bétons b3 et b4 étaient pratiquement les mêmes, sauf le dosage en superplastifiant (un peu plus faible pour le b4). Cependant, leurs lots de ciment (de mêmes marque et origine) étaient différents. Les mesures brutes au BT RHEOM lors de ces essais sont données en annexe E. Les constantes binghamiennes, ainsi que les valeurs de slump* obtenues sont présentées aux tableaux 3-5 à 3-7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	moyenne	écart-type	dispersion
slump (cm)	19,5	20,0	20,0	20,0	19,5	19,5	20,5	20,5	20,0	20,0	0,5	2%
τ_0 (Pa)	657	711	720	694	652	888	571	804	737	715	91	13%
μ (Pa.s)	294	323	248	314	314	224	294	263	261	282	34	12%

Tableau 3-5 : Première série d'essais de répétabilité, béton b2 (voir annexe D).

	1	2	3	4	5	6	moyenne	écart-type	dispersion
slump (cm)	23,0	23,5	23,5	23,5	23,5	23,0	23,5	0,3	1%
τ_0 (Pa)	307	338	307	333	297	315	316	16	5%
μ (Pa.s)	206	216	220	256	212	262	229	24	10%

Tableau 3-6 : Deuxième série d'essais de répétabilité, béton b3 (voir annexe D)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	moyenne	écart-type	dispersion
slump (cm)	21,5	22	22	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	23	22	22,5	0,5	2%
τ_0 (Pa)	738	594	702	646	693	679	669	643	720	623	671	45	7%
μ (Pa.s)	163	152	152	165	171	165	193	183	158	149	165	14	9%

Tableau 3-7 : Troisième série d'essais de répétabilité, béton b4 (voir annexe D)

On constate tout d'abord une dispersion** extrêmement faible sur les affaissements au cône d'Abrams, ce qui montre en fait le peu de sensibilité de cette mesure pour les BHP (rappelons en effet que les volumes des bétons testés dans le rhéomètre et dans le cône

* L'essai au cône d'Abrams est ici pris comme référence, car c'est généralement le seul utilisé pour les BHP à l'état frais.

** Prise comme étant le rapport entre l'estimation de l'écart-type et la valeur moyenne.

d'Abrams sont comparables). Nous reviendrons sur ce point plus loin (§4.2). En ce qui concerne les caractéristiques de Bingham, les dispersions obtenues sont voisines de 10% pour le béton b2. Elles sont plus faibles dans les séries des bétons b3 et b4, car ces deux bétons, du fait de leurs volumes de pâte plus importants et leurs dosages en superplastifiant convenables, étaient beaucoup moins sujets à la ségrégation par remontée des gravillons (cf. figure 3-23), et avaient donc un comportement plus stable.

3.7) Essais comparatifs

i) Essais comparatifs avec le viscosimètre BML (norvégien)

Ces essais ont été réalisés dans un premier temps au NTH*, avec le viscosimètre BML que nous avons déjà évoqué dans la section 2.3.3, puis, répétés (2 ans après) au LCPC-Paris, avec le BT RHEOM. Les matériaux étaient d'origine norvégienne. La composition des bétons est donnée en annexe D (b5 à b16). Le dosage en ciment variait de 450 à 600 kg/m³, le rapport fumée de silice/ciment de 0 à 10%, le rapport superplastifiant/ciment de 0 à 1,4%, et le rapport eau/ciment de 0,29 à 0,45. La taille des granulats était comprise entre 0 et 8 mm. La formulation des bétons a été déterminée à l'aide du logiciel BETONLAB [79].

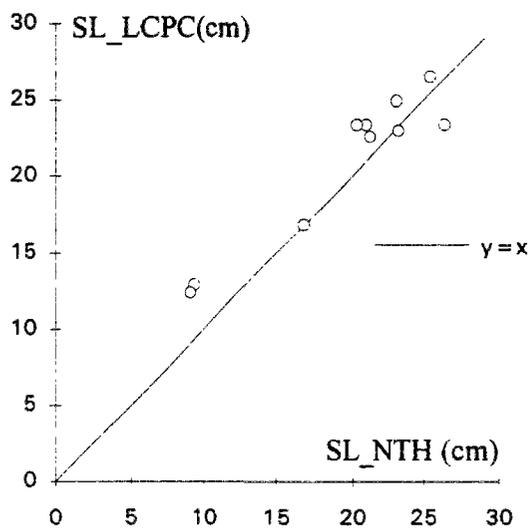
WALLEVIK et GJØRV [26] ont présenté en détail le viscosimètre BML. Après le chargement du béton dans le récipient, sans aide de pique ni de vibration, le récipient est posé sur un disque lié au moteur de rotation. L'essai commence par l'immersion du cylindre intérieur dans le récipient, en même temps que le récipient est entraîné à tourner par l'intermédiaire des butées sur le disque. L'essai est réalisé automatiquement, piloté par un micro-ordinateur. Les mesures principales, couple et vitesse, sont prises en général en 5 paliers de vitesse (laquelle varie en principe entre 0,2 et 0,6 tour/seconde, en décroissant). Le temps d'un essai est d'environ 75 secondes. La plupart des essais au viscosimètre BML ont présenté un écoulement piston. Ces essais ont été alors dépouillés avec la méthode de régression non-linéaire (voir section 2.3.2). Pour les autres, le dépouillement est réalisé par une régression linéaire, classique pour les viscosimètres à cylindres coaxiaux (voir également section 2.3.2).

Nous avons constaté [17] que l'essai au viscosimètre BML ne convient pas pour les bétons de slump inférieur à 8 cm. Nous verrons plus loin (§ 4.1) qu'il en est de même pour l'essai au BT RHEOM. La comparaison des mesures des essais pour les deux appareils ne concerne, par conséquent, que les bétons ayant des affaissements supérieurs ou égaux à 8 cm. Cette comparaison est présentée dans le tableau 3-8 et en figure 3-25. Les coefficients de corrélation sont respectivement 0,95 pour les slumps, 0,75 pour les seuils et 0,95 pour les viscosités. Par contre, du point de vue de la valeur absolue, qui nous intéresse ici, ces essais ne sont pas satisfaisants. Bien que les slumps mesurés au NTH soient comparables à ceux mesurés au LCPC, les constantes binghamiennes obtenues par les deux appareils sont très différentes. Celles au BT RHEOM sont systématiquement plus élevées que celles au viscosimètre BML. La raison n'en est pas claire. Les deux appareils ont été étalonnés; il est donc peu probable que la cause provienne de l'étalonnage. La dimension minimale de l'échantillon était 5 cm au viscosimètre BML et 10 cm au BT RHEOM; l'effet de paroi peut alors être exclu ici (rappelons que la taille maximale de gros grains n'est que 8 mm). Le grand délai entre les essais au NTH et au LCPC, pendant lequel se produit éventuellement une évolution des matériaux, peut probablement être une raison. Cependant, les slumps obtenus à Paris et à Trondheim sont similaires. On pense alors à la ségrégation des bétons au viscosimètre BML. Rappelons que dans ce dernier, le cylindre intérieur est creux; il est probable que les gravillons s'y accumulent sous l'effet de dilatance. Cependant, nous n'avons pas de mesures sur ce sujet.

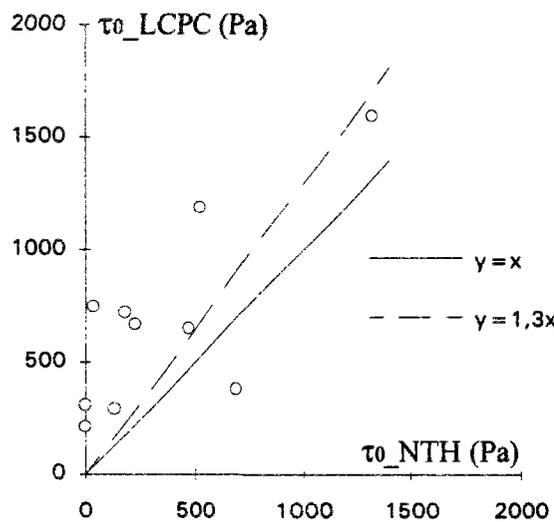
* NTH : The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norvège.

		b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11	b12	b13	b14
viscosimètre BML	slump (cm)	23,0	23,0	21,5	26,5	25,5	17,0	9,5	21,0	9,0	20,5
	τ_0 (Pa)	34	0	0	173	131	519	470	701	1310	220
	μ (Pa.s)	70	97	170	73	156	33	170	11	16	89
BT RHEOM	slump (cm)	23,0	25,0	22,5	23,4	26,5	17,0	13,0	23,5	12,5	23,5
	τ_0 (Pa)	747	216	306	721	292	1190	655	381	1600	671
	μ (Pa.s)	209	262	354	172	255	82	350	68	71	149

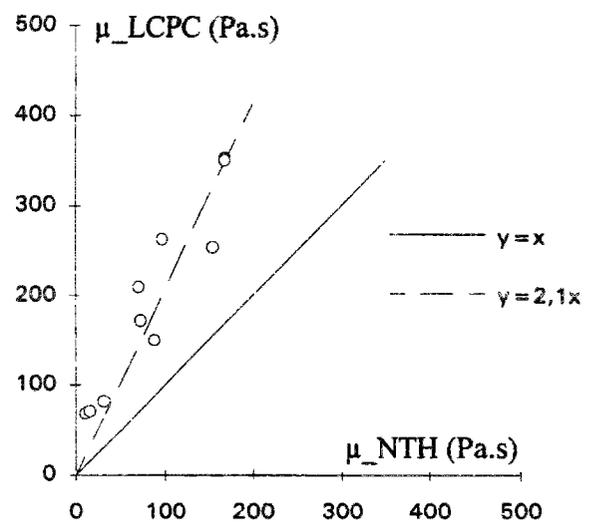
Tableau 3-8 : Résultat des essais comparatifs BML - BT RHEOM.



(a) comparaison des slumps



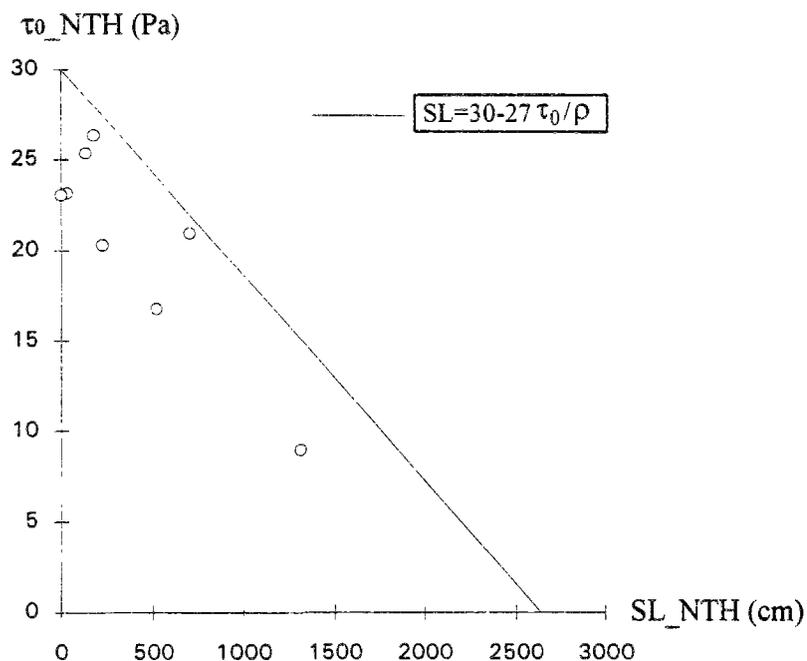
(b) comparaison des seuils



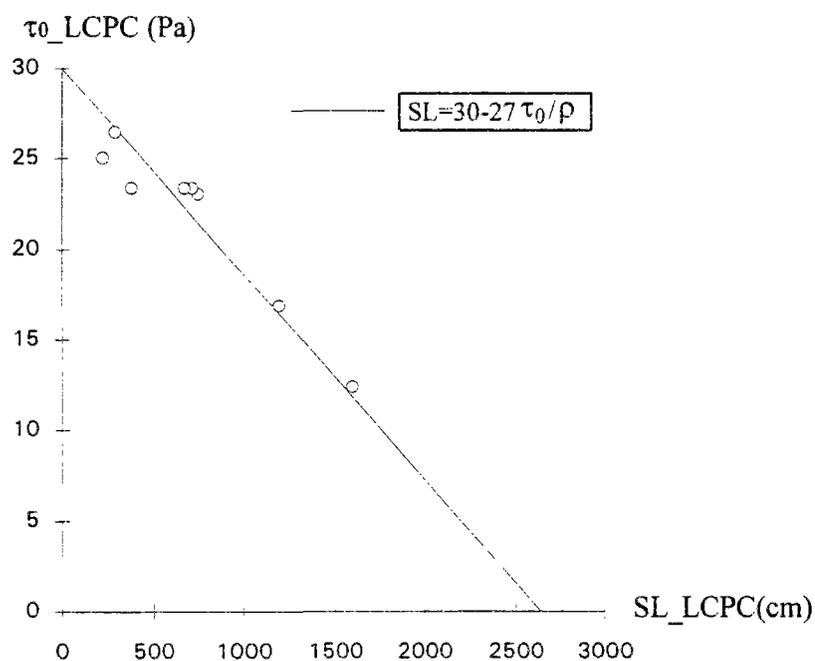
(c) comparaison des viscosités

Figure 3-25 : Comparaison des essais LCPC - NTH.

On verra plus tard (au §4.2) qu'il existe une relation assez directe, déductible de la théorie, entre slump et seuil. On constate en figures 3-26 que cette relation (les droites dans les figures) s'applique bien aux mesures au LCPC, mais pas tellement aux celles au NTH. Les valeurs de seuil mesurés au BML sont systématiquement plus faibles par rapport aux celles prédites avec les valeurs de slump mesurées. Ceci renforce le doute évoqué sur la ségrégation.



a) essais au NTH



(a) essais au LCPC

Figure 3-26 : Relation entre slump et seuil de cisaillement pour les essais au NTH et ceux au LCPC (8 bétons dont la viscosité plastique est inférieure à 300 Pa.s).

ii) Essais comparatifs avec le "Rhéomètre CEMAGREF-IMG" et le "Rhéomètre LAFARGE"

Le Rhéomètre CEMAGREF-IMG (voir la photo ci-dessous) a été développé par COUSSOT [18] au sein du CEMAGREF-IMG (Laboratoire de Rhéologie), afin d'étudier la rhéologie des boues et des laves torrentielles. C'est un viscosimètre à cylindres coaxiaux de grande taille construit en acier, dont le cylindre intérieur tourne, alors que la cuve extérieure est fixe. Ses rayons intérieur et extérieur sont respectivement 38 et 60 cm, la hauteur de l'échantillon 78 cm. Ceci conduit à un volume d'échantillon de 500 litres environ. Des systèmes sont installés sur les parois verticales pour empêcher le glissement du béton: 12 pales verticales de 3,5 cm de largeur régulièrement réparties sur la paroi du cylindre extérieur, et un grillage, en tôle déployée, de 6 mm d'épaisseur formé de losanges d'environ 20 mm de coté, soudé sur la paroi du cylindre intérieur. Le bas de cette dernière, afin d'éviter la fuite du béton, est équipé d'un joint de caoutchouc écrasé contre le fond de la cuve par une partie du poids du cylindre intérieur. La gamme de vitesse de rotation de cet appareil est comprise entre 0,00083 et 0,33 tours/s. Le couple maximum peut atteindre 6000 N.m. Attirés par sa conception et sa mise au point rigoureuse, et en particulier par sa grande taille, laquelle limite certainement au minimum l'effet de paroi et l'effet d'échelle, nous avons tenté d'effectuer une série d'essais comparatifs entre cet appareil et le BT RHEOM.



Une vue du rhéomètre CEMAGREF-IMG.

Dans la configuration d'origine du rhéomètre CEMAGREF-IMG, le cylindre intérieur est entraîné en rotation par l'arbre moteur à l'aide de deux clavettes servant de butées. Des jauges collées sur les faces des clavettes permettent de mesurer leur déformation quand un couple est appliqué. Une formule relie directement le couple avec la déformation des clavettes. Cependant, du fait des dimensions assez petites des clavettes (1,8 cm de largeur, 3 cm de hauteur, 5 cm de longueur effective) et des conditions aux limites très compliquées, il semble qu'une telle formule n'assure pas une précision suffisante pour des essais de comparaison de deux rhéomètres de conceptions différentes, en terme de mesures des caractéristiques intrinsèques des matériaux.

L'équipe du LCPC a donc raffiné le système de mesure du couple. Le nouveau système est constitué de deux capteurs identiques, placés symétriquement par rapport à l'axe de l'arbre moteur. Chaque capteur est constitué d'une clavette motrice qui transmet le couple à une clavette réceptrice par l'intermédiaire d'une bielle tangentielle (voir figure 3-27). Du fait que ces biellettes ne travaillent qu'en traction pure, les forces appliquées sur les biellettes peuvent être mesurées de manière précise par des jauges. La multiplication de ces forces par la distance de l'axe des biellettes au centre de rotation de l'arbre moteur donne donc le couple. La charge maximale de 6000 N.m et la place limitée nous obligent à faire travailler les deux biellettes à peu près en même temps (ceci correspond tout de même à une force de 25 kN pour chaque bielle, ou une contrainte d'environ 140 MPa). Cette symétrie du chargement des deux capteurs n'est pas évidente à obtenir à cause d'un degré d'hyperstaticité. La mise en place des capteurs s'effectue en deux temps. On installe d'abord le premier capteur et on met légèrement en traction sa bielle en faisant tourner manuellement le cylindre intérieur. On installe ensuite le deuxième capteur que l'on met également en traction par l'intermédiaire d'une vis de réglage qui supprime le jeu dû à l'hyperstaticité du montage. Chacun des capteurs est équipé de deux jauges longitudinales et de deux jauges transversales, ce qui constitue un demi-pont sur chaque capteur. Ces deux demi-ponts peuvent être alimentés et amplifiés séparément ou être câblés ensemble pour former un pont complet avec une seule amplification. Dans le premier cas, on peut surveiller la dissymétrie du chargement au prix d'un montage plus compliqué. C'est la solution adoptée pour ces essais comparatifs. La différence de chargements sur les deux biellettes ne pose aucun problème au niveau des mesures. En fonction de la tension de sortie S_i de chaque amplificateur de mesure, le moment Γ_i des capteurs peut être calculé par l'équation suivante :

$$\Gamma_i = E A R \varepsilon_i = E A R \alpha_i S_i = \alpha'_i S_i \quad (3-21)$$

E : module d'élasticité de la bielle

A : section de la bielle

R : distance entre l'axe de la bielle et l'arbre moteur (0,116 m)

ε_i : la déformation longitudinale de la bielle

α_i : coefficient dépendant du montage du pont

α'_i : sensibilité de capteur

La précision des valeurs de E , A , R et α_i est difficile à bien connaître. Par contre, on peut, par une calibration de force sur une presse, ajuster le gain de l'amplificateur de chaque capteur pour atteindre la sensibilité α'_i voulue, sans prendre en compte dans un premier temps l'incertitude sur R .

Choisissant une même sensibilité α' de 1000 N.m/V pour les deux capteurs, on applique un effort de traction de 25 kN (pleine échelle, correspondant approximativement au couple maximum 6000 N.m) sur les deux capteurs montés en série et on règle le gain des deux amplificateurs à une valeur permettant d'obtenir la tension de sortie suivante pour chaque capteur :

$$S_i = \frac{\Gamma_i}{\alpha'} = \frac{25000 \times 0,116}{1000} = 2,9 \text{ V} \quad (3-22)$$

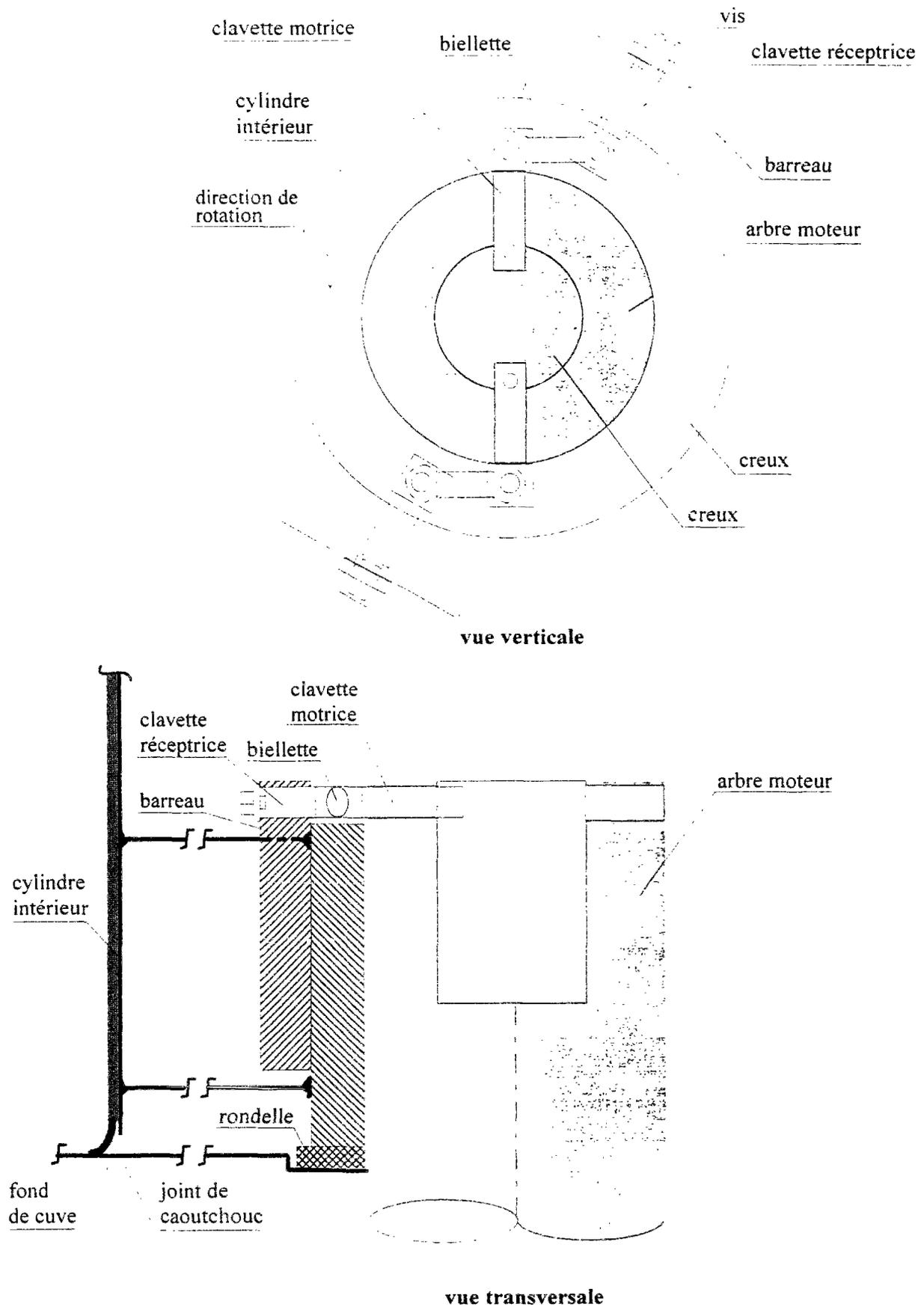


Figure 3-27 : Schéma du système de mesure de couple au Rhéomètre CEMAGREF-IMG.

Les résultats de la calibration avec cette sensibilité (1000 N.m/V) sont montrés en figure 3-28. L'erreur relative des capteurs est inférieure à 0,5% (0,07% pour le pont A et 0,44% pour le pont B). L'erreur absolue est de 10 N sur une échelle de 50 kN pour la presse utilisée pour la calibration. Comme la sensibilité est identique pour les deux capteurs, le couple exercé par l'arbre moteur se calcule :

$$\Gamma = \alpha'(S_1 + S_2) \quad (3-23)$$

On estime que l'incertitude sur la positionnement est d'environ 1 mm. En ajoutant cette erreur de 0,9% (1 mm sur 116 mm), l'erreur sur la mesure du couple est donc inférieure à 1,4%; ceci est suffisamment précis.

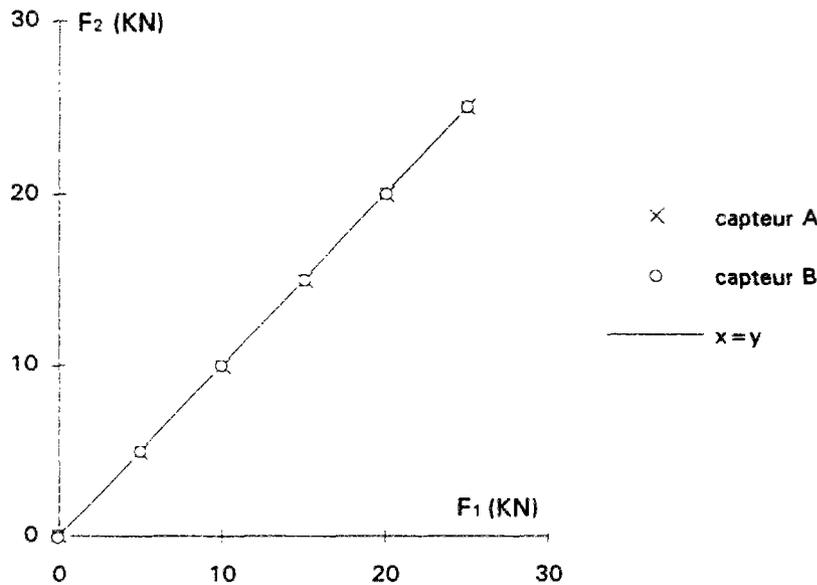


Figure 3-28 : Comparaison des forces appliquées par la presse, F_1 , et mesurées par les capteurs, F_2 (11 mesures pour chaque pont).

Avant d'effectuer des essais comparatifs, nous avons procédé à un essai préliminaire avec un "faux béton*", dans lequel on remplace le ciment par du filler calcaire (précaution afin de pouvoir effectuer une longue manipulation). Le but est, d'une part, de vérifier que l'appareil est capable de cisailer le béton, et, d'autre part, de mettre au point un protocole d'essai. Ce dernier point est particulièrement important au regard du grand volume d'échantillon à charger et à vider, et de l'enregistrement manuel de l'essai. Les mesures brutes des essais sont présentées au tableau 3-9. L'essai 1 mesure le frottement du joint de caoutchouc sec. L'essai 2 mesure le frottement du joint lubrifié par du coulis. Dans cet essai, on met du béton jusqu'à la hauteur du joint (10 cm environ). On peut remarquer que le coulis diminue énormément le frottement du joint. On doit alors soustraire ce couple de frottement des mesures brutes pour

* La formulation de ce mélange est la suivante :

Gravillon (5/12,5) : 810 kg/m³ ; Sable (0/5) : 901 kg/m³ ; Filler calcaire : 470 kg/m³ ; Filler calcaire ultrafine : 50 kg/m³ ; Superplastifiant (e.s.) : 3 kg/m³ ; Eau : 177 l/m³.

obtenir le couple effectif. L'essai 3 et l'essai 4 sont deux essais dans lesquels la cuve est remplie respectivement à mi-hauteur et complètement. Un écoulement piston est apparu lors de ces essais. En fait, l'écoulement piston apparaît certainement assez souvent dans cet appareil du fait des faibles vitesses appliquées. Nous utilisons, dans ce cas, la méthode de régression non-linéaire pour dépouiller les mesures (cf. §2.3.3). La méthode de régression linéaire (cf. équation 2-17 au §2.3.3) est utilisée pour des essais sans écoulement piston. Le tableau 3-10 donne une comparaison des caractéristiques issues de ces essais et celles issues de l'essai au BT RHEOM. On constate que le premier appareil donne des résultats beaucoup plus faibles. Le slump du "faux béton" s'élevait à 19 cm, et nous avons observé une sédimentation et une ségrégation horizontale* pendant l'essai au Rhéomètre CEMAGREF-IMG. Ceci explique, probablement, l'écart entre les deux appareils, ce qui reste à vérifier. Toutefois, la mise en oeuvre d'un essai au Rhéomètre CEMAGREF-IMG est très lourde, et nous n'en avons pas réalisé d'autres à cette étape. Néanmoins, cet essai préliminaire nous a assuré qu'il n'y avait pas de mauvaise surprise avec le moteur ni avec les systèmes de mesures, et nous a permis d'affiner le protocole d'essai.

essai 1		essai 2		essai 3		essai 4	
Ω	Γ	Ω	Γ	Ω	Γ	Ω	Γ
rad/s	N.m	rad/s	N.m	rad/s	N.m	rad/s	N.m
0,09	360	0,08	15	0,17	245	0,12	405
0,21	360	0,28	30	0,37	290	0,40	510
0,39	440	0,42	40	0,70	325	0,66	565
0,74	440	0,68	55	1,03	360	0,89	660
1,04	410	1,01	60	1,27	400	1,21	740
1,31	410	1,33	80	1,70	470	1,57	920
1,63	410	1,71	90				

Tableau 3-9 : Mesures brutes des essais préliminaires au Rhéomètre CEMAGREF-IMG.

	Rhéomètre CEMAGREF-IMG		BT RHEOM
	essai 3	essai 4	
τ_0 (Pa)	466	443	906
μ (Pa.s)	85	133	148

Tableau 3-10 : Comparaison des résultats issus des essais préliminaires au Rhéomètre CEMAGREF-IMG et de ceux au BT RHEOM.

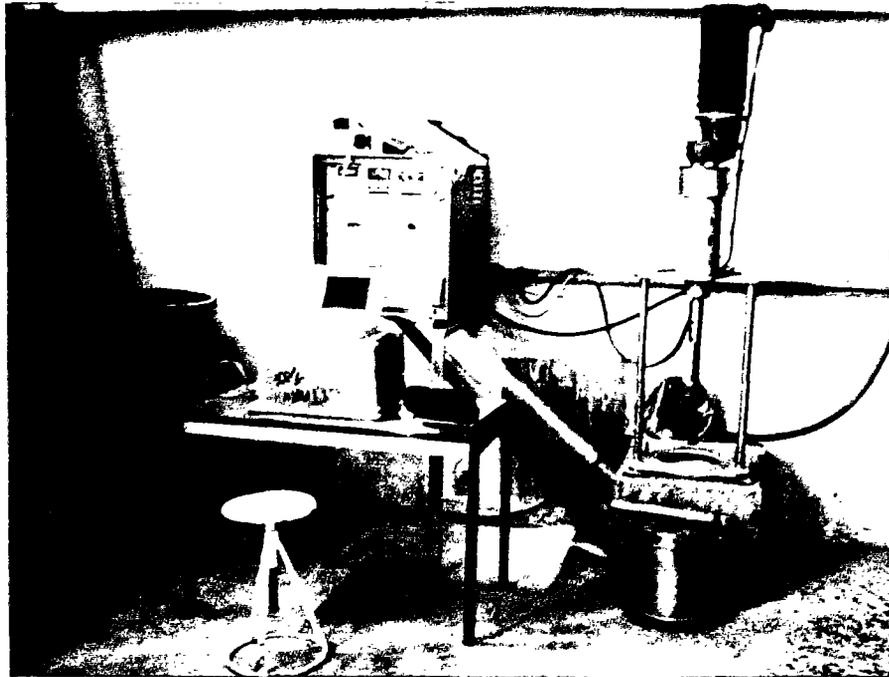
Un autre appareil, le Rhéomètre Lafarge (voir la photo ci-après), a également été utilisé lors des essais comparatifs. Son schéma est montré en figure 3-29. Le principe de cet appareil est le même que celui de l'appareil "Two-point test" (cf. §2.3.2). Pendant chaque essai, la vitesse angulaire est augmentée progressivement de 0 à une vitesse maximale, puis, elle est diminuée jusqu'à 0. Le couple est mesuré à chaque vitesse. La variation de vitesse est si petite

* se matérialisant par une migration centrifuge des gravillons, et par une accumulation de fines au voisinage du cylindre intérieur.

que l'on peut considérer la mesure comme caractéristique du régime permanent. Un segment de courbe de retour (vitesse décroissante) est utilisé pour ajuster une droite :

$$\Gamma = G + H\Omega \quad (3-24)$$

G (en N.m) et H (en N.m.s) sont les deux constantes fournies par l'essai, et supposées liées respectivement au seuil de cisaillement et à la viscosité plastique de l'échantillon.



Une vue du rhéomètre LAFARGE.

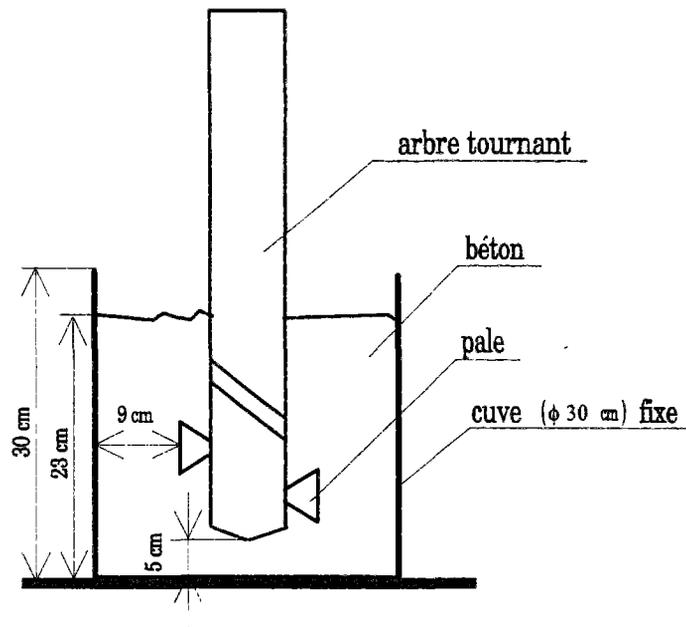


Figure 3-29 : Schéma du Rhéomètre LAFARGE (partiel).

Après l'étape de préparation, nous avons réalisé, avec la coopération de l'équipe MATEBET du Ciment Lafarge à Viviers, une série d'essais comparatifs dans leur laboratoire. Pour chaque essai, 2 m³ de béton étaient fabriqués dans une centrale à béton, puis livrés sur le site d'essais par un camion toupie. Les valeurs de slump étaient ajustées sur place, généralement en ajoutant de l'eau au béton. L'essai commençait par le chargement du béton dans le récipient du Rhéomètre CEMAGREF-IMG jusqu'à 10 cm environ de profondeur, en vue de mesurer le frottement du joint (on a vu l'importance de cette mesure lors des essais préliminaires). Le remplissage était fait directement depuis la goulotte du camion toupie. Après la mesure, on continuait le remplissage jusqu'à mi-hauteur du récipient. Puis, on prélevait des échantillons pour le BT RHEOM et le Rhéomètre LAFARGE. Enfin, on complétait le remplissage du récipient du Rhéomètre CEMAGREF-IMG. Remarquons que, pendant le remplissage de ce dernier, le moteur tournait à une petite vitesse. Cette précaution a été prise afin d'éviter les problèmes de démarrage du moteur, en particulier pour des bétons très thixotropes.

Pendant cette campagne d'essai de deux jours, 9 bétons ont été testés. La composition de ces bétons (b17 à b25) est présentée en annexe D. En raison de la température ambiante élevée et de la durée de chaque essai au Rhéomètre CEMAGREF-IMG, un retardateur a été utilisé dans tous les bétons. Les 5 premiers bétons (b17 à b21) étaient des bétons ordinaires (BO) pour ouvrage d'art, ne contenant pas de superplastifiant. Il y avait cependant un entraîneur d'air dans le béton 21. Les 4 derniers bétons (b22 à b25) étaient des bétons à hautes performances (BHP). Le béton 25 contenait également un entraîneur d'air. La taille maximale des gros grains était 15 mm pour les bétons b20 et b25, et 25 mm pour les autres.

On a trouvé au BT RHEOM que le béton 17 ne pouvait pas être considéré comme un matériau binghamien (faible coefficient de corrélation de la droite ajustée; et viscosité anormalement faible; cf. §4.1 figure 4-2). Le tableau 3-11 donne une comparaison des caractéristiques binghamiennes issues du BT RHEOM (τ_{0_B} , μ_B) et du Rhéomètre CEMAGREF-IMG (τ_{0_C} , μ_C) pour les 8 bétons restants.

béton	slump	τ_{0_B}	τ_{0_C}	écart relatif	μ_B	μ_C	écart relatif	écoulement piston	sédimentation	
	cm	Pa	Pa	%	Pa.s	Pa.s	%			cm
BO	b17	6,5	non-binghamien							
	b18	19	1052	806	23	36	2,3	94	oui	14
	b19	16	1070	665	38	58	12,8	78	oui	15
	b20	11	991	1111	12	50	10,9	78	oui	3
	b21	15	929	955	3	55	8,8	84	oui	10
BHP	b22	22	368	573	56	143	67,7	53	oui	8
	b23	20	745	565	24	217	180	17	oui	5
	b24	24	190	168	12	310	314	1	non	0
	b25	22	113	134	19	303	315	4	non	0

Tableau 3-11 : Comparaison des constantes de Bingham issues du BT RHEOM (τ_{0_B} , μ_B) et du Rhéomètre CEMAGREF-IMG (τ_{0_C} , μ_C).

En ce qui concerne le seuil de cisaillement, les valeurs mesurées avec les deux appareils ont le même ordre de grandeur pour chaque béton. A part deux essais, les écarts relatifs de tous les autres sont inférieurs à 24%. Rappelons que la dispersion des mesures au BT RHEOM est voisine de 10%, encore que l'incertitude sur la mesure de couple devienne grande pour des bétons de faible seuil à cause de l'incertitude de la mesure du frottement du joint. Par ailleurs, la répétabilité du Rhéomètre CEMAGREF-IMG n'est pas précisément connue (15% environ d'incertitude sur la contrainte dans sa configuration originale [18]). Etant donné tous ces facteurs de perturbation, les résultats obtenus sont donc assez positifs. La figure 3-30 résume cette comparaison.

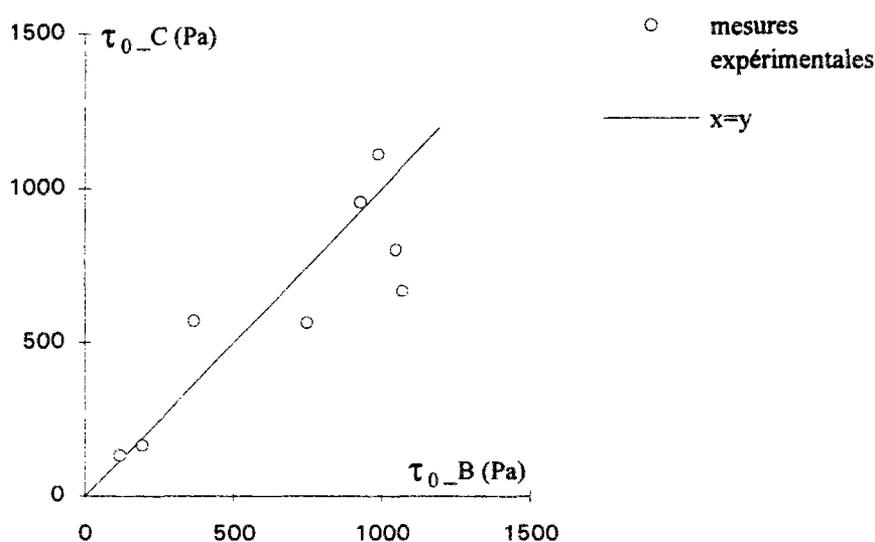


Figure 3-30 : Comparaison du seuil mesuré au BT RHEOM (τ_{0_B}) et celui mesuré au Rhéomètre CEMAGREF-IMG (τ_{0_C}).

Pour la viscosité plastique, on s'aperçoit que la mesure au BT RHEOM est toujours plus élevée que celle au Rhéomètre CEMAGREF-IMG, sauf pour les deux derniers bétons (voir tableau 3-11 et figure 3-31). Pendant les essais au Rhéomètre CEMAGREF-IMG, nous avons observé qu'une ségrégation, horizontale et verticale, existe manifestement pour certains bétons, ce qui n'a pas été remarquée au BT RHEOM. Notamment, dans le cas des bétons peu visqueux, une couche de pâte ou de mortier, plus ou moins profonde, recouvrait la surface de l'échantillon à la fin de l'essai. Ceci est probablement une cause importante pour laquelle on trouve des mesures plus faibles dans cet appareil. Nous avons tenté de quantifier la sédimentation des gros grains par une mesure de la profondeur de mortier à la surface. On constate que l'écart relatif est d'autant plus élevée que cette sédimentation est forte (voir figure 3-32), ce qui confirme l'hypothèse évoquée. Par ailleurs, la figure 3-33 montre que la sédimentation est fortement liée à la viscosité plastique (mesurée au BT RHEOM) du béton. On peut alors imaginer que dans le viscosimètre à cylindres coaxiaux, la propagation de l'écoulement dépend de la viscosité du matériau. Pour des échantillons peu visqueux, la ségrégation des gros grains se produit facilement. Par conséquent, le cisaillement est localisé juste dans une partie de l'échantillon, dans laquelle il y a moins de gros grains. Dans ce cas, il

n'est pas étonnant qu'on obtienne des mesures de la viscosité plus faibles. A noter que pour les deux derniers bétons (b24 et b25), qui étaient les plus visqueux, la correspondance des mesures des deux appareils est excellente.

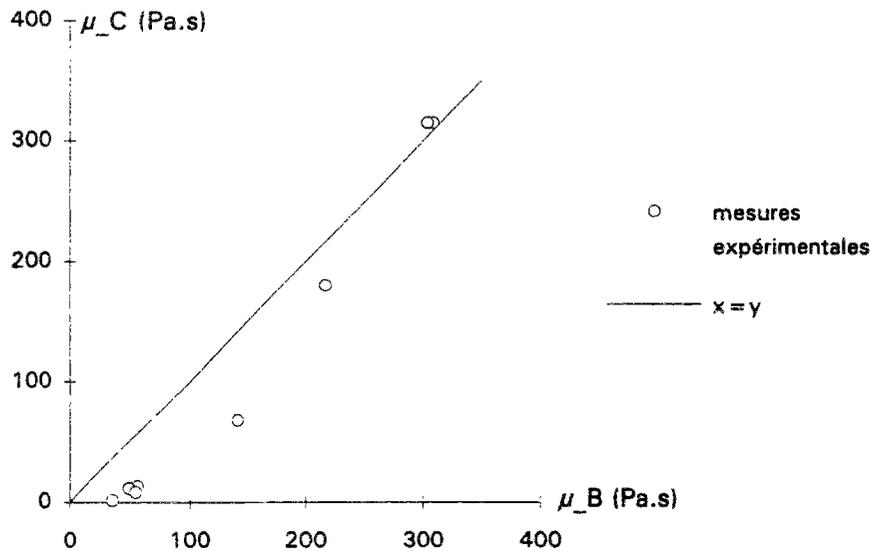


Figure 3-31 : Comparaison de la viscosité plastique mesurée au BT RHEOM (μ_B) et celle mesurée au Rhéomètre CEMAGREF-IMG (μ_C).

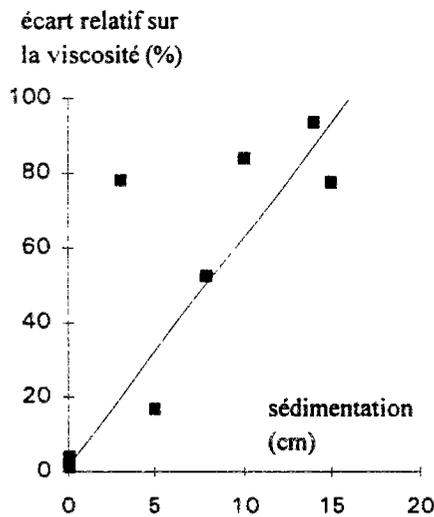


Figure 3-32 : Relation entre l'écart relatif sur la viscosité et la sédimentation des gros grains.

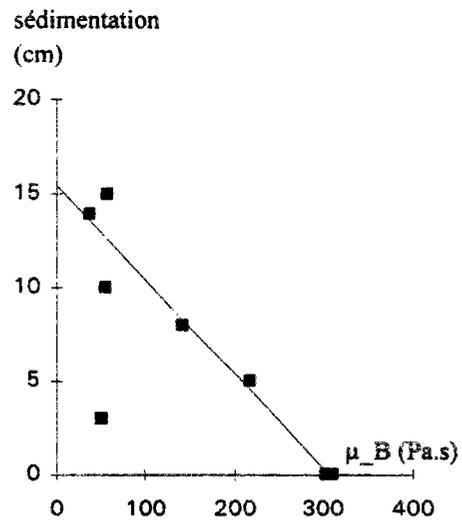


Figure 3-33 : Relation entre la sédimentation des gros grains et la viscosité mesurée au BT RHEOM.

Nous donnons également une comparaison des résultats issus du BT RHEOM et du Rhéomètre LAFARGE en figure 3-34. Notons qu'aucune ségrégation n'a été constatée avec ce

dernier, probablement grâce aux pales de forme hélicoïdale, qui produisent des mouvements du matériau vers le haut. On peut voir de bonnes relations entre les mesures issues des deux appareils, notamment pour la viscosité (dont le coefficient de corrélation est égale à 0,99). Cependant, les corrélations mises en évidence ne sont pas forcément généralisables pour passer aux caractéristiques binghamiennes à partir des mesures effectuées au Rhéomètre LAFARGE. En effet, ces résultats, très limités, n'excluent pas que les relations puissent dépendre de la composition (nature, forme géométrique des granulats, granulométrie, etc) des bétons.

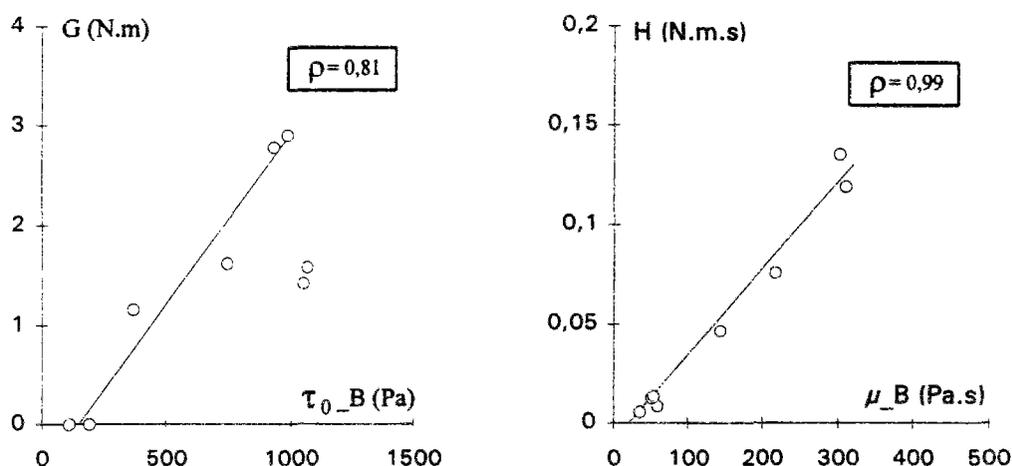


Figure 3-34 : Comparaison des résultats issus du BT RHEOM (seuil τ_{0_B} et viscosité μ_B) et du Rhéomètre LAFARGE (G et H).

iii) Bilan

La première série des essais comparatifs avec le viscosimètre BML n'a pas donné de résultats très satisfaisants. Probablement à cause de la ségrégation des gravillons au viscosimètre BML. Par contre, un bon accord entre une relation théorique slump-seuil et les mesures de seuil de cisaillement au BT RHEOM nous rassure sur la fiabilité de ces dernières. La deuxième série des essais comparatifs avec le Rhéomètre CEMAGREF-IMG montre un bon accord global pour le seuil, mais pas pour la viscosité plastique. Il semble que l'écart provienne, là encore, de la ségrégation des matériaux. Cette dernière a été observée dans le Rhéomètre CEMAGREF-IMG pendant la majorité des essais*, ce qui n'est pas le cas dans les essais avec BT RHEOM. La ségrégation peut a priori influencer également les mesures de seuil. En fait, on peut penser que le seuil de cisaillement dépend surtout de la distance moyenne entre particules dans le béton frais. Dans une ségrégation gravillon/mortier telle que celle observée dans le rhéomètre CEMAGREF-IMG, cette distance est probablement peu affectée. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour éclaircir cette question. En tout cas, nous avons remarqué que la ségrégation se produit d'autant plus que le béton est peu

* Remarquons que, parmi les bétons testés lors de ces essais, peu d'entre eux auraient été jugés acceptables sur un chantier, du fait de leur aspect "caillouteux" et leur tendance à se ségréger. La raison en était notamment que leur consistance était ajustée par ajout d'eau dans la bétonnière, pratique considérée comme peu recommandable lorsqu'on désire des bétons homogènes.

visqueux, au moins pour les bétons testés. Sur les deux bétons suffisamment visqueux pour que la ségrégation ne soit pas observée au Rhéomètre CEMAGREF-IMG, les valeurs de viscosité, et de seuil, mesurées aux deux appareils, sont très concordantes. Par ailleurs, de bonnes corrélations ont été trouvées entre les mesures effectuées au Rhéomètre LAFARGE et au BT RHEOM.

Tous les essais comparatifs n'ont pas donné les résultats escomptés. L'opération était complexe à réaliser, car les essais rhéologiques actuels appliqués au béton ne donnent pas de caractéristiques intrinsèques, ce qui justifie d'ailleurs l'initiative du développement du nouveau rhéomètre BT RHEOM. Cependant, ces essais nous ont permis de tirer certains résultats positifs, et d'être raisonnablement confiants dans les mesures effectuées avec le BT RHEOM.

Notamment, le choix d'un cisaillement entre plans horizontaux contrecarre la tendance naturelle des gravillons à sédimenter. Par ailleurs, on dispose de trois indicateurs permettant de s'assurer de la validité des essais au BT RHEOM:

1) si la surface supérieure n'est pas trop "caillouteuse" en cours de cisaillement, on en déduit que l'échantillon demeure raisonnablement homogène. Dans le cas contraire, les gravillons émergent pendant l'essai, et "coulent" dans la pâte pendant la phase de vibration sans rotation des pales;

2) si le seuil de cisaillement dépasse une valeur de 2000 Pa, les risques de localisation du cisaillement deviennent importants;

3) cette localisation se traduit généralement par un alignement médiocre des points de mesure de couple (corrélation inférieure à 0,9), ainsi parfois que par une nette diminution de la viscosité plastique dans les essais visant à caractériser l'évolution du comportement.

3.8) Conclusion

Un nouveau rhéomètre à béton, BT RHEOM, a été développé. Le principe de fonctionnement (cisaillement entre deux plans horizontaux) supprime l'existence de l'écoulement piston, et permet de réaliser un appareil de petite taille et suffisamment léger pour être portable par une personne. Ce rhéomètre est donc utilisable en laboratoire comme sur chantier. Le principe du dépouillement de l'essai et l'objectivité de l'appareil ont été discutés. Une correction a ainsi été proposée pour la mesure de la viscosité plastique en raison du frottement des parois verticales. Les performances de ce rhéomètre, ainsi que son utilisation, ont été détaillées. Avec BT RHEOM, on peut mesurer notamment des caractéristiques telles que seuil de cisaillement et viscosité plastique (sans et avec vibration), ainsi que le seuil au repos. Les essais sont pilotés par un micro-ordinateur, par l'intermédiaire d'un logiciel spécifiquement programmé: ADRHEO. 3 séries d'essais de répétabilité ont été effectuées. La dispersion des mesures des deux constantes binghamiennes est d'environ 10%, ce qui est assez satisfaisant vu l'hétérogénéité du béton. Nous avons réalisé également deux séries d'essais comparatifs avec notamment deux appareils de type viscosimètre à cylindres coaxiaux, dont le principe est différent de celui du BT RHEOM. Nous avons également effectué une comparaison avec un appareil ressemblant à celui de "Two-point test". En fait, nous avons cherché à comparer nos mesures avec la majorité des rhéomètres existants, en principe applicables au béton. Les points positifs et négatifs de ces essais ont été présentés. Au travers de ces essais, on peut s'apercevoir plus clairement des problèmes posés par l'utilisation du viscosimètre à cylindres coaxiaux pour caractériser le béton frais. Ces différents points valident la conception du BT RHEOM, tant du point de vue scientifique que pratique.

4. Etude expérimentale du comportement rhéologique de quelques bétons fluides

4.1) Loi de comportement des bétons fluides

Les bétons que nous avons testés au rhéomètre BT RHEOM sont pour la plupart à hautes performances. Ils comprennent également des bétons de sable et des bétons ordinaires. Les intervalles de variation des paramètres de composition sont les suivants (voir annexe D): 5 à 25 mm pour la taille maximale du granulat, 266-600 kg/m³ pour le dosage en ciment, 0 ou 10% pour le rapport fumée de silice sur ciment (sauf b44), 0,26-0,66 pour le rapport eau/ciment, et 0-2,5% pour le rapport superplastifiant/ciment, ce qui donne des slumps variant entre 6 et 28 cm. Les échantillons de ces bétons mis au BT RHEOM n'ont présenté aucune ségrégation manifeste, ce qui nous permet de les considérer comme des matériaux homogènes.

Les résultats obtenus montrent que, pour tous les bétons d'affaissement au cône d'Abrams supérieur à 8 cm, la relation entre le couple et la vitesse angulaire est affine (coefficient de corrélation supérieur à 0,95) dans la plage de gradient de vitesse utilisée. Afin d'éviter une ségrégation du béton aux vitesses élevées, due à la force centrifuge, ainsi que l'instabilité de la rotation de la pièce tournante aux vitesses très faibles (due aux coincements occasionnels des gravillons), le domaine étudié de gradient de vitesse maximal au rhéomètre (celui correspondant au rayon externe) est souvent compris entre 1,5 et 6 s⁻¹. Un exemple de mesures avec une plage de gradient de vitesse encore plus large, notamment avec une valeur minimale assez faible (gradient de vitesse compris entre 0,6 et 7 s⁻¹) est montré en figure 4-1. On peut constater que la relation couple-vitesse reste affine à vitesse relativement faible comme à vitesse relativement élevée. Gênés par des difficultés techniques, nous n'avons pas pris beaucoup de mesures correspondant à la zone de gradient de vitesse encore plus faible. Selon les bases théoriques présentées au §3.2.1, le comportement de ces bétons respecte alors le modèle de Bingham, au moins pour la gamme de gradient de vitesse utilisée.

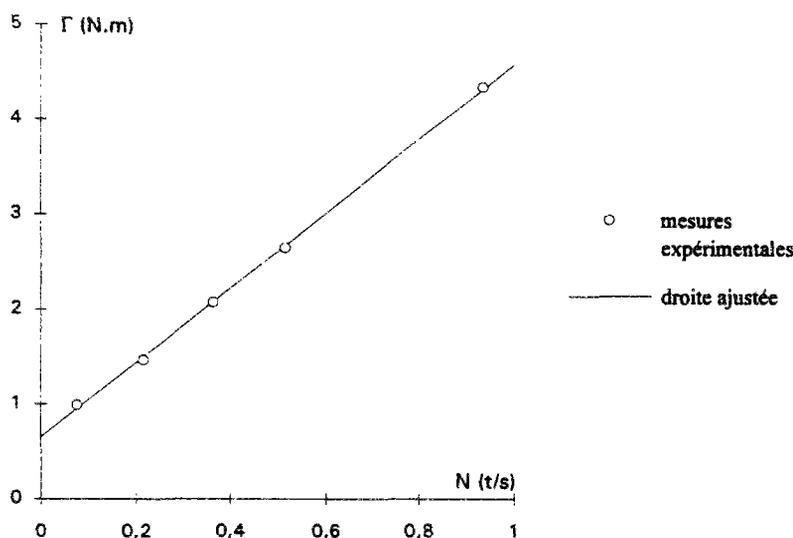
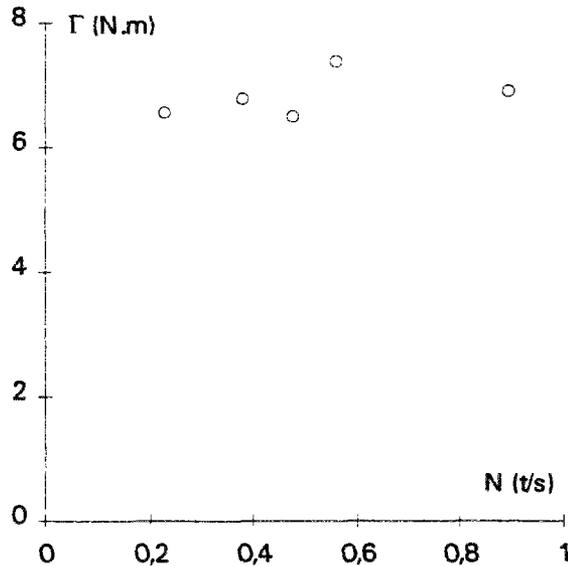


Figure 4-1 : Un exemple des mesures couple en fonction de vitesse au BT RHEOM (béton b34, cf. annexe D).

Pour des bétons plus fermes (valeur de slump inférieure à 8 cm), il apparaît que leur comportement ne suit plus le modèle de Bingham*. L'une des manifestations de ces bétons est que leurs viscosité devient anormalement faible, voire même nulle. Une autre manifestation est qu'on observe plus de perturbations des mesures à cause de la mauvaise homogénéité de ces bétons. La figure 4-2 présente les mesures d'un béton (b17, cf. annexe D) dont l'affaissement au cône était 6 cm.



coefficient de corrélation de la droite ajustée : 0,42
 "viscosité" issue de la droite ajustée : 27 Pa.s

Figure 4-2 : Mesures brutes d'un béton de slump de 6 cm.

Les caractéristiques binghamiennes (sans vibration) relatives aux bétons testés sont présentées au tableau 4-1. Nous constatons tout d'abord que :

- le seuil de cisaillement mesuré varie entre 50 et 2000 Pa ;
- la viscosité plastique varie entre 40 et 500 Pa.s .

Les différences entre bétons sont donc grandes devant la dispersion des mesures de l'appareil. Nous constatons également en figure 4-3 qu'aucune corrélation n'apparaît entre les deux caractéristiques de Bingham, ce qui montre, s'il en était besoin, l'insuffisance des types d'essais fournissant un seul paramètre. En particulier, pour un même affaissement au cône, la viscosité du béton peut varier de 1 à 4 en valeur relative (voir figure 4-4).

* Soulignons que le comportement parlé ici est sans vibration. Nous verrons au §4.5 que sous vibration, les bétons ayant des valeurs de slump plus faibles peuvent avoir encore un comportement binghamien .

béton	sans vibration		avec vibration		slump (cm)
	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	τ_{0v} (Pa)	μ_v (Pa.s)	
b1	653	74	-	-	22
b2	715	282	-	-	20
b3	316	229	142	214	23,5
b4	671	165	346	173	22,5
b5	747	209	143	276	23
b6	216	262	-	-	25
b7	306	354	-	-	22,5
b8	721	172	-	-	23,5
b9	292	255	180	306	26,5
b10	1190	82	376	189	17
b11	655	350	119	324	13
b12	380	68	274	110	23,5
b13	1600	71	764	184	12,5
b14	671	149	387	194	23,5
b15	748	536	245	464	11
b16	2000	410	-	-	8
b17	-	-	902	223	6,5
b18	1050	36	844	107	19
b19	1070	58	924	107	16
b20	991	50	647	113	11
b21	929	55	454	144	15
b22	368	143	315	140	22
b23	745	217	-	-	20
b24	190	310	0	318	23,5
b25	113	303	42	266	22
b26	572	321	261	224	23
b27	534	317	113	231	23
b28	624	405	352	268	22,5
b29	1450	146	857	259	18
b30	502	138	322	163	27
b31	176	110	116	128	28
b32	162	113	101	120	27,5
b33	173	138	69	143	26,5
b34	181	172	48	192	28
b35	51	140	0	170	28
b36	281	285	-	-	27
b37	845	146	395	172	21
b38	298	199	160	162	26,5
b39	913	163	385	192	18,5
b40	317	149	124	145	24
b41	1450	174	728	231	13,5
b42	1840	192	1073	280	9
b43	-	-	1355	340	7
b44	927	203	648	179	20
b45	302	247	200	221	24
b46	361	196	181	201	22
b47	244	184	38	168	24
b48	868	140	471	178	13
b49	309	140	177	142	20,5

Tableau 4-1 : Caractéristiques rhéologiques initiales de différents bétons testés.

4.2) Relation entre slump et seuil de cisaillement

L'essai au cône d'Abrams (voir §2.3.1) est en fait un essai essentiellement statique, ce qui suppose intuitivement que l'affaissement est fortement lié au seuil de cisaillement de l'échantillon, mais qu'il ne dépend guère de sa viscosité plastique [2].

Selon les résultats de simulations numériques assez compliquées, TANIGAWA et MORI [81] ont donné des diagrammes reliant slump, seuil et viscosité pour des bétons légers, des bétons ordinaires, et des bétons lourds. Les plages des grandeurs dans les diagrammes sont les suivantes: de 1 à 26 cm pour la valeur du slump; de 200 à 1800 Pa pour celle du seuil; et de 40 à 300 Pa.s pour celle de la viscosité. Qualitativement, il semble qu'il n'y ait pas de surprise dans ces diagrammes. Pourtant, avec les constantes de Bingham mesurées au BT RHEOM, les valeurs de slump issues de ces diagrammes sont toujours plus faibles que celles de l'expérience (voir tableau 4-2 et figure 4-6), bien qu'il existe une bonne corrélation entre elles (coefficient de corrélation 0,90). Les simulations de ces auteurs nécessitent les connaissances des interfaces du béton avec les parois de moule, ce qui est, comme évoqué au §3.2.2, une question difficile.

	b9	b6	b3	b5	b4	b7	b1	b2	b10	b13
SL mesuré (cm)	26,5	25	23,5	23	22,5	22,5	22	20	17	12,5
SL TANIGAWA (cm)	20	21	19,5	13	15	19	18	13	9,5	6
SL MURATA (cm)	8	11	7	1	1	7,5	1,5	1	0	0

Tableau 4-2 : Valeurs de slump mesurées, issues des diagrammes de TANIGAWA, et issues de la formule de MURATA.

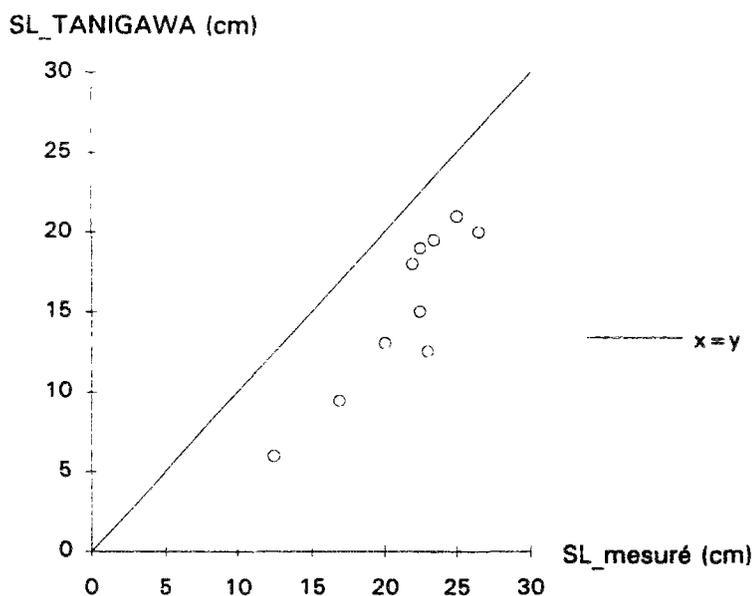


Figure 4-6 : Comparaison des valeurs de slump mesurées et celles issues des diagrammes de TANIGAWA.

MURATA et KIKUKAWA [82] ont ajusté, d'après leurs mesures expérimentales, une formule empirique suivante :

$$\tau_0 = 714 - 473 \log(SL) \quad (4-1)$$

SL étant la valeur de slump, en cm, et τ_0 le seuil de cisaillement, en Pa. Cependant, appliquant cette formule à nos mesures, nous obtenons des valeurs de slump très différentes de celles mesurées (voir également tableau 4-2). En fait, ces auteurs se sont basés sur des mesures au viscosimètre à cylindres coaxiaux. On a discuté les problèmes liés à ce type d'essai aux chapitres précédents.

Nous essayons alors de modéliser cet essai par une autre approche simplifiée. L'affaissement de l'échantillon est provoqué par son poids propre. Compte tenu du soulèvement du cône relativement lent, l'influence de la viscosité sur l'affaissement de l'échantillon doit être secondaire. Par conséquent, nous considérons le seuil de cisaillement comme le seul facteur déterminant l'affaissement. A la fin de l'essai, la contrainte de cisaillement doit être partout dans l'échantillon inférieure ou égale au seuil de cisaillement, du fait que l'écoulement ne se produit plus. En vue de simplifier un peu la simulation, nous prenons les hypothèses suivantes :

- la forme finale de l'échantillon reste conique ;
- la surface supérieure de l'échantillon reste la même, au début comme à la fin .

Ainsi, pour une hauteur finale de l'échantillon donnée (rappelons que la différence entre celle-ci et la hauteur originale de l'échantillon, 30 cm, donne la valeur de slump), nous pouvons calculer le diamètre de la surface inférieure en conservant le volume de l'échantillon constant. La forme géométrique finale de l'échantillon peut alors être déterminée. Il ne reste qu'à calculer la contrainte maximale dans un cône sous charge de poids propre (problème axisymétrique et statique).

Les calculs ont été réalisés avec le logiciel CESAR, développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. La figure 4-7 montre un maillage utilisé dans un cas de calcul (15 cm de slump). Les éléments sont des quadrilatères à 8 noeuds. Cependant, nous avons utilisé des éléments de triangle à 6 noeuds pour modéliser le cas de 25 cm de slump, en raison de la forme plate de l'échantillon. La contrainte de cisaillement maximale, relative au seuil de cisaillement, se situe toujours au centre de la surface inférieure pour tous les calculs réalisés, lesquels représentent les essais dont les valeurs de slump sont respectivement 0, 10, 15, 20 et 25 cm. Nous avons présenté, en figure 4-8, les courbes de variation de contrainte normale, le long du rayon à la surface inférieure, dans le calcul correspondant au cas de 15 cm de slump.

Les valeurs de slump imposées et les contraintes de cisaillement maximales correspondantes calculées sont présentées en figure 4-9. On peut voir que la relation slump-seuil est à peu près affine. Par un ajustement des valeurs, nous avons obtenu la relation slump-seuil sous la forme suivante :

$$SL = 30 - \frac{27 \tau_0}{\rho} \quad (4-2)$$

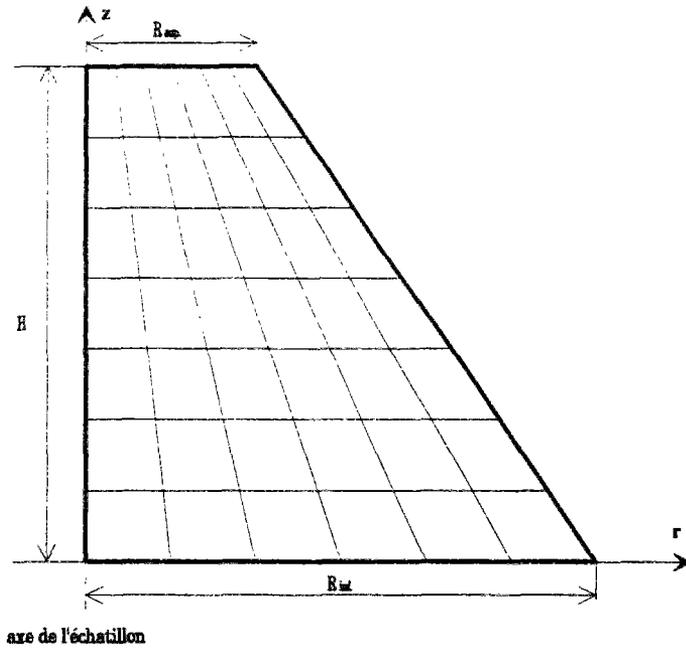
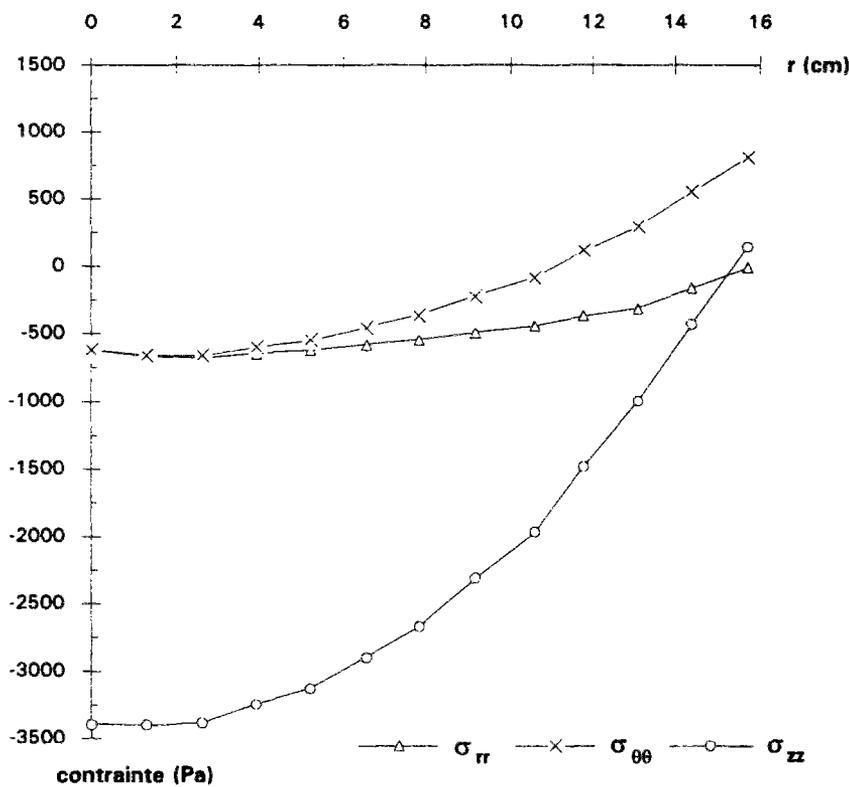


Figure 4-7 : Maillage de la section de révolution de l'échantillon adopté pour un calcul de contrainte (slump=15 cm) dans cet échantillon.



au centre de la surface :
 contrainte normale maximale = 3390 (Pa)
 contrainte normale minimale = 620 (Pa)
 contrainte de cisaillement maximale = $(3390-620)/2 = 1385$ (Pa)

Figure 4-8 : Courbes de variation de contrainte normale à la surface inférieure dans une simulation (slump=15 cm).

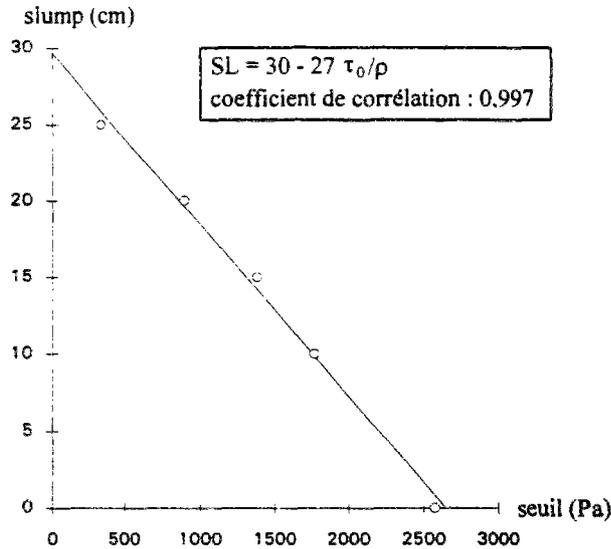


Figure 4-9 : Relation slump-seuil issue des simulations.

où SL représente le slump (en cm), τ_0 le seuil de cisaillement (en Pa), et ρ la masse volumique du béton frais (en kg/m^3). Bien que cette relation soit issue des modélisations simplifiées, on constate en figure 4-10 qu'elle est bien cohérente avec des mesures expérimentales obtenues au BT RHEOM.

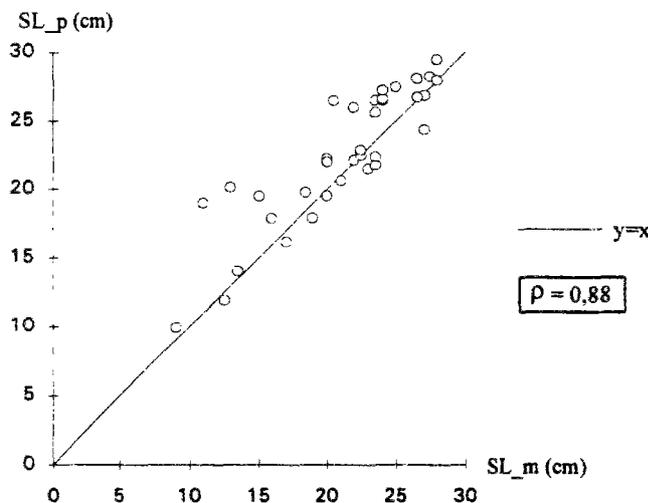


Figure 4-10 : Comparaison des valeurs de slump mesurées SL_m pour 38 bétons différents et celles prédites par l'équation (4-2) SL_p avec les seuils des bétons mesurés au BT RHEOM.

Dans toutes les mesures disponibles (cf. tableau 4-1), on a exclu les bétons dont la viscosité plastique est supérieure à 300 Pa.s. En effet, le modèle de prédiction du slump néglige cette caractéristique rhéologique; or, elle joue cependant un rôle [81], qui pourrait devenir important pour les bétons très visqueux. Pour les 38 mesures restantes, l'erreur absolue de la valeur de slump prédite est de 1,9 cm, alors que l'erreur relative est de 13% (notions définies au §3.3). C'est donc un résultat satisfaisant.

On remarque que lorsque le modèle se trompe, il tend le plus souvent à *surestimer* le slump. Cette erreur est probablement liée à la négligence de l'influence de la viscosité plastique des bétons, car plus un béton est visqueux, plus l'écoulement est lent, ce qui permet à la thixotropie de se manifester. De plus, dans d'autres cas, une certaine ségrégation apparaît lors de l'affaissement du cône. Il se forme alors une "montagne" de gravillon, au travers de laquelle le mortier s'écoule. La stabilité de l'édifice granulaire diminue alors l'affaissement, par rapport à celui que l'on observerait si le béton restait homogène.

Au chapitre 3.6, nous avons cité la faible sensibilité de l'essai au cône d'Abrams par rapport au essai au BT RHEOM pour les BHP. On peut le mettre en évidence en utilisant l'équation (4-2). Soit ε_{sl} et ε_{τ_0} les dispersions de slump et de seuil de cisaillement, pour un même groupe de n mesures expérimentales, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{sl}}{\varepsilon_s} &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SL - \overline{SL})^2}{(n-1)}}}{\overline{SL}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_0 - \overline{\tau_0})^2}{(n-1)}}}{\overline{\tau_0}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (30 - \frac{27\tau_0}{\rho} - 30 + \frac{27\overline{\tau_0}}{\rho})^2}{(n-1)}}}{30 - \frac{27\overline{\tau_0}}{\rho}} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_0 - \overline{\tau_0})^2}{(n-1)}}}{\overline{\tau_0}} \\ &= \frac{\frac{27\overline{\tau_0}}{\rho}}{30 - \frac{27\overline{\tau_0}}{\rho}} \\ &= \frac{30 - \overline{SL}}{\overline{SL}} \end{aligned} \quad (4-3)$$

\overline{SL} et $\overline{\tau_0}$ étant les valeurs moyennes de slump et de seuil. Pour les BHP, prenons un cas de 20 cm de slump moyen, la sensibilité de l'essai de slump n'est donc que la moitié de celle de l'essai au BT RHEOM. On peut trouver au §3.6 que les mesures d'essais de répétabilité conforment bien cette formule, à l'exception de la première série (réalisée avec un récipient d'un modèle préliminaire).

4.3) Phénomène de thixotropie

Nous avons mesuré le seuil au repos de quelques bétons. Cependant, s'inquiétant de la capacité du couple du moteur*, ce type de mesure est assez limité dans cette étude. Selon les résultats obtenus, le seuil au repos τ_{r0} est en général largement plus élevé que le seuil τ_0 mesuré en régime permanent (béton remanié). La valeur de τ_{r0} peut être plusieurs fois celle de τ_0 (voir tableau 4-3). Ceci explique pourquoi on se rend compte sur les chantiers que certains bétons sont terriblement "figés" en place quelque temps après le coulage, et que la difficulté de les régler est grande, alors que ces bétons étaient faciles à manipuler peu de temps avant. Par contre, une fois qu'on arrive à remanipuler ces bétons "figés", on constate souvent que ces bétons redeviennent faciles à travailler. Ce dernier phénomène peut être bien expliqué par la figure 2-3-(a).

	τ_0 (Pa)	τ_{r0} (Pa)
b46	361	1476
b49	309	1840
bx	1500	2960
	τ_{v0} (Pa)	τ_{vr0} (Pa)
b45	200	181

Tableau 4-3 : Comparaison du seuil au repos avec le seuil en régime permanent pour quelques bétons. Le seuil sous vibration τ_{v0} est défini au paragraphe 4.5.

En suivant le même protocole que celui utilisé pour mesurer le seuil au repos *sans* vibration, nous avons testé le seuil au repos *sous* vibration τ_{vr0} ** sur un béton. Nous observons que les deux seuils sous vibration (τ_{v0} et τ_{vr0}), présentés au tableau 4-3, sont peu différents. On pourrait en déduire que la vibration appliquée est efficace pour annuler temporairement la thixotropie de ce béton. Toutefois, davantage de résultats à ce sujet sont nécessaires pour généraliser cette conclusion.

Dans la pratique, un fort seuil au repos n'est pas toujours un inconvénient. Lors du coulage d'un élément en pente, si l'on décoffre peu temps après le coulage, le béton, subissant un cisaillement sous poids propre, doit avoir un seuil de cisaillement suffisamment élevé pour bien maintenir la surface. En l'occurrence, c'est le seuil au repos qu'on doit prendre en compte. Par conséquent, afin que le béton ne s'écoule pas, et que la surface du béton ne forme pas les vagues que l'on observe parfois sur chantier, la condition suivante est indispensable :

* La conception du BT RHEOM a prévu un couple maximal de travail de 13 N.m. A ce couple de résistance, le moteur peut travailler normalement pendant une durée de quelques dizaines de minutes, sans s'échauffer trop. Compte tenu d'un couple dépensé à vaincre le frottement du joint, supposé 1,5 N.m, le BT RHEOM peut alors mesurer un seuil au repos maximal de 3200 Pa environ (cf. équation (3-18)). Notons également que, le moteur peut aussi créer momentanément un couple de démarrage beaucoup plus élevé que le couple maximale de travail. Par contre, on risque de griller le moteur si cela dure longtemps.

** Remarquons que le "seuil au repos sous vibration" est en fait une dénomination critiquable, car le béton sous vibration n'est alors pas vraiment au repos. Néanmoins, nous gardons ici cette dénomination pour faciliter la comparaison avec le seuil au repos sans vibration.

$$\tau_{r0} S \geq \rho g S e \sin \theta \quad (4-4)$$

soit :

$$\tau_{r0} \geq \rho g e \sin \theta \quad (4-5)$$

où S est la surface du béton coulé, en m^2 , e l'épaisseur du béton, en m ; et θ l'angle de pente, en rad (voir figure 4-11).

L'équation (4-5) permet de définir la valeur nécessaire du seuil au repos du béton pour différentes pentes données. Par exemple, dans le cas de hourdis de pont de 20 cm d'épaisseur (valeur courante), prenons une pente de 2% (valeur usuelle pour écoulement de l'eau de pluie), et supposons que la masse volumique du béton est de 2400 kg/m^3 , on obtient ainsi :

$$\tau_{r0} \geq 2400 \times 9,8 \times 0,2 \times 0,02 = 94 \text{ Pa}$$

Un autre exemple, si l'on prend une pente de 6% (cas des viaducs d'accès du Pont de Normandie), on doit avoir :

$$\tau_{r0} \geq 2400 \times 9,8 \times 0,2 \times 0,06 = 282 \text{ Pa}$$

L'autre forme suivante de l'équation (4-5) permet de calculer l'angle maximal θ_{\max} de pente pour un béton donné :

$$\theta_{\max} \approx \frac{\tau_{r0}}{\rho g e} \quad (4-6)$$

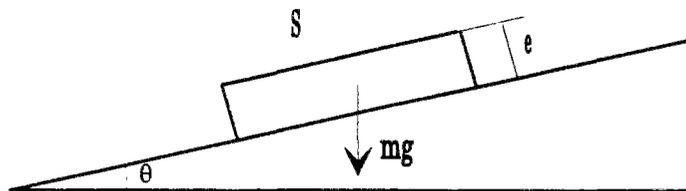


Figure 4-11 : béton coulé sur une pente

4.4) Evolution des caractéristiques rhéologiques en fonction du temps — liens entre béton et coulis

Il est important, voire même indispensable de connaître la durée pratique d'utilisation du béton sur chantier, pour des raisons telles que transport, mise en place difficile, etc. Cette connaissance peut être appréhendée facilement par un essai du suivi de l'évolution des caractéristiques rhéologiques au BT RHEOM. Les figures 3-21 et 3-22 ont montré les mesures principales d'un tel type d'essai. Selon les résultats des essais réalisés, nous avons quelques remarques générales à formuler :

- le processus de perte de maniabilité se traduit par une diminution de l'affaissement au cône, et par une augmentation corrélative du seuil de cisaillement. L'évolution du seuil en fonction du temps n'est pas toujours parfaitement linéaire. Cependant, comme BEAUPRE [23] l'a mentionné, la perte de maniabilité peut être exprimée par un taux moyen d'augmentation du pseudo-seuil en Nm/h. En unité fondamentale, ce taux serait en Pa/h ou Pa/min.

- dans la plupart des cas, la viscosité évolue peu pendant la durée des mesures. Ceci est par ailleurs mentionné par BEAUPRE [23] en terme de pseudo-viscosité.

La question qui va nous préoccuper ici est de voir dans quelle mesure ces phénomènes sont comparables sur béton, et sur une partie de ce dernier: le coulis (la phase la plus fine).

Dans le cadre des activités du groupe de travail de l'AFREM* "Connaissance et utilisation des BHP", sous-groupe "Formulation", on a comparé des essais du suivi sur coulis (*essai au cône de Marsh modifié***) avec ceux sur béton (essai au BT RHEOM) en vue d'observer si l'effet rhéologique du superplastifiant, en différentes doses et de différente nature, est qualitativement le même pour les deux types d'essai.

Depuis quelques années, on pratique beaucoup en France la *méthode de coulis*, proposée par DE LARRARD et PUCH [83,84], pour mettre au point la formulation des BHP du point de vue rhéologique. Cette méthode consiste à chercher l'optimisation de la fluidité du béton à travers le temps d'écoulement du coulis au cône de Marsh modifié, avec l'hypothèse que la fluidité du coulis est déterminante dans le béton. La proportion des constituants du coulis reste la même que celle de la pâte dans le béton. Un grand avantage de cette méthode est évidemment sa simplicité, ce qui permet d'alléger grandement le travail de formulation des BHP. Cependant, pour des bétons fortement adjuvés, le temps d'écoulement est parfois tellement court qu'il est difficile d'obtenir une bonne précision des mesures, en particulier quand on cherche la dose de saturation en adjuvant. D'ailleurs, il semble que l'évolution rhéologique des coulis ne reflète pas toujours ce qui se passe dans les bétons. Nous constatons en figure 4-12 que les temps d'écoulement des coulis mesurés n'évoluent guère avec le temps, voire même diminuent légèrement, ce qui est pourtant rarement le cas de la fluidité du béton. Les mesures réalisées au BT RHEOM sur les bétons relatifs à ces coulis sont présentées aux figures 4-13 et 4-14. La tendance de l'évolution des seuils est croissante. Par contre,

* Association Française de Recherche et d'Etudes sur les Matériaux et les constructions.

** Pour réaliser cet essai, on verse 1 litre du liquide dans un cône de Marsh dont la hauteur est de 290 mm, le diamètre de la section supérieure est de 155 mm, et la section inférieure fournit d'un ajutage variable, ce dernier permet de choisir un temps d'écoulement convenable pour un certain volume du liquide de référence. La mesure de cet essai est alors le *temps d'écoulement* d'un volume fixé de l'échantillon [83], qui est considéré comme l'indice de la fluidité du liquide.

l'évolution des viscosités ressemble beaucoup à celle du coulis. Nous verrons au §4.7 que l'utilisation de superplastifiant augmente souvent la viscosité du béton. Cet effet peut être remarquable pour des bétons fort adjuvés. Il est alors probable que, même tenant en compte d'autres facteurs telle que la consommation d'eau par le ciment*, la viscosité du béton diminue au fur et à mesure de la consommation de superplastifiant par le ciment. Le taux de diminution dépend alors la vitesse de consommation de superplastifiant, ce qui est relatif à la question de compatibilité ciment/adjuvant. Bien qu'il semble avoir une similitude entre l'évolution de temps d'écoulement du coulis et l'évolution de viscosité du béton, les mesures très peu nombreuses que nous avons eues ne permettent pas de la quantifier.

Vis-à-vis de ce problème, une autre méthode, dite *méthode de coulis adaptée*, a été proposée par le groupe de travail [85]. La modification essentielle est l'ajout dans le coulis de la partie fine du sable, dont la taille des grains est inférieure à 2 mm. Avec cette méthode, nous avons effectué des essais sur 7 coulis adjuvés dont tous les constituants, ainsi que leurs quantités, étaient identiques, sauf leurs superplastifiants. Ces derniers diffèrent, soit par leur dose, soit par leur nature. Les coulis 1 à 5 utilisaient le superplastifiant SP 1 (naphtalène) en différentes doses; les coulis 6 et 7 utilisaient respectivement les superplastifiants SP 2 (polyacrylate) et SP 3 (mélamine), en dose de saturation. Signalons que les doses de saturation des trois superplastifiants ont été déterminées avec la méthode de coulis par un laboratoire du groupe AFREM. Elles étaient respectivement 1,3% pour SP 1, 0,65% pour SP 2, et 1,2% pour SP 3 (le pourcentage doit se comprendre par rapport au ciment en poids d'extraits secs). Les bétons (b29 à b35) contenant les mêmes coulis ont été mesurés au BT RHEOM. Les compositions granulaires de tous ces bétons étaient également identiques. La seule différence entre ces bétons provenait alors du superplastifiant, comme dans les coulis.

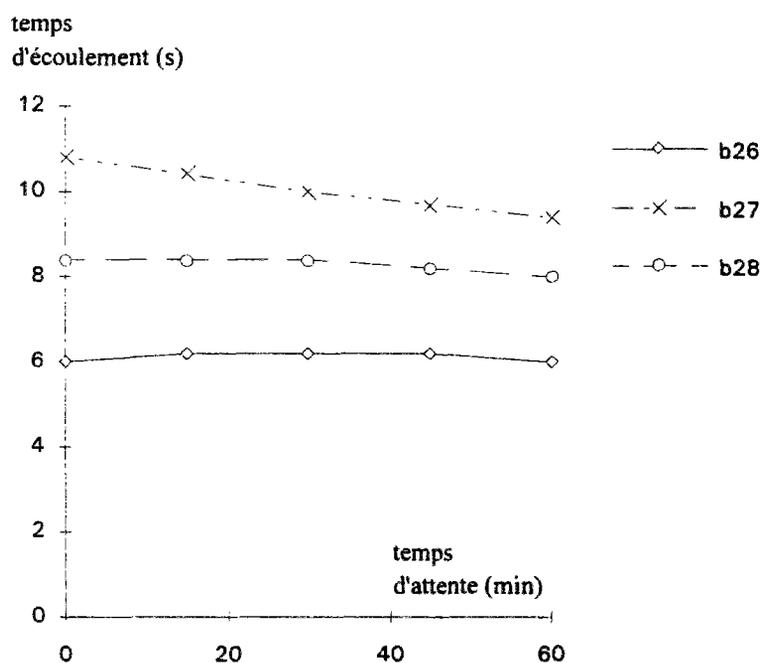


Figure 4-12 : Evolution des temps d'écoulement des coulis correspondant respectivement aux bétons b26, b27 et b28.

* On verra au §4.7 que la diminution d'eau conduit, en principe, à une augmentation de viscosité.

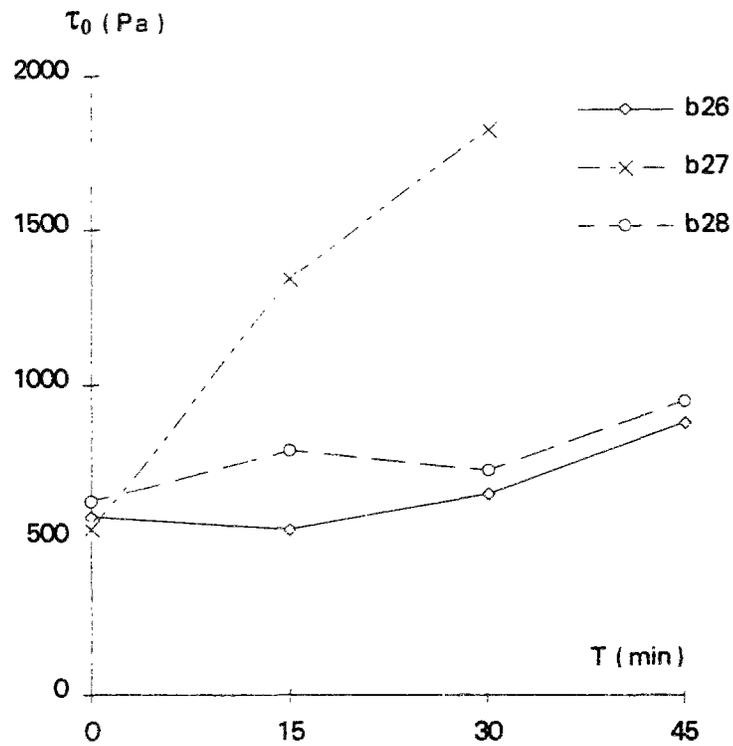


Figure 4-13 : Evolution des seuils des bétons b26, b27 et b28.

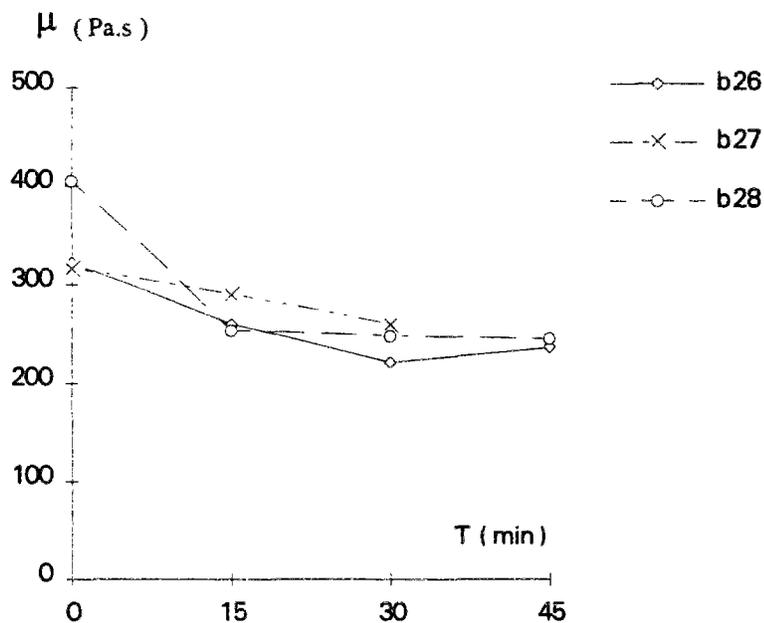


Figure 4-14 : Evolution des viscosités des bétons b26, b27 et b28.

Les mesures sur coulis sont présentées au tableau 4-4 et en figures 4-15 et 4-16. Nos résultats montrent que, pour le superplastifiant SP 1, à partir de la dose 1,1%, il n'y a plus de gain de la fluidité. On constate également que la fluidité du coulis diminue dans les cas de

surdosage. Nous pouvons identifier, en figure 4-16, que le classement d'efficacité des trois superplastifiants, sur coulis, est le suivant :

$$SP\ 3 > SP\ 1 > SP\ 2$$

Ce classement reste le même pendant 60 minutes. Cependant, si l'on regarde les *indices de l'évolution** des trois coulis, les coulis avec SP 1 et SP 2 évoluent plus rapidement que celui avec SP 3.

coulis	SP/C (%)	temps d'écoulement (s)				
		t ₀ +5'	t ₀ +15'	t ₀ +30'	t ₀ +45'	t ₀ +60'
coulis 1	0,9	39	61	60,9	74	93
coulis 2	1,1	27,3	34	46,5	51	62
coulis 3	1,3	28	38,5	46,4	56,7	65
coulis 4	1,5	30,4	38,4	47,8	54,1	66
coulis 5	1,7	30,3	44,3	53,7	73	74
coulis 6	0,65	29,6	40,4	49,3	61,3	68,3
coulis 7	1,2	28	30	33	36	38

Tableau 4-4 : Résultats obtenus pour les coulis.

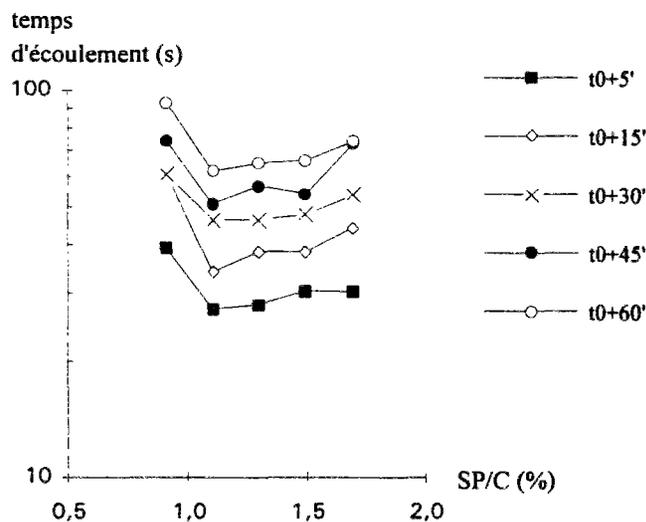


Figure 4-15 : Temps d'écoulement en fonction de dose en superplastifiant (pourcentage par rapport à ciment en extrait sec). Coulis 1 à 5 (avec SP 1).

* Défini comme $\frac{\partial \text{Log}(T)}{\partial t}$ [84], T et t étant respectivement le temps d'écoulement et le temps d'attente.

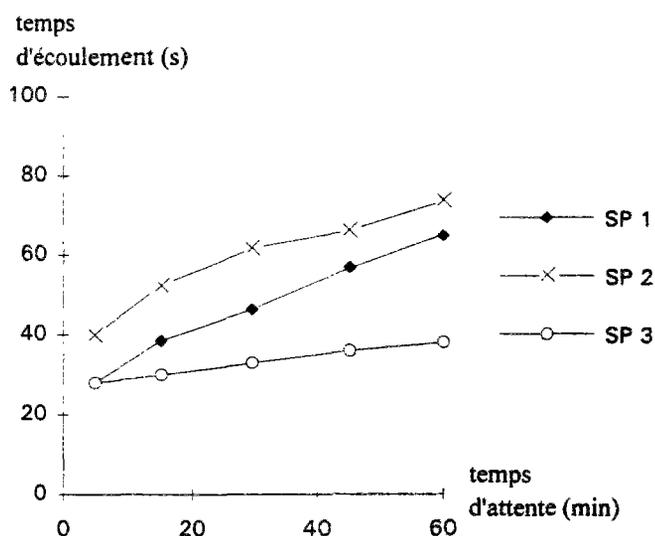


Figure 4-16 : Comparaison des coulis avec trois superplastifiants différents en dose de saturation.

Les mesures sur bétons sont données au tableau 4-5. Les bétons étaient pour la plupart très fluides. Une certaine ségrégation se présentait pendant l'essai au cône. Par contre, nous ne l'avons pas observée tellement pendant les essais au rhéomètre. Les mesures de slump en fonction du temps ont été effectuées toujours sur un même échantillon. Bien que les bétons aient été soigneusement protégés, on ne pouvait empêcher la perte d'humidité pendant le malaxage (durée d'une minute) avant chaque mesure et la perte de fines après chaque mesure. La fiabilité de ces mesures peut donc être mise en question.

Pour suivre l'évolution des caractéristiques rhéologiques, les essais au BT RHEOM ont été réalisés immédiatement après le malaxage du béton et à toutes les quinze minutes pendant une heure.

Les figures 4-17 et 4-18 montrent les évolutions des seuils et des viscosités pour des bétons concernant la recherche de la dose de saturation en superplastifiant. Selon la figure 4-17, les courbes relatives aux bétons b31, b32 et b33 sont pratiquement confondues. En ce qui concerne la viscosité, nous voyons en figure 4-18 que les b31 et b32 sont meilleurs que les autres. Par conséquent, nous pouvons dire que, la dose de saturation en superplastifiant SP 1 trouvée sur coulis (1,3% de SP/C) correspond à celle trouvée sur béton.

Les figures 4-19 et 4-20 comparent l'efficacité des trois superplastifiants du point de vue des caractéristiques binghamiennes. Les évolutions des viscosités sont toutes lentes pour trois bétons (respectivement 0,4; 0,6; et 0,4 Pa.s/min de taux d'augmentation en moyenne). Nous pouvons voir que le classement d'efficacité des superplastifiants, du point de vue de viscosité, est bien net :

$$SP\ 1 > SP\ 3 > SP\ 2$$

béton	SP/C (%)	temps d'attente (min)	τ_0 (Pa)	μ (Pa.s)	coefficient de corrélation	slump (cm)
b29	0,9	0	1498	146	1,00	18
		15	2067	170	1,00	6
b30	1,1	0	502	138	1,00	27
		15	611	141	1,00	21,5
		45	735	140	1,00	-
		60	871	138	1,00	13,5
b31	1,3	0	176	110	1,00	28
		15	214	124	1,00	-
		45	303	124	1,00	21,5
		60	373	135	1,00	16,5
b32	1,5	0	162	113	1,00	27,5
		15	141	128	1,00	26,5
		45	248	129	1,00	23
		60	313	136	1,00	-
b33	1,7	0	173	138	1,00	26,5
		15	212	150	1,00	-
		45	310	156	1,00	25
		60	332	162	1,00	24
b34	0,65	0	181	172	1,00	28
		15	206	197	1,00	28
		45	201	198	1,00	-
		60	212	209	1,00	26,5
b35	1,2	0	51	140	1,00	28
		15	49	167	1,00	27,5
		45	171	166	1,00	-
		60	276	158	1,00	22,5

Tableau 4-5 : Mesures sur les bétons.

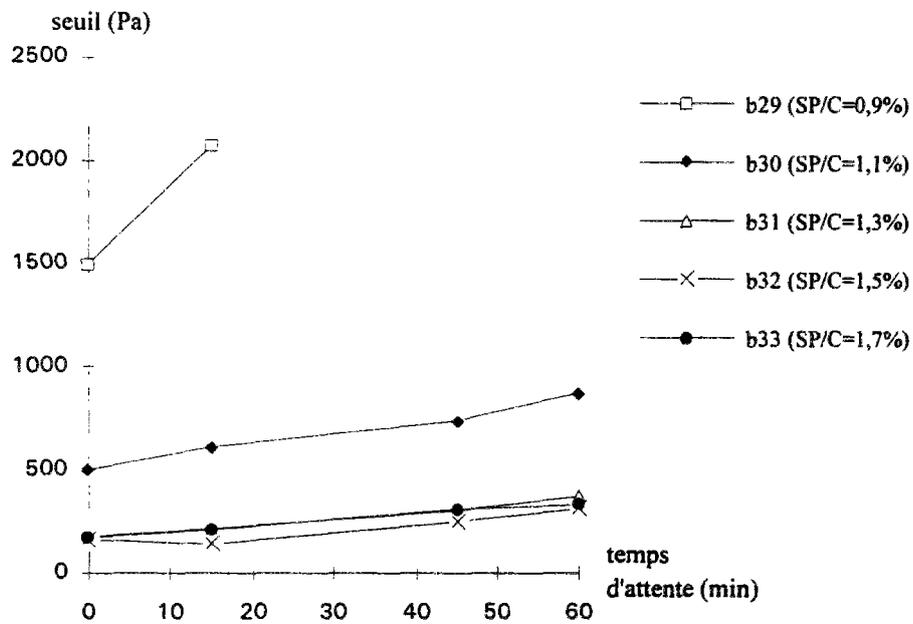


Figure 4-17 : Evolution des seuils en fonction du temps pour bétons b29 à b33.

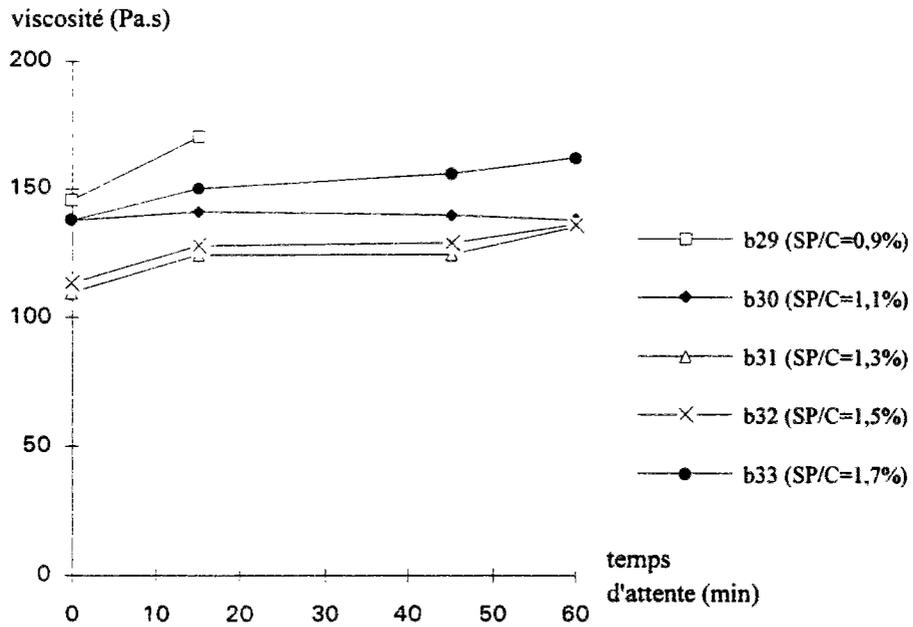


Figure 4-18 : Evolution des viscosité en fonction du temps pour bétons b29 à b33.

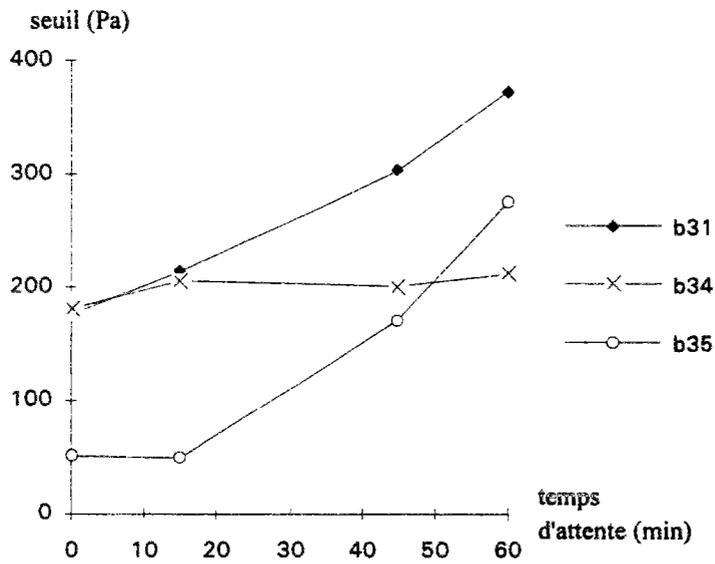


Figure 4-19 : Evolution des seuils en fonction du temps pour bétons b31, b34 et b35.

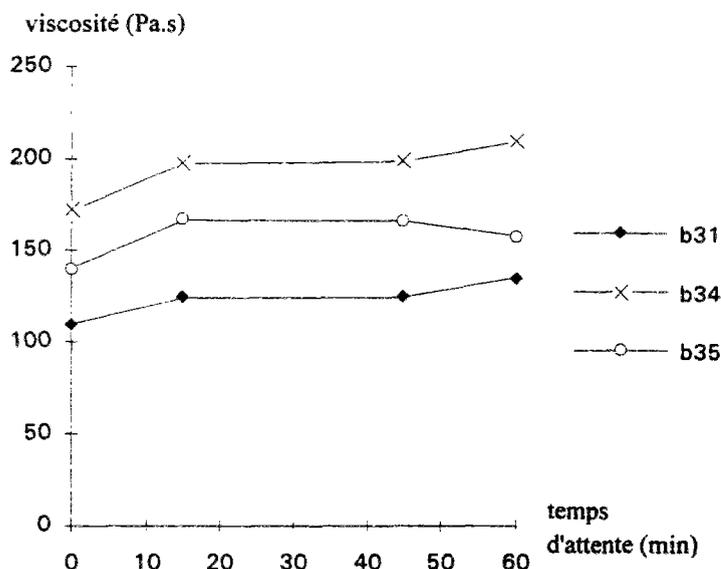


Figure 4-20 : Evolution des viscosités en fonction du temps pour bétons b31, b34 et b35.

Par contre, il est un peu moins évident quand on regarde l'évolution des seuils. Le seuil du béton b34 n'évolue pratiquement pas (0,5 Pa/min en moyenne); celui du b31 augmente à un taux de 3,3 Pa/min environ; quant à celui du b35, il ne bouge pas pendant le premier quart d'heure, puis évolue relativement vite (5 Pa/min environ). Du point de vue de seuil, on a globalement (au moins pour les trois premiers quarts d'heure) le classement des superplastifiants comme le suivant :

$$SP\ 3 > SP\ 2 > SP\ 1$$

Il paraît alors difficile à donner une évaluation simple de l'efficacité du superplastifiant sur le béton, en tenant compte à la fois de son influence sur le seuil et sur la viscosité. Cependant, la considération peut se baser sur une combinaison de ces deux caractéristiques. Nous savons que la contrainte nécessaire pour réaliser et conserver un écoulement du béton dépend du gradient de vitesse de l'écoulement. Dans le cas des matériaux de Bingham, la contrainte est d'une combinaison de seuil, de viscosité et de gradient de vitesse :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (4-7)$$

Si l'écoulement du béton est lent, comme dans l'essai au cône d'Abrams, la partie due au seuil est prédominante dans la contrainte supportée par le béton; on peut donc juger la fluidité du béton par son seuil. Par contre, dans le cas où l'écoulement est rapide, comme le pompage, la partie de contrainte liée à la viscosité est essentielle*; le critère de jugement doit alors être la viscosité. Dans les cas intermédiaires, les deux constantes de Bingham peuvent être autant importantes.

Pour les coulis utilisés, la concentration en solide était autour de 0,75. Il paraît plus raisonnable de considérer ces coulis comme des fluides binghamiens que newtoniens.

* Nous discuterons plus en détail le problème de pompage au §5.1.

Cependant, il est difficile de calculer le gradient de vitesse dans le coulis pour l'essai au cône de Marsh, car il s'agit d'un écoulement en régime transitoire. Par ailleurs, l'estimation précise de l'écoulement correspondant au béton est une question difficile. Simplement à titre d'exemple, nous montrons que, en prenant un gradient de vitesse de $2,5 \text{ s}^{-1}$ pour les calculs de contrainte dans différents bétons à différents temps, nous pouvons obtenir les évolutions des contraintes ressemblant aux évolutions de temps d'écoulement des coulis (voir figures 4-16 et 4-21). Nous y retrouvons alors le même classement d'efficacité des superplastifiants sur coulis et sur bétons: $\text{SP 3} > \text{SP 1} > \text{SP 2}$.

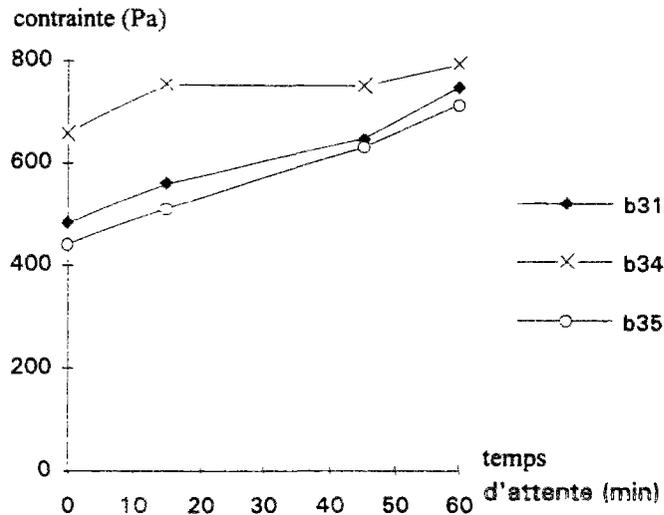


Figure 4-21 : Evolutions des contraintes des bétons au gradient de vitesse $2,5 \text{ s}^{-1}$.

Les essais du suivi de l'évolution des constantes binghamiennes présentés ci-dessus montrent une nouvelle façon d'apprécier l'évolution du béton, ainsi qu'une nouvelle méthode d'évaluer le béton selon les types d'utilisation envisagés, tout en distinguant l'effet différent du seuil et de la viscosité.

4.5) Influence de la vibration sur le comportement rhéologique

Les résultats obtenus indiquent que le comportement des bétons sous vibration est également binghamien dans la gamme de gradient de vitesse étudiée (généralement comprise entre 1,5 et 6 s⁻¹). Par ailleurs, la limite de validité de cette conclusion semble être encore plus loin du côté des bétons plastiques (slumps compris entre 5 et 10 cm) que celle relative au comportement des bétons sans vibration. La figure 4-22 montre que les deux bétons b17 et b43, dont l'affaissement au cône d'Abrams sont respectivement 6,5 et 7 cm, sont conformes au modèle de Bingham. Cependant, le peu de résultats disponibles sur des bétons plastiques ne nous a pas encore permis d'en tirer un critère général.

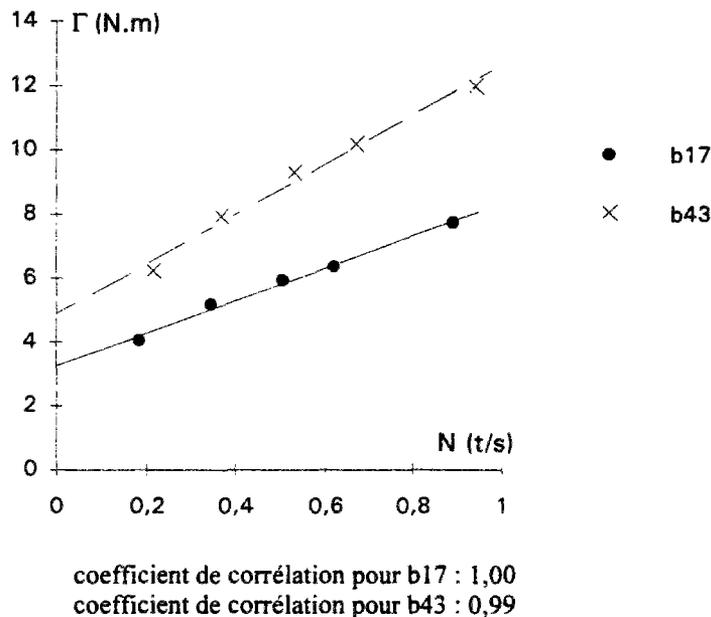


Figure 4-22 : Relation couple-vitesse sous vibration (50 Hz, 4 g) pour bétons b17 et b43.

Quant au comportement du béton vibré aux faibles gradients de vitesse, en raison de difficultés techniques (comme celles rencontrées dans l'étude du comportement sans vibration), nous n'avons pas beaucoup de mesures à ce sujet. Selon les études de TATTERSALL et BAKER [49,87], le pseudo-seuil du béton est supprimé par la vibration. Toutefois, des recherches supplémentaires sont encore nécessaires afin d'éclaircir cette question.

Admettant que le comportement des bétons sous vibration reste binghamien (ce qui n'est pas contradictoire avec nos mesures), nous pouvons caractériser le comportement des bétons sous vibration avec les deux constantes suivantes: le seuil de cisaillement sous vibration (τ_{0v}) et la viscosité plastique sous vibration (μ_v). Quand on utilisera des outils numériques pour modéliser des problèmes d'écoulement du béton sous vibration, tel que celui proposé par MORI et TANIGAWA [86], ce sont ces caractéristiques que l'on devra prendre en compte dans le calcul. Les mesures de ces deux caractéristiques sont présentées au tableau 4-1. La vibration utilisée avait une fréquence de 50 Hz et une accélération de 4 g.

Les figures 4-23 et 4-24 donnent les comparaisons des seuils et des viscosités sous et sans vibration. On peut constater que la vibration a notamment pour effet de diminuer le seuil de cisaillement des bétons. Ceci provient probablement du fait que, la vibration met les grains en mouvements apparemment désordonnés et alternatifs, ce qui diminue le frottement intergranulaire [1,46]. En ce qui concerne les valeurs de viscosité plastique, nous trouvons qu'elles sont souvent légèrement augmentées sous vibration, notamment quand elles sont faibles. Néanmoins, l'influence de la vibration sur la viscosité reste en général assez limitée. Cela traduit le fait que la vibration influence la viscosité surtout aux faibles gradients de vitesse.

Selon les résultats expérimentaux obtenus dans cette recherche, il existe de bonnes corrélations entre les caractéristiques sans et avec vibration. Les coefficients de corrélation sont respectivement 0,90 entre τ_0 et τ_{0v} , et 0,86 entre μ et μ_v . Avec la *méthode des moindres déviations absolue**, nous avons trouvé les deux équations suivantes :

$$\tau_{0v} = 0,52 \tau_0 \quad (4-8)$$

$$\mu_v = 0,62 \mu + 80 \quad (Pa.s) \quad (4-9)$$

A défaut de mesures directes, ces deux équations devraient permettre d'estimer les caractéristiques sous vibration à partir de celles sans vibration.

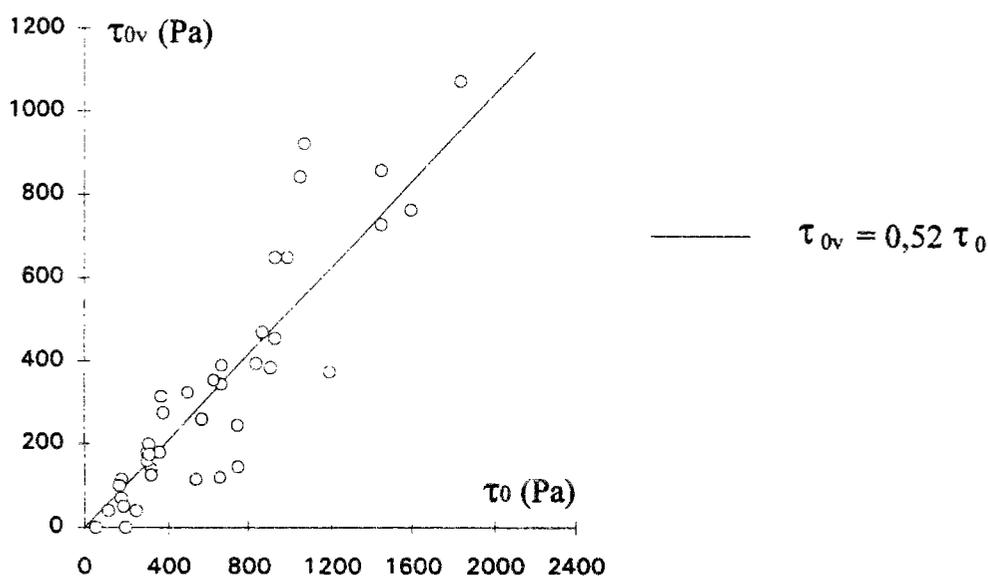


Figure 4-23 : Comparaison des seuils sans vibration et sous vibration. 39 mesures.

* Cette méthode consiste à ajuster une équation en cherchant la somme minimale des déviations absolues de

toutes les données $\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|$.

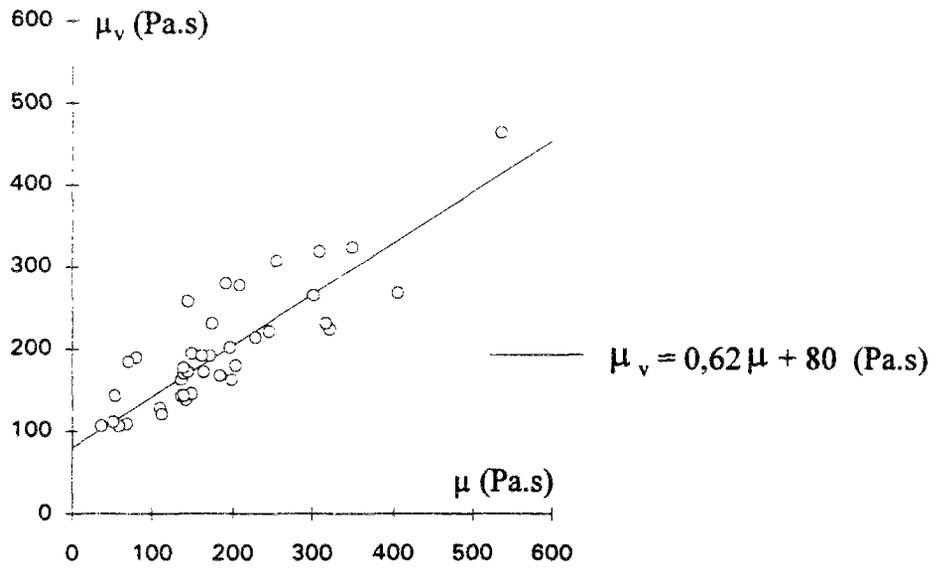


Figure 4-24 : Comparaison des viscosités sans vibration et sous vibration. 39 mesures.

4.6) Dilatance

Des mesures de dilatance sont présentées au tableau 4-6. Dans la plus part des cas, les valeurs de dilatance obtenues sont assez modérées. Cependant, la valeur maximale atteint quand même 10%; ceci pourrait poser des problèmes dans certains cas tel que l'écoulement du béton dans une conduite pendant le pompage. Les résultats obtenus sont apparemment assez dispersés, et nous n'avons trouvé aucun paramètre qui domine de façon évidente le phénomène. Néanmoins, nous pouvons en tirer quelques remarques suivantes :

- il n'y a pas de relation directe entre la dilatance et les constantes binghamiennes;
- la dilatance est faible dans des bétons ordinaires;
- la dilatance se manifeste plus remarquablement dans des bétons dont la taille des gros grains est relativement grande (par exemple, supérieure à 15 mm);
- la forme géométrique des gravillons est un facteur non négligeable, la dilatance est souvent plus marquée dans des bétons avec des gravillons concassés que dans ceux avec des gravillons roulés;
- la formulation du béton peut avoir un effet très important. Selon les résultats obtenus, nous avons constaté que l'augmentation du volume de la partie fine (particules de taille inférieure à 400 μm) est un moyen efficace pour limiter la dilatance (cf. figure 4-25). Ceci laisse imaginer que la dilatance des petites particules est masquée par celle des grandes particules [88]. S'il y a suffisamment de fines pour séparer les gros grains les uns des autres, l'enchevêtrement de ces derniers en cours d'écoulement sera évité ou restera négligeable. Dans ce cas, la dilatance du béton n'apparaît pas.

Enfin, bien que nous ayons obtenu quelques mesures de dilatance des bétons, ce phénomène est encore mal connu. Plus de recherches à ce sujet sont nécessaires, surtout si l'incidence de la dilatance sur la pompabilité est vérifiée par l'expérience.

béton	b2	b4	b18	b19	b20	b21	b22	b24	b25
dilatance	0,005	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,100	0,011	0,011
béton	b29	b30	b31	b32	b33	b34	b35	b36	b37
dilatance	0,015	0,000	0,025	0,010	0,009	0,000	0,010	0,003	0,004
béton	b38	b41	b42	b44	b45	b46	b47	b48	b49
dilatance	0,010	0,054	0,087	0,080	0,021	0,023	0,037	0,014	0,000

Tableau 4-6 : Dilatances de certains bétons mesurées au BT RHEOM.

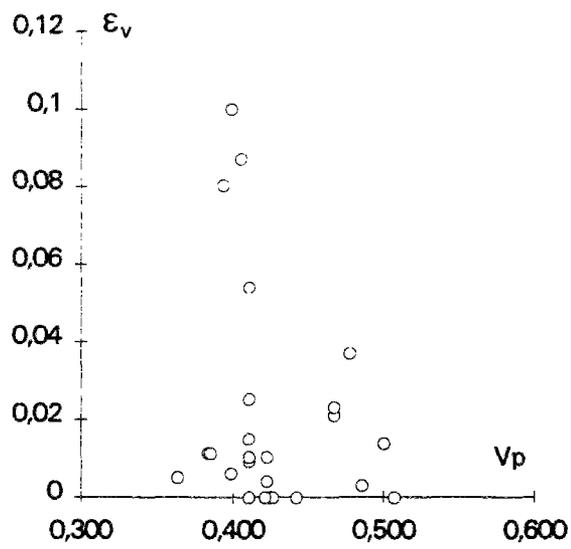


Figure 4-25 : Dilatance (ϵ_v) en fonction de volume partiel (V_p) de pâte (taille maximale des particules inférieure à $400 \mu m$).

4.7) Influence des paramètres de composition sur le comportement rhéologique

4.7.1) Etudes qualitatives

Il est connu depuis longtemps que, du point de vue rhéologique, l'eau est l'un des constituants les plus importants du béton. La figure 4-26 donne un exemple des variations des caractéristiques rhéologiques des bétons en fonction du dosage en eau (tous autres paramètres identiques, et notamment le rapport SP/C*). On peut constater qu'au fur et à mesure de l'augmentation du dosage en eau, l'affaissement au cône s'accroît, le seuil et la viscosité décroissent. Cependant, une dose excessive conduit à une ségrégation du béton.

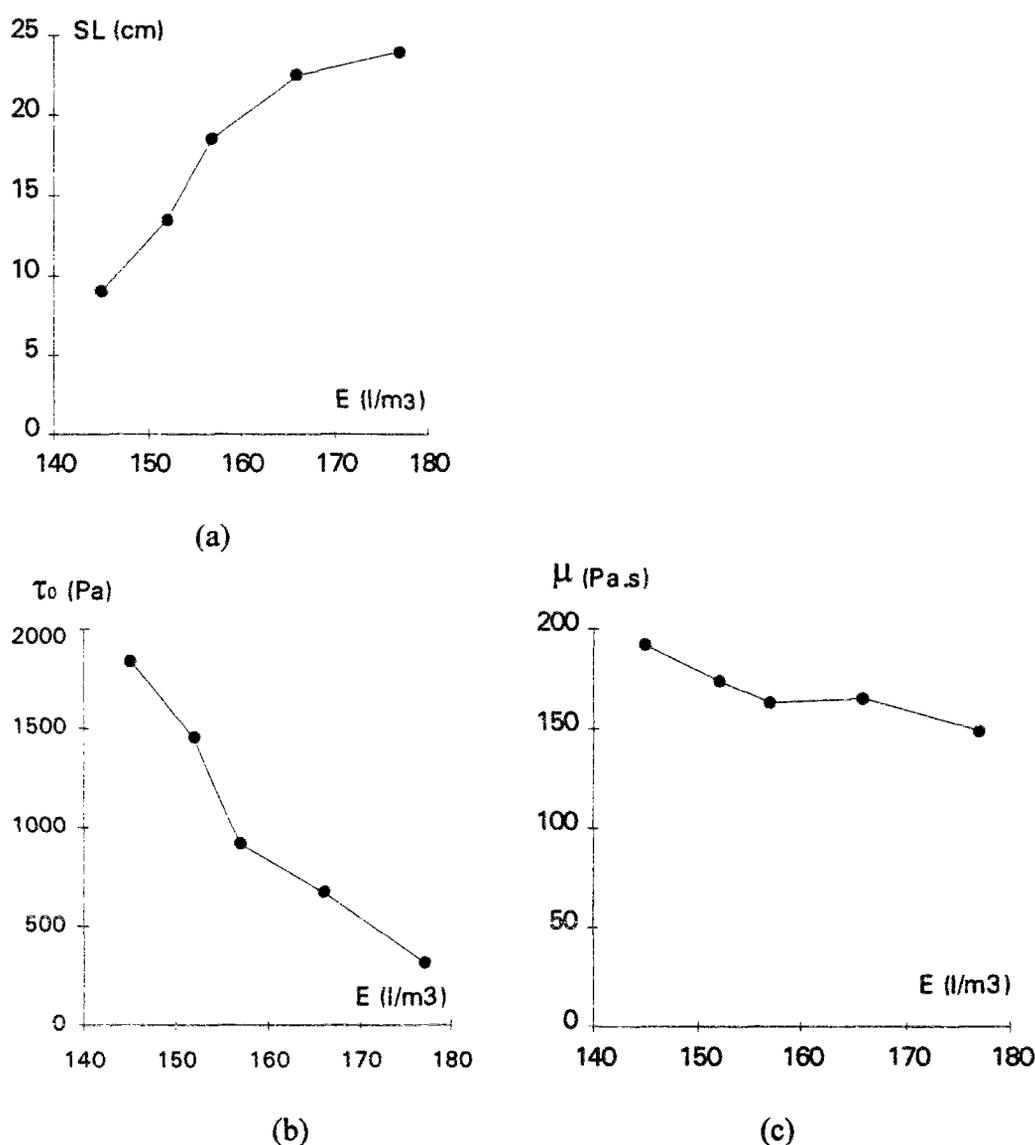


Figure 4-26 : Mesures rhéologiques en fonction du dosage en eau. Bétons b4, b39, b40, b41 et b42.

* En fait, tous les autres paramètres ne peuvent qu'être à peu près identiques, compte tenu de la condition que la somme des volumes partiels de tous les constituants dans un béton frais, y compris l'air occlus, est égale à 1.

Un autre constituant important est sans doute l'adjuvant. On sait, dans la formulation des BHP, que l'usage du superplastifiant permet de réduire le dosage en eau, tout en gardant un affaissement au cône constant. Par contre, à quantité d'eau constante (cf. figure 4-27), nous voyons que le seuil diminue quand la quantité de superplastifiant utilisée augmente, phénomène observé par BANFILL [52] sur les mortiers.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent également que l'augmentation du dosage en superplastifiant est souvent accompagnée par l'augmentation de la viscosité du béton (cf. figure 4-27). Il apparaît que, dans un béton fortement adjuvanté, une partie importante de superplastifiant reste en solution au lieu d'être adsorbée par les grains [89]. Cette partie de superplastifiant augmente alors la viscosité de la solution, et ainsi celle du béton. Néanmoins, d'un point de vue pratique, il y a intérêt à surdoser légèrement le superplastifiant, afin de disposer d'une "réserve" qui empêchera la perte rapide d'ouvrabilité du béton.

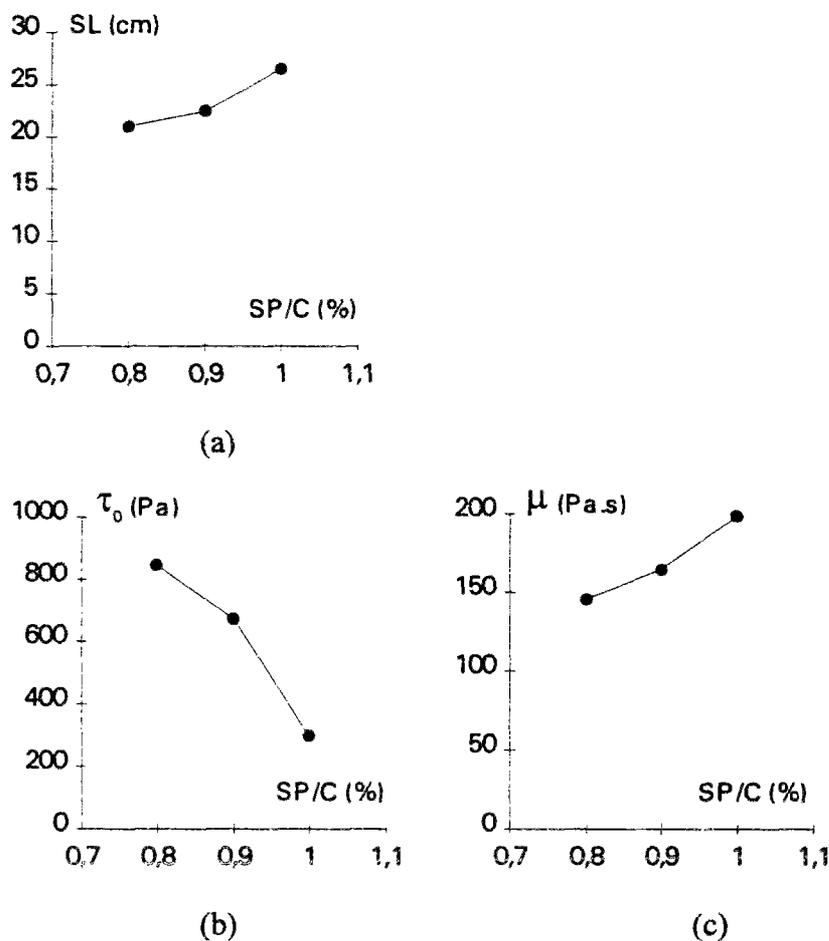
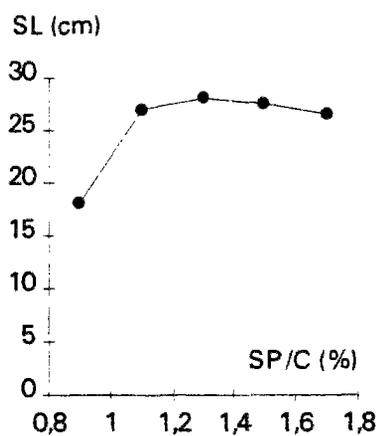
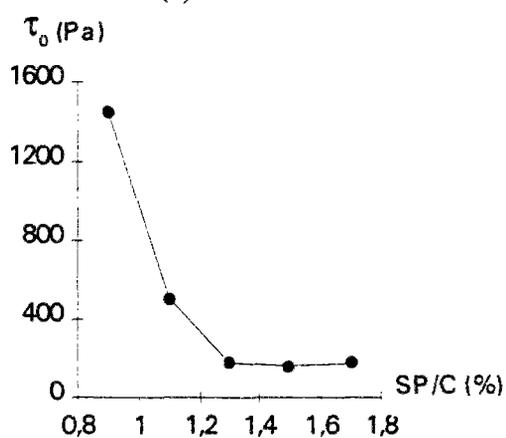


Figure 4-27 : Mesures rhéologiques en fonction du dosage en superplastifiant (tous autres paramètres identiques, et notamment l'eau totale). Bétons b4, b37 et b38.

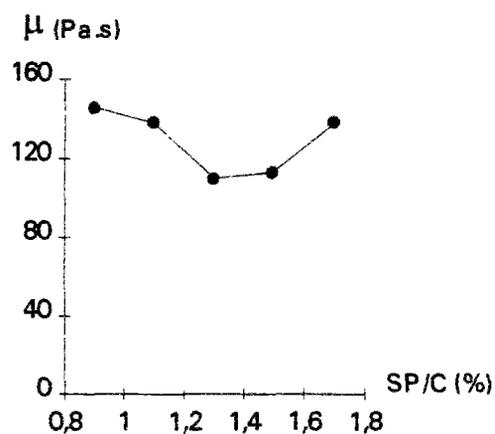
Cependant, en restant dans la plage de faible dosage, il semble que le superplastifiant peut ne pas affecter beaucoup la viscosité, et parfois même la diminuer pour un incrément positif de dosage (cf. figure 4-28).



(a)



(b)



(c)

Figure 4-28 : Mesures rhéologiques en fonction du dosage en superplastifiant (tous autres paramètres identiques). Bétons b29 à b33.

Le peu de mesures disponibles sur l'influence de la fumée de silice confirme les résultats de WALLEVIK et GJØRV [62] et de BEAUPRE [23]: une dose modérée en fumée de silice diminue la viscosité du béton. On observe en figure 4-29 que cette diminution est considérable, en particulier pour des bétons fortement adjuvantés. Ceci traduit le fait que les particules de la fumée de silice, étant très petites devant celle du ciment, remplissent en partie les interstices entre les particules de ciment et lubrifient ainsi ces dernières pendant l'écoulement. L'effet global est donc la diminution de la viscosité du béton. Ceci explique également que les bétons b10 et b13, de différents dosages en fumée de silice (respectivement 45 et 60 kg/m³), mais ayant le même rapport sur ciment (F.S./C=10%), ont à peu près les mêmes viscosités (respectivement 82 et 71 Pa.s, cf. tableau 4-1). C'est la raison pour laquelle on exprime, en figure 4-29, le dosage en fumée de silice par le rapport fumée de silice sur ciment.

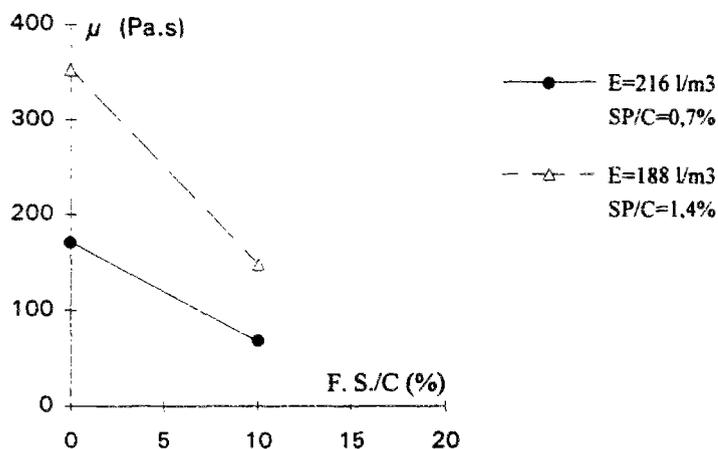


Figure 4-29 : Mesures rhéologiques en fonction du dosage en fumée de silice. Bétons b4, b37 et b38.

Quant à l'effet de la fumée de silice sur le seuil du béton, les résultats obtenus sont assez dispersés, n'indiquant donc pas une tendance évidente.

Jusqu'ici, on a montré qualitativement l'influence de quelques paramètres de composition sur les caractéristiques rhéologiques du béton. Sauf l'eau, on s'est intéressé notamment aux deux paramètres particuliers pour les BHP: superplastifiant et fumée de silice. Les figures présentées nous permettent alors d'avoir quelques idées intuitives des rôles de ces constituants, avant de nous plonger dans des modèles de prédiction plus compliqués, et, le cas échéant, d'orienter la formulation du béton dans le bon sens.

4.7.2) Modèle quantitatif pour estimer la viscosité des BHP — modèle de Farris adapté

Nous avons présenté au §2.4.3 le modèle de Hobbs et le modèle de Kikukawa-Murata pour estimer la viscosité plastique du béton. Le premier nécessite la connaissance de la viscosité de la pâte. On ne peut donc l'appliquer directement ici. Le deuxième, qui paraît sortir du modèle de Farris (que nous présenterons ci-après), n'a pas donné des résultats satisfaisants pour nos bétons. Ceci provient probablement, d'une part, de la sensibilité des constantes "K" aux matériaux, d'autre part, du fait que ce modèle n'a pas bien pris en compte l'influence de superplastifiant.

FARRIS [90] a développé une théorie pour l'estimation de la viscosité de suspensions de sphères multimodales dans un liquide newtonien. L'idée est de considérer que les petites sphères se comportent comme un liquide devant les grosses sphères, si le rapport de leurs rayons (petit sur grand) est suffisamment faible, (par exemple, inférieur à 0,01). Ceci permet de découpler une suspension multimodale et de calculer une par une des suspensions unimodales découplées.

Selon les résultats expérimentales, on constate que la viscosité d'une suspension de sphères unimodale ne dépend que de la viscosité μ_0 du liquide et de la concentration volumique en solide ϕ , soit :

$$\mu = \mu_0 H(\phi) \quad (4-10)$$

avec la définition suivante :

$$\phi = \frac{V_s}{V_0 + V_s} \quad (4-11)$$

où H est d'une fonction croissante de ϕ , V_0 et V_s les volumes partiels de liquide et de solide.

Dans une suspension de sphères bimodales, dont les tailles des deux classes sont suffisamment éloignées l'une de l'autre, avec l'hypothèse évoquée (les petites sphères se comportent comme un liquide devant les grosses), on peut calculer la viscosité de la suspension par l'équation suivante :

$$\mu = \mu_1 H(\phi_2) = \mu_0 H(\phi_1) H(\phi_2) \quad (4-12)$$

où ϕ_1 et ϕ_2 sont respectivement les concentrations volumiques en solide de suspension 1 découplée: liquide 1 (vrai liquide) + petites sphères, et de suspension 2 découplée: liquide 2 (suspension 1) + grosses sphères, lesquelles s'expriment sous les formes suivantes :

$$\phi_1 = \frac{V_1}{V_0 + V_1} \quad (4-13)$$

$$\phi_2 = \frac{V_2}{(V_0 + V_1) + V_2} \quad (4-14)$$

V_0 , V_1 et V_2 étant les volumes partiels de liquide, de petites sphères et de grosses sphères.

En généralisant cette considération à une suspension de sphères multimodales de n classes, on peut obtenir l'équation suivante pour estimer la viscosité de cette suspension :

$$\mu = \mu_0 \prod_{i=1}^n H(\phi_i) \quad (4-15)$$

avec la définition suivante de la concentration volumique en solide ϕ_i de chaque suspension découplée :

$$\phi_i = \frac{V_i}{\sum_{j=0}^i V_j} \quad (4-16)$$

V_i étant le volume partiel de constituant i , et V_0 le volume partiel de liquide.

Il ne reste alors qu'à trouver la fonction $H(\phi)$. FARRIS a montré que, à faible concentration en solide, la fonction H a la forme suivante :

$$H(\phi) = (1 - \phi_i)^{-k} \quad (4-17)$$

et l'équation (4-15) devient :

$$\mu = \mu_0 (1 - \phi_T)^{-k} \quad (4-18)$$

k étant une constante positive, et ϕ_T la concentration volumique en solide totale dans la suspension. Selon les résultats expérimentaux rapportés par FARRIS [90], montrés en figure 4-30, on constate que, pour des suspensions de concentration volumique en solide inférieure à 0,2, $k = 2,5$ permet d'obtenir la meilleure concordance entre les valeurs expérimentales et celles prédites par (4-18). Ceci est d'ailleurs cohérent avec l'équation suivante, due à Einstein, pour des suspensions unimodales de sphères diluées :

$$\mu = \mu_0 (1 + 2,5\phi_T) \quad (4-19)$$

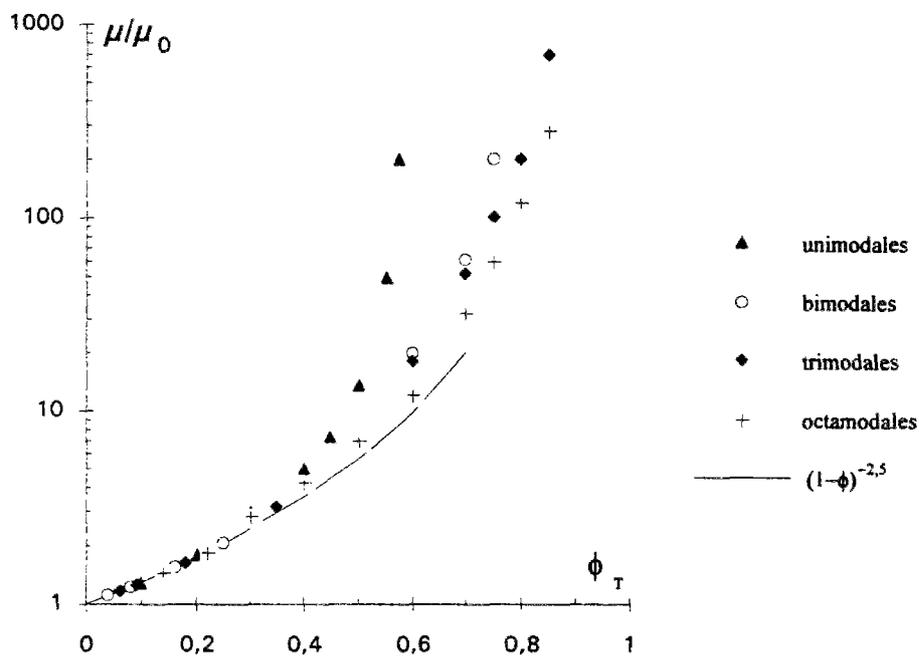


Figure 4-30 : Résultats expérimentaux [90] des suspensions unimodales, bimodales, trimodales et octamodales, ainsi qu'une courbe de lissage.

En figure 4-30, on voit également que, quand la concentration en solide d'une suspension approche une certaine valeur, la viscosité de suspension devient très élevée et tend vers l'infini. Cette valeur de concentration est en fait la compacité maximale du mélange. Il est bien connu que, pour un mélange de sphères unimodales, cette compacité peut atteindre 0,74 dans le cas d'arrangement hexagonal, mais seulement 0,64 dans le cas d'un empilement

aléatoire [91]. Il y a alors intérêt à prendre en compte cet effet. Nommons α la compacité maximale du mélange et écrivons la fonction H sous la forme suivante :

$$H(\phi) = \left(1 - \frac{\phi_T}{\alpha}\right)^{-k\alpha} \quad (4-20)$$

Dans les suspensions de sphères unimodales présentées en figure 4-31, il apparaît que la valeur de α des suspensions utilisées est plutôt 0,60. En gardant la constante $k = 2,5$, on trouve que l'équation (4-20) lisse bien les mesures expérimentales (cf. figure 4-31).

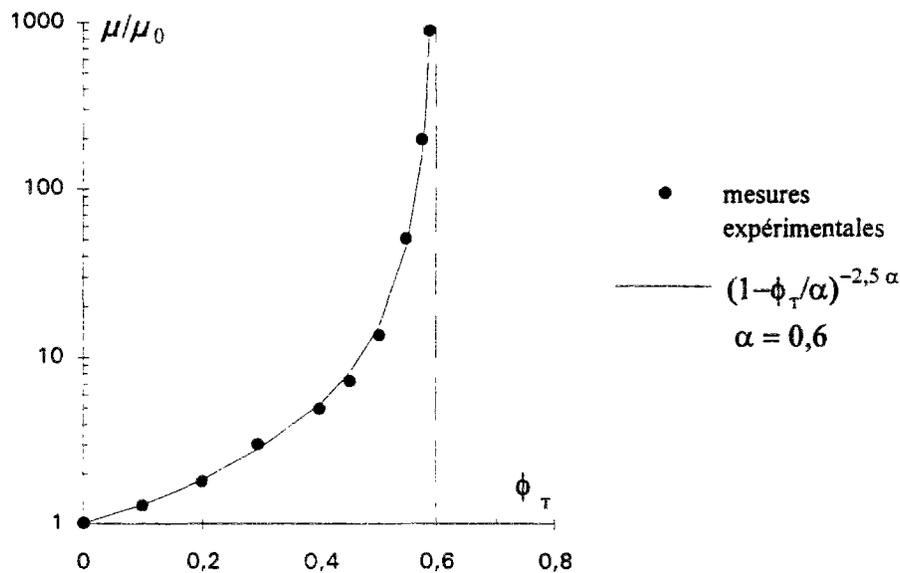


Figure 4-31 : Résultats expérimentaux [90] des suspensions unimodales et leur courbe de lissage.

Dans le cas du béton, les tailles des constituants de la phase solide s'étendent continûment de quelques microns à quelques centimètres. Donc, strictement, l'hypothèse selon laquelle les tailles de chaque classe sont très différentes les unes des autres ne peut être satisfaite. Néanmoins, on peut concentrer les tailles des principaux constituants (granulat, ciment, et éventuellement fumée de silice) chacune à leur valeur moyenne. Les rapports de taille moyenne des classes inférieures sur celles des classes supérieures sont en général inférieurs à 0,1. Pour fixer les idées, on donne les ordres de grandeurs suivants des tailles moyennes des trois constituants principaux: quelques millimètres pour les granulats; une dizaine de microns pour le ciment (y compris le filler); et 0,2 micron pour la fumée de silice. Par conséquent, nous pouvons considérer un béton fluide comme une suspension bimodale (sans fumée de silice) ou trimodale (avec fumée de silice), et appliquer ainsi la théorie de Farris à l'estimation de sa viscosité.

Par ailleurs, comme on l'a vu, le béton frais n'est pas un matériau newtonien, mais plutôt, avec des restrictions déjà présentées, un corps de Bingham. Admettant que le seuil de cisaillement est la manifestation macroscopique du frottement entre particules, alors que la

viscosité plastique traduit la dissipation visqueuse de l'eau dans la porosité des grains, on assimilera la viscosité prédite par le modèle de Farris à une viscosité *plastique* au sens de Bingham.

Le modèle de Farris a été fait pour des suspensions de sphères. Cependant, les particules des matériaux de génie civil sont plus ou moins concassées, ce qui conduit certainement à une viscosité plus élevée dans les cas de concentrations en solide élevées. Nous pensons que ceci peut être traduit par la prise d'une valeur plus élevée pour la constante k. Pour la fumée de silice (s'il y en a), étant donné que le dosage courant de cette dernière est toujours suffisamment faible pour que sa concentration volumique (dans la suspension découplée) ne dépasse jamais 0,2, nous gardons donc $k = 2,5$. Quant aux classes de ciment et de granulat, nous ajusterons la valeur de la constante k pour elles. L'équation pour estimer la viscosité du béton peut alors être écrite sous la forme suivante :

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\phi_F}{\alpha_F}\right)^{-2,5\alpha_F} \left(1 - \frac{\phi_C}{\alpha_C}\right)^{-k\alpha_C} \left(1 - \frac{\phi_G}{\alpha_G}\right)^{-k\alpha_G} \quad (4-21)$$

où ϕ_F , ϕ_C , et ϕ_G sont respectivement les concentrations volumiques en solide des suspensions découplées des classes de fumée de silice, de ciment et de granulat, α_F , α_C et α_G respectivement leurs compacités maximales (arrangement aléatoire). La compacité des différentes classes peut être estimée par le modèle de Caquot adapté aux particules concassées [92,93] :

$$\alpha = 1 - 0,45 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,19} \quad (4-22)$$

où d et D représentent les tailles de tamis correspondant respectivement à 10% et à 90% de passant. Plus récemment, SEDRAN et DE LARRARD [94] ont développé le logiciel René-LCPC, lequel se base sur le *modèle de suspension solide*, proposé par les mêmes auteurs [89,95]. Avec ce logiciel, on aura la possibilité d'estimer de façon plus précise la compacité maximale d'un mélange. Cependant, ce calcul exige plus d'information sur le matériaux que celui avec l'équation (4-22).

Contrairement à ce qu'on attendait, on n'a pas pu trouver une valeur adéquate pour k qui permette à l'équation (4-21) de prédire des valeurs assez correctes par rapport à l'expérience. Par ailleurs, on peut remarquer que la forme de cette équation n'est pas très différente de celle de Kikukawa-Murata. Le problème réside en fait dans le rôle particulier du superplastifiant dans les BHP. On sait que le superplastifiant disperse les particules de ciment, ce qui conduit à une demande en eau plus faible pour avoir une pâte de même consistance. Il s'ensuit une augmentation de la compacité du ciment. Toutefois, nous avons observé qu'à l'exception de deux bétons, les viscosités de tous les mélanges testés s'accroissaient avec le dosage en superplastifiant (voir paragraphe précédent). Nous avons supposé que ceci provient du superplastifiant qui reste dans la solution. Néanmoins, sa manière d'influencer la viscosité ne peut pas être expliquée par le modèle de Farris. Quoi qu'il en soit, nous proposons la fonction empirique h suivante afin de tenir en compte cet effet :

$$\mu_r = h(V_s) = \left(1 + k_s \frac{V_s}{\beta_s}\right) \quad (4-23)$$

où μ_r est la viscosité relative de la pâte adjuvantée par rapport à celle de la pâte sans superplastifiant, V_s et β_s respectivement le dosage en superplastifiant et le dosage de saturation (au sens chimique) en superplastifiant, et k_s un paramètre à ajuster. Le dosage de saturation en superplastifiant β_s peut être appréhendé par l'essai au cône de Marsh [83,85]. Par ailleurs, les résultats expérimentaux montrent que l'influence du superplastifiant sur la viscosité dépend également de sa compatibilité avec le ciment. Ce fait peut alors être reflété par le paramètre k_s , ce qui implique qu'il peut varier d'un couple superplastifiant/ciment à l'autre.

Enfin, on aboutit au modèle de Farris adapté aux BHP, qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\mu = \mu_0 (1 + k_s \frac{V_s}{\beta_s}) (1 - \frac{\phi_F}{\alpha_F})^{-2,5\alpha_F} (1 - \frac{\phi_C}{\alpha_C})^{-k\alpha_C} (1 - \frac{\phi_G}{\alpha_G})^{-k\alpha_G} \quad (4-24)$$

avec deux constantes k et k_s à adapter aux matériaux. A noter que, la viscosité du liquide μ_0 dans l'équation est la viscosité de l'eau (0,001 Pa.s à 20°C).

Nous avons calibré ce modèle par trois séries de bétons testés, dont les données des matériaux (densité, granulométrie, etc.), nécessaires pour les calculs, sont disponibles. Dans chaque série de bétons, le même couple superplastifiant/ciment était utilisé. Les ciments employés étaient un CPA HP pour la première série, un CPA pour la deuxième, et un CPA HPR pour la troisième. La nature des superplastifiants était la même: une résine mélamine. Les matériaux de la deuxième série provenaient de Norvège; ceux des deux autres séries étaient d'origine française, mais de différentes régions. Les compacités des matériaux sont les suivantes :

- Série 1 :	$\alpha_F = 0,48^*$	$\alpha_C = 0,63^*$	$\alpha_G = 0,82^*$
- Série 2 :	$\alpha_F = 0,48^*$	$\alpha_C = 0,66^*$	$\alpha_G = 0,76^{**}$
- Série 3 :	$\alpha_F = 0,48^*$	$\alpha_C = 0,72^*$	$\alpha_G = 0,82^*$

Les valeurs avec une étoile "*" sont calculées par le logiciel René-LCPC, tandis que celle avec deux étoiles est calculée avec le modèle de Caquot adapté (4-22). Les dosages de saturation en superplastifiant β_s pour les trois séries de bétons sont les suivants: 0,013 C***, 0,014 C et 0,015 C.

Avec les mesures expérimentales, nous avons ajusté par la méthode des moindres carrés, en utilisant les mesures de la viscosité de trois séries de bétons évoqués, une constante k (en supposant qu'il existe une constante générale pour toute sorte de granulats) et trois constantes différentes k_s (vu les différents couplages adjuvant/ciment pour trois séries de bétons). Les valeurs obtenues de ces constantes sont respectivement 4,2 pour k , et 33, 81, et 53 pour k_s des bétons des séries 1, 2 et 3.

*** C'est une expression conventionnelle du dosage en superplastifiant dans la formulation du béton, où C représente le dosage (en poids) en ciment. Cependant, dans l'équation (4-23), V_s et β_s s'apparaissent plus naturellement comme des volumes partiels. En tous cas, poids ou volume, cela ne change pas le rapport V_s/β_s , si V_s et β_s prennent la même unité.

Les valeurs de la viscosité mesurées et celles prédites par le modèle sont présentées au tableau 4-7. Une confrontation entre elles est visible en figure 4-32. On peut observer que la concordance est assez bonne. Le coefficient de corrélation est égal à 0,93, alors que l'erreur relative est inférieure à 20%. Ce résultat est donc très encourageant. On note en particulier que si la généralité de la constante k (4,2) est confirmée, il ne reste à adapter dans le modèle une seule constante k_s pour chaque couplage adjuvant/ciment. Toutefois, à l'heure actuelle, on ne peut dire qu'on arrive à calibrer à peu près un modèle de viscosité avec des mesures expérimentales de trois séries de bétons disponibles. La confrontation de ce modèle avec plus de résultats expérimentaux est indispensable afin de le justifier.

série 1	μ_m	μ_p	série 2	μ_m	μ_p	série 3	μ_m	μ_p
	Pa.s	Pa.s		Pa.s	Pa.s		Pa.s	Pa.s
b4	165	145	b5	209	150	b45	247	322
b37	146	130	b6	262	210	b46	196	218
b38	199	160	b7	354	317	b47	184	154
b39	163	192	b8	172	137	b48	140	103
b40	149	111	b9	255	248	b49	140	99
b41	174	217	b10	82	75			
b42	192	241	b11	350	445			
			b12	68	62			
			b13	71	81			
			b14	149	190			
			b15	536	546			
			b16	410	336			

Tableau 4-7 : Valeurs des viscosités mesurées (μ_m) et celles prédites (μ_p) par le modèle de Farris adapté aux BHP.

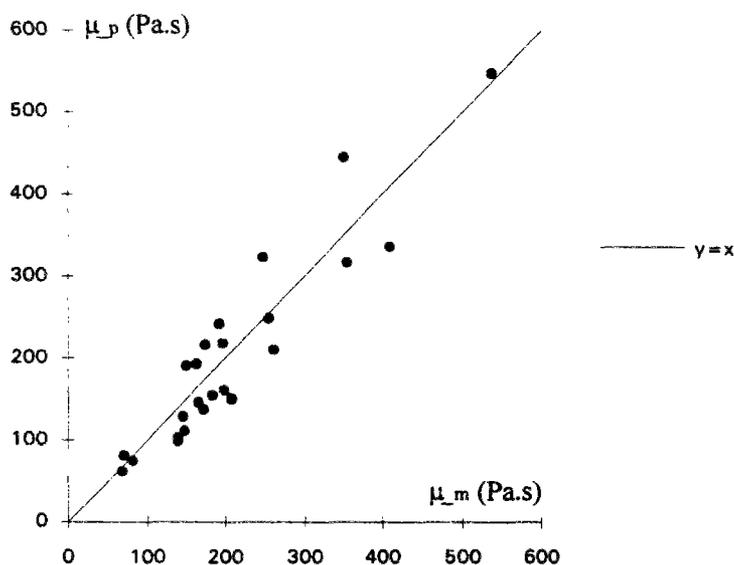


Figure 4-32 : Comparaison des viscosités mesurées (μ_m) et prédites (μ_p) par le modèle de Farris adapté aux BHP.

4.8) Conclusion

Nos résultats expérimentaux indiquent que les bétons testés respectent le modèle de Bingham, ce qui vérifie l'assertion de Tattersall et d'autres auteurs [12,15,25,26,45], tout au moins dans une certaine plage de gradient de vitesse. Cette conclusion est valable à condition que les bétons restent dans la gamme de consistance de très plastique à fluide, et que ces matériaux restent homogènes pendant l'essai. Nous pouvons alors résumer le comportement des bétons remaniés par deux caractéristiques intrinsèques: le seuil de cisaillement τ_0 et la viscosité plastique μ . Une relation entre slump et seuil, établie théoriquement, est assez bien vérifiée par les résultats expérimentaux relatifs à des bétons ayant une viscosité plastique modérée (inférieure à 300 Pa.s). Par ailleurs, cette relation valide d'une façon indirecte les mesures au BT RHEOM. Enfin, nous avons montré que le suivi des évolutions des caractéristiques binghamiennes permet de mieux appréhender l'évolution rhéologique du béton.

Pour des bétons sous vibration, nous observons qu'ils suivent également le modèle de Bingham dans la gamme de gradient de vitesse étudiée (comprise entre 1,5 et 6 s⁻¹), même lorsque leur affaissement est inférieur à 8 cm. Cependant, la limite de validation de cette conclusion au niveau de la consistance reste à établir. Par ailleurs, le comportement aux gradients de vitesse très faibles est un sujet à approfondir. Afin de distinguer les caractéristiques des bétons sous vibration de celles sans vibration, les premières sont appelées τ_{0v} et μ_v . Nous constatons, pour le type de vibration appliqué à nos échantillons, que le seuil de cisaillement sous vibration est à peu près la moitié de celui sans vibration. En revanche, la viscosité est peu affectée.

Nous avons proposé pour décrire la thixotropie du béton une caractéristique intrinsèque: le seuil au repos τ_{0r} . Bien que nous ayons peu exploité ce sujet, les quelques résultats obtenus ont déjà mis en évidence son importance.

La dilataance est également un sujet auquel on s'est intéressé dans cette étude. Il apparaît que le volume de la partie fine (particules de taille inférieure à 400 μm) est un paramètre important vis-à-vis de la dilataance, bien que les formes et la taille maximale de granulats semblent avoir également une certaine influence. Néanmoins, aucun paramètre prédominant qui contrôle la dilataance n'a été trouvé.

L'étude de l'influence rhéologique des paramètres de composition du béton est certainement très utile pour mieux maîtriser la formulation du béton. Dans cette recherche, nous avons présenté qualitativement l'influence de trois paramètres (eau, superplastifiant et fumée de silice). Nous avons ensuite établi un modèle quantitatif pour estimer la viscosité des BHP à partir de leur formulation. La confrontation de ce modèle avec les résultats expérimentaux est satisfaisante, mais nécessite encore plus de justification. En ce qui concernent l'estimation du seuil, nous n'avons pas encore trouvé un modèle adéquat. Nous espérons que la continuation de la recherche permettra d'avancer dans la résolution de ce problème.

5. Applications pratiques

Les applications du rhéomètre BT RHEOM sont multiples. TATTERSALL [96,97] a démontré l'avantage de la mesure des deux caractéristiques du matériau, au lieu d'une dans les essais empiriques (tel que l'essai au cône d'Abrams), pour ce qui concerne le contrôle qualité. En effet, en connaissant la sensibilité rhéologique des constantes de Bingham à la formulation du béton, on détecte plus facilement quels sont les paramètres de compositions qui ont changé en cours de fabrication. Par ailleurs, on a démontré que la mesure de seuil est plus sensible que celle du slump. Une autre application de l'appareil, sur le même principe que l'application précédente, est de permettre de formuler des bétons satisfaisant des cahiers de charges plus exigeants. Avec la mesure du seuil au repos par l'appareil, on peut calculer la pente maximale qu'une dalle de béton frais peut tenir (cf. §4.3). Dans la mesure où les caractéristiques obtenues au BT RHEOM sont intrinsèques, on peut tenter de les utiliser dans différents calculs d'écoulement. Dans ce chapitre, on se limite à présenter deux exemples d'applications réalisées pendant cette recherche, dont l'un concerne l'évaluation de la pompabilité du béton, et l'autre la formulation de béton.

5.1) Etude préliminaire de la pompabilité du béton

5.1.1) Considération théorique

Dans la littérature, on utilise souvent l'équation de *Buckingham-Reiner* pour décrire les problèmes de pompage et d'injection des matériaux de Bingham, en supposant que l'écoulement est permanent et laminaire, et que le frottement est parfait entre matériaux et paroi de conduite [14,98,99].

Pour un écoulement dans une conduite cylindrique horizontale suffisamment longue et large pour qu'on puisse négliger les effets de bords, le problème est bi-dimensionnel. Le champ de vitesse en coordonnées cylindriques (cf. figure 5-1) s'exprime par :

$$\vec{v} = v_z(r, z) \vec{e}_z \quad (5-1)$$

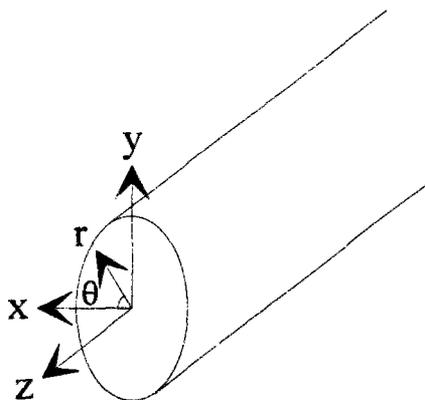


Figure 5-1 : Coordonnées cylindriques

Avec l'hypothèse de l'écoulement permanent et compte tenu de l'effet négligeable de la pesanteur, les équations d'équilibre (2-4) deviennent :

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_r)}{\partial r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} = \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{cases} \quad (5-2)$$

et l'équation de continuité (2-5) donne :

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (5-3)$$

D'autre part, on a les relations suivantes :

$$\sigma_r = \sigma_z = -p \quad (5-4)$$

$$\tau_{rz} = \tau_0 \operatorname{sign}(\dot{\gamma}_{rz}) + \mu \dot{\gamma}_{rz} = \tau_0 \operatorname{sign}\left(\frac{\partial v_z}{\partial r}\right) + \mu \frac{\partial v_z}{\partial r} \quad (5-5)$$

p étant la pression. Reportant (5-3), (5-4) et (5-5) dans (5-2), il vient alors :

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (5-6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r(\tau_0 \operatorname{sign}(\frac{\partial v_z}{\partial r}) + \mu \frac{\partial v_z}{\partial r}))}{\partial r} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5-7)$$

Les équations (5-3) et (5-6) impliquent que la vitesse v_z ne dépend pas de la variable z et que la pression p ne dépend pas de la variable r . De ce fait, dans l'équation (5-7), le terme du côté gauche doit être une fonction de r et celui de l'autre côté une fonction de z . La conséquence est alors que chacun est égale à une constante, ce qui conduit aux équations suivantes :

$$\frac{dp}{dz} = C \quad (5-8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d(r(\tau_0 \operatorname{sign}(\frac{dv_z}{dr}) + \mu \frac{dv_z}{dr}))}{dr} = C \quad (5-9)$$

Connaissant la longueur de la conduite L et la différence de pression entre les deux bouts: ΔP ($\Delta P = P_1 - P_2$), l'équation (5-8) permet de calculer facilement la constante C (gradient de pression), où :

$$C = -\frac{\Delta P}{L} \quad (5-10)$$

Une première intégration de l'équation (5-9) donne :

$$\tau_0 \operatorname{sign}\left(\frac{dv_z}{dr}\right) + \mu \frac{dv_z}{dr} = \frac{1}{2} C r + \frac{C_1}{r} \quad (5-11)$$

C_1 étant une constante d'intégration. Sur l'axe de la conduite, la contrainte de cisaillement ne peut être infinie, ce qui conduit à écrire $C_1 = 0$. Du fait que C est une constante négative et que les deux termes du côté gauche de l'équation ont le même signe, ce signe est forcément négatif. Il vient alors :

$$\frac{dv_z}{dr} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2} C r + \tau_0 \right) \quad (5-12)$$

On constate dans cette équation que pour la zone :

$$r \leq r_0 = -\frac{2\tau_0}{C} = \frac{2L\tau_0}{\Delta P} \quad (5-13)$$

le gradient de vitesse est nul. Ceci dit, pour un fluide de Bingham, le flux dans une conduite sous pression consiste en un cylindre intérieur de matériau circulant en bloc ("écoulement piston"), entouré d'une couche annulaire de matériau cisailé, comme schématisé en figure 5-2.

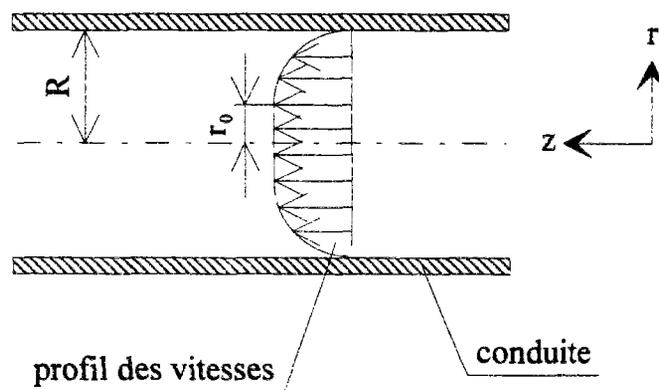


Figure 5-2 : Ecoulement permanent laminaire d'un fluide de Bingham dans une conduite.

Soit R le rayon de la conduite, avec l'hypothèse de frottement parfait, on a pour la zone annulaire ($R > r > r_0$) :

$$\int_0^v dv_z = \int_R^r \frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2} C r + \tau_0 \right) dr \quad (5-14)$$

d'où :

$$v(r) = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{4} C (R^2 - r^2) + \tau_0 (R - r) \right] \quad (5-15)$$

Remplaçons r par r_0 , la vitesse du bloc ($r \leq r_0$) est alors :

$$v(r_0) = -\frac{C}{4\mu} (R - r_0)^2 \quad (5-16)$$

Le débit Q se calcule par l'équation suivante (l'équation de Buckingham-Reiner) :

$$\begin{aligned} Q &= \pi r_0^2 v(r_0) + \int_{r_0}^R 2\pi r v(r) dr \\ &= -\frac{C\pi R^4}{8\mu} f(\beta) \\ &= \frac{\pi R^4 \Delta P}{8L\mu} f(\beta) \end{aligned} \quad (5-17)$$

avec :

$$f(\beta) = 1 - \frac{4}{3}\beta + \frac{1}{3}\beta^4 \quad (5-18)$$

$$\beta = \frac{r_0}{R} = -\frac{2\tau_0}{CR} = \frac{2L\tau_0}{R\Delta P} \quad (5-19)$$

Dans une conduite inclinée d'un angle θ , l'effet de la pesanteur dans le sens de la longueur de la conduite n'est pas toujours négligeable. On peut le prendre en compte en ajoutant un terme $-\rho g \sin\theta$ (supposant que la direction de z est contraire au sens de la pesanteur), relatif à la force volumique, au côté gauche de la deuxième équation de (5-2). Suivant le raisonnement présenté ci-dessus, on peut trouver qu'après la correction de la constante C , c'est-à-dire, en la remplaçant par l'expression suivante :

$$C = -\frac{\Delta P}{L} + \rho g \sin\theta \quad (5-20)$$

toutes les autres équations demeurent valables. L'équation (5-20) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\Delta P = -CL + \rho g L \sin\theta \quad (5-21)$$

On voit alors que la correction effectuée est en fait une pression supplémentaire (pouvant être positive ou négative selon le sens d'écoulement) par rapport à la conduite horizontale, due à la force volumique de matériau. Dans le cas de l'installation verticale de conduite pour pomper du béton de bas en haut, pour un béton de masse volumique de 2400 kg/m^3 , on a :

$$\rho g \sin \theta = 23520 \quad \text{Pa/m} \quad (5-22)$$

Ainsi les praticiens ajoutent 1 bar (100000 Pa) de pression par dénivelé de 4 m pour les pompes en hauteur [100].

Le débit dans les cas de conduites inclinées est alors calculé par l'équation suivante :

$$Q = \frac{\pi R^4 (\Delta P - \rho g L \sin \theta)}{8L\mu} f(\beta) \quad (5-23)$$

avec :

$$\beta = \frac{r_0}{R} = -\frac{2\tau_0}{CR} = \frac{2L\tau_0}{R(\Delta P - \rho g L \sin \theta)} \quad (5-24)$$

Dans la théorie présentée, on peut s'inquiéter a priori pour l'hypothèse de l'écoulement laminaire, en raison des gradients de vitesse élevés dans la conduite (de l'ordre de quelques dizaines de s^{-1}). Néanmoins, le raisonnement suivant démontrera que cette hypothèse paraît raisonnable. MANNHEIMER [101] a rapporté que l'écoulement du liquide newtonien reste laminaire si le nombre de Reynolds R_d est inférieur à 2000. Dans une conduite, le nombre de Reynolds s'exprime :

$$R_d = \frac{\bar{v}D}{\nu} \quad (5-25)$$

où \bar{v} est la vitesse moyenne de l'écoulement, D le diamètre de la conduite, ν la viscosité cinématique du liquide. Les définitions de la viscosité cinématique et de la vitesse moyenne sont les suivantes :

$$\bar{v} = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (5-26)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5-27)$$

où S est la surface de la section de conduite. Reportant (5-26) et (5-27) dans (5-25), on obtient l'équation suivante pour estimer le nombre de Reynolds :

$$R_d = \frac{4\rho Q}{\pi D\mu} \quad (5-28)$$

Prenons un cas courant du pompage de béton, où :

$$\begin{aligned} \rho &= 2400 \text{ kg/m}^3; & \mu &= 100 \text{ Pa.s}; \\ Q &= 50 \text{ m}^3/\text{h}; & D &= 12 \text{ cm}; \end{aligned}$$

le nombre de Reynolds R_d n'y est que 3,5. Il y a donc suffisamment de marge pour assurer que l'écoulement du béton soit laminaire.

5.1.2) Expérimentation, résultats, et discussion

Les expériences ont été réalisées sur le chantier de l'enceinte interne du réacteur nucléaire de Civaux II (Vienne).

Pour la construction de cette enceinte, un béton à hautes performances de formulation spéciale a été mis au point [104]. Il s'agissait de répondre à un cahier des charges comportant des clauses contradictoires: haute résistance mécanique, faibles perméabilité et fluage, mais cependant basse exothermie et retrait endogène limité. On est parvenu à une composition innovante, comportant à la fois des adjuvants, des fumées de silice, et du filler calcaire en substitution partielle du ciment (voir tableau 5-1).

gravillon		sable	ciment	FS	FC	A 1	A 2	eau totale
12,5/25 mm	5/12,5 mm	0/5 mm						
kg/m ³	l/m ³							
791	309	759	266	40	57	7,68	7,68	161

FS : fumée de silice FC : filler calcaire A 1 : Rhéobuild 1000 A 2 : Pozzolith 100XR

Tableau 5-1 : Composition du BHP de Civaux II.

Ce matériau, mis en oeuvre sur le chantier de Civaux, a dans l'ensemble donné satisfaction, à l'exception des difficultés rencontrées dans les opérations de pompage. Ces dernières sont imputables en partie à la mauvaise forme des granulats, et aux limitations du matériel. Cependant, le pompage plus facile du béton ordinaire dans l'enceinte de Civaux I laisse penser que le comportement intrinsèque du BHP était aussi en cause.

Lors des derniers mois de construction de la partie génie civil de l'enceinte de Civaux II, et plus particulièrement de la ceinture torique, on a procédé à un suivi rhéologique de charges successives de BHP, lors de deux journées de bétonnage. Tout d'abord, le comportement du béton à la fabrication était estimé à l'aide du wattmètre de la centrale à béton (indication de l'enregistreur avant la vidange du malaxeur). Puis, les bétonnières étaient dirigées vers le chantiers. Afin de ne pas perturber trop les travaux, on n'a fait de prélèvement que dans 10 bétonnières pour chaque bétonnage, dans lequel on procédait en même temps aux essais classiques (cône d'Abrams et table à secousses DIN) et au essai avec BT RHEOM. Sur chantier, deux pompes à piston fonctionnaient parallèlement. Lors du pompage de la charge considérée, on notait la pression maximale de pompage, et on comptait le nombre de courses par minute des pistons. Les mesures obtenues sont résumées au tableau 5-2.

La figure 5-3 présente quelques photos de l'installation, dont les dimensions principales étaient les suivantes :

longueur effective de conduite : $L_e = 90$ m ; élévation de conduite : $H = 53$ m ;
rayon de conduite : $R = 0,0625$ m ; rayon du cylindre de pompe : $R' = 0,1$ m ;
nombre de coudes (90°) : 24 ; rayon de coude : 0,25 m .

gâchée	τ_0	μ	slump	DIN	W	ε_v	P	N_c	$Q_{pré}$	R_p
	Pa	Pa.s	cm	cm	%		bar	c/min	m ³ /h	bar.min/c
c1*	1073	221	22	60	22,5	-	150	15	7,3	10,00
c2*	1023	245	21	58,5	21	-	150	14	6,8	10,71
c3*	1184	327	22	59,5	20,5	-	160	13	5,2	12,31
c4*	1050	329	20	54,5	22,5	-	170	12	6,1	14,17
c5*	1451	182	21	54,5	20,5	-	140	14	6,0	10,00
c6*	1057	206	21,5	62,5	20	-	150	15	7,9	10,00
c7*	1065	230	21,5	58,5	19	-	140	13	6,2	10,77
c8*	1332	239	21,5	60,5	20	-	140	13	5,0	10,77
c9*	1156	248	20	53	22	-	150	13	6,2	11,54
c10*	1249	288	21,5	61	19,8	-	160	14	5,7	11,43
d1**	927	203	20	52,5	22,5	-	150	13	8,6	11,54
d2**	856	213	21	56	21	0,05	160	13	9,4	12,31
d3**	754	254	20	55	21	0,07	165	13	8,6	12,69
d4**	983	215	20,5	57	20	0,08	160	13	8,7	12,31
d5**	715	241	19	53,5	21	0,06	160	13	8,8	12,31
d6**	930	203	21,5	55	20,8	0,09	160	13	9,5	12,31
d7**	560	162	20,5	54	20	0,07	130	13	10,5	10,00
d8**	663	250	21	55	20	0,1	160	13	8,7	12,31

* : première expérimentation ; ** : deuxième expérimentation;
DIN : étalement à la table à secousse allemande;
W : pourcentage de puissance du wattmètre par rapport à sa capacité maximale;
P : Pression de pompe ; N_c : nombre de courses de la pompe par minute;
 ε_v : dilataance du béton ; $Q_{pré}$: débit prédit par théorie;
 R_p : Indice de résistance au pompage.

Tableau 5-2 : Caractéristiques des différentes gâchées testées lors des expérimentations de Civaux.

Dans la pratique, on se rend compte que l'écoulement du béton est plus difficile dans les coudes que dans les parties droites; et la difficulté est d'autant plus grande que le rayon de coude est petit. Pour un coude de 90° et un rayon de 250 mm, la considération simplificatrice est de le prendre en compte comme 1 m de longueur horizontale [100]. La part due aux coudes doit donc être ajoutée à la longueur totale L prise dans les calculs. En l'occurrence, elle est de :

$$L = 90 + 24 = 114 \text{ (m)}$$

En vue de vérifier la validation de la théorie présentée au paragraphe précédent, on peut comparer le débit prédit par l'équation (5-23) pour chaque gâchée considérée avec le débit mesuré sur place. Cependant, bien qu'on ait noté les nombres de courses par minute à la pompe, la méconnaissance du coefficient de remplissage du béton nous empêche d'obtenir des valeurs sûres. On essaye donc de comparer le volume total prédit du béton coulé pendant le bétonnage avec celui de la réalité.

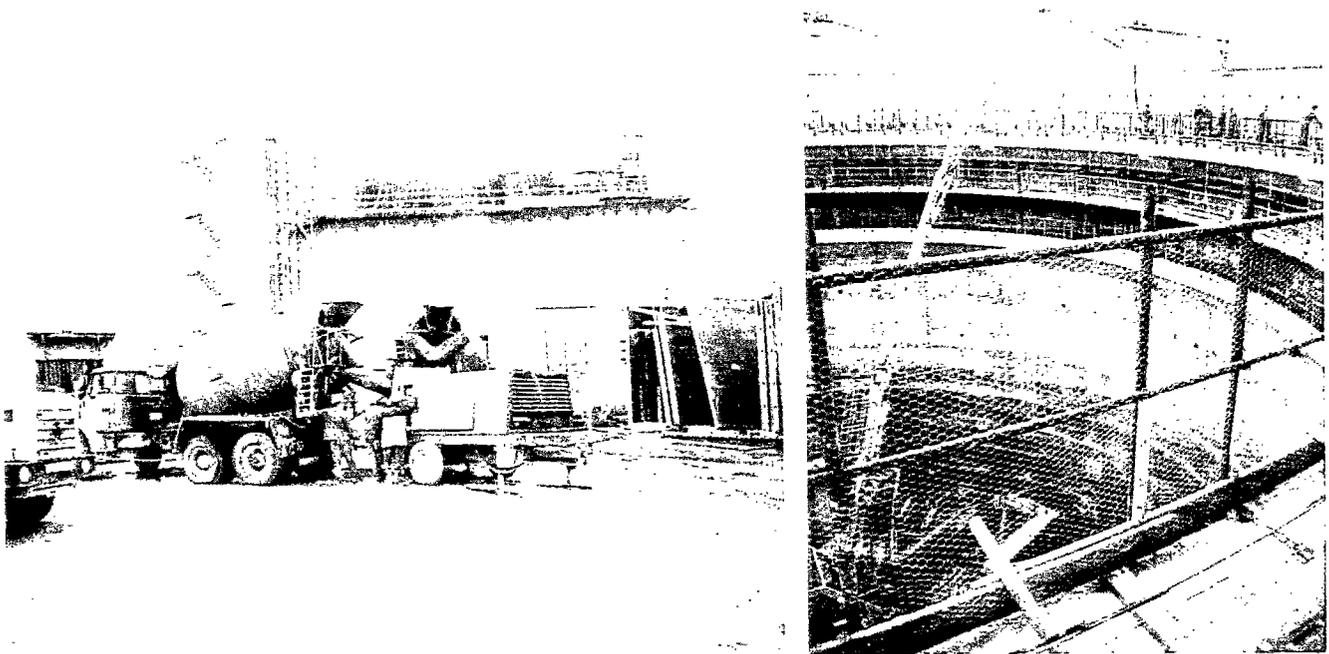


Figure 5-3 : Installation de pompage du chantier de Civaux.

Pour les deux bétonnages, on considère que les installations étaient approximativement les mêmes. Les durées des travaux et les volumes de béton coulés étaient identiques: 7 heures et 336 m³. Cependant, le déroulement de travaux n'était pas le même d'une journée de bétonnage à l'autre. Le premier bétonnage s'était bien déroulé; on suppose donc que le taux d'utilisation était voisin de 95%. Par contre, plusieurs arrêts de pompes, en raison de coupures d'électricité, ont eu lieu pendant le deuxième bétonnage. Le taux d'utilisation est alors pris égale à 80%. Avec les valeurs prédites du débit moyen: 6,23 m³/h dans chaque pompe pour le premier bétonnage, et 9,09 m³/h pour le deuxième (cf. tableau 5-2), et en tenant compte de l'utilisation parallèle des deux pompes, on peut calculer les volumes prédits du béton coulés :

$$\text{premier bétonnage : } V = 2 \times 6,23 \times 7 \times 95\% = 83 \text{ m}^3$$

$$\text{deuxième bétonnage : } V = 2 \times 9,09 \times 7 \times 80\% = 102 \text{ m}^3$$

Ces résultats sont très loin de la réalité, ce qui nous laisse penser que l'effet du glissement du béton dans la conduite est très important, voire dominant dans le calcul de débit. Bien que l'importance de cet effet reste à vérifier, il apparaît qu'on ne peut appliquer l'équation de Buckingham-Reiner sans en tenir en compte. En fait, l'hypothèse de frottement parfait dans la théorie présentée est certainement trop simplificatrice. Nous avons déjà démontré au §3.2 que

l'interface béton/paroi métallique ne peut pas être de type frottement parfait ni de type glissement parfait. Ainsi certains auteurs [102,103] ont tenté de prendre en compte le glissement du béton pour les simulations de sa pompabilité par des méthodes numériques. Comme déjà évoqué, l'estimation du comportement de l'interface béton/paroi est une question difficile, qu'on n'a pas l'intention de résoudre dans le cadre de ce travail.

Toutefois, on peut tenter de prendre la même hypothèse évoquée au §3.2, à savoir qu'il existe une couche de coulis entre béton et paroi de la conduite. Le grand cisaillement sur ce coulis entraîne un grand gradient de vitesse, ce qui équivaut au glissement du béton. Admettant que le comportement du coulis demeure binghamien, sa viscosité devrait être le paramètre contrôlant la vitesse de glissement, et donc le pompage, en raison des gradients de vitesse très élevés. Or, dans le modèle de l'estimation de la viscosité de bétons présenté au §4.7.2, on voit que la viscosité du béton est proportionnelle à celle du coulis, c'est-à-dire :

$$\mu_b = a \mu_p \quad (5-29)$$

μ_b et μ_p étant les viscosités du béton et du coulis, et "a" un coefficient. Ceci revient à dire que la viscosité du béton contrôle principalement sa pompabilité. Cette observation est confortée par une étude expérimentale de YONEZAWA et al. [105].

Dans une centrale à béton, la variation de composition d'une gâchée à l'autre est souvent assez faible pour que la concentration en granulats soit à peu près constante. On peut donc considérer que le coefficient "a" est le même pour les bétons utilisés dans un même bétonnage. En revanche, cette variation peut parfois influencer beaucoup la viscosité du coulis, et par là même celle du béton. Le coefficient "a" demeurant constant, ceci nous permet de vérifier l'observation évoquée en cherchant la corrélation entre viscosité des bétons et caractéristiques de pompabilité.

Nous avons présenté dans une publication [106] une partie des résultats de cette expérimentation, afin de montrer la corrélation entre l'*indice de résistance au pompage* R_p et la viscosité μ . Du fait qu'on ne connaît pas exactement le débit réel, on se contente de prendre le nombre de course par minute comme l'indice de débit. Par ailleurs, la pression de pompe varie d'une gâchée à l'autre. On peut alors définir un indice de résistance au pompage, rapport entre la pression P du cylindre de pompe et le nombre de courses par minute N_c enregistré pendant les expérimentations sur chantier. Ce rapport s'exprime par l'équation suivante :

$$R_p = \frac{P}{N_c} \quad (5-30)$$

Les valeurs de cet indice apparaissent au tableau 5-2. On peut voir en figure 5-4 qu'il existe une relation affine entre R_p et μ . Cependant, le coefficient de corrélation trouvé (0,63) est limité :

- par la faible précision de la mesure de R_p (de l'ordre de 1,6) rapportée à son étendue de variation (de 10 à 14 environ);

- par le fait que le réglage de l'installation de pompe n'était probablement pas le même d'une journée de bétonnage à l'autre. Notons que si l'on traite séparément les mesures de deux journées, les coefficients de corrélation s'élèveront respectivement à 0,90 et à 0,84 (voir tableau 5-3).

Ce résultat est très encourageant, si on le compare avec les corrélations obtenues entre R_p et les mesures des essais rhéologiques classiques (cf. tableau 5-3): coefficient de corrélation 0,43 pour le slump, 0,39 pour la table DIN, et 0,28 pour le wattmètre. Notons au passage que la corrélation est également extrêmement faible avec le seuil (coefficient de corrélation 0,27).

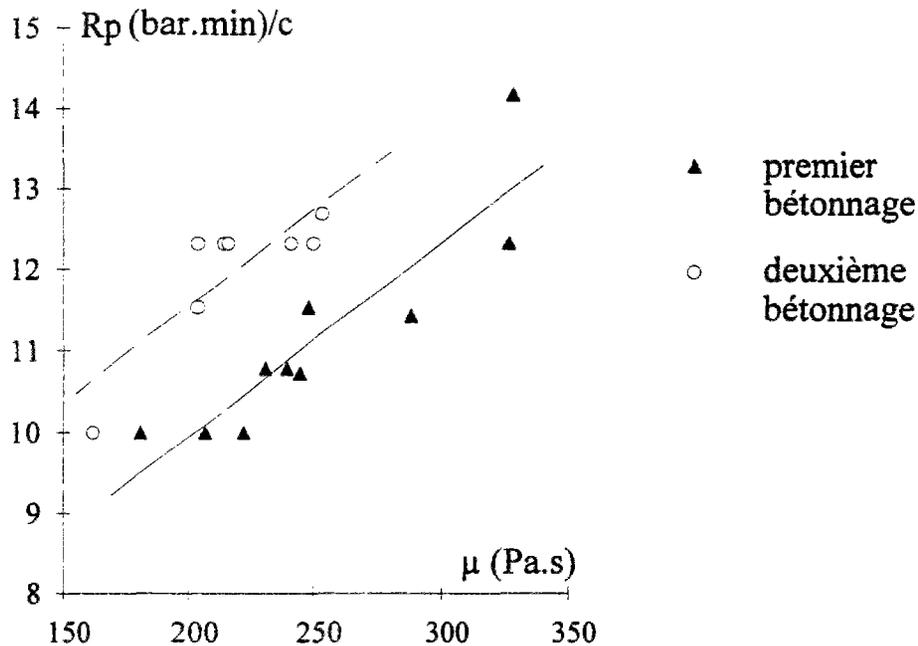


Figure 5-4 : Relation entre l'indice de pompabilité et la viscosité du béton (18 mesures).

	μ	τ	slump	étalement DIN	puissance de wattmètre
1° bétonnage	0,90	0,22	0,51	0,40	0,37
2° bétonnage	0,84	0,49	0,01	0,42	0,12
ensemble	0,63	0,27	0,43	0,39	0,28

Tableau 5-3 : Coefficients de corrélation entre indice de pompabilité et différentes caractéristiques rhéologiques.

Il est à noter que pendant le deuxième bétonnage, en raison de coupures d'électricité, deux camions toupies ont attendu longtemps avant qu'on ne puisse pomper leurs contenus. Des bouchons se sont produits pendant le pompage de ces bétons. Nous avons prélevé les échantillons dans ces deux camions. Les mesures rhéologiques sont présentées au tableau 5-4. On constate que les viscosités de ces deux échantillons sont plus élevées que les autres. Ceci révèle probablement la cause des bouchons rencontrés.

	τ_0	μ	slump
	Pa	Pa.s	cm
d9**	766	315	14,5
d10**	1170	243	15,5

Tableau 5-4 : Mesures rhéologiques des deux bétons relatifs aux bouchons rencontrés.

L'importance de l'effet de la viscosité du béton sur sa pompabilité peut alors expliquer, au moins en partie, la difficulté de pompage rencontrée pendant la construction de Civaux II. Pour la construction de Civaux I, ce problème a été moins aigu, du fait que les bétons ordinaires (sans utilisation de superplastifiant) ont systématiquement des valeurs de viscosité plus faibles.

Par ailleurs, les mesures de dilatance des bétons pendant la deuxième série d'essais sont également présentées au tableau 5-2. On voit que les valeurs sont assez élevées. Ceci peut être aussi une des raisons du pompage difficile.

5.2) Application à la mise au point de formulations de bétons

Dans le cadre d'une étude de formulation de BHP, avec des matériaux locaux, pour un pont de type passage supérieur, le LPC de Blois a mis au point deux formules (b45 et b50, voir annexe D), dont l'une correspondait à un B60*, sans utilisation de fumée de silice, et l'autre à un B80, avec fumée de silice (10% du ciment en poids).

Sur le plan de la rhéologie, le cahier des charges des bétons était le suivant :

- la valeur initiale de slump autour de 20 cm;
- pompable pendant une heure.

Selon nos expériences sur le chantier de Civaux, une viscosité plastique du béton inférieure à 200 Pa.s paraît nécessaire pour avoir une bonne pompabilité. On a donc passé une journée au LPC de Blois pour mesurer avec le BT RHEOM les caractéristiques binghamiennes des bétons obtenus. A l'aide des mesures réalisées au rhéomètre, on a proposé quelques modifications sur les formules afin de remplir le cahier des charges. Les caractéristiques rhéologiques des différents bétons testés sont résumées au tableau 5-5.

béton	temps d'attente	τ_0	μ	slump
	min	Pa	Pa.s	cm
b45	0	302	247	24
b46	0	361	196	22
	20	400	221	20,5
	40	503	239	-
	60	750	226	20
b47	0	244	184	24
	25	450	199	-
	50	560	205	21
	75	700	194	-
b48	0	868	140	13
b49	0	309	140	20,5
	20	480	152	-
	40	719	155	-
	60	970	138	13

Tableau 5-5 : Caractéristiques rhéologiques des bétons testés lors des expérimentations au LPC de Blois.

Les mesures sur béton b45 au temps 0 ont indiqué que ce béton était trop visqueux. Ceci n'était pas surprenant, vu le dosage élevé en superplastifiant: 1,5% de SP/C (rapport

* Béton dont la résistance caractéristique en compression à 28 jours est supérieure ou égale à 60 MPa.

superplastifiant sur ciment en poids d'extraits secs). Au paragraphe §4.7, nous avons montré que l'augmentation de la teneur en eau, ainsi que la diminution du dosage en superplastifiant, est souvent un moyen efficace de limiter la viscosité. Cependant, on ne voulait pas modifier trop le rapport eau sur ciment, afin de maintenir la résistance du béton. On a donc ramené la dose en superplastifiant à 1% de SP/C. Sachant que ceci aurait également pour effet une augmentation du seuil (donc, une diminution de la valeur de slump), on a ajouté 5 litres/m³ d'eau; cette opération elle aussi s'effectue dans le bon sens pour affaiblir la viscosité. On a obtenu alors la formule b46 (voir annexe D). Un essai de suivi rhéologique au BT RHEOM a aussi été réalisé. On voit au tableau 5-5 que les mesures initiales satisfaisaient les demandes, mais, après 20 minutes d'attente, les valeurs de viscosité dépassaient 200 Pa.s. Pour résoudre ce problème, on a utilisé un dosage modéré en retardateur (0,3% du ciment en poids). En même temps, on a ajouté 10 kg/m³ de ciment, en gardant le même rapport eau sur ciment (remarquons que ceci revient à augmenter la teneur en eau). Ainsi a-t-on abouti à la formule finale b47 (voir annexe D). Les valeurs au tableau 5-5 montrent que ce béton répondait bien au cahier des charges.

Quant au béton B80 (b50, cf. annexe D), bizarrement, la valeur de slump était très différente de celles obtenues pendant les études préliminaires: 10 cm au lieu de 20 cm. Il n'a donc pas été testé au rhéomètre. En vue d'avoir un slump plus élevé, il faut diminuer le seuil du béton. A cette fin, le moyen le plus efficace est sans doute d'augmenter la teneur en eau. L'augmentation du dosage en superplastifiant, si ce dernier n'est pas encore saturé, est également un bon moyen. Du fait que la dose en superplastifiant (1,3% de SP/C) était déjà un peu forte, on s'inquiétait a priori de la conséquence de son surdosage sur la viscosité. On préférerait donc d'abord ne jouer que sur la teneur en eau. Comme il s'agissait d'un béton de très haute résistance, le rapport eau sur ciment devait être très exigeant; on a donc ajouté 20 kg/m³ du ciment sans changer le rapport eau sur ciment. On est alors arrivé à la formule b48 (voir annexe D). Les mesures réalisées au rhéomètre ont montré que, avec l'usage de la fumée de silice, la viscosité de ce béton était tout à fait satisfaisante, malgré que son dosage en superplastifiant était plus fort que celui du b47. Cependant, la valeur de slump n'était pas encore suffisante; elle était seulement de 13 cm. Etant donné qu'il y avait encore de la marge pour la valeur de viscosité, on a donc essayé de mettre un peu plus de superplastifiant: 1,5% de SP/C. Cette modification, donnant la formule b51 (voir annexe D), n'a pourtant pas donné plus d'affaissement au cône. Ce béton ne méritait alors pas un essai au rhéomètre. On revenait donc au rapport SP/C de 1,3%. La meilleure solution semblait d'augmenter encore plus de ciment, tout en gardant le même rapport eau sur ciment. On est donc parvenu à la formule finale b49 (voir annexe D), en rajoutant à nouveau 20 kg/m³ du ciment. On peut voir au tableau 5-5 que ce béton, avec une valeur initiale d'affaissement de 20,5 cm, avait une viscosité modérée et stable pendant une heure.

Les évolutions des viscosités de trois bétons mesurés au BT RHEOM sont visibles en figure 5-5. Les essais mécaniques réalisés par le LPC de Blois montrent que les résistances des bétons mis au point sont satisfaisantes. Les résistances en compression des bétons testés, à l'âge de 28 jours, sont les suivantes :

b46 : 77,7 MPa ;

b48 : 91,1 MPa ;

b47 : 71,0 MPa ;

b49 : 89,9 MPa .

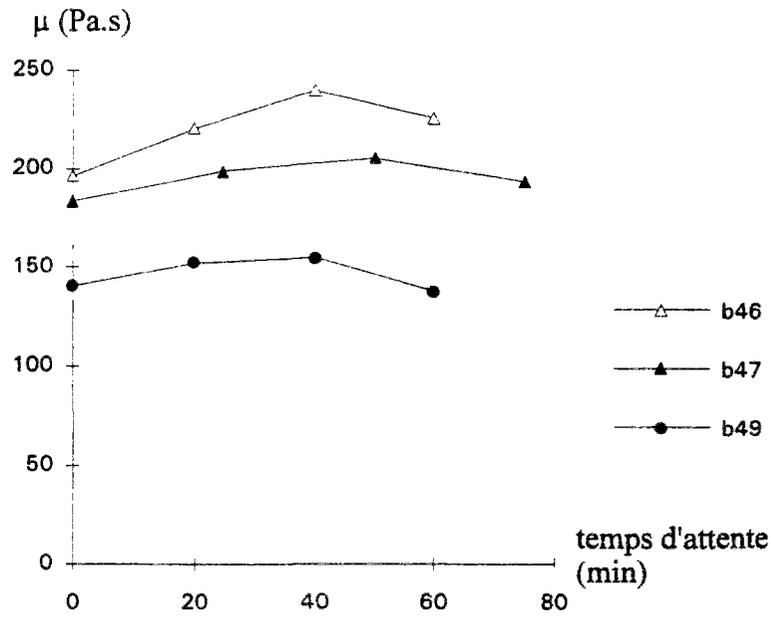


Figure 5-5 : Evolutions des viscosités plastiques des trois bétons testés.

5.3) Conclusion

Deux applications différentes avec le rhéomètre BT RHEOM ont été présentées.

Pour la première, on a étudié la pompabilité d'un béton. Bien qu'il s'agisse d'un BHP dont la fabrication faisait l'objet d'un contrôle qualité rigoureux, il apparaît des fluctuations de viscosité de 1 à 2 et de seuil de 1 à 2,6 en valeurs relatives. Ces variations, en particulier celles de viscosité, influencent beaucoup la pompabilité du matériau; mais elles étaient indétectables par les essais classiques. Appliquant une théorie simplifiée au calcul de pompage, on n'a pas pu obtenir des résultats cohérents avec la réalité. Il apparaît que l'erreur provient de la négligence du glissement du béton dans la conduite. L'hypothèse selon laquelle ce glissement doit être lié fortement à la viscosité du coulis, ainsi qu'à celle du béton, nous conduit à la conclusion que la viscosité du béton est le paramètre prédominant qui contrôle sa pompabilité, ce qui est confirmé par nos résultats expérimentaux.

Une autre application du BT RHEOM a été d'aider à mettre au point de deux formules de bétons "pointues". Profitant du progrès de la recherche en rhéologie du béton, on a réussi à contrôler les deux caractéristiques de Bingham en modifiant les compositions du béton, et on a atteint l'objectif prévu sans trop de difficulté.

Conclusion générale et perspectives

Le sujet de cette recherche est ambitieux. Des constituants de nature et de taille très différentes imposent une hétérogénéité beaucoup plus forte dans le béton que dans d'autres matériaux tels que polymère, peinture, huile, etc. Le fait que les propriétés des bétons soient évolutives vient encore compliquer le problème. Malgré tout, nous avons fait dans ce travail un maximum d'efforts face à ce problème. Cependant, ce sujet est encore loin d'être épuisé. Nous espérons que les apports de cette recherche pourront se joindre à la contribution de nombreux chercheurs dans ce domaine. Nous espérons également que ce travail pourra être une introduction à d'autres recherches.

Apports de la thèse

Les appareils existants ne s'adaptant pas bien aux bétons fluides, un rhéomètre de conception nouvelle, BT RHEOM, a été mis au point. Son principe de fonctionnement permet d'obtenir des caractéristiques rhéologiques, qui peuvent être considérées comme intrinsèques dans la mesure où les écueils de la ségrégation et de la localisation sont évités, ce qui est généralement le cas pour les bétons bien formulés de consistance très plastique à fluide. L'essai a été évalué par la comparaison des simulations numériques et des mesures expérimentales, ainsi que par des essais comparatifs réalisés avec 4 autres types d'appareils. Il nous semble correspondre à une étape importante au niveau de la caractérisation des bétons fluides. La conception, prenant en compte les besoins de l'ingénieur, en fait un appareil utilisable sur chantier comme en laboratoire, ce qui permet de faire le lien entre la recherche et l'application.

Les essais réalisés avec nouveau rhéomètre ont révélé certains aspects rhéologiques des bétons. L'assertion de certains auteurs selon laquelle le comportement des bétons suit le modèle de Bingham est confirmée pour les bétons testés dans cette étude de consistance très plastique à fluide, tout au moins dans un certain domaine de gradient de vitesse. On a également constaté le même type de comportement pour des bétons sous vibration dans la gamme de gradient de vitesse appliquée (comprise entre 1,5 et 6 s⁻¹), avec des seuils de cisaillements plus faibles. La mise en évidence de la relation entre affaissement au cône et seuil de cisaillement, de manière à la fois théorique et expérimentale, permet d'une part de conforter l'objectivité des mesures, et d'autre part de donner un repère aux praticiens. Différents types de mesures de bétons (tels que le seuil au repos, la dilatace, l'évolution rhéologique, etc) ont été montrés. Nous avons également étudié l'influence rhéologique de quelques paramètres de composition du béton, et nous avons proposé un modèle d'estimation de la viscosité, espérant qu'il pourrait constituer une aide à la formulation des bétons à hautes performances.

En ce qui concerne les applications de chantier, on a procédé à une étude préliminaire de la pompabilité du béton à hautes performances. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance du glissement du béton dans un calcul de pompage. Il apparaît que ce glissement dépend notamment de la viscosité du béton. Nous pensons ainsi que la pompabilité du béton est principalement contrôlée par la viscosité de ce dernier. Ceci est vérifié par les résultats expérimentaux. Une autre application réalisée dans ce travail concerne la formulation des

BHP. On a utilisé une nouvelle approche de la mise au point de bétons avec le rhéomètre BT RHEOM, en visant certaines valeurs pour les caractéristiques rhéologiques des matériaux.

Points à améliorer pour le rhéomètre

Pour les essais au rhéomètre BT RHEOM, il est nécessaire d'utiliser des joints entre la pièce tournante et le réservoir. Les exigences de bonne étanchéité et de frottement faible en même temps sont difficiles à concilier. Le joint actuel, se situant dans la gorge de la jupe externe de la pièce tournante, présente un frottement assez important par rapport à la grandeur de mesures, en particulier pour des bétons de seuils très faibles. Par ailleurs, l'autre joint à coller sur la paroi intérieure de la jupe interne ne paraît pas suffisamment pratique pour son utilisation sur chantier. L'amélioration de ces joints est donc souhaitable.

Plus généralement, on a présenté un certain nombre d'indices qui permettent d'alerter l'utilisateur sur le caractère éventuellement non significatif de certains résultats d'essai. Il sera important, lorsqu'une plus grande expérience aura été acquise avec le rhéomètre BT RHEOM, de donner des règles permettant de s'assurer de la validité des mesures, et de leur caractère intrinsèque. Les critères de seuil, d'évolution de la viscosité, de dilatance ou encore d'aspect de la surface libre du béton pourront aider à clarifier de telles règles.

Continuation de la recherche

Limités par le temps, nous n'avons pu étudier qu'un nombre limité de problèmes dans le domaine de la rhéologie des bétons. D'ailleurs, certaines études ne sont que préliminaires. Cependant, avec le nouveau rhéomètre BT RHEOM, on peut réaliser beaucoup plus d'études, dont quelques unes sont énumérées ci-après.

1) La pompabilité du béton est sans doute un sujet présentant un grand intérêt industriel, étant donné qu'un incident de pompage (blocage), fréquent sur chantier, peut conduire à des pertes économiques importantes. Une théorie de simulation a été présentée. Cependant, la négligence du glissement du béton semble être le grand défaut de cette théorie. Une étude expérimentale a montré le rôle important de la viscosité du béton dans la simulation du pompage. Cependant, des études spécifiques à ce sujet sont nécessaires pour quantifier cette influence.

2) La formulation des bétons avec prise en compte des nouvelles caractérisations est certainement un sujet important. Nous connaissons aujourd'hui la conséquence qualitative sur les caractéristiques du béton de la variation de quelques paramètres dans une gamme limitée. Cependant, il y a encore beaucoup de travail à réaliser pour bien connaître l'influence de tous les paramètres de composition. Le modèle construit dans cette recherche, pour estimer la viscosité des bétons, attend encore des confirmations. Par ailleurs, nous n'avons pas encore pu établir un modèle pour l'estimation du seuil des bétons. Beaucoup de recherches sont nécessaires à ce sujet.

3) Le comportement du béton vibré aux gradients de vitesse très faibles est un sujet à approfondir. Par ailleurs, nous n'avons pas étudié l'influence des paramètres de la vibration sur les caractéristiques rhéologiques des bétons. Il est pourtant important de la connaître afin d'optimiser l'énergie de mise en place des bétons nécessitant une vibration.

4) La dilatance des bétons est également un sujet à approfondir. La maîtrise des paramètres contrôlant ce phénomène semble utile pour résoudre certains problèmes relatifs aux écoulements confinés des bétons, comme dans une conduite de pompe.

Les études de parement, visant à une homogénéité de texture et de couleur; les études physico-chimiques, permettant de mieux comprendre certains mécanismes d'interaction entre ciment et adjuvant... nous ne pouvons certainement pas citer toutes les recherches potentiellement fructueuses, car la rhéologie du béton est un domaine vaste et presque vierge, qui nécessite encore de nombreux efforts de recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] L'HERMITE R. , "Prélude aux recherches expérimentales sur la vibration du béton", Annales de l'ITBTP, Février, 1948, pp. 3-17.
- [2] BOMBLED J.P. , "Rhéologie du béton frais", Revue des Matériaux de Construction "Ciments et Bétons", N° 591, Décembre, 1964.
- [3] LESAGE R. , "Etude expérimentale de la mise en place du béton frais", Thèse de Paris VI et Rapport de Recherche LPC 37, Juin 1974, 127 p.
- [4] TATTERSALL G.H. , "The rational of a two-point workability test", Magazine of Concret Research, Vol. 25, No. 84, September, 1973, pp. 197-172.
- [5] REINER M. , Rhéologie théorique, Ed. par Dunod, Paris, 1955, 187 p.
- [6] PERSONZ B. , Introduction à l'étude de la rhéologie, Ed. par Dunod, Paris, 1960, 251 p.
- [7] MEHTA P.K. , Concrete : Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc. , Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1986, 450 p.
- [8] BARON J. , "La nécessité d'une démarche pragmatique : l'idée de maniabilité et sa mise en pratique", Le Béton Hydraulique, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 131-142.
- [9] NEVILLE A.M. , Properties of Concrete, Pitman Edition, London, 1982.
- [10] DE LARRARD F. , "La consistance du béton frais", Séminaire "Connaissances de base du béton", Paris, Novembre, 1989.
- [11] BARTOS P.J.M. , "Assessment of properties of underwater concrete by the Orimet test", RILEM Workshop Special Concretes : Workability and Mixing, Paisley, March, 1993, pp. 191-200.
- [12] TATTERSALL G.H. , "Progress in measurement of workability by the tow-point test", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 203-212.
- [13] DE LARRARD F. , SZITKAR J.C. , et HU C. , "Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides", Bull. Liaison Labo P. et Ch. , 186, Juillet-Août 1993.
- [14] LEGRAND C. , "Le comportement rhéologique des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 115-130.
- [15] BANFILL P.F.G. , "A coaxial cylinders viscometer for mortar : design and experimental validation", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 217-226.

- [16] DZUY N.Q. and BOGER D.V. , "Yield stress measurement for concentrated suspensions", *Journal of Rheology*, Vol. 27, 1983, pp. 321-349.
- [17] HU C. , DE LARRARD F. and GJØRV, O.E. , "Rheological testing and modelling of fresh high-performance concrete", *Materials and Structures*, 1995, 28, pp. 1-7.
- [18] COUSSOT P. , "Rhéologie des boues et laves torrentielles — Etudes de dispersions et suspensions concentrées", Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, et Etudes du CEMAGREF, Série Montagne, N° 5, 1993, 418 p.
- [19] UZOMAKA O.J. , "A concrete rheometer and its application to a rheological study of concrete mixes", *Proceedings of 6th International Congress of Rheology*, Lyons, Vol. 4, September 1972, pp. 233-235.
- [20] MURATA J. and KIKUKAWA H. , "Studies on rheological analysis of fresh concrete", *Fresh Concrete : Important properties and their measurement*, *Proceedings of a RILEM Seminar held on March 1973*, Leeds, The University, Vol. 1, 1973, pp. 1.2-1 to 1.2-33.
- [21] TATTERSALL G.H. and BLOOMER S.J. , "Further development of the two-point test for workability and extension of its range", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 109, December, 1979, pp. 202-210.
- [22] BEAUPRE D. , MINDESS S. and PIGEON M. , "Rheology of fresh shotcrete", 1993, 11 p.
- [23] BEAUPRE D. , "Rheology of high performance shotcrete", Ph. D. Thesis of The University of British Columbia, Canada, February, 1994, 249 p.
- [24] WALLEVIK O.H. and GJØRV, O.E. , " Modification of the two-point workability apparatus", *Magazine of Concrete Research*, No. 152, September, 1990, pp. 135-142.
- [25] KIKUKAWA H. , "Rheological studies on fresh concrete using admixtures", *Proceedings of the international conference on "Admixtures for concrete : Improvement of properties"*, RILEM, Barcelona, May, 1990, pp. 34-50.
- [26] WALLEVIK O.H. and GJØRV O.E. , "Development of a coaxial cylinders viscometer for fresh concrete", *Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete"*, RILEM, London, October, 1990, pp. 213-224.
- [27] STRUBLE L.J. , "The rheology of fresh cement paste", *International Symposium on "Advances in Cementitious Materials"*, Conference of American Ceramic Society, 1991, pp. 7-29.
- [28] GJØRV O.E. , "High-Strength Concrete", *Advances in Concrete Technology*, Malhotra V.M. Ed. , Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, MSL G2-6 (R), May, 1992.
- [29] TANGTERMSIRIKUL S. , SAKAMOTO J. , SHINDOH T. and MATSUOKA Y. , "Development of super workable concrete", *4th CANMET/ACI Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Supplementary papers, Istanbul, May, 1992.

- [30] VERNET C. et CADORET G. . "Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des bétons à hautes performances pendant les premiers jours", Séminaire BHP, ENS Cachan, Juin, 1991.
- [31] BARRIOULET M. et LEGRAND C. , "Les interactions mécaniques entre pâte et granulats dans l'écoulement du béton frais", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 263-270.
- [32] HOBBS D.W. , "Influence of aggregate volume concentration upon the workability of concrete and some predictions from the viscosity-elasticity analogy", Magazine of Concrete Research, Vol. 28, No. 97, December, 1976, pp. 191-202.
- [33] BARRIOULET M. and LEGRAND C. , "Diphasic semi-empiric model for the rheological behaviour of vibrated fresh concrete", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 343-351.
- [34] LEGRAND C. , " Workability and rheology", RILEM Workshop Special Concretes : Workability and Mixing, Paisley, March, 1993, pp. 51-54.
- [35] LEGRAND C. , "La structure des suspensions de ciment", Le Béton Hydraulique, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, pp. 99-113.
- [36] BANFILL P.F.G. , "The rheology of cement paste : progress since 1973", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 3-9.
- [37] ZUKOSKI C.F. and STRUBLE L.J. , "Rheology of Cementitious Systems", MRS Bulletin, March, 1993, pp. 39-42.
- [38] BARKAT O. , SHAUGHNESSY R. and CLARK P.E. , "A rheological study of cement slurry", Third International Symposium on "Liquid-Solid Flows", American Society of Mechanical Engineers, Chicago, 27 November - 2 December, 1988, pp. 115-120.
- [39] ATZENI C. , MASSIDDA L. and SANNA U. , "Effect of rheological properties of cement pastes on workability of mortars", Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 7, No. 2, 1985, pp. 78-83.
- [40] PAPO A. , "The thixotropic behaviour of white portland cement pastes", Cement and Concrete Research, Vol. 18, 1988, pp. 595-603.
- [41] BLANC R. et GUYON E. , "La physique de la sédimentation". La Recherche, N° 234, Vol. 22, Juillet-Août, 1991.
- [42] DE LARRARD F. et BUIL M. , "Granularité et Compacité dans les matériaux de Génie Civil", Matériaux et Construction, RILEM, Vol. 20, Mars-Avril, 1987, pp. 117-126.
- [43] UKRAINCIIK V. , "Study on fresh concrete flow curves", Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980, pp. 203-212.
- [44] LEGRAND C. , "Les comportements rhéologiques du mortier frais", Cement and Concrete Research, Vol. 32, N°1, January, 1972, pp. 17-31.

- [45] SMEPLASS S. , " Applicability of the bingham model to high strength concrete", RILEM Workshop Special Concretes : Workability and Mixing, Paisley, March, 1993, pp. 145-150.
- [46] ACI Committee 309, "Behaviour of fresh concrete during vibration", Journal of the ACI, No. 78-3, January-February, 1981, pp. 36-53.
- [47] BARRIOULET M. et LEGRAND C. , "L'effet de masse des granulats dans l'écoulement du béton frais vibré", Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 20, 1987, pp. 196-201.
- [48] BARRIOULET M. et LEGRAND C. , "Mise en évidence expérimentale des interactions entre pâte interstitielle et granulats dans l'écoulement du béton frais vibré", Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 19, 1986, pp. 273-278.
- [49] TATTERSALL G.H. , "Effect of vibration on the rheological properties of fresh cement pastes and concretes", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 323-338.
- [50] BORGESSION L. and FREDRIKSSON A. , "Influence of vibrations on the rheological properties of cement", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 313-322.
- [51] KAKUTA S. and KOJIMA T. , "Rheology of fresh concrete under vibration", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 239-342.
- [52] BANFILL P.F.G. , "Experimental investigations of the rheology of fresh mortar", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 145-153.
- [53] DE LARRARD F. , "Le comportement rhéologique des bétons", Séminaire ENPC "La mise en oeuvre des bétons, Mai, 1993.
- [54] BACKES H.P. and VOM BERG W. , "Rheological experiments on influence of chemical composition of cement upon flow behaviour of cement pastes", Proc. IX Intl. Congress on Rheology, Mexico, 1984, pp. 673-672.
- [55] SUHR S. , "Interactions between sulphate minerals and C₃A in cement paste rheology", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 37-46.
- [56] VOM BERG W. , "Influence of specific surface and concentration of solids upon the flow behaviour of cement pastes", Mag. Concr. Res. , Vol. 31, No. 109, December, 1979, pp. 211-216.
- [57] AÏTCIN P.C. , "L'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances", Les bétons à hautes performances (du matériau à l'ouvrage), Edité par MALIER Y. , Paris, 1990, pp. 31-50.

- [58] MORANVILLE-REGOURD M. , "Microstructure des bétons à hautes performances", Les bétons à hautes performances (du matériau à l'ouvrage), Edité par MALIER Y. , Paris, 1990, pp. 21-30.
- [59] PENTTALA V. , "Possibilities of increasing the workability time of high strength concretes", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 92-100.
- [60] BANFILL P.F.G. , "Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials", Construction and Building Materials, Vol. 8, N°1, 1994, pp. 43-50.
- [61] BARON J. et LESAGE R., "Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques", Rapport de Recherche des LPC N° 3, Paris, Août, 1969.
- [62] WALLEVIK, O.H. and GJØRV, O.E. , "Practical description of the rheology of fresh concrete", Report for communication, December, 1990, 12 p.
- [63] AÏTCIN P.C. , BALLIVY G. and PARIZEAU R. , "The use of condensed silica fume in grouts", International Symposium on "Innovative Cement Grouting, ACI, SP 83, 1992, pp. 1-18.
- [64] BUIL M. , WITIER P. , DE LARRARD F. et al. , "Physicochemical mechanism of the action of the naphthalene sulfonate based superplasticizers on silica fume concretes", Proceedings of the Second International Conference on "Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Madrid, ACI, SP 91-46, Vol. 2, 1986, pp. 959-971.
- [65] BUIL M. et PAILLÈRE A.M. , "Utilisation des fillers ultrafins dans les bétons", Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, N° 30, Paris, 1984, pp. 13-16.
- [66] SCHOLZ E. , "Consistency and stiffening of model concretes : influence of cement and interactions with temperature", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 116-124.
- [67] LEGRAND C. , "Rhéologie des mélanges de ciment ou de sable et d'eau", Rev. Matér. Constr. Trav. Publics Cim. Béton, Septembre, 1970, No. 659/660, pp. 217-222.
- [68] PAILLÈRE A.M. , SERRANO J.J. and GRIMALDI M. , "Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimum des bétons à hautes performances avec et sans fumées de silice", Proceedings of the international conference on "Admixtures for concrete : Improvement of properties", RILEM, Barcelona, May, 1990, pp. 63-79.
- [69] CHAPPUIS J. , "Rheological measurements with cement pastes in viscometers : a comprehensive approach", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 3-12.
- [70] DE LARRARD F. , "Réflexion pour un nouvel essai de mesure de la consistance des bétons", Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, N° 166, Mars-Avril , 1990, pp. 91-94.

- [71] DE LARRARD F. , SZITKAR J.C. , HU C. et al. , " Design of a rheometer for fluid concretes", RILEM Workshop Special Concretes : Workability and Mixing, Paisley, March, 1993, pp. 201-208.
- [72] BARRIOULET M. et LEGRAND C. , "Influence des caractéristiques des granulats sur les actions intergranulaires dans l'écoulement du béton frais", Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 22, 1989, pp. 339-343.
- [73] TANIGAWA Y. , MORI H. , TSUTSUI K. and KUROKAWA Y. , "Constitutive law and yield condition of fresh concrete", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 9, 1987, pp. 47-54.
- [74] TANIGAWA Y. , MORI H. , MASUDA K. and WATANABE K. , "Finite element analysis for determination of rheological constants of concrete by cylindrical rotation viscometer", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 10, 1988, pp. 43-50.
- [75] TANIGAWA Y. , MORI H. , WATANABE K. and MIWA M. , "Consistency testing methods for high-strength and ultra-high-strength concrete", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 12, 1990, pp. 49-56.
- [76] TANIGAWA Y. , MORI H. and WATANABE K. , "Computer simulation of consistency and rheology tests of fresh concrete by viscoplastic finite element method", Proceedings of the international conference on "Properties of Fresh Concrete", RILEM, London, October, 1990, pp. 301-308.
- [77] TANIGAWA Y. , MORI H. and WATANABE K. , "Analytical and experimental studies on casting of fresh concrete into wall form", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 13, 1991.
- [78] TOUTLEMONDE F. , BOULAY C. , PASUTTO S. et GOURRAUD C. , "Projet 1.3 — Dynamique des bétons — Bilan 91 et perspectives 92", Rapport scientifique 1991 du GRECO II Géomatériq. Reynouard ed., pp. 139 - 149.
- [79] DE LARRARD F. et FAU D., "Bétonlab: logiciel d'aide à la formulation des bétons", Version 1, Presses de l'ENPC, 28, rue des Saints-Pères, Paris, 1992.
- [80] SEDRAN T. , "Les bétons autonivelants (BAN)", Session de Formation Continue de l'ENPC: "Formulation des bétons (2): la gamme des bétons modernes", Paris, Octobre, 1994, 10 p.
- [81] TANIGAWA Y. and MORI H. , "Flow simulation of fresh concrete subjected to vibration", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 115, No. 3, March, 1989, pp. 493-508.
- [82] MURATA J. and KIKUKAWA H. , "Viscosity equation for fresh concrete", ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 230-237.
- [83] DE LARRARD F. et PUCH C. , "Formulation du béton à hautes performances : la méthode de coulis", Bull. Liaison Labo P. et Ch. , 161, Mai-Juin 1989.
- [84] DE LARRARD F. , "Proposition d'une méthode de détermination de la dose de saturation d'un adjuvant", Communication au sein du Groupe AFREM "Connaissance et utilisation des BHP", Sous-groupe "Formulation", Février, 1994, 3 p.

[85] Rapport AFREM, "Nouvelle méthode de coulis pour la formulation des bétons à hautes performances", en préparation pour le Bull. Liaison Labo P. et Ch. .

[86] MORI H. and TANIGAWA Y. , "Flow simulation of fresh concrete subjected to vibration", Magazine of Concrete Research, 42, No. 153, December, 1990, pp. 223-232.

[87] TATTERSALL G.H. and BAKER P.H. , "The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 40, No. 143, June, 1988, pp. 79-89.

[88] BOMBLED J.P. , "Rhéologie des mortiers et des bétons frais — Etudes de la pâte interstitielle de ciment", Revue des Matériaux de Construction, N° 688, Mai - Juin, 1974, pp. 137-155.

[89] DE LARRARD F. , "Formulation et propriété des bétons à très hautes performances", Thèse de doctorat de l'ENPC et Rapp. Recherche LPC 149, Mars 1988, 340p.

[90] FARRIS R.J. , "Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data", Transactions of the Society of Rheology, 12(2), 1968, pp. 281-301.

[91] CUMBERLAND D.J. et CRAWFORD R.J. , "The packing of particles", Elsevier, 1987.

[92] CAQUOT, A., "Rôle des matériaux inertes dans le béton", Mémoire de la société des ingénieurs civils de France, Juillet-Août, 1935.

[93] DE LARRARD F. et TONDAT P. , "Sur la contribution de la topologie du squelette granulaire à la résistance en compression du béton", Matériaux et Constructions, RILEM, Vol. 26, 1993, pp. 505-516.

[94] SEDRAN T. et DE LARRARD F. , "Réné-LCPC: un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil", Journées des Sciences d'Ingénieur, Presqu'île de Giens, Octobre, 1994.

[95] DE LARRARD F. et SEDRAN T. , "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model", Cement and Concrete Research, Vol. 24, N° 6, 1994, pp. 997-1009.

[96] TATTERSALL G.H. , "Application of rheological measurements to practical control of concrete", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 270-280.

[97] TATTERSALL G.H. , Workability and Quality Control of Concrete, Published by E & FN Spon, London, 1991, 262 p.

[98] REINER M. , "Deformation, Strain and Flow", H.K. Lewis & Co. , Ltd. , 1960.

[99] SAKUTA M. , YAMANE S. , KASAMI H. et al. , "Pumpability and rheological property of fresh concrete", in Proceedings of Conference on Quality Control of Concrete Structures, Stockholm, Swedish Cement & Concrete Research Institute, Vol. 2, June, 1979, pp. 125-132.

[100] V. ECKARDSTEIN K.E. , "Béton pompable et pompes à béton — Un manuel pour le pompage du béton", Editeur: SCHWING, D-4690 Herne 2, B.P. 200362, 1983.

- [101] MANNHEIMER R.J. , "Laminar and turbulent flow of cement slurries in large diameter pipe — a comparison with laboratory viscometers", Proceedings of the International Conference on "Rheology of Fresh Cement and Concrete", Liverpool, March, 1990, pp. 147-158.
- [102] TANIGAWA Y. , MORI H. and NODA Y. , "Theoretical study on pumping of fresh concrete", Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 13, 1991.
- [103] NANAYAKKARA A. , GUNATILAKA D. , OZAWA K. and MAEKAWA K. , "Flow and segregation of fresh concrete in tapered pipes — Two-phase computational model", Third International Symposium on "Liquid-Solid Flows", ASME, Chicago, 27 November - 2 December, 1988, pp. 47-52.
- [104] ITHURRALDE G. , DE LARRARD F. , NECTOUX J. , "Bétons à hautes performances (BHP) pour l'étanchéité des structures en béton — Expérimentation", Annales de l'ITBTP, N° 502, Mars-Avril 1992.
- [105] YONEZAWA T. , IZUMI I. , OKUNO T. , SUGIMOTO M. , SHIMONO T. and ASAKURA E. , "Reducing viscosity of high strength concrete using silica fume", Proceedings of the Fourth CANMET/ACI International Conference on "Fly, Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete" (Supplementary Papers), Istanbul, 1992, pp. 765-780.
- [106] DE LARRARD F. , HU C. , SZITKAR J.C. , JOLY M. , CLAUX F. et SEDRAN T. , "Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides", Annales de l'ITBTP, N° 527, Octobre, 1994.
- [107] ATZENI C. , MASSIDDA L. and SANNA U. , "Comparison between rheological models for portland cement pastes", Cem. Concr. Res. , Vol. 15, 1985, pp. 511-519.
- [108] PAPO A. , "Rheological models for cement pastes", Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 21, 1988, pp. 41-46.
- [109] EIRICH F. R. , Rheology : Theory and application, Published by Academic Press, New York, Vol. 3, 1960, 680p.
- [110] BORLAND, "Turbo Pascal 4.0 — Manuel de Référence", Sprint, Borland France, 1988.
- [111] BORLAND, "Turbo Pascal 4.0 — Manuel de l'utilisateur", Sprint, Borland France, 1988.

ANNEXES

A. Modèles pour décrire les lois de comportement [40,107,108]

Nous présentons d'abord quelques modèles pour des fluides exclusivement visqueux.

1) Modèle de Williamson

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \frac{\tau_{\infty} \dot{\gamma}}{(\dot{\gamma} + a)} + \mu_{\infty} \dot{\gamma}$$

τ_{∞} , μ_{∞} et a sont trois constantes du modèle. Quand $\tau_{\infty} = 0$, le modèle revient à celui de newtonien.

2) Modèle de Sisko

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = a\dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^c$$

a , b et c étant trois constantes du modèle. Quand $c = 1$, ceci revient au modèle de Newtonien. En variant la constante c , on peut tenter d'exprimer les fluides rhéoépaississants et rhéofluidifiants.

3) Modèle de Briant

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{a \mu_{\infty} \dot{\gamma}}\right)^a$$

τ_{∞} , μ_{∞} et a sont trois constantes du modèle.

4) Modèle de Powell-Eyring

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = \mu_{\infty} \dot{\gamma} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \frac{\sinh(\beta \dot{\gamma})}{\beta}$$

Ici, μ_0 et μ_{∞} sont respectivement la viscosité initiale et finale du matériau, et β une autre constante du modèle.

Les modèles ci-après sont destinés a priori aux fluides viscoplastiques. Nous y trouvons donc toujours une constante τ_0 pour exprimer le seuil de cisaillement. Remarquons que ces modèles s'adaptent également aux fluides exclusivement visqueux en prenant τ_0 nul.

5) Modèle de Herschel-Bulkley

Ce modèle s'exprime par :

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b$$

Ici, τ_0 est le seuil de cisaillement, a et b deux autres constantes du modèle. Nous voyons que quand b égale 1, nous retrouvons le cas binghamien.

6) Modèle de Casson

Ce modèle peut être décrite par :

$$(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0})^2 = a\dot{\gamma}$$

à part τ_0 , a est une autre constante du modèle.

7) Modèle de Vom-Berg

Ce modèle est de la forme suivante :

$$\tau = \tau_0 + a \sinh^{-1}\left(\frac{\dot{\gamma}}{b}\right)$$

a et b étant deux constantes du modèle.

8) Modèle de Robertson-Stiff

Ce modèle s'écrit :

$$\tau = a(b + \dot{\gamma})^c$$

a, b et c étant trois constantes du modèle. Dans ce modèle, le seuil de cisaillement $\tau_0 = a b^c$.

B. Quelques viscosimètres

1) Les viscosimètres capillaires [109]

Il s'agit d'un instruments dont la partie principale est un tuyau, où s'écoule le fluide. A la distance r de l'axe du tuyau, la contrainte de cisaillement s'écrit :

$$\tau = \frac{\Delta P r}{2L}$$

où L est la longueur du tuyau, ΔP la chute de pression. Pour les fluides newtoniens, la loi de Poiseuille permet de calculer la viscosité :

$$\mu = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8LQ}$$

R et Q étant le rayon du tuyau et le débit du fluide. Afin de limiter l'influence du bord, la longueur L doit être assez grande devant le rayon R ($L/R > 20$).

2) Le viscosimètre à rotation de type plan-plan

Dans cet appareil, le matériau est cisailé entre deux disques horizontaux, dont l'un tourne et l'autre est fixe (cf. figure B-1). Dans chaque plan horizontal, le gradient de vitesse est linéaire au rayon r , nul au centre et maximum à la périphérie (voir figure 3-2) :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{h} r$$

Ω et h étant respectivement la vitesse angulaire relative de deux disques et l'entrefer (hauteur de l'éprouvette). Les distributions du gradient de vitesse sont théoriquement identiques dans toutes les couches.

Pour des fluides newtoniens, la viscosité peut être calculée par :

$$\mu = \frac{2h\Gamma}{\pi R^4 \Omega}$$

où R est le rayon des disques (plans horizontaux), Γ le couple entraînant la rotation du disque tournant. Pour les matériaux binghamiens, il existe la relation suivante entre Γ et Ω :

$$\Gamma = \frac{2\pi}{3} R^3 \tau_0 + \frac{\pi R^4 \mu}{2h} \Omega$$

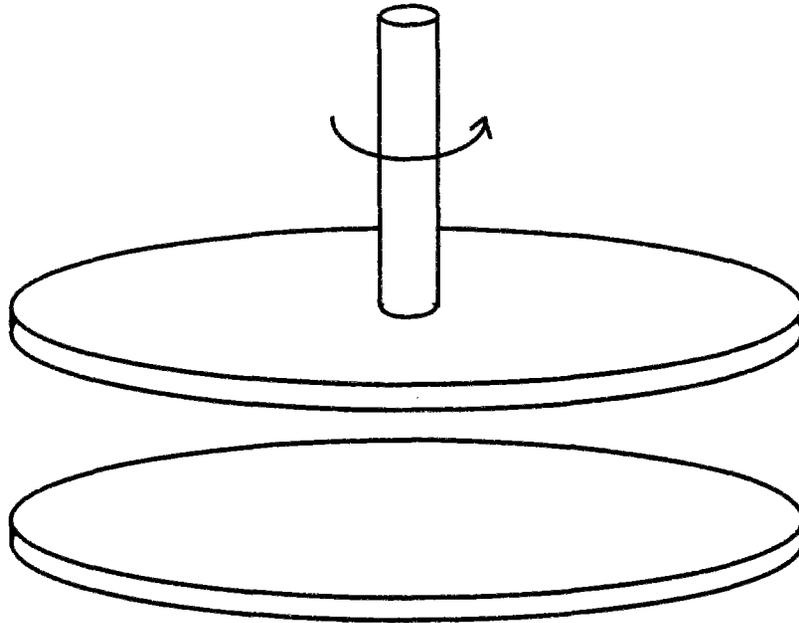


Figure B-1 : Viscosimètre de type plan-plan

3) Le viscosimètre à rotation de type cône-plan [109]

Pour cet appareil, un grand avantage est que tout échantillon est soumise à un gradient de vitesse uniforme décrite par l'équation suivante :

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\alpha}$$

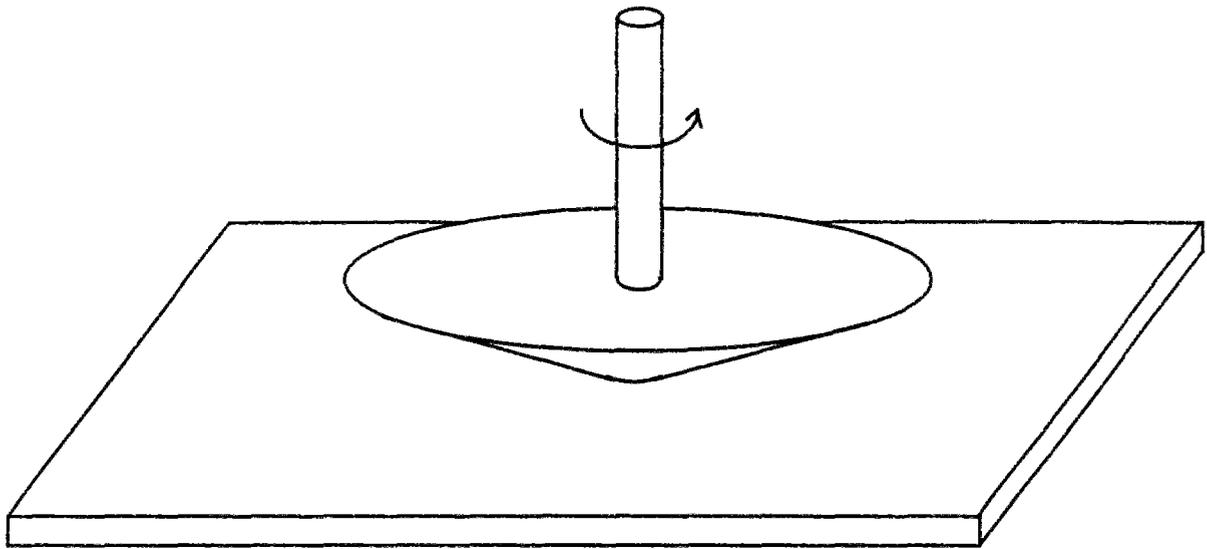
Ω et α sont la vitesse angulaire et l'angle du cône (voir Figure B-2). Dans le cas de matériaux newtoniens, la contrainte peut être calculée par :

$$\tau = \frac{3\Gamma}{2\pi R^3}$$

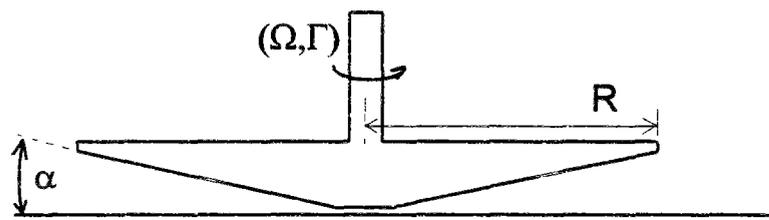
Γ et R étant le couple exercé et le rayon maximal du cône. La viscosité s'exprime par :

$$\mu = \frac{3\alpha\Gamma}{2\pi R^3\Omega}$$

Pour assurer un gradient de vitesse constant dans tout échantillon, α doit être en principe inférieur à 4° .



(a)



(b)

Figure B-2 : Viscosimètre de type cône-plan

C. Logiciel ADRHEO et son mode d'emploi

C.1) Présentation du logiciel ADRHEO

Le logiciel ADRHEO est programmé en langage Pascal. L'environnement utilisé pour la compilation est Turbo Pascal 4.0 [110,111]. C'est un programme exécutable sous DOS, sans nécessité, pour son utilisation, du soutien de l'environnement Turbo Pascal.

Le logiciel contient le programme principal ADRHEO et les 20 *modules** (sans compter les *modules* CRT et DOS, ainsi que celles de l'environnement de Turbo Pascal) suivants: AXES, CALIBRAT, CARTELEC, CPLCOMD, DIAGRAM, ESSAIRHE, ESSAITHX, ESSAIVID, FICHPARA, GLOBMESA, IMAGES, LANESSAI, LINEREGR, MAGASIN, MISENPL, PARAMETR, PHRASE, SHELL, STATIQUE et VITCOMD, lesquels contiennent de nombreux sous-programmes. Leurs descriptions sont données dans les paragraphes suivants.

C.1.1) Programme principal ADRHEO

Il utilise les modules CALIBRAT, CARTELEC, DIAGRAM, FICHPARA, GLOBMESA, ESSAIVID, IMAGES, LANESSAI, MAGASIN, MISENPL, PHRASE, et STATIQUE. Son schéma est présenté en figure C-1.

C.1.2) Module AXES

Il contient le sous-programme ECHELLE, qui utilise les deux modules GLOBMESA et MAGASIN. Le sous-programme ECHELLE a pour fonction de tracer des échelles et d'afficher les légendes pour différents diagrammes.

C.1.3) Module Calibrat

Ce module contient un sous-programme: CALIBRATION. Ce dernier utilise les modules CARTELEC, GLOBMESA, IMAGES, MAGASIN, PHRASE et VITCOMD.

En ce qui concerne les mesures au BT RHEOM (vitesse, fréquence, couple et dilatance), l'ordinateur reçoit des signaux numériques. La multiplication de ces derniers par un coefficient correspondant (dit *unité*) fournit donc les valeurs de ces mesures. Les coefficients sont mis dans un fichier (capteurs.coe), qui est chargé dès qu'on lance le logiciel ADRHEO. Toutefois, le sous-programme CALIBRATION permet de corriger, le cas échéant, les coefficients correspondants, d'après les résultats de l'étalonnage en direct, et d'enregistrer la modification dans le même fichier (capteurs.coe). Ce sous-programme contient lui-même quatre sous-programmes, qui concernent respectivement les calibrations des mesures de vitesse, de fréquence, de couple et de dilatance. La correction utilisée dans les programmes est une correction linéaire de type :

* Les *modules* (units en anglais) sont les bases de la programmation modulaire en Turbo Pascal. Ils permettent de construire des bibliothèques qu'on peut intégrer dans divers programmes sans avoir besoin des fichiers source.

$$C_2 = \frac{X_r}{X_m} C_1$$

où C_1 est le coefficient pris en compte avant correction et C_2 le coefficient corrigé; X_m et X_r sont les valeurs de la mesure données respectivement par l'ordinateur (avant correction) et par l'étalonnage.

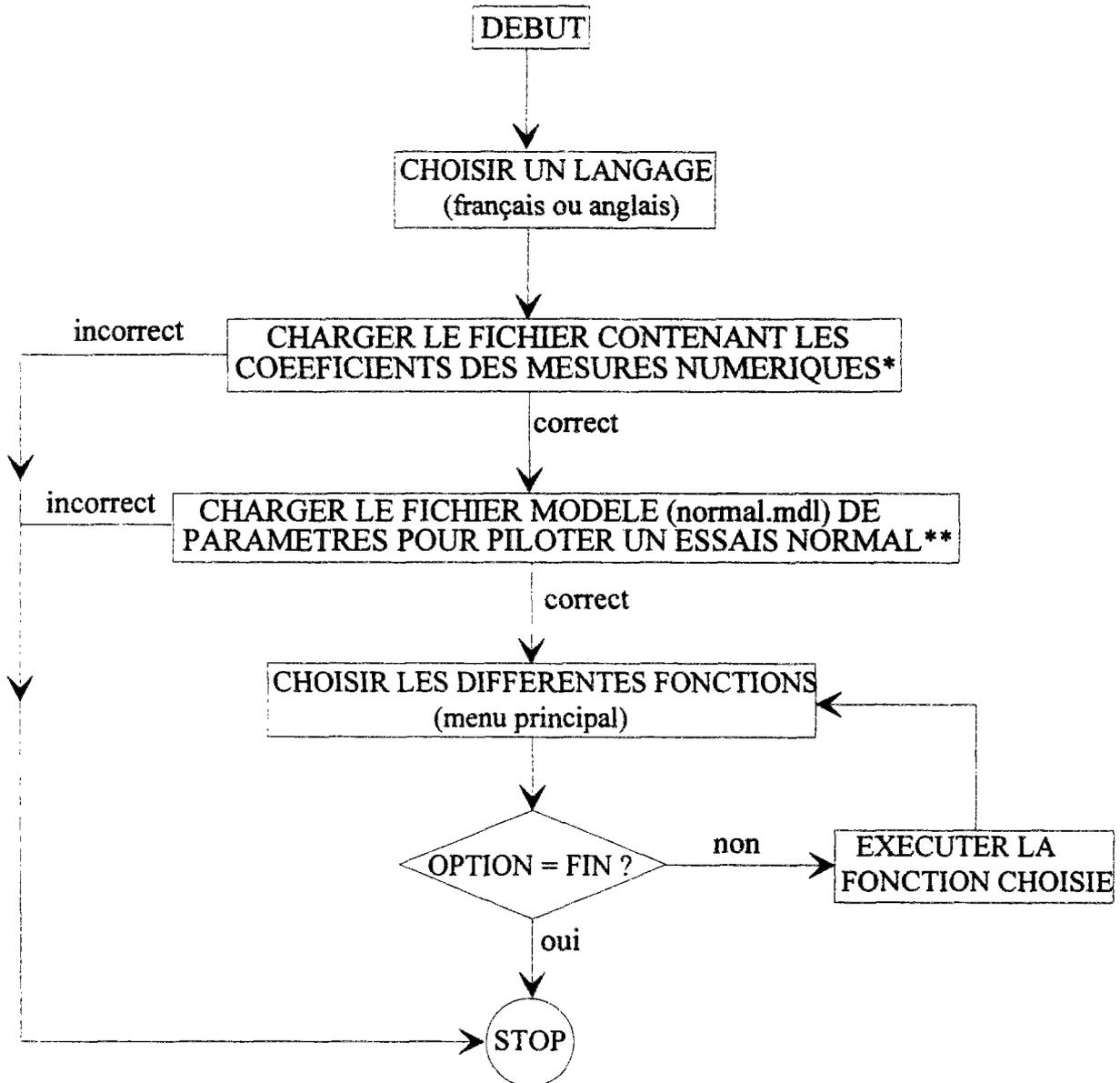


Figure C-1 : Schéma du programme principal ADRHEO. (* cf. C.1.3; ** cf. §3.5).

C.1.4) Module CARTELEC

Ce module contient des sous-programmes qui permettent de transformer des signaux analogiques de différentes mesures en signaux numériques, afin que les signaux des mesures soient lisibles par l'ordinateur. Les deux modules GLOBMESA et SHELL ont été utilisés dans le module CARTELEC.

C.1.5) Module CPLCOMD

Il contient un sous-programme: COUPLECOMD. Ce dernier utilise les modules CARTELEC, GLOBMESA, MAGASIN et SHELL. La fonction de ce sous-programme est de contrôler la variation du couple dans un essai à *contrainte imposée* (voir §2.3.2). Son principe de fonctionnement est similaire à celui du sous-programme VITESSECOMD (voir C.1.21), lequel on pratique le plus souvent.

C.1.6) Module DIAGRAM

Ce module, utilisant les modules AXES, GLOBMESA, LINEREGR, MAGASIN et SHELL, contient le sous-programme DIAGRAMME. Ce dernier permet de visualiser les résultats de l'essai contenus dans le fichier donné. Son schéma est montré en figure C-2.

C.1.7) Module ESSAIRHE

Ce module contient le sous-programme ESSAIRHEO. Il utilise les modules AXES, CARTELEC, CPLCOMD, GLOBMESA, LINEREGR, MAGASIN, SHELL, STATIQUE et VITCOMD. Ce sous-programme pilote principalement les essais de type *normal* (voir §3.5). L'appel du sous-programme SEUILDILAT lui permet également de piloter l'essai de mesure de seuil au repos si cet essai est demandé. Le schéma du sous-programme ESSAIRHEO est présenté en figure C-3.

C.1.8) Module ESSAITHX

Il contient un sous-programme ESSAITHIX, qui utilise les modules AXES, CARTELEC, CPLCOMD, GLOBMESA, LINEREGR, MAGASIN, SHELL, STATIQUE et VITCOMD. Le sous-programme ESSAITHIX permet de suivre l'évolution du couple à vitesse constante, ou de suivre l'évolution de la vitesse à couple constant (mettre en évidence de la thixotropie). Le schéma de ce sous-programme est présenté à la figure C-4.

C.1.9) Module ESSAIVID

Ce module, utilisant les modules FICH PARA, GLOBMESA, MAGASIN et LANESSAI, contient le sous-programme ESSAI_DU_JOINT. Il permet d'effectuer un essai de mesure du frottement du joint, sous le pilotage du fichier modèle (joint.mdl) de paramètres. L'essai concerné est de type *normal* (cf. §3.5).

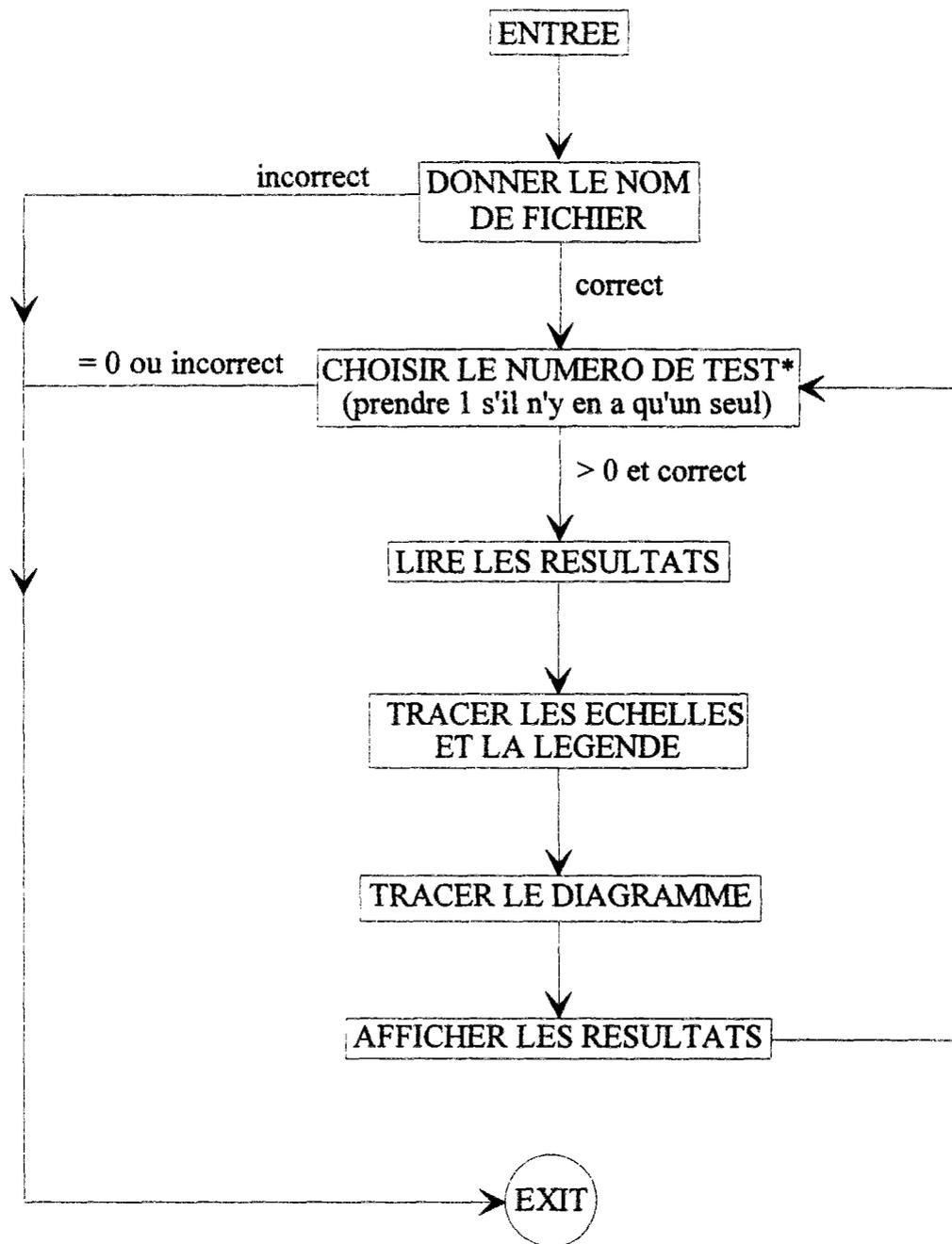


Figure C-2 : Schéma du sous-programme DIAGRAMME. (* ceci est fait surtout pour des essais du suivi de l'évolution).

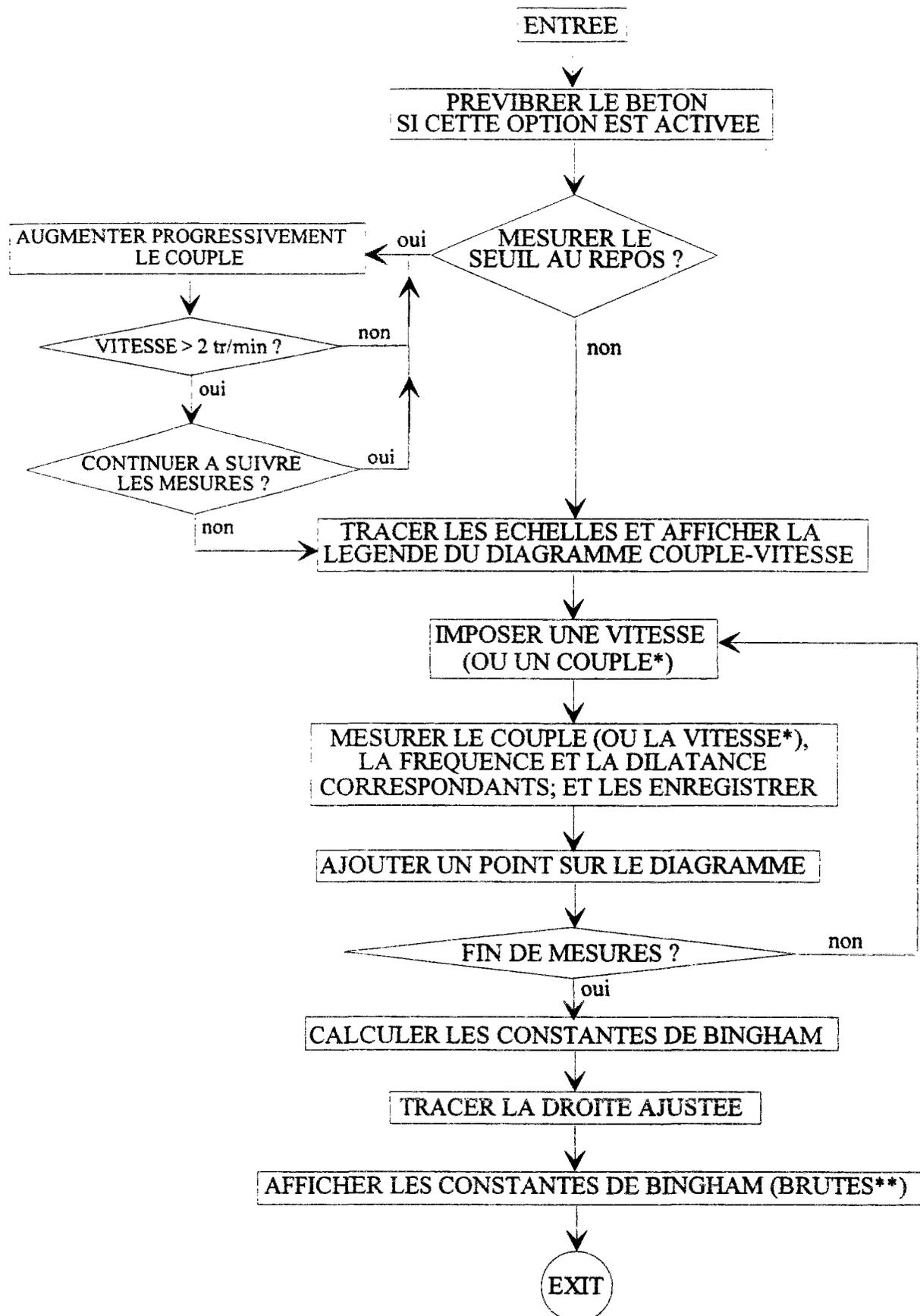


Figure C-3 : Schéma du sous-programme ESSAIRHEO. (* correspond au cas de l'essai à contrainte imposée; ** Compte non tenu du frottement du joint).

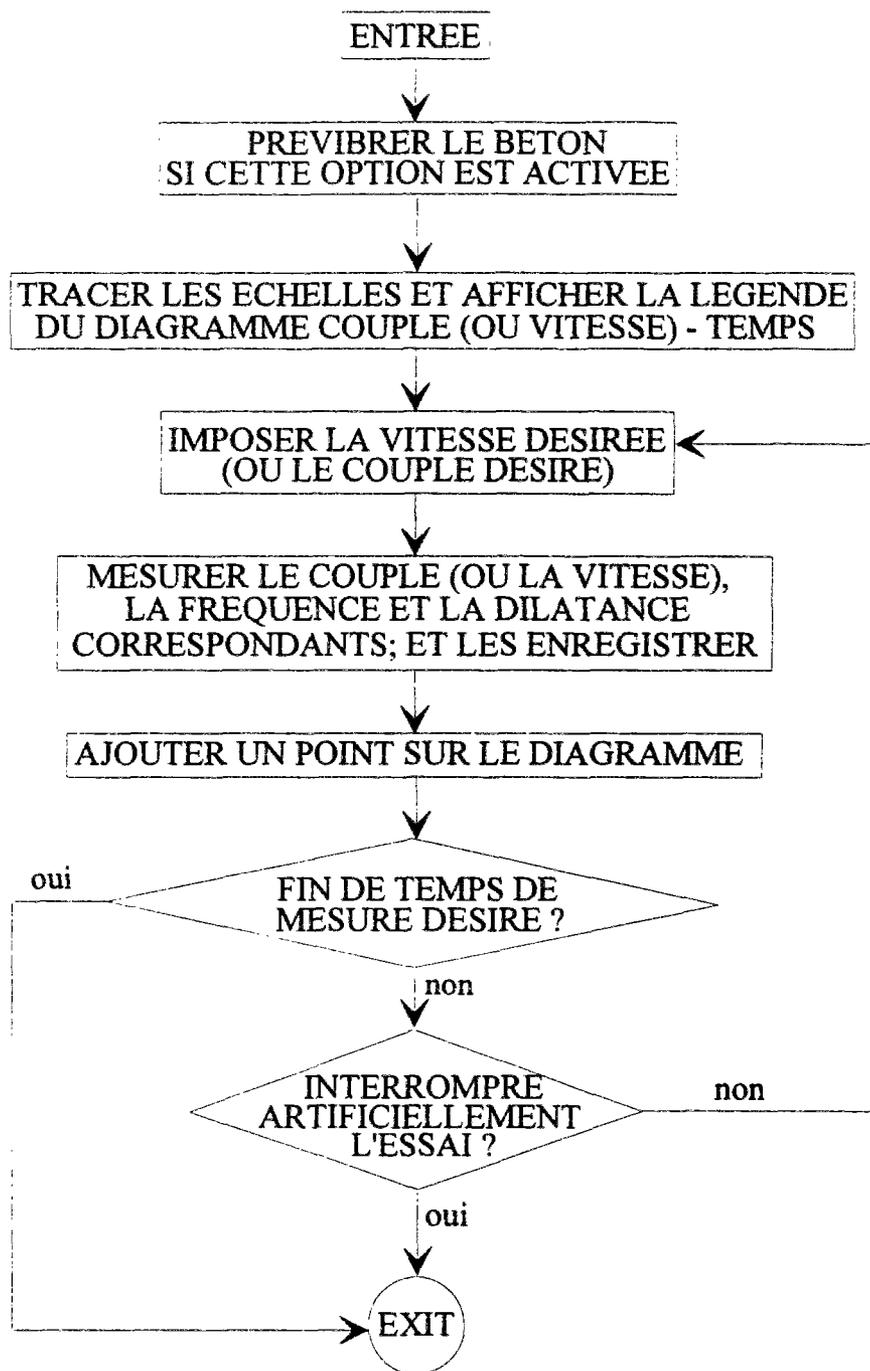


Figure C-4 : Schéma du sous-programme ESSAITHLX.

C.1.10) Module FICHPARA

Ce module, utilisant les modules GLOBMESA, MAGASIN et PARAMETR, contient deux sous-programmes LECTURE_FICHER et FICHER_PARAMETRE. Le premier permet de lire les paramètres contenus dans un fichier modèle et de les prendre en compte

pour le prochain essai. Ces paramètres peuvent être utilisés partout dans les modules utilisant GLOBMESA, et ont notamment pour fonction de définir divers essais.

Quand on lance le logiciel ADRHEO, le fichier modèle (normal.mdl) de paramètres est chargé automatiquement. Néanmoins, le sous-programme FICHIER_PARAMETRE permet de rappeler un autre fichier modèle de paramètres (lequel est soit fourni avec le logiciel, soit pré-paramétré par l'utilisateur), ou d'établir un nouveau fichier modèle de paramètres (cf. C.1.17). Le logiciel prend en compte toujours le fichier modèle de paramètres chargé (ou établi) le plus récemment.

C.1.11) Module GLOBMESA

Ce module ne contient qu'un petit nombre de *types globaux*, de *constantes globales* et de *variables globales*, que l'on utilise fréquemment dans le logiciel. Ceci simplifie d'une part la modification des types et des constantes globaux, et facilite d'autre part la transmission de valeurs des variables globales entre divers sous-programme.

C.1.12) Module IMAGES

Il utilise les deux modules GLOBMESA et MAGASIN. Les sous-programmes contenus sont faits pour afficher quelques menus et icônes.

C.1.13) Module LANESSAI

Ce module contient le sous-programme LANCERESSAI, qui utilise les modules CARTELEC, GLOBMESA, ESSAIRHE, ESSAITHX, MAGASIN et VITCOMD. Ce sous-programme permet notamment de fournir les noms de fichier de résultats pour divers essais, puis de lancer les essais correspondants.

C.1.14) Module LINEREGR

Il n'utilise que le module GLOBMESA, et ne contient que le sous-programme LINEAR, qui permet d'ajuster une droite à partir des mesures expérimentales, en utilisant la méthode des moindres carrés.

C.1.15) Module MAGASIN

De même que la précédente, ce module utilise seulement le module GLOBMESA. Les divers sous-programmes contenus concernent des fonctions que le logiciel utilise fréquemment, telles que les détections des entrées par clavier, le lecture de temps actuel, etc.

C.1.16) Module MISENPL

Ce module, utilisant les modules CARTELEC, GLOBMESA, LANESSAI, MAGASIN et VITCOMD, contient le sous-programme MISE_EN_PLACE. Ce dernier permet de faire vibrer l'échantillon aussi longtemps qu'on le désire, sans rotation de la pièce tournante. Le schéma de ce sous-programme est donné en figure C-5.

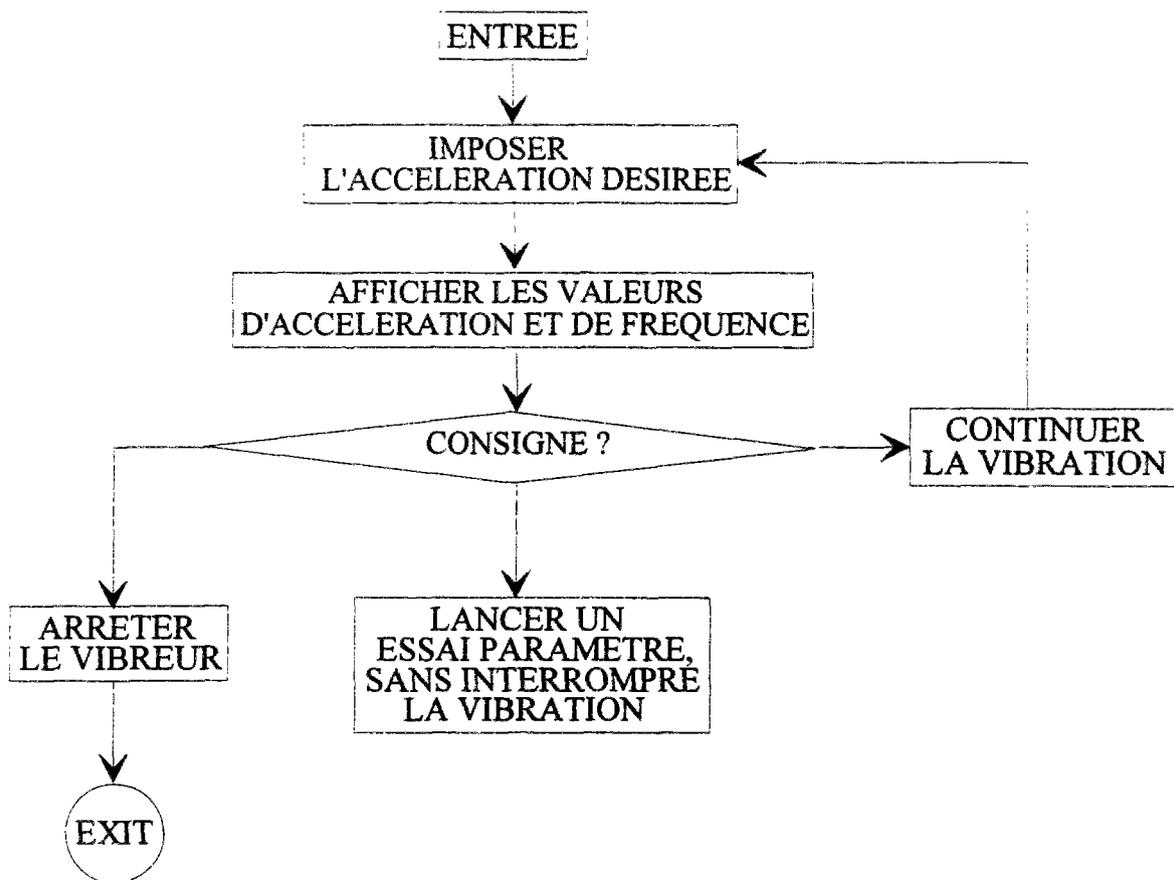


Figure C-5 : Schéma du sous-programme MISE_EN_PLACE.

C.1.17) Module PARAMETR

Ce module, utilisant les modules GLOBMESA et MAGASIN, contient les deux sous-programmes INPUTALARME et PARAMETRES. Le premier contient quelques opérations utilisées fréquemment dans le sous-programme PARAMETRES. Ce dernier permet de construire un fichier de modèle de paramètres, qui définit un essai que l'utilisateur désire effectuer. Le schéma du sous-programme PARAMETRES est présenté à la figure C-6.

En ce qui concerne la modification des valeurs des tableaux 1 à 3 (voir figure C-6), effectuée avec le clavier, ce sous-programme ne prend en compte que des chiffres et le point "." entrés, afin de limiter les erreurs qui peuvent provoquer l'arrêt du logiciel. Des entrées de données sont considérées dans un premier temps comme caractères, ce qui permet d'éliminer tous les caractères différents des chiffres et du ".". Le programme convertit ensuite l'entrée archivée à une valeur numérique.

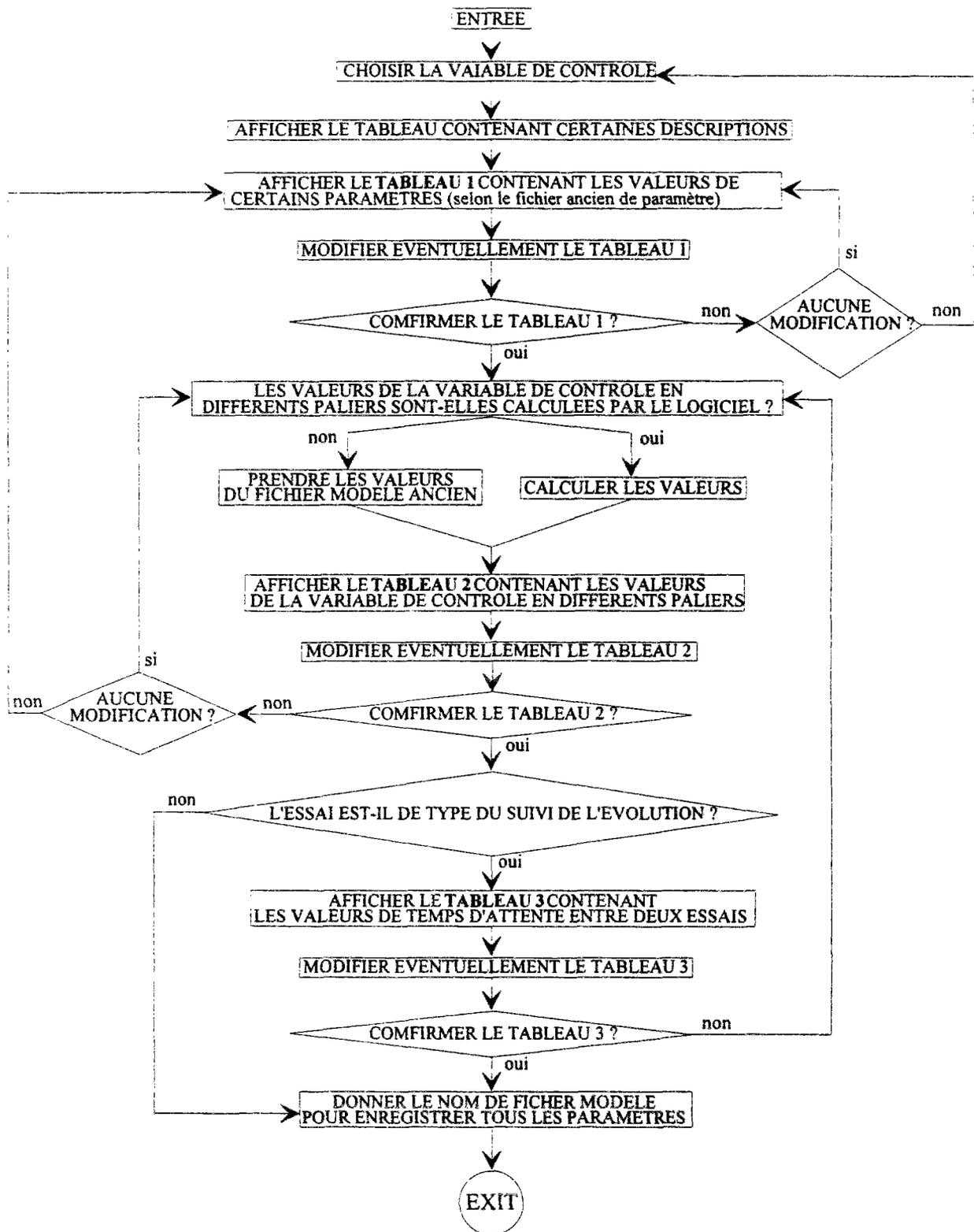


Figure C-6 : Schéma du sous-programme PARAMETRES.

C.1.18) Module PHRASE

Ce module, utilisant seulement le module GLOBMESA, contient un tableau de mots et de phrases, lesquels sont affichés sur l'écran ou s'apparaissent sur les fichiers de résultats des essais. Le langage peut être le français ou l'anglais selon l'option activée.

C.1.19) Module SHELL

Ce module, utilisant seulement le module GLOBMESA, contient les deux sous-programmes: ORDRE et REALORDRE. Ces derniers permettent respectivement de mettre en ordre les chiffres intégraux (ORDRE) et les chiffres décimaux (REALORDRE).

C.1.20) Module STATIQUE

Ce module utilise les modules CARTELEC, GLOBMESA, MAGASIN et VITCOMD. Il contient les deux sous-programme SEUILDILAT et ESSAISTATIQUE. Le premier permet de piloter l'essai de mesure de seuil au repos. Son schéma est présenté en figure C-7. Il est à noter qu'on a prévu un arrêt de 5 secondes pour le moteur après 12 secondes de blocage de ce dernier, compte tenu de l'échauffement important du moteur à l'état bloqué. Ce sous-programme peut être appelé dans les programmes ESSAIRHEO, ce qui permet de mesurer le seuil au repos avant d'effectuer un essai normal; il apparaît également dans le programme ESSAISTATIQUE, ce dernier ne permet d'effectuer que des essais de mesure de seuil au repos.

C.1.21) Module VITCOMD

Ce module, utilisant les modules CARTELEC, GLOBMESA et MAGASIN, contient le sous programme VITESSECOMD. Ce dernier permet de contrôler la vitesse de rotation du moteur principal, ainsi que la fréquence du vibreur. Il est à noter que l'accélération de vibration est en fait contrôlée par la variation de fréquence.

Le contrôle d'une variable X est réalisé par multiples communications entre l'ordinateur, les alimentations et les capteurs. On approche la valeur cherchée X_d par approximations linéaires successives, qui s'exprime :

$$n_{i+1} = n_i \mp 0,5(n_{\max} - n_{\min}) \frac{X_i - X_d}{X_{\max}}$$

où n représente le signal numérique de l'ordinateurs, l'indice i le i^{ème} pas d'itération, X_{\max} la valeur maximale de X, n_{\min} et n_{\max} les valeurs minimale et maximale de n. Le coefficient de 0,5 a pour but de modérer l'approximation, et d'éviter ainsi des variations brutales dans certains cas. Le signe "+" est utilisé dans les cas où les signaux analogiques sont décroissants avec les signaux numériques, tandis que le signe "-" correspondant est pour les cas contraires. Notons que, après 10 pas d'itérations, si la précision de la valeur de variable n'a toujours pas été satisfaite, on s'arrête à la dernière valeur, et on sort de la boucle d'itération.

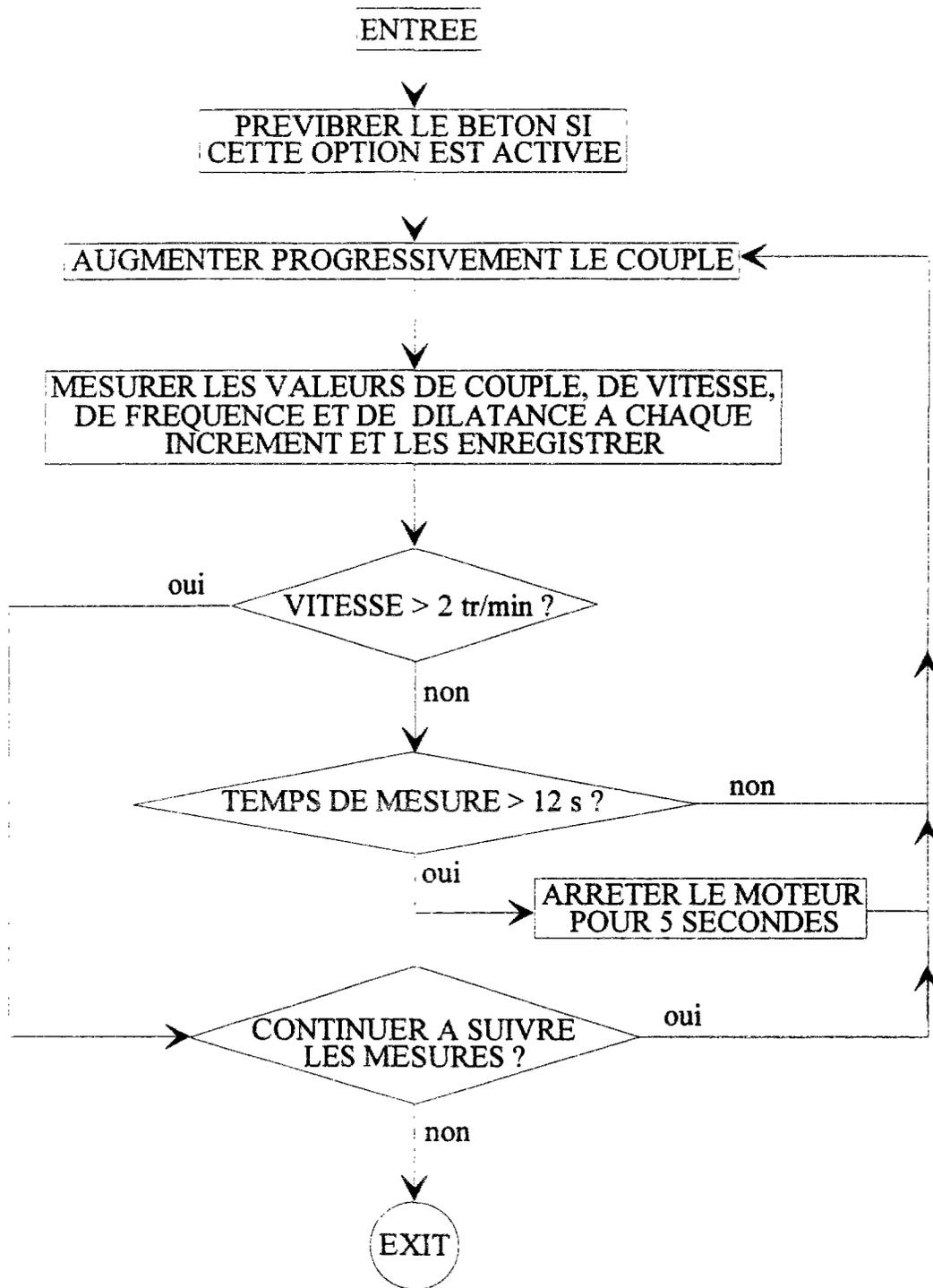


Figure C-7 : Schéma du sous-programme SEUILDILAT.

C.2) Utilisation du logiciel ADRHEO

Le logiciel contient 5 fichiers: **ADRHEO.exe**, **capteurs.coe**, **joint.mdl**, **normal.mdl** et **evolue.mdl**. Le fichier ADRHEO.exe est le programme exécutable. Le fichier capteurs.coe contient les coefficients qui permettent de calculer les valeurs de mesures à partir des signaux numériques. Les fichiers joint.mdl, normal.mdl et evolue.mdl sont respectivement les fichiers de paramètres qui définissent, de manière générale, un essai de mesure du frottement du joint, un essai normal et un essai du suivi de l'évolution rhéologique du béton. Il est à noter que les 4 premiers fichiers sont indispensables pour utiliser le logiciel.

Dans le répertoire où l'on installe le logiciel, il suffit de taper ADRHEO pour lancer le logiciel. Ce dernier charge automatiquement les fichiers capteurs.coe, normal.mdl et joint.mdl. L'utilisation du logiciel est en général guidée par des instructions affichées à l'écran (mode conversationnel). **Et, en cas d'urgence, on coupe les alimentations des moteurs, en même temps qu'on arrête le programme (soit par CRT+C, soit par redémarrage de l'ordinateur)**. Puis, on relance le logiciel; ce dernier met systématiquement d'abord en arrêt les moteurs. On peut ensuite redémarrer l'essai, après avoir réglé les problèmes apparus. Toutefois, les quelques descriptions du logiciel ci-après peuvent être utiles.

Tout d'abord, on donne quelques règles générales que l'on doit suivre en vue d'éviter tout problème informatique :

- Les chiffres suivent le système anglo-saxon. On utilise donc le point "." au lieu de la virgule "," pour exprimer des chiffres décimaux. Par ailleurs, on souligne deux particularités de ce programme :

- * les chiffres inférieurs à 1 doivent être précédés d'un "0";
- * les chiffres doivent s'exprimer de façon normale.

On donne quelques exemples suivants :

exemple 1 : 0.2 est correct; 0,2 ou .2 ou 2E-1 sont incorrects.

exemple 2 : 3600 est correct; 3,6E3 ou 3.6E3 sont incorrects.

- En ce qui concerne le nom de fichier, comme pour toutes les applications informatiques, le nom principal est composé en général de caractères alphabétiques, de chiffres, et du tiret en bas "_" (certains logiciels acceptent également le tiret au milieu "-", mais non celui-ci), dont le nombre total ne peut dépasser 8. Ce nom principal, commençant toujours par caractère alphabétique, peut également être suivi par un suffixe, avec le séparateur point ".". Le suffixe, s'il y en a, est en principe composé de 3 caractères au maximum. Dans notre programme, nous avons fixé les suffixes pour différents types de fichiers (ceci est par ailleurs la fonction principale des suffixes). Ils sont :

- .mdl** pour les fichiers modèles de paramètres;
- .ftr** pour les fichiers de résultats de mesure du frottement du joint;
- .out** pour les fichiers de résultats des essais de type "normal" et de type "suivi";
- .st** pour les fichiers de résultats de l'essai de mesure de seuil au repos.
- .thx** pour les fichiers contenant des informations pendant les temps d'attente entre deux essais pour les essais de type "suivi".

Par conséquent, partout dans le programme, on ne donne que le nom principal du fichier quand il s'agit d'une demande de nom de fichier, sauf pour l'option DIAGRAMME du menu principal, où l'on est obligé de donner également le suffixe afin de distinguer les différents types de résultats. On reviendra plus loin sur ce point.

Revenons à présent au logiciel. Après avoir lancé le logiciel, on voit sur l'écran le menu suivant qui permet de choisir un langage :

1 : VERSION EN FRANCAIS (FRENCH VERSION)

2 : VERSION EN ANGLAIS (ENGLISH VERSION)

VOTRE CHOIX (YOUR CHOICE) :

On peut entrer le chiffre correspondant à l'option préférée. Dans ce rapport, à titre d'exemple, on ne donne que des descriptions du programme correspondant à l'option 1. On entre alors le chiffre 1. Il vient ensuite l'icône suivante :

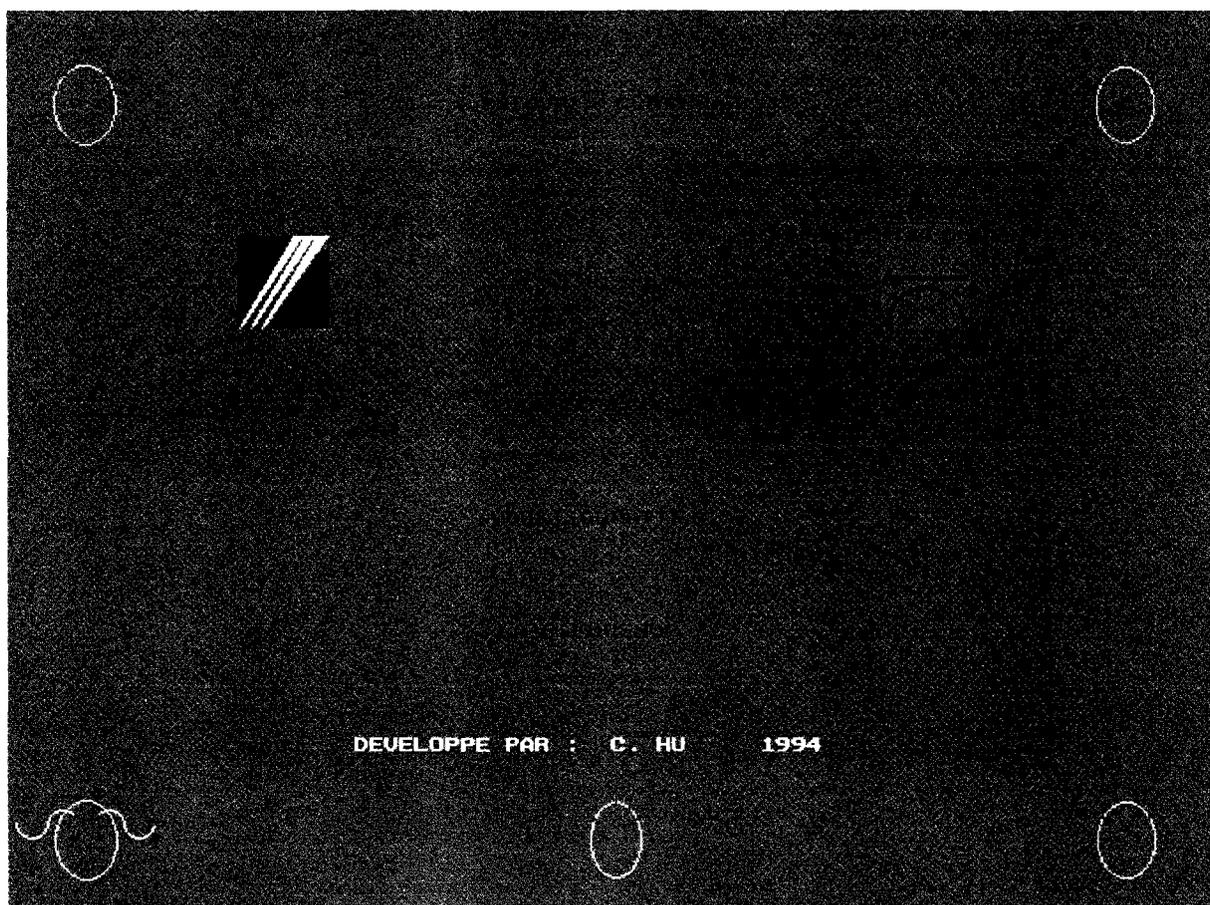


Figure C-7 : Icône d'accueil.

On passe au menu principal suivant en tapant sur la touche retour "↵" :

- 0 : FIN
- 1 : CALIBRATION
- 2 : PARAMETRES DE L'ESSAI
- 3 : MESURE DU FROTTEMENT DU JOINT
- 4 : VIBRATION SEULE
- 5 : ESSAI BETON
- 6 : MESURE DU SEUIL AU REPOS
- 7 : DIAGRAMME

VOTRE CHOIX :

On peut entrer le chiffre correspondant à l'option désirée. Exceptée l'option 0, toutes les autres options permettront de revenir à ce menu principal, après avoir effectué la tâche correspondante. On détaille maintenant les différentes options du menu.

- *0 = fin*

Elle permet de sortir définitivement du programme.

- *1 = calibration*

Elle permet de calibrer les mesures du rhéomètre (couple, vitesse, fréquence et dilatace). Ceci est réalisé par la comparaison des valeurs de mesures du rhéomètre et de celles données par l'étalonnage, suivie d'une correction éventuelle de leurs coefficients (appelés *unités* dans le programme), qui concernent les calculs de valeurs de mesures à partir des signaux numériques.

Après avoir choisi cette fonction, on voit le sous-menu suivant :

- 0 : FIN DE CALIBRATION
- 1 : VITESSE DE ROTATION
- 2 : COUPLE
- 3 : FREQUENCE DE VIBRATION
- 4 : DILATANCE

VOTRE CHOIX :

Le principe de fonctionnement des options 1 à 4 sont similaires. A titre d'exemple, on suit ce qui se passe pour l'option 1. Tapons le chiffre 1; on voit sur l'écran les indications et les questions suivantes :

ENTREZ UNE VITESSE DE ROTATION (0.05-5 TOURS/SECONDE) : 2
 VITESSE DE ROTATION MESUREE (TOURS/SECONDE) : 2.0022
 ENTRER LA VITESSE DE ROTATION REELLE (TOURS/SECONDE) : 2.2400
 UNITE DE TEMPS PRECEDENTE (ms) : 0,1975

NOUVELLE UNITE DE TEMPS PRECEDENTE (ms) : 0,17653

VOULEZ VOUS RETENIR LA NOUVELLE UNITE DE TEMPS ? (O/N) N

AUTRE CALIBRATION DE VITESSE DE ROTATION ? (O/N) N

La première phrase demande la vitesse que l'on souhaite imposer. En l'occurrence, on indique 2 tr/s. Puis, on voit que le programme affiche sur l'écran la vitesse mesurée (2.0022 tr/s). Il demande ensuite la vitesse réelle (en fait, celle-ci doit se comprendre comme la valeur mesurée par un autre outil supposé plus précis). Ici, on donne une valeur de 2.2400 tr/s. Il affiche alors les valeurs de l'unité précédente (existante) et de la nouvelle unité. Remarquons que la correction effectuée est l'inverse de celle décrite au C.1.3, du fait qu'il s'agit ici de l'unité de temps, qui est proportionnelle à l'inverse de la vitesse. Par ailleurs, il en est de même pour la fréquence. Le programme demande ensuite si l'on veut garder la nouvelle unité. S'il on répond O (i.e. oui), le programme remplacera définitivement l'unité ancienne par la nouvelle. Par contre, s'il on entre N (i.e. non), comme dans l'exemple actuel, le programme ne prendra pas en compte cette modification. Pour la question suivante, on peut répondre soit O afin de continuer la calibration, soit N pour sortir de la calibration de cette mesure.

Un étalonnage nécessite en principe un certain nombre de répétition avant qu'on n'obtienne une conclusion définitive. Cependant l'option CALIBRATION propose de modifier le coefficient de mesure après chaque comparaison de valeurs. Par ailleurs, les coefficients modifiés seront enregistrés et utilisés pour tous les mesures qui suivent (même après être sorti du programme). Un mauvais étalonnage est alors catastrophique. **Il est donc fortement déconseillé d'utiliser l'option CALIBRATION en modifiant les coefficients de mesures sans en être sûr!** Pour un nombre de mesures insuffisant, il suffit de répondre N (i.e. non) à la question suivante :

VOULEZ VOUS RETENIR LA NOUVELLE UNITE DE x ? (O/N)

x peut être le TEMPS (qui sert à calculer la vitesse et la fréquence), le COUPLE ou le DEPLACEMENT (qui sert à calculer la dilataance).

Toutefois, cette option permet d'effectuer de temps en temps des contrôles simples. Dans les cas de doutes, on passera à des étalonnages plus approfondis. Ensuite, on peut modifier directement dans le fichier les valeurs d'unités.

- **2 = paramètres de l'essai**

Cette option permet de rappeler un fichier de paramètres existant ou d'en établir un. Les paramètres contenus dans un fichier modèle servent à définir les essais de type normal ou du suivi de l'évolution. Il n'est pas exclu que, dans certains cas, certains paramètres soient inutiles; on peut alors ignorer leurs valeurs ou leur donner des valeurs quelconques.

S'il on entre le chiffre 2, on voit le sous-menu suivant :

0 : FIN

1 : SPECIFICATION DES PARAMETRES

2 : AFFECTER LE NOM DE FICHER DES PARAMETRES

VOTRE CHOIX :

L'option 2 permet de rappeler un fichier de modèle existant. Le choix de cette option provoque la demande suivante de nom de fichier :

NOM DU FICHIER DES PARAMETRES : (RETOUR = FICHIER MODELE: normal.mdl)

Comme évoqué plus haut, on donne ici seulement le nom principal du fichier cherché, pour lequel le programme ajoute automatiquement le suffixe ".mdl". Si l'on tape simplement le retour (↵), le programme ne charge aucun nouveau fichier; il garde le fichier déjà chargé (en l'occurrence, c'est "normal.mdl").

Cependant, s'il on décide d'effectuer un essai particulier, pour lequel aucun fichier modèle n'existe, on peut alors prendre l'option 1. Le programme demande d'abord le choix de la variable de contrôle dans le menu ci-dessous :

- 0 = ANNULER
- 1 = (VITESSE IMPOSEE)
- 2 = (COUPLE IMPOSE)

CHOIX PRECEDENT : 1

NOUVEAU CHOIX :

Si l'on se trompe d'option, on peut en sortir en entrant le chiffre "0". Sinon, on choisit en général la vitesse comme variable de contrôle. On passe donc au tableau suivant :

TYPE ESSAI (1=NORMAL 2=THIXOTROPE 3=EVOLUTION)	3	
TEMPS TOTAL DE L'ESSAI DE TYPE 3 (SECONDES)	3600	DEPLACEZ AVEC LES
NOMBRE DE REPETITIONS DE L'ESSAI DE TYPE 3	4	TOUCHES DE FLECHE
PROTOCOLE (1=↓ 2=↑/↓ 3=↓/↑ 4=↓+VIBR/↓)	4	
NOMBRE DE POINTS A MESURER (<= 20)	12	F5=ANNULEZ TOUTES
VITESSE DE ROTATION MINIMALE (<= 5 t/s)	0.20	LES MODIFICATIONS
VITESSE DE ROTATION MAXIMALE (<= 5 t/s)	0.80	
VITESSE DE ROTATION ENTRE DEUX ESSAIS (<= 1 t/s)	0.00	F1=O.K.
ACCELERATION DE PREVIBRATION (0 OU 1-4 g)	4.00	
FREQUENCE CORRESPONDANTE (Hz)	46.40	
ACCELE. DE VIBR. PENDANT L'ESSAI(0 OU 1-4 g)	4.00	
FREQUENCE CORRESPONDANTE (Hz)	46.40	

Maintenant, on peut modifier les valeurs de paramètres à la colonne de chiffres. On donne quelques descriptions ci-après pour certains paramètres.

- **TYPE ESSAI** : Le choix 1 représente l'essai normal, visant à mesurer le seuil et la viscosité (pouvant avec et/ou sans vibration). Le choix 2 représente l'essai qui mesure

l'évolution du couple à vitesse constante (ou l'évolution de la vitesse à couple constante). La dernière option, choix 3, est l'essai du suivi de l'évolution rhéologique du béton. Il répète périodiquement l'essai normal pendant une durée de suivi.

- **PROTOCOLE** : Les entrées des chiffres 1 à 4 correspondent respectivement aux protocoles 1 à 4. Le protocole 1 permettant d'effectuer un seul test, correspond au protocole présenté en figure 3-16. Les protocoles 2 à 4 permettent d'effectuer deux tests successifs dans un essai. On propose pour le protocole 2 de réaliser d'abord un test avec la vitesse croissant par paliers, puis, d'effectuer le deuxième test avec la vitesse décroissant par paliers. Le protocole 3 inverse l'ordre des tests de protocole 2. Pour les 3 premiers protocoles, les tests sont effectués soit tous avec vibration, soit tous sans vibration, selon la définition du paramètre concernant la vibration. En revanche, le protocole 4 permet de réaliser un test avec vibration (le premier), et l'autre sans vibration; les deux tests tous sont réalisés avec la vitesse décroissant par paliers. Toutefois, si l'on met la valeur nulle pour l'accélération de la vibration, les deux tests seront tous sans vibration. Il est à noter que les protocoles proposés ici permettent simplement au programme de calculer les valeurs de vitesse en différents paliers. Tout de même, il est possible de modifier ces valeurs comme ce qu'on désire à l'étape suivante (voir plus loin).

- **NOMBRE DE POINTS A MESURER** : C'est le nombre total de mesures (vitesse N_i , couple Γ_i) dans un essai. Si ce dernier comprend deux tests, chaque test aura la moitié du nombre de mesures pour dépouiller les caractéristiques du matériaux. Pour un matériau de Bingham, on a une relation affine entre la vitesse et le couple (cf. §3.2). Dans ce cas, 5 points différents, en principe, sont suffisants pour ajuster une droite. Dans ce programme, le nombre maximum est limité à 20 points.

- **VITESSE DE ROTATION MINIMALE (ou MAXIMALE)** : Ces deux paramètres permettent d'encadrer la plage de variation de la vitesse. On prend en général 0.2 tr/s pour le minimum, en vue d'éviter l'instabilité de la rotation, et 0.8 tr/s pour le maximum, afin de limiter la force centrifuge (voir §4.1).

- **VITESSE DE ROTATION ENTRE DEUX ESSAIS** : Il y a une possibilité dans l'ADRHEO de laisser tourner le rhéomètre à une vitesse constante entre deux essais (pour les essais du suivi de l'évolution rhéologique). C'est alors ici qu'on définit cette vitesse. Si on lui donne une valeur nulle, le rhéomètre demeure au repos entre deux essais (c'est par ailleurs le protocole que nous préconisons).

- **ACCELERATION DE PREVIBRATION** : Une valeur non nulle ici entraînera une vibration du béton pendant 15 secondes avant d'effectuer un essai. L'unité d'accélération est g (accélération de la pesanteur). Cette opération permet, d'une part, de mettre en place l'échantillon après le chargement d'un béton pas suffisamment fluide, d'autre part, d'isoler le phénomène de thixotropie. Il est à noter qu'on a exclu la gamme d'accélération entre 0 et 1 g, afin d'être suffisamment loin de la fréquence de résonance de l'appareil, qui correspond à une accélération de 0,25 g environ.

- **ACCELERA. DE VIBR. PENDANT L'ESSAI** : Avec ce paramètre, on décide si la vibration intervient pendant les tests des essais de protocoles 1 à 3 et le premier test des essais du protocole 4.

Etant donné que l'amplitude de la vibration est fixé mécaniquement dans le BT RHEOM, la connaissance de l'accélération permet de connaître la fréquence. Le programme calcule ainsi automatiquement la fréquence correspondant à l'accélération demandée, et affiche sa valeur pour information.

Notons qu'à cette étape, on peut toujours annuler ce qui apparaît au tableau de chiffres et revenir au menu précédent, en tapant la touche "F5", comme indiqué dans le tableau à droite. En revanche, si l'on trouve que tous les paramètres apparus sont corrects, on peut passer à l'étape suivante en tapant la touche "F1"; la question suivante apparaît alors à l'écran :

CALCUL AUTOMATIQUE DES VITESSES (OU COUPLES) EN DIFFERENTS PALIERS ? (O/N) :

La réponse "O" laisse alors le programme calculer les valeurs de la vitesse (ou du couple si l'on a choisi le couple comme la variable de contrôle) en différents paliers, selon le protocole indiqué, tandis que la réponse "N" implique que le programme prendra les mêmes valeurs que celles du fichier déjà chargé. Quoi qu'il en soit, on passe ensuite à un tableau de valeurs de vitesses. Supposons qu'on réponde "O", ce tableau contient les valeurs suivantes :

CALCUL AUTOMATIQUE DES VITESSES (OU COUPLES) EN DIFFERENTS PALIERS ? (O/N) :
O

VITESSES DE ROTATION EN DIFFERENTS PALIERS (t/s) :

0.80 0.68 0.56 0.44 0.32 0.20 0.80 0.68 0.56 0.44
0.32 0.20

On peut modifier ces valeurs si elles ne sont pas satisfaisantes, ou changer l'ordre de mesures (ce dernier suivra pendant l'essai celui des valeurs apparus à l'écran, comme affiché ci-dessus). Par ailleurs, comme indiqué sur l'écran, on peut taper la touche "F5" pour abandonner les valeurs apparaissant au tableau, et revenir à l'étape précédente, ou encore jusqu'au menu où l'on choisit la variable de contrôle. Par contre, si l'on a terminé la modification, on tape la touche "F1" pour passer à l'étape suivante.

En ce qui concerne les essais de type différent de 3 (suivi de l'évolution), l'étape suivante sera de donner un nom de fichier pour enregistrer tous les paramètres. Cependant, comme on a choisi le type 3 dans cet exemple, on doit passer encore à une autre étape où l'on détermine les temps d'attente entre les essais. On voit alors à l'écran :

TEMPS D'ATTENTE ENTRE LES ESSAIS (SECONDES) :

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
1200 1200 1200

Les chiffres 1 à 10 représentent respectivement le numéro pour les temps d'attente entre essai 1 et 2, 2 et 3, etc. Le nombre maximal de répétition est limité à 11 (y compris celui à temps 0), qui est en général largement suffisant. Le programme propose une période identique (en l'occurrence, 1200 secondes) pour la répétition des essais. Cependant, on peut imposer des périodes différentes en modifiant les valeurs. Jusqu'à ce stade, il n'est pas trop tard pour changer d'idée. On peut remonter aux étapes précédentes en tapant "F5". Par contre, si l'on frappe ici la touche "F1", il n'y a qu'à donner un nom de fichier (tout de même, on peut donner un nom quelconque et détruire ce fichier plus tard). On voit alors à l'écran l'instruction suivante :

NOM DU FICHIER DES PARAMETRES : (RETOUR=essai.mdl)

Comme évoqué plus haut, on ne donne que le nom principal. Le programme ajoute automatiquement le suffixe ".mdl". On sera averti si l'on a donné un nom existant. A l'utilisateur à décider si le programme écrase les contenus existant dans le fichier ou si l'on lui donne un autre nom. Par ailleurs, notons qu'il est interdit de prendre les noms suivants: "joint", "normal" et "evolue", lesquels sont réservés pour les fichiers du logiciel. Si l'on ne lui donne aucun nom, en tapant la touche retour, le programme prendra le nom "essai".

- **3 = mesure du frottement du joint**

Cette option permet de mesurer le frottement du au joint et le couple parasite qui en découle. Après avoir choisi cette option, le programme demande de fournir un nom de fichier pour enregistrer les résultats de l'essai. L'affiche à l'écran est la suivante :

0 = ANNULER

NOM DU FICHIER DE RESULTATS DE L'ESSAI RHEOLOGIQUE :

(RETOUR=rheoresu)

On lui donne alors le nom principal, sans suffixe; le programme ajoutera automatiquement le suffixe ".ftr". Il est à noter qu'on doit se souvenir de ce suffixe quand on utilise l'option 7 (DIAGRAMME) afin de permettre au programme de distinguer différents fichiers ayant le même nom principal. Si l'on ne donne aucun nom, en tapant simplement la touche retour, le programme prendra le nom "rheoresu". Le programme affiche le diagramme de mesure au fur et à mesure du déroulement de l'essai. La figure C-8 montre un diagramme à la fin de l'essai, où T représente le couple et N la vitesse de rotation. Les deux droites en couleur respectivement bleue et rosée, (malheureusement, on ne distingue pas la couleur ici) correspondent respectivement à deux tests.

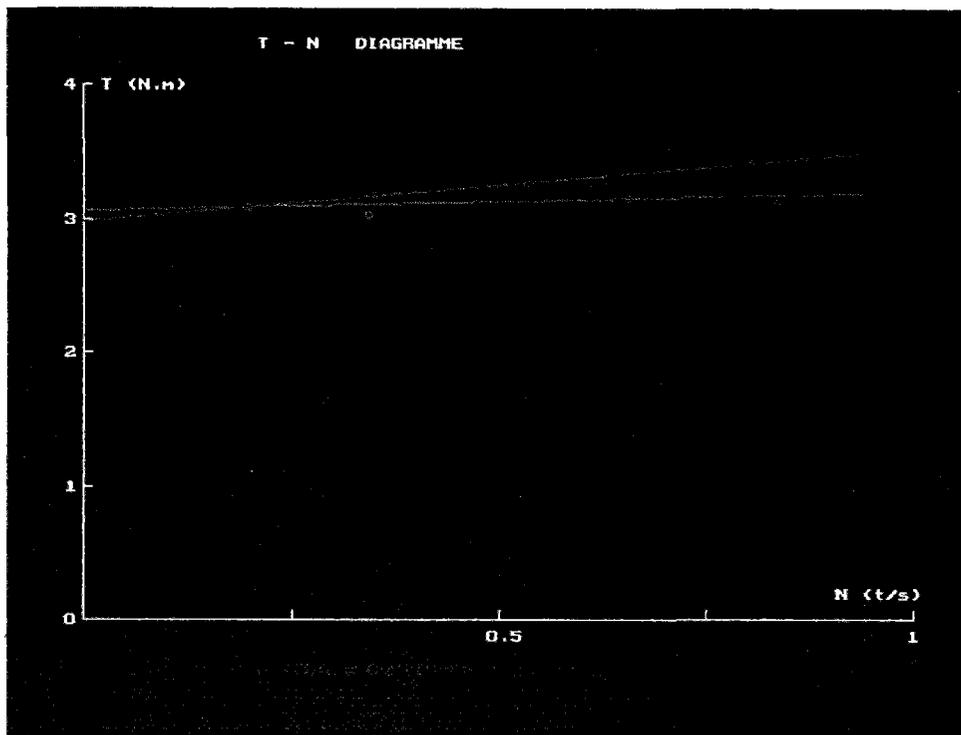


Figure C-8 : Diagramme de mesure du couple du au frottement du joint.

Après avoir tapé la touche retour, on voit sur l'écran les informations suivantes :

--- PREMIER TEST ---

FONCTION AJUSTEE : $T = 2.9795 + 0.5376 N$

COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.96530

ECART DE L'ESTIMATION : 0.035

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 901.76 Pa

--- DEUXIEME TEST ---

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.0628 + 0.1361 N$

COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.38622

ECART DE L'ESTIMATION : 0.082

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 869.62 Pa

DUREE DE L'ESSAI : 190 SECONDES

(RETOUR = CONTINUER)

Il est à noter que seule la seconde mesure est utilisée car elle prend en compte la mise en place du joint. En vue de faciliter la correction sur la mesure de seuil, le programme donne ici la valeur du "seuil équivalent de joint", qui est en fait le couple du au joint divisé par

un coefficient de géométrie, comme si ce couple provenait des contraintes de cisaillement réparties sur la section horizontale de l'éprouvette.

Enfin, tapant à nouveau la touche retour, on revient au menu principal.

- **4 = vibration seule**

Cette option permet de n'effectuer que la vibration de l'échantillon, mais aussi longtemps que le désire l'utilisateur. **Attention, ne pas lancer la vibration sans avoir chargé correctement du béton dans le récipient (notamment dans le cas du récipient vide) !** Car dans les cas d'un échantillon trop léger ou trop lourd, le plateau vibrant sera en butée, et n'aura pas assez de course pour la vibration. Si l'on se trompe de cette option, pas de panique! La vibration ne part pas tout de suite. La réponse négative à la question suivante :

COMMENCER LA VIBRATION ? (O/N)

permet d'en sortir. Par contre, la réponse positive démarre la vibration dont l'accélération est définie par le paramètre concernant la prévibration (voir option 2 du menu principal). Ensuite, le programme répète périodiquement la question si l'on veut arrêter cette vibration; en l'absence de réponse, ou si elle est négative, la vibration continue. Suite à la réponse "O", on aura la possibilité de lancer directement un essai (comme ce qu'on fait avec l'option 5 du menu principal), ou d'arrêter la vibration et de retourner au menu principal.

- **5 = essai béton**

Cette option permet de lancer les essais proprement dits, avec les paramètres du fichier modèle sélectionné dans le menu 2 (chaque fois que l'on lance le logiciel, le programme charge automatiquement le fichier modèle "normal.mdl"). Après avoir tapé le chiffre "5", on voit sur l'écran la demande suivante du nom de fichier pour enregistrer les résultats de l'essai :

0 = ANNULER

NOM DU FICHIER DE RESULTATS DE L'ESSAI RHEOLOGIQUE :

(RETOUR=rheoresu)

On ne donne que le nom principal; le programme ajout automatiquement le suffixe ".out". Il est conseillé de prendre toujours le même nom principal que celui pour l'essai de mesure du frottement du joint, afin de reconnaître facilement tous les renseignements sur un essai. Mais, par défaut, le programme prend le nom "rheoresu". Comme déjà évoqué, la possibilité existe de mesurer le seuil au repos juste avant d'effectuer un essai de mesure des constantes binghamiennes. Ceci dépend de la réponse de la question suivante :

VOULEZ-VOUS MESURER LE COUPLE AU DEMARRAGE ? (O/N) :

Dans le cas de la réponse négative, le programme lance tout de suite l'essai de mesure des constantes binghamiennes. Sinon, il demande encore un nom pour enregistrer les résultats de mesures de seuil au repos, en affichant l'instruction suivante :

0 = ANNULER

NOM DU FICHIER DE RESULTATS DE MESURE DE SEUIL AU REPOS :

(RETOUR=rheoresu)

De même, on ne donne que le nom principal, en général identique que ceux pour les essais de mesure du frottement du joint et de mesure des constantes de Bingham, le programme, ajoute automatiquement le suffixe ".st". Il est à noter chaque fois qu'on voit à l'écran l'affichage "**0 = ANNULER**", le logiciel permet d'annuler l'opération en cours. Cependant, ici, l'entrée d'un nom de fichier déclenche la mesure du couple au démarrage (sert à déduire le seuil au repos). Comme évoqué plus haut, on doit rester vigilant pour des essais avec vibration. **Ne pas lancer un essai avec vibration sans avoir chargé correctement du béton dans le récipient (notamment dans le cas du récipient vide) !**

Pour les essais du protocole 4 (cf. option 2 du menu principal), la mesure de seuil au repos est réalisée sans vibration. Pour ceux des protocoles 1 à 3, cette question dépend du paramètre concernant la vibration pendant l'essai (cf. option 2 du menu principal). Pendant l'essai, le programme affiche au fur et à mesure à l'écran les valeurs de la vitesse, du couple, de la dilatance, etc. Du fait que le moteur au démarrage peut s'échauffer beaucoup quand il est bloqué, on l'arrête pour 5 secondes toutes les 12 secondes de blocage. Quand la vitesse de rotation est égale ou supérieure à 0.2 tr/s, on considère que l'écoulement du béton commence. Ce n'est qu'à partir de ce moment-là qu'on a la possibilité d'arrêter cette mesure, suivant les instructions affichées à l'écran. Toutefois, le programme continue de prendre les mesures jusqu'à ce qu'on lui donne la consigne d'arrêt.

Ensuite, le programme commence l'essai de mesures de constantes de Bingham. On voit que les points de mesures sont dessinés au fur et à mesure du déroulement de l'essai, sur le diagramme couple (**T**) en fonction de vitesse de rotation (**N**). La figure C-9 montre un diagramme à la fin d'un essai normal.

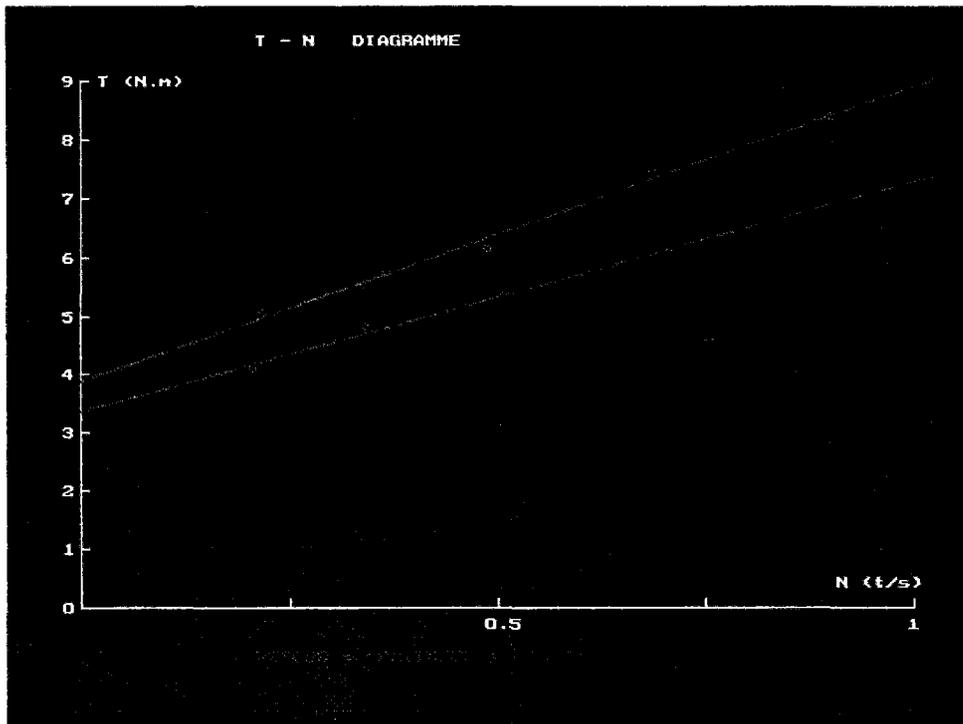


Figure C-9 : Diagramme couple en fonction de vitesse pour un essai de béton en utilisant le fichier modèle de paramètres normal.mdl.

Les droites en couleur bleue et rosée (qu'on voit mal ici) représentent respectivement les résultats du premier et du deuxième tests. Dans le cas d'un seul test, on ne verra qu'une seule droite. Ensuite, en tapant la touche retour, on peut passer à l'affichage suivant :

--- PREMIER TEST --- (SOUS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.3663 + 3.9281 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99577
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.102

SEUIL DE CISAILLEMENT 934.48 Pa
 VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 172.88 Pa.s

--- DEUXIEME TEST --- (SANS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.8944 + 5.0203 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99658
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.112

SEUIL DE CISAILLEMENT 1081.10 Pa
 VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 220.94 Pa.s

DUREE DE L'ESSAI : 261 SECONDES

(RETOUR = CONTINUER)

On a sur cette affichage les valeurs de viscosité plastique (corrigées suivant ce qu'on a proposé au chapitre 3.2.2), les valeurs brutes de seuil (compte non tenu du frottement du joint), ainsi que les autres informations tels que les coefficients de corrélation des droites ajustées. Après avoir noté les résultats, on peut taper la touche retour pour revenir au menu principal.

A noter que pour un essai du suivi de l'évolution, le logiciel demande encore un nom principal de fichier pour enregistrer des informations pendant les temps d'attente entre deux essais (ceci est prévu en particulier pour les cas où l'on laisse tourner le rhéomètre pendant le temps d'attente). Le suffixe ".thx" est ajouté automatiquement par le logiciel. Par ailleurs, les affichages se déroulent automatiquement, et le programme retourne au menu principal à la fin de l'essai.

- **6 = mesure du seuil au repos**

Cette option ne permet de mesurer que le seuil au repos du béton. Le programme demande d'abord le nom de fichier pour enregistrer les résultats, comme pour l'option précédente. Ensuite, il demande le nombre de répétition, car, on a la possibilité d'effectuer plusieurs mesures dans une durée donnée, ce qui permet de suivre l'évolution du seuil au repos. On doit donc indiquer le temps d'attente entre deux essais le cas échéant. Par ailleurs, on doit indiquer également si les mesures désirées seront effectuées avec vibration, et avec quelle vibration (si oui). Le déroulement de l'essai est identique à celui évoqué à l'option précédente.

- **7 = diagramme**

Cette option permet de visualiser les diagrammes couple-vitesse et les informations complémentaires, ainsi que le diagramme couple-temps (ou vitesse-temps) et le diagramme dilatance-couple (qui permet d'étudier la relation entre la dilatance et la contrainte).

Le logiciel demande d'abord le nom de fichier de résultats. **C'est le seul endroit où l'on doit donner le nom principal et son suffixe**, afin de distinguer différents fichiers portant le même nom principal (en effet, on a conseillé d'utiliser le même nom principal pour les fichiers de résultats de tous les essais concernant le même échantillon). On doit préciser également le numéro de l'essai auquel on s'intéresse. Ceci est fait surtout pour les essais du suivi de l'évolution. On donne pour les autres types d'essai le chiffre "1". Si tous sont bien saisis, on verra ensuite ce qu'on attend.

On a donc présenté à peu près toutes les fonctions du logiciel. Ce logiciel, d'une conception ouverte, offre les possibilités aux utilisateurs d'effectuer différentes études rhéologiques. Cependant, dans la plupart des cas, notamment pour les praticiens, on s'intéresse surtout aux mesures de caractéristiques de Bingham. On présente donc au paragraphe suivant un exemple de leurs mesures.

C.3) Exemple des mesures des constantes de Bingham

Comme évoqué au §3.5, on doit mesurer le frottement du joint avant tout essai de béton. Supposons qu'on a lancé le logiciel, et qu'on est arrivé au menu principal, on choisit alors l'option 3 pour la mesure de frottement du joint. Après avoir tapé le chiffre "3", on donne le nom de fichier pour enregistrer les résultats. Ici, on prend le nom "bt1_1".

On verra ensuite le diagramme de type présenté en figure C-8, suivi d'un affichage des résultats de premier dépouillement, par exemple :

-- PREMIER TEST --

FONCTION AJUSTEE : $T = 2.9795 + 0.5376 N$

COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.96530

ECART DE L'ESTIMATION : 0.035

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 901.76 Pa

-- DEUXIEME TEST --

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.0628 + 0.1361 N$

COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.38622

ECART DE L'ESTIMATION : 0.082

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 869.62 Pa

DUREE DE L'ESSAI : 190 SECONDES

(RETOUR = CONTINUER)

On note la valeur moyenne du seuil équivalent de joint du deuxième test (qui prend en compte la mise en place du joint) : 869,6 Pa. On peut ensuite revenir au menu principal en tapant la touche retour ↵. Il est à noter qu'on peut consulter ces résultats soit par l'option 7 (DIAGRAMME) du menu principal, soit par d'autres moyens tels que les logiciels Excel, Word, etc. Les contenus de fichier (bt1_1.ftr) sont les suivants :

******* FICHER DE RESULTATS : bt1_1.ftr *******

NOM DU FICHER DE PARAMETRES : joint.mdl

VARIABLE DE CONTROLE : 1 (VITESSE IMPOSEE)

TYPE DE DIAGRAMME : T_N

PROTOCOLE : 4

DATE : 04/10/1994 , HEURE : 11:14:40

No.	1			
POINT	VITESSE	COUPLE	FREQ.	DILAT.
10	(t/s)	(N.m)	(Hz)	
1	0.801	3.446	0.000	0.0000
2	0.634	3.262	0.000	0.0003
3	0.528	3.272	0.000	0.0002
4	0.349	3.172	0.000	0.0003
5	0.190	3.090	0.000	0.0009
6	0.837	3.122	0.000	0.0004
7	0.658	3.156	0.000	0.0002
8	0.532	3.268	0.000	0.0001
9	0.341	3.031	0.000	0.0004
10	0.198	3.086	0.000	0.0006
11	0	0	0	0.0006

--- PREMIER TEST --- (SANS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 2.9795 + 0.5376 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.96530
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.035

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 901.76 Pa

--- DEUXIEME TEST --- (SANS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.0628 + 0.1361 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.38622
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.082

VALEUR MOYENNE DU SEUIL EQUIVALENT DE JOINT : 869.62 Pa

DUREE DE L'ESSAI : 190 SECONDES

***** FIN DU FICHIER *****

Après avoir chargé du béton, on peut lancer l'essai de mesure des caractéristiques avec l'option 5. On tape donc le chiffre "5". On fournit ensuite le nom de fichier pour enregistrer les résultats. Ici, on prend le nom "bt1_1". Supposons qu'on ne mesure pas le seuil au repos, on donne alors une réponse négative à la question suivante :

VOULEZ-VOUS MESURER LE COUPLE AU DEMARRAGE ? (O/N) :

On verra ensuite le diagramme de type présenté en figure C-9, suivi d'un affichage des résultats du premier dépouillement, tel que :

--- PREMIER TEST --- (SOUS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.9626 + 5.6666 N$
COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99430
ECART DE L'ESTIMATION : 0.219

SEUIL DE CISAILLEMENT 1100.02 Pa
VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 249.39 Pa.s

— DEUXIEME TEST — (SANS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 4.7033 + 7.4005 N$
COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99412
ECART DE L'ESTIMATION : 0.214

SEUIL DE CISAILLEMENT 1305.65 Pa
VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 325.69 Pa.s

DUREE DE L'ESSAI : 252 SECONDES

(RETOUR = CONTINUER)

Les valeurs des viscosités plastiques obtenus ici ont déjà été corrigées suivant ce qu'on a proposé au §3.2.2. On a donc :

$$\mu_v = 249,4 \text{ Pa.s}$$

$$\mu = 325,7 \text{ Pa.s}$$

Par contre, en ce qui concerne les valeurs des seuils, le frottement du joint n'a pas encore été pris en compte. Comme évoqué au §3.5.2, on doit effectuer les corrections suivantes:

$$\tau_{0v} = 1100,0 - 0,4 \times 869,6 = 752,2 \text{ (Pa)}$$

$$\tau_0 = 1305,7 - 0,6 \times 869,6 = 783,9 \text{ (Pa)}$$

Rappelons que la valeur 869,6 Pa est due au frottement du joint lubrifié par l'eau.

De même, on peut consulter les résultats du premier dépouillement soit par l'option 7 (DIAGRAMME) du menu principal, soit par des autres moyens. Les contenus de fichier (bt1_1.out) sont les suivants :

***** FICHER DE RESULTATS : bt1_1.out *****

NOM DU FICHER DE PARAMETRES : normal.mdl

VARIABLE DE CONTROLE : 1 (VITESSE IMPOSEE)

TYPE DE DIAGRAMME : T_N

PROTOCOLE : 4

NOMBRE DE REPETITION : 1

DATE : 04/10/1994 , HEURE : 11:24:40

No. 1 POINT	VITESSE (t/s)	COUPLE (N.m)	FREQ. (Hz)	DILAT.
10				
1	1.142	10.430	47.054	0.0010
2	0.645	7.388	47.550	0.0008
3	0.499	7.051	47.033	0.0008
4	0.355	6.148	47.615	0.0009
5	0.203	4.908	47.550	0.0009
6	0.882	11.438	0.000	0.0016
7	0.658	9.481	0.000	0.0008
8	0.515	8.220	0.000	0.0008
9	0.349	7.261	0.000	0.0009
10	0.200	6.389	0.000	0.0011
11	0	0	0	0.0007

— PREMIER TEST — (SOUS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 3.9626 + 5.6666 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99430
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.219

SEUIL DE CISAILLEMENT 1100.02 Pa
 VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 249.39 Pa.s

— DEUXIEME TEST — (SANS VIBRATION)

FONCTION AJUSTEE : $T = 4.7033 + 7.4005 N$
 COEFFICIENT DE CORRELATION : 0.99412
 ECART DE L'ESTIMATION : 0.214

SEUIL DE CISAILLEMENT 1305.65 Pa
 VISCOSITE PLASTIQUE CORRIGEE : 325.69 Pa.s

DUREE DE L'ESSAI : 252 SECONDES

***** FIN DU FICHIER *****

Pour des essais de suivi de l'évolution, on s'est aperçu que le frottement du joint diminue de 0,15 N.m après chaque essai de type normal. Ce couple correspond à 40 Pa environ du seuil équivalent. Les corrections des valeurs des seuils seront donc les suivantes :

$$\tau_{0v} = \tau_{0v-b} - [0,4 \times \tau_{0-j} - (n - 1) \times 40] \quad (\text{Pa})$$

$$\tau_0 = \tau_{0-b} - [0,6 \times \tau_{0-j} - (n - 1) \times 40] \quad (\text{Pa})$$

où τ_{0-j} représente le seuil équivalent de joint lubrifié par l'eau, τ_{0v-b} et τ_{0-b} respectivement les valeurs brutes des seuils avec et sans vibration, et n le nombre d'essais normaux réalisés.

Pour la mesure du seuil au repos, on note (ou consulte dans le fichier de résultats, sans oublier son suffixe .st) la valeur maximale atteinte avant le démarrage de la pièce tournante (correspondant à une vitesse de cette dernière supérieure à 2 tours/min, voir §3.5.1). On effectue les mêmes corrections évoquées plus haut, ce qui permet d'obtenir la valeur de seuil au repos.

D. Composition des bétons testés

Les tableaux D-1 et D-2 donnent toutes les formules de bétons utilisés dans cette recherche. Les significations des abréviations sont les suivantes :

G : gravillon	S. C. : sable concassé	S. R. : sable roulé
C : ciment	F. S. : fumée de silice	F. C. : filler calcaire
SP : superplastifiant (e.s. : pourcentage en extrait sec dans le produit)		
R : retardateur	A : entraîneur d'air	E : eau ajoutée (sur granulats secs)

Les origines et les natures des constituants sont les suivantes :

- béton b1

sable : Seine (silico-calcaire)	ciment : CPA HP de Cormeilles
filler : PICKETTY (calcaire)	superplastifiant : LOMAR D (naphtalène)
retardateur : MELRETARD (25% extraits secs)	

- béton b2

gravillons : Boulonnais (calcaire)	sable concassé : Boulonnais
sable roulé : Seine	ciment : CPA 55 HTS du Teil
fumée de silice : Laudun	superplastifiant : LOMAR D

- bétons b3, b4 et b37 à b43

gravillons : Boulonnais	sable concassé : Boulonnais
sable roulé : Seine	ciment : CPA HP de Cormeilles
fumée de silice : Laudun	retardateur : Chrytard (15% extraits secs)
superplastifiant : Chryso Superplast THP (mélamine)	

- bétons 5 à 16

granulat : Norvégien	ciment : Norvégien
fumée de silice : Norvégien	superplastifiant : Norvégien (mélamine)

- bétons 17 à 25

ciment : CPA HP du Teil	superplastifiant : Résine GT (mélamine)
retardateur : Cérítard (25% extraits secs)	agent entraîneur d'air : Cérigel D10

- bétons b26 à b28

gravillons : Voiron	sable : Voiron
ciment : CPA HP PMES	fumée de silice : Laudun
superplastifiants : respectivement CIMFLUID ML (mélamine), RHEOBUILD 1000 (naphtalène), et SIKAMENT 10 (Polyacrylate)	

- bétons b29 à b35

gravillons : Gardon	sable : Sable Normal de Leucate (siliceux)
ciment : CPA HP PMES de St-Vigor	fumée de silice : LAUDUN
eau : déminéralisée	
superplastifiants : respectivement RHEOBUILD 1000 pour b29 à b33, SIKAMENT 10 pour b34, et CIMFLUID ML pour b35	

-béton b36

gravillons : Boulonnais

sable roulé : Seine

filler : PICKETTY

retardateur : Chrytard

agent visqueux : AQUA BETON (Méthyle Cellulose)

sable concassé : Boulonnais

ciment : CPA HP PM de St-Vigor

superplastifiant : Résine GT

- béton b44

gravillons : Arlaut (concassé, calcaire)

ciment : CPJ 55 d'Airvault

superplastifiant : RHEOBUILD 1000

sable : Arlaut (concassé, calcaire)

filler : CICAL

retardateur : Pozzolith 100 XR

- béton b45 à b51

gravillons : (calcaire, concassé)

sable (0/0,4) : Loire

ciment : CPA HPR de Beffes

retardateur : Céritard

sable : Loire (0/4) :

sable (0/0,2) : Fontainebleau

superplastifiant : Chryso Superplast THP

bétons	G										S. C.	S. C.	S. R.	S. N.	C	F. S.	F. C.	SP		R	A	E ajoutée
	15/25	12,5/20	5/15	8/12	5/12,5	4/8	e.s.		kg/m³	kg/m³												
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m³	%															
b1	-	-	-	-	-	-	-	-	1466	350	-	42,1	200	2,45	100	4,20	-	230				
b2	-	854	-	-	411	-	-	326	326	421	42,1	-	-	7,59	100	-	-	112				
b3	-	720	-	-	347	-	-	359	359	425	42,5	-	-	10,62	40	1,70	-	160				
b4	-	720	-	-	347	-	-	359	359	425	42,5	-	-	9,56	40	1,70	-	160				
b5	-	-	-	-	-	-	1710	-	-	450	-	-	-	12,60	25	-	-	194				
b6	-	-	-	-	-	-	1683	-	-	450	-	-	-	25,20	25	-	-	179				
b7	-	-	-	-	-	-	1715	-	-	450	-	-	-	25,20	25	-	-	170				
b8	-	-	-	-	-	-	1589	-	-	600	-	-	-	16,80	25	-	-	203				
b9	-	-	-	-	-	-	1582	-	-	600	-	-	-	33,60	25	-	-	173				
b10	-	-	-	-	-	-	1634	-	-	450	45	-	-	12,60	25	-	-	189				
b11	-	-	-	-	-	-	1721	-	-	450	45	-	-	25,20	25	-	-	143				
b12	-	-	-	-	-	-	1492	-	-	600	60	-	-	16,80	25	-	-	203				
b13	-	-	-	-	-	-	1517	-	-	600	60	-	-	16,80	25	-	-	185				
b14	-	-	-	-	-	-	1532	-	-	600	60	-	-	33,60	25	-	-	161				
b15	-	-	-	-	-	-	1735	-	-	450	45	-	-	25,20	25	-	-	134				
b16	-	-	-	-	-	-	1765	-	-	450	-	-	-	12,60	25	-	-	180				
b17	759	-	315	-	-	-	-	233	545	394	-	-	-	-	-	1,18	-	174				
b18	714	-	297	-	-	-	-	220	513	371	-	-	-	-	-	1,11	-	223				
b19	735	-	305	-	-	-	-	226	528	382	-	-	-	-	-	2,29	-	199				
b20	-	-	1101	-	-	-	-	200	581	400	-	-	-	-	-	1,20	-	161				
b21	741	-	308	-	-	-	-	228	532	385	-	-	-	-	-	2,31	2,00	192				
b22	771	-	321	-	-	-	-	237	554	451	-	-	-	8,56	30	2,70	-	135				
b23	782	-	325	-	-	-	-	241	562	457	-	-	-	13,72	30	4,57	-	116				
b24	-	-	1127	-	-	-	-	205	594	461	-	-	-	10,15	30	4,61	-	111				
b25	788	-	327	-	-	-	-	242	566	460	-	-	-	10,13	30	4,60	4,14	113				
b26	-	-	-	-	-	400	-	-	696	371	37,1	-	-	30,93	30	-	-	108				
b27	-	-	-	-	-	400	-	-	696	371	37,1	-	-	10,20	40	-	-	124				
b28	-	-	-	-	-	400	-	-	696	371	37,1	-	-	13,00	20	-	-	120				

bétons	G										S. C.	S. C.	S. R.	S. N.	C	F. S.	F. C.	SP.		R	A	E ajoutée									
	15/25	12,5/20	5/15	8/12	5/12,5	4/8	0/8	0/5	0/5	0/2								kg/m ³	kg/m ³				kg/m ³								
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm																					
b29	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	10,25	40	-	-	-	145												
b30	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	12,43	40	-	-	-	144												
b31	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	14,63	40	-	-	-	142												
b32	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	16,83	40	-	-	-	141												
b33	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	19,03	40	-	-	-	140												
b34	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	14,65	20	-	-	-	139												
b35	-	486	-	-	489	-	-	-	-	782	450	45	-	18,00	30	-	-	-	138												
b36	-	562	-	-	281	-	-	-	-	-	415	-	188	20,10	30	1,66	0,19*	-	183												
b37	-	720	-	-	347	-	-	-	-	-	425	42,5	-	8,50	40	1,70	-	-	161												
b38	-	720	-	-	347	-	-	-	-	-	425	42,5	-	10,63	40	1,70	-	-	159												
b39	-	726	-	-	350	-	-	-	-	-	430	43	-	9,68	40	1,72	-	-	150												
b40	-	714	-	-	344	-	-	-	-	-	420	42	-	9,45	40	1,68	-	-	170												
b41	-	729	-	-	351	-	-	-	-	-	432	43,2	-	9,72	40	1,73	-	-	145												
b42	-	731	-	-	352	-	-	-	-	-	434	43,4	-	9,77	40	1,74	-	-	138												
b43	-	734	-	-	354	-	-	-	-	-	437	43,7	-	9,83	40	1,75	-	-	130												
b44	791	-	-	-	309	-	-	-	-	-	266	40	57	19,20	40	7,68	-	-	143												

* Cette quantité correspond en fait à la composition de l'agent visqueux, au lieu de l'entraineur d'air.

Tableau D-1 : Composition des bétons testés (partiel)

bétons	G		S		S		S		C		F.S.		SP.		R	E ajoutée
	10/20	4/10	0/4	0/0,4	0/0,2	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		e.s.				
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/m ³	mm	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	brut	%	kg/m ³	l/m ³		
b45	897	197	473	137	75	450	-	16,88	40	-	-	177	-	-	-	-
b46	897	197	473	137	75	450	-	11,25	40	-	-	185	-	-	-	-
b47	880	193	464	134	74	460	-	11,50	40	-	-	188	-	1,38	-	-
b48	842	185	443	129	70	460	46	14,95	40	-	-	191	-	-	-	-
b49	830	182	437	127	70	480	48	15,6	40	-	-	199	-	-	-	-
b50	865	190	456	132	73	440	44	14,3	40	-	-	183	-	-	-	-
b51	842	185	443	129	70	460	46	17,05	40	-	-	191	-	-	-	-

Tableau D-2 : Compositions des bétons testés (partiel).

E. Mesures brutes des essais de répétabilité

Les mesures brutes pour les trois séries des essais de répétabilité sont présentées dans les tableaux E-1, E-2 et E-3, et les courbes couple-vitesse en figures E-1, E-2 et E-3. Notons que les viscosités regressées dans ces tableaux n'ont pas été corrigées, suivant ce qu'on a proposé au chapitre 3.2.2.

	Point	Vitesse	Couple	Seuil	Viscosité	Coefficient de corrélacion
		t/s	N.m	Pa	Pa.s	
essai 1	1	0,995	8,82147	657	327	0,99
	2	0,69	7,17046			
	3	0,482	5,68689			
	4	0,287	4,48321			
	5	0,143	3,02879			
essai 2	1	1,167	10,5974	711	359	0,98
	2	0,684	8,21171			
	3	0,501	6,6715			
	4	0,309	4,89721			
	5	0,09	2,61312			
essai 3	1	0,936	7,72441	720	275	1,00
	2	0,685	6,50323			
	3	0,49	5,55028			
	4	0,305	4,34076			
	5	0,144	3,24703			
essai 4	1	0,896	8,77232	693	349	1,00
	2	0,671	7,41287			
	3	0,519	6,20668			
	4	0,293	4,6573			
	5	0,141	3,40197			
essai 5	1	0,933	9,40374	652	349	0,99
	2	0,702	6,87308			
	3	0,5	5,79518			
	4	0,28	4,32993			
	5	0,154	3,67186			
essai 6	1	0,941	7,88268	888	249	0,99
	2	0,683	6,63318			
	3	0,494	6,02259			
	4	0,302	4,76559			
	5	0,126	3,66687			

essai 7	1	0,976	8,52326	571	327	1,00
	2	0,699	6,92223			
	3	0,528	5,4095			
	4	0,296	4,11669			
	5	0,143	2,97964			
essai 8	1	0,881	7,98347	803	292	1,00
	2	0,682	7,12965			
	3	0,511	6,10672			
	4	0,281	4,47154			
	5	0,141	3,69685			
essai 9	1	1,009	8,60322	736	290	1,00
	2	0,706	6,76146			
	3	0,484	5,67856			
	4	0,28	4,45155			
	5	0,133	3,25953			

Tableau E-1 : Mesures brutes des essais : série 1

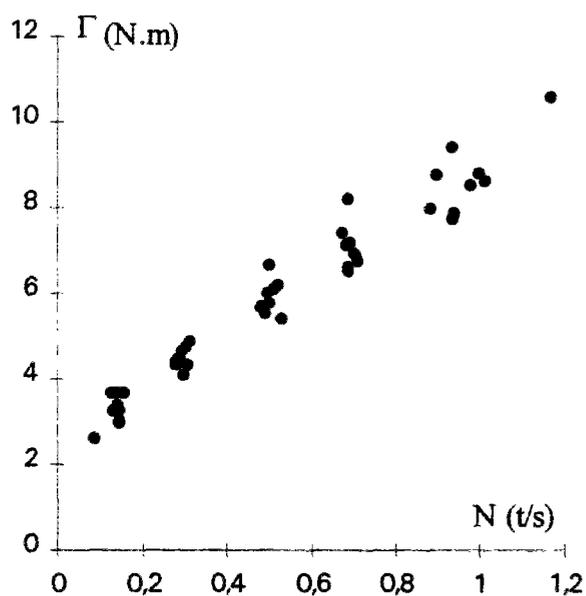


Figure E-1 : Courbes couple-vitesse de 9 essais (série 1).

	Point	Vitesse	Couple	Seuil	Viscosité	Coefficient de corrélation
		t/s	N.m	Pa	Pa.s	
essai 1	1	0,666	4,294	307	229	1,00
	2	0,496	3,34			
	3	0,346	2,69			
	4	0,188	2,043			
essai 2	1	0,66	4,435	338	240	1,00
	2	0,52	3,798			
	3	0,344	2,909			
	4	0,191	2,143			
essai 3	1	0,853	5,393	307	245	1,00
	2	0,686	4,564			
	3	0,517	3,609			
	4	0,343	2,903			
	5	0,186	2,019			
essai 4	1	0,849	6,287	333	284	1,00
	2	0,653	4,832			
	3	0,504	4,053			
	4	0,35	3,216			
	5	0,198	2,454			
essai 5	1	0,784	4,659	297	235	0,99
	2	0,65	4,341			
	3	0,53	3,679			
	4	0,337	2,746			
	5	0,197	1,905			
essai 6	1	0,84	6,308	315	291	1,00
	2	0,665	4,89			
	3	0,511	4,14			
	4	0,374	3,343			
	5	0,207	2,458			

Tableau E-2 : Mesures brutes des essais : série 2

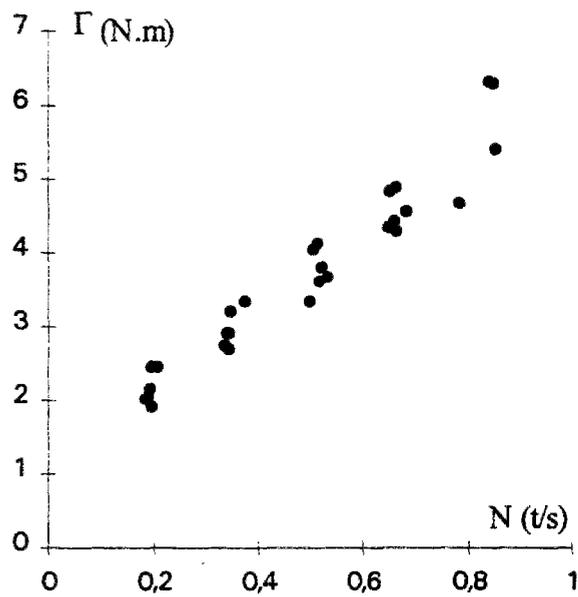


Figure E-2 : Courbe couple-vitesse de 6 essais (série 2).

	Point	Vitesse	Couple	Seuil	Viscosité	Coefficient de corrélation
		t/s	N.m	Pa	Pa.s	
essai 1	1	0,795	5,688	738	181	1,00
	2	0,677	5,088			
	3	0,504	4,495			
	4	0,363	4,000			
	5	0,183	3,370			
essai 2	1	0,827	5,014	594	169	1,00
	2	0,668	4,406			
	3	0,506	3,926			
	4	0,36	3,371			
	5	0,205	2,851			
essai 3	1	0,825	5,429	702	169	1,00
	2	0,663	4,789			
	3	0,51	4,270			
	4	0,368	3,763			
	5	0,202	3,276			
essai 4	1	0,815	5,496	646	183	0,99
	2	0,67	4,771			
	3	0,512	4,139			
	4	0,357	3,663			
	5	0,198	3,144			

essai 5	1	0,81	5,691	693	190	1,00
	2	0,672	5,036			
	3	0,482	4,402			
	4	0,366	3,853			
	5	0,184	3,252			
essai 6	1	0,806	5,553	679	183	0,99
	2	0,672	4,892			
	3	0,483	4,128			
	4	0,351	3,809			
	5	0,207	3,262			
essai 7	1	0,801	6,083	669	214	0,99
	2	0,659	5,140			
	3	0,516	4,553			
	4	0,362	4,003			
	5	0,196	3,348			
essai 8	1	0,813	5,673	643	203	1,00
	2	0,668	5,050			
	3	0,517	4,600			
	4	0,375	3,832			
	5	0,216	3,191			
essai 9	1	0,672	4,933	720	177	1,00
	2	0,516	4,343			
	3	0,359	3,729			
	4	0,197	3,329			
essai 10	1	0,804	5,034	623	165	1,00
	2	0,658	4,429			
	3	0,514	3,873			
	4	0,352	3,419			
	5	0,206	3,006			

Tableau E-3 : Mesures brutes des essais : série 3

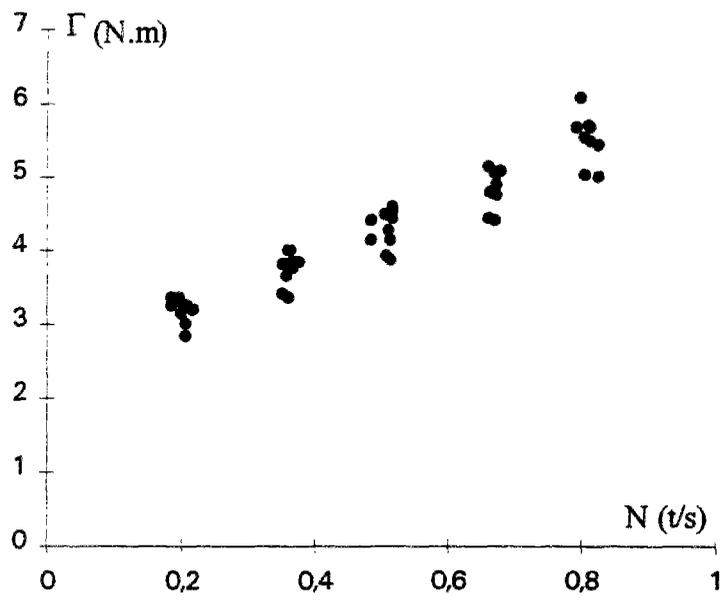


Figure E-3 : Courbe couple-vitesse de 10 essais (série 3).