



HAL
open science

Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais

Sofiane Amziane

► **To cite this version:**

Sofiane Amziane. Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais. Matériaux. Université de Bretagne Sud, 2005. tel-00069705

HAL Id: tel-00069705

<https://theses.hal.science/tel-00069705>

Submitted on 19 May 2006

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.

UNIVERSITE DE BRETAGNE SUD

Année 2005

Série HDR n°:

MEMOIRE

Pour l'obtention de

l'Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences

Discipline : Génie Civil

par :

Sofiane AMZIANE

Maître de Conférences de l'Université de Bretagne Sud

IUP de Génie Civil de Lorient

Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux (UPRES EA 2595)

Contribution à l'étude des matériaux cimentaires à l'état frais

Vol. 1 : Synthèse de l'activité scientifique

Sera soutenu le : 09 décembre 2005

JURY

M. Philippe COUSSOT , Professeur, ENPC, Champs sur Marne	Examineur
M. Christophe LANOS , Professeur, Université de Rennes 1	Rapporteur
M. Jean PERA , Professeur, INSA Lyon	Rapporteur
M. Arnaud POITOU , Professeur, Ecole Centrale de Nantes	Rapporteur
M. Abdelhafidh KHELIDJ , Professeur, Université de Nantes	Examineur
M. Gérard RIO , Professeur, Université de Bretagne Sud	Examineur

À mon épouse Miriam et à mes enfants Lounès et Selma,

À mes parents et mon frère Amine

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement les Professeurs Christophe Lanos, Jean Pera et Arnaud Poitou d'avoir accepté de rapporter ce travail. Je remercie les Professeurs Philippe Coussot, Abdelhafidh Khelidj et Gérard Rio de me faire l'honneur de participer à ce jury d'Habilitation à Diriger des Recherches

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de manière directe à l'élaboration des résultats de recherche exposés ici. Je remercie en ce sens :

- Ny Riana Andriamanantsilavo : Le co-encadrement de sa thèse m'a permis l'expérience enrichissante de la mise en place effective d'une thématique de recherche en génie civil à l'UBS. Son sérieux, sa ténacité et son souci de la clarté ont donné lieu à un travail original qui restera comme étant le fondement des travaux de recherche en Génie Civil à l'UBS.
- L'équipe de recherche du NIST (USA) et en particulier Clarissa Ferraris : Mon séjour de 6 mois aux USA a été l'occasion de confrontations scientifiques de qualité qui m'ont permis d'élargir considérablement mon champ d'investigation et de faire aboutir certains des résultats clés présentés dans ce rapport.
- Mon collègue Vincent Picandet avec lequel une véritable collaboration de recherche est en place.
- Les étudiants en stage de recherche (DEA, Master) et le doctorant actuel Jean Claude Tchamba. Leur contribution au quotidien est essentielle. C'est un plaisir de leur transmettre le savoir faire acquis. En retour, leur curiosité et la pertinence des questions permettent d'enrichir notre propre réflexion.

Je remercie Gérard Rio d'avoir intégré la thématique génie civil comme faisant partie intégrante des trois axes de recherches du LG2M.

REMERCIEMENTS SPECIAUX à Alain Fouché, Directeur de l'IUP de Génie Civil. Bien que non chercheur, il a toujours porté un œil critique, parfois sur un ton taquin, qui fait du bien et qui au bout du compte nous fait sortir le nez du guidon. Il a su aussi me communiquer sa dynamique d'enseignant à la pédagogie efficace et à l'organisation sans faille.

REMERCIEMENTS à Anne Gouello pour une relecture efficace et ses conseils de présentation.

Je remercie Christophe Baley, collègue du Laboratoire L2AC pour ses avis lors de la relecture de ce rapport.

Je remercie l'ensemble de mes collègues du LG2M d'avoir fini par accepter l'émergence d'une thématique de « ciment qui tâche » dans un labo de « mécanique high-tech ».

SOMMAIRE

CURRICULUM VITAE DETAILLE	1
1 Etat civil, Formation, Carrière.	2
1.1 <i>Etat civil</i>	2
1.2 <i>Formation</i>	2
1.3 <i>Carrière</i>	2
2 Activités de recherche	3
2.1 <i>Déroulement de mes activités de recherche</i>	3
2.2 <i>Description de mes activités de recherche</i>	4
3 Collaborations et rayonnement hors laboratoire	9
3.1 <i>Collaboration internationale</i>	9
3.2 <i>Collaborations nationales</i>	9
3.3 <i>Expertises et revues d'articles scientifiques</i>	10
3.4 <i>Appartenance à des associations scientifiques</i>	10
4 Missions scientifiques au laboratoire	10
5 Missions d'administration (UBS)	11
6 Activités et responsabilités pédagogiques	11
7 Encadrement Doctoral	13
7.1 <i>Doctorants :</i>	13
7.2 <i>DEA ou Master Recherche</i>	13
8 Publications	15
8.1 <i>Revues internationales et nationales à comité de lecture</i>	15
8.2 <i>Rapport scientifique à grande diffusion :</i>	17
8.3 <i>Articles de rang B : Communications à des congrès internationaux et nationaux</i>	17
8.4 <i>Rapports de contrats industriels</i>	19
8.5 <i>Thèse de doctorat et DEA</i>	19

TRAVAUX REALISES

1	INTRODUCTION	21
2	EVALUATION DE LA RHEOLOGIE PENDANT LE MALAXAGE EN CAMION BETONNIERE	23
2.1	<i>Description synthétique de l'étude</i>	24
2.2	<i>Discussion des principaux résultats</i>	26
2.2.1	<i>Variation de la viscosité plastique</i>	28
2.2.2	<i>Variation de la contrainte seuil</i>	29
2.3	<i>Conclusions</i>	30
3	LA POUSSEE DES MATERIAUX CIMENTAIRES CONTRE LES COFFRAGES	32
3.1	<i>Description synthétique de l'étude</i>	33
3.1.1	<i>Essai en laboratoire à l'aide d'un coffrage grandeur nature</i>	33
3.1.2	<i>Essai à la colonne</i>	34
3.1.3	<i>Essai in-situ</i>	37
3.2	<i>Discussion des principaux résultats</i>	38
3.2.1	<i>Essai en coffrage de laboratoire</i>	38
3.2.2	<i>Essai à la colonne</i>	41
3.2.3	<i>Essai in-situ</i>	47
3.3	<i>Conclusions</i>	48
4	STRUCTURATION ET RHEOLOGIE DES MATERIAUX CIMENTAIRES	50
4.1	<i>Contexte de l'étude</i>	50
4.2	<i>Description synthétique de l'étude</i>	51
4.2.1	<i>Mesure de la conductivité hydraulique d'une pâte de ciment avant prise</i>	52
4.2.2	<i>Mesure du retrait endogène par la méthode de pesée hydrostatique</i>	53
4.2.3	<i>Mesure des caractéristiques rhéologiques pendant la prise</i>	54
4.2.4	<i>Couplage rhéologie - pression interstitielle</i>	54
4.3	<i>Discussion des principaux résultats</i>	56
4.3.1	<i>Evolution du retrait pendant la prise</i>	56
4.3.2	<i>Evolution de la conductivité hydraulique et du retrait pendant la prise</i>	57
4.3.3	<i>Evolution des propriétés rhéologiques</i>	62
4.3.4	<i>Evolution de la pression interstitielle lors du cisaillement</i>	67
4.4	<i>Conclusions</i>	69
5	MODELISATION PHYSIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE DE LA CINETIQUE DE MATURATION	72
5.1	<i>Description synthétique de la démarche de modélisation</i>	73
5.1.1	<i>Hypothèses de modélisation</i>	74
5.1.2	<i>Résolution numérique de l'équation de Richards</i>	76
5.2	<i>Quelques résultats de simulation</i>	78
5.2.1	<i>Influence du mouvement de l'eau ($S = 0$)</i>	78
5.2.2	<i>Influence du changement de l'état de l'eau ($S \neq 0$)</i>	79

5.2.3	<i>Cas des pâtes de ciment</i>	80
5.2.4	<i>Cas des bétons :</i>	83
5.3	<i>Conclusions</i>	85
6	Conclusions et Projets de Recherches	86
	<i>Perspectives de recherches</i>	88
7	Références	92

CURRICULUM VITAE DETAILLE

1 Etat civil, Formation, Carrière.

1.1 Etat civil

Sofiane AMZIANE

Né le 4 mars 1970 (35 ans)

Marié, 2 enfants

Nationalité française

Adresse professionnelle : LG2M, Centre de Recherche de Lorient
Rue Saint Maudé – BP 92116
56321 Lorient cedex

Adresse personnelle : 15 place Jules Ferry
56100 Lorient

e-mail : Sofiane.Amziane@univ-ubs.fr

Web : <http://www-lg2m.univ-ubs.fr/>

Téléphone : (33) 2-97-87-45-39

Fax : (33) 2-97-87-45-72

1.2 Formation

Janv. 1998 Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes
Comportement cyclique des bétons ordinaires et des BHP : De l'expérimentation du matériau à la simulation du dommage des structures en béton armé
Jury : Professeurs Jean-Marie Reynouard, Jacky Mazars, et Luc Taerwe, MC. Jean Francois Dubé
Direction de thèse : M. Jacques Lamirault, MCF.

1994 DEA en Génie Civil : Ecole Centrale de Nantes.
Laboratoire de Génie Civil de Nantes – St.-Nazaire.

1991 Ingénieur d'Etat en Génie Civil, Université des Sciences et Techniques d'Alger.

1.3 Carrière

Sept. 1998 Maître de Conférences à l'Université de Bretagne Sud - IUP de Lorient, Laboratoire de Génie Mécanique et Matériaux, (LG2M) / UPRES-EA 2595

1997 / 1998 Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 ATER) à l'IUT de St.-Nazaire, Département de Génie Civil

2 Activités de recherche

2.1 Déroulement de mes activités de recherche

- Mes activités de recherche ont débuté concrètement en 1994 lors de mon stage d'initiation à la recherche en DEA dans le domaine de l'expérimentation du béton armé sous charge cyclique au laboratoire de génie civil de l'Ecole Centrale de Nantes. J'ai poursuivi en thèse ce travail initial, dans le même laboratoire, avec une orientation plus large vers la modélisation numérique du comportement statique et cyclique du béton durci.
- En 1998, j'ai été en position d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1/2 poste sur un an). J'ai ainsi rejoint l'équipe de recherche de l'IUT de Saint-Nazaire sur une thématique orientée vers la durabilité des bétons.
- En septembre 1998, j'ai été recruté au LG2M sur un poste de maître de conférences de l'IUP Génie Civil de Lorient. L'activité de recherche du LG2M est organisée autour des trois thèmes : Mise en forme des matériaux, Dynamique rapide et Rhéologie des matériaux cimentaires. La recherche en génie civil y est récente ; elle a été impulsée par le Pr. Philippe Baudeau en 1997 sur le thème général du comportement rhéologique des bétons frais. Dans ce contexte de démarrage de l'axe génie civil au LG2M, j'ai commencé dès mon arrivée en septembre 1998 par me familiariser à cette nouvelle thématique. Un premier programme de recherche réalisable sur quatre ans (1999/2003) a été mis en œuvre avec deux objectifs :
 - identifier les besoins de recherche dans la thématique afin d'initier un programme d'équipement adéquat,
 - réaliser des travaux permettant d'identifier clairement l'entité génie civil dans l'environnement de recherche de notre Université.

Concernant le premier point, j'ai réalisé un travail sur l'état de l'art dans le domaine de la rhéologie du béton frais qui m'a permis de dégager les principales idées directrices de mon action future qui se déclinent en :

- l'étude couplée de la mécanique de la physique et de la rhéologie des matériaux cimentaires pendant les process de mise en œuvre,
- l'identification des paramètres intervenant dans la mise en oeuvre des matériaux cimentaires puis lors de la maturation,
- la mise en œuvre d'outils numériques et de modélisation des phénomènes observés.

De manière graduelle, plusieurs équipements de laboratoire (extensomètre, malaxeur, ...) et dispositifs expérimentaux ont été conçus afin de passer à une phase opérationnelle.

- Fin 1999, notre équipe s'est étoffée par l'arrivée du doctorant Ny Riana Andriamanantsilavo que j'ai co-encadré avec le Pr. Ph. Baudeau. J'ai établi un sujet de thèse en continuité des investigations évoquées.
- En 2003 j'ai mis en place une collaboration avec le NIST (National Institute of Standards and Technologies) sur la thématique du malaxage des matériaux non newtoniens (typiquement le béton).
- Depuis septembre 2004, je co-encadre avec le Dr. Vincent Picandet (Maître de Conférences de l'UBS depuis septembre 2002) une deuxième thèse (doctorant J.C. Tchamba). Le travail engagé s'appuie sur la base expérimentale constituée sur la cinétique de maturation des matériaux cimentaires à l'état frais dans un coffrage.
- En juin 2005, j'ai mis en place les bases pour la signature d'une convention entre l'Université des Sciences Houari Boumediene (Algérie) et l'Université de Bretagne Sud. Cet accord me permet dès à présent de co-encadrer deux thèses de doctorat dans le cadre du régime de la co-tutelle. La thématique de ces thèses est orientée vers la production de BHP à l'aide de matériaux locaux.

2.2 Description de mes activités de recherche

Depuis dix ans, le matériau béton constitue l'élément fédérateur de ma contribution en tant que chercheur. Mes recherches et développements sur le matériau ont été dictés dans une première phase par les impératifs liés au sujet de DEA puis de thèse, mené à l'Ecole Centrale de Nantes, sur le comportement du béton durci en tant que matériau et en tant que structure soumise à des sollicitations statiques, cycliques et dynamiques.

Dans une seconde phase, j'ai abordé une nouvelle problématique relative à la genèse du matériau, c'est-à-dire l'évolution du matériau cimentaire depuis la mise en contact des ingrédients (ciment, eau, adjuvant, granulats, ...) jusqu'au décoffrage.

Ces deux expériences complémentaires m'ont permis au travers des investigations réalisées d'acquérir une culture à large spectre sur le béton, sur les plans de l'expérimentation, de la modélisation et également en termes de simulation numérique. On y retrouve les aspects de physico-chimie, de rhéologie et de mécanique des structures.

Pour une meilleure lisibilité de mon parcours en tant que chercheur, je choisis de vous en présenter une description qui n'est pas celle de la logique de « la vie » de ce matériau inorganique, à savoir : fabrication, comportement à l'état frais, mise en place dans un coffrage, prise du matériau, et enfin comportement à l'état durci et durabilité. C'est dans l'ordre des travaux de DEA, de thèse, puis post-thèse qu'est présenté l'ensemble des activités.

Thème 1 : Comportement mécanique du béton durci [D1, D2, A9, A10, B9 à B22]¹

C'est un domaine que j'ai abordé concrètement en mars 1994 lors de mon stage d'initiation à la recherche en DEA dans le domaine de l'expérimentation du béton armé sous charge cyclique au laboratoire de Génie Civil de l'Ecole Centrale de Nantes. Un dispositif expérimental a été élaboré et les résultats ont fait l'objet d'une communication en conférence [B14]. J'ai poursuivi ce travail initial avec une orientation vers la modélisation numérique du comportement statique et cyclique du béton durci dans le cadre de ma thèse à l'Ecole Centrale de Nantes.

Sur le plan expérimental, une campagne d'essais sur les Bétons à Hautes Performances et BHP fibrés a permis la proposition de lois d'évolution cyclique en fonction de la résistance du béton et de la concentration volumique en fibres [A10, B10, B11, B13]. Des caractéristiques comme la fragilité des BHP ou la ductilité des BHPF ont pu être décrites par des lois continues en pré et post-pic pour des bétons dont la résistance varie de 20 à 90 MPa. En simulation numérique, le calcul prédictif du comportement des structures en béton armé et BHP est abordé par la proposition de modèles de comportement valides pour toute la gamme de bétons étudiés. Ces modèles intègrent les variables mécaniques déduites des essais et sont implantés dans le code "EfiCoS-LMT-Cachan". Ce code utilise une description multicouche de la structure. Une confrontation des simulations aux résultats d'essais de diverses ossatures a été réalisée. En dynamique, la possibilité de s'affranchir de la prise en compte de l'amortissement a été analysée en introduisant le comportement hystérétique du matériau. En outre, un outil de décision pour l'évaluation des dégradations de structures en béton armé a été proposé [A9, B9, B12, B18]. Il s'agit d'utiliser des indicateurs de dommages locaux calculés dans la structure pour obtenir un indice global de dommage. Les résultats simulés en rapport avec les constats d'essais permettent d'apprécier le dommage d'une structure suite à des actions statiques ou cycliques. Cet indice de dommage apporte à l'ingénieur un instrument de décision pour réhabiliter ou détruire des ouvrages.

¹ La liste de publication est donnée pages 15 à 19.

Thème 2 : Comportement dynamique du béton

Les travaux menés sont essentiellement le fruit de ma collaboration avec Dr. V. Grolleau, de la thématique dynamique rapide du LG2M. Nos investigations ont concerné la caractérisation des mortiers de ciment avec et sans fibres d'acier sous chargements statique et dynamique de type impact, l'objectif étant plus précisément de traiter trois points particuliers :

- quantifier l'influence de la vitesse de déformation sur le comportement en flexion d'un mortier avec et sans fibres ;
- analyser la propagation des ondes selon que la zone soit comprimée ou tendue en flexion dynamique ;
- identifier les paramètres de sensibilité liés aux conditions aux limites, en particulier le contact entre le projectile et l'élément testé.

Thème 3 : Durabilité du béton

Lors de mon passage dans l'équipe de recherche de l'IUT de Saint-Nazaire sous la direction du Pr. G. Bastian et du Pr. A. Khelidj en tant qu'ATER, mon activité de recherche a été orientée vers la durabilité des bétons. Ce court passage m'a permis de collaborer et me familiariser avec des techniques expérimentales dédiées au suivi de la maturation et des transferts pendant l'hydratation du béton durci.

Thème 3 : Mise en place des bétons et maturation dans un coffrage [A3, A5, A7, A8, B2, B4, B5, B6, B7, B8]²

Concernant ce thème, une première étude sur l'analyse de l'influence de la concentration granulaire dans un mélange pâte-granulat vis-à-vis de la poussée exercée par un béton frais sur une paroi coffrante a été réalisée et a donné lieu à publication dans une revue internationale [A8]. Les investigations expérimentales ont été menées par Ph. Baudeau et son équipe à l'IUT de Génie Civil de Strasbourg sur des bétons dont la concentration volumique en granulats varie de 0% à 70%. Les résultats ont montré que l'accroissement du volume granulaire s'accompagne d'un changement progressif du profil de pression mesuré sur la paroi coffrante. Un effet non linéaire est observé pour des concentrations granulaires dont le rapport $V(\text{pâte})/V(\text{granulats})$ est supérieur à 40%. Ce phénomène induit une réduction de pression à la base du coffrage par rapport à la pression hydrostatique d'un fluide parfait équivalent. Nos résultats, obtenus à l'échelle globale, sont à rapprocher du comportement rhéologique du

² La liste de publication est donnée pages 15 à 19.

béton frais qui subit une modification sensible de son écoulement pour un rapport $V(\text{pâte})/V(\text{granulats})$ de 40%.

Après ce travail initial, un nouvel outil expérimental permettant la mesure des pressions interstitielles dans le béton avant prise a été conçu. Nous avons mené une étude sur la pression du béton frais sur les coffrages, avant la prise dans l'intervalle [0-5h]. Une campagne expérimentale axée sur l'étude du comportement hydrodynamique au jeune âge des pâtes de ciment et des bétons mis en œuvre dans un coffrage est présentée. Les expérimentations ont nécessité le développement de capteurs de mesure de la pression interstitielle et de la pression latérale totale [A5, A7]. En parallèle, des mesures du retrait endogène, de l'évolution de la température et de la prise des matériaux ont été réalisées. Principalement, nous avons pu observer qu'à une profondeur donnée, la pression latérale totale qu'exerce un matériau cimentaire sur un coffrage évolue suivant une cinétique identique à celle de la pression interstitielle régnant dans le matériau. Dès l'annulation de la pression totale, des dépressions interstitielles ont été observées. Cette étude a fait apparaître que la chute de pression trouve son origine dans le processus physico-chimique dû aux réactions d'hydratation de la pâte de ciment. Nous nous sommes également intéressés à la simulation de l'évolution des pressions dans un coffrage. La démarche adoptée repose sur une modélisation de la cinétique d'évolution de l'état de l'eau dans un milieu poreux non saturé. Nos investigations nous ont conduits à adapter l'équation de Richards à notre problématique. Cette démarche nous a amenés à quantifier la perméabilité des matériaux étudiés. L'identification du coefficient de perméabilité est fondée sur une expérience de drainage à pas de pression unique, couplée à une analyse inverse pour l'identification des coefficients issus de la résolution de l'équation d'écoulement de Richards [A6].

Ces travaux se poursuivent aujourd'hui dans le cadre de la thèse de J.C. Tchamba par la réalisation du même type d'essai, mais cette fois en conditions de chantier, sur des bétons mis en œuvre dans des coffrages de grandes hauteurs. De nouveaux essais de perméabilité font aussi l'objet d'investigations de notre part, en particulier sur une possible influence du fluage de la pâte au jeune âge sur la mesure et l'évolution du coefficient de conductivité hydraulique.

Thème 4 : Fabrication du matériau [A1, R1, B1, B3]³

J'ai abordé cette thématique dans le cadre d'une collaboration avec le National Institute of Standards and Technologies (NIST-USA) que j'ai mise en œuvre en 2004. J'ai effectué au titre d'un Congé de Recherche ou de Conversion Thématique (CRCT), un séjour de 6 mois au sein du Laboratoire dirigé par M. Ed. Garbosci entre janvier et juillet 2004. Sur ce thème, deux productions scientifiques ont été réalisées : la première sous la forme d'un état de l'art sur le malaxage du béton en milieu industriel [R1] et la seconde sous forme d'une étude d'investigation sur la déduction des paramètres rhéologiques (seuil de cisaillement, viscosité) d'un béton malaxé en camion toupie [A1, B1, B3]. L'étude de faisabilité nous a permis de préciser la démarche de mesure en environnement industriel.

Thème 5 : Rhéologie des matériaux cimentaires [A2, A3, S1, B4, B5]

C'est aussi au cours de mon séjour au NIST que j'ai abordé de manière concrète la rhéologie expérimentale. Ma contribution dans le domaine a été relative à la mesure de l'évolution des caractéristiques mécaniques pendant la période de prise des matériaux cimentaires. Cette évolution représente à mon sens un des paramètres clés de la maîtrise des procédés en génie civil (pompage, temps de décoffrage, mise en forme, ...). Actuellement, le test de Vicat représente l'essai standard du suivi de la prise. L'information obtenue à partir de cet essai (temps de début et de fin de prise) est largement insuffisante pour juger par exemple du temps pendant lequel le matériau est pompable, extrudable ou décoffrable. Dans ce contexte, nous présentons une étude d'investigation sur la possibilité de caractériser la prise par le biais du suivi de l'évolution de paramètres intrinsèques du matériau tels que le seuil de cisaillement, la viscosité et la pression interstitielle. Ainsi, la prise de pâtes de ciment est étudiée, à travers d'une part l'évolution du seuil de cisaillement et de la viscosité obtenu par deux tests spécifiques au rhéomètre plan-plan et d'autre part en suivant la cinétique de pression interstitielle dans le mélange. Les résultats de ces expérimentations sont discutés et confrontés aux tests de Vicat. En conclusion, nous proposons de redéfinir la prise à partir des temps caractéristiques identifiés sur les tests de rhéologie et d'évolution des pressions.

³ La liste de publication est donnée pages 15 à 19.

3 Collaborations et rayonnement hors laboratoire

3.1 Collaboration internationale

Dans le cadre du Congé de Recherche ou de Conversion Thématique (CRCT) que j'ai obtenu en 2004, j'ai effectué un séjour de 6 mois de janvier à juillet 2004 au National Institute of Standards and Technologies (NIST–Washington). Ce séjour m'a permis de me confronter à une équipe de recherche internationale de haut niveau et de mettre en place une collaboration entre le LG2M et le NIST. De manière plus concrète, ce travail, dans une équipe orientée vers la physique des matériaux, m'a permis de réaliser deux études sur la rhéologie des pâtes de ciment et des bétons qui ont donné lieu aux publications de revue [S1, S2, S3], au rapport d'état de l'art [R1] et à des congrès [C1, C2, C3].

Cette collaboration toujours active doit aboutir à la mise en place prochaine d'un programme de recherche sur la rhéologie des bétons en phase malaxage. Une demande de subvention pour financer un thésard de l'UBS est en cours auprès du National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA-USA).

Enfin, mon collègue MC. V. Picandet doit effectuer un congé de recherche (CRCT) de six mois sur les mêmes problématiques à partir de janvier 2006.

3.2 Collaborations nationales

Elles s'établissent actuellement suivant deux échelons :

- A l'échelon national, une collaboration avec le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et ses laboratoires régionaux a été mise en œuvre en juin 2004 et a abouti à l'intégration du groupe Génie Civil du LG2M dans un projet d'envergure nationale avec l'INSA de Rennes, ainsi que des acteurs majeurs de l'industrie du BTP en France (Entreprises et Associations telles que le CERIB et l'ATHIL).

Cette opération de recherche s'est fixée trois objectifs :

- progresser dans la maîtrise de la rhéologie complexe des bétons modernes (matériaux thixotropes multiphasiques),
- être capable de prédire l'interaction entre rhéologie du matériau frais, complexité de la pièce à réaliser et méthodes de mise en œuvre,
- fournir des bases pour l'innovation (structures plus ferrillées, utilisation de l'orientation des fibres pour la fabrication d'éléments de structures anisotropes...),

- à l'échelon régional, nous participons de manière active au groupe G2RB2M (Groupe de Recherche Régional de Bretagne en Mécanique des Matériaux). La mise en place du GIS (Groupe d'Intérêt Scientifique de la Région Bretagne) obtenu par le G2RB2M et piloté à Lorient par le Pr. G. Rio doit nous permettre de conduire un projet réalisé en commun avec le Pr. T. Aubry, du Laboratoire de Rhéologie de Brest. Le travail engagé doit aboutir à la concrétisation d'une thèse co-délivrée sur les aspects de formulation des matériaux cimentaires au regard de la rhéologie.

3.3 Expertises et revues d'articles scientifiques

- 8 revues d'articles (Peer Review) pour American Concrete Institute Journal en 2004 et 2005
- 2 revues d'articles (Peer Review) pour Materials and Structures de la RILEM en 2005
- 3 expertises de rapports et de publications pour le National Institute of Standard and Technologies en 2004 et 2005

3.4 Appartenance à des associations scientifiques

- Membre du Groupe Français de Rhéologie (GFR) depuis 2001
- Membre de L'association Universitaire de Génie Civil (AUGC) depuis 1999
- Membre senior de l'association RILEM
- Membre Votant de l'American Concrete Institute (Comité 236-A)
- Membre de l'American Concrete Institute (Chapitre de Paris)

4 Missions scientifiques au laboratoire

- Coordination des séminaires du laboratoire (2000-2003) : organisation bimensuelle d'un séminaire scientifique où sont exposés les travaux du laboratoire, de chercheurs invités nationaux et étrangers ainsi que des partenaires industriels. Le programme des séminaires est disponible sur le site : <http://belz.univ-ubs.fr/labadmin/Seminar/>

- porteur du projet du LG2M dans le cadre du contrat de plan Etat-Région 2000-2006 : acquisition d'une machine d'essais quatre colonnes. Cette machine sera conçue pour solliciter un matériau ou une structure sous des chemins de sollicitations radiaux (compression - traction) et non radiaux (combinaison compression - traction - torsion) et sera en outre capable de développer des chargements cycliques en compression - traction et torsion.

- contribution à la mise en place du GIS (thématique : rhéologie) du G2RB2M piloté à Lorient par le Pr. G. Rio. Concrètement, j'ai participé avec le LRMS de Brest, à la partie du dossier qui concerne les aspects liés à la rhéologie.

5 Missions d'administration (UBS)

- Membre élu du Conseil National des Universités (60^{ème} section, Génie Mécanique et Génie Civil) depuis juillet 2005.
- Membre élu de la Commission de Spécialistes de la 60^{ème} section de l'Université de Bretagne Sud depuis 2000 (2 mandatures).
- Membre élu au Conseil de l'Unité de Formation et de Recherche – Sciences et Sciences de l'Ingénieur (UFR-SSI) – (2001-2004).
- Membre élu du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire (CEVU sur la période 1999-2003)
- Membre élu du Conseil Scientifique (CS sur la période 2004-2007)
- Représentant du CEVU au Conseil d'Administration des Ressources Informatiques (CARI)

6 Activités et responsabilités pédagogiques

La dimension enseignement est un élément fondamental du métier d'enseignant chercheur. Je souhaite en évoquer quelques aspects.

Mes activités pédagogiques à l'UBS couvrent la période septembre 1998 à décembre 2004. J'ai réalisé l'intégralité de mes enseignements à l'IUP de Génie Civil de Lorient.

De manière synthétique, trois éléments reflètent l'engagement pédagogique que j'ai eu depuis mon recrutement :

- Ma première rentrée à l'IUP de Génie Civil de Lorient, qui a été ouvert en 1997, a coïncidé avec la mise en place de la maîtrise de Génie Civil de l'IUP en 1998. Dans ce cadre, j'ai eu à **créer en totalité et/ou à coordonner une dizaine de modules de Génie Civil** couvrant un large spectre scientifique : équipement technique du bâtiment (acoustique, thermique, électricité, réseaux divers, énergétique, ...), Matériaux cimentaires, Topographie, Résistance des Matériaux, Béton Précontraint et plus récemment la Dynamique des Structures. Simultanément, j'ai assuré l'encadrement d'une dizaine de projets

technologiques de génie civil par an ainsi que le suivi de stages en entreprise de nos étudiants, éléments essentiels à une formation professionnalisante.

- J'assure chaque année l'**encadrement de plusieurs étudiants** (Master 1 ou 2) en stage au LG2M au niveau du Centre de Recherche sur des thématiques liées à mes recherches. Lors de ces actions, je ne manque pas de tout mettre en œuvre pour un transfert effectif de la dimension recherche et innovation dans la démarche de travail des étudiants.

- Dans le cadre de la réforme dite du LMD, **j'ai pris en responsabilité le fonctionnement Master Génie Civil « Maitrise de projet »** dans sa partie professionnelle. J'en suis le responsable pédagogique depuis la rentrée 2004. Je rédige aussi à ce titre, en collaboration avec le responsable de la partie génie mécanique du Master, le dossier de réhabilitation de la formation.

- J'assure en outre la **promotion des parcours menant au Master Recherche** actuellement assurés conjointement par l'IUP de Génie Mécanique et par l'INSA de Rennes dans l'objectif d'amener des flux significatifs d'étudiants de génie civil de l'UBS vers la Recherche.

7 Encadrement Doctoral

7.1 Doctorants :

- [D1] NyRiana Andriamanantsilavo, thèse soutenue le 15 décembre 2003.
Thèse : comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation
Taux d'encadrement : 80% (thèse dirigée par Pr. Ph. Baudeau)
Devenir du doctorant : qualifié aux fonctions de MCF 60ème. Actuellement responsable d'une filière de BTS génie civil en Lycée CFA à St Brieuc.
Jury : Pr. Michel Barrioulet, Pr. Philippe Baudeau, Pr. Philippe Coussot, Pr. Michel Moan, MC. Gérard Bernier, MC. Sofiane Amziane.
- [D2] Jean Claude Tchamba (soutenance prévue en décembre 2006)
Thèse : Contribution à l'étude de la rhéologie des matériaux cimentaires
Taux d'encadrement : 50%
- [D3] M. Boulekbache (soutenance prévue en décembre 2007)
Thèse : Contribution à l'étude des structures en BHP
Taux d'encadrement : 50% (thèse Co-dirigée par Pr. M. Chemrouk – USTHB - Algérie)
- [D4] M. Hamarat (soutenance prévue en décembre 2007)
Thèse : Contribution à l'étude de la ductilité des Bétons à Haute Performance
Taux d'encadrement : 50% (thèse Co-dirigée par Pr. M. Chemrouk – USTHB - Algérie)

7.2 DEA ou Master Recherche

- [D3] Mikael Harscoet (Février à Juillet 2002) :
Titre : Etude sur le comportement des bétons de fibres soumis aux chargements dynamiques de type choc et statique. DEA Mécanique et Matériaux de l'UBS-INSA de Rennes, soutenu et obtenu le 26 juillet 2002 à Lorient.

[D4] Astrid Kiehne (Octobre 2002 à Janvier 2003)

Echange ERASMUS avec « l'Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz TU Braunschweig » (Allemagne).

Titre : Etude expérimentale sur le comportement des mortiers avec et sans fibres métalliques soumis aux chargements statiques et dynamiques de type impact.

Soutenu en mars 2003 à "Technical University at Brunswick (Allemagne) "

[D5] Christophe Richard (DEA 2004-2005)

Titre : Couplage Hydro Mécanique dans l'évolution de la structuration des matériaux cimentaires

DEA Mécanique et Matériaux de l'UBS-INSA de Rennes, soutenu en juin 2005 à Lorient.

[D6] Karim Ghernaout (DEA 2005-2006)

Titre : Evolution de la rhéologie des bétons pendant la prise

DEA Mécanique et Matériaux de l'UBS-INSA de Rennes, soutenance prévue en juin 2006 à Lorient.

8 Publications

- 10 publications dans des revues à comité de lecture (dont 9 de Revue Internationale). Deux publications internationales ont été soumises en 2005.

- 20 communications Internationales et Nationales dans des actes de congrès (dont 5 en congrès international à comité de lecture + présentation orale).

- 1 rapport à large diffusion

- 3 rapports de contrat industriel

Type de publication	Titre de la revue	Nbre	Total
Revues Internationales	- Cement and Concrete Research	2 (en 04 et 05)	8
	- Journal of NIST	1 (en 04)	
	- Advances in Cement Research	1 (en04)	
	- Special Publication of ACI	2 (en 05)	
	- Materials and Structures	2 (en 00 et 01)	
Revues Nationales	Journal Européen de Génie Civil	1 (en 00)	2
	Rhéologie	1 (en 03)	
Congrès Internationaux	RILEM, SCC 05	1 (en 05)	5
	CONCREEP 7	1 (en 05)	
	EM2002	1 (en 02)	
	ISHPRP 98	1 (en 98)	
	E-Materials 97	1 (en 97)	
Congrès Nationaux	GFR	3	19
	AUGC	6	
	Autres colloques	10	

Le détail des références bibliographiques est donné ci-dessous :

8.1 Revues internationales et nationales à comité de lecture

- 2005** [A1] S. Amziane, C.F. Ferraris, E.P. Koehler, Measurement of Rheological Properties of Fresh Concrete Using a Mixing Truck, **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, volume 110, Number 1, January-February 2005
- [A2] Eric P. Koehler, David W. Fowler, Chiara F. Ferraris, and Sofiane Amziane, A new, portable rheometer for fresh self-consolidating concrete, **Special Publication of American Concrete Institute, in press, 2005.**

- [A3] S. Amziane, C. F. Ferraris, SCC Evolution of formwork hydraulic pressure and of rheological properties, **Special Publication of American Concrete Institute, in press, 2005.**
- [A4] S. Amziane, “Setting Time Determination of Cementitious Material on Measurements of the Pore Water Pressure Variations”, In Press, Corrected Proof, Available online 6 September 2005, www.sciencedirect.com, **Cement and Concrete Research**, 2005.
- 2004** [A5] N.R. Andriamanantsilavo, S. Amziane, Maturation of fresh cement paste within 1-to-10m large formworks, **Cement and Concrete Research**, (V34) pp. 2141-2152. 2004
- [A6] S. Amziane, N. Andriamanantsilavo, Prediction of cement paste pore water pressure variations during setting period, **Advances in Cement Research**, Thomas Telford ed., Jan 2004, V16, n°1.
- 2003** [A7] N.R. Andriamanantsilavo, S. Amziane, Ph. Baudeau, Étude expérimentale sur l'évolution de la pression exercée par une pâte de ciment contre un coffrage pendant la prise, **Rhéologie**, V.3, avril 2003.
- 2000** [A8] S. Amziane, Ph. Baudeau, Influence de la concentration et de la dimension des granulats vis-à-vis de la poussée du béton frais sur une paroi coffrante, **Materials and structures**, vol. 33, No 1, pp. 50-58, janvier-fevrier 2000
- [A9] S. Amziane, J. F. Dube, J. Lamirault, Evaluation des dégradations de structures à l'aide d'un indicateur de dommage, **Revue Française du Génie Civil**, vol. 4, No 4, pp. 16, ISBN 1279-5119, juin 2000 – Edition Hermes-
- 1999** [A10] S. Amziane, A. Loukili, Etude expérimentale du comportement des bétons à hautes performances renforcés de fibres d'acier sous chargements statique et cyclique , **Materials and structures**, vol. 32, No 6, pp. 348-353, Juin 1999

Soumises

- 2005** [S1] S. Amziane, C.F. Ferraris, Monitoring of Setting Evolution of Cementitious Materials by Measurements of Rheological Properties and Hydraulic Pressure Variations, Submitted to ACI MATERIAL JOURNAL, 2005
- [S1] S. Amziane, V. Picandet, Simultaneous measurements of rheological properties and hydraulic pressure in multi phase fluids, Soumis à Journal of rheology en octobre 2005

8.2 Rapport scientifique à grande diffusion :

- 2005** [R1] S. Amziane, C.F. Ferraris, “Measurement of workability of fresh concrete during the mixing operation, the truck mixer case, state of the art report”, NISTIR xxxx, 2004 (en cours de relecture).

8.3 Articles de rang B : Communications à des congrès internationaux et nationaux

- 2005** [B1] S. Amziane, C.F. Ferraris, E.P. Koehler, “Measurement of Rheological Properties of Fresh Concrete Using a Mixing Truck”, SCC05, publication on proceeding of RILEM conference, Chicago 05.
- [B2] V. Picandet, S. Amziane, J.C. Tchamba, “Study of early age shrinkage, hydraulic pressure and conductivity of cement paste”, CONCREEP 7 conference, Nantes 05.
- [B3] S. Amziane, Mesure des propriétés rhéologiques en camion malaxeur, 40^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Nice, Octobre 2005
- [B4] S. Amziane, Poussée des bétons sur les coffrages , 23^{ème} congrès universitaire de génie civil - AUGC Grenoble, 25-26 mai 2005 AUGC, (Association Universitaire de Génie Civil).
- 2004** [B5] S. Amziane, C.F. Ferraris, Caractérisation de la prise des matériaux cimentaires , 39^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Mulhouse, Octobre 2004
- 2003** [B6] S. Amziane, N.R. Andriamanantsilavo, Etude de la pression des matériaux cimentaires Etude de la pression des matériaux cimentaires sur les coffrages, 38^{ème} colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie Brest Octobre 2001 Groupe Français de Rhéologie , n°299238S dépôt légal : septembre 2001
- 2002** [B7] S. Amziane, N.R. Andriamanantsilavo, Ph. Baudeau, An experimental study on the pressure of cement based materials against formwork , The 15th Engineering Mechanics Division Conference of the American Society of Civil Engineers at Columbia University in the City of New York, June 2-5, 8pp, 2002
- 2001** [B8] S. Amziane, N.R. Andriamanantsilavo, Ph. Baudeau, Etude de la pression des matériaux cimentaires sur les coffrages, 36^{ème} colloque annuel du Groupe

Français de Rhéologie Marne-la-Vallée, 10-12 Octobre 2001 Groupe Français de Rhéologie, n°299238S dépôt légal : septembre 2001

- 2000** [B9] S. Amziane, Outil de décision pour l'évaluation des dégradations de structures en béton armé, 3ème congrès universitaire de génie civil - AUGC Lyon, 27-28 juin 2000, AUGC, (Association Universitaire de Génie Civil) Forum des associations Génie Civil et Urbain, AUGC, AFGC, IREX vol.1 pp.215-222 ISSN 2-9509268-8-6
- 1998** [B10] S. Amziane, A. Loukili, Simulation of Cyclic behaviour of HSC structures, The International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, August 16-20, 1998, Sherbrooke, Qc, Canada
- 1997** [B11] S. Amziane, J. Lamirault, A. Loukili, From Normal Strength Concrete to High Strength Concrete : Concrete behaviour under static and cyclic loadings, Proceeding of the 1997 International Conference on Engineering Materials June 8-11, 1997, Ottawa, Canada. ISBN : 0-921303-70-X
- [B12] S. Amziane, J.F. Dube, J. Lamirault, J.F. Daubet, Passage du dommage local au dommage global d'une structure : proposition d'une démarche , 4^{ème} Réunion annuelle du réseau de laboratoire GEO, 24-28 Novembre 1997, Aussois.
- [B13] S. Amziane, Influence des fibres métalliques sur le comportement des BHP, V^{ème} Colloque de l'Intergroupe des Ecoles Centrales, Nantes, 7-10 juillet 1997
- [B14] S. Amziane, Formulation analytique du comportement de bétons ordinaires et à très hautes performances sous charges cycliques, 15^{èmes} Journées de l'AUGC, Strasbourg, Prix Jeunes Chercheurs René Houpert , 1997
- 1996** [B16] S. Amziane, J.F. Dube, J. Lamirault, Simulation du comportement de structures en béton armé sous charges cycliques, Génie parasismique et aspects vibratoires dans le Génie Civil, 4^{ème} Colloque de l'AFPS, 10-12 avril 1996, ISBN n° 2-911709-00.
- [B17] S. Amziane, Simulation du comportement d'ossatures en béton armé sous charges dynamiques, IV^{ème} Colloque de l'Intergroupe des Ecoles Centrales - Lille, 7-9 juin 1996
- [B18] S. Amziane, J. F. Dubé, J. G. Sieffert, Application d'un indicateur à l'évaluation de l'endommagement d'une structure en béton armé , 3^{ème} Réunion annuelle du réseau Géomatériaux - Environnement - Ouvrages, 2-6 décembre 1996

- [B19] S. Amziane, J.F. Dube, J. Lamirault, H. Hussein, Comportement du béton et caractérisation de l'amortissement structural, GEO 1996, 3^{ème} réunion annuelle, Aussois, France, 02-06 décembre 1996
- [B20] S. Amziane, J.F. Dubé, J. Lamirault, Analyse prévisionnelle non linéaire par éléments finis multicouches, GEO 1996, 3^{ème} réunion annuelle, Aussois, 2-6 décembre 1996
- 1995** [B21] S. Amziane, J. Lamirault, Simulation du comportement de structures en béton armé sous charges cycliques, 4^{ème} Colloque de l'AFPS, Génie parasismique et aspects vibratoires dans le Génie Civil, 10-12 avril 1996, ISBN n° 2-911709-00.
- 1994** [B22] S. Amziane, J. Lamirault, Simulation du comportement de structures en béton armé sous charges cycliques, AUGC 1995, Nantes, France

8.4 Rapports de contrats industriels

- 2002** [C1] S. Amziane, Simulation du comportement d'une structure sous charges roulantes, rapport de contrat de recherche pour le compte de Queguiner Industrie, 29400 Landivisiau
- 2001** [C2] S. Amziane, Etude de caractérisation des propriétés des bétons de la base sous-marine de Lorient, rapport de contrat pour le compte de SPIE CITRA OUEST
- 2000** [C3] S. Amziane, Etude de caractérisation des propriétés des bétons de résine en flexion, rapport de contrat de recherche pour le compte de Queguiner Industrie, Landivisiau

8.5 Thèse de doctorat et DEA

- 1998** [D1] S. Amziane, Comportement cyclique des bétons ordinaires et des BHP : De l'expérimentation du matériau à la simulation du dommage des structures en béton armé, Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, Janvier 1998
- 1994** [D2] S. Amziane, Mise au point d'un essai de fatigue cyclique de flexion de structure en béton armé, DEA de l'Ecole Centrale de Nantes, Juin 1994

TRAVAUX REALISES

1 INTRODUCTION

Les bétons connaissent depuis plusieurs décennies une évolution remarquable en matière de rhéologie à l'état frais et du comportement mécanique à l'état durci. Ces avancées techniques sont le résultat d'une recherche scientifique accrue dans le domaine de la physico-chimie des matériaux cimentaires. Ainsi d'un mélange à base d'eau, de ciment, et de granulats nous sommes passés à des mélanges complexes intégrant en plus des fillers tels que la fumée de silice, des adjuvants tels que les superplastifiants et des éléments de renforcement tels que les fibres.

Ces développements sur le matériau se sont logiquement répercutés sur les procédés de fabrication et de mise en œuvre dans le génie civil. Par exemple, il devient courant de réaliser des murs banchés de grande hauteur (supérieure à 10 m) en une seule phase ainsi que des structures en béton à géométrie complexe et fortement ferraiées. En outre, que ce soit respectivement dans les domaines des procédés de malaxage, d'extrusion des matériaux cimentaires, de pompage du béton, d'injection de coulis à base de ciment pour le renforcement des sols, ou encore en ce qui concerne la finition des murs en béton banchés, la maîtrise du comportement physico-mécanique de la pâte de ciment a permis d'améliorer de manière significative l'efficacité des procédés et la qualité des réalisations.

Pour autant, ces avancées ne permettent toujours pas de lever un certain nombre de verrous technologiques. Par exemple, l'industrie de la préfabrication butte toujours sur le problème du bullage des parements, en particulier en procédés utilisant des bétons très fermes. Les temps de malaxage et la détermination de la rhéologie pendant cette phase ne sont pas encore parfaitement maîtrisés. La prévision de l'évolution de la rhéologie du matériau pendant la phase transport reste empirique. L'évaluation des poussées contre les coffrages et la prévision d'un temps de décoffrage font l'objet de nombreux travaux de recherche.

Dans ce contexte, l'élaboration de connaissances nouvelles dans le domaine du comportement des matériaux cimentaires au jeune âge est toujours d'actualité, d'une part pour optimiser les procédés et d'autre part pour améliorer les caractéristiques et la qualité des produits finis. C'est l'objectif que je me suis fixé depuis 1999.

Aujourd'hui, de nombreux résultats ont d'ores et déjà été établis. Dans le cadre de ce document, strictement réservé aux travaux post thèse, une revue de synthèse sous forme de bilan des principaux points abordés permet de tirer les enseignements essentiels puis de définir un projet et des perspectives.

Le document est organisé suivant quatre thèmes :

- Malaxage en camion bétonnière
- Poussée des matériaux cimentaires contre les coffrages
- Structuration des matériaux cimentaires
- Modélisation physique et simulation numérique de la cinétique de maturation.

Une conclusion suivie des perspectives et projets sont proposés en fin de chapitre.

2 EVALUATION DE LA RHEOLOGIE PENDANT LE MALAXAGE EN CAMION BETONNIERE

A partir des ingrédients bruts (ciment, eau, granulats, adjuvants, ...), le malaxage est la première étape dans le processus de fabrication du béton. De la qualité du malaxage dépend l'homogénéité structurelle du béton. Dans ce domaine, les travaux du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a montré l'influence du paramètre malaxage sur l'homogénéité du béton en sortie du camion toupie [1,2] et sur la caractérisation de la rhéologie en malaxeur de laboratoire [3,4].

Sur ce dernier point, l'usage de plus en plus large de bétons très fluides, dont la caractérisation par le cône d'Abrams (ASTM C 143 [5]) s'est avéré insuffisant, a eu pour conséquence l'émergence de nombreuses nouvelles méthodes de caractérisation de la rhéologie des bétons frais. Une synthèse de ces dispositifs [6] a montré les avantages, inconvénients et limites liés à la géométrie, au coût et à la complexité d'utilisation de plus de 57 appareils (U test, boîte LCL, etc.) mis en oeuvre à ce jour.

Pour caractériser un béton fluide, il apparaît clairement que le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité sont deux informations indispensables [7]. La détermination précise de ces paramètres n'est actuellement possible qu'à l'aide d'un rhéomètre à béton [8, 9 et 10]. Le coût de ces appareils (pourtant très faible par rapport au coût des quantités de béton produites), la complexité de leur utilisation à l'échelle industrielle et peut-être le nombre réduit d'appareils disponibles, (BML CEMAGREF, BTRHEOM, IBB and Two Points Test, etc.) font que leur usage est encore extrêmement réduit voire confidentiel aux laboratoires de recherche.

Par ailleurs, le problème principal sur lequel buttent toutes les méthodes est lié à la calibration du dispositif d'essai. La dispersion des résultats est un facteur qui réduit considérablement la confiance de l'opérateur dans la mesure qu'il effectue. C'est sûrement la raison essentielle pour laquelle le cône d'Abrams reste depuis 1919 l'outil de référence pour caractériser le béton frais, car sa calibration simple et sans équivoque ne prête pas à confusion. Il reste que ce test, au travers de la mesure de l'affaissement, reflète seulement la contrainte seuil [11] ce qui est insuffisant pour les bétons fluides. Des tentatives de détermination de la viscosité partant de la mesure du diamètre de galette formée après affaissement ont montré les limites de cette possibilité [12]. A partir de ce bref constat, les développements doivent se poursuivre afin de trouver une solution simple et fiable adaptée aux besoins de l'Industrie.

A ce titre, l'analyse du process de fabrication du béton montre que la phase transport, notamment juste avant mise en oeuvre, est certainement la plus adéquate pour mesurer les propriétés rhéologiques. C'est d'ailleurs le moment généralement choisi pour faire un test au cône d'Abrams. Cela permet en outre de vérifier que le temps de transport n'a pas affecté la rhéologie prévue lors du dosage avant malaxage.

Pour ces raisons, nous allons explorer les possibilités de mesure, par l'exploitation des données disponibles et mesurables en camion à ce moment critique. L'idée de mesurer les grandeurs rhéologiques pendant la phase de malaxage n'est pas nouvelle [13] ; le développement des rhéomètres a conduit à explorer cette possibilité. Il reste que peu de travaux existent sur le cas de cette détermination pendant la phase transport en camion.

2.1 Description synthétique de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la maniabilité du béton frais pendant la phase malaxage en camion toupie. Il s'agit en particulier de déterminer les propriétés rhéologiques fondamentales : viscosité plastique et contrainte seuil, sans avoir à réaliser un déversement du matériau et un essai au rhéomètre béton.

L'étude complète comprenant un état de l'art sur le malaxage en bétonnière est disponible sur le rapport [14]. La partie expérimentale est présentée dans le détail sur la publication [15].

Neuf mélanges de béton d'ouvrabilité variable ont été expérimentés (Tableau 1). Les mélanges sont issus de deux gâchées témoins, auxquelles nous avons ajouté suivant le cas un superplastifiant ou un viscosant pour modifier l'ouvrabilité du matériau. Le ciment Portland utilisé est de type ASTM C150 type I. Il dispose d'une densité de 3050 kg/m^3 et d'une surface spécifique Blaine de $467 \text{ m}^2/\text{kg}$. Un laitier granulé de haut fourneau (ground granulated blast furnace slag) est utilisé en matériau d'ajout au ciment. Un sable de granulométrie 0-3 mm et un gravier de dimensions 4-10 mm sont utilisés. Le superplastifiant haut réducteur d'eau est un polycarboxylate modifié d'une densité de 1.1.

Les mesures faites après homogénéisation du matériau sont fondées sur la méthodologie utilisée en rhéométrie traditionnelle. Ainsi, en réduisant la vitesse de rotation de la toupie du maximum au minimum possible, le matériau est soumis à un taux de cisaillement décroissant. La puissance générée à chaque incrément de vitesse est simultanément enregistrée. Finalement, un rhéogramme du matériau est obtenu. Les propriétés rhéologiques sont déduites moyennant le tracé d'une droite de régression tel que défini par le modèle de Bingham :

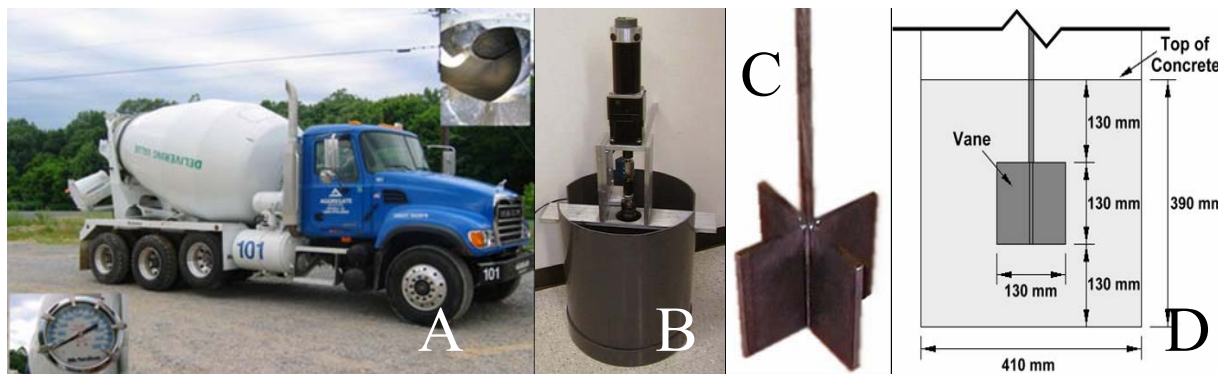
$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

avec $\dot{\gamma}$: taux de cisaillement, τ contrainte de cisaillement.

Tableau 1: Composition des mélanges testés

		Première gâchée de béton (50% de la capacité maximale)					Deuxième gâchée de béton (100% de la capacité maximale)			
		C10	C11	C12	C13	C14	C20	C21	C22	C23
Gravier (sec)	kg/m ³	1099.4		←Constant→			+869.9		←Constant→	
Sable (sec)	kg/m ³	774.0		←Constant→			+908.4		←Constant→	
Eau (totale)*	kg/m ³	145.8		←Constant→			+151.4		←Constant→	
Ciment	kg/m ³	163.7		←Constant→			+193.1		←Constant→	
Slag	kg/m ³	163.2		←Constant→			+193.1		←Constant→	
Retardateur	L/m ³	0.656		←Constant→			+1.656		←Constant→	
Superplastifiant (SP)	L/m ³	0	+1.4	+1.4	+0.6			+4.0	+4.0	+4.0
Viscosant	L/m ³	0				+0.2				
Temps	H	0.5	1.0	1.5	2.0	2.4	0.5	1.0	1.6	2.1
Temperature	°C	18	19.5	20	20	21	29.5	30	31	31
Affaissement	mm	70	110	170	240	150	60	120	60	40

*La quantité d'eau indiquée tient compte du taux d'humidité initiale des granulats.



<i>Figure 1 : Vue du camion malaxeur, indicateur du slump (en bas à gauche) et intérieur de la bétonnière (en haut à droite)</i>	<i>Figure 2 : Vue du rhéomètre ICAR</i>	<i>Figure 3 : Géométrie «vane».</i>	<i>Figure 4 : Dimensions du rhéomètre</i>
--	---	-------------------------------------	---

Les résultats de ces expériences sont ensuite analysés et comparés aux données obtenues à l'aide du rhéomètre ICAR (figures 2 b,c,d) largement décrit ref. [16,17]. Ce rhéomètre portable

est conçu pour des mesures de rhéologie sur le béton. Le rhéomètre portable ICAR (figures 2, 3 et 4) a fait l'objet d'un calibrage sur une centaine de bétons d'ouvrabilité diverse et d'une comparaison avec le rhéomètre du LCPC BTRHEOM.

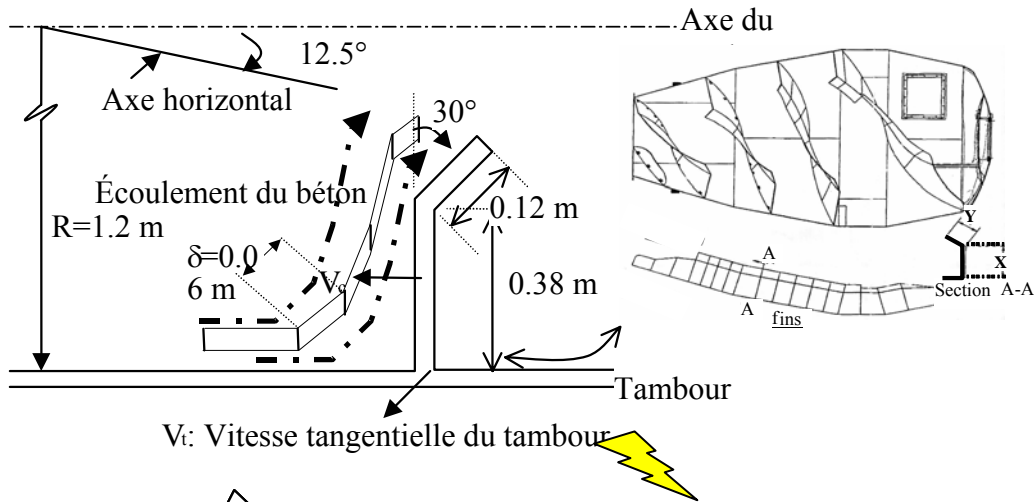
Le protocole expérimental adopté est le suivant :

- Mesure de la courbe de puissance avec la bétonnière vide (figure 6)
- Mise en place du béton dans la bétonnière après malaxage en centrale pendant 50 s
- Remplissage du camion à 50% de sa capacité maximale pour la gâchée 1 (C_{10} à C_{14}) et 100% pour la gâchée 2 (C_{20} à C_{23})
- Début des mesures 30 minutes après malaxages
- Remplissage de la cuve du rhéomètre (40 l) et mesure de l'affaissement au cône d'Abrams
- Test simultané sur camion et rhéomètre. La vitesse de la toupie est portée à la vitesse maximale 16.6 tpm puis maintenue pendant 10 révolutions. La vitesse est ensuite réduite par palier de 2 tpm.

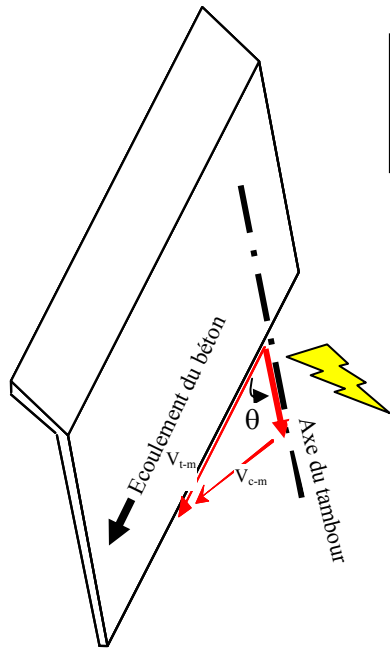
L'usage du camion toupie pour déterminer la contrainte seuil et la viscosité requiert plusieurs mesures simultanées de vitesses de rotation de la toupie et des puissances nécessaires à la rotation de la cuve. Bien entendu, à l'instar d'un rhéomètre béton, en raison de l'influence de la géométrie sur les mesures, la détermination des propriétés intrinsèques n'est pas possible à l'aide du camion. De plus, le passage de la vitesse de rotation [tours par minute ou rd/s] en taux de cisaillement [s^{-1}] nécessite de tenir compte des caractéristiques géométriques du malaxeur (figure 5). Pour passer d'une entité à l'autre, une méthode est exposée référence [18]. A l'issue des calculs tenant compte de la géométrie du camion utilisé et de la plage de vitesse possible (0 à 16.6 tours par minute), il apparaît que le taux de cisaillement est compris entre 0 et $18.5 s^{-1}$.

2.2 Discussion des principaux résultats

Les courbes d'écoulements obtenues à l'aide du camion bétonnière pour les deux gâchées sont données sur les figures 6 et 7. Celles obtenues à l'aide du rhéomètre ICAR sont données sur les figures 8 et 9. Les droites de régression linéaires sont de bonne qualité avec un coefficient de corrélation moyen égale à 0.93.



Écoulement du béton relativement à la pale fixe hélicoïdale pendant la phase malaxage. L'écoulement du béton est modélisé ici sous forme d'un milieu continu d'éléments finis discrets. Les éléments sont initialement carrés de côté $\delta = 0.06$ m. Le taux de cisaillement maximum est certainement localisé à l'extrémité angulaire de la pale.



Vc-m : Vitesse du béton entrant dans le malaxeur (en phase malaxage)
 Vt-m : vitesse tangente de la pale fixe du malaxeur (en phase malaxage)

$$\text{tg}(\theta) = \frac{V_{t-m}}{V_{c-m}}$$

Figure 5 : Caractéristiques géométriques de la bétonnière du camion-malaxeur utilisé

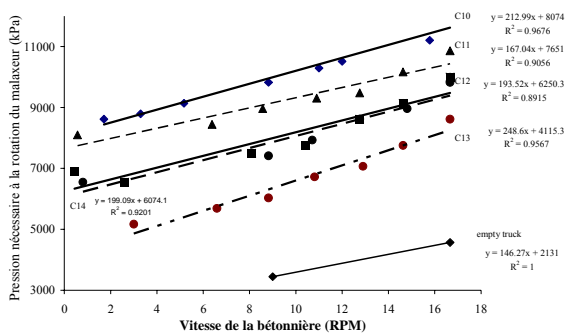


Figure 6 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du camion sur la gâchée C10-C14

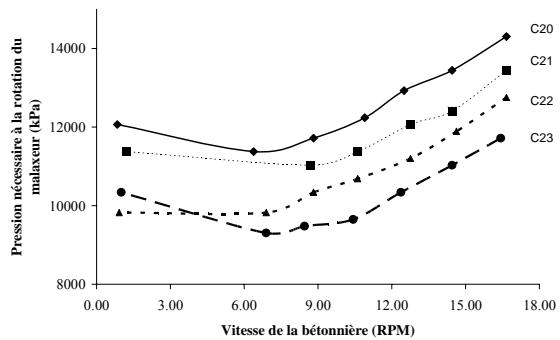


Figure 7 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du camion sur la gâchée C20-C23

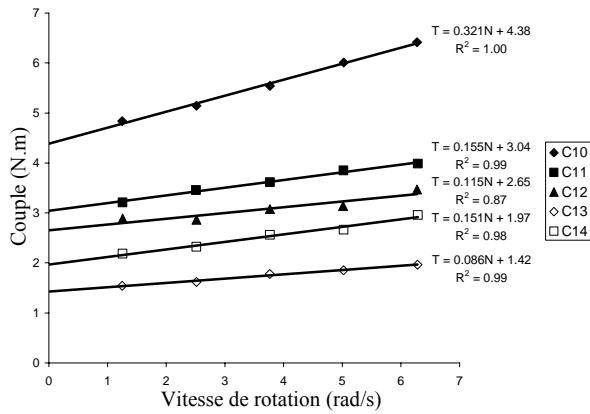


Figure 8 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre sur la gâchée C10-C14

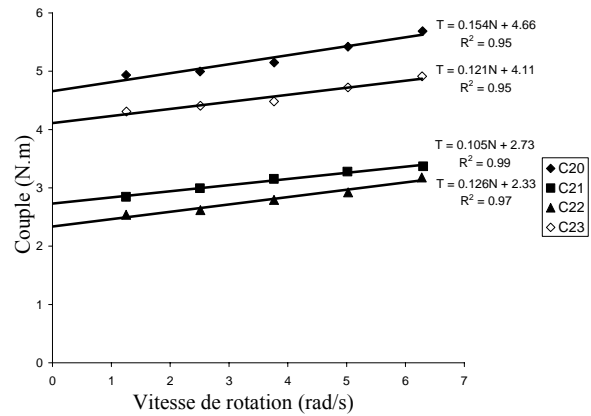


Figure 9 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre sur la gâchée C20-C23

2.2.1 Variation de la viscosité plastique

Sur la figure 10, les valeurs de viscosité plastique relatives sont reportées. Elles sont déduites en faisant le rapport entre viscosité mesurée (pente de la droite de Bingham des figures 8 et 9) du mélange étudié (C₁₀ à C₁₄ et C₂₀ à C₂₃) sur la viscosité mesurée du mélange témoin (C₁₀ ou C₂₀). L'ajout du super plastifiant (SP) au mélange C₁₀ se traduit par une baisse de la viscosité vue de manière similaire par le rhéomètre et la bétonnière. Cependant, les ajouts ultérieurs de super plastifiants sont analysés de manière contradictoire. Une hausse de viscosité est déduite des courbes d'écoulement de la bétonnière. A l'inverse, une baisse de viscosité est observée par le rhéomètre ICAR. De même, l'ajout d'un agent viscosant (mélange C₁₄) entraîne une augmentation de viscosité pour le rhéomètre et une baisse pour la bétonnière.

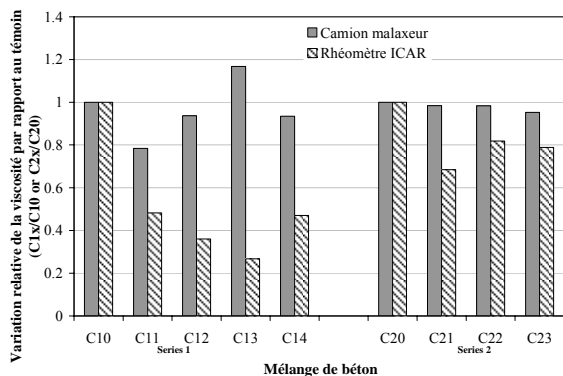


Figure 10 : Comparaison des viscosités obtenues suivant le mélange et le dispositif de mesure

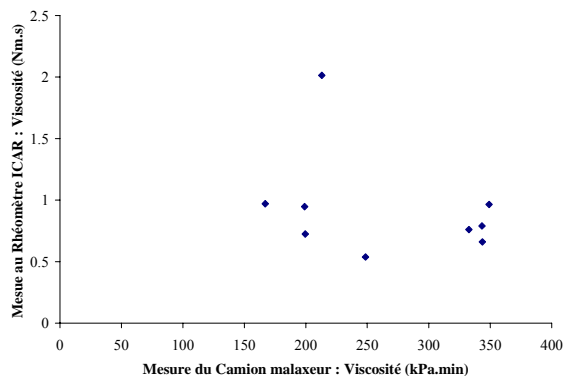


Figure 11 : Corrélation des viscosités données par le rhéomètre et le camion malaxeur

Lors de la seconde gâchée, l'ajout d'un SP conduit à une chute de viscosité vue par les deux dispositifs (mélange C₂₁). On note que le rhéomètre réagit de manière plus sensible au changement de viscosité que la bétonnière. Ainsi, l'ajout de SP (mélange C₂₂) conduit à une baisse de viscosité pour le rhéomètre alors que celle-ci reste quasi constante pour la bétonnière.

Ces observations montrent au final soit des tendances inverses soit une mauvaise corrélation en raison de la grande différence de sensibilité (figure 11).

2.2.2 Variation de la contrainte seuil

Pour les bétons de la gâchée 2 (mélange C₂₀ à C₂₃) un test à vitesse de cisaillement constante « Stress Growth, [19] » est proposé figure 12. La courbe de comportement montre 3 phases :

- une phase pré pic d'accroissement du couple sans mouvement de matériau,
- le pic qui correspond à la résistance maximale qu'oppose le matériau au couple appliqué
- une phase post pic quasi plastique avec une tendance à une lente baisse du couple. La valeur au pic peut être assimilée à celle du seuil de cisaillement [20 et 21].

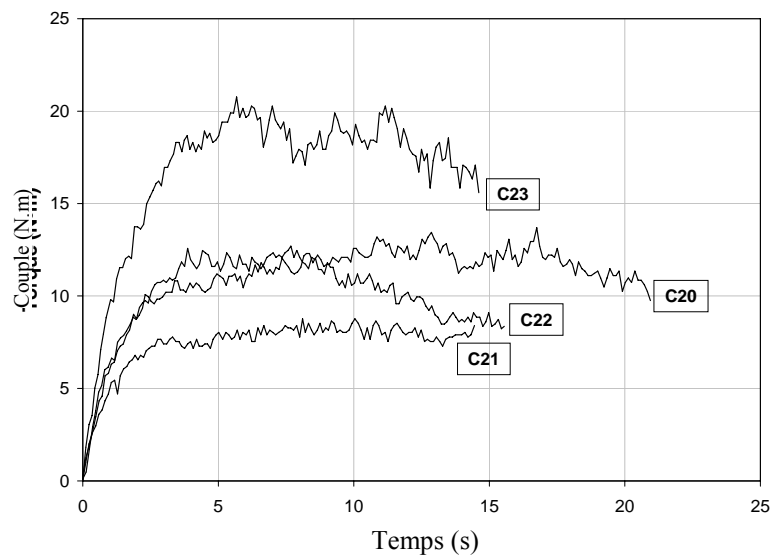


Figure 12 : Comportement du béton soumis à un cisaillement à vitesse constante

Les valeurs issues de cette méthode ainsi que celles déduites des courbes découlement de la bétonnière et du rhéomètre sont données sur la figure 13. Une comparaison au slump mesuré est aussi réalisée. Quelle que soit la méthode retenue pour calculer le seuil (droite de Bingham issue de la bétonnière ou du rhéomètre, Stress Growth.), Il est remarquable de constater que les résultats obtenus suivent la même tendance. Le slump suit comme attendu une évolution inverse du seuil de cisaillement. Par exemple l'ajout d'un viscosant (mélange C₁₄) induit l'augmentation des seuils vus par la bétonnière et le rhéomètre. Ceci est synonyme d'un matériau plus ferme du mélange C₁₄ par rapport au mélange C₁₃. Il en résulte une chute de l'affaissement au cône d'Abrams de 24 cm à 15 cm.

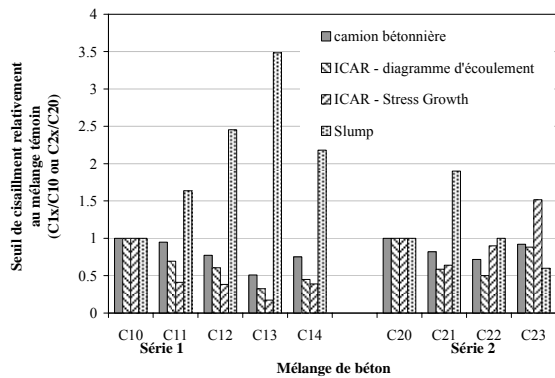


Figure 13 : Comparaison des seuils de cisaillement obtenus suivant le mélange et le dispositif de mesure

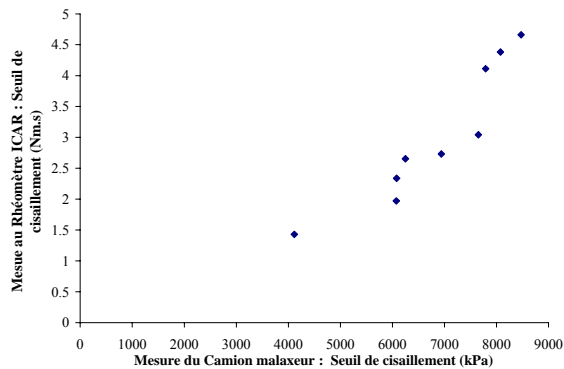


Figure 14 : Corrélation des seuils de cisaillement donnés par le rhéomètre et le camion malaxeur

Les bons résultats issus du comparatif se retrouvent sur celui du diagramme de corrélation bétonnière-rhéomètre avec un diagramme quasi linéaire qui exprime bien les variations et les sensibilités similaires des deux méthodes (figure 14). La proportionnalité entre seuil de cisaillement et affaissement par ailleurs démontrée [11 et 22] est une nouvelle fois observée.

2.3 Conclusions

La campagne d'essais présentée a permis de montrer la pertinence de l'utilisation d'un camion toupie sans modification majeure, de manière analogue à un rhéomètre béton.

Un protocole quasi identique à celui habituellement utilisé dans les tests au rhéomètre s'est révélé adapté au cas de la bétonnière.

L'analyse des courbes d'écoulement a montré une moindre sensibilité de la bétonnière aux changements d'ouvrabilité du béton, par rapport au rhéomètre, tant au niveau du seuil d'écoulement que de la viscosité plastique.

Ainsi, la contrainte seuil déterminée avec la toupie est bien corrélée aux mesures de seuil du rhéomètre ICAR. Cependant, les variations de viscosité plastique obtenues avec la toupie sont inverses des variations de viscosité plastique données par le rhéomètre ICAR. Au regard des mélanges testés, les résultats du rhéomètre paraissent plus vraisemblables que ceux de la bétonnière en ce qui concerne les variations de viscosité.

La levée de plusieurs sources d'incertitudes est susceptible d'améliorer ce dernier point. Dans un premier temps, la mise en œuvre d'instruments de mesure précis, au coût modique si l'on considère le prix d'un camion toupie, nous semble indispensable. En particulier, il faudra mettre en place un capteur de couple précis sur l'arbre entraînant la rotation de la bétonnière.

Une automatisation de la mesure de la vitesse de rotation peut aussi améliorer la qualité des rhéogrammes.

Il reste que l'une des difficultés majeures à lever réside dans la possibilité de transcrire les diagrammes (couple-vitesse) en diagramme (contrainte de cisaillement - taux de cisaillement). Au moyen d'un modèle réduit de laboratoire dont la conception sera fondée sur une analyse dimensionnelle puis un travail sur la définition, des conditions aux limites seront deux pistes à suivre pour rendre comparables les résultats d'un rhéomètre et ceux d'une bétonnière.

3 LA POUSSEE DES MATERIAUX CIMENTAIRES CONTRE LES COFFRAGES

Une fois les opérations de malaxage et de mise en œuvre effectuées, le développement de la poussée exercée par le béton frais sur les parois coffrantes est un point critique qui a fait l'objet de nombreuses investigations rapportées dans la littérature récente [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 et 31]. Cet aspect intéresse aussi bien les fabricants de coffrage que les entreprises du bâtiment et du génie civil [32]. Une surestimation de la pression entraîne une élévation du coût des coffrages ; une sous-estimation des pressions a pour conséquence des déformations inacceptables de la structure, voire son effondrement.

Les nombreuses recherches ont abouti à la mise en place de normes pour le dimensionnement des coffrages [33, 34 et 35]. Ces règlements sont largement analysés et synthétisés par [36]. Les principaux paramètres qui influent significativement sur la pression d'un béton sont : la vibration, les dimensions de la paroi coffrante, la température, l'ouvrabilité au cône d'Abrams, la concentration en adjuvants, la masse volumique du béton et la vitesse de coulage. Il faut noter qu'une partie des paramètres cités est affectée par la concentration volumique en granulats. On observe pourtant que dans les formulations en vigueur, la concentration granulaire n'est abordée que de manière indirecte. En effet, seule la masse volumique du béton est susceptible de rendre compte de l'influence des granulats sur la poussée. Compte-tenu de cette dernière remarque, nous avons pensé utile d'effectuer une étude expérimentale permettant d'approfondir la connaissance que nous avons de la poussée exercée par le béton frais sur les coffrages, en tenant compte de l'influence du rapport pâte/granulats et de la nature de la distribution granulaire dans le béton.

Un autre aspect qui suscite l'intérêt de l'industrie dans ce domaine concerne le temps optimal de décoffrage dans l'objectif d'améliorer les cycles de rotation de banche. Aujourd'hui, bien qu'il existe des outils fiables tels que la technique thermique de maturométrie développée par le LCPC [37] ou l'auscultation acoustique, leur usage est confiné à des cas exceptionnels.

Dans l'objectif d'apporter de nouveaux éléments sur ces questions, nous avons mis en œuvre un dispositif permettant d'aller plus loin dans la mesure et l'analyse de la pression du béton contre un coffrage. Il s'agit d'une part de mesurer les pressions totales et interstitielles du béton dès la mise en œuvre jusqu'à la phase décoffrage et d'autre part de réaliser des essais in-situ par adaptation d'un dispositif de laboratoire.

3.1 Description synthétique de l'étude

Concernant l'étude de la poussée des bétons contre les coffrages trois campagnes expérimentales sont présentées :

- Essai en laboratoire à l'aide d'un coffrage grandeur nature
- Essai à la colonne
- Essai in-situ.

3.1.1 Essai en laboratoire à l'aide d'un coffrage grandeur nature

C'est un travail du professeur Baudeau [38]. Mon implication s'est faite sur l'analyse des résultats expérimentaux [39]. Seule une partie des résultats d'essais est présentée dans ce document. La publication [39] comporte le détail des résultats. L'étude est focalisée sur l'analyse de l'influence de la concentration granulaire dans un mélange pâte-granat vis-à-vis de la poussée totale exercée par un béton frais sur une paroi coffrante. L'appareillage expérimental est constitué d'un coffrage grandeur nature instrumenté de capteurs de force, de déplacement et de pression (figures 15, 16 et 17).

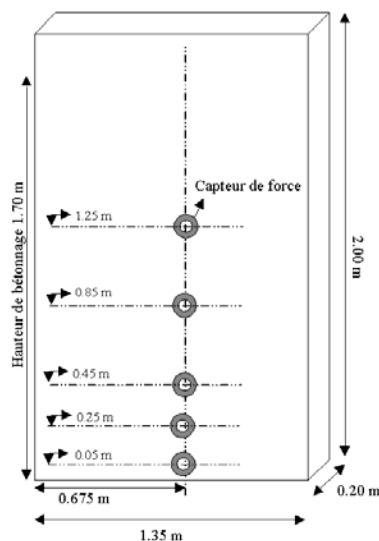


Figure 15: Dimensions du coffrage et emplacement des capteurs de force



Figure 16: Vue de face du coffrage et des capteurs de force



Figure 17: Vue de profil du coffrage

Les investigations sont menées sur des bétons dont la concentration volumique en granulats varie de 0% à 70% (tableau 2). Les caractéristiques du béton sont données sur le tableau 3. Des distributions granulaires continues et discontinues sont utilisées dans la composition des bétons (résultats présentés ref. [39]).

Tableau 2 : Composition d'un exemple de bétons expérimentés

Type de mélange	Gravier (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	$\rho_{\text{béton}}$ (t/m ³)
Dimensions des granulats	3/7	0/3			
M0	0	0	1214.6	607,3	1,82
M1_G1	134.6	67.8	1117.4	558,7	1.88
M2_G1	270	135	1022	511	1.94
M3_G1	405	202.5	922	461	1.99
M4_G1	541	270.5	826	413	2.05
M5_G1	674	337	728.8	364,4	2.1
M6_G1	810	405	632	316	2.16
M7_G1	945	472.5	536	268	2.22
M8_G1	1081	540.5	434	217	2.28
M9_G1	1255	627.5	336	168	2.39

Tableau 3 : Caractéristiques des bétons frais

Type de mélange	$\left(\frac{E}{C}\right)$	$\left(\frac{V_{\text{agrégat}}}{V_{\text{total}}}\right)$ (%)	$\left(\frac{V_{\text{pâte}}}{V_{\text{granulat}}}\right)$
M0	0.5	0	∞
M3_G1	0.5	24.08	3.15
M4_G1	0.5	32.18	2.1
M5_G1	0.5	40.08	1.5
M6_G1	0.5	48.17	1.075
M7_G1	0.5	56.07	0.783
M8_G1	0.5	64.17	0.558
M9_G1	0.5	72.06	0.387

3.1.2 Essai à la colonne

La seconde campagne expérimentale est présentée dans le détail en référence [40]. L'objectif était de mieux comprendre l'origine de la poussée initiale et de mesurer son évolution dans le temps jusqu'au durcissement. Au vu des problèmes de mise en œuvre rencontrés avec le dispositif constitué du coffrage grandeur nature (figures 15 à 17), nous avons conçu un outil de taille plus réduite représenté par une colonne tubulaire (figure 18). L'outil expérimental est

constitué d'une colonne tubulaire d'une hauteur de 1.30 m, 110 mm de diamètre extérieur et d'une épaisseur de 5.3 mm. La colonne est équipée de deux capteurs : 1 capteur de pression totale (figures 19 et 20) et un capteur de pression interstitielle (figures 21 et 22). Des pâtes de ciment, bétons standards et bétons auto-plaçants y ont été successivement testés (Tableaux 4 et 5).

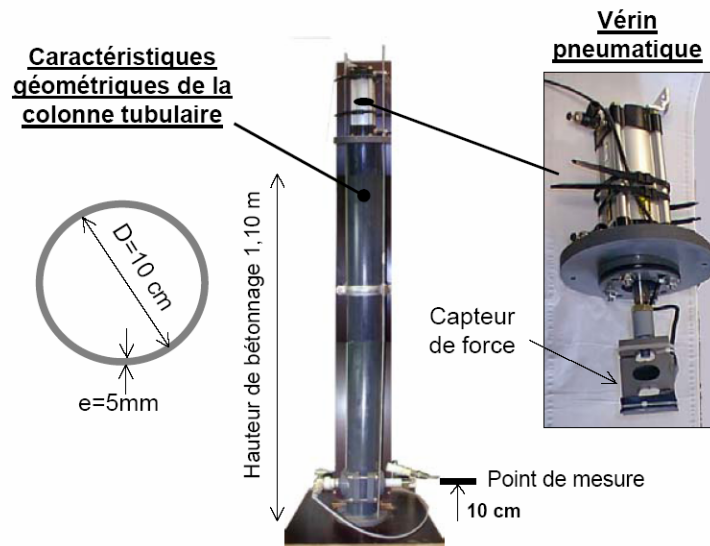


Figure 18 : Caractéristiques géométriques de la paroi coffrante

La mesure de la pression latérale se fait généralement avec un capteur de pression à membrane mis en contact direct avec le matériau. Sous l'action de la pression du matériau, la membrane se déforme et induit une variation conjointe de la résistance des fils à l'intérieur du capteur et de la tension de sortie. Ce procédé de mesure n'est pas adapté pour un matériau qui fait prise tel que la pâte de ciment. En effet, quand le matériau fait sa prise, la déformation de la membrane du capteur n'est pas réversible même si celui-ci n'exerce plus de pression.

En conséquence, nous avons conçu un dispositif original permettant la mesure de la pression latérale exercée par un matériau cimentaire qui fait prise. Le principe de fonctionnement du capteur est fondé sur la mise en œuvre d'une contre-pression d'air régulée. Cette contre-pression est continuellement équilibrée par la pression exercée par le matériau.

Le dispositif est composé de deux cellules interconnectées (figure 20). La première cellule est équipée d'un capteur de pression (3) lié à un distributeur d'air comprimé (2). Dans la seconde cellule, nous avons intégré un capteur de déplacement (4) dont la tête est solidaire d'une membrane élastique très fine en latex. L'autre face de la membrane est en contact direct avec le matériau testé. En cours d'essai, la pression dans les cellules est réglée de telle sorte que la membrane reste toujours dans une position verticale. Cela traduit l'équilibre des pressions de

part et d'autre de la membrane. La pression exercée par le matériau sur le coffrage est par conséquent égale à la pression mesurée dans les cellules.

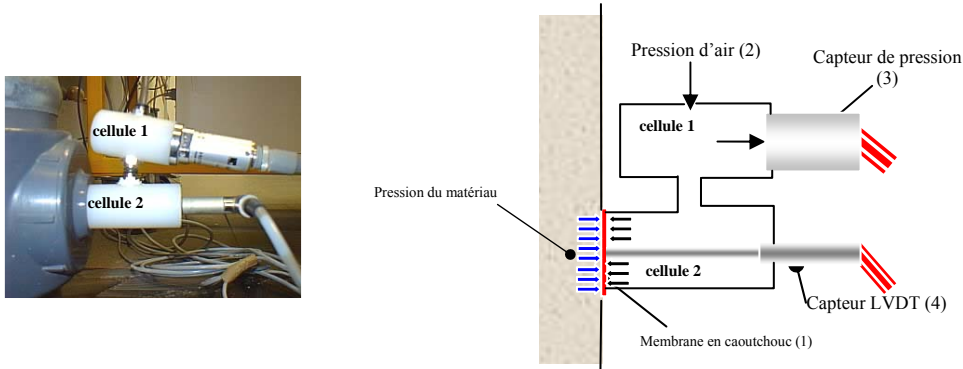


Figure 19 : Vue du capteur de pression totale Figure 20 : Synoptique de fonctionnement du capteur de pression

La mesure de la pression interstitielle dans le sol sous contrainte est généralement réalisée en laboratoire à l'aide de l'appareil triaxial. Ce type d'essai est très complexe à réaliser pour des matériaux fluides tels que la pâte de ciment à l'état frais [41]. C'est la raison pour laquelle un montage spécifique est développé (figure 21). La pression interstitielle est mesurée à l'aide d'un capteur de pression (1) fixé sur un bloc désaérateur (2) saturé d'huile et séparé du matériau par un dispositif de filtration de l'eau en fibres de coton compactées (figure 22). L'huile hydrofuge dans la chambre se met en équilibre de pression avec l'eau présente dans la pâte par transfert de pression à travers le filtre. Les tests effectués ont montré que la réponse de notre appareil de mesure aux variations de pression interstitielle est instantanée.

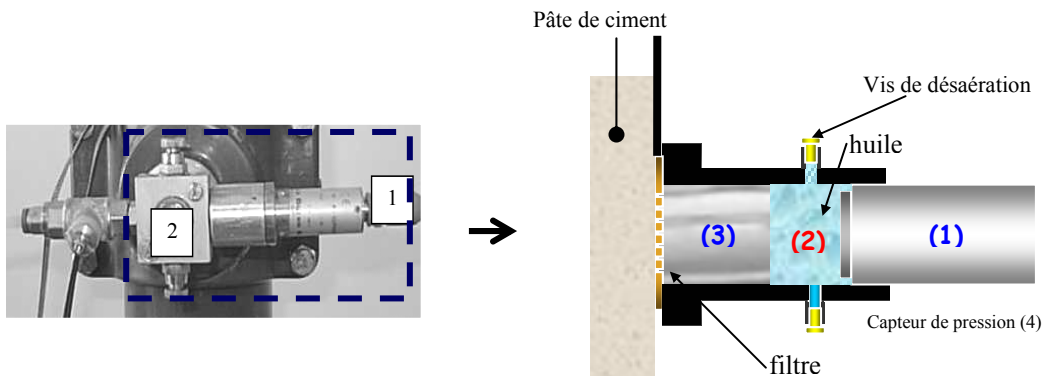


Figure 21 : Vue du capteur de pression interstitielle

Figure 22 : Synoptique de fonctionnement du capteur de pression

Tableau 4 : Formulations des pâtes de ciment et des pâtes de filler calcaire.

Type de mélange	Eau efficace l/m ³	CEM II 32,5 R kg/m ³	BETONCARB P2 kg/m ³	$\rho_{\text{pâte}}$ t/m ³	E/C ou E/FC	ϕ_0 □
P ₃₀	478	1593	-	2,070	0,30	0,52
P ₃₆	523	1454	-	1,977	0,36	0,48
P ₄₅	579	1286	-	1,864	0,45	0,42
FC ₃₆	494	-	1373	1,867	0,36	0,51

Tableau 5 : Formulations des bétons.

Type de mélange	Eau l/m ³	CEM I 52,5R kg/m ³	BETONCARB P2 kg/m ³	Viscocrete 3010 SC l/m ³	Sable 0/3,15 kg/m ³	Gravillon 4/10 kg/m ³
BN	228	350	-	-	795	1031
BAP	210	280	170	2,6	735	891

Tableau 6 : Caractéristiques des mélanges de béton.

Type de mélange	BN	BAP
P (t/m ³)	2,404	2,289
E/C	0,65	0,75
E/(C+FC)	-	0,47
G/S	1,30	1,21
Γ (%)	68	60
Δ	0,46	0,64

3.1.3 Essai in-situ

La technique de suivi de la pression interstitielle sur des bétons devient particulièrement intéressante si elle peut être employée sur les chantiers. Outre un suivi direct de la pression pouvant être utilisé pour vérifier la sécurité des banches vis-à-vis des pressions exercées, on pourra suivre la cinétique de prise du béton en temps réel. Dans ce cadre, une campagne d'essais sur les pressions a été réalisée en conditions réelles de chantier dans le cadre de la thèse de J.C. Tchamba [42]. L'objectif a été d'analyser l'efficacité du capteur de pression interstitielle en condition in-situ (figure 23). Il a été adapté sur une banche de 6 m de hauteur (figure 24). Dans cet objectif, un dispositif portable de pression interstitielle et adapté à une mise en place rapide a été développé. Comme représenté sur la figure 24, le coffrage a été directement équipé d'un dispositif de mesure de pression hydraulique placé

200 millimètres au-dessus de la base du coffrage. Le coffrage a eu une hauteur de 6 m, une longueur de 30 m et une largeur de 0,28 m.



Figure 23 : Vue du coffrage in-situ



Figure 24 : adaptation du capteur de pression interstitielle en pied de coffrage

Le béton a été pompé et mis en place en chute libre d'une hauteur d'environ 1 m après avoir été transporté par camion pendant une heure. Une heure de plus a été nécessaire pour remplir le coffrage en deux couches, soit une vitesse de mise en œuvre de 6m/h. La composition du mélange utilisé est donnée sur le tableau 7. Il s'agit globalement d'une composition proche du béton (BN) étudiée précédemment (tableau 5).

Tableau 7: Formulation du béton in-situ

Type de mélange	Eau efficace l/m ³	CEM I 52,5R kg/m ³	Sable 0/3,15 kg/m ³	Gravillon 4/10 kg/m ³
BN-1	175	355	765	1010

3.2 Discussion des principaux résultats

3.2.1 Essai en coffrage de laboratoire

L'objectif fixé par nos expériences est d'apporter une réponse quant à l'influence de la concentration granulaire sur la poussée des bétons frais sur les parois coffrantes. Du point de vue de la réglementation, les nombreux essais réalisés à échelle réelle montrent que l'apport granulaire influe favorablement sur le profil de pression (figure 25) [39]. Il apparaît suffisant de tenir compte du volume granulaire en l'introduisant de manière indirecte à partir de la masse

volumique du béton. Ceci va dans le sens de la sécurité, sans que le sur-dimensionnement ne soit exagéré (figure 26) [40].

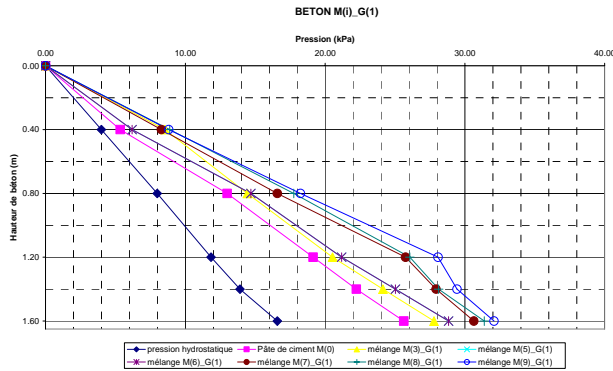


Figure 25 : Profil de pression latérale suivant le type de mélange

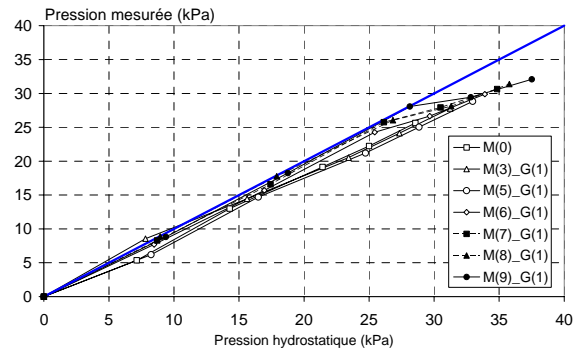


Figure 26 : Comparatif entre la pression mesurée et la pression hydrostatique

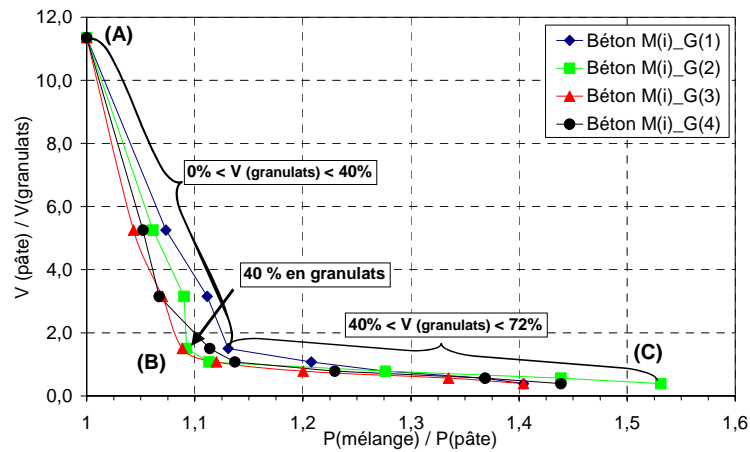


Figure 27 : Influence de la phase granulaire sur la poussée du béton frais

Concernant la corrélation entre concentration granulaire et profil de pression, la définition du béton frais, matériau à deux phases (pâte interstitielle + granulats) nous permet de différencier l'action de la pâte et des granulats sur la forme du profil de pression. L'analyse des résultats, notamment en ce qui concerne le phénomène du changement de profil de la poussée, a montré une forte similitude entre les phénomènes locaux observés pendant l'écoulement du béton frais et les profils de pression déduits de nos essais. En effet, nous avons constaté que le seuil critique de 40% en concentration volumique de granulats anguleux modifie d'une part l'écoulement du béton frais de manière défavorable, d'autre part la forme du profil de pression de manière favorable.

Les essais réalisés sur un mélange sans granulats $M_{(0)}$ et sur des mélanges de formulation granulaire fondée sur le rapport $\left(\frac{V_g}{V_p}\right)$ nous permettent de différencier l'influence de la phase "granulaire" de la phase "pâte" vis-à-vis de la pression exercée par le béton. La distinction biphasique choisie dans notre étude n'est pas fortuite. Ce choix reprend un concept largement utilisé par de nombreux auteurs [43,44, et 45] dans l'étude rhéologique du béton frais. A titre d'exemple, l'étude [46] montre l'influence de la concentration granulaire sur l'ouvrabilité du béton. Les relations de comportement suivantes sont proposées :

$$\sigma_c = \sigma_a V_a + \sigma_p (1 - V_a) \quad (2) \quad \text{et} \quad \varepsilon_c = \varepsilon_p (1 - V_a) \quad (3)$$

où, σ_c = contrainte dans le béton, σ_a = contrainte dans les agrégats, σ_p = contrainte dans la pâte, ε_c = déformation dans le béton, ε_p = déformation dans la pâte, et V_a = concentration volumique en agrégats. Il est constaté aussi, selon cet auteur, que le seuil de cisaillement décroît avec la diminution de la concentration volumique en agrégats :

$$\tau_{oc} = \tau_{op} \left[1 + \frac{\left(1.5 V_{a.\max} + V_a^2 \right)}{\left(V_{a.\max} + V_a \right)} \right] \quad (4)$$

τ_{oc} = contrainte limite de cisaillement, $V_{a.\max}$ = concentration volumique en agrégats maximale, τ_{op} = contrainte limite de cisaillement dans la pâte.

Les indications fournies par ces équations montrent clairement la dépendance entre les deux phases pâte et agrégats dans le comportement du béton frais.

La figure 27 présente l'influence de la phase granulaire sur le profil de pression. Une indication concrète des phénomènes observés nous est ainsi donnée. Chaque courbe peut être décomposée en deux intervalles :

- L'intervalle (AB-figure 27) tel que $1,5 < \left(\frac{V_g}{V_p}\right) < 11,35$, soit une concentration volumique en granulats comprise entre 8.1% et 40%, alors que le rapport $\left(\frac{P_{\text{mélange}}}{P_{\text{pâte}}}\right)$ ne varie que très faiblement, entre 1,0 et 1,15 ;

- L'intervalle (BC-figure 27) tel que $0,387 < \left(\frac{V_g}{V_p} \right) < 1,15$, soit une concentration volumique en granulats comprise entre 40% et 72%, avec une variation sensible du rapport $\left(\frac{P_{mélange}}{P_{pâte}} \right)$ entre 1,15 et 1,55.

L'évolution du rapport $\left(\frac{P_{mélange}}{P_{pâte}} \right)$ en fonction de $\left(\frac{V_g}{V_p} \right)$ dans la phase (AB) traduit l'effet de masse (augmentation de la masse volumique) dû à l'adjonction de granulats. Le changement de comportement sur la phase (BC) résulte quant à lui de la modification du comportement rhéologique du béton frais.

De nombreuses recherches viennent corroborer ce constat [43,47]. En effet, dans un mélange où le volume de la pâte est prépondérant par rapport à celui des granulats, les contacts entre grains sont quasi-inexistants. Inversement, on observe un accroissement parallèle des volumes granulaires et des contacts intergranulaires dans un béton frais à partir d'un seuil critique. Ainsi, certains auteurs [45] estiment que, compte-tenu des propriétés visqueuses de la pâte de ciment, on considère la plupart du temps cette dernière comme élément essentiel de l'écoulement, les granulats n'intervenant que par des actions d'encombrement considérées généralement comme défavorables à l'écoulement. Une quantification précise et systématique du seuil critique qui semble induire une non-linéarité du profil de pression est relativement complexe, étant donné le nombre de paramètres qui entrent en jeu dans la détermination du taux de cisaillement (nature minéralogique, dimension et forme des granulats, ...). Néanmoins, dans la majorité des cas, la concentration volumique en granulats est le paramètre prépondérant à prendre en compte.

A ce propos, notre étude montre que la zone de transition se situe dans l'intervalle, soit entre 40% et 48% d'agrégats en volume par rapport au volume total. Ce résultat rejoint dans ses proportions une étude [44] menée sur les frottements intergranulaires dans le béton frais vibré en écoulement à travers un maniabilimètre spécifique. Les conclusions de l'étude menée sur des granulats anguleux indiquent une valeur particulière de 40% en volume granulaire au-delà de laquelle l'écoulement est radicalement modifié.

3.2.2 *Essai à la colonne*

3.2.2.1 *Pâtes de ciment et filler calcaire*

L'évolution de la pression interstitielle dans une pâte de ciment a fait l'objet de notre part d'une présentation détaillée dans la littérature [48, 49 et 50]. De manière synthétique, l'idée que nous avons développée repose sur le concept suivant : un matériau cimentaire à l'état frais s'écoule.

Une fois dans son moule, il exerce une pression latérale quasi-hydrostatique dont la valeur dépend principalement de la hauteur de pâte de ciment fluidifiée. Il s'ensuit une cinétique en trois étapes : la pression diminue (figure 26), s'annule puis passe en pression négative avant retour à zéro et annulation définitive. L'autre résultat important concerne l'égalité entre pression interstitielle et pression totale de la mise en œuvre à l'annulation simultanée des pressions totale et interstitielle (figure 29).

La chute des pressions interstitielles trouve son origine dans le processus physico-chimique dû à l'hydratation du ciment. Ce processus induit des dépressions capillaires au sein du matériau. Avant la prise de la pâte de ciment, la dépression est due à la baisse de l'humidité relative interne du matériau provoquée par le passage en solution des hydroxydes alcalins provenant du ciment dans la phase aqueuse.

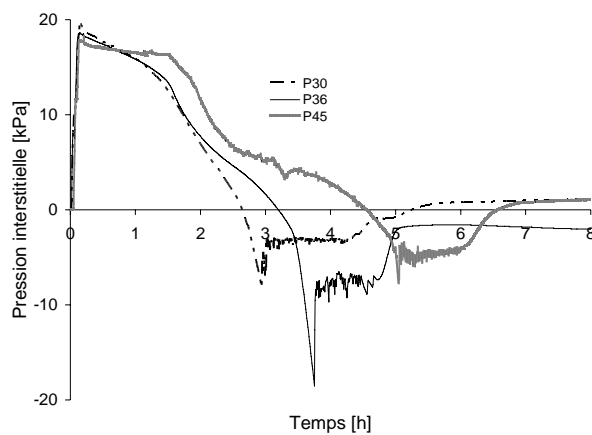


Figure 28 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise en fonction de la teneur en eau

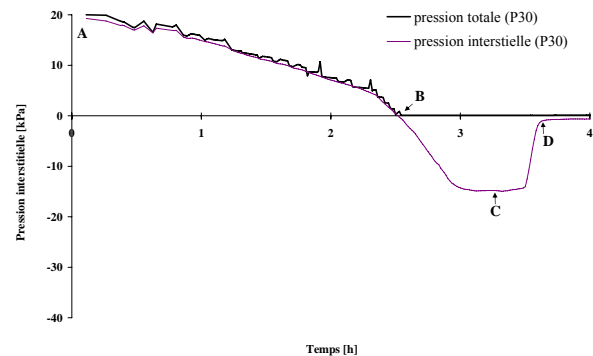


Figure 29 : Comparatif de l'évolution des pressions interstitielle et totale

Plus précisément, l'analyse de la composition du fluide interstitiel d'une pâte de ciment durant les 4 premières heures d'hydratation montre que les concentrations en calcium (Ca^{2+}), en alcalins (K^+ et Na^+), en hydroxydes (OH^-) et en sulfates (SO_4^{2-}) atteignent rapidement des valeurs élevées. Ces alcalins sont initialement présents dans les phases principales du clinker (Na_2O et K_2O) ou sous forme sulfatée (Na_2SO_4 , K_2SO_4 , $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3$). La présence de ces sels dans l'eau interstitielle, particulièrement des hydroxydes alcalins (Na^+ , K^+ et OH^-), induit une diminution de l'humidité relative HR au sein du matériau. L'humidité relative, initialement égale à 100%, peut descendre jusqu'à 98% avant la prise du ciment [51].

La baisse de l'humidité interne au matériau provoque alors une augmentation de la dépression capillaire appelée également succion. La loi de Kelvin permet de déterminer l'intensité de la

dépression capillaire $U_{suscion}$: $U_{suscion} = U_{air} - U_{eau} = \sigma_{capillaire} = \frac{-\ln(RH)RT}{gM}$

R est la constante molaire des gaz ($R=8,3143 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ; T : la température ; g : la gravité ;
M : la masse molaire de l'eau ($M=18,016 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Par exemple à 20°C, $\sigma_{cap} = \frac{-\ln(RH)RT}{gM} = \frac{-\ln(0.98) \times 8.3143 \times (20 + 273)}{9.81 \times 18.016} = 2.8 \text{ MPa}$

Nous constatons, d'après cette équation, que l'amplitude de la dépression capillaire est également fonction de la température. Etant donné que nous sommes dans une période d'inertie thermique, seul le changement de l'humidité relative interne détermine la variation de la dépression capillaire. Pour une température de 20°C, la relation de Kelvin nous donne une valeur de la succion théorique de 2,83 MPa pour 98% d'humidité.

Aux forces capillaires et à l'action de la gravité s'ajoutent les forces d'attraction de Van der Waals et les forces électrostatiques, amplifiant ainsi le rapprochement des grains de ciment et la chute du rayon de pore.

Aussi, la chute de pression interstitielle entraîne plusieurs phénomènes physico-mécaniques tels que : le ressuage [52], le retrait plastique [53] et l'évolution des propriétés rhéologiques [54,55].

Afin de confirmer ou d'infirmer ce constat, nous avons mené des mesures de pression sur un matériau non hydraulique (ne s'hydratant pas en présence d'eau) : le filler calcaire. Le choix du filler calcaire est motivé par sa surface spécifique et sa granulométrie proches de celles du ciment CEM II/B-LL 32.5 R utilisé pour confectionner les pâtes de ciment. La surface spécifique Blaine du filler est de 3970 cm²/g et celle du ciment est de 3950 cm²/g.

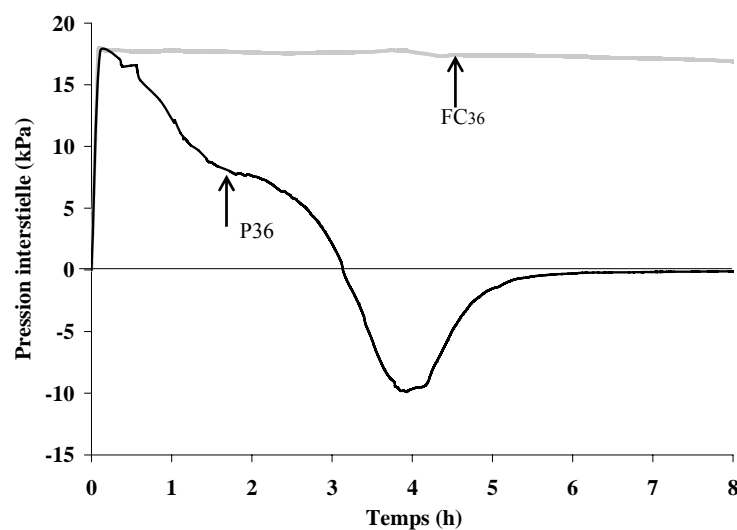


Figure 30 : Pressions comparées d'un filler calcaire et d'une pâte de ciment

Les comparaisons vont concerner le mélange de pâte de ciment P₃₆ et le mélange de pâte de filler calcaire FC₃₆ qui présentent des teneurs en solide identiques (rapport massique eau/solide égale à 0,36). La cinétique d'évolution de la pression interstitielle au sein des mélanges FC₃₆ et P₃₆ est mesurée à 1 mètre de profondeur. Les pressions initiales enregistrées sont du même ordre. On observe ensuite au bout de 4 heures une quasi-annulation de pression pour le mélange de pâte de ciment alors que la pression du filler calcaire reste stable (figure 30). L'infime diminution de la pression interstitielle dans le cas du mélange de filler calcaire est certainement engendrée par des phénomènes de sédimentation/ressuage [19]. Ceci montre clairement la relation entre l'activité physico-chimique et la chute de pression dans les matériaux à base de ciment, même durant la période d'induction.

Plus récemment, dans le cadre d'une collaboration avec le LCPC pour le projet OAH 51, nous avons mené des essais à la colonne sur de la bentonite. Ce matériau connu pour ces fortes propriétés thixotropes s'est comporté de manière assez analogue à une pâte de ciment avec une chute de pression interstitielle dès le début de structuration après avoir été à un fort cisaillement dans la colonne. A l'inverse d'une pâte de ciment, la pression interstitielle reste toutefois toujours positive pour la bentonite en se stabilisant au bout de plusieurs heures. Les résultats de cette étude seront prochainement publiés.

3.2.2.2 Bétons courants et auto-plaçants

La deuxième partie de cette étude doit déterminer la corrélation entre les mesures de pression interstitielle sur un béton et la pâte de ciment dont il est constitué. La comparaison entre un béton courant BN et sa pâte de ciment équivalente P45 (tableaux 4 et 5) prouve que le béton BN a un comportement quasi semblable pendant la phase plastique. Ce résultat montre que le processus d'hydratation de la pâte de ciment régit la variation de pression interstitielle du béton. Les granulats n'affectent pas, à ce stade, la diminution de la pression interstitielle.

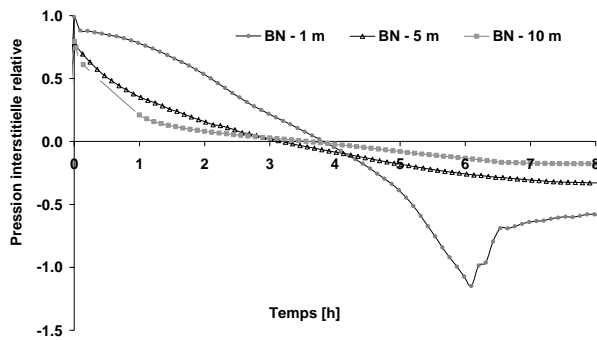


Figure 31 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise d'un béton normale en fonction de la hauteur de béton mise en oeuvre

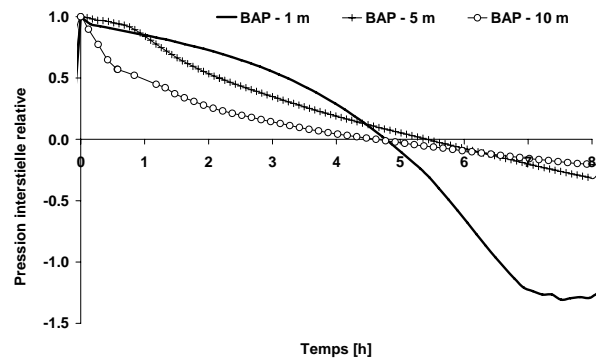


Figure 32 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise d'un béton auto-plaçant en fonction de la hauteur de béton mise en oeuvre

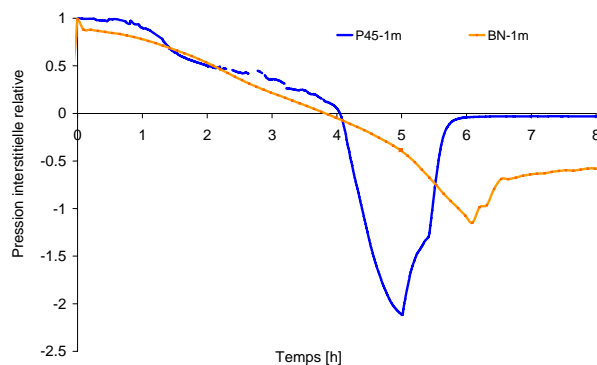


Figure 33 : Evolution de la pression interstitielle relative pendant la prise d'un béton normale et de la pâte de ciment équivalente

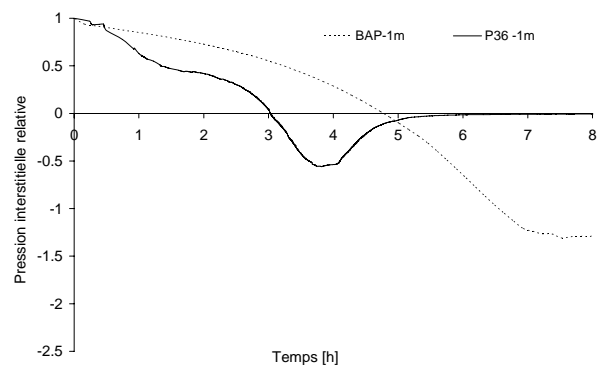


Figure 34 : Evolution de la pression interstitielle relative pendant la prise d'un béton auto-plaçant et de la pâte de ciment équivalente

Dans la deuxième phase (pression relative négative), il règne dans le milieu une pression relative négative ; la dépression interstitielle relative est plus importante pour la pâte de ciment équivalente. C'est probablement dû au fait que sur la deuxième phase le squelette granulaire est en mesure de reprendre pour une part les contraintes générées et empêche ainsi la réduction de la pression interstitielle. Concernant le BAP, on peut noter que la pression interstitielle s'annule après environ 5 h, alors que pour la pâte de ciment équivalente P 36, la pression s'annule après 3 h, soit un décalage de 2 h. Une explication possible réside dans la présence de filler calcaire, d'adjuvants (effet dispersant) et enfin de la moindre teneur en ciment du BAP. Comme montré plus haut, la pression interstitielle d'une pâte de filler calcaire ne baisse pas et une teneur en eau plus forte dans une pâte de ciment retarde l'annulation de la pression interstitielle. D'autres

expériences, en utilisant différentes concentrations granulaires, de super plastifiants et de filler calcaire sont nécessaires pour expliquer de manière approfondie l'influence de ces paramètres sur la cinétique de la variation de pression.

Nous avons en outre reconstitué les profils de pression à partir des essais à 1 m, 5 m et 10 m (35 et 36). La pression initiale est soit hydrostatique soit réduite d'un facteur k par rapport à la pression hydrostatique. C'est le cas des bétons : la pression est hydrostatique jusqu'à une profondeur $h_{critique}$ à partir de la surface supérieure de l'échantillon. Au-delà de $h_{critique}$, la pression est considérée réduite. Le facteur de réduction k n'est pas constant sur toute la hauteur du coffrage (voir tableau 8).

Tableau 8 : Rapport $P_{mesurée}/P_{hydrostatique}$ pour les mélanges BN et BAP.

Mélange	H = 5 m	H = 10 m
BN	0,77	0,79
BAP	0,82	0,81

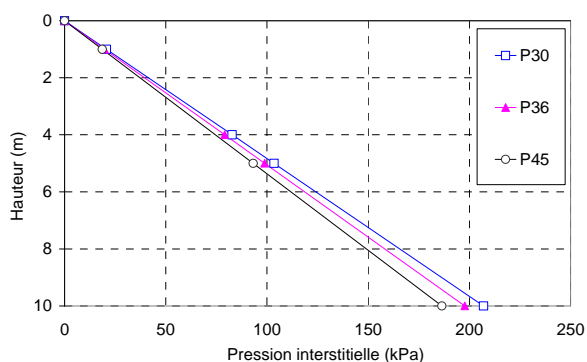


Figure 35 : Profil de pression sur la colonne des pâtes de ciment

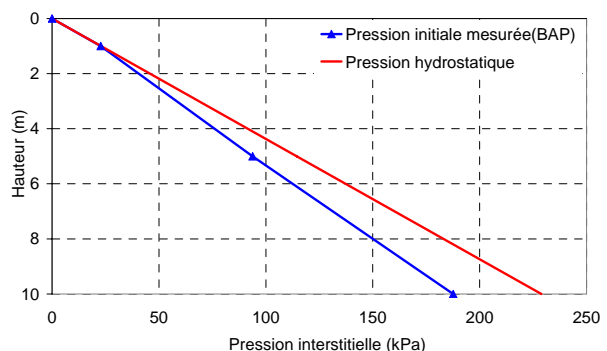


Figure 36 : Profil de pression sur la colonne du BAP

3.2.3 Essai in-situ

Les essais préliminaires sur le terrain visent à prouver que le dispositif de pression hydraulique pourrait être utilisé pour surveiller successivement le bétonnage, la prise et le décoffrage.

Sur l'essai présenté, la première couche de béton, mise en place en 20 minutes, permet d'atteindre $\frac{3}{4}$ de la hauteur totale (soit 4,5 m) et la pression interstitielle augmente immédiatement jusqu'au 1er pic (pic 1 – figure 37), soit une vitesse de remplissage de 13,5 m/h. La pression maximale mesurée est de l'ordre de 47 % de la pression hydrostatique. Cette réduction de la pression hydraulique de la pression hydrostatique est prévisible du fait des frottements internes résultant de la présence d'une phase granulaire et des frottements banche/matériaux. Nous observons ensuite une diminution rapide de la pression interstitielle pendant environ 25 minutes (figure 37).

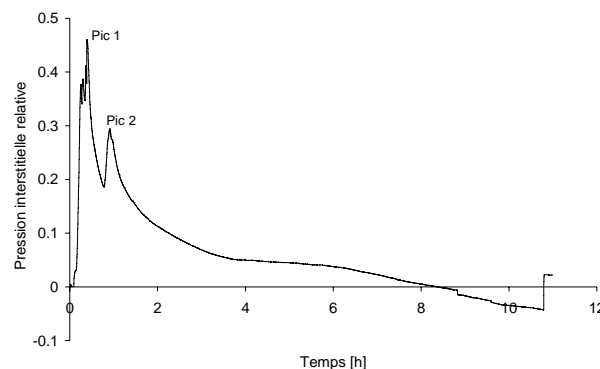


Figure 37: Evolution de la pression interstitielle lors de l'essai in-situ

Une seconde couche de 1,5 m est enfin ajoutée, à une vitesse de chargement de 8,3 m/h. De nouveau, la pression interstitielle augmente (pic 2 – figure 37) puis diminue à une vitesse du même ordre qu'à la suite de la première phase de bétonnage. On assiste en 25 minutes à une diminution de près de 50 % de la pression interstitielle relative après mise en place de chaque couche. Cette propriété est très intéressante d'un point de vue de la sécurité. La pression maximale sur le coffrage a pu être réduite en remplissant par étape au lieu d'un bétonnage en une phase.

L'annulation de la pression a été enregistrée après l'enlèvement partiel du coffrage après environ 7 h. Une séparation partielle des deux faces de coffrage a été faite après 15 heures. Ceci peut être observé par l'augmentation immédiate de la pression mesurée (figure 37). L'appareil de mesure de pression n'est plus en contact avec le béton. Au final, le dispositif s'est montré en mesure de fournir des informations significatives dans un environnement de chantier.

3.3 Conclusions

Une modélisation du béton comme un matériau biphasique (pâtes interstitielles+granulats) nous a permis de différencier l'action de chaque phase sur la forme du profil initial de pression, d'une part, et sur la cinétique d'évolution de pression, d'autre part.

- Une première campagne d'essais utilisant un coffrage grandeur nature dans des conditions de laboratoire a permis de constater que pour un mélange de pâte pure de ciment, les pressions initiales sont égales aux pressions hydrostatiques d'un liquide de même densité. Dans le cas d'un mélange de pâte et de granulats, nous obtenons également un profil de pression hydrostatique tant que nous ne dépassons pas un certain seuil de concentration granulaire et une certaine hauteur de coffrage. En effet, au-delà de ces seuils, les phénomènes de frottement et d'enchevêtrement des grains ne sont plus négligeables et les pressions deviennent inférieures aux pressions hydrostatiques.
- La seconde phase expérimentale, utilisant une colonne instrumentée de capteurs de pression totale et interstitielle, a mis en évidence que pour les pâtes de ciment et de filler calcaire testées ne contenant pas de granulats, le profil de pression initiale est toujours quasi-hydrostatique. Pour des mélanges comportant des granulats, nous observons un seuil de concentration granulaire et un seuil de contrainte à partir desquels les forces de frottement deviennent non négligeables et font que les pressions sont inférieures aux pressions hydrostatiques.
- Au cours du temps, la pression totale présente un profil décroissant et s'annule au bout de quelques heures en fonction de la composition du mélange et des conditions de mise en œuvre. L'étude menée a permis de constater l'identité de cinétique de la pression latérale totale et de la pression interstitielle allant de la fin du coulage, où l'on enregistre la pression maximale initiale, à l'annulation de la pression totale.

Il en découle alors que la connaissance de la cinétique d'évolution de la pression interstitielle au sein du matériau permet de suivre entièrement la maturation du mélange. En d'autres termes, le suivi de l'état de l'eau dans le mélange, au travers de la pression interstitielle, reflète de manière dynamique l'évolution de la prise de la pâte de ciment.

Nous avons montré que la diminution des pressions au jeune âge trouve essentiellement son origine dans les processus physico-chimiques liés aux réactions d'hydratation du

ciment. Les résultats expérimentaux confirment que la diminution des pressions est d'autant plus lente que le rapport E/C est grand et la chute de pression est d'autant plus rapide que la hauteur de matériau est importante. Enfin, la vibration accélère la baisse des pressions.

- L'application de la technique de mesure de pression mise au point en laboratoire a été ensuite utilisée et adaptée sur un chantier et a permis de suivre précisément la montée en pression en fonction de la hauteur de bétonnage, puis le suivi de la pression jusqu'à la phase décoffrage. Lors de bétonnages multicouches à l'aide de bétons courants, des pressions largement inférieures aux pressions hydrostatiques ont été enregistrées. Le décoffrage réalisé peu après l'annulation de la pression interstitielle indique que ce paramètre pourrait être utilisé comme indicateur du possible temps de décoffrage.

L'ensemble de ces résultats expérimentaux constitue une base de données pour les simulations de la cinétique d'évolution des pressions.

4 STRUCTURATION ET RHEOLOGIE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Dès la mise en contact du ciment et de l'eau de malaxage, on assiste à la naissance d'un long processus de structuration qui va durer plusieurs jours. A 28 jours on estime que 90% de la résistance du matériau est atteinte. L'essentiel du processus se concentre néanmoins pendant les premières heures et à l'échelle de la vie du matériau, il n'est pas déraisonnable d'affirmer que pour l'essentiel la structuration dite de « jeune âge » est terminée 24h après malaxage (temps courant de décoffrage).

Dans les conditions normales de fabrication et de température, et pour des compositions courantes, le processus d'hydratation s'enclenche alors au bout de 3 à une dizaine heures selon le type de ciment ou d'adjuvants, s'ensuit un durcissement du matériau simultanément à un fort dégagement de chaleur. La mesure de l'évolution des caractéristiques mécaniques des matériaux cimentaires au jeune âge représente un des paramètres clés de la maîtrise des procédés en génie civil (malaxage, transport, pompage, temps de décoffrage, mise en forme, ...). Actuellement, le test de Vicat représente l'essai standard du suivi de la prise. L'information obtenue à partir de cet essai (temps de début et de fin de prise) est largement insuffisante pour juger par exemple du temps pendant lequel le matériau est pompable, extrudable ou décoffrable.

Sur ce thème, nous avons mené une étude d'investigation sur la possibilité de caractériser la prise par le biais du suivi de l'évolution de paramètres intrinsèques du matériau tels que la pression interstitielle, la conductivité hydraulique, le retrait endogène et les propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité). Les résultats de ces expérimentations sont discutés et confrontés aux tests de Vicat. En conclusion, nous proposons de redéfinir la prise à partir des temps caractéristiques identifiés sur les tests de rhéologie et d'évolution des pressions.

4.1 Contexte de l'étude

La prise des matériaux cimentaires s'accompagne d'un ensemble de phénomènes mécaniques, thermiques et physico-chimiques dont la mesure de la cinétique est à l'origine de la majorité des méthodes de mesure de la prise. Une synthèse du début du siècle dernier [56] montre que

les premiers dispositifs de la mesure de la prise sont principalement basés sur la résistance à la pénétration d'un outil. McKenna indique que le premier dispositif a été mis au point par le français Vicat Louis Joseph. Le test est fondé sur la pénétration d'une aiguille entraînée par une charge dans une pâte de ciment à faible teneur en eau. Il permet de définir à partir d'un certain niveau d'enfoncement de l'aiguille le temps de début de prise et par un enfoncement nul, la fin de prise. Ainsi on compare qualitativement les différents types de ciment. Le dispositif de Vicat reste le plus utilisé de nos jours par les cimentiers pour définir la prise et fait l'objet de normes précises (ASTM C 191-99, EN 196-3, ...) [57 et 58].

L'étude de la prise a été ensuite abordée par d'autres techniques fondées par exemple sur la mesure du dégagement de chaleur induit par l'hydratation [59]. Les moyens d'observation tels que la microscopie électronique ont permis une compréhension plus fine de l'hydratation du ciment et des phénomènes physiques qui l'accompagnent. Tout cela a contribué à l'émergence de nombreuses techniques d'investigations très élaborées. Pour suivre la cinétique d'hydratation du ciment, les techniques les plus récentes utilisent la propagation d'ondes acoustiques [60 et 61], de conductimétrie électrique [62] ou encore de mesure du retrait plastique [63].

Pour autant, bien qu'aujourd'hui le phénomène de la prise soit connu, les mesures déduites demeurent difficilement exploitables dans la pratique. Les méthodes récentes d'auscultation présentent par ailleurs la difficulté d'une mise en relation avec des grandeurs mécaniques de type contrainte et déformation.

Ce bref aperçu montre que les méthodes de caractérisations mécaniques n'ont pas connu d'avancée significative depuis les travaux de Vicat au milieu du 19ème siècle en termes de normalisation. En conséquence, il nous semble que de nouveaux travaux doivent être menés sur l'évolution de la structuration des matériaux cimentaires en utilisant des méthodes fondées sur l'évolution des grandeurs mécaniques pendant la prise.

4.2 Description synthétique de l'étude

Le suivi de la structuration du matériau frais a été réalisé d'une part grâce aux mesures de variations volumiques (retrait et chute de la conductivité hydraulique) engendrées par les pressions capillaires et d'autre part en caractérisant l'évolution de la rhéologie du matériau.

Cinq dispositifs spécifiques décrits ci-après ont été élaborés. Les mélanges de pâte de ciment expérimentés (P30, P36 et P45) sont présentés sur le tableau 4.

4.2.1 Mesure de la conductivité hydraulique d'une pâte de ciment avant prise

Les mesures de la conductivité hydraulique dans le cas des matériaux poreux non saturés, et particulièrement dans le cas d'un matériau cimentaire frais, sont très délicates. Dans le cas de pâte de ciment ou de mortier de consistance ferme, il existe des travaux récents et très complets qui décrivent expérimentalement [64] et théoriquement [65] les phénomènes de drainage du matériau sous une contrainte de compression simple.

Sous l'action de ce champ de contrainte, telle qu'une éponge, la pâte de ciment se trouve essorée. Logiquement, la capacité de rétention du matériau, les caractéristiques de la structure poreuse ainsi que les conditions aux limites (drainantes ou non) sont les éléments qui influenceront les propriétés rhéologiques et la cinétique de maturation. Gardner [66] a mis au point un dispositif permettant l'identification de la conductivité hydraulique à l'eau des sols non saturés. Il s'agit de suivre au cours du temps la quantité d'eau sortant d'un échantillon soumis à une pression d'air.

Associée à cet essai, l'équation de Richards, qui décrit le mouvement de l'eau dans un milieu non saturé, permet de déterminer par analyse inverse la conductivité hydraulique du matériau étudié. L'appareillage (figure 38) est constitué principalement d'une cellule de pression de 795 cm³ (10 cm de diamètre et 10 cm de hauteur) dans laquelle on met en œuvre le matériau à tester et d'une balance de précision (0,01 g) servant à peser l'eau sortant de l'échantillon. La cellule est munie sur sa partie supérieure d'une arrivée d'air comprimé et sur sa partie inférieure d'une vanne d'évacuation d'eau équipée d'un filtre. Un capteur de pression est relié à l'arrivée d'air comprimé pour contrôler la pression. Avant toute manipulation, l'ensemble des systèmes de filtration est préalablement saturé. Les pâtes sont par la suite introduites dans la cellule en 4 couches d'égale hauteur et mises en place par piquage à raison de 25 coups par couche. La tige de piquage est celle utilisée pour l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (NF P 18-451). La pression d'eau à appliquer sur la surface supérieure de l'échantillon doit être suffisamment forte pour permettre l'écoulement de l'eau sans conduire à la rupture du matériau par cisaillement. Nous avons alors adopté des pressions égales à 10, 20 et 30 kPa. En effet, une pression supérieure à 30 kPa provoque un cisaillement des pâtes de ciment. La conductivité hydraulique à considérer est celle qui tient compte de la formation d'un cake due à la migration de fines en bas de l'échantillon (figure 39).

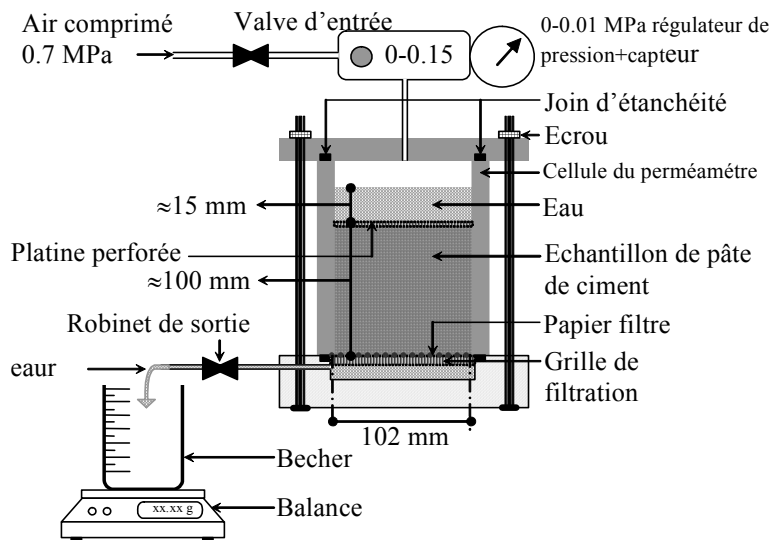


Figure 38 : Dispositif expérimental de filtration pour la détermination de la conductivité hydraulique

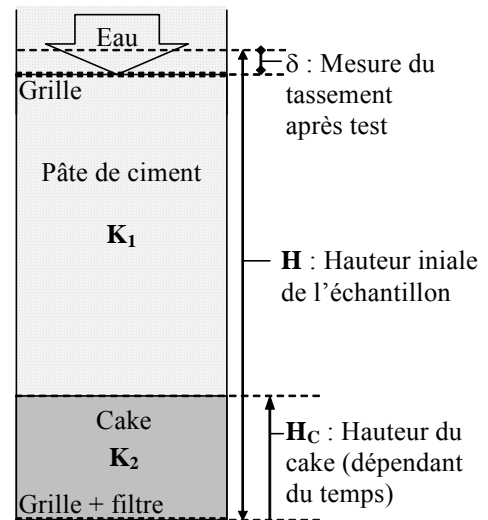


Figure 39 : Etat de l'échantillon pendant le test

4.2.2 Mesure du retrait endogène par la méthode de pesée hydrostatique

La variation de volume au cours des réactions d'hydratation d'un matériau cimentaire est à l'origine du retrait endogène. Une des méthodes permettant le suivi de cette variation volumique est basée sur la méthode par pesée hydrostatique développée par Rey [67]. Le dispositif expérimental (figure 40), est principalement constitué d'un bain thermostatique et d'une balance de précision (0,01 g).

Les mesures ont été effectuées sur des gâchées de pâte P30, P36 et P45. Pour ce faire, 300 ± 50 grammes de pâte sont mis en œuvre à l'intérieur d'une membrane en latex très élastique et très peu perméable à l'eau. L'ensemble est placé dans un panier fixé à une balance et complètement immergé dans de l'eau à 20°C. Une attention particulière a été apportée lors de l'introduction de la pâte dans la membrane de telle manière qu'il y ait le moins d'air piégé possible.

- A - balance
- B - bain thermostaté
- C - échantillon de pâte de ciment

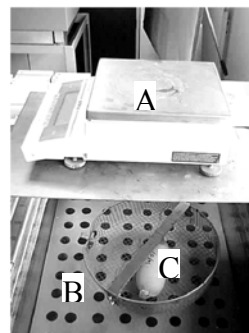


Figure 40 : Dispositif de mesure du retrait endogène par pesée hydrostatique

4.2.3 **Mesure des caractéristiques rhéologiques pendant la prise**

La mesure des propriétés rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité) a été réalisée à l'aide d'un rhéomètre plan-plan. Le choix de cette géométrie s'est avéré adapté à notre besoin dans la mesure où le suivi de l'évolution de la rhéologie nécessite de nombreux essais (1 toutes les quinze minutes) sur une courte période (4 à 6 heures). Il faut alors mettre en œuvre rapidement un échantillon de pâte de ciment pré-cisaillé par malaxage juste avant chaque essai.

Les plateaux du rhéomètre sont de diamètre égale à 35 mm et possèdent une surface rugueuse. L'espace entre plateaux est pris égale à 1 mm.

Deux tests spécifiques au rhéomètre plan-plan sont réalisés :

- 1) "Stress Growth" : L'évolution du seuil de cisaillement pendant la prise est mesurée en utilisant un test à cisaillement constant de la pâte de ciment. Le test est effectué au taux de cisaillement le plus faible possible pour notre rhéomètre (0.01 s^{-1}),
- 2) Test de Bingham : Pour l'obtention de la courbe d'écoulement, nous utilisons la méthode habituelle qui consiste à cisailier la pâte de ciment suivant un gradient de taux de cisaillement décroissant entre 50 s^{-1} et 0.1 s^{-1} par pas de 10 s^{-1} .

Pour suivre l'évolution pendant la prise, les courbes sont enregistrées toutes les 15 à 20 min.

Les résultats issus des essais de rhéologie sont ensuite croisés avec ceux obtenus à l'aide de la colonne présentée au paragraphe (3.2.2.1, figures 28 et 29).

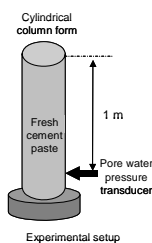


Figure 41 : Colonne de pression



Figure 42 : Rhéomètre plan-plan



Figure 43 : Dispositif anti-évaporation

4.2.4 **Couplage rhéologie - pression interstitielle**

Dans l'objectif d'améliorer la compréhension du phénomène de variation simultanée (pression interstitielle – propriétés rhéologiques) nous avons conçu un dispositif capable d'enregistrer les variations de pression interstitielle d'un matériau cimentaire sous contrainte de cisaillement. Le rhéomètre que j'ai conçu reprend le principe des rhéomètres rotatifs à géométrie "vane" respectant une échelle dimensionnelle adaptée au béton ($122 \text{ mm} \times 122 \text{ mm}$). Le principe est d'entraîner un cylindre de béton dont les dimensions sont définies par les dimensions du "vane" à une vitesse ou un couple contrôlé. Le cisaillement se produit alors entre le béton situé à

l'intérieur du "vane" et le béton à l'extérieur. Le rhéomètre se comporte donc comme un rhéomètre à cylindres coaxiaux à la différence que la géométrie "vane" supprime tout glissement possible. La mesure de la pression interstitielle se fait de manière simultanée avec la vitesse de rotation et le couple à l'aide des capteurs présentés au paragraphe 3.1.2. Deux capteurs sont montés sur la cuve à mi-hauteur de la géométrie "vane".

Le rhéomètre est présenté ici dans sa version provisoire. La version définitive (figure 24) comportera un bâti permettant la manipulation du bloc moteur jusqu'à la géométrie grâce à un système de poulies et de contre poids ainsi qu'une cuve en inox de 40 litres. Pour les mesures du seuil de cisaillement τ et de la viscosité plastique μ , deux types d'essais ont été effectués :

- 1) Accroissement de couple à cisaillement constant (Stress Growth),
- 2) Courbe d'écoulement avec taux de cisaillement contrôlé (test de Bingham).



Figure 44 : Rhéomètre béton

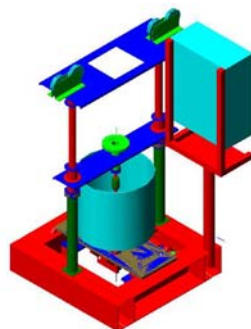


Figure 45 : Design du futur rhéomètre

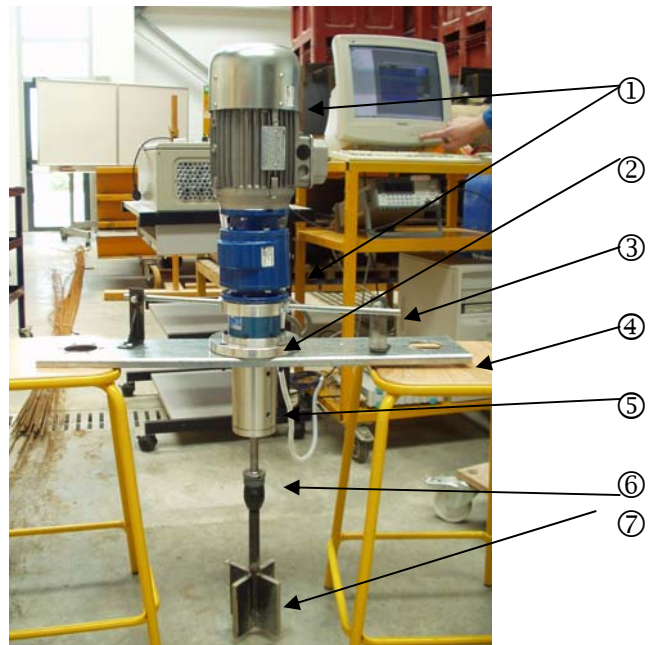


Figure 46 : Eléments du rhéomètre

La partie mécanique se compose de : ① Bloc moteur-motoréducteur, ② Capteur de couple, ③ Système de limitation de couple (protection du capteur), ④ Plaque support, ⑤ Boîtier de roulements (reprise des efforts verticaux), ⑥ Arbre avec mandrin, ⑦ Géométrie "vane".

La cuve provisoire est réalisée dans un tuyau en PVC de 400 mm de diamètre. Elle est fermée à sa base par un bouchon en PVC collé et étanchéifié par un joint en silicone. Le moteur est alimenté électriquement par l'intermédiaire d'un variateur qui commande la vitesse de rotation de la géométrie. On peut également le piloter grâce à un générateur de fonction permettant d'appliquer précisément des rampes ou des créneaux de vitesse préprogrammés.

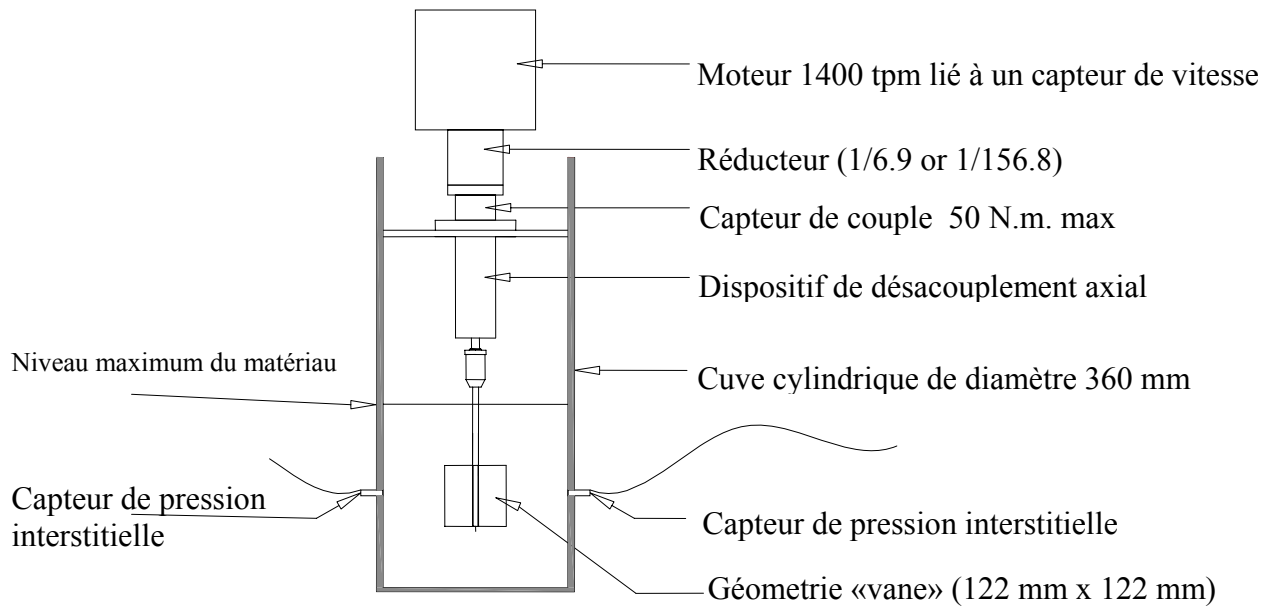


Figure 47 : Rhéomètre dans sa version définitive

4.3 Discussion des principaux résultats

4.3.1 Evolution du retrait pendant la prise

Le matériau n'étant pas rigide durant la période d'induction, les dépressions capillaires entraînent le rapprochement des grains solides dans le mélange.

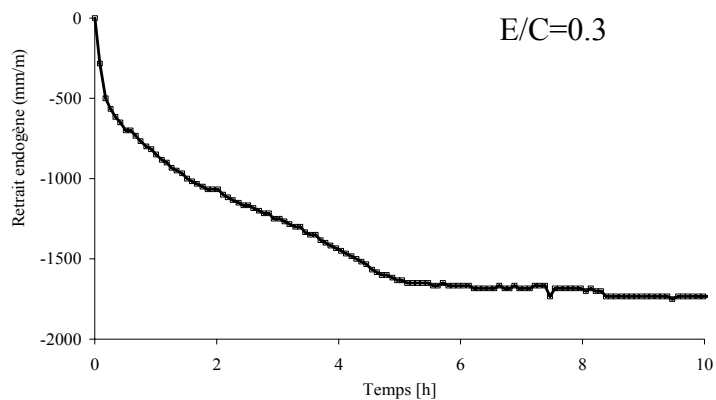


Figure 48 : Evolution du retrait endogène au jeune âge

Ce processus se traduit mécaniquement par le retrait et une baisse de la poussée du matériau.

Le matériau a un comportement élastique durant cette phase. Les tests qui ont été menés sur du mortier ont montré la proportionnalité entre la dépression capillaire et le retrait durant les 8 premières heures d'hydratation [68]. Il a été aussi conclu que le module d'élasticité du mortier évolue dans le temps et qu'il est de l'ordre de 15 MPa au bout de 7-8 heures [68]. La forme générale des courbes de retrait endogène (figure 48) obtenue à l'aide du dispositif (figure 40) est en accord avec celles trouvées dans la littérature [44, 45, 16 et 53]. Nous distinguons une première étape marquée par une augmentation rapide de la déformation, suivie d'un plateau où l'accroissement des contractions est beaucoup plus lent.

4.3.2 Evolution de la conductivité hydraulique et du retrait pendant la prise

Les résultats expérimentaux bruts se présentent sous forme de courbes exprimant la quantité d'eau cumulée sortant de l'échantillon soumis à une pression P en fonction du temps. Le but recherché est la mesure de la conductivité hydraulique de l'échantillon. Nous sommes en milieu poreux perméable. Le comportement est régi par la loi de Darcy. La formulation générale de cette loi est donnée par :

$$\frac{dq}{dt} = K.S.\frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

où dq/dt est le débit de l'écoulement mesuré en m^3/s ; K la conductivité hydraulique; S la surface de l'échantillon traversé par le liquide en m^2 ; Δh la charge hydraulique appliquée sur l'échantillon mesuré en (m) et L la hauteur d'échantillon traversé par le liquide en (m).

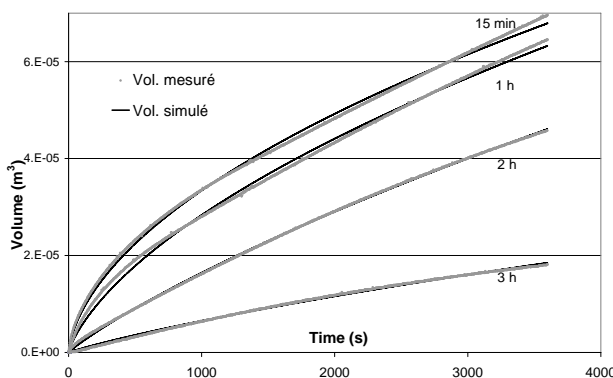


Figure 49 : Evolution cumulée du volume d'eau essorée pendant un test de perméabilité

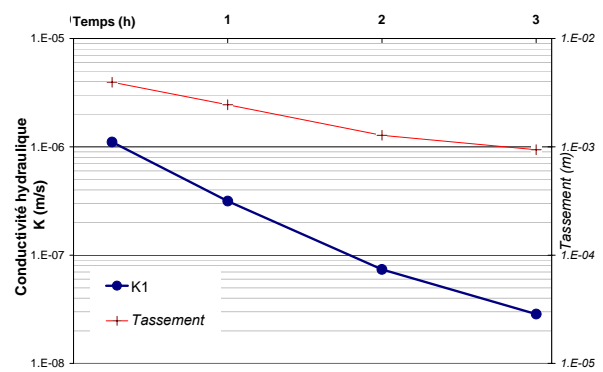


Figure 50 : Evolution de la conductivité hydraulique et du tassement de la pâte de ciment pendant la prise

L'évolution cumulée du volume d'eau essorée étant déterminée expérimentalement puis numériquement (figure 49), il est aisé de calculer à l'aide de la formule (5) la conductivité hydraulique de la pâte de ciment pour chaque échéance. L'évolution de la conductivité hydraulique pendant la prise est représentée sur la figure 50.

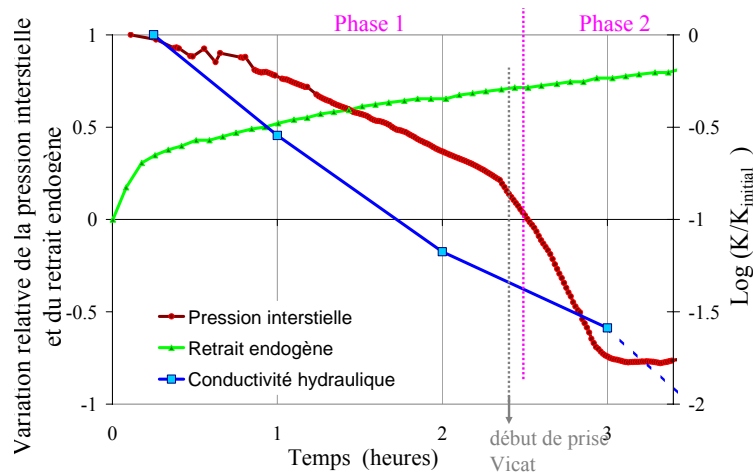


Figure 51 : Evolutions relatives de la conductivité hydraulique et du retrait endogène simultanément à la chute de pression interstitielle pendant la prise d'une pâte de ciment

La figure 51 représente l'évolution comparée de la conductivité hydraulique, du retrait et de la pression interstitielle. Une conclusion claire et logique s'en dégage : la chute de pression à l'origine de la contraction volumique du matériau plastique (retrait) induit une chute de conductivité hydraulique.

Par ailleurs, dans le cadre d'une démarche de modélisation numérique du problème de l'écoulement et de l'évolution de la pression de la pâte de ciment, le calcul de la conductivité hydraulique a aussi fait l'objet de notre part d'une démarche de détermination indirecte en faisant appel à une identification par analyse inverse. Ce travail est largement exposé dans la thèse [40] et en partie sur la publication [69].

La méthode de résolution du problème d'identification est fondée sur la minimisation d'une fonctionnelle F (ou fonction objective). Cette fonctionnelle exprime l'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de la simulation. Dans la présente étude, nous avons utilisé le logiciel SiDoLo (logiciel de Simulation et d'Identification de LOis de comportement) pour la détermination des paramètres de notre modèle. Ce logiciel, écrit en Fortran 77, a été développé à partir de 1980 par Ph. Pilvin [70].

Le tableau 8 reprend de manière synthétique les conductivités hydrauliques et les coefficients de diffusivité optimisés obtenus sur un test de filtration juste après malaxage (figures 49 et 50). Ces résultats nous semblent corrects si l'on se réfère aux valeurs proposées par Neville [71] et Uzomaka [72], qui sont de l'ordre de 10^{-7} - 10^{-6} m/s. Les conductivités hydrauliques sont également assez proches de celles obtenues à l'aide de la méthode de détermination directe présentée ci-dessus.

Tableau 9 : Valeurs de la diffusivité D et de la conductivité hydraulique K optimisées

($\Delta P=0,3$ bars).

Mélange	D [m ² /s]	K* [m/s]
P ₃₀	0,3947.10 ⁻⁵	1,1657.10 ⁻⁷
P ₃₆	0,4362.10 ⁻⁵	2,2406.10 ⁻⁷
P ₄₅	0,6945.10 ⁻⁵	4,7329.10 ⁻⁷
BN	0,6206.10 ⁻⁵	2,0539.10 ⁻⁷
BAP	0,4089.10 ⁻⁵	0,9619.10 ⁻⁷

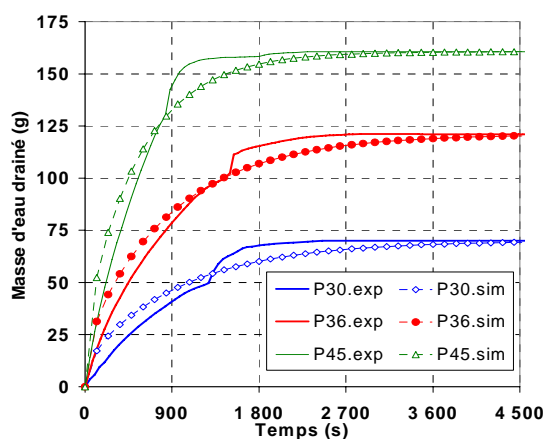


Figure 52 : Courbes de drainage mesurées et calculées pour une pâte de ciment

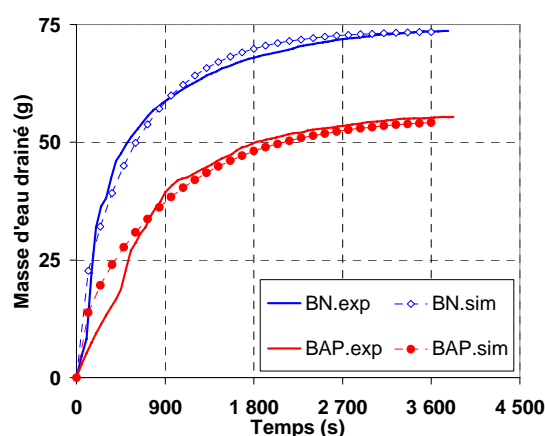


Figure 53 : Courbes de drainage mesurées et calculées pour une BN et un BAP

Les figures 52 et 53 montrent en parallèle les courbes de drainage cumulé mesurées et celles de drainage calculées pour les pâtes de ciment, béton et BAP. On obtient une bonne adéquation entre la courbe obtenue lors de l'essai et la courbe issue de l'identification inverse.

4.3.2.1 Influence de l'incrément de charge

Le choix de la valeur de l'incrément de pression influe considérablement sur la valeur des coefficients obtenus. En passant de 0,10 bar à 0,30 bar, la conductivité hydraulique diminue d'environ 30% (voir tableau 9). Cela s'explique par le fait qu'en augmentant la pression, le

matériau devient plus compact et par conséquent moins perméable. La diffusivité augmente avec l'incrément de pression. Le matériau devenant peu perméable, l'eau a tendance à diffuser plus facilement dans le sens horizontal.

Tableau 10 : Valeurs de la diffusivité D et de la conductivité hydraulique K optimisées pour les différents mélanges ($\Delta P=0,1$ à $0,3$ bars).

Mélange	$\Delta P=0,10$ bar		$\Delta P=0,20$ bar		$\Delta P=0,30$ bar	
	D [m ² /s]	K* [m/s]	D [m ² /s]	K* [m/s]	D [m ² /s]	K* [m/s]
P ₃₆	$0,3784 \cdot 10^{-5}$	$3,2987 \cdot 10^{-7}$	$0,3950 \cdot 10^{-5}$	$2,3811 \cdot 10^{-7}$	$0,4362 \cdot 10^{-5}$	$2,2406 \cdot 10^{-7}$

Cette remarque est très importante du fait que l'état de contrainte régnant dans le matériau à l'intérieur du coffrage est différent de celui existant dans l'essai de drainage. Pour ce dernier, les contraintes sont imposées et égales à 0,10, 0,20 et 0,30 bar, alors que dans le coffrage la contrainte varie avec la hauteur et en bas de coffrage celle-ci peut atteindre, dans notre étude, plus de 2 bars (10 m de hauteur de pâte de ciment dans des conditions de non drainage). La figure 53 donne une comparaison entre les courbes expérimentales et celles optimisées.

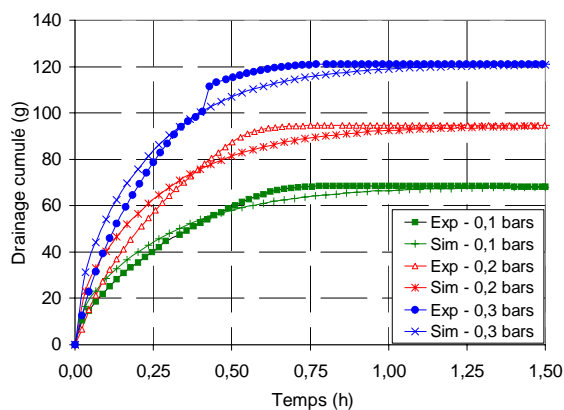


Figure 54 : Influence de l'incrément de pression ΔP sur les courbes de drainage mesurées et calculées

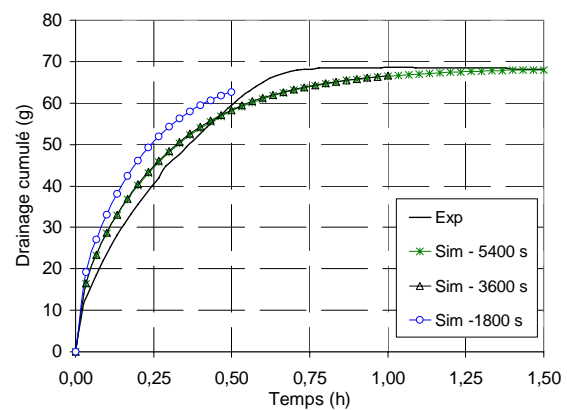


Figure 55 : Influence du temps d'optimisation $t_{\text{optimisation}}$ sur les courbes de drainage mesurées et calculées

4.3.2.2 Influence de la durée pendant laquelle est effectuée l'optimisation

La figure 54 montre l'influence de l'intervalle de temps où l'on effectue l'optimisation sur les valeurs des coefficients obtenus. On note que plus la durée de l'optimisation est courte, plus la valeur de K obtenue est grande. Le tableau 11 indique qu'en effectuant l'optimisation sur les 1800 premières secondes, on obtient une conductivité hydraulique 1,35 fois plus grande que sur 5400 secondes. En effet, nous savons que la conductivité hydraulique d'un matériau cimentaire

diminue avec la progression de l'hydratation. De plus, au cours du temps, le matériau devient de plus en plus compact et par conséquent de plus en plus imperméable. Par conséquent, en effectuant l'optimisation sur les 5400 premières secondes, on obtient une valeur moyenne de la conductivité hydraulique et de diffusivité sur cet intervalle de temps.

Tableau 11: Valeurs optimisées de la diffusivité et des conductivités hydrauliques pour le mélange P₃₆ et pour différents temps d'optimisation $t_{\text{optimisation}}$ ($\Delta P=0,1$ bar).

Mélange	$t_{\text{optimisation}} = 1800$ s		$t_{\text{optimisation}} = 3600$ s		$t_{\text{optimisation}} = 5400$ s	
	D [m ² /s]	K [m/s]	D [m ² /s]	K [m/s]	D [m ² /s]	K [m/s]
P ₃₆	$0,5127 \cdot 10^{-5}$	$4,4651 \cdot 10^{-7}$	$0,3843 \cdot 10^{-5}$	$3,3468 \cdot 10^{-7}$	$0,3784 \cdot 10^{-5}$	$3,2984 \cdot 10^{-7}$

4.3.2.3 Influence de la teneur en eau (E/C).

Il est intéressant de noter sur le tableau 9 que pour les pâtes de ciment, la conductivité hydraulique augmente avec le rapport eau/ciment. A titre d'illustration, un accroissement du E/C de 0,30 à 0,45 induit une augmentation de la conductivité hydraulique d'environ 4 fois (figure 56).

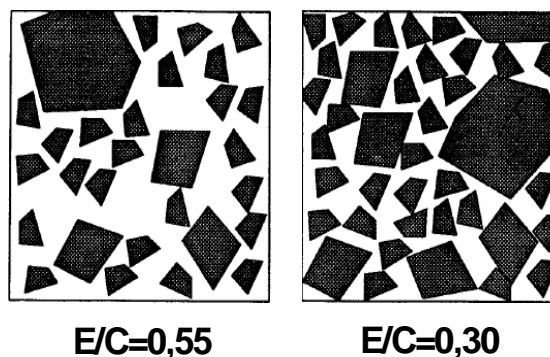
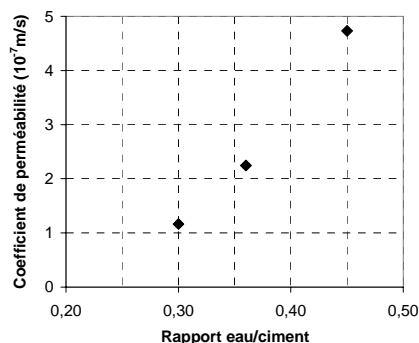


Figure 56 : Influence de la teneur en eau sur la conductivité hydraulique d'une pâte de ciment

Figure 57 : Représentation schématisque de la pâte de ciment à l'état frais (Gagné 1993 [30])

En effet, la distance initiale entre les grains de ciment dans le mélange est fonction du rapport E/C. Les grains sont d'autant plus rapprochés que E/C est faible (voir figure 57). Or, la porosité du mélange (donc sa conductivité hydraulique) est directement liée à cet espace intergranulaire. La conductivité hydraulique de la pâte augmente avec la teneur en eau de la pâte de ciment.

4.3.2.4 Influence des granulats

L'influence des granulats sur la conductivité hydraulique n'est pas très évidente. En effet, la présence des granulats fait augmenter la conductivité hydraulique du matériau. Le fluide (l'eau ou l'air) est amené à parcourir une plus longue distance pour contourner le gravier et/ou le sable. De plus, les régions proches de l'interface entre la pâte et les granulats présentent une plus grande porosité par rapport à celles se situant au cœur même de la pâte. Ces régions sont donc plus favorables à l'écoulement. Malgré cela, la conductivité hydraulique du béton dépend essentiellement, selon Larbi [50], de celle de la pâte interstitielle, l'eau pouvant s'écouler à travers les pores capillaires occupant les espaces entre les grains de ciment. Nous constatons sur le tableau 9 que le mélange P36 ($E/C = 0,36$) présente une conductivité hydraulique voisine de celle du BN ayant un $E/C = 0,65$. Cela suppose donc que la structuration de la pâte constituant le BN est proche de celle du mélange P36. L'une des raisons pouvant expliquer ce phénomène est que les granulats adsorbent une certaine quantité d'eau provenant de la pâte. Le tableau 9 indique par contre que la conductivité hydraulique du béton auto-plaçant est inférieure à celui du béton normal. Cela s'explique au moins pour deux raisons : (1) la proportion de pâte est plus élevée dans le mélange de BAP, (2) le superplastifiant entrant dans la composition du BAP permet une réduction de la porosité du mélange en défloculant les grains de ciment.

4.3.3 Evolution des propriétés rhéologiques

4.3.3.1 Evolution du seuil de cisaillement

Seule une partie des résultats est discutée ici, une présentation plus large est disponible dans la Ref. [73]. Au travers de la discussion des résultats, nous proposons de croiser l'évolution de grandeurs rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité apparente) en fonction de la pression interstitielle. La figure 58 montre l'évolution typique des courbes obtenues pendant la prise. On observe à chaque fois trois phases :

- Phase pré-pic : la pâte de ciment a un comportement élastique linéaire suivi d'une phase non linéaire jusqu'au maximum de contrainte. La fin de la phase linéaire est certainement le seuil de cisaillement vrai. Cependant, la sensibilité de notre rhéomètre ne permet pas d'avoir plus de deux ou trois points avant le pic, particulièrement au très jeune âge ($t < 90$ min), d'où l'incertitude dans la détermination de cette valeur en pré-pic.

- Pic de la courbe: la nature discrète de la valeur au pic nous permet d'approximer correctement le seuil de cisaillement y compris au très jeune âge.
- Phase post-pic : on observe un comportement adoucissant avec un palier plastique. A ce comportement succèdent pour des mesures effectuées après la prise initiale selon Vicat des courbes très bruitées (en dent de scie) synonymes de frictions inter-granulaires croissantes et d'une disparition progressive de l'eau interstitielle.

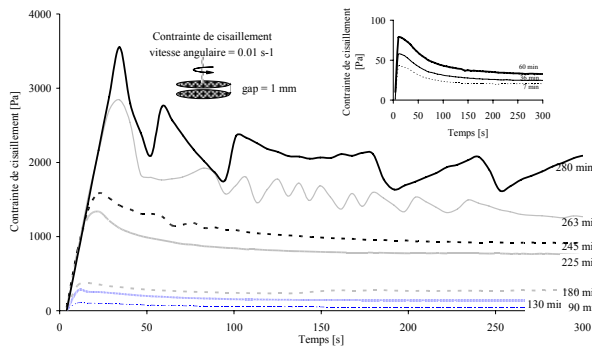


Figure 58 : Résistance au cisaillement de la pâte de ciment en fonction du temps de prise (stress growth test)

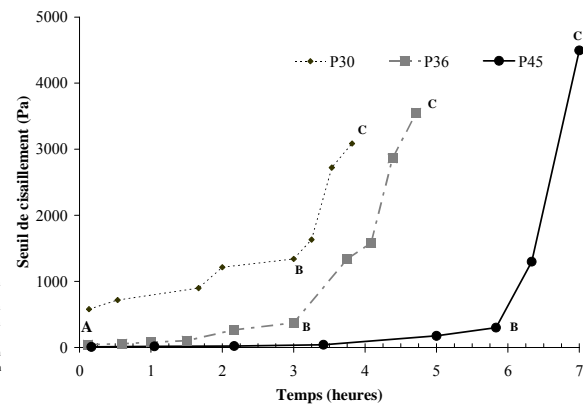


Figure 59 : Accroissement de la résistance maximale au cisaillement pendant la prise suivant la teneur en eau de la pâte de ciment

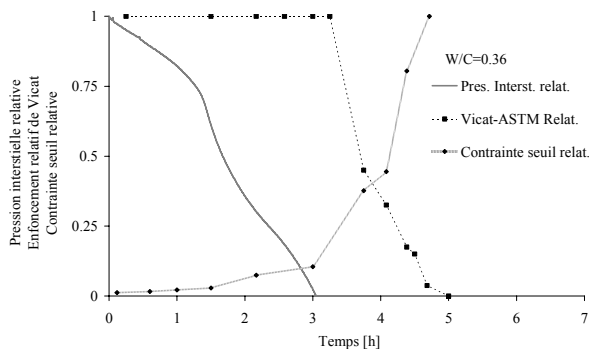


Figure 60 : Evolutions relatives de la pression interstitielle, de la contrainte seuil et de l'enfoncement Vicat de la pâte de ciment P₃₆

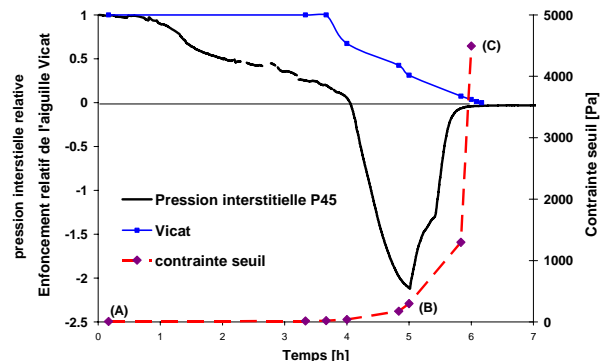


Figure 61 : Evolutions relatives de la pression interstitielle, de la contrainte seuil et de l'enfoncement Vicat de la pâte de ciment P₄₅

On construit à l'aide des valeurs aux pics la courbe d'évolution du seuil de cisaillement pendant la prise (figure 59). Sur cette figure, deux sections quasi-linéaires sont observables :

- Section AB (entre le point A et B figure 59) : Plus la teneur en eau augmente, plus la période est longue et le gradient d'accroissement du seuil de cisaillement diminue.
- Section BC (entre le point B et C figure 59) : l'augmentation rapide du seuil de cisaillement indique une évolution brusque de la structure de la pâte de ciment.

4.3.3.2 Définition du temps de prise

Les figures 60 et 62 illustrent les résultats des trois méthodes en fonction du temps : pression interstitielle, seuil de cisaillement à taux de cisaillement constant, et enfoncement Vicat pour les pâtes de ciment P₃₆ et P₄₅. Relativement à la pression interstitielle, on observe une variation simultanée du seuil de cisaillement, et de l'enfoncement Vicat. On observe clairement la simultanéité du changement de gradient du seuil de cisaillement et de l'annulation de la pression interstitielle. On propose à cet égard de définir la prise de la pâte de ciment par cette valeur particulière au point B. Il est à noter que nos résultats sont à chaque fois dans les mêmes ordres de grandeur et que l'influence de l'eau induit les mêmes tendances quelle que soit la méthode de mesure.

On propose de définir la prise par la valeur du temps auquel la pression latérale s'annule. Cette définition nous paraît pertinente à la fois par sa simplicité, du fait qu'elle est uniquement fonction des paramètres intrinsèques du matériau et parce que la méthode d'essai est non intrusive et est valable pour tout type de matériaux qui fait prise (pâte, mortier, béton, ...).

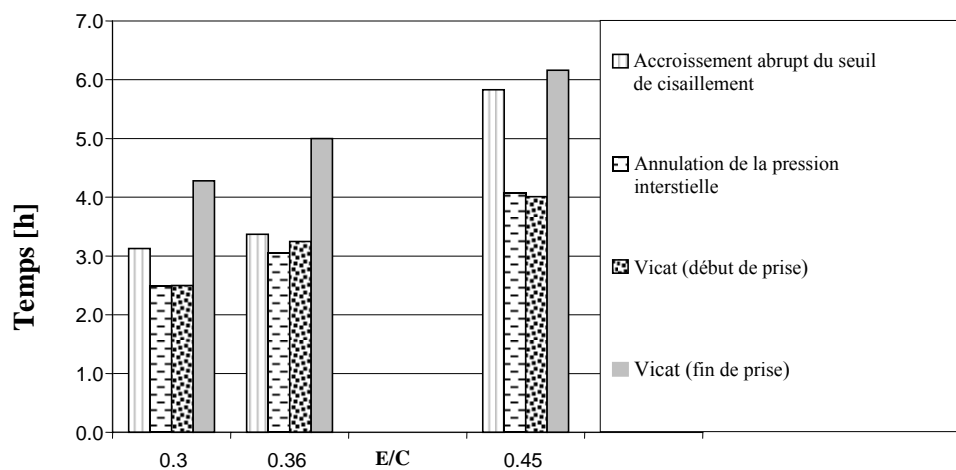


Figure 62 : Comparatif des temps caractéristiques des différentes méthodes

4.3.3.3 Evolution de la viscosité

L'interprétation des résultats de l'écoulement des matériaux cimentaires est généralement réalisée à l'aide du modèle de Bingham. La viscosité non-newtonienne est définie par le rapport contrainte de cisaillement / taux de cisaillement [74] à un taux de cisaillement donné. On remarque sur la figure 63 que la forme de la courbe d'écoulement n'est pas toujours parfaitement linéaire. La non linéarité est observable, d'une part aux faibles taux de

cisaillement, d'autre part tout au long de la structuration de la pâte conduisant à la prise. On observe notamment l'apparition de pentes négatives aux faibles taux de cisaillement et pour un temps supérieur à 85 min (figures 63 et 65).

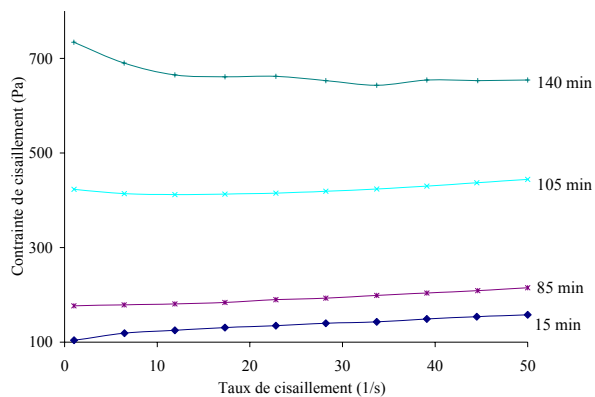


Figure 63 : Evolution des courbes d'écoulement de la pâte P36 entre 15min et 140 min.

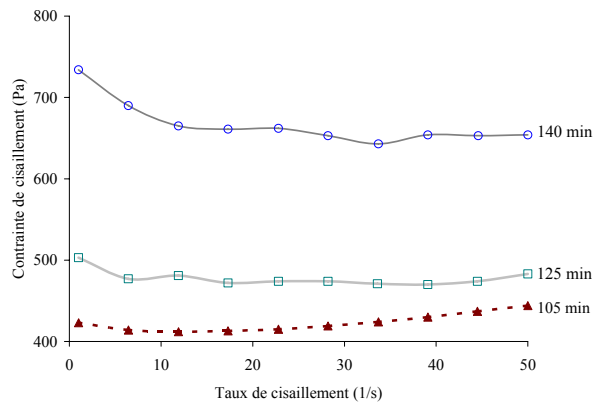


Figure 64 : Evolution des courbes d'écoulement de la pâte P36 entre 105min et 400 min.

Nous présentons sur les figures 65 et 67 l'évolution de la pente de la courbe d'écoulement (pente calculée en utilisant à chaque fois trois points de la droite de Bingham de la figure 64) en fonction du taux de cisaillement moyen et le temps depuis le malaxage. Ces courbes suggèrent deux commentaires :

- Après malaxage, la viscosité plastique diminue quand on augmente le taux de cisaillement. C'est le comportement typique d'un fluide à seuil non-newtonien. Ce comportement a déjà été observé par d'autres chercheurs [75 et 76].
- Après environ 65 min, cette tendance s'inverse et la pente augmente simultanément avec le taux de cisaillement. Cette transition peut être interprétée comme étant le passage à une prédominance des forces frictionnelles qui jouent alors un rôle majeur.

Bien entendu, quand le comportement est non linéaire, le calcul d'une « viscosité plastique » négative n'a pas de sens. Toutefois, l'évolution de la viscosité non-newtonienne montre que quel que soit le taux de cisaillement la viscosité reste positive et s'accroît pendant la prise (figure 67). Cet accroissement est plus important aux faibles taux de cisaillement. Ce résultat plus logique, conforme aux résultats classiques, n'est toutefois pas aussi riche en enseignements que celui en rapport avec l'évolution de la pente de la courbe d'écoulement. L'inversion positive/négative est susceptible de représenter un critère clair pour définir la prise. Pour expliquer l'inversion de pente positive/négative, la littérature donne des pistes qui semblent s'adapter à notre cas, particulièrement l'étude de Ancy et Coussot [77]. Leurs tests

ont été effectués sur un fluide modèle ayant des caractéristiques rhéologiques proches de notre pâte de ciment, à s'avoir une suspension de billes de verre de rayon égale à 150 μm en suspension dans un fluide newtonien de viscosité égale à 0.96 Pa.s de concentration de volume solide de 60.5 %. Notre pâte de ciment a une concentration solide de 52 % (Table 1) et la viscosité se situe juste après malaxage entre 0.9 Pa.s et 2.5 Pa.s (Figure 6) suivant le taux de cisaillement.

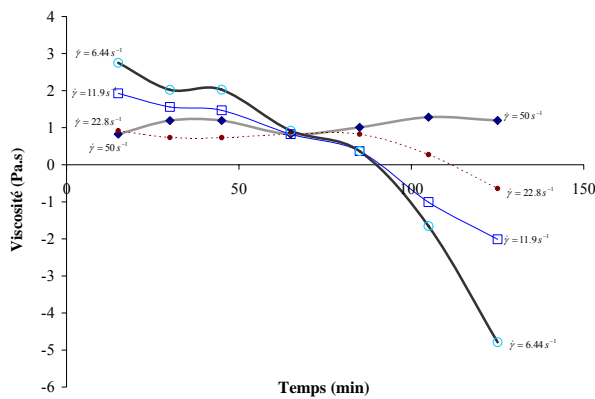


Figure 65 : Evolution de la viscosité plastique pendant la prise en fonction du temps.

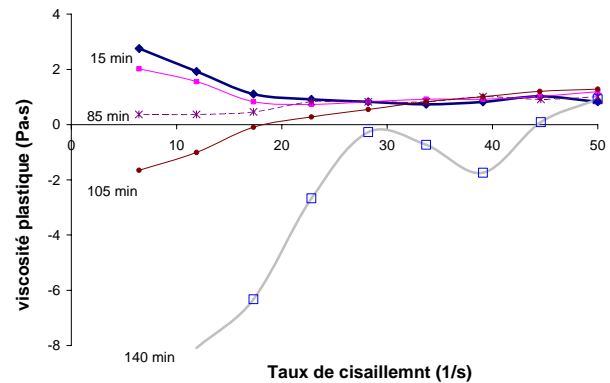


Figure 66 : Evolution de la viscosité plastique pendant la prise en fonction du taux de cisaillement induit.

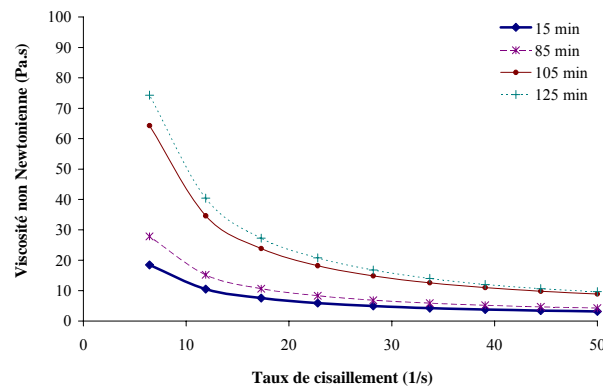


Figure 67: Evolution de la viscosité non Newtonienne pendant la prise en fonction du taux de cisaillement induit.

Ancy et Coussot [77] stipulent qu'aux faibles vitesses de cisaillement, les particules sont en contact direct les unes avec les autres. Le frottement solide entre particules permet de distribuer la force de pesanteur le long du réseau de particules en contact. A partir d'une certaine vitesse, les forces visqueuses sont capables de lubrifier les contacts, le comportement macroscopique est entièrement gouverné par la dissipation visqueuse. La translation de cette théorie valable pour un fluide newtonien parfait à la pâte de ciment permet de dire que l'accroissement des

contacts, à mesure que l'eau interstitielle se raréfie, induit une augmentation de la résistance au cisaillement du matériau. Ce phénomène est amplifié aux taux de cisaillement faible ce qui conduit à l'obtention logique au calcul d'une pente négative.

4.3.4 Evolution de la pression interstitielle lors du cisaillement

Il a été clairement établie une relation de cause à effet entre la chute de pression interstitielle et la hausse du seuil de cisaillement et de la viscosité à faible taux de cisaillement. On se propose maintenant d'établir, au travers d'une expérience de mesure directe de la variation de pression interstitielle d'un matériau soumis à cisaillement, un couplage hydromécanique dans le comportement rhéologique des matériaux cimentaires. L'observation des variations de l'état de l'eau dans cette configuration est à notre sens originale. Ce type d'expérience n'a été mené à notre connaissance que dans le cadre d'essais triaxiaux sur des sols ou des pâtes de ciment de consistance ferme.

On utilise dans ce but le dispositif présenté au paragraphe 4.2.4 et sur les figures 44 et 45. Nous avons dans une première étape soumis séparément à cisaillement un sable saturé et pré-densifié par vibration puis une pâte de ciment P36. Un test sur mortier (sable+eau+ciment) est ensuite effectué.

Dans les trois cas, on observe une courbe couple-rotation en trois phases :

- la phase pré-pic où aucune localisation de rupture dans le matériau n'est observée
 - au pic, la résistance maximale au cisaillement (couple seuil) est atteinte
 - en phase post-pic, il y a rupture par cisaillement. La rupture est probablement localisée suivant un volume cylindrique ayant les dimensions de la géométrie "vane".
- **Dans le cas de la pâte de ciment**, on enregistre au repos une pression hydrostatique. Les forces inter-particulaires de cohésion induites par la prise réduisent la pression interstitielle qui baisse lentement. Sous cisaillement, l'augmentation du couple résistant induit un accroissement de la pression interstitielle (figure 68). L'eau liée aux grains de ciment est libérée, comme lors d'un essorage, conduisant à l'accroissement de la pression interstitielle. En phase pré-pic, le comportement de la pâte est quasi-linéaire. La pâte se comporte comme un pseudo solide élastique. Un comportement non linéaire est observé sur la phase post-pic. Dans le cas des suspensions visqueuses, le cisaillement induit un accroissement de pression interstitielle, la contrainte effective dans le matériau chute à l'image du frottement inter particulaire. Le seuil d'écoulement

est vaincu, la suspension devient plus fluide et le couple décroît jusqu'à une valeur d'équilibre. L'écoulement est alors piloté par une viscosité stable.

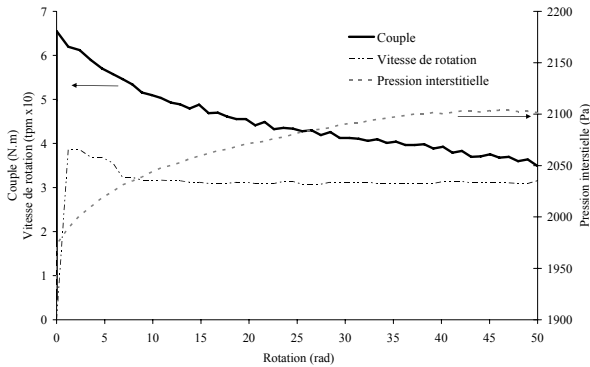


Figure 68 : Evolutions simultanées du couple et de la pression d'une **pâte de ciment** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

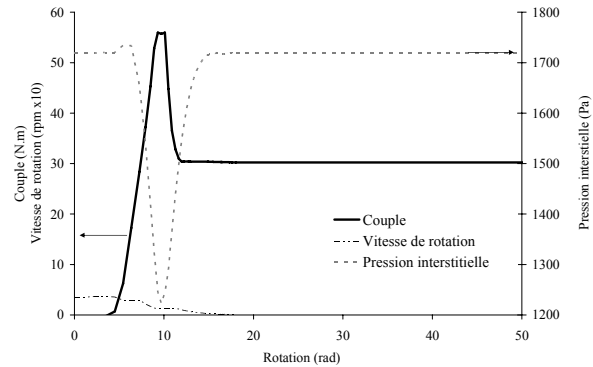


Figure 69 : Evolutions simultanées du couple et de la pression d'un **sable saturé compacté** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

- Dans le cas du **sable saturé et pré-densifié**, l'accroissement du couple sous cisaillement induit, à l'inverse d'une pâte de ciment, une chute simultanée de la pression interstitielle (figure 69). Ce résultat attendu correspond au phénomène de dilatance décrit par Reynold's (1885). En phase pré-pic, la chute de pression interstitielle est le reflet d'une augmentation des contraintes effectives dans le milieu. C'est le résultat de l'amplification du frottement inter-granulaire. L'accroissement des frottements se reflète sur le couple. Il est à remarquer la simultanéité d'obtention du couple et de la pression maximum. En phase post-pic, le couple résistant se stabilise tandis que la pression interstitielle retrouve sa valeur initiale égale à la hauteur d'eau de saturation.

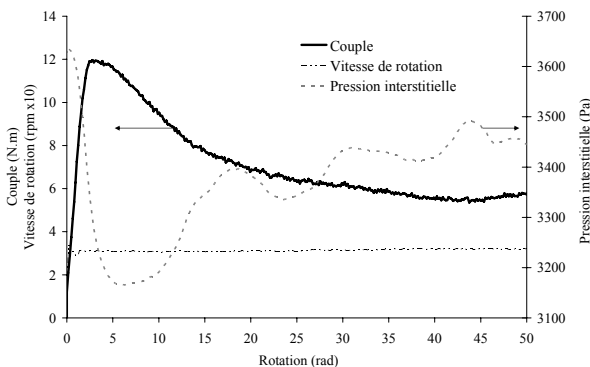


Figure 70 : Evolutions simultanées du couple et de la pression interstitielle d'un **mortier de ciment** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

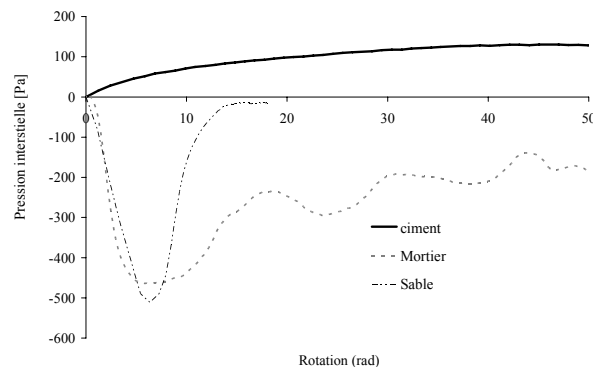


Figure 71 : Comparaison de l'évolution de la pression interstitielle observée pour la pâte de ciment, le sable et le mortier

- **Le mortier testé** est un mélange pâte de ciment – sable ($V_p/V_s=0.965$). On rappelle que l'amplitude de variation de pression sous cisaillement a été plus importante pour le sable (≈ 500 Pa) que pour la pâte de ciment (≈ 100 Pa). Nous avons enregistré pour le mortier une chute de pression interstitielle légèrement inférieure à celle du sable (figure 70). La compacité du sable contenue dans le mortier est certainement plus faible que dans le cas du test au sable brut en plus du comportement opposé de la pâte de ciment sous cisaillement. Au final, le mortier a un comportement dilatant sur la phase pré-pic. Le comportement y est dominé par les frottements inter-granulaires. Sur la phase post-pic, le comportement est assez similaire à celui de la pâte de ciment avec un couple décroissant lentement vers une valeur d'équilibre et une remontée de la pression interstitielle. Nous avons observé, sur des temps longs sous cisaillement, que la valeur finale de la pression peut être supérieure à la valeur initiale avant cisaillement. Ceci est certainement le résultat de la rupture des liaisons qui lient l'eau aux grains de ciment. En fait, ce comportement instantané dans le cas du sable se produit dans le cas de la pâte de ciment après un temps de cisaillement largement plus long. C'est la raison pour laquelle la pression d'équilibre n'est atteinte que plus tard (figure 71).

4.4 Conclusions

La chute de pression interstitielle pendant la phase plastique lors de la structuration des matériaux cimentaires est un phénomène dont les répercussions sont nombreuses tant sur la structure géométrique du matériau que sur son comportement mécanique. Les principales conclusions déduites de nos expérimentations sont les suivantes :

- **Une simultanéité des variations de pression interstitielle et celles du retrait endogène est observée.** C'est le reflet d'une évolution de la structure poreuse du matériau qui se traduit par ailleurs par une variation de la conductivité hydraulique du matériau pendant la prise. **Dans ce domaine, nous avons montré que la conductivité hydraulique passe de l'ordre de 10^{-6} m/s juste après malaxage à $5 \cdot 10^{-7}$ m/s au moment de la prise.** Nous avons aussi observé que ces paramètres dépendent de la teneur en eau du mélange et de l'état de contrainte auquel est soumis le matériau. **A ce titre, la conductivité hydraulique augmente avec la teneur en eau. En revanche, la conductivité hydraulique tend à diminuer avec l'augmentation de pression.**

- Dans le domaine de la caractérisation de la prise des matériaux cimentaires, la méthode de Vicat n'est pas sensible à la structuration d'une pâte de ciment avant le « début de prise ». Nous avons investigué plusieurs possibilités utilisant l'évolution de la pression interstitielle et des propriétés rhéologiques pendant la prise. **Les méthodes proposées permettent de détecter de manière précise et sensible les évolutions de la structuration de la pâte de ciment dès le malaxage à l'aide de grandeurs mécaniques. Des indicateurs discriminants ont été observés tels que l'annulation de la pression interstitielle, la brusque augmentation du gradient de seuil de cisaillement ou encore l'inversion de la pente de la courbe d'écoulement (viscosité plastique).** Ces investigations montrent qu'il est largement concevable que la mesure de la prise pourrait évoluer et être modifiée par des méthodes mécaniques. Enfin, nous avons imaginé que les méthodes proposées peuvent avoir des applications liées à la technologie de construction, par exemple :
- La mesure de la pression interstitielle sur une paroi coffrante est un bon moyen de détecter le moment à partir duquel le béton est en équilibre auto-stable. Le décoffrage est alors envisageable dans certaines conditions.
 - Le gradient de seuil de cisaillement lié à l'évolution de la pression interstitielle donne une indication de qualification du matériau sans attendre le début de prise (qui peut se révéler très long).
 - L'évolution de la viscosité non-newtonienne est une indication des variations de la capacité du matériau à s'écouler. La transition d'un matériau fluide à celui d'un matériau gouverné par un régime frictionnel reste cependant non clairement établie par cette méthode. Nous lui préférons le suivi de l'évolution de la pente de la courbe d'écoulement (viscosité plastique) qui devient négative à faible taux de cisaillement. Cette information peut être précieuse pour juger de la pompabilité d'un matériau cimentaire.
- Une étude sur les variations de l'état de l'eau lors d'un cisaillement de matériaux cimentaires a permis de montrer l'intérêt de **coupler la pression interstitielle aux grandeurs rhéométriques dans le cas de suspensions multiphasiques fluides.** Dans ce domaine, les principaux constats sont les suivants :

- La variation de pression interstitielle est positive dans le cas de pâte de ciment (suspension fluide visqueuse) et négative pour un sable saturé pré-densifié (suspension granulaire). Dans le cas d'un mortier (sable + pâte de ciment), la chute de pression interstitielle est de l'ordre de celle d'une suspension granulaire. On note toutefois que la chute est contre-balançée par le comportement opposé de la pâte de ciment.
- A vitesse de cisaillement contrôlée, plus l'amplitude de chute de pression est importante, plus le couple correspondant est grand.
- Dans le cas de suspension granulaire, le retour à l'équilibre des pressions interstitielles est atteint de manière plus rapide comparé au mortier. La différence de conductivité hydraulique est sans doute à l'origine de ce phénomène.
- Finalement, si la pression interstitielle décroît sous cisaillement (cas du mortier), la contrainte effective dans les grains augmente, induisant l'accroissement des frottements grains – grains et du couple résistant au cisaillement. A l'inverse, si le cisaillement entraîne une hausse de pression interstitielle (cas de la pâte de ciment), la contrainte effective décroît rendant le milieu plus fluide.

L'ensemble de ces conclusions montre les multiples applications de la mesure de la pression interstitielle tant pour caractériser la structuration du matériau que pour en expliquer le comportement rhéologique.

5 MODELISATION PHYSIQUE ET SIMULATION NUMERIQUE DE LA CINETIQUE DE MATURATION

Au cours de notre démarche expérimentale, nous nous sommes intéressés au processus de maturation des pâtes de ciment et des bétons. Ceci a été fait aussi dans le but d'atteindre deux objectifs :

- Prédire quantitativement les contraintes engendrées dès le coulage.
- Modéliser la cinétique de maturation afin par exemple de maîtriser avec précision les temps de décoffrage.

Concernant le premier point, la détermination de la contrainte seuil du matériau associée à la géométrie du coffrage permet de prédire la reprise des efforts aux parois. Cette méthode fondée sur le principe fondamental d'équilibre mécanique permet de déterminer aisément la pression initiale d'un béton contre un coffrage. Cette méthode utilisée initialement dans le cas des silos par Jansen [78] a été adaptée avec succès au cas du béton par Ovarlez et al. [79, 80].

Concernant le second point, deux alternatives sont envisageables :

- On utilise la même démarche mécanique que précédemment en introduisant cette fois l'évolution du seuil de cisaillement pendant la maturation du matériau. Cette méthode a fait l'objet de travaux par Roussel et al. [81].
- On utilise une approche physique du problème en décrivant l'évolution de la maturation du matériau par adaptation et intégration d'une équation d'état de l'eau dans le matériau.

Nous avons opté pour la deuxième approche en nous appuyant sur l'observation suivante :

A une profondeur donnée, la pression latérale totale qu'exerce un matériau cimentaire sur un coffrage évolue suivant une cinétique identique à la pression interstitielle régnant dans le matériau. Nous allons de ce fait nous intéresser essentiellement à la modélisation de l'évolution de l'état de l'eau à l'intérieur du matériau dans un coffrage.

Cette modélisation repose sur la description de l'écoulement et de l'état de l'eau en milieu non saturé dans un milieu poreux. Ce type d'approche est habituellement utilisé en mécanique des sols non saturés pour modéliser leur comportement mécanique et en agronomie pour modéliser le drainage des champs.

La littérature en la matière propose de nombreuses équations à même de résoudre le problème de modélisation posé. Nos investigations nous ont amenés à adapter l'équation de Richards à

notre problématique. Cette équation différentielle aux dérivées partielles est de type parabolique en milieu non saturé et de type elliptique en milieu saturé.

5.1 Description synthétique de la démarche de modélisation

On suppose généralement qu'à l'état frais les matériaux cimentaires sont saturés. Dans la réalité, des bulles d'air restent piégées dans le matériau pendant le malaxage. Ces bulles d'air occupent un volume de 5 à 20% du volume total pour le béton frais (A. M. Neville [71]) et de l'ordre de 5% pour les pâtes de ciment (S. Mansoutre [82]). De plus, l'avancement de la réaction d'hydratation provoque une augmentation du volume occupé par cette phase gazeuse qui est constituée d'air et de vapeur d'eau. De ce fait, l'hypothèse de non saturation initiale nous semble tout à fait justifiée, même si par ailleurs certains auteurs jugent que le matériau est plutôt saturé en se référant aux mesures d'humidité relative proche de 100% au départ. Il faut signaler en outre que le degré de saturation diminue avec la progression de l'hydratation des grains de ciment.

Les principales équations régissant le transfert de l'eau en milieu non déformable et non saturé ont été initialement utilisées dans le cas des sols non saturés. La loi générale des écoulements de l'eau dans un milieu non saturé (6) est obtenue en reportant la loi de Darcy dans l'équation de continuité (ou de conservation de la masse).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div} \left[-K(\theta) \text{grad}(\psi_p + z) \right] + S \quad (6)$$

θ est la teneur en eau volumique, t le temps, $K(\theta)$ la conductivité hydraulique fonction de la teneur en eau θ , ψ_p le potentiel de pression exprimé en hauteur d'eau, z la cote du matériau et S le terme source tenant compte de l'apport ou du prélèvement d'eau.

Cette équation peut être présentée uniquement en termes de potentiel de pression ψ_p (**la pression de l'eau est fréquemment assimilée à ce potentiel**) ou en termes de teneur en eau θ .

En introduisant la capacité capillaire $C(\psi_p)$ définie par :

$$C(\psi_p) = \partial \theta / \partial \psi_p$$

on obtient l'équation de Richards sous sa forme capacitive :

$$C(\psi_p) \frac{\partial h}{\partial t} = \text{div} \left[K(\psi_p) \text{grad}(\psi_p + z) \right] + S \quad (7)$$

Les propriétés de transfert de l'eau dans un milieu poreux non saturé sont également définies par un paramètre global qu'est la diffusivité D . Ce paramètre est fonction de la conductivité hydraulique et des propriétés de rétention d'eau du sol et il est défini par l'expression (8) suivante.

$$D(\theta) = K(\theta) / C(\theta) = K(\theta) \cdot \partial \psi_p / \partial \theta \quad (8)$$

La courbe de rétention $\psi_p(\theta)$, appelée également courbe caractéristique de la teneur en eau, est la forme de la relation entre la teneur en eau volumique et la charge matricielle.

En introduisant l'expression de la diffusivité dans l'équation (7), on obtient la forme diffusive de l'équation de Richards ou équation de Fokker Planck.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} [D(\theta) \text{grad} \theta] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} + S \quad (9)$$

L'écoulement dans un milieu non saturé dépend donc de la conductivité hydraulique du matériau $K(\theta)$ et des propriétés de rétention d'eau du matériau exprimé par $D(\theta)$. L'influence de la gravité sur les écoulements intervient dans le terme $\partial K(\theta) / \partial z$. A partir de ces éléments de base, la modélisation de l'évolution de la pression interstitielle dans un coffrage est réalisée en intégrant l'équation de Fokker Planck.

Le terme source S de l'équation (9) représente le changement d'état de l'eau dans le matériau cimentaire :

- l'eau passant d'un état libre à un état lié (eau chimiquement liée avec les anhydres du ciment),
- l'eau passant d'un état libre à un état adsorbé (adsorption chimique ou physique).

5.1.1 Hypothèses de modélisation

Pour une première approche, l'équation d'écoulement de l'eau dans le coffrage de Fokker Planck est résolue dans le cas 1D (sens vertical z). L'expression (9) devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} + S \quad (10)$$

La conductivité hydraulique K du matériau varie peu suivant la cote z dans le coffrage. En effet, les analyses par gamma densimétrie de l'évolution de la densité des matériaux dans un coffrage de 1,4 mètre ont montré que sur les 24 premières heures et pour notre gamme de pâte ($E/C=0,30$ à $0,45$), elle reste quasi-homogène sur toute la hauteur [83].

La courbe de rétention d'eau est supposée linéaire, soit :

$$\theta(\psi_p) = A + B.\psi_p \quad (11)$$

Sachant que $\psi_p = (u_{\text{air}} - u_{\text{eau}}) / \gamma_{\text{eau}}$, la teneur en eau varie donc linéairement en fonction de la pression de l'eau u_{eau} , soit :

$$\theta(u_{\text{eau}}) = a + b.u_{\text{eau}} \quad (12)$$

Compte tenu de ces hypothèses, la diffusivité D ne varie pas également suivant z et nous obtenons l'équation différentielle régissant les variations spatio-temporelles de la pression d'eau u_{eau} :

$$\frac{\partial u_{\text{eau}}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u_{\text{eau}}}{\partial z^2} + S \quad (13)$$

Cette équation indique qu'une variation temporelle de la pression interstitielle trouve son origine d'une part à cause d'un mouvement de l'eau libre, d'autre part en raison du changement de l'état de l'eau dans le mélange modélisé par le terme source S . Sans le terme source, l'équation 13 est similaire à celle de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi.

La résolution de cette équation passe par une définition des conditions initiales et aux limites.

- En termes de pression, les conditions initiales sont déduites directement des résultats expérimentaux présentés au chapitre précédent. La pression initiale est soit hydrostatique soit réduite d'un facteur k par rapport à la pression hydrostatique. C'est le cas des bétons : la pression est hydrostatique jusqu'à une profondeur h_{critique} à partir de la surface supérieure de l'échantillon. Au-delà de h_{critique} , la pression est considérée réduite. Le facteur de réduction k n'est pas constant sur toute la hauteur du coffrage (voir Tableau 12).

Tableau 12 : Rapport $P_{\text{mesurée}} / P_{\text{hydrostatique}}$ pour les mélanges BN et BAP.

Mélange	H = 5 m	H = 10 m
BN	0,77	0,79
BAP	0,82	0,81

- Concernant les conditions aux limites : sur les essais réalisés, la pression interstitielle u_w à la surface libre (cote $z=L$) est égale à la pression atmosphérique. Le flux est nul à la cote $z=0$ puisqu'il n'y a pas d'écoulement à la face inférieure de l'échantillon.

Le système d'équations à résoudre se résume alors comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_{\text{eau}}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u_{\text{eau}}}{\partial z^2} + S \\ \frac{\partial u_{\text{eau}}}{\partial z} = 0 \text{ (soit } q = 0) \quad t > 0 \quad z = 0 \\ u_{\text{eau}} = 0 \quad t > 0 \quad z = L \\ u_{\text{eau}} = k\gamma(L - z) \quad t = 0 \quad 0 < z \leq L \end{array} \right. \quad (14)$$

avec $k = 1.0$ pour les pâtes,
 $k = 1.0$ si $z > z_{\text{critique}}$ } pour les bétons.
 $k < 1.0$ si $z \leq z_{\text{critique}}$ }

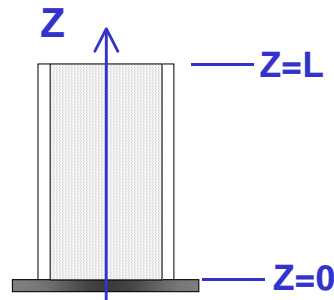


Figure 72 : Représentation simplifiée du coffrage.

5.1.2 Résolution numérique de l'équation de Richards

Une solution analytique de l'équation de Richards n'existe que dans certains cas particuliers. Sa résolution se fait généralement à l'aide de méthodes numériques, telles que les différences finies, les éléments finis et les volumes finis. Dans notre cas, la résolution a été réalisée avec la méthode des différences finies.

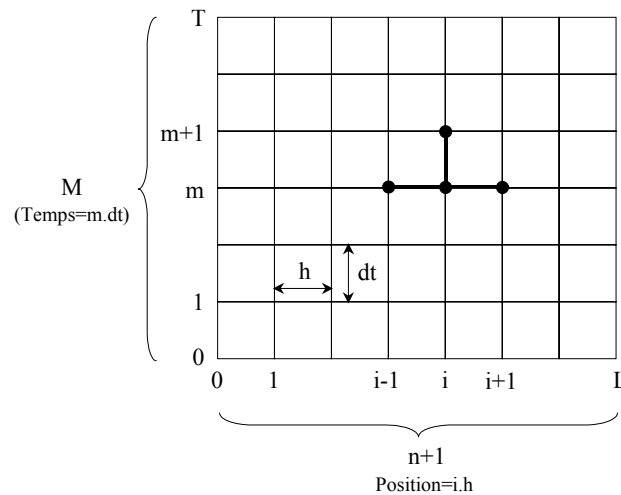


Figure 73 : Maillage "différences finies"

Le problème modèle est discrétisé de manière classique (figure 73) :

$$U^{m+1} = S^m + (I - \alpha B)U^m \quad (22)$$

La résolution de ces problèmes nous oblige donc à connaître la diffusivité D (ou de la conductivité hydraulique K) du matériau étudié. L'application de l'équation de Richards à l'essai de drainage à pas de pression unique nous permettra par la suite de déduire, par analyse inverse (ou indirecte), la valeur de ces paramètres. Nous avons présenté ces résultats au paragraphe 4.3.2 (tableau 10).

5.2 Quelques résultats de simulation

La résolution de l'équation de modélisation (13) peut être envisagée avec ou sans prise en compte du terme source S . Cela va nous permettre d'apprécier distinctement l'influence du mouvement de l'eau libre (ressuage) et du changement de l'état de l'eau sur la baisse des pressions.

5.2.1 Influence du mouvement de l'eau ($S = 0$)

Lorsque l'eau est soumise à un gradient de pression, elle circule à travers le réseau poreux jusqu'à ce que l'équilibre hydrique soit atteint. Afin d'étudier la répercussion de ce phénomène (le ressuage) sur la cinétique d'évolution de la pression interstitielle dans le matériau, nous allons considérer l'équation de Fokker Plank sans le terme source S . Ce terme source représente l'état de fixation de l'eau dans le mélange. Nous avons donc à résoudre le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{lll} \frac{\partial u_w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} & & \\ \frac{\partial u_w}{\partial z} = 0 \text{ (soit } q = 0) & t > 0 & z = 0 \\ u_w = 0 & t > 0 & z = L \\ u_w = k\gamma(L - z) & t = 0 & 0 < z \leq L \end{array} \right. \quad (23)$$

A titre d'exemple, nous présentons ici les résultats obtenus avec le mélange P_{36} . Le calcul a été effectué avec un coefficient de diffusivité de $0,3784 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, soit une conductivité hydraulique de $3,2987 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (voir tableau 9).

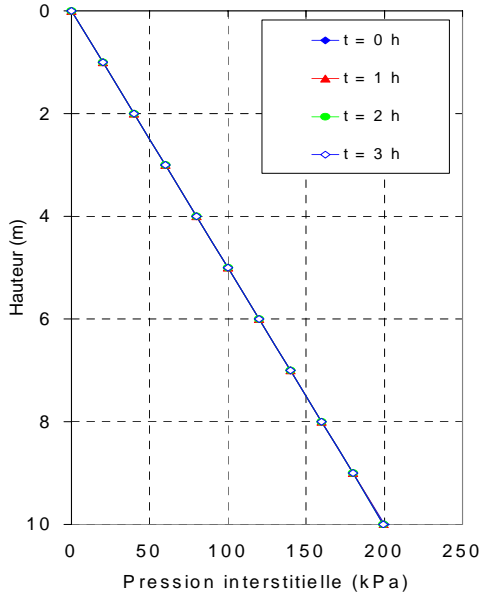


Figure 74 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (simulation avec $D=0,3784 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

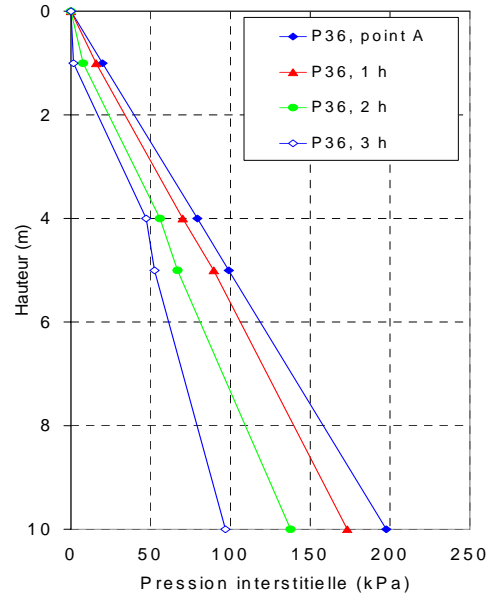


Figure 75 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (expérimentation)

Les figures 74 et 75 représentent les courbes expérimentales et simulées de l'évolution du profil de pression sur les quatre premières heures d'hydratation. On note, durant cet intervalle de temps, que la baisse de pression mesurée expérimentalement à la base du coffrage (de l'ordre 50%) est largement supérieure à celle simulée (de l'ordre de 2%).

Nous avons déterminé, pour le même mélange, la valeur de la conductivité hydraulique K qui donnerait une cinétique de réduction de la pression interstitielle proche de celle obtenue expérimentalement. Le calcul nous indique alors une conductivité hydraulique de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ qui est certainement incorrecte dans la mesure où celui du sable est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Finalement, notre simulation fait apparaître que la diminution de la pression interstitielle doit être modélisée en intégrant un changement de l'état de l'eau dans le matériau et non pas le mouvement de l'eau libre.

5.2.2 Influence du changement de l'état de l'eau ($S \neq 0$)

En tenant compte du terme source S , nous obtenons les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_{\text{eau}}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u_{\text{eau}}}{\partial z^2} + S \\ \frac{\partial u_{\text{eau}}}{\partial z} = 0 \text{ (soit } q = 0) \quad t > 0 \quad z = 0 \\ u_{\text{eau}} = 0 \quad t > 0 \quad z = L \\ u_{\text{eau}} = k\gamma(L - z) \quad t = 0 \quad 0 < z \leq L \end{array} \right. \quad (24)$$

5.2.3 Cas des pâtes de ciment

Dans le cas des pâtes de ciment, S rend compte du volume d'eau libre consommée par les grains de ciment durant son hydratation. La connaissance du taux d'hydratation permet de disposer, à tout instant t , d'une estimation de la proportion de l'eau consommée, donc du terme source. Nous avons par ailleurs mentionné dans la partie bibliographique (A.3.1.2) qu'une des manières de déterminer l'avancement du degré d'hydratation consiste à mesurer l'évolution du flux thermique, i.e. la chaleur dégagée par le matériau, au cours du temps.

Par analogie avec la courbe calorimétrique de l'hydratation, nous proposons, par conséquent, de prendre un terme source ayant la forme d'une Gaussienne (figure 76) :

$$S = A.e^{-B(t-t_0)^2} \quad (25)$$

Où : A est l'amplitude ou la hauteur de la gaussienne, B correspond à sa largeur, et t_0 indique la position du centre de la gaussienne.

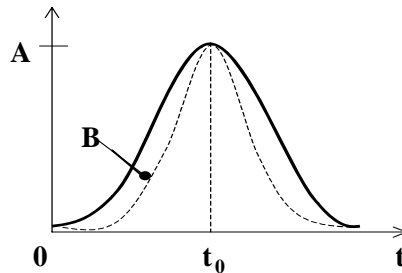


Figure 76 : Représentation d'une Gaussienne.

La position du centre de la Gaussienne t_0 correspond à l'instant où nous obtenons le pic de température mesurée lors des tests à la colonne. Elle est alors prise égale à 9,33 heures pour P₃₀, 9,83 heures pour P₃₆ et 11,16 heures pour le mélange P₄₅.

Les paramètres A et B, quant à eux, sont identifiés par analyse inverse sur les courbes expérimentales de l'évolution de la pression interstitielle. Ces identifications sont effectuées sur une portion de ces courbes, i.e. à partir du point "A" jusqu'à l'instant où nous enregistrons le pic de dépression (voir figure 28).

L'ensemble des résultats de l'analyse inverse menés sur les pâtes de ciments (tableau 12 et figures 77 à 82) nous permet d'étudier particulièrement l'influence des paramètres E/C et de la hauteur du mélange sur la cinétique du terme source.

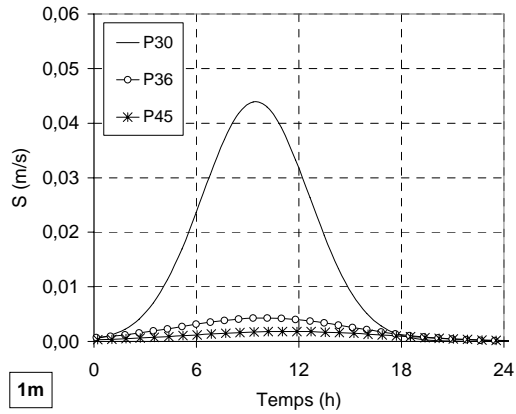


Figure 77 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (simulation avec $D=0,3784 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

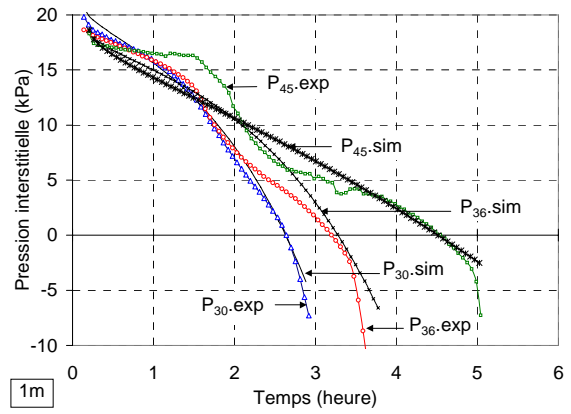


Figure 78 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (expérimentation) à 1 m

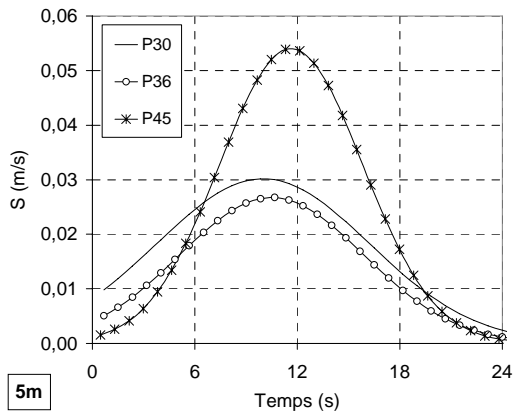


Figure 79 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (simulation avec $D=0,3784 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

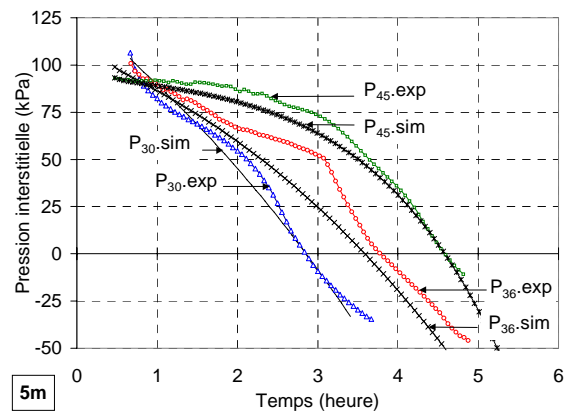


Figure 80 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P_{36} . (expérimentation) à 5 m

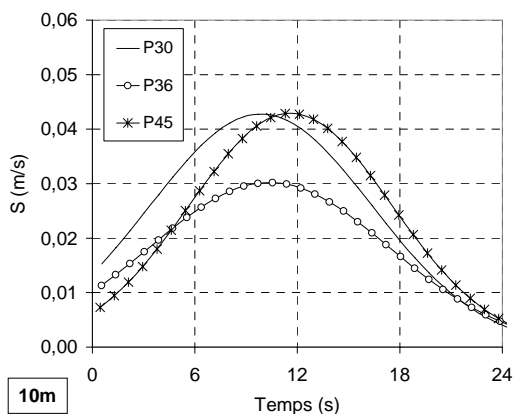


Figure 81 : Cinétique du terme source pour 10 m de hauteur de pâte de ciment.

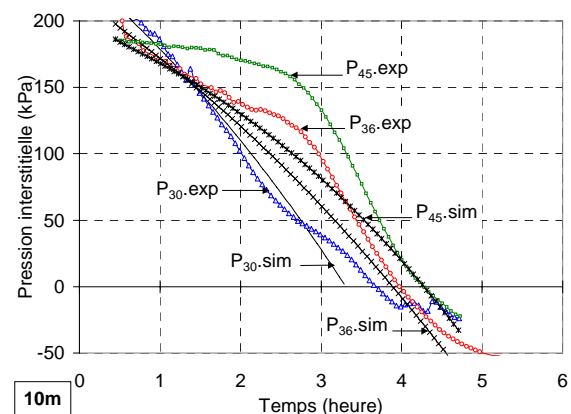


Figure 82 : comparaison des courbes simulées / expérimentales de la pression interstitielle pour les pâtes de ciment

Tableau 13 : Valeurs des paramètres A et B optimisées.

Mélange	Variables	Unités	Hauteur (m)		
			1,0	5,0	10,0
P ₃₀	A	x10 ⁻² m.s ⁻¹	4,3916	3,0185	4,2783
	B	x10 ⁻⁹	3,9250	0,9973	0,9116
P ₃₆	A	x10 ⁻² m.s ⁻¹	0,4284	2,6740	3,0222
	B	x10 ⁻⁹	1,4828	1,3286	0,7844
P ₄₅	A	x10 ⁻² m.s ⁻¹	0,1814	5,4050	4,2922
	B	x10 ⁻⁹	1,1553	2,1967	1,0957

Au vu de ces résultats, nous constatons que :

– L’amplitude du terme source est d’autant plus élevée que la teneur en eau est faible, tout au moins sur les 4-5 premières heures d’hydratation. Cela présume que le degré d’hydratation à une échéance donnée est plus élevé pour de faibles valeurs du rapport E/C. Cela s’explique selon Boivin [16] par le fait que, pour des systèmes contenant moins d’eau, le niveau de sursaturation vis-à-vis des S-H et de la portlandite est plus vite atteint. Dans ce cas, ces deux espèces se précipitent beaucoup plus rapidement.

- Sauf pour les cas P_{30-1m} et P_{45-5m}, l’amplitude du terme source augmente globalement avec l’état de contrainte auquel est soumis le matériau. Pour le mélange P₃₆, par exemple, l’amplitude du terme source à 10 mètres de profondeur est d’environ 24 fois supérieure à celle obtenue à 1 mètre. Cela suppose donc qu’une augmentation de la contrainte accélère le changement de l’état de l’eau dans la pâte.

La comparaison des courbes simulées et expérimentales montre une meilleure modélisation de la cinétique des pressions interstitielles pour de faibles hauteurs de matériau. Nous enregistrons un écart maximum entre les valeurs expérimentales et celles simulées de l’ordre de 30% (mélange P_{45-10m}). Ces résultats indiquent néanmoins une bonne estimation du temps d’annulation des pressions avec un écart maximum de 23 minutes (par rapport au mélange P_{30-10m}) entre la simulation et l’expérience.

5.2.4 Cas des bétons :

Pour les mélanges de béton, le terme S correspond d'une part à la quantité d'eau libre extraite pour l'hydratation du ciment et d'autre part à la quantité d'eau adsorbée par les granulats.

Tableau 14 : Identification des paramètres A et B.

Mélange	Variables	Unités	Hauteur (m)		
			1,0	5,0	10,0
BN	A	$\times 10^{-2} \text{m.s}^{-1}$	0,4616	0,0815	0,0503
	B	$\times 10^{-9}$	1,0667	-1,5469	-2,3406
BAP	A	$\times 10^{-2} \text{m.s}^{-1}$	2,0278	0,2579	0,0564
	B	$\times 10^{-9}$	1,3641	-2,4893	-1,1694

Pour une première approche, la formulation du terme source sera la même que celle utilisée pour les pâtes de ciment, i.e. une gaussienne (équation 25). Les coefficients A et B du terme source seront pareillement identifiés à partir des courbes d'évolution des pressions interstitielles. La position du centre de la gaussienne se situe quant à elle à 12,0 heures pour BN et 15,9 heures pour le BAP.

Les résultats présentés sur les figures 77 à 88 montrent que le modèle donne une bonne estimation de l'évolution de la pression interstitielle pendant les 4 à 5 heures d'hydratation.

Toutefois, nous constatons que pour des hauteurs de 5 et 10 mètres, la forme du terme source diffère largement de celle de la courbe calorimétrique. Nous concluons, dans le cas des bétons, à l'importance du phénomène d'adsorption de l'eau par les granulats vis-à-vis de la cinétique de baisse des pressions.

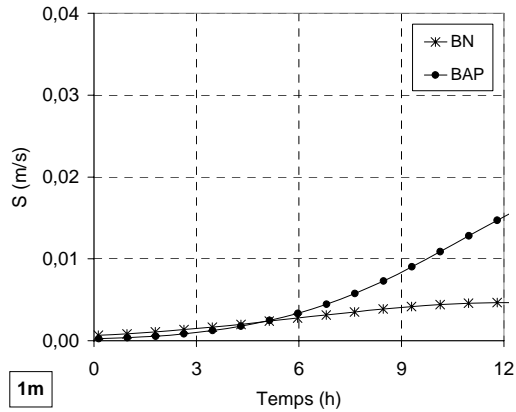


Figure 83 : Cinétique du terme source pour 1 m de hauteur de béton.

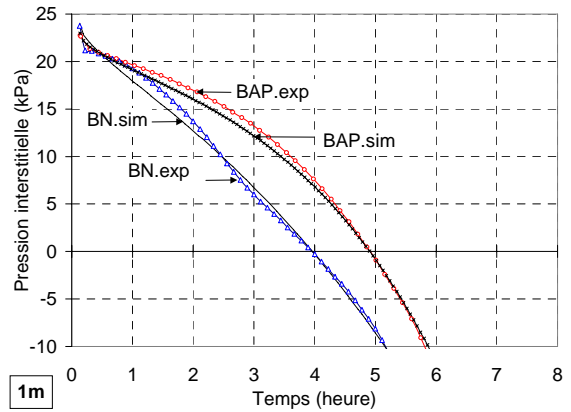


Figure 84 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 1m.

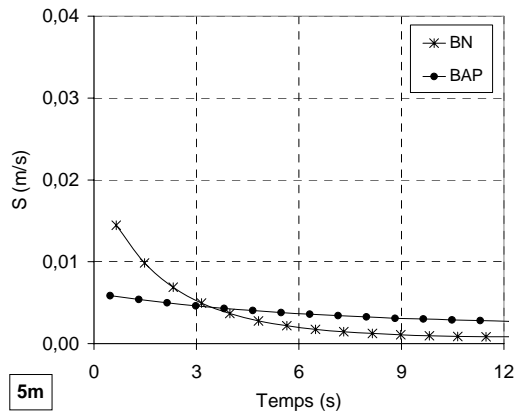


Figure 85 : Cinétique du terme source pour 5 m de hauteur de béton

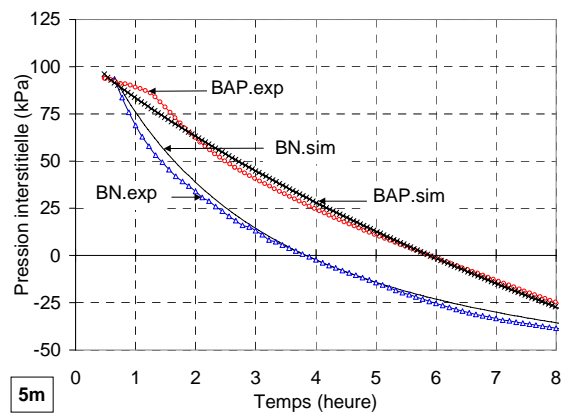


Figure 86 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 5m.

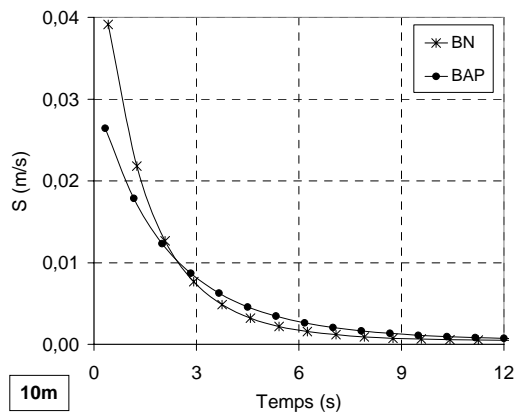


Figure 87 : Cinétique du terme source pour 10 m de hauteur de matériau

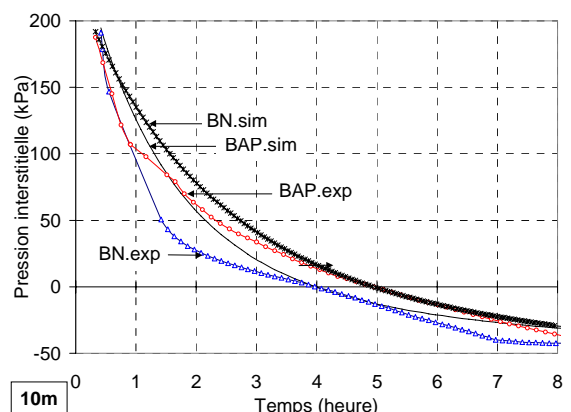


Figure 88 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 10 m

5.3 Conclusions

Compte tenu des résultats expérimentaux montrant l'égalité entre la pression interstitielle et la pression totale, nous nous sommes intéressés à la modélisation de l'évolution de l'état de l'eau dans le matériau mis en œuvre dans un coffrage. Nous avons adapté l'équation de Richards à notre problématique. Cette équation régit le transfert de l'eau en milieu non saturé et résulte de la combinaison de la loi de Darcy et de l'équation de continuité. **Le modèle ainsi utilisé met en jeu deux paramètres, à savoir la conductivité hydraulique du matériau et un terme source qui correspond à l'état de fixation de l'eau.**

Les chutes de pressions sont essentiellement dues à la consommation de l'eau par les grains de ciment et à l'adsorption de l'eau par les grains solides. Ce phénomène est intégré dans le terme source de l'équation de Richards. **La forme du terme source représente le paramètre fondamental d'influence de la qualité des simulations présentées.**

La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux issus de la modélisation montre que les baisses de pressions engendrées par le ressuage et la sédimentation du matériau sont négligeables vis-à-vis de l'amplitude des chutes observées.

6 Conclusions et Projets de Recherches

Mon activité de recherche se situe dans le domaine de la rhéologie des matériaux cimentaires en phase plastique. Le contexte des études effectuées est essentiellement associé aux problèmes technologiques des procédés de mise en œuvre : malaxage, poussée contre les coffrages, maturation.

Les études menées sur un matériau complexe suivant plusieurs angles d'investigation, alliant tests classiques et développement de techniques originales, ont permis d'établir un certain nombre de résultats nouveaux :

- Concernant le malaxage : l'application de procédés de rhéométrie sur un camion bétonnière a montré une bonne corrélation entre le seuil de cisaillement donné par la bétonnière et celui d'un rhéomètre à béton. Des résultats contradictoires sont toutefois constatés pour la viscosité. Ces résultats initiaux montrent l'intérêt de la démarche et ouvrent des perspectives en matière de rhéologie à l'échelle industrielle du béton.
- Concernant la poussée des bétons contre les coffrages : au moyen de dispositifs expérimentaux originaux, plusieurs études de l'évolution des pressions sur les coffrages jusqu'au durcissement du matériau sont présentées. Les influences respectives de la géométrie (hauteur de matériau mise en œuvre), de la composition des matériaux cimentaires (teneur en eau, composition et concentration granulaire) et de la présence ou non de vibration pendant la mise en œuvre sont analysées. L'étude de l'évolution de la pression a montré l'égalité des pressions interstitielles et totales jusqu'à annulation de la pression totale. L'origine des variations de la pression interstitielle est attribuée en grande partie à l'activité physico-chimique qui règne pendant la période dormante. L'influence de plusieurs paramètres tels que la teneur en eau, la vibration et la hauteur de matériau mises en place sur l'évolution de pression est démontrée. Par ailleurs, Le comportement des bétons en termes de cinétique de pression interstitielle est calqué sur celui des pâtes de ciment équivalentes tant que la pression totale ne s'annule pas. Plus la concentration granulaire est forte plus la pression maximale initiale décroît. Une influence granulaire sur la zone dépressionnaire qui consiste en une reprise d'une part

des contraintes dans le milieu par les granulats est cependant enregistrée. L'application de la technique de mesure de pression a été ensuite utilisée et adaptée sur un chantier et a permis de suivre précisément la montée en pression en fonction de la hauteur de bétonnage, puis le suivi de la pression jusqu'à la phase décoffrage. La campagne d'essais in-situ a montré l'intérêt de mesure continue de la pression dans le but de prédire un temps de décoffrage.

- Concernant la maturation des matériaux cimentaires : un ensemble d'investigations comportant des essais originaux de suivi de la maturation par le biais de tests rhéométriques, de drainage et de retrait a été effectué. Dans tous les cas, nous avons simultanément mesuré de manière directe ou indirecte les variations de pression interstitielle. L'analyse des résultats a montré que la variation de pression interstitielle est l'élément déclencheur de changement de comportement dans la rhéologie des matériaux cimentaires. L'accroissement de la conductivité hydraulique et du retrait est aussi induit par l'évolution des pressions capillaires.
- Concernant la modélisation de la maturation : dans le but de modéliser et de simuler la maturation d'un matériau cimentaire, nous avons adapté l'équation de Richards à notre problématique. Cette démarche a permis de confirmer que l'évolution de la pression est bien le fait de la structuration du matériau. La proposition d'un paramètre de description de la structuration à l'aide d'un terme source a permis de prédire de manière satisfaisante les évolutions de pression observées lors des expérimentations.

A travers ces conclusions transparaissent des perspectives, où la nécessité de l'expérimentation et de la modélisation restera le pivot de mes recherches futures.

Perspectives de recherches

Le bilan des travaux réalisés me permet à présent d'évoquer, dans l'ordre des priorités, les principales perspectives envisagées :

Dans l'immédiat, une forte partie de mon activité est orientée sur une question fondamentale à deux volets par rapport aux travaux expérimentaux déjà réalisés :

Quelles expérimentations rhéologiques pour caractériser l'évolution des contraintes externes aux interfaces matériau/coffrage et des contraintes internes conséquences de la maturation?

- Sur la question des contraintes aux interfaces, comme évoqué au chapitre 3, les phénomènes de frottement et d'hydrodynamique sont à l'origine du décalage des pressions latérales totales initiales par rapport aux pressions hydrostatiques. L'étude de ces frottements est généralement faite à l'aide de tribomètres. L'identification du coefficient de frottement à partir de ce type d'appareil nous semble complexe compte tenu des artéfacts et de la limitation des mesures (vitesse, pression, dimension). Dans un souci de simplicité (mise en œuvre, exploitation des résultats) et pour nous rapprocher autant que possible des conditions réelles de mise en œuvre, nous proposons une mesure directe de la contrainte verticale reprise aux parois. Cette méthode nous permettra de **déterminer la part de la contrainte verticale reprise par les frottements aux parois**. Une réflexion est aussi menée pour la **conception d'un capteur de cisaillement mis en place directement sur la surface interne de la paroi** coffrante.
- En ce qui concerne les contraintes internes, la présence de granulats et l'adjonction d'un adjuvant influent de manière considérable sur la rhéologie et la cinétique d'évolution des pressions. Sur cet aspect, l'état de l'art montre la pertinence de développements nouveaux sur la définition d'une rhéométrie adaptée qui s'inspire de la réalité des procédés en Génie Civil. Nous mettons en œuvre à ce titre **un rhéomètre capable de générer une large gamme de couples et de vitesses de cisaillement pour les bétons**

fluides et fermes. Cet outil sera associé aux capteurs de mesures de pressions interstitielles et de frottements aux parois.

Les résultats des nouvelles expérimentations doivent nous permettre de reprendre notre démarche de modélisation et de simulation numérique. D'où la question :

Comment améliorer notre modèle de simulation ?

- Pour une première approche, le modèle utilisé dans la présente étude pour la simulation de l'évolution des pressions est unidimensionnel. Dans la réalité, la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du matériau, la présence du coffrage, sont certainement des paramètres à prendre en compte dans la modélisation. Il est donc intéressant de voir ce **que peut apporter un modèle bidimensionnel ou tridimensionnel.**
- Nous avons tenu compte dans notre modèle d'une conductivité hydraulique moyenne. Or **la conductivité hydraulique d'un matériau cimentaire varie au cours du temps en fonction de l'avancement des réactions d'hydratation.** Il est donc intéressant d'intégrer dans le modèle une conductivité hydraulique qui évolue au cours du temps.
- Enfin, **le terme source** pris en compte dans l'équation de Richards rend compte de l'état de fixation de l'eau dans les matériaux cimentaires. Au cours de cette étude, nous n'avons pu apporter une solution déterministe à chaque paramètre du terme source. **Une étude visant à mettre en place des essais d'identification précis est à réaliser.**

A moyen terme, je compte élargir mon activité vers de nouvelles applications de la rhéologie des matériaux cimentaires en étudiant par exemple les cas extrêmes des solutions diluées (type coulis de ciment) et des bétons très fermes. En d'autres termes :

Quelles expérimentations rhéologiques dans les procédés spécifiques du génie civil ?

Par exemple, je compte étudier les qualités mécaniques et physiques des bétons de parement en préfabrication industrielle. Plus précisément, Il s'agit d'obtenir, sur des produits préfabriqués conçus à l'aide de bétons très fermes démoulés en moins

d'une minute, un aspect de surface à la porosité la plus fine possible (échelle micrométrique au lieu du millimètre actuellement). L'imperméabilité accrue, résultat d'une porosité largement abaissée, induira automatiquement une meilleure résistance mécanique du béton ainsi qu'une barrière étanche aux attaques acides provenant de l'environnement agressif.

Sur cette thématique, à exception de l'essai au plastomètre développé à l'INSA de Rennes pour les mortiers et pâtes de ciment, il n'existe quasiment que peu de méthodes expérimentales pour évaluer les propriétés rhéologiques des bétons très fermes. D'où l'intérêt de développer un outil à même de discriminer des bétons très fermes de manière quantitative à l'aide de grandeurs rhéologiques. Il s'agit aussi de comprendre le mécanisme de migration de l'air occlus par le malaxage lors de la mise en œuvre vers les parements.

A plus long terme, par le biais de l'acquisition de matériels expérimentaux adaptés, de nouvelles voies seront ouvertes afin d'aborder les questions suivantes :

Quelle est l'échelle d'observation adaptée à la rhéologie des matériaux cimentaires ?

- Les matériaux cimentaires se distinguent par une distribution granulaire allant du nanomètre au centimètre. Il est légitime de s'interroger sur la fiabilité d'une démarche purement macroscopique. L'observation et la mesure des propriétés mécaniques à l'échelle nanométrique des matériaux cimentaires durcis fait partie déjà du présent grâce aux techniques de la nano indentation [84]. Les nombreux travaux publiés dans la littérature depuis cinq ans sur les bétons ont montré la pertinence de la démarche. Ceci a permis entre autres de construire des modèles de comportement sur la base des propriétés de chacune des phases élémentaires des hydrates formés. Sur la pâte de ciment fluide, l'échelle nanométrique n'est pas encore véritablement investiguée. Toutefois, avec l'émergence d'outils d'observation et de mesure tels que le rhéomètre utilisant la technologie IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) [85] ou encore la nouvelle génération de capteur MEMS (Micro Electro Mechanical System), de nouvelles perspectives s'ouvrent. La taille de ces capteurs (humidité, pression, thermique...) qui est de l'ordre du micron voir moins, en mesure

d'être immergés au cœur du matériau va nous permettre d'ausculter la matière à une échelle qui ne nous est pas accessible actuellement.

Quelle influence de la structuration au très jeune âge sur les propriétés à long terme ?

- C'est sans nul doute une des questions clé de mon activité à long terme. Elle est à l'interface de la rhéologie et de la durabilité. Y'a-t-il un lien de cause à effet entre la vitesse de structuration du matériau fluide et les propriétés physico mécaniques du matériau durci ?

L'aboutissement de ces perspectives représentera une part importante et essentielle de mes activités à court, moyen et long termes. L'activité de tous les membres de la thématique « rhéologie des matériaux cimentaire » du LG2M est d'ores et déjà structurée autour de la réalisation de ces objectifs.

En conclusion, l'ensemble des études présentées a été mené sans qu'il n'y ait d'antériorité au LG2M. A l'exception de l'impulsion de départ du Pr. Ph. Baudeau, qui m'a orienté sur une thématique riche en questions encore posées, il n'y avait pratiquement ni équipements ni locaux opérationnels de recherche. Dans un contexte de création des formations de la filière de Génie Civil en 1997, il a fallu mettre en place et construire en priorité pour nos étudiants une formation viable à long terme.

Sept ans après, l'axe de recherche Génie Civil du LG2M dont j'assume la responsabilité, dispose de plusieurs équipements de recherche dédiés à la rhéologie (colonne instrumentée, rhéomètre béton, filtration par perméamétrie et œdométrie). Depuis 2003, des réseaux collaborations ont été mises en place à l'échelon national avec le LCPC par notre participation au projet national OH51 et international avec le National Institute of Standards and Technologies (NIST, USA) sur la thématique rhéologie et malaxage des bétons. Sur le plan régional nous collaborons avec le Laboratoire de Rhéologie et des Matériaux de l'UBO (LRMS, Brest). Le positionnement de notre thématique de recherche autour de la physique et de la mécanique rend nécessaire des collaborations par ailleurs élargies vers d'autres champs disciplinaires que le strict domaine mécanique et génie civil. Enfin, Un transfert du savoir faire auprès des étudiants de l'IUP de Génie Civil de Lorient par l'encadrement de stages de Master Recherche et la codirection de thèses à contribué aux recherches présentées dans ce mémoire.

7 Références

- [1] H. Beitzel, "Efficiency of Concrete Mixers – Report on Assessment and Classification of Performance of Mixers," RILEM TC-150-ECM, 1998.

- [2] Y. Charonnat and H. Beitzel, "RILEM TC 150 ECM: Efficiency of Concrete Mixers - Report: Efficiency of Concrete Mixers Towards Qualification of Mixers," Mater. Struct. (Suppl. 196) 30, 28-32, 1997.

- [3] D. Chopin, "Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants : Optimisation du temps de fabrication," Collection Études et Recherches des LPC - série Ouvrages d'art - n° 41, Issn 1161-028X, juin 2003

- [4] F. de Larrard, B. Cazacliu, D. Chopin, E. Chateau, "Production of SCC," 3rd International Symposium on Self Compacting Concrete, 17-20 August 2003, Reykjavik, Iceland.

- [5] "Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete" ASTM C143 -97, Vol. 04.02

- [6] E. P. Koehler, D. W. Fowler, "Summary of Concrete Workability. Test Methods," ICAR Report 105.1, International Center for Aggregates Research, Austin, TX, August 2003.

- [7] R. J. Flatt, "Towards a Prediction of Superplasticized Concrete Rheology," Materials and Structures / Materiaux et Constructions, 37, 289-300, (2004).

- [8] C. Ferraris, L. Brower editors, "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at LCPC (Nantes, France) in October 2000", NISTIR 6819, September 2001.

- [9] C. Ferraris, L. Brower editors, "Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB (Cleveland OH, USA) in May 2003," National Institute of Standards and Technology NISTIR 7154, September 2004.

- [10] L. E. Brower, C. F. Ferraris, "Comparison of Concrete Rheometers," Concrete International, 25 (8), 41-47, (2003).

- [11] C. F. Ferraris and F. de Larrard, "Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology," NISTIR 6094, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, February 1998.

- [12] C. F. Ferraris, F. de Larrard, "Modified Slump Test to Measure Rheological Parameters of Fresh Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 20 #2, 241-247 Dec. 1998.

-
- [13] J. A. Daczko, "A Proposal for Measuring Rheology of Production Concrete," *Concrete International*, 22 (5), 47-49, (2000).
- [14] S. Amziane and C. F. Ferraris, à paraître, NISTIR 2005
- [15] S. Amziane, C. F. Ferraris, E. P. Koehler "Measurement of Rheological Properties of Fresh Concrete Using a Mixing Truck", accepted for publication to the NIST Journal of Research, January-February 2005.
- [16] E. P. Koehler, "Development of a Portable Rheometer for Portland Cement Concrete," MS Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, TX, 2004.
- [17] E. P. Koehler, D. W. Fowler, C. F. Ferraris, and S. Amziane, "A New Portable Rheometer for Fresh Self-Consolidating Concrete", Proc. of session ACI 2005 (New York)
- [18] R. Helmuth, L. Hills, D. Whitting, S. Bhattacharja, "Abnormal Concrete Performance in the Presence of Admixtures," *Portland Cement Association* # 2006, 1995.
- [19] H.A. Barnes, and Q.D. Nguyen, "Rotating Vane Rheometry - a Review," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 98, # 1, 2001, pp. 1-14.
- [20] A.W.Saak, H.M. Jennings, and S.P. Shah, "The Influence of Wall Slip on Yield Stress and Viscoelastic Measurements of Cement Paste", *Cement and Concrete Research*, 31(2), 205-212.
- [21] S. Amziane and C. F. Ferraris, "Monitoring of Setting Evolution of Cementitious Materials by Measurements of Rheological Properties and Hydraulic Pressure Variations" Submitted to *ACI Material Journal* in 2004.
- [22] W. R. Schowalter and G. Christensen, "Toward a Rationalization of the Slump Test of the Fresh Concrete: Comparison of Calculations and Experiments" *J. Rheol.*, 42 (4) 865-870, (1998)
- [23] D. Vié, M. Durot, D. Poineau, "Poussée du béton fluidifié", *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, (1998), 19-30.
- [24] J. Assaad and K. H. Khayat, "Variations of Lateral and Pore Water Pressure of Self-Consolidating Concrete at Early Age", *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 4, PP 310-317, July 2004.

-
- [25] J. Assaad, K. H. Khayat, and H. Mesbah, "Variation of Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 100, No. 1, January-February 2003.
- [26] Y. Vanhove, *Contribution à l'étude du frottement d'un béton auto-plaçant contre une surface métallique – Application aux poussées contre les coffrages*. Thèse de Doctorat à l'Université d'Artois, décembre 2001.
- [27] G. Ovarlez, N. Roussel. A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on a formwork. Article accepté par RILEM Materials and structures.
- [28] J. Nasvik, "Formwork for Self-Consolidating Concrete", *Concrete Construction*, October 2004
- [29] D. Fedroff, R.J. Frosch, "Formwork for Self-Consolidating Concrete", *Concrete International*, Vol. 26 #10, pp. 32-37, 2004
- [30] P. Billberg, "Form pressure generated by self-compacting concrete," 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete", pp. 271-280, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.
- [31] A. Leemann, C. Hoffmann, "Pressure of self compacting concrete on the formwork", 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete", pp. 288-295, Reykjavik, Iceland, 17-20 August 2003.
- [32] NOE, 'Pression du béton pour murs et poteaux élevés', Document technique du fabricant de coffrage NOE, (1990), 1-13.
- [33] Norme française NFP 93-350, 'Banches industrialisées pour ouvrages en béton', juin (1995).
- [34] DIN 18218, 'Frishbeton auf lautrechte', (pressure of concrete on vertical formwork), (only available in german) (Berlin), (1980).
- [35] Clear, C. A., Harison, T. A., 'Concrete pressure on formwork', CIRIA-report 108 (London), (1985).
- [36] Gardner, N. J., 'Pressure of concrete on formwork – a review', American concrete institute, Title N°. 82-69, september – october (1985), 744-753.

-
- [37] L. Nachbaur, L. D'aloia, R. Le Roy, "Influence of formwork removal and concrete workability on cladding hue", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 240, September-October 2002, ref 4399, pp 27-42.
- [38] P. N. Okoh, L. Ouldhammou, Ph. Baudeau, *The evolution of fresh concrete pressure on formwork walls*, International Conference on Rheology of Fresh Cement and Concrete, University of Liverpool, 26-29th March, 1990.
- [39] S. Amziane, Ph. Baudeau, Influence de la concentration et de la dimension des granulats vis-à-vis de la poussée du béton frais sur une paroi coffrante, **Materials and structures**, vol. 33, No 1, pp. 50-58, janvier-fevrier 2000
- [40] N. Andriamanantsilavo, Comportement des Matériaux Cimentaires dans un Coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la pousée et du processus de maturation, Thesis of University of South Britany, in French, <http://web.univ-ubs.fr/lg2m/labadmin/THESES/>, Lorient, France, December, 2003
- [41] Ph. Baudeau, *Contribution à l'étude du comportement rhéologique du béton contenu dans des parois coffrantes de grande hauteur avant prise du ciment*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur de Strasbourg, p.189, 1983.
- [42] J. C. Tchamba, Contribution à l'étude de la rhéologie des matériaux cimentaires, Thèse en cours de l'Université de Bretagne Sud.
- [43] M. Barrioulet, C. Legrand, "L'effet de masse des granulats dans l'écoulement du béton frais vibré", Material and Structures, V. 20, N°. 117, (1987), 196-201.
- [44] M. Barrioulet, C. Legrand, "Mise en évidence expérimentale des interactions entre pâte interstitielle et granulats dans l'écoulement du béton frais vibré", Materials and Structures, V. 19, N°. 112, (1986), 273-277.
- [45] C. Hu, "Rhéologie des bétons fluides", Etude et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Série ouvrages d'art OA16, septembre (1995), 6-202.
- [46] D. W.Hobbs, "Influence of aggregate volume concentration upon the workability of concrete and some predictions from the viscosity-elasticity analogy", Magazine of Concrete Research (London), Vol. 28, 97, décembre (1976), 191-202.
- [47] R. L'Hermite, 'Expérience et théorie sur la technologie du béton', Revue Béton 189, N°374, juillet – août (1979).
- [48] N.R. Andriamanantsilavo, S. Amziane, Ph. Baudeau, Rhéologie, Volume 3, 12-21, (2003)

-
- [49] S. Amziane, N.R. Andriamanantsilavo, Ph. Baudeau, 15th Engineering Mechanics Division Conference of ASCE, Columbia University, New York, 8pp, (2002)
- [50] N. Andriamanantsilavo, S. Amziane, "Maturation of Fresh Cement Paste Within 1 to 10 m Large Formworks", *Cement and Concrete Research*, V 34/11 pp. 2141-2152, 2004.
- [51] P. Lura, O.M. Jensen, K. van Breugel, *Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: an evaluation of basic mechanisms*, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, N° 2, pp. 223-232, 2003.
- [52] L. Josserand, Ressuage des bétons hydrauliques, Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Octobre, 2002.
- [53] P., Mounanga, Etude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retraits, propriétés thermophysiques, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, Décembre, 2003.
- [54] J. Assaad, K. H. Khayat, and H. Mesbah, "Assessment of Thixotropy of Flowable and Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 100, No. 2, March-April, 2003.
- [55] J. Assaad, K. H. Khayat, and H. Mesbah, "Variation of Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Consolidating Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 100, No. 1, January-February, 2003.
- [56] F. McKenna, "Hardness of Plasters and Cements, and a Simple Chronographic Apparatus for Recording Set", *The Journal of Industrial and Engineering Chemistry*", V 70, n° 146, feb., 1912, pp. 110-114.
- [57] "ASTM Annual Book of Standards", ASTM 191-99, V. 04.01, Cement; Lime, Gypsum, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999
- [58] PR NF EN ISO 9597, "Méthode d'essai des ciments – Détermination du temps de prise et de la stabilité", P15-473PR et NF EN 193-3, Ciment et Chaux, Afnor Ed., ISBN 2-12-132911-0, 2003
- [59] A. Damasceni, L. Dei, E. Fratini, F. Ridi, S. H. Chen, and P., Baglioni, "A Novel Approach Based on Differential Scanning Calorimetry Applied to the Study of Tricalcium Silicate Hydration Kinetics", *J. Phys. Chem. B* 2002, 106, 11572-11578

-
- [60] J. Carlsson, M. Nilsson, E. Fernandez, J. A. Planell, "An ultrasonic pulse-echo technique for monitoring the setting of CaSO₄-based bone cement", *Biomaterials*, V. 24, (2003), pp 71–77
- [61] A. Boumiz, C. Vernet, F. C., Tenoudji, "Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages", *Advanced Cement Based Materials*, 3(3/4), 1996, 94-106.
- [62] W. J. McCarter, and P. N. Curran, "The Electrical Response Characteristics of Setting Cement Paste", *Magazine of Concrete Research*, (1984), V. 36, No. 126, 42.
- [63] S. G. Boivin, "Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène", Thèse de doctorat à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, p. 251, 1999.
- [64] Z. Toutou, N. Roussel and C. Lanos, "The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material's rheological behaviour and evaluate their extrusion ability", *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 10, October 2005, Pages 1891-1899
- [65] N. Roussel, C. Lanos and Y. Mélinge, "Induced heterogeneity in saturated flowing granular media", *Powder Technology*, Volume 138, Issue 1, 30 November 2003, Pages 68-72
- [66] W. R. Gardner, *Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data*, Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 20, pp. 317-320, 1956.
- [67] M. Rey, *Nouvelle méthode de mesure de l'hydratation des liants hydrauliques*, Publication Technique du CERILH, N°31, 1950.
- [68] E. Fourdrin, C. Guigou, J. Chappuis, Early age shrinkage of mortars : conception of a new device and detailed analysis of a typical experimental curve; International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, 2000
- [69] S. Amziane, N. Andriamanantsilavo, Prediction of cement paste pore water pressure variations during setting period, *Advances in Cement Research*, Thomas Telford ed., Jan 2004, V16, n°1.
- [70] G. Cailletaud, P. Pilvin, *Inverse Problems in Engineering Mechanics*, Bui, Tanak et al., Balkema, Rotterdam, ISBN 9054105178, pp. 79-86, 1994.
- [71] Adam M. Neville, *Propriétés des bétons*, Ed. Eyrolles, 1992, p. 805.

-
- [72] O.J. Uzomaka, Some fundamental Engineering Properties of Plastic Concrete, PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1969.
- [73] S. Amziane and C. F. Ferraris, "Monitoring of Setting Evolution of Cementitious Materials by Measurements of Rheological Properties and Hydraulic Pressure Variations", Submitted to ACI MATERIAL JOURNAL, 2005
- [74] V. A. Hackley, C.F. Ferraris, "The Use of Nomenclature in Dispersion Science and Technology" NIST Recommended Practice Guide, SP 960-3, 2001.
- [75] G. Schramm, A practical approach to rheology and rheometry , Haake, Karlsruhe, Germany, 1994.
- [76] D. Lootens, P. Hebraud, E. Lecolier and H. Van Damne, "Gelation, Shear-Thinning and Shear-Thickening in Cement Slurries", Oil and Gaz, Science and Technologie – Rev. IFP, Vol. 59, N.1, pp. 31-40, 2004.
- [77] C. Ancey and C.R. Coussot, "Transition from frictional to viscous regime for granular suspensions" C.R. Acad. Sci. Paris, t. 327, Serie ii b, pp. 515-522, 1999.
- [78] H. A. Janssen, *Tests in grain pressure silos*, Z. Vereins Deutsch Ing., Vol. 29, p.1045, 1895.
- [79] Ovarlez G., Fond C., Clément E., Overshoot effect in Janssen granular column : A crucial test for granular mechanics, Phys. Rev. E67, 060302 (R).
- [80] Ovarlez G., Clément E., Elastic medium confined in a column versus the Janssen experiment, Eur. Phy. J. E, (in press).
- [81] Ovarlez G., Roussel N., A physical model for the prediction of the lateral stress exerted by SCC on a formwork, submitted to RILEM Materials and Structures Journal, 2005
- [82] S. Mansoutre, Des suspensions concentrées aux milieux granulaires lubrifiés, études des pâtes de silicate tricalcique. Thèse de Doctorat à l'Université d'Orléans, janvier 2000.
- [83] F. Rosquoët, A. Alexis, A. Khelidj, A. Phelipot, *Experimental study of cement grout : rheological behavior and sedimentation*, Cement and Concrete Research, Vol. 33, Issue 5, pp. 729-732, 2003.

-
- [84] G. Constantinides and F.-J. Ulm, The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling, *Cement and Concrete Research*, Volume 34, Issue 1, January 2004, Pages 67-80
- [85] S. Jarny, N. Roussel, S. Rodts, F. Bertrand, R. Le Roy and P. Coussot, Rheological behavior of cement pastes from MRI velocimetry, *Cement and Concrete Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 27 July 2005

Liste des figures

Figure 1 : Vue du camion malaxeur, indicateur du slump (en bas à gauche) et intérieur de la bétonnière (en haut à droite)

Figure 2 : Vue du rhéomètre ICAR

Figure 3 : Géométrie «vane».

Figure 4 : Dimensions du rhéomètre

Figure 5 : Caractéristiques géométriques de la bétonnière du camion-malaxeur utilisé

Figure 6 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du camion sur la gâchée C10-C14

Figure 7 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du camion sur la gâchée C20-C23

Figure 8 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre sur la gâchée C10-C14

Figure 9 : Courbes d'écoulement obtenues à l'aide du rhéomètre sur la gâchée C20-C23

Figure 10 : Comparaison des viscosités obtenues suivant le mélange et le dispositif de mesure

Figure 11 : Corrélation des viscosités données par le rhéomètre et le camion malaxeur

Figure 12 : Comportement du béton soumis à un cisaillement à vitesse constante

Figure 13 : Comparaison des seuils de cisaillement obtenus suivant le mélange et le dispositif de mesure

Figure 14 : Corrélation des seuils de cisaillement donnés par le rhéomètre et le camion malaxeur

Figure 15: Dimensions du coffrage et emplacement des capteurs de force

Figure 16: Vue de face du coffrage et des capteurs de force

Figure 17: Vue de profil du coffrage

Figure 18 : Caractéristiques géométriques de la paroi coffrante

Figure 19 : Vue du capteur de pression totale

Figure 20 : Synoptique de fonctionnement du capteur de pression

Figure 21 : Vue du capteur de pression interstitielle

Figure 22 : Synoptique de fonctionnement du capteur de pression

Figure 23 : Vue du coffrage in-situ

Figure 24 : adaptation du capteur de pression interstitielle en pied de coffrage

Figure 25 : Profil de pression latérale suivant le type de mélange

Figure 26 : Comparatif entre la pression mesurée et la pression hydrostatique

Figure 27 : Influence de la phase granulaire sur la poussée du béton frais

Figure 28 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise en fonction de la teneur en eau

Figure 29 : Comparatif de l'évolution des pressions interstitielle et totale

Figure 30 : Pressions comparées d'un filler calcaire et d'une pâte de ciment

Figure 31 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise d'un béton normale en fonction de la hauteur de béton mise en oeuvre

Figure 32 : Evolution de la pression interstitielle pendant la prise d'un béton auto-plaçant en fonction de la hauteur de béton mise en oeuvre

Figure 33 : Evolution de la pression interstitielle relative pendant la prise d'un béton normale et de la pâte de ciment équivalente

Figure 34 : Evolution de la pression interstitielle relative pendant la prise d'un béton auto-plaçant et de la pâte de ciment équivalente

Figure 35 : Profil de pression sur la colonne des pâtes de ciment

Figure 36 : Profil de pression sur la colonne du BAP

Figure 37: Evolution de la pression interstitielle lors de l'essai in-situ

Figure 38 : Dispositif expérimental de filtration pour la détermination de la conductivité hydraulique

Figure 39 : Etat de l'échantillon pendant le test

Figure 40 : Dispositif de mesure du retrait endogène par pesée hydrostatique

Figure 41 : Colonne de pression

Figure 42 : Rhéomètre plan-plan

Figure 43 : Dispositif anti- évaporation

Figure 44 : Rhéomètre béton

Figure 45 : Design du futur rhéomètre

Figure 46 : Eléments du rhéomètre

Figure 47 : Rhéomètre dans sa version définitive

Figure 48 : Evolution du retrait endogène au jeune âge

Figure 49 : Evolution cumulée du volume d'eau essorée pendant un test de perméabilité

Figure 50 : Evolution de la conductivité hydraulique et du tassement de la pâte de ciment pendant la prise

Figure 51 : Evolutions relatives de la conductivité hydraulique et du retrait endogène simultanément à la chute de pression interstitielle pendant la prise d'une pâte de ciment

Figure 52 : Courbes de drainage mesurées et calculées pour une pâte de ciment

Figure 53 : Courbes de drainage mesurées et calculées pour une BN et un BAP

Figure 54 : Influence de l'incrément de pression ΔP sur les courbes de drainage mesurées et calculées

Figure 55 : Influence du temps d'optimisation $t_{\text{optimisation}}$ sur les courbes de drainage mesurées et calculées

Figure 56 : Influence de la teneur en eau sur la conductivité hydraulique d'une pâte de ciment

Figure 57 : Représentation schématique de la pâte de ciment à l'état frais (Gagné 1993 [30])

Figure 58 : Résistance au cisaillement de la pâte de ciment en fonction du temps de prise (stress growth test)

Figure 59 : Accroissement de la résistance maximale au cisaillement pendant la prise suivant la teneur en eau de la pâte de ciment

Figure 60 : Evolutions relatives de la pression interstitielle, de la contrainte seuil et de l'enfoncement Vicat de la pâte de ciment P_{36}

Figure 61 : Evolutions relatives de la pression interstitielle, de la contrainte seuil et de l'enfoncement Vicat de la pâte de ciment P_{45}

Figure 62 : *Comparatif des temps caractéristiques des différentes méthodes*

Figure 63 : Evolution des courbes d'écoulement de la pâte P_{36} entre 15min et 140 min.

Figure 64 : Evolution des courbes d'écoulement de la pâte P_{36} entre 105min et 400 min.

Figure 65 : Evolution de la viscosité plastique pendant la prise en fonction du temps.

Figure 66 : Evolution de la viscosité plastique pendant la prise en fonction du taux de cisaillement induit.

Figure 67 : Evolution de la viscosité non Newtonienne pendant la prise en fonction du taux de cisaillement induit.

Figure 68 : Evolutions simultanées du couple et de la pression d'une **pâte de ciment** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

Figure 69 : Evolutions simultanées du couple et de la pression d'un **sable saturé compacté** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

Figure 70 : Evolutions simultanées du couple et de la pression interstitielle d'un **mortier de ciment** lors d'un essai de cisaillement à vitesse constante égale à 0.3 tpm

Figure 71 : Comparaison de l'évolution de la pression interstitielle observée pour la pâte de ciment, le sable et le mortier

Figure 72 : Représentation simplifiée du coffrage.

Figure 73 : Maillage "différences finies"

- Figure 74 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆. (simulation avec $D=0,3784.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
- Figure 75 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆.(expérimentation)
- Figure 76 : Représentation d'une Gaussienne.
- Figure 77 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆. (simulation avec $D=0,3784.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
- Figure 78 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆.(expérimentation) à 1 m
- Figure 79 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆. (simulation avec $D=0,3784.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)
- Figure 80 : Evolution du profil de pression interstitielle pour le mélange P₃₆.(expérimentation) à 5 m
- Figure 81 : Cinétique du terme source pour 10 m de hauteur de pâte de ciment.
- Figure 82 : comparaison des courbes simulées / expérimentales de la pression interstitielle pour les pâtes de ciment
- Figure 83 : Cinétique du terme source pour 1 m de hauteur de béton.
- Figure 84 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 1m.
- Figure 85 : Cinétique du terme source pour 5 m de hauteur de béton
- Figure 86 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 5m.
- Figure 87 : Cinétique du terme source pour 10 m de hauteur de matériau
- Figure 88 : Comparaison des courbes simulées/expérimentales de la pression interstitielle pour les bétons à 10 m

Résumé

Ce rapport est une synthèse de mon activité de recherche post-thèse au LG2M à Lorient. Les recherches exposées se situent dans le domaine de la rhéologie des matériaux cimentaires en phase plastique.

Le malaxage en camion bétonnière, la pression sur les coffrages, l'étude de la structuration du matériau et enfin une modélisation théorique du comportement expérimental constituent l'ossature des travaux de recherche exposés dans ce rapport.

Les méthodes expérimentales employées ont permis d'investiguer l'évolution de la rhéologie et de la maturation des matériaux cimentaires à travers l'observation de l'état de l'eau dans la matière. L'étude de l'évolution de la pression interstitielle et de la pression totale exercées par une colonne de matériau sur un coffrage, couplée à des expériences de rhéologie, de retrait endogène et de conductivité hydraulique nous a permis de tirer plusieurs enseignements :

- Il est possible de mesurer correctement à l'aide d'une bétonnière portée (camion toupie) les caractéristiques rhéologiques d'un béton, en appliquant les principes de la rhéométrie rotative.
- Après malaxage et mise en œuvre dans un coffrage, la pression interstitielle et la pression totale des bétons sont égales jusqu'à annulation de la pression totale. Les contraintes effectives sont nulles sur cette phase. Une dépression interstitielle est ensuite observée. L'annulation de la pression interstitielle se produit à rupture des ponts capillaires.
- Le processus physico-chimique d'hydratation du ciment est à l'origine de la chute de pression interstitielle y compris en zone dépressionnaire. La formation des produits d'hydratation induit ensuite l'annulation de la pression interstitielle.
- Dans le cas des bétons, l'augmentation de la concentration granulaire induit une baisse de la pression maximale initiale, comparée à la pression hydrostatique, d'un fluide de masse volumique équivalente. C'est le résultat de la mobilisation des frottements aux parois des coffrages.
- Le comportement des bétons en termes de cinétique de pression interstitielle est calqué sur celui des pâtes de ciment équivalentes tant que la pression totale est positive. Une influence granulaire sur la zone dépressionnaire due à la reprise d'une partie des contraintes par les granulats est en outre enregistrée.
- La chute de pression interstitielle induit un accroissement de la contrainte seuil de cisaillement et du retrait, ainsi qu'une réduction de la conductivité hydraulique.
- L'analyse des variations instantanées de pression interstitielle consécutives à un cisaillement à taux de déformation constante montre un comportement opposé suivant que le milieu est granulaire (sable dense saturé par exemple) ou analogue à un fluide visqueux (pâte de ciment par exemple). La dilatance induit une chute de pression interstitielle (cas des milieux granulaires). A l'opposé, un accroissement de pression interstitielle est observé lors du cisaillement de la pâte de ciment.
- La modélisation de la variation de la pression interstitielle en phase plastique fondée sur l'adaptation et l'intégration d'une équation d'état de l'eau dans le matériau, a montré la prépondérance d'un terme source qui rend compte du changement de l'état de l'eau lors de la phase d'hydratation du ciment. Ce terme est identifié à une gaussienne dont les paramètres sont déterminés par analyse inverse. Les résultats de la simulation sont majoritairement très proches de ceux de l'expérimentation.

Finalement, l'ensemble des résultats obtenus montre qu'à l'aide du seul capteur de pression interstitielle, il est possible de détecter précisément la structuration des matériaux cimentaires. A ce titre, une des applications possibles concerne la détermination d'une valeur discrète du temps de prise.

Une conclusion incluant mon projet de recherches est enfin présentée.