



**HAL**  
open science

## Regulation of concrete production

Ngoc Dong Lê

► **To cite this version:**

Ngoc Dong Lê. Regulation of concrete production. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2007. English. NNT: . pastel-00003421

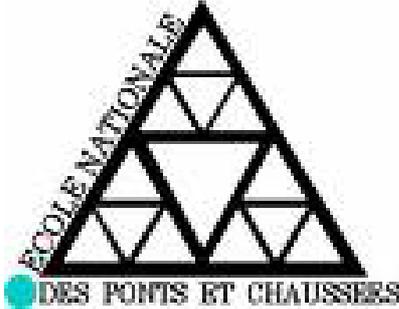
**HAL Id: pastel-00003421**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00003421v1>**

Submitted on 22 Feb 2008

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

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



# **THESE**

présentée par

Ngoc-Dong LE

pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE  
DES PONTS ET CHAUSSEES**

Spécialité: STRUCTURES ET MATERIAUX

**AMELIORATION DE LA REGULARITE  
DU BETON EN PRODUCTION**

Date de soutenance: 29 mai 2007

Composition du jury: Messieurs,

Jack LEGRAND	Président
Kamal Henri KHAYAT	Rapporteur
Gilles ESCADEILLAS	Rapporteur
François de LARRARD	Directeur de thèse
Bogdan CAZACLIU	Conseiller d'étude
Thierry SEDRAN	Conseiller d'étude
Cyrille CATHERINE	Invité
Eric BRUNQUET	Invité

---

# Sommaire

<b>RESUME</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>8</b>
<b>PARTIE I ETAT DE L'ART ET OBJECTIFS DE LA THESE</b> .....	<b>10</b>
<b>I.1. Propriétés d'usage et formulation du béton</b> .....	<b>11</b>
I.1.1 Propriétés d'usage du béton.....	11
I.1.2 Formulation et propriétés d'usage du béton .....	19
<b>I.2. Fabrication du béton dans les centrales BPE [37] [38]</b> .....	<b>29</b>
I.2.1 Stockage .....	29
I.2.2 Dosage.....	30
I.2.3 Malaxage .....	33
<b>I.3. Influence des paramètres de production industrielle du béton sur sa qualité</b> .....	<b>37</b>
I.3.1 Impact du dosage et du stockage .....	37
I.3.2 Impact du malaxage.....	46
<b>I.4. Moyens de contrôle de la régularité de qualité du béton</b> .....	<b>52</b>
I.4.1 Réglementation normative.....	52
I.4.2 Enregistrement des paramètres de fabrication .....	53
I.4.3 Contrôle de la teneur en eau du granulat .....	55
I.4.4 Contrôle de l'humidité du béton frais dans le malaxeur .....	58
I.4.5 Contrôle de consistance effectuée sur la gâchée courante.....	59
<b>I.5. Besoins en recherche et objectifs de la thèse</b> .....	<b>62</b>
<b>PARTIE II CONTROLE DU DOSAGE EN EAU DANS LES CENTRALES A BETON</b> .....	<b>64</b>
<b>II.1. Contexte général</b> .....	<b>64</b>
<b>II.2. Description et statistique de production de la centrale analysée (centrale d'Argentan)</b> .....	<b>65</b>
II.2.1 Description des matériels de production .....	65
II.2.2 Acquisition des données de production .....	67
II.2.3 Assurance de la qualité du béton .....	67
II.2.4 Statistique de la production .....	70
II.2.5 Dispersion des écarts de dosage des constituants .....	74
<b>II.3. Calibrage des mesures dans le malaxeur</b> .....	<b>76</b>
II.3.1 Mesure du dosage en eau réel dans le malaxeur.....	77
II.3.2 Calibrage du Wattmètre.....	87
II.3.3 Mesure de consistance.....	92
II.3.4 Conclusions .....	95
II.3.5 Proposition de protocole applicable industriellement.....	95
<b>II.4. Amélioration en ligne de la régularité du dosage en eau</b> .....	<b>96</b>

II.4.1	Analyse de la variation en eau apportée par les granulats à l'échelle d'une toupie.....	96
II.4.2	Information automatisée sur les écarts de dosage en eau .....	99
II.4.3	Conclusions .....	101
<b>II.5.</b>	<b>Méthode de calibrage des mesures d'hygrométrie des granulats .....</b>	<b>102</b>
II.5.1	Calibrage des mesures d'hygrométrie par régression multiple linéaire.....	103
II.5.2	Validation « virtuelle » de l'algorithme .....	115
II.5.3	Calibrage des humidités « paramètre par paramètre ».....	119
<b>II.6.</b>	<b>Conclusion du chapitre .....</b>	<b>127</b>
 <b>PARTIE III SUIVI DE L'OUVRABILITE EN LIGNE DU BETON FRAIS .....</b>		<b>129</b>
<b>III.1.</b>	<b>Contexte général.....</b>	<b>130</b>
<b>III.2.</b>	<b>Modèle de puissance consommée du malaxeur.....</b>	<b>130</b>
<b>III.3.</b>	<b>Etude préliminaire sur un malaxeur du laboratoire.....</b>	<b>135</b>
III.3.1	Objectifs .....	135
III.3.2	Description des matériels.....	136
III.3.3	Réalisation du plan d'expérience.....	139
III.3.4	Analyses des résultats .....	144
III.3.5	Discussion.....	148
<b>III.4.</b>	<b>Etude complémentaire sur le malaxeur de laboratoire modifié.....</b>	<b>150</b>
III.4.1	Objectifs .....	150
III.4.2	Matériels et protocoles.....	150
III.4.3	Formules de bétons.....	154
III.4.4	Dépouillement à l'aide du couple de malaxage.....	155
III.4.5	Analyse des résultats .....	156
III.4.6	Discussion.....	163
<b>III.5.</b>	<b>Validation sur le malaxeur à l'échelle industrielle .....</b>	<b>164</b>
III.5.1	Introduction .....	164
III.5.2	Matériels et protocoles d'expérience .....	164
III.5.3	Expérimentations .....	170
III.5.4	Analyse des résultats .....	173
III.5.5	Discussion.....	177
III.5.6	Proposition de calibrage d'un malaxeur équipé d'un wattmètre différentiel.....	180
<b>III.6.</b>	<b>Faisabilité de la procédure de mesure sur une centrale BPE .....</b>	<b>181</b>
III.6.1	Objectif.....	181
III.6.2	Matériels et protocoles.....	181
III.6.3	Analyse des résultats .....	184
III.6.4	Discussion.....	187
<b>III.7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>188</b>
 <b>PARTIE IV CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>191</b>
<b>IV.1.</b>	<b>Apports de la thèse .....</b>	<b>192</b>
IV.1.1	Régulation du dosage en eau .....	192
IV.1.2	Amélioration du contrôle d'ouvrabilité .....	193
<b>IV.2.</b>	<b>Besoin en recherche.....</b>	<b>194</b>
IV.2.1	Validation supplémentaire des hypothèses et des résultats de la thèse.....	194
IV.2.2	Vers une régulation globale de la fabrication des bétons.....	197

---

<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>198</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>204</b>

---

## Résumé

Les fournisseurs de bétons doivent assurer la qualité de leurs produits. Ceci requiert, en premier lieu, une maîtrise de la composition du béton fabriqué. Cependant, les variations d'humidité des granulats rendent difficile le dosage précis des constituants. Le travail présenté dans ce mémoire vise à proposer des méthodes pour améliorer la régularité du dosage en eau, et pour suivre en continu l'ouvrabilité des bétons fabriqués industriellement.

Dans un premier temps, un protocole original de calibrage du wattmètre en tant que outil de mesure en ligne de l'humidité du béton frais a été proposé et évalué. Les mesures de dosage en eau calibrées sont utilisées dans un deuxième temps, pour la mise au point de plusieurs algorithmes. Le premier type d'algorithme se traduit par une correction de l'écart d'eau dans la bétonnière portée, alors que le deuxième permet le calibrage des sondes hydrométriques des granulats. Les méthodes présentées sont validés sur des données acquises en centrale industrielle.

Le suivi de l'ouvrabilité fait appel à la construction d'un modèle de puissance consommée par le malaxeur, reliant les caractéristiques rhéologiques du béton à la puissance totale dépensée. La détermination de l'ouvrabilité du béton par cette méthode nécessite l'utilisation d'un variateur de vitesse du malaxeur. La validation expérimentale sur des malaxeurs à différentes échelles permet de montrer qu'il est possible d'estimer convenablement le seuil de cisaillement et l'affaissement au cône d'Abrams du béton en cours de malaxage, sans connaissance préalable de sa composition.

Mots clés : affaissement, algorithme, béton, béton-prêt-à-l'emploi, calibration, consistance, production, rhéologie, sonde, teneur en eau, variateur

---

## Abstract

Concrete producers must guarantee the quality of their products, which induces a suitable control of the composition of the concrete produced. However, changes in the aggregate water content make the precise dosage of the various constituents difficult. The aim of this work is then to propose methods for the improvement of water dosage consistency, and for the on-line monitoring of workability, in the context of industrial concrete production.

An original procedure is first proposed to calibrate the watt-meter, seen as a probe to assess the fresh concrete water content. Then, from these calibrated measurements various algorithms are developed. With the first category, it is possible to correct the difference in water dosage from a batch to another one in the same truck. The second category deals with a semi-automatic calibration of aggregate water probes. These methods are validated from data acquired in industrial ready-mix concrete plants.

To monitor the concrete workability, a power model is developed, linking the concrete rheological parameters and the total power spent by the mixer. This process, which requires the possibility to change the mixer speed, was validated with mixers of several sizes (from laboratory to industrial, scale-1 mixers). Finally it is now possible to assess the yield stress and the slump of the concrete currently mixed, without prior knowledge of its composition.

Keywords: algorithm, calibration, concrete, probe, production, ready-mix concrete, rheology, slump, variator, water content, workability

---

## Remerciements

Les travaux présentés dans ce memoire ont été préparés au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes. Nombreux sont ceux que je voudrais remercier pour m'avoir aidé durant ces trois années de thèse.

Je tiens à exprimer en premier toute ma reconnaissance à Monsieur Francois de Larrard pour avoir accepté d'être directeur de ma thèse et pour l'aide considérable qu'il m'a apportée afin de réaliser ce travail de recherche.

J'exprime mes sincères remerciements à Messieurs Bogdan Cazacliu et Thierry Sedran pour la qualité de leur encadrement, pour les discussions scientifiques et les conseils utiles, qui m'ont permis de m'affranchir efficacement des difficultés apparues pendant ma thèse. Je remercie tout particulièrement Monsieur Thierry Sedran pour ses conseils linguistiques.

Mes remerciements s'adressent ensuite à messieurs:

- Kamal Henri Khayat, professeur à l'université de Sherbrooke et Gilles Escadeillas, professeur des Universités à l'INSA de Toulouse, qui ont bien voulu consacrer du temps pour rapporter sur le manuscrit de la thèse;
- Jack Legrand, professeur à l'université de Nantes, qui m'a fait l'honneur d'exercer les fonctions de président du jury ;
- Eric Brunquet et Cyrille Catherine qui ont suivi mon travail au cours des trois années de thèse et qui m'ont aidé à préparer et organiser avec succès les campagnes d'essai à l'échelle industrielle.

Je n'oublie pas les co-financeurs de ma thèse, sans lesquels ce travail n'aurait pu se faire. Ma reconnaissance s'adresse donc à mes collègues des deux entreprises Couvrot et PointP: Olivier Richard, directeur de la société Couvrot ; Samuel Masson, responsable des automatisme de la société Couvrot ; Jean Pierre Vallée, directeur de la société Point P ; Patrick Charon, responsable de qualité à la société Point P.

Je remercie l'ensemble de mes collègues du LCPC/TGCE pour les moments d'amitié partagés au laboratoire, par lesquels j'ai pu apprécier les aspects les plus agréables de la vie à l'étranger. Je remercie également Caroline, Raphael, Shainaz, Eddy et mes amis vietnamiens Trong Dong, Hung Coc, Gia BK, Vu Quebec, Minh Beo, Thien Hai pour l'aide amicale qu'ils m'ont apportée durant la thèse.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, ma soeur Dao, mon frère Dang et mon amie Thoa pour leur soutien constant et leur patience, même s'ils n'étaient pas à mes côtés pendant mes études en France. C'est aussi à eux que je dois en grande partie l'accomplissement de ce travail, par l'espoir et la confiance qu'ils ont toujours su me donner. Qu'ils trouvent ici un geste modeste de reconnaissance et de gratitude.

---

## Introduction

Le matériau béton a connu plus d'un siècle de développement et d'emploi. Du béton traditionnel à quatre constituants (ciment, eau, sable et gravillon), on en est venu à formuler des bétons complexes dont les constituants sont aujourd'hui de taille et de nature très variables, grâce aux progrès dans la formulation. Depuis les années 80, on note l'apparition de nouveaux bétons, destinés à satisfaire des besoins divers: le bétonnage sans vibration (avec les bétons autoplaçants, voire les bétons autonivelants); de hautes résistances en compression (bétons à hautes ou très hautes performances), en traction (bétons de fibres métalliques et bétons fibrés ultra-performants)... Rien ne permet de prédire la fin de cette liste, car des bétons de caractères particuliers font toujours l'objet de recherches.

L'évolution des bétons a été notamment permise par des progrès considérables dans l'industrie des constituants. L'utilisation des adjuvants, des additions minérales, des ciments de qualité contrôlée... permet d'optimiser la composition du béton, et de résoudre les problèmes de conflits au niveau de ses propriétés: consistance et résistance mécanique, résistance au jeune âge et diminution du retrait, durabilité et résistance au feu etc. Cependant, de nombreuses recherches ont montré que, pour de tels mélanges, une variation, même faible, dans la composition peut engendrer des variations importantes des performances prévues. C'est pourquoi fabriquer ces formules est en général plus difficile que pour les bétons ordinaires.

Le développement du marché du béton ainsi que les exigences de qualité des normes ont poussé le développement de l'industrie du béton prêt à l'emploi (BPE). La qualité de la fabrication du béton dans les centrales de BPE est contrôlée en grande partie par la précision des matériels de dosage et de contrôle. Les centrales modernes sont équipées de matériels de plus en plus performants: informatisation du pilotage, automatisation du procédé de fabrication, sondes automatiques de teneur en eau des granulats, surveillance en continu de l'évolution du béton frais dans le malaxeur par wattmètre différentiel... tous ces moyens permettent de fabriquer avec succès les bétons de nouvelle génération.

Cependant, le problème de régularité de la qualité du béton reste posé, que ce soit pour les bétons ordinaires ou pour les nouveaux bétons. La cause la plus importante de variation des propriétés d'un béton en production est sans doute la présence d'eau dans les granulats, variable du fait du stockage généralement en extérieur de ces matériaux. Plus généralement, l'ensemble des constituants minéraux, assis sur une ressource naturelle, est affectée par l'hétérogénéité des gisements exploités. Même les constituants organiques peuvent de temps en temps accuser des variations de propriétés. Le fait qu'une formule théorique puisse être différente de son homologue dans l'ouvrage, par l'occurrence de divers incidents depuis l'amont vers l'aval de la chaîne de production, est un risque permanent pour les performances finales d'un ouvrage. Dans cette chaîne, la production en centrale est une étape-clef qui doit assurer au mieux la régulation de la qualité du béton produit. Des efforts considérables ont été effectués lors des dernières années pour améliorer la maîtrise de la qualité à la fabrication. Des travaux de recherches tels que ceux menés dans les projets nationaux Calibé, BAP, BHP 2000... ont mis en lumière les facteurs essentiels conditionnant la qualité de la fabrication des bétons. On cherche cependant encore des solutions technologiques, aussi rigoureuses au niveau scientifique qu'efficaces au regard d'applications pratiques.

---

Ce contexte nous conduit à mener notre sujet de recherche dans l'objectif d'obtenir des nouveaux outils de contrôle et de contribuer à l'amélioration de la qualité du béton en phase de production. On s'intéressera en particulier à l'atténuation des variations du dosage en eau des bétons, et de sa conséquence la plus immédiatement détectable : son ouvrabilité.

Dans une première partie, on dressera un état de l'art du matériau béton, de ses propriétés d'usage les plus importantes, et des difficultés liées à sa production, ce qui nous permettra de préciser nos objectifs de recherche. Dans la deuxième partie, plusieurs stratégies seront étudiées afin de mieux évaluer la teneur en eau du béton produit. La troisième partie sera consacrée à l'amélioration du suivi en continu de l'ouvrabilité du béton, par une nouvelle utilisation du wattmètre différentiel. Suivra la conclusion de ces travaux, mettant en lumière nos apports, ainsi que des pistes pour de nouvelles recherches.

---

# **Partie I**

## **Etat de l'art et objectifs de la thèse**

Ce mémoire abordant la régularité de production du béton, on commence par rappeler les propriétés d'usage du matériau, et la façon de les obtenir en combinant les constituants. On étudie ensuite la technologie de fabrication industrielle du béton, l'influence des paramètres de production sur les caractéristiques du matériau et les moyens dont disposent les industriels pour contrôler la régularité du béton en production. On termine ce chapitre par une prospective sur les besoins en recherche, dont on déduit les objectifs de la thèse.

## **I.1. Propriétés d'usage et formulation du béton**

Le béton est un matériau formé par le mélange de granulats (sable, gravier et éventuellement des cailloux) noyé dans une pâte (éléments fins, ciment et eau). Il présente des caractéristiques assez complexes aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci, et est donc l'objet de nombreux traités de physique, chimie, mécanique, science de matériaux, rhéologie... Pour son utilisation, ce matériau doit satisfaire certaines exigences : avoir une ouvrabilité (fluidité) adaptée aux moyens de mise en œuvre disponibles, et atteindre les propriétés mécaniques et de durabilité visées. Ces propriétés peuvent être quantifiées comme indiqué dans les paragraphes suivants.

### ***I.1.1 Propriétés d'usage du béton***

Dans un premier temps, deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques. Dans un deuxième temps, la résistance en compression du béton, propriété importante du matériau à l'état durci, est discutée.

#### ***I.1.1.a Ouvrabilité***

Après avoir été malaxé, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité. L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. Dreux et Festa [1] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage ». Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction. En effet, selon ces auteurs, la plupart des qualités de l'ouvrage telles que la compacité et la résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, l'enrobage et l'adhérence des armatures, les parements de belle apparence, l'étanchéité... dépendent de l'ouvrabilité. Au-delà de la mise en place sur le chantier, Faury [2] souligne que l'ouvrabilité est un ensemble de qualités pratiques que doit posséder le béton frais pour être transporté aisément et sans risque de malfaçons. Ces propriétés doivent donc être classées en deux groupes distincts suivant qu'elles s'appliquent au transport ou à la mise en œuvre du mélange.

Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de transport (en bétonnière, en wagonnette, en benne, en camion...) et plusieurs processus de mise en œuvre [18] (pompage, vibration, projection, compactage...). C'est pourquoi de nombreux tests technologiques ont été proposés pour s'adapter à cette diversité. Ces essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité. Nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses [1]. Pour les bétons très secs, on pourra utiliser l'essai V.B., qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un cône de béton se mette à l'horizontale dans un récipient cylindrique périphérique, une fois soumis à une vibration. Le maniabilimètre L.C.L. [4]

fonctionne sur le même principe, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. Un temps long signifie que le béton est ferme. Ces essais sont présentés dans la figure (Figure I.1).

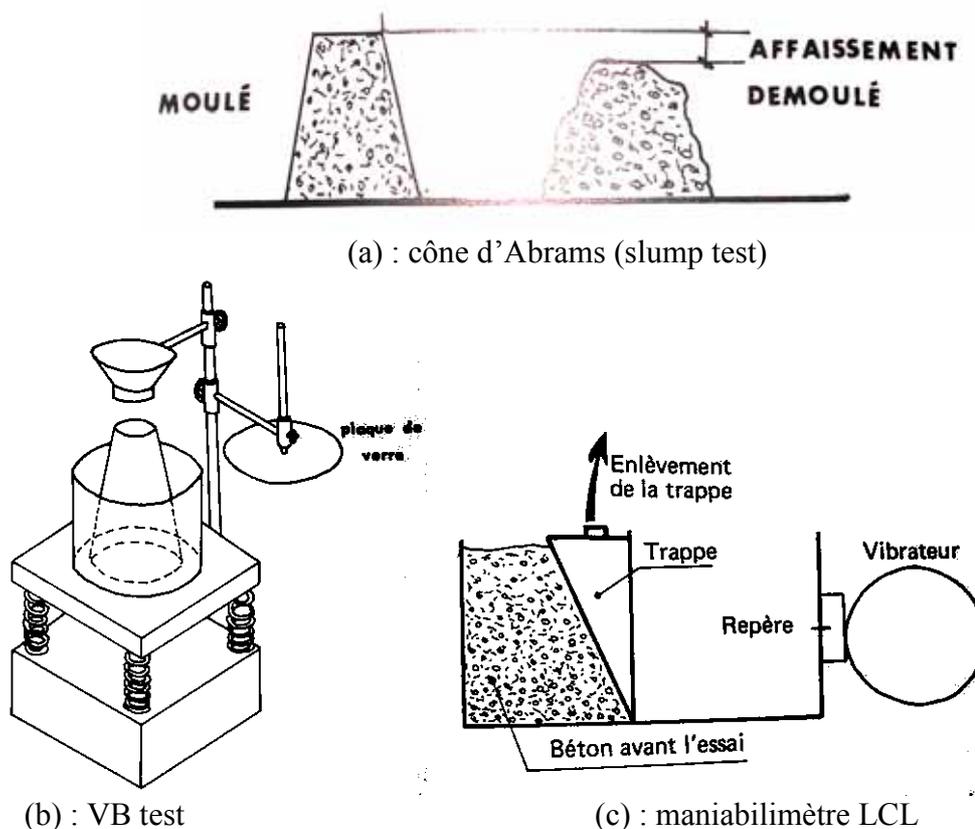


Figure I.1-Certains appareils pour mesurer l'ouvrabilité

L'affaissement au cône d'Abrams est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés. Il est décrit dans la norme européenne EN 12350-2. Pour effectuer cet essai, on remplit tout d'abord un moule en tôle tronconique ( $D = 20$  cm,  $d = 10$  cm,  $h = 30$  cm) de béton. Le remplissage est exécuté en trois couches serrées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (Tableau I.1).

Classes	Affaissement en mm
S1	de 10 à 40
S2	de 50 à 90
S3	de 100 à 150
S4	de 160 à 210
S5	$\geq 220$

Tableau I.1-Classes de consistance vis-à-vis de l'affaissement

Pour les bétons les plus fluides, la mesure de l'affaissement n'est plus discriminante. Il est alors plus judicieux de mesurer le diamètre de la galette de béton obtenue (moyenne de

deux diamètres orthogonaux). On parle alors d'étalement du béton. Ceci est utilisé, par exemple, pour caractériser les bétons autoplaçants.

L'importance de la connaissance préalable de l'affaissement pour la mise en place est évoquée dans la référence [18]. Lors du remplissage du coffrage, l'affaissement du béton est un des facteurs faisant varier la pression du béton sur le coffrage, paramètre important lors de leur dimensionnement. Dans le cas d'un béton serré par vibration, le temps total de vibration est relié à l'affaissement par l'expression empirique suivante [18] :

$$t_v = 2,5 \left( G + \frac{1}{A + 0,05} \right) \frac{VF}{\Phi} \quad (\text{I-1})$$

- où  $t_v$  : temps total de vibration (s)  
 $A$  : affaissement au cône d'Abrams (m)  
 $V$  : volume du béton ( $m^3$ )  
 $\Phi$  : diamètre de l'aiguille vibrante (m)  
 $F$  : coefficient de ferrailage ( $1 \div 1,5$ )  
 $G$  : coefficient de d'angularité des granulats ( $1 \div 5$ )

L'affaissement est aussi un bon indicateur pour classer le béton selon sa finalité. De Larrard [7] présente une gamme d'affaissement pour les bétons dans le tableau (Tableau I.2).

Application	Affaissement désiré (mm)
Préfabrication industrielle – Bétons secs pour démoulage immédiat	0
Béton pour chaussées mis en place à la machine à coffrage glissant	20/50
Béton de résistance normale pour structures armées ou précontraintes	80/150
Béton à haute performance coulé sur chantier	180/250
Béton autoplaçant	>250 (étalement > 600)

Tableau I.2-Plage d'affaissement à spécifier pour différentes applications [7]

### 1.1.1.b Propriétés rhéologiques

Certains tests empiriques pour mesurer l'ouvrabilité du béton sont parfois contradictoires. Un bon exemple est présenté par Baron [4]. Dans une campagne expérimentale, cet auteur a formulé des bétons en faisant varier le dosage en eau et le rapport Sable/Gravillon, et a effectué des mesures d'ouvrabilité à la fois avec le cône d'Abrams et le maniabilimètre L.C.L.. Il a constaté qu'un béton X pouvait s'affaisser plus qu'un béton Y au cône d'Abrams mais s'écouler moins vite au maniabilimètre L.C.L. Donc, la caractérisation de l'ouvrabilité du béton frais par un seul paramètre au moyen d'un essai technologique (affaissement, temps d'écoulement, étalement...) n'est pas tout à fait suffisante. Il faut donc rechercher d'autres méthodes de caractérisation permettant de mesurer des caractéristiques intrinsèques du matériau à l'état frais. Dès les années 70, Tattersall [3], [11] a proposé le "two point test". Cet appareil est en fait un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. L'expérience montre que l'on obtient des droites ne passant pas par l'origine et qu'il est donc nécessaire d'avoir deux paramètres « g » et « h » pour caractériser l'écoulement du béton frais (Figure I.2). Des versions plus modernes de malaxeurs instrumentés ont été développées, telles que l'IBB [83] (voir Figure I.3). Les améliorations concernent essentiellement l'acquisition plus rapide et précise du couple et de la vitesse et le traitement automatisé des données.

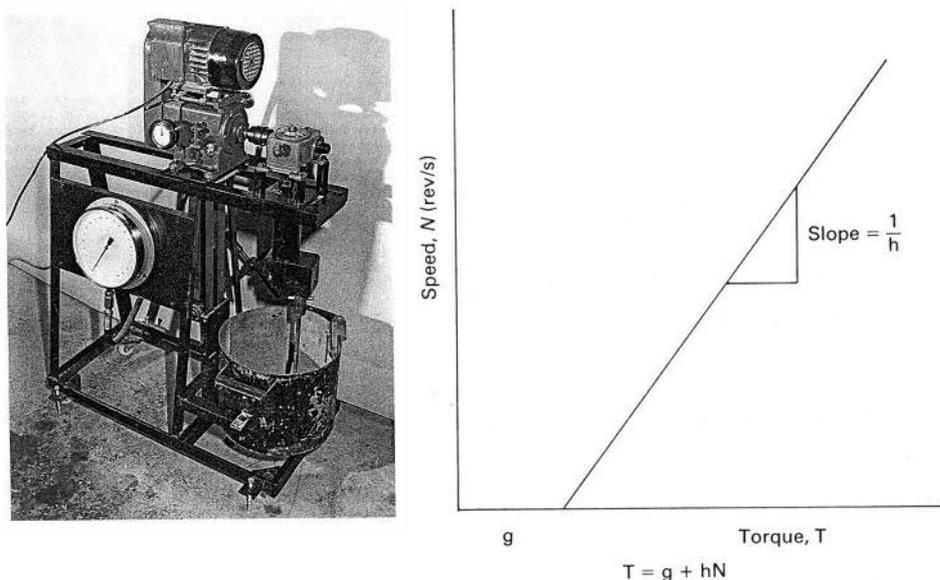


Figure I.2-Two-point test et Paramètres associés [3]



Figure I.3-Malaxeur instrumenté IBB [83]

De Larrard [7] et Hu [6] sont allés plus loin en développant un rhéomètre à béton, le BTRHEOM, et en analysant le béton frais à partir de sa rhéologie. Le but de cette science est d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon de Larrard, le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. Hu [6] a ainsi montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens. En effet, lorsqu'ils sont cisailés, de tels bétons peuvent présenter une dilatance importante et perdre leur homogénéité. Ces bétons contiennent alors un volume d'air piégé non négligeable (5-30%). A contrario, pour des affaissements supérieurs à 10 cm et si les conditions de stabilité (absence de ségrégation) sont respectées, le béton frais peut être assimilé à un fluide de type Herschel-Bulkley dont la loi fondamentale gouvernant le comportement rhéologique est décrit dans [7] par:

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b \quad (\text{I-2})$$

avec  $\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)  
 $\dot{\gamma}$  vitesse de cisaillement en ( $s^{-1}$ )  
 $a, b$  deux constantes physiques du modèle

Sur le plan rhéologique, le béton frais est correctement décrit par l'équation (I-2). Toutefois, les auteurs ont anticipé les difficultés d'utilisation d'un modèle à trois paramètres dans la pratique. Ils ont donc proposé de l'approcher par un modèle de type Bingham intégrant seulement deux paramètres :

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{I-3})$$

avec  $\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)  
 $\mu$  viscosité plastique (Pa.s)  
 $\dot{\gamma}$  vitesse de cisaillement en ( $s^{-1}$ ).

Les auteurs proposent dans [7] de calculer dans un premier temps la valeur de seuil à l'aide de l'équation (I-2), puis, une fois celui-ci fixé, de déterminer la valeur de viscosité plastique à l'aide de l'équation (I-3).

D'un point de vue physique, les deux paramètres de Bingham ont été interprétés [7] comme suit: le seuil de cisaillement est expliqué comme la somme macroscopique de frottements internes des grains solides. Il dépend directement du nombre et de la nature des contacts entre les grains et donc de la compacité du squelette granulaire. Au-delà du seuil, la contrainte appliquée au mélange entraîne l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs entre les grains solides (le frottement) et la circulation de la phase liquide dans la porosité inter-grains. C'est cette dernière qui causerait la dissipation visqueuse dans le liquide en écoulement et expliquerait le deuxième terme  $\mu\dot{\gamma}$  dans la loi de Bingham. Plus la circulation est difficile, plus le paramètre  $\mu$  est important.

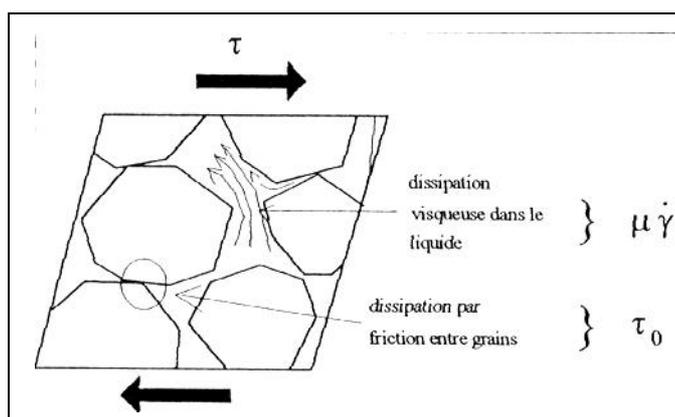
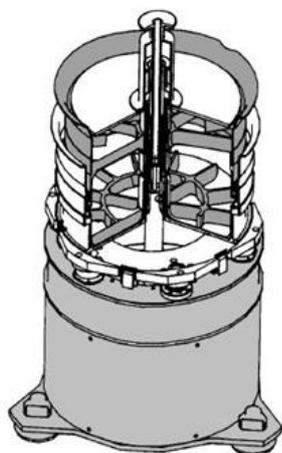


Figure I.4-Interprétation physique du modèle de Bingham [7]

Le BTRHEOM est un rhéomètre de type plan-plan. Sa conception se permet de n'utiliser qu'un volume restreint de béton (environ 7 litres). Ce rhéomètre comprend plusieurs parties (illustration dans la Figure I.5) :

- un bloc supérieur compose d'un récipient pour contenir l'échantillon de béton et d'une pièce tournante pour mettre ce dernier en cisaillement. Le bon fonctionnement de l'ensemble est assuré par un système de pales de blocage et de joints de feutres ;
- un bloc inférieur forme le corps de l'appareil. Il contient les moteurs à courant continu, le système mécanique et les dispositifs métrologiques ;
- une boîte d'alimentation ;
- un micro-ordinateur avec lequel on réalise le pilotage des essais et l'acquisition des mesures.

Une étude sous le parrainage du NIST en 2000 [83] a fait un inventaire et une comparaison des rhéomètres disponibles dans le commerce. L'annexe F de ce document fait également une analyse critique des artefacts de mesures classiquement observées avec ces appareils. Une seconde étude de validation a été réalisée [84].



Rhéomètre plan-plan BTRhéom



Rhéomètre BML à cylindres coaxiaux



Rhéomètre à cylindres coaxiaux Cemagref-IMG (volume de l'échantillon de 500 L ; ce rhéomètre était initialement dédié à l'étude des laves torrentielles).

*Figure I.5-Rhéomètres expérimentés dans [83]*

Ces appareils permettent d'obtenir des rhéogrammes qui décrivent la relation entre le couple appliqué à un échantillon représentatif et la vitesse de rotation de la pièce mobile. Au contraire du cas des malaxeurs instrumentés, c'est la connaissance a priori du champs de vitesses théorique dans les rhéomètres plan-plan ou du champs de contraintes dans les rhéomètres à cylindres coaxiaux qui permet de remonter à la loi de comportement du béton et donc au seuil et à la viscosité.

Dans la pratique, les paramètres rhéologiques de Bingham sont encore rarement utilisés mais de nouvelles applications se font jour.

Se basant sur les expériences acquises dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, de Larrard [7] présente des valeurs caractéristiques du seuil de cisaillement pour différents types de béton (Tableau I.3).

Application	Seuil de cisaillement spécifié (Pa)
Béton de résistance normale pour structure armée/précontrainte	800-1500
Béton à hautes performances fabriqué sur chantier	300-1200
Béton autoplaçant	200-500

Tableau I.3-Plages de seuil de cisaillement à spécifier pour diverses applications [7].

Le seuil de cisaillement contrôle l'affaissement au cône d'Abrams. Dans son travail de thèse, Hu [6] a ainsi établi, par un calcul simplifié aux éléments finis, la relation suivante, qu'il a ensuite validée expérimentalement avec le BTRHEOM:

$$SL = 300 - \frac{270\tau_0}{\rho} \quad (\text{I-4})$$

où SL est l'affaissement en mm et  $\rho$  la masse volumique en  $\text{kg/m}^3$ .

Suite à un grand nombre d'expériences, un ajustement a été proposé par Ferraris et de Larrard [12], permettant de prédire l'affaissement supérieur à 10 cm (avec une erreur moyenne de 2,4 cm) :

$$SL = 300 - 0,347 \frac{(\tau_0 - 212)}{\rho} \quad (\text{I-5})$$

Un seuil de cisaillement élevé signifie un manque de maniabilité. Par contre, un seuil trop bas peut créer certains problèmes de stabilité dans le cas de coulage en pente (voie d'accès à un pont, par exemple).

Ainsi, le seuil de cisaillement critique,  $\tau_0^{crit}$ , en dessous duquel le béton s'écoule, peut se calculer aisément grâce à la condition d'équilibre des forces :

$$\tau_0^{crit} = \rho gh \sin \theta \quad (\text{I-6})$$

où  $\rho$  : masse volumique du béton ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $g$  : accélération de la pesanteur ( $\text{m/s}^2$ )  
 $\theta$  : pente de la surface

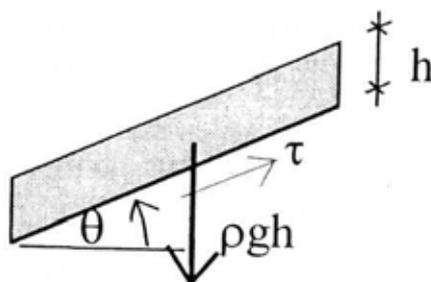


Figure I.6-Equilibre de la pente d'un béton frais soumis à la gravité [7]. Quand la contrainte de cisaillement  $\tau$  équivaut au seuil de cisaillement, le béton s'écoule.

Le béton doit donc être formulé pour que le seuil de cisaillement soit supérieur à ce seuil critique.

Dans [7], de Larrard souligne que la viscosité plastique contrôle divers aspects de la maniabilité du béton. Les bétons ayant une viscosité supérieure à 300 Pa.s sont difficiles à manier, à vibrer, à talocher et à travailler à la truelle de part leur aspect "collant".

Kaplan [19] et Chapdelaine [20] ont également montré que le seuil et la viscosité interviennent dans la prédiction de la relation (pression à la pompe/débit de béton) lors d'opération de pompage. Même si le paramètre primordial reste le frottement béton/tuyau, les propriétés rhéologiques prennent de l'importance dans le cas des bétons à faible seuil et pour des pompages à forts débits. Les travaux de Kaplan ont été synthétisés dans un guide technique du pompage [34] accompagné d'un outil informatique permettant le dimensionnement d'un circuit de pompage à partir des mesures de frottements du béton/tuyau et de sa rhéologie.

Les paramètres rhéologiques peuvent être introduits dans des codes de calcul pour simuler des écoulements. Cette approche a, par exemple, été récemment utilisée par Roussel et al. [85] pour évaluer les critères que devaient respecter les paramètres rhéologiques pour garantir qu'un béton autoplaçant puisse remplir correctement le coffrage d'une poutre composite pré-fléchie. A l'aide de simulations numériques sur le logiciel Flow 3D, les auteurs ont constaté que, dans le cas étudié, la capacité de remplissage du coffrage était essentiellement pilotée par le seuil de cisaillement, puisque les bétons étudiés avaient une viscosité inférieure à 100 Pa.s et que la vitesse de remplissage était faible. Une valeur de seuil critique de 60 Pa a été obtenue et imposée lors de la formulation du béton. Le bon remplissage du coffrage a été confirmé expérimentalement.

### 1.1.1.c Résistance en compression

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures (exception faite par exemple du domaine routier). C'est donc en général la résistance en compression qui sert de caractérisation de base du béton durci. Cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne [NF EN 12390-3]. La résistance à 28 jours après une cure en milieu saturé sert en général de référence. La norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur cylindre 16x32, tandis que Y est la résistance (de même béton) mesurée sur cube 15x15.

La résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, mélange de clinker et de gypse finement co-broyés. Le clinker se compose principalement des quatre minéraux suivants dans des proportions variables : silicate tricalcique  $C_3S$ , silicate bicalcique  $C_2S$ , aluminat tricalcique  $C_3A$  et aluminoferrite tétracalcique  $C_4AF$ .

La réaction du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H ( $CaO-SiO_2-H_2O$ ), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton ([25] et [26]).

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton. On observe, autour des granulats dans le béton durci, une zone de pâte hydratée particulière : l'auréole de transition. Cette auréole a des propriétés différentes de la pâte dans sa masse, en fonction de la porosité des granulats. Dans le cas de granulats non poreux, l'auréole comporte une couche des cristaux de grandes dimensions, très poreuse et de cohésion faible, générant des zones de faiblesse pour les bétons soumis à des actions mécaniques [27].

### **1.1.2 Formulation et propriétés d'usage du béton**

La formulation des bétons permet de lier la composition du béton à ses propriétés. L'objectif est alors de rechercher une composition utilisant au mieux les ressources locales, qui soit la plus économique possible et qui possède les propriétés désirées.

Après avoir présenté l'importance du concept de compacité du squelette granulaire, on présente ici comment l'affaissement, la rhéologie et la résistance à la compression sont influencées par quelques paramètres de formulation.

#### **1.1.2.a Compacité du squelette granulaire**

Un béton est constitué d'un squelette granulaire mis en suspension dans de l'eau (contenant éventuellement des adjuvants). Le squelette est lui-même composé d'un ensemble de grains solides de tailles différentes, du micron (pour les fines du ciment ou des additions minérales) à la dizaine de millimètres (pour les gravillons). Sa compacité joue un rôle « clé » sur les propriétés du béton, notamment sur l'ouvrabilité. On peut illustrer ce fait de façon très schématique: l'eau mise dans un béton va, dans un premier temps, combler les vides constituant la porosité du squelette, puis une fois cette porosité comblée, écarter les grains. On peut donc faire l'hypothèse que c'est la seconde partie de l'eau qui donne au béton son ouvrabilité. Ainsi pour une ouvrabilité donnée, maximiser la compacité du squelette permet de diminuer la quantité d'eau dans le béton donc de faire des bétons plus économiques. De façon corollaire, maximiser la compacité permet d'augmenter l'ouvrabilité pour une teneur en eau fixée [8].

Caquot (cité dans [32] et [1]) a proposé, dès 1937, une approche théorique pour déterminer une courbe granulométrique quasi optimale, pour un mélange granulaire non borné (en termes de diamètre maximal et minimal), puis pour une étendue granulaire donnée. Cette approche néglige toutefois les conditions de mise en œuvre, la forme des granulats et fait des hypothèses fortes sur les interactions (effet de paroi et de desserrement) entre les grains...

Sur la base de l'analyse statistique d'un grand nombre de bétons de la région parisienne, Dreux et Gorisse (cité dans [1]) ont développé une méthode graphique, dans les années 60 au CEBTP (Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics). Cette méthode consiste à construire dans une repère semi-logarithmique une courbe OAB bilinéaire supposée optimale, comme indiqué sur la Figure I.7, pour laquelle le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat, et le point de brisure A (X,Y) a des coordonnées définies par :

- en abscisse X: soit le milieu du segment  $[5-D]$ , si  $D > 20$  mm, soit  $D/2$  si  $D \leq 20$  mm.
- en ordonnée :  $Y = 50 - \sqrt{D} + K$  où K est une valeur tabulée, fonction du dosage en ciment, l'efficacité du serrage, la forme des granulats, et également module de finesse du sable.

Le formulateur ajuste ensuite les pourcentages respectifs de sables et de gravillons pour coller au mieux à cette courbe de référence.

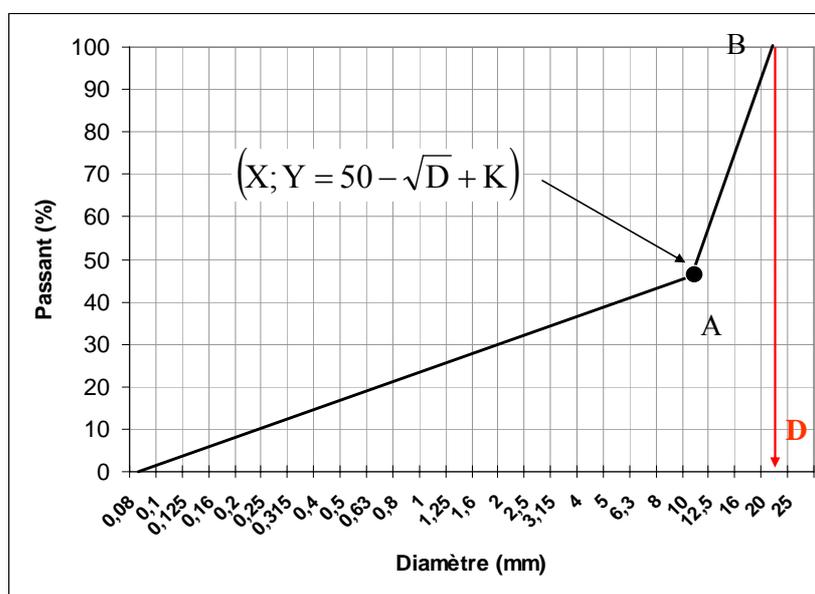


Figure I.7-Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse [1]

Récemment, un nouveau modèle plus complet de compacité granulaire, le modèle d'empilement compressible (MEC) [7] [8], a été développé au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Ce modèle permet de prendre en compte l'aptitude à se compacter de chaque granulat, les interactions granulaires (effet de paroi et de desserrement), l'effet de paroi et l'effet de l'énergie de mise en œuvre. On distingue, dans le cadre du MEC, les notions de compacité virtuelle et compacité expérimentale qui sont respectivement la compacité optimale qu'on peut atteindre en effectuant un empilement optimal grain par grain, et la compacité réelle du mélange dans lequel l'arrangement granulaire est naturellement désordonné. La compacité virtuelle  $\gamma$  d'un mélange polydispense est donné par :

$$\gamma = \text{Min}_i(\gamma_i) \text{ avec } \gamma_i = \frac{\beta}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j \left( 1 - \beta_i + b_{i,j} \beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right) - \sum_{j=i+1}^n y_j \left( 1 - a_{i,j} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right)} \quad (\text{I-7})$$

Où

$\gamma_i$ : compacité virtuelle du mélange si la classe  $i$  est supposée dominante  
 $n$ : nombre de classes granulaires du mélange

- $\beta_i$  : compacité virtuelle de la classe  $i$  (prise individuellement)  
 $y_i$  : proportion volumique de la classe  $i$  dans le mélange  
 $\gamma_i$  : compacité virtuelle du mélange si la classe  $i$  est présumée dominante  
 $b_{i,j}$  : fonction d'effet de paroi exercé par la classe  $j$  sur la classe  $i$   
 $a_{ij}$  : fonction de desserrement des grains  $j$  par les grains  $i$ .

La réalisation du mélange, dans la pratique, est loin de l'état virtuel. La compacité réelle est, par conséquent, inférieure à la compacité virtuelle et dépend de l'énergie de serrage. Cette dernière est introduite dans le MEC par l'intermédiaire du concept de l'indice de serrage  $K$  :

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \quad \text{avec} \quad K_i = \frac{\phi_i}{\phi_i^* - \phi_i} \quad (\text{I-8})$$

- Où  $K$  : indice de serrage pour le mélange ;  
 $K_i$  : indice de serrage partiel dû à la classe  $i$  ;  
 $\phi_i$  : teneur volumique du mélange en classe  $i$  ;  
 $\phi_i^*$  : teneur volumique maximale du mélange en classe  $i$  étant donnée la présence des autres classes.

Finalement, la compacité réelle  $C$  d'un mélange de granulats (Figure I.8) est reliée à  $K$  par l'expression :

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{\frac{1}{C} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (\text{I-9})$$

- Où  $C$  : compacité expérimentale du mélange  
 $K$  : indice de serrage pour le mélange

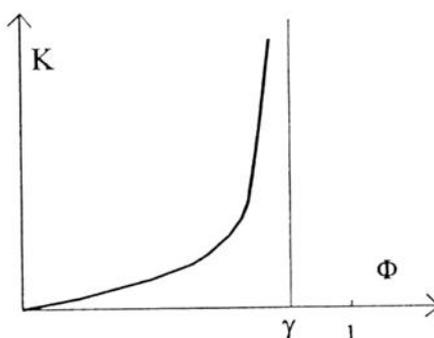


Figure I.8-Variation de  $K$  en fonction de la compacité  $\phi$  [7]

### 1.1.2.b Affaissement et rhéologie en fonction de la formulation

#### ❖ Rôle de l'eau

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la Figure I.9 montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé. Un ajout d'eau conduit également à une

diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la Figure I.25 – paragraphe I.3.1.c (tirée de Hu [6]).

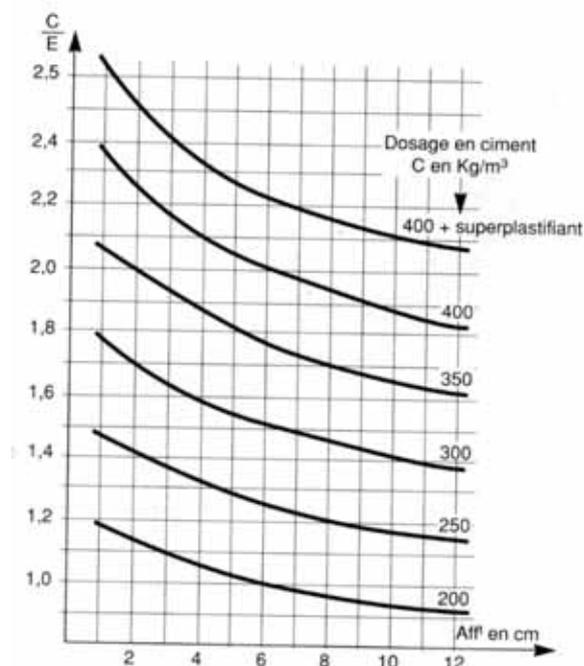


Figure I.9-Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé (tiré de [1])

L'adjuvant, l'eau et les éléments fins sont les paramètres essentiels qui affectent l'ouvrabilité du béton. Le rôle de l'eau sera étudié plus tard dans le paragraphe I.3.1.c. Dans la suite, l'influence de l'adjuvant et des éléments fins est discutée.

#### ❖ Rôle des adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors du malaxage ou avant leur mise en œuvre, provoquent des modifications des propriétés du béton, notamment à l'état frais [1]. Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2 : plastifiants/superplastifiants, rétenteurs d'eau, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise, hydrofuges...

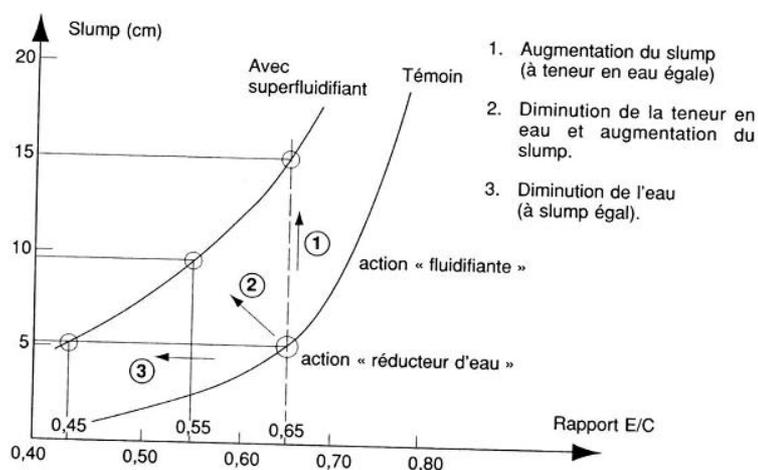


Figure I.10-Utilisations des superplastifiants- Tiré de [1]

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la Figure I.11 tirée de [1], soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en terme de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces.

Dans sa thèse, Hu [6] a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Il a ainsi montré que le superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, mais que l'effet sur la viscosité reste modeste (Figure I.11).

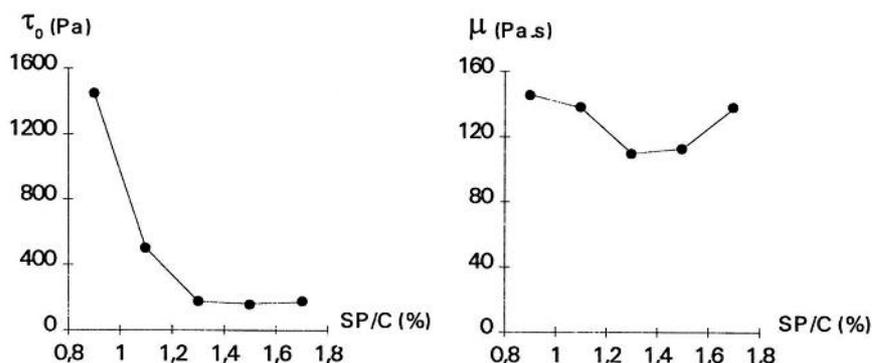


Figure I.11-L'effet du dosage du superplastifiant [6].

Les premières générations de superplastifiants étaient des résines du type mélamines sulfonées, naphthalènes-sulfonates ou vinyles sulfonates. Le mécanisme physique, permettant au superplastifiant d'augmenter la maniabilité du béton, est résumé comme suit ([30], [28]) : le ciment, dont la taille des grains varie de l'ordre de quelques microns à une centaine de microns, est obtenu par broyage. Ce dernier provoque une désorganisation de la surface des grains, et donc la création de sites chargés électriquement. Par conséquent, le ciment présente, à l'état concentré, une structure floculante: les charges opposées s'attirent mutuellement pour former des agrégats de particules. Au sein d'une suspension (béton frais), les grains de ciment forment des agglomérats qui emprisonnent une certaine quantité d'eau, qui n'est plus alors disponible pour donner de l'ouvrabilité au mélange. Le rôle des superplastifiants est donc de casser ces agglomérats pour rendre cette eau disponible. Ce type d'adjuvant se compose de molécules organiques solubles dans l'eau, portant des charges électriques (négative par exemple) réparties sur leur longueur. Ces molécules viennent donc se fixer aux points chargés positivement situés à la surface des grains de ciment et forment des boucles au-dessus de cette surface. Grâce à cette boucle, tout se passe comme si le grain de ciment avait acquis une forte charge négative. Chaque grain de ciment, étant chargé de cette façon, tend à s'écarter de ses voisins. Ces forces de répulsion peuvent être assez grandes pour fragmenter des agglomérats et libérer l'eau liée.

Parmi les nouvelles générations de superplastifiants, on trouve la famille des polycarboxylates. Ils sont en général plus efficaces et fournissent un maintien de l'ouvrabilité plus long. Ces produits agissent sur les grains de ciment, comme exposé ci-dessus, mais plutôt par effet d'encombrement stérique [23].

Un superplastifiant est en général commercialisé sous une forme liquide. On définit alors son extrait sec comme la teneur pondérale en produit actif (en général 20 à 30 %).

On définit les fines dans un béton comme les grains dont le diamètre est inférieur à  $63 \mu\text{m}$ . Ces derniers proviennent soit du ciment, soit des additions minérales (fillers, fumées de silice, cendres volantes...) ou soit des fines dans les granulats (sable, gravillons) obtenus par concassage. Les additions minérales sont intégrées dans les ciments composés mais elles sont également de plus en plus utilisées dans la fabrication des bétons (BHP, BAP, BFUP...) en combinaison avec des superplastifiants. A l'état durci, les additions minérales ne sont pas totalement « inertes », mais présentent certains effets liants ou accélérateurs (au sens où elles favorisent l'hydratation du ciment Portland) [7]. A l'état frais, les éléments fins jouent essentiellement un rôle granulaire. Puisque le superplastifiant réagit essentiellement sur les fines, son dosage est en général exprimé en pourcentage (soit d'extrait sec, soit sous sa forme liquide) de la masse des fines, voire du ciment.

Un ciment se distingue par ses propriétés physico-chimiques. Des ciments de natures différentes ne possèdent donc pas les mêmes caractéristiques. Une des caractéristiques physiques du ciment est sa finesse de mouture, également appelé finesse Blaine, exprimée en  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Ce paramètre représente la surface spécifique d'une masse de 1 kg de ciment [1]. Plus la dimension moyenne des grains de ciment est faible, plus la surface spécifique est importante. L'efficacité d'un superplastifiant est essentiellement contrôlée par la capacité de fixation des molécules organiques sur les sites chargés situés sur la surface des grains de ciment et donc par la nature minéralogique et la finesse de mouture du ciment. Une étude expérimentale sur ce sujet a été réalisée par Saada et ses collègues [33]. Dans cette étude, des ciments de finesse Blaine variable ont été recomposés en mélangeant en proportions variables un ciment portland à des fillers calcaires ou siliceux. Deux superplastifiants de type naphthalène et mélamine respectivement ont été utilisés. Des pâtes de ciment à E/C fixé, pour des surfaces spécifiques différentes, ont été fabriquées avec ou sans superplastifiant. Le seuil de cisaillement est utilisé comme critère d'efficacité. Les auteurs ont constaté que l'effet du fluidifiant diminue lorsque la finesse de mouture augmente ; son efficacité dépend de la nature du filler (Figure I.12).

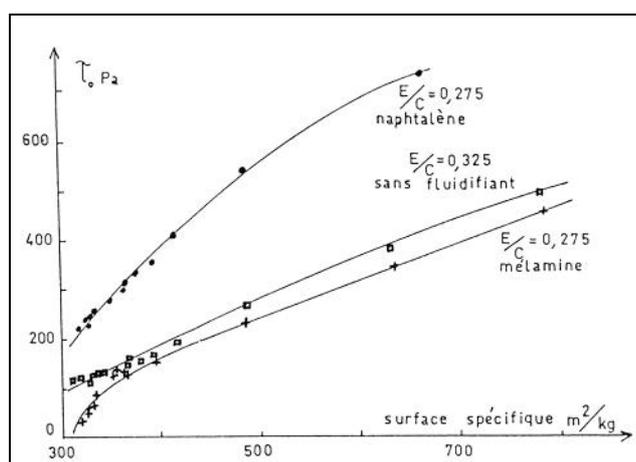


Figure I.12-Influence de la nature du fluidifiant sur le seuil de cisaillement [33].

La Figure I.13) illustre également l'influence de la nature et de la finesse d'additions minérales, utilisées en substitution du ciment, sur le dosage en superplastifiant nécessaire pour obtenir des mortiers de même maniabilité.

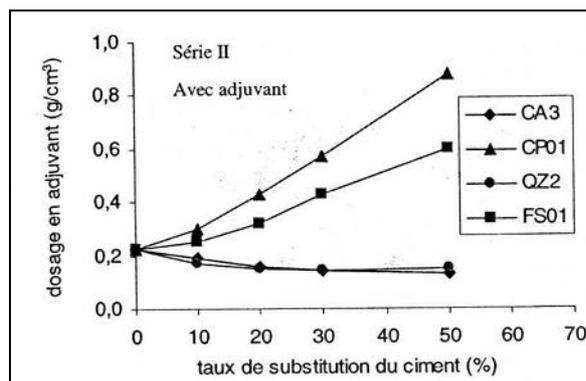


Figure I.13-Dosage SP pour des éléments fins différents à une même maniabilité [29]. Cas des 4 mortiers fabriqués avec des additions différentes à dosage variable.

L'efficacité d'un superplastifiant dépend bien évidemment aussi de sa composition chimique. Au final, l'efficacité d'un superplastifiant s'évalue pour un couple fines/superplastifiant donné.

Pour un ciment donné, le choix d'un superplastifiant optimal peut se faire directement par des mesures d'ouvrabilité ou de rhéologie sur béton. Cela s'avère toutefois lourd à mettre en œuvre et fastidieux. C'est pourquoi une méthode (dite méthode des coulis) a été proposée par de Larrard et al. [7] pour tester l'adéquation du couple ciment/superplastifiant sur le coulis extrait du béton étudié. Elle est basée sur la mesure du temps d'écoulement de 0,5 litre de coulis dans un entonnoir normalisé. Plus le temps d'écoulement est court, plus, pour un dosage en eau fixé, l'adjuvant est efficace. Cette méthode est notamment utilisée dans le domaine de la formulation des bétons à hautes performances (BHP).

Quand on augmente le dosage en superplastifiant, les paramètres rhéologiques diminuent et l'affaissement augmente. Toutefois, à partir d'un certain dosage, tout ajout complémentaire de superplastifiant n'a plus qu'un effet très faible sur l'ouvrabilité (voir par exemple la Figure I.11) car l'adjuvant a saturé les grains de ciment. On parle alors du dosage de saturation en superplastifiant. Pour des raisons économiques, il n'est pas intéressant d'aller au-delà de ce dosage, car l'effet est marginal pour un coût croissant.

La méthode des coulis permet de comparer des superplastifiants entre eux, mais elle permet également de déterminer le dosage de saturation d'un superplastifiant. En faisant un suivi dans le temps du temps d'écoulement du coulis, il est également possible d'évaluer le maintien d'ouvrabilité offert par le couple ciment/adjuvant.

#### ❖ *Un modèle de prédiction des propriétés rhéologique et de l'affaissement*

De Larrard et Ferraris [12] ont mesuré les propriétés rhéologiques à l'aide du BTRHEOM sur un ensemble de 78 formules comprenant des mortiers et des bétons, avec différents dosages en superplastifiant. Ils ont ainsi montré que le seuil et la viscosité peuvent être calculés à partir des paramètres du modèle d'empilement compressible présenté précédemment.

La viscosité plastique du béton est contrôlée par le volume solide relatif  $\Phi/\Phi^*$ , où  $\Phi$  est la teneur en solide du mélange, et  $\Phi^*$  désigne la compacité maximale que le squelette peut atteindre (calculée avec le MEC pour un certain indice de serrage  $K$  fixé forfaitairement à 9). Le seuil de cisaillement est, quant à lui, contrôlé par la friction entre les grains. Les

auteurs ont proposé des modèles permettant de prévoir quantitativement les deux paramètres binghamiens sous les formes suivantes:

$$\begin{cases} \mu = \exp \left[ A \left( \frac{\Phi}{\Phi^*} + B \right) \right] & : \text{viscosité} \\ \tau_0 = \exp \left[ a + \sum_{i=1}^n a_i K_i \right] & : \text{seuil de cisaillement} \end{cases} \quad (\text{I-10})$$

avec  $A, B, a$  : trois constantes du modèle  
 $\Phi$  : teneur en solide du béton  
 $\Phi^*$  : compacité maximale (calculé avec le MEC)  
 $a_i$  : coefficient de frottement qui diminue lorsque le diamètre augmente  
 $K_i$  : contribution de la classe  $i$  à l'indice de serrage

La forme des modèles a été confirmée par Sedran [8] sur un autre ensemble de données mais avec des constantes quelque peu différentes.

Ces modèles permettent de prendre en compte les effets de l'eau sur les propriétés rhéologiques (à travers les termes  $\phi$  et  $K_i$ ), des plastifiants et superplastifiants (à travers les termes  $\phi^*$ ,  $K_i$  mais également par une diminution des coefficients de frottement  $a_i$ ) ainsi que l'effet du squelette granulaire (à travers les termes  $\phi^*$  et  $K_i$ ). L'équation (I-4) permet alors d'en déduire l'affaissement.

Le modèle d'empilement compressible et les modèles rhéologiques tels que proposés par de Larrard et Ferraris ont été implantés dans le logiciel de formulation BétonLabPro2 [86] pour faciliter leur utilisation par l'ingénieur. Ce logiciel permet d'alimenter des fiches résumant un certain nombre de propriétés des constituants (ciments, additions minérales, fluidifiants, granulats) mesurables en laboratoire. Il est alors possible de simuler différentes formules de béton avec ces constituants et d'en déduire plus de 25 propriétés dont la rhéologie et l'affaissement, la résistance en compression, mais également d'autre propriété comme le retrait et le fluage. On peut donc en déduire l'influence des paramètres sur les propriétés d'usage. Ce point sera étudié au paragraphe I.3.1.c.

### I.1.2.c Modèle de résistance

#### ❖ Historique

René Féret fut un des premiers à réaliser des recherches sur la loi régissant la résistance du béton. Il a trouvé que la résistance en compression est donnée par l'expression suivante [2]:

$$R = K \left( \frac{c}{e + v + c} \right)^2 \quad (\text{I-11})$$

où  $c$  : volume absolu occupé par le ciment (dans un volume unitaire du béton)  
 $e$  : volume occupé par l'eau (dans un volume unitaire du béton)  
 $v$  : volume de l'air (dans un volume unitaire du béton)  
 $K$  : une constante du modèle

Supposons que le volume des vides soit faible vis-à-vis de celui de l'eau et du ciment, la résistance du béton est alors principalement contrôlée par le rapport volumique de l'eau sur le ciment. Dans la pratique, la variation de la densité du ciment est relativement faible (autour de 3,1) et la densité de l'eau de gâchage est aux alentours de 1. C'est alors le rapport E/C ou C/E en masse qui est le plus utilisé.

L'effet du rapport E/C paramètre sur la résistance a été mis en évidence par divers autres comme le montrent les formules suivantes tirées de [2].

Bolomey :

$$R = K \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad (\text{I-12})$$

Dutron :

$$R = K \left( \frac{C}{E} \right)^{1,5} \quad (\text{I-13})$$

Abrams :

$$R = \frac{K}{7^{1,5w}} \quad \text{avec} \quad w = \frac{E}{C} \quad (\text{I-14})$$

Graf :

$$R = \frac{K}{\left( \frac{E}{C} \right)^2} \quad (\text{I-15})$$

La valeur de K diffère d'une formule à l'autre, mais dépend principalement de la résistance du liant à un âge déterminé. Ces expressions présentent une diversité de forme qui peut surprendre à première vue. Toutefois, si on applique toutes les formules ci-dessus pour des valeurs usuelles de C/E comprises entre 1 et 2, on constate que les écarts entre les formules n'excèdent guère 15% [2]. De même, un travail plus récent [24] a confirmé que la résistance des bétons est affectée par le rapport E/C quelque soit le type de ciments avec lesquels les bétons ont été fabriqués (Figure I.14).

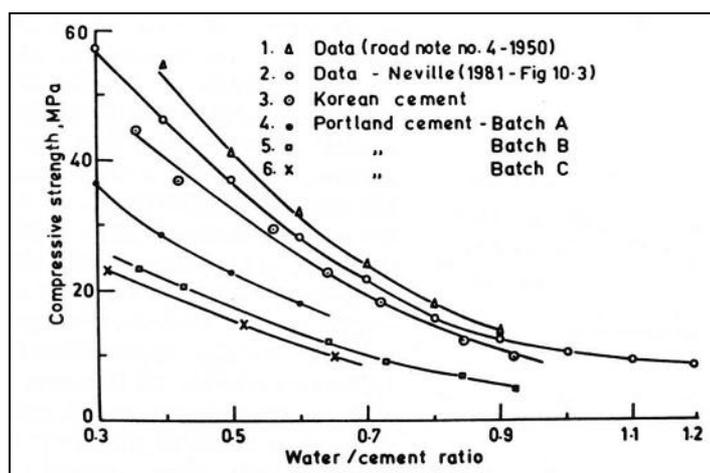


Figure I.14-L'effet de E/C sur la résistance en compression [24]

Des travaux susmentionnés permettent de constater que l'augmentation du rapport C/E conduit à l'augmentation de la résistance en compression du béton, et vice versa.

### ❖ *Modèle développé au LCPC*

Un modèle complet de la résistance à la compression a été développé au LCPC et présenté dans [7] dont on retrace ici les grands principes.

Dans un premier temps, sur la base de la loi de Férét généralisée, on calcule la résistance de la pâte seule selon une loi en puissance :

$$f_{cp} = 11,4R_{c,28} \left( \frac{v_c}{v_c + v_e + v_a} \right)^{2,85} \quad (\text{I-16})$$

avec  $R_{c,28}$  est la classe vraie du ciment à 28 jours

$v_c$ ,  $v_e$  et  $v_a$  sont respectivement les volumes de ciment, d'eau et d'air occlus

Dans un deuxième temps, le béton est considéré comme un matériau composite comportant la matrice liante (la pâte de ciment) et la phase rigide et inerte (les granulats). Leur présence dans la pâte entraîne sur la résistance en compression des effets dépendant de leur taille maximale et de leur proportion volumique dans le mélange. Alors, l'effet de ces deux facteurs est traduit par l'introduction de la notion d'« épaisseur maximale de pâte » (EMP). Cette valeur est calculée par :

$$EMP = D_{\max} \left( \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad (\text{I-17})$$

avec  $D_{\max}$  diamètre maximale des granulats

$g$  volume de granulat dans une unité de volume de béton

$g^*$  compacité du granulat calculée à l'aide du modèle d'empilement compressible.

En suite, la résistance de la matrice est déterminée complètement par la prise en compte de la résistance de la pâte et l'épaisseur équivalente maximale EMP. Cette relation est exprimée comme suivante :

$$f_{cm} = f_{cp} EMP^{-0,13} \quad (\text{I-18})$$

avec  $f_{cm}$  résistance de la matrice

$f_{cp}$  résistance de la pâte.

La résistance du béton dépend encore de la résistance intrinsèque de la roche dont sont issus les granulats ainsi que de l'adhérence entre la pâte et les granulats. C'est pourquoi on déduit la résistance du béton de l'équation suivante:

$$f_c = \frac{pf_{cm}}{1 + qf_{cm}} \quad (\text{I-19})$$

Les paramètres  $p$  et  $q$  ne dépendent que de la nature des granulats:  $p$  traduit l'adhérence avec la pâte et  $p/q$  la résistance des granulats. Les valeurs de  $p$  et  $q$  varient respectivement dans un intervalle de 0,5 à 1,2 et de 0 à 0,005.

Le rôle liant des additions minérales peut être pris en compte à travers la notion de ciment équivalent  $C_{eq}$  :

$$C_{eq} = C(1 + \varphi(F/C))$$

où

$F$  est la teneur en addition et  $\varphi$  une fonction décrivant la réactivité de l'addition.

Au final on a alors

$$f_{cm} = 13,4R_{c28} \left[ \left( 1 + \rho_c \frac{E + A}{C_{eq}} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \quad (I-20)$$

où  $E$  et  $A$  sont les volumes d'eau et d'air  
 $C_{eq}$  est la masse de ciment équivalent  
 $\rho_c$  est la densité du ciment

Comme indiqué plus haut, ce modèle a été intégré au logiciel BétonlabPro2 [86] pour pouvoir être utilisé par l'ingénieur de façon pratique.

## I.2. Fabrication du béton dans les centrales BPE<sup>1</sup> [37] [38]

Pour fabriquer le béton, il faut tout d'abord doser les constituants, en référence à une formule sélectionnée, puis assurer un mélange aussi homogène que possible. La chaîne de fabrication du béton en centrale passe par trois étapes: le stockage, le dosage et le malaxage. En fonction du besoin de la mise en place, ce matériau est fabriqué selon deux modes différents : continu ou discontinu. Pour une production à très forte cadence et sur des périodes de plusieurs heures, comme pour les barrages et les chaussées, des centrales continues sont souvent utilisées. Dans la pratique, il est plus courant de produire le béton dans les centrales discontinues, « gâchée par gâchée ». C'est aussi le mode de production adoptée par des centrales BPE dont le débit est compris entre 40 m<sup>3</sup>/h et 150 m<sup>3</sup>/h. Nous allons détailler les trois étapes de la fabrication dans les centrales de BPE.

### I.2.1 Stockage

Le but du stockage est de conserver les propriétés des constituants, de faciliter l'extraction des matériaux lors de la production, et d'assurer la continuité de la production. Les moyens de stockage sont spécifiques pour chaque constituant.

Les granulats sont stockés soit en trémie, soit en tour compartimentée. Un stock secondaire sur le sol est souvent observé. L'alimentation des granulats en trémie est réalisée soit directement à partir d'un quai, soit par des chargeurs à partir des stocks secondaires. Les tours compartimentées sont alimentées par des godets ou la bande transporteuse. Les liants et les additions sont toujours stockés dans deux ou trois silos. Les adjuvants sont stockés soit en citerne, soit en fût. L'eau utilisée est en grande partie de l'eau propre, délivrée par le réseau. Pour éviter les rejets, les eaux « recyclées » (issus du lavage des équipements de la centrale, des aires de fabrication et eaux de ruissellement) sont réutilisées systématiquement. Ces eaux, riches en éléments fins dans des proportions variables, sont décantées avant toute réutilisation.

Au cours du stockage, diverses perturbations d'état des constituants peuvent entraîner des effets préjudiciables à la qualité du béton produit. Il faut donc prendre des précautions pour limiter leurs influences (Tableau I.4) [38]. Certaines informations sur les états des propriétés de constituants tels que teneur en eau, quantité d'éléments fins sont des paramètres importants pour formuler un béton de qualité. Par conséquent, des dispositifs permettant de suivre en continu la variation de ces propriétés tels que les sondes de teneur en eau des granulats, les sondes de teneur en éléments fins de l'eau recyclée sont fréquemment installés dans les centrales. Ces données influenceront les commandes de dosage.

<sup>1</sup> pour Béton Prêt à l'Emploi

Constituants	Origine des perturbations	Dispositions à prendre
Pulvérulents secs (ciment et additions sèches)	Aération par le transport par air Remplissage du silo par excès de pression température du pulvérulent élevé Vitesse d'extraction excessive.	Densifier le matériau à la base du silo, vis à double pas ou vibration par exemple. Conserver une quantité minimale de pulvérulent dans le cône du silo. Extraction lente du pulvérulent. Eviter de soutirer du pulvérulent pendant le remplissage du silo Eviter les pulvérulents trop chauds.
Sable	Utilisation trop rapide après l'extraction Concentration de fines par égouttage ou ségrégation Arrêt d'écoulement si la quantité de fines accumulée est trop forte.	Organiser les stocks pour permettre un égouttage (dépend de la quantité de fines) Prélever à l'avancement dans les stocks (reprise en ligne en évitant le pied des tas) Eviter le roulage des camions sur les stocks. Calibrer régulièrement les sondes de teneur en eau Utiliser les sondes comme des indicateurs de fluctuation Dégager régulièrement les zones d'accumulation de fines
Gravillons	Variation de la teneur en éléments fins	Eviter le roulage des camions sur les stocks Dégager régulièrement les zones d'accumulation de fines
Additions humides	Mottage Décantation	Emotter le produit Protéger les stocks pour éviter l'augmentation de teneur en eau (cas des produits peu humides) Délayer le produit pour dépasser la teneur en eau de bouletages (cas des produits très humides) Agiter en permanence lors que le produit est délayé
Eaux de récupération	Décantation Irrégularité de la teneur en éléments fins	Agiter le produit en permanence Contrôler la densité du produit en permanence

Tableau I.4-Perturbations de l'état des constituants et remèdes pour limiter leur influence [38]

## 1.2.2 Dosage

Le dosage est l'ensemble des opérations permettant de remplir les constituants dans le malaxeur de sorte que ses proportions fixées par les formules nominales soient respectées. Le dosage se fait en référence à des consignes qui sont déterminées à partir de la formulation théorique, et par les paramètres d'état des constituants (teneur en eau, absorption d'eau des granulats...). Dans la pratique, les quantités de matériaux effectivement utilisées dans une gâchée fluctuent en plus ou en moins, par rapport aux formules théoriques à fabriquer. C'est pourquoi la norme EN 206-1 définit les tolérances à respecter lors du dosage (Tableau I.5). Le référentiel de la marque NF renforce les tolérances demandées à des centrales de BPE.

Le succès du dosage est assuré par des bonnes combinaisons de fonctionnement entre différents matériels dans les chaînes de dosage.

Constituants	Tolérances
Ciment Eau Ensembles des granulats Additions utilisées en quantité > 5% de la masse de ciment	± 3% de la quantité requise
Adjuvant et additions utilisées en quantités ≤ 5% de la masse de ciment	± 5% de la quantité requise

Tableau I.5-Tolérance de dosage fixée par EN 206-1

### 1.2.2.a Chaîne de dosage

Le dosage d'un constituant quelconque est réalisé à l'aide d'une chaîne de dosage qui est constituée des éléments suivants :

- **un calculateur** qui permet de calculer les consignes à doser des constituants à partir des informations directement adressées par le conducteur de la centrale (correction des constituants) et les équipements de contrôle et de mesure (teneur en eau, teneur en éléments fins...). Ce calculateur est intégré à l'automatisme de pilotage de la centrale ;
- **un dispositif d'extraction des matériaux** qui permet d'extraire les matériaux dans les conteneurs, et les transférer aux réceptacles ;
- **un réceptacle** qui permet de recevoir au fur et à mesure les matériaux à doser ;
- **un instrument** qui est constitué des capteurs spécifiques, permettant de mesurer les volumes, les masses, les quantités des matériaux (comprenant un compteur, des ailettes de rotation, des jauges de déformation, etc.).

La liaison entre les éléments dans la chaîne est assurée par la connexion permanente avec l'automatisme central qui, en plus de définir la consigne de dosage, compare en permanence les informations délivrées par les capteurs à cette consigne, et commande le fonctionnement des matériels dans la chaîne de dosage.

### 1.2.2.b Mode de programmation des consignes

Avant de lancer l'opération de dosage, les consignes à viser doivent être déterminées. Pour cela, on doit tenir compte des proportions théoriques et du mode de fonctionnement des matériels.

#### ❖ *Respect des proportions*

On rencontre deux méthodes de programmation des dosages afin de respecter la proportion fixée par la formule nominale :

- soit la quantité réelle du premier constituant dosé est prise en compte comme référence, et les consignes d'autres constituants sont alignées sur celui-là ;
- soit une consigne fixe est visée pour chacun des constituants.

La première méthode est intéressante si l'écoulement du constituant de référence lors du dosage est difficile à maîtriser et que ce dernier est jugé important pour les propriétés du béton. Cette méthode est notamment utilisée pour le mode de fabrication continue. La méthode de consigne fixe est, dans la pratique, la plus utilisée pour les centrales de BPE. Bien entendu, les écarts extrêmes sur des constituants jugés les plus sensibles aux propriétés du béton ont une très faible probabilité de se produire simultanément. Cette méthode est satisfaisante à condition de bien maîtriser les états de constituants.

Quelle que soit la méthode de programmation, les pesées doivent respecter les consignes de dosage, condition nécessaire pour obtenir un béton de qualité. Deux sources d'erreurs liées aux matériels d'extraction peuvent influencer la qualité de dosage : l'après coulant et la chute (ou la jetée) (Figure I.15). En effet, lorsque l'automatisme donne l'ordre d'arrêter le dosage, la réponse de matériels (tels que la courroie, la vis, le casque) n'est pas instantanée et une quantité de matériau supplémentaire tombe dans le réceptacle avant l'arrêt définitif. De plus, pendant le remplissage de la bascule, la chute de matériau exerce une force équivalente à une certaine quantité de produit. Toutes ces informations doivent être prises en compte et corrigées par l'automatisme.

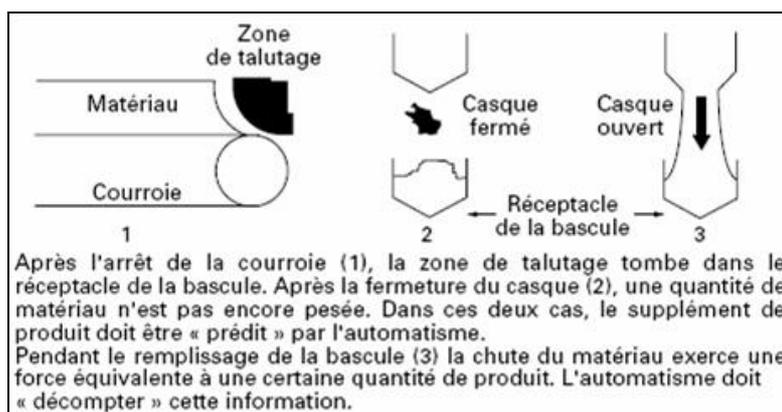


Figure I.15-Talutage, après coulant et jetée [42]

#### ❖ Dosage en cumulé

Par économie de place, on utilise souvent une seule bascule pour doser deux, voire trois constituants. Cela se passe dans la majorité des cas entre le ciment et le filler, l'eau et l'adjuvant, ou encore le granulats grossiers et le sable. Le dosage peut donc être effectué en pesage cumulé. Si le dosage des constituants précédents est imprécis, l'erreur est automatiquement reportée sur le nouveau constituant. Cette erreur peut devenir importante si la quantité du nouveau constituant est faible, comme dans le cas d'un granulats de taille intermédiaire. Pour remédier à ces erreurs cumulées, un procédé consiste à définir la consigne d'un constituant en tenant en compte de la valeur réellement obtenue par l'ensemble des constituants précédemment dosés dans la bascule. C'est la méthode de programmation la plus utilisée actuellement dans les centrales.

#### 1.2.2.c Matériels de dosage

Les constituants du béton sont liquides (eau, adjuvant) ou solides (ciment, filler, granulats). Chaque constituant possède sa ligne de dosage propre. Le tableau (Tableau I.6) résume les matériels de dosage utilisés.

Constituants	Extracteur	Grandeur mesurée ou dispositif de mesure	
		Volumétrique	Pondérale
Granulats	Casque, courroie, godet	-	Jauge de déformation
Pulvérulents	Vis alvéolaire	-	Jauge de déformation
Eau	Vanne, pompe	Compteur, débitmètre	Jauge de déformation
Adjuvant	Pompe	Compteur, débitmètre	Jauge de déformation

Tableau I.6-Récapitulatif des moyens utilisés pour le dosage des constituants

Dans le cas d'un dosage pondéral, les balances sont utilisées pour peser des matériaux. Selon les définitions données dans l'annexe G de la norme EN 206-1 [39], la précision des instruments de pesage utilisés pour la fabrication du béton sont au moins de la classe III. L'utilisation des balances nécessite les principales caractéristiques suivantes :

- **la portée** de chaque balance doit être telle que toutes les pesées à réaliser sont supérieures à 10 % de cette portée. La portée est exprimée en fonction du volume nominal de la gâchée ;
- **l'échelon de vérification** présente l'incertitude absolue maximale. Il n'a de valeur que s'il a été vérifié tout au long de l'échelle de mesure par un organisme notifié (Tableau I.7) ;

Classe de précision		Nombre (n) d'échelons de vérification (e) : n = portée maximale/e	Portée minimale pour éviter les erreurs excessibles
Appellation	Symboles		
Ordinaire	III	$100 \leq n \leq 1000$	10 e

Tableau I.7- Caractéristiques des balances

Il existe de nombreux types de balances. Toutes comportent un réceptacle, un dispositif de mesure et un système d'évacuation. On utilise toujours des balances pour les granulats et les pulvérulents. Pour l'eau, ce type de dosage est également préféré dans les centrales reliées à un réseau où la pression peut fréquemment fluctuer. Pour les adjuvants, l'emploi des balances est plus délicat car, les quantités étant faibles, les balances doivent être plus petites, et par conséquent plus sensibles aux vibrations qui existent dans les centrales.

### 1.2.3 Malaxage

Après le dosage, les constituants sont versés dans un malaxeur et mélangés à l'aide d'un système de pales de brassage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant. L'objectif du malaxage est de répartir des constituants de nature et de tailles différentes en vue d'obtenir un mélange le plus homogène possible. La répartition homogène s'accompagne d'une structure optimale, attendue pour un mélange poly-phasique comme le béton: le ciment entre en contact avec l'eau, les petits grains s'empilent dans les vides des plus gros grains et la pâte enrobe les granulats. L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage.

#### 1.2.3.a Cycle de malaxage

L'homogénéité ne peut être obtenue immédiatement après le remplissage du malaxeur, et on doit assurer un temps de malaxage minimum pour que les outils de brassage dispersent les constituants du béton. Le référentiel de la marque NF impose un temps de malaxage minimal avec tous les constituants dans les centrales BPE : 35 s pour les bétons sans adjuvants et 55 s pour les bétons adjuvés. La durée totale du cycle de malaxage (Figure I.16) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

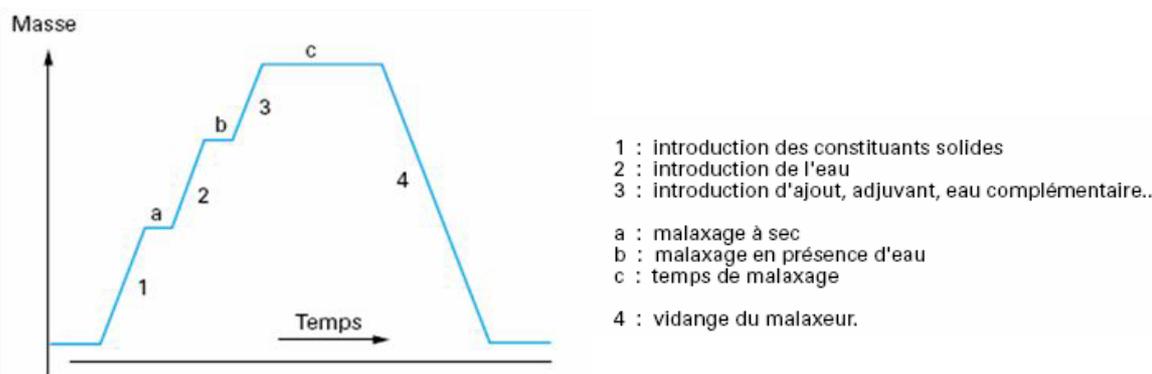


Figure I.16-Cycle de malaxage [38]

Pour un cycle de malaxage, on définit les différentes phases de la façon suivante :

- **malaxage à sec** : période comprise entre le début de l'introduction des granulats et le début de l'introduction de l'eau et de l'adjuvant ;
- **malaxage humide** : période comprise entre le début de l'introduction de l'eau et la fin de la vidange du malaxeur ;
- **temps de malaxage** : temps écoulé entre la fin d'introduction du dernier constituant et le début de vidange du malaxeur.

Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

### 1.2.3.b Rôle du système de pales

L'homogénéité du béton est obtenue grâce au brassage opéré par un système de pales. En effet, sous l'effet des mouvements de ces dernières, à partir d'un état séparé, les matériaux sont transportés dans le volume de la cuve en se mêlant. Il existe deux zones de sollicitations différentes devant une pale (Figure I.17) :

- la zone 1 où les matériaux sont traînés directement par la pale. Ce volume se disperse lentement dans toute la masse de matériau ;
- la zone 2 où les matériaux subissent indirectement l'action de la pale. Cette quantité se cisaille et permet un échange rapide avec l'environ proche.

Le volume de matériaux dans les deux zones dépend de la pale mais également de la consistance du mélange. L'orientation de la pale, sa surface, sa vitesse de déplacement, le nombre de pales et la composition du mélange influencent le volume d'échange dans le mélange. C'est par la multiplication de déplacements des pales et donc du cisaillement du matériau que les constituants se structurent progressivement dans le temps, vers un état final dont la proportion entre les éléments constitutifs, dans un volume représentatif du béton, est l'image de celle des constituants incorporés dans le malaxeur. Le mélange devient homogène, et n'évolue plus sous l'effet du système de brassage.

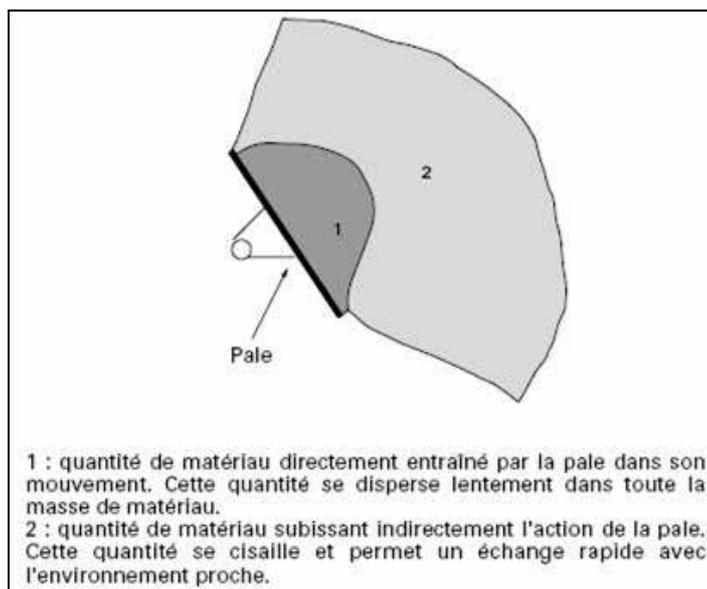


Figure I.17 - Action d'une pale [38]

### 1.2.3.c Malaxeurs

Le malaxeur est composé d'un système de pales et d'une cuve destinée à contenir les matériaux à mélanger. Le système de pales est constitué d'un ou plusieurs mobiles, reliés par l'intermédiaire d'un axe à un moteur. Ces mobiles entraînent les mouvements pour homogénéiser le mélange. On rencontre diverses conceptions de la mise en mouvement des mobiles, en vue d'obtenir une meilleure homogénéité.

Lorsque la rotation des mobiles peut se réaliser autour d'un axe vertical, on parle de malaxeurs verticaux. De même, lorsque les mobiles se déplacent autour d'un axe horizontal, on parle de malaxeurs horizontaux. Enfin, nous appelons les malaxeurs 3D ceux dont les mobiles ne restent pas dans le plan donné.

Du point de vue de l'action de malaxage, les malaxeurs se distinguent par ceux à action forcée ou gravitaire. Dans les malaxeurs à action forcée, le brassage des matériaux est effectué par les pales, la cuve restant le plus souvent immobile. Dans les malaxeurs à action gravitaire, les pales n'ont qu'un effet passager dans la masse des composants, qui s'assimile au cisaillement. Le malaxage se fait essentiellement par la chute sous l'effet de la gravité.

Les types de malaxeur utilisés pour la fabrication du béton en discontinu sont très nombreux, en fonction notamment de la rotation des mobiles et l'action de brassage du système des pales. On peut les classer en cinq grandes familles [38] :

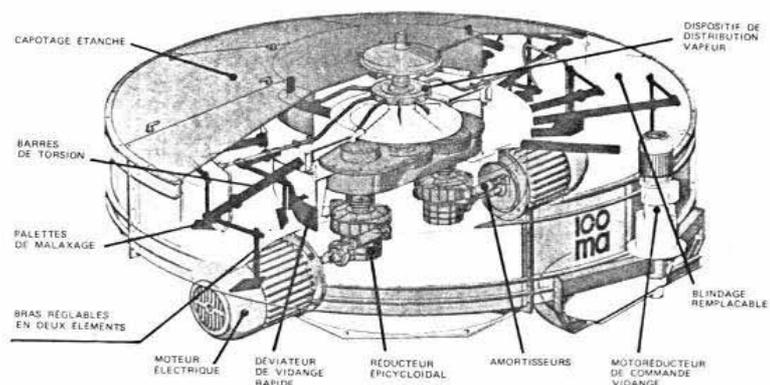
- malaxeur à axe vertical, à action forcée ;
- malaxeur à axe vertical, à action gravitaire ;
- malaxeur à axe horizontal, à action forcée ;
- malaxeur à axe horizontal, à action gravitaire ;
- malaxeur à axe incliné, à action gravitaire.

Actuellement, le premier type est le plus utilisé dans les centrales BPE. Il s'agit d'un malaxeur constitué d'une cuve fixe, d'un système de pales « mobiles » qui assure le

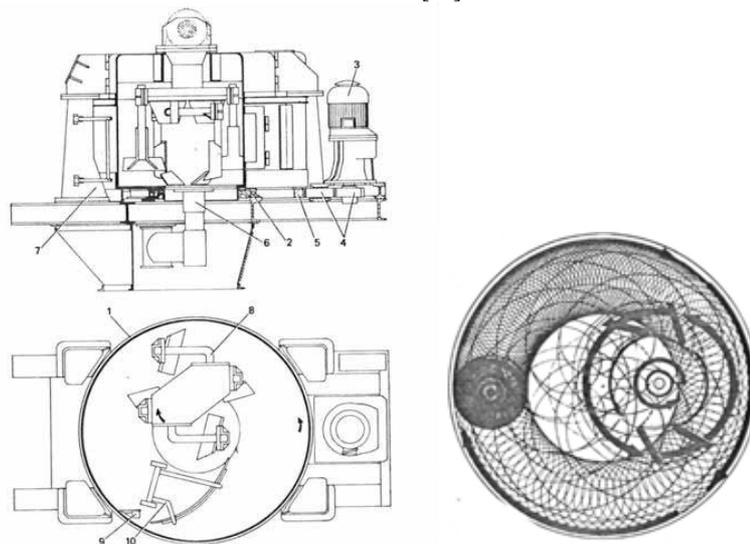
mélange des matériaux par brassage et par cisaillement et d'un système de pales « passives » qui raclent les parois pour éviter les zones d'accumulation où des éléments particuliers viendraient se loger. Il existe, pour certains malaxeurs, un système de pales qui tournent autour d'un axe lui-même en rotation autour de l'axe principal (appelé tourbillon ou train valseur). L'objectif de ce système est de créer un fort cisaillement dans la cuve qui doit briser les agglomérats de particules fines formés en présence de l'eau.



Mouvements des pales – [ [www.couvrot.com](http://www.couvrot.com) ]



Turbo malaxeur [41]



1. Cuve cylindrique. 2. Couronne à billes. 3. Moto-réducteur. 4. Pignons. 5. Grande couronne dentée. 6. Dispositif de vidange. 7. Châssis cadre. 8. Étoile mélangeuse. 9. Palette de bord. 10. Palette oscillante.

Malaxeur à train valseur et à tourbillons [41]

Figure I.18-Malaxeurs et mouvements des pales

### I.3. Influence des paramètres de production industrielle du béton sur sa qualité

Dans un contexte contractuel, la qualité du béton désigne l'ensemble des spécifications sur ses propriétés, de l'état frais à l'état durci, destiné à satisfaire l'utilisation de ce matériau. De nombreuses études ont montré que les propriétés du béton étaient contrôlées à la fois par la composition et par la façon dont les constituants se structuraient. Les facteurs affectant la qualité du béton résident donc dans la qualité des constituants, la fabrication, le transport, la mise en place et les conditions de cure (Figure I.19) [3].

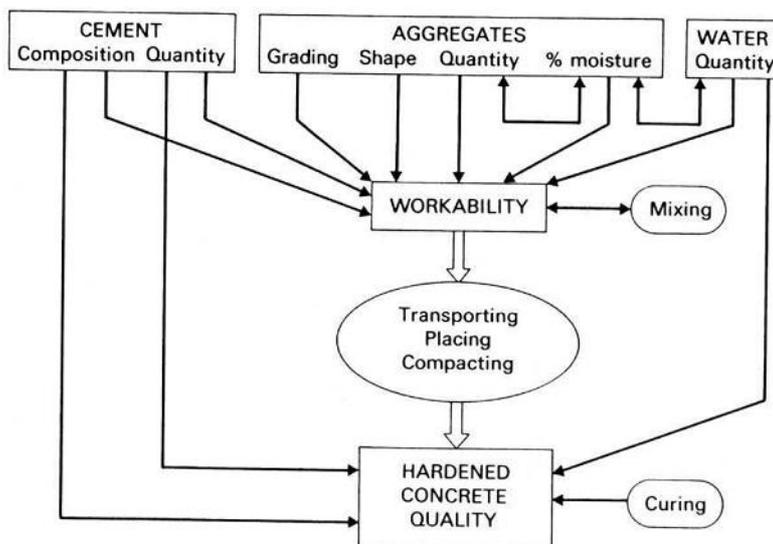


Figure I.19 - Facteurs affectant la qualité du béton [3]

La qualité du béton, fabriqué en industrie, est affectée par les trois étapes de la chaîne de production : stockage, dosage et malaxage. Les propriétés des constituants et ses proportions peuvent être modifiées lors du stockage et du dosage. Le malaxage, quant à lui, affecte la structuration du béton.

#### I.3.1 Impact du dosage et du stockage

Les propriétés d'usage du béton sont contrôlées par certains paramètres tels que : compacité du squelette granulaire (donc rapport gravillon/sable, ou G/S), rapport eau/ciment (E/C), dosage du superplastifiant, dosage en éléments fins... Les incidents lors du stockage et du dosage peuvent entraîner la fluctuation de la composition, par rapport à celle préalablement fixée par une formule théorique. Ceci conduit à la modification des paramètres contrôlant les propriétés du béton et donc à la variation de ces dernières vis à vis de celles visées.

##### I.3.1.a Risque de fluctuation des paramètres de composition

Au cours du stockage, les constituants peuvent affecter la précision du dosage [43]. Les variations d'humidité, du taux d'absorption et de la teneur en fines des granulats sont une des premières sources de fluctuation. Si l'automatisme ne détecte pas cette évolution, le dosage faussera les masses réelles de l'eau (que nous allons détailler plus loin) et des granulats à mettre dans le malaxeur. Ceci se traduit par une fluctuation de la consistance du béton à cause de l'évolution de la teneur en eau du sable et du taux en éléments fins

(Figure I.20). Des incidents concernant la régularité de l'écoulement des constituants lors du dosage sont une deuxième source d'incidents. Les matériaux, comme les additions humides ou les sables, se comportent de manière différente en présence d'eau, de l'air et notamment des fines (pour les sables). Ces dernières provoquent le changement du flux d'écoulement et donc la modification du dosage (cf.I.2.2.b). Le changement de diamètre maximal des gravillons et/ou la dégradation de la qualité du ciment dans les silos de stockage peuvent également entraîner des anomalies dans le comportement du béton.

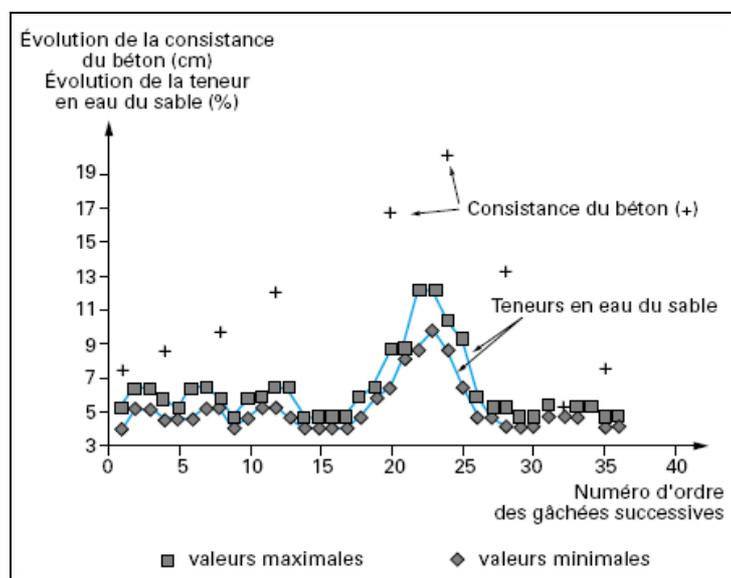


Figure I.20-Influence de la variation de l'humidité du sable sur la consistance du béton [38]

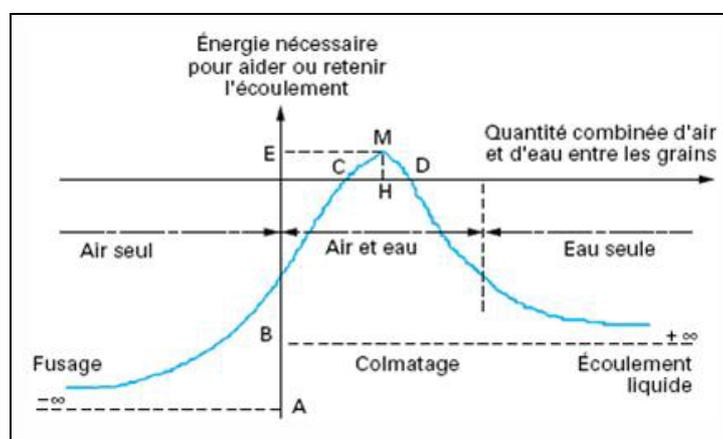


Figure I.21-Comportement à l'écoulement d'un pulvérulent [38]

L'eau et l'adjuvant, deux constituants très sensibles pour les propriétés du béton, doivent être particulièrement bien protégés lors du stockage [63]. Les variations de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  provoquent des variations sensibles dans la défloculation des éléments fins du béton. L'utilisation des eaux de récupération pose le problème de la maîtrise des taux des matières en suspension (MES) et du degré de pH de ces eaux. Au cas où les incertitudes de mesure sur les taux de MES ne seraient pas négligeables, le dosage en eau du béton peut varier de manière importante. La variation de pH peut, en couplage avec le superplastifiant, engendrer dans un premier temps des variations rhéologiques. Concernant les adjuvants, l'incompatibilité de ces constituants vis-à-vis d'un ciment donné reste un incident affectant

fortement l'ouvrabilité du béton. Bien que ce problème soit rarement observé dans les centrales à béton moderne (à cause notamment des exigences de la norme EN 206-1 actuellement en vigueur), d'autres anomalies dans le comportement rhéologique peuvent être causées par l'adjuvant (Tableau I.8).

Problème lié à l'adjuvant
Adjuvant dilué
Stockage dans une cuve mal nettoyée
Adjuvant périmé
Séparation en deux phases
Développement d'une phase polluante dans l'adjuvant
Mélange de deux livraisons d'adjuvants à caractéristiques extrêmes
Mélange de deux adjuvants d'âges très différents
Mauvais ordre de l'incorporation des adjuvants (en cas d'utilisation des adjuvants à fonction différente)

Tableau I.8-Causes probables d'anomalies rhéologiques dues à l'adjuvantation [63]

Le dosage permet de déterminer la proportion en masse des constituants à mettre dans le malaxeur. Les consignes à doser sont calculées en fonction des informations sur l'état des constituants : humidité, taux en éléments fins, absorption, extrait sec de l'adjuvant... La mauvaise connaissance de ces états engendre immédiatement des écarts de production (Tableau I.9).

Pour remplir le malaxeur, les matériaux sont extraits par les extracteurs, puis pesés par des balances (cas du dosage pondéral). Si ces matériels fonctionnent mal, la composition du béton peut varier considérablement [38]. La figure (Figure I.22) montre qu'entre le début et la fin du chantier, une balance accomplit des écarts importants vers la fin du chantier par rapport au début. Ce dérèglement fausse de manière notable la quantité des matériaux pesés. L'erreur systématique maximale observée est de 3 %, égale à la tolérance acceptable selon la norme EN 206-1 lors du dosage des granulats. La composition du béton et sa qualité s'en trouvent donc affectées.

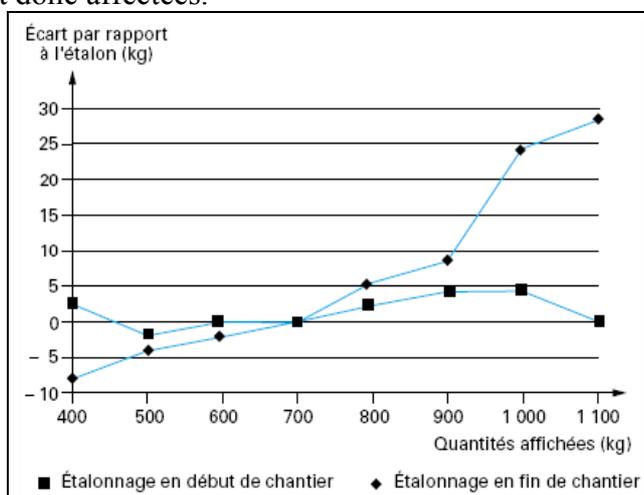


Figure I.22-Dérive d'une balance entre le début et la fin du chantier [38]

Erreur d'estimation	Effet sur le dosage d'un BAP typique		
Teneur en eau du sable ou du gravillon Erreur typique: 1 point	Eau	9 l/m <sup>3</sup>	(5,0%)
	Éléments fins	3 kg/m <sup>3</sup>	(0,6%)
	Superplastifiant		(0,6%)
	G/S		(0,6%)
Teneur en éléments fins du sable Erreur typique : 2 points	Eau		-
	Éléments fins	18kg/m <sup>3</sup>	(3,6%)
	Super plastifiant		(3,6%)
	G/S		(2,0%)
Teneur en éléments fins de l'eau de récupération (de 50% de la quantité totale) Erreur typique: 1 point	Eau	0,5 l/m <sup>3</sup>	(0,3%)
	Éléments fins	0,5kg/m <sup>3</sup>	(3,6%)
	Superplastifiant		(0,1%)
	G/S		-

*Tableau I.9-Conséquences des erreurs de mesure des constituants [87]. La mauvaise estimation de teneur en eau ou teneur en éléments fins entraîne la variation de dosage d'autres constituants qui ont des conséquences définitives sur les propriétés du béton.*

### ***1.3.1.b Conséquences de fluctuations des paramètres de composition***

La composition du béton peut fluctuer à la fois par la nature et par le dosage des constituants. Les méthodes utilisées pour formuler les bétons permettent d'évaluer les répercussions de la variabilité quantitative des composants. En revanche, à dosage constant, il est difficile de prévoir la variation de la qualité du béton face à la variabilité naturelle inhérente des constituants (classe de ciment, qualité de l'adjuvant, granularité...). En effet, les formules de béton, après la fabrication, sont « fixées » sur le papier, tandis que la qualité de sa composition peut varier. Pour étudier et classer l'effet des variations naturelles des constituants, dès 1975, un plan d'expérience a été mis en place par Ray et ses collègues [79]. Ce plan consiste à réaliser des essais expérimentaux en variant les facteurs contrôlés de la réponse (une propriété quelconque du béton) dans la limite des modalités prédéfinies. Ces études montrent que la résistance en compression du béton, parmi les paramètres choisis, est contrôlé, selon l'ordre de l'influence, par l'âge du béton, la qualité du ciment (pour des lots chronologiques différents ou de modules de finesse différentes), la teneur en eau du béton, la méthode de conservation. Certains paramètres comme le module de finesse du sable et celui du petit gravillon, le rapport G/S sont négligeables.

Le plan d'expérience peut également être utilisé pour la prévision quantitative des variations des propriétés du béton due aux fluctuations du dosage des composants. Toutefois, le nombre d'essais croit rapidement en puissance ( $2^n$  au cas où les facteurs contrôlés ont deux modalités et  $n$  est le nombre de ces facteurs) semble être l'inconvénient de cette méthode. De Larrard et al. [22] ont proposé une autre voie pour étudier la variabilité de la composition avec un nombre restreint des essais. En effet, la variation de la résistance mécanique, par exemple, peut s'exprimer à l'aide de la formule différentielle suivante :

$$dFc = \frac{\partial Fc}{\partial r_1} dr_1 + \frac{\partial Fc}{\partial r_2} dr_2 + \dots + \frac{\partial Fc}{\partial r_n} r_n \quad (\text{I-21})$$

où  $F_c$  représente la résistance en compression et  $r_1 \dots r_n$  les  $n$  paramètres de composition. Donc, pour étudier  $n$  paramètres de composition (de deux modalités), il s'agit de fabriquer seulement  $(n+1)$  gâchées.

Lors de l'expérience, les écarts des paramètres de composition (eau, ciment, fluidifiant, fumée de silice) sont choisis pour étudier leurs conséquences sur l'ouvrabilité et notamment sur la résistance du béton. Deux bétons témoins, un ordinaire (sans adjuvant) et un BTHP (béton à très hautes performances), ont été formulés. Les auteurs ont fait varier les dosages pour simuler les défauts de dosage lors de la fabrication en centrale BPE. Ces défauts ont été imposés de manière à ce que ces derniers soient supérieurs aux tolérances de dosage exigées par la norme. Pour chaque fabrication, un seul paramètre varie, les autres sont bloqués. L'ouvrabilité est mesurée au moyen de l'affaissement au cône d'Abrams et du maniabilimètre LPC. Les essais de compression sont pratiqués sur des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm. Les résultats de cette expérience montrent que les pertes relatives en résistance, imputables aux fluctuations des dosages des divers constituants sont du même ordre (soit 10 % à 15 %) pour les bétons ordinaires et les bétons THP, et que la prévision théorique selon l'équation (I-21) approche les mesures expérimentales. Les auteurs ont également vérifié que l'excès d'eau est bien l'incident le plus dommageable pour la résistance du béton. La chute relative est plus importante dans le cas du BTHP. Par contre, la maniabilité, dans cette expérience, varie de manière imprévisible. D'autres paramètres non contrôlés au cours des essais peuvent affecter l'ouvrabilité :

- la température ;
- les caractéristiques du ciment ( finesse de mouture, taux d'aluminates) ;
- le taux de carbone de la fumée de silice ;
- le taux d'absorption d'eau des granulats.

### 1.3.1.c Variations du dosage en eau

De nombreuses recherches montrent que l'eau est un des constituants les plus sensibles affectant les propriétés du béton. Ceci est confirmé physiquement par plusieurs rôles importants joués par l'eau : hydratation des grains de ciment, plasticité du béton à l'état frais et cohésion interne du béton frais [7], [17]... Cependant, l'eau est également un des constituants le plus difficile à doser en fabrication. L'eau d'ajout est facile à doser, compte tenu de la précision des balances. Par contre, elle peut aussi être en partie apportée par les granulats, et donc sera dosée dans la balance à granulats, mais non dans la balance à eau. De même, l'adjuvant et les additions humides apportent au béton des quantités d'eau non négligeables. De plus, les granulats, s'ils ne sont pas saturés, absorberont dans le béton de l'eau (Figure I.23). Par conséquent, la quantité d'eau à ajouter dans une gâchée varie en fonction des apports d'eau des granulats, des additions, des adjuvants et de l'eau absorbée par les granulats. Le Tableau I.10 représente l'ordre de grandeur des différentes origines d'eau incorporée dans un mètre cube de béton. L'imprécision lors de la détermination de ces grandeurs cause l'incertitude du dosage en eau (Tableau I.11).

Origine de l'eau		Quantité par m3 de béton (L)	Prise en compte
Eau du sable	absorbée	de 8 à 20	Se retranche
	interstitielle	de 10 à 70	S'ajoute

Eau des gravillons	absorbée	de 5 à 25	Se retranche
	interstitielle	de 10 à 20	S'ajoute
Eau des additions	absorbée	Considérée = 0	
	interstitielle	de 0 à 10	S'ajoute
Eau des adjuvants		de 0,5 à 5	On ajoute l'eau de dilution et on retranche l'extrait sec
Eau de récupération avec les fines		de 10 à 80	On ajoute l'eau et on retranche les fines
Eau d'ajout		de 50 à 140	Se calcule par différence

Tableau I.10-Origine de l'eau incorporée dans le béton [17]

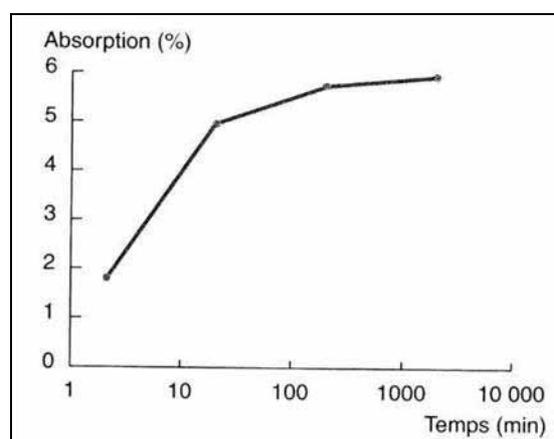


Figure I.23-Absorption progressive de l'eau par un sable à forte porosité [17]

Origine de l'eau	Ecart d'information	Ecart sur l'eau (L)
Teneur en eau du sable	0,5 point	4
Teneur en eau des gravillons	0,5 point	5
Eau d'apport (dosage pondéral)	1%	1,5
Eau d'apport (Compteur et stockage)	2%	3
Eau de récupération (40 litres par exemple)	5% (sur MV)	2
	1% (de dosage)	0,4
Solution d'adjuvant (compteur)	2%	0,5

Tableau I.11-Bilan des incertitudes sur les quantités d'eau selon leur origine [17]

Ce tableau représente un bilan des écarts courants (imprécisions) et leurs répercussions en termes de quantité d'eau (pour 1 m<sup>3</sup> de béton). Tous les écarts ne s'ajoutent pas systématiquement. Toutefois, le risque d'un écart de 10 litres d'eau pour 1 m<sup>3</sup> de béton est tout à fait possible. Un autre incident qui peut causer la variation du dosage en eau, selon Charonnat [17], est l'effet « conducteur de la centrale » : « Lorsque le conducteur de la centrale voit que son indicateur de consistance ne correspond pas à son attente, la seule action possible, immédiate et qui donnera apparemment satisfaction est l'ajout d'eau ». Dans la plupart des cas, le centralier n'a aucun dispositif à sa disposition lui permettant de savoir d'où vient l'incident. Donc, son intervention sur un des paramètres contrôlant

l'ouvrabilité est tout à fait compréhensible. Toutefois, dans le cas où l'eau ne serait pas la cause de l'anomalie, des dommages sur le comportement du béton sont donc à prévoir.

#### ❖ *Conséquences de l'écart de l'eau sur les propriétés d'usage*

Une quantité d'eau en excès provoque immédiatement la variation de la consistance. Cette caractéristique dépend évidemment d'innombrables facteurs, mais la teneur en eau est un des paramètres les plus influents. La Figure I.24 représente la variation de l'affaissement en fonction du dosage en eau d'un béton ordinaire et d'un béton BHP [7]. La variation des paramètres rhéologiques de Bingham est présentée sur le graphique (Figure I.25). Supposons que nous souhaitions fabriquer des bétons dont les consistances sont de 10 cm d'affaissement pour le béton ordinaire (consistance plastique) et de 20 cm d'affaissement pour le BHP (consistance fluide). La variation de 10 L d'eau fait changer complètement la classe de consistance de ces bétons. Concrètement, l'effet de  $\pm 10$  litres d'eau peut engendrer la variation de plus de  $\pm 5$  cm d'affaissement (Figure I.24). Pour éviter un béton trop plastique, Charonnat [17] constate qu'un « bon béton » est tel qu'un excès de 10 litres d'eau n'entraîne pas une variation de la consistance supérieure à 2 cm d'affaissement. Ce n'est pas le cas pour les bétons présentés sur la Figure I.24.

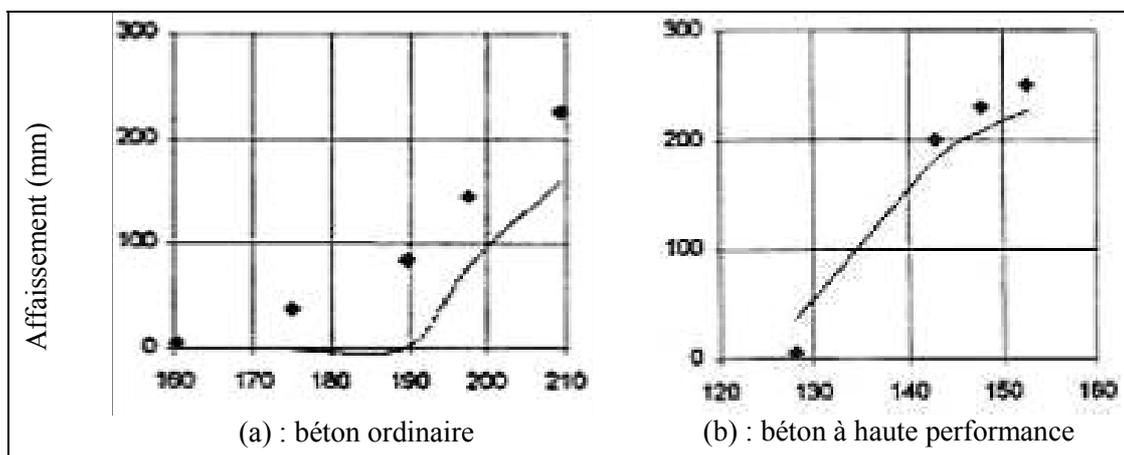


Figure I.24-Influence du dosage d'eau sur la consistance [7]

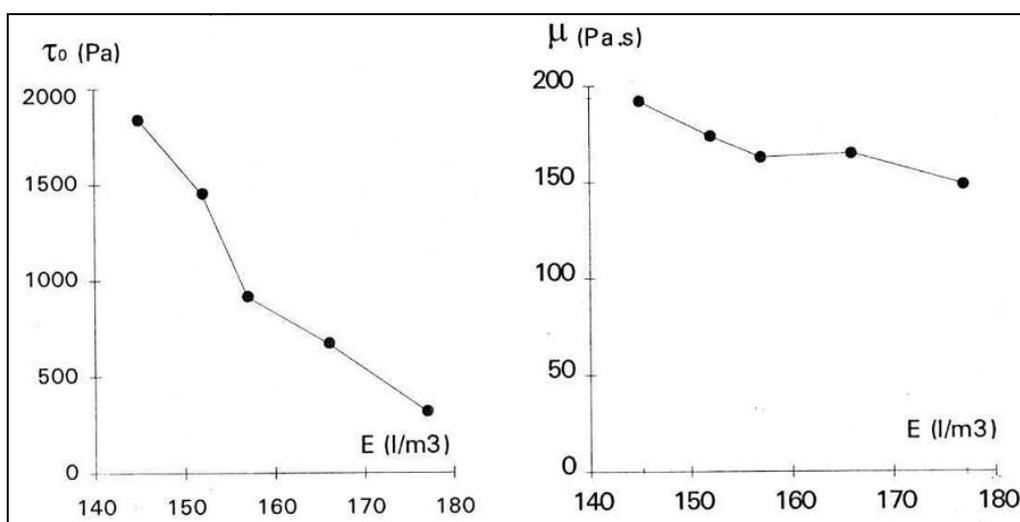


Figure I.25-Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [6]

Au niveau de la résistance mécanique, on peut prédire que l'écart d'eau va modifier la masse volumique du béton, ce qui entraîne le changement du rapport E/C (facteur principal influençant la résistance en compression du béton). En effet, 10 litres d'eau représentent 1 % du volume, ce qui revient à modifier la teneur en ciment de 1% en masse [17]. D'un autre point de vue, un excès d'eau augmente la porosité du squelette solide du béton et donc diminue la résistance en compression. La Figure I.26 présente, par les simulations avec BétonlabPro2 [86], la variation de la résistance en compression en fonction de la quantité d'eau pour trois bétons : un ordinaire, un BAP et un BHP. On constate que la résistance mécanique du béton décroît de manière proportionnelle avec l'accroissement de la quantité d'eau. L'excès de 10 litres d'eau entraîne une diminution de la résistance de l'ordre de 4 MPa pour un béton ordinaire et de 8 MPa pour les bétons de nouvelles générations tels que BHP et BAP. Selon Salembier (cité par Charonnat [17]), 10 % de la quantité d'eau en excès diminue la résistance mécanique d'environ 12 %. Il faut donc garder en mémoire ces observations, et limiter l'ajout d'eau en vue de faciliter la mise en place du béton sur chantier ou d'atteindre la consistance prévue après une certaine durée de transport.

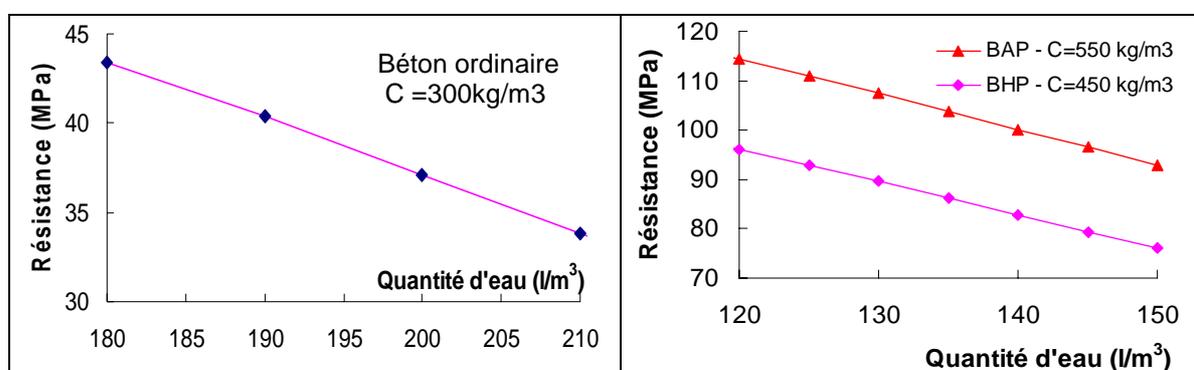


Figure I.26-Influence de la quantité d'eau sur la résistance mécanique du béton [BétonlabPro2]

#### ❖ Conséquences de l'écart d'eau sur l'homogénéité du béton

L'excès d'eau dans le béton peut s'accompagner d'effets secondaires préjudiciables à la qualité du béton. Deux phénomènes très connus sont le ressuage et la ségrégation lorsque le dosage d'eau est excessif, notamment pour les bétons nouveaux (BAP, BHP...). Le succès de ces fabrications dépend de contrôles rigoureux de composition.

#### Ressuage/tassement [82]

Sous l'angle du compactage optimisé, les constituants du béton doivent être organisés de manière à ce que les grains de petite taille remplissent bien les « trous » des grains de taille plus grande. Entre les grains, les contacts directs sont prédominants. Pour maintenir cette structure, la présence de l'eau ne doit pas modifier la compacité du mélange. Cette dernière ne doit donc jouer qu'un rôle de remplissage des porosités de la phase solide du béton. Du point de vue de l'ouvrabilité, un tel mélange est difficile à mettre en œuvre. C'est pourquoi, pour assurer la capacité de mobilisation du mélange, l'eau doit être ajoutée en excès dans le mélange précédemment décrit.

Une fois le béton mis en place et dans la condition de bonne étanchéité du coffrage, une partie de cet excès d'eau remonte sous l'effet de la gravité, ce qui entraîne un tassement naturel du matériau et une pellicule d'eau à la surface supérieure de la pièce coulée : c'est le phénomène de ressuage (Figure I.28).

Toutefois, le phénomène est freiné par la faible perméabilité du réseau poreux du béton frais et par la rigidification croissante du squelette due à l'hydratation du ciment. Une quantité d'eau libre est piégée dans le béton. Celle-ci s'évapore au fur et à mesure et laisse des micro-vides répartis dans le béton durci, responsables d'une chute de résistance en compression (Figure I.27-b). Une autre conséquence préjudiciable du ressuage peut se produire dans le cas où le tassement serait gêné par un obstacle (cage d'armatures par exemple). Les cassures se forment alors dans le béton frais. A l'état durci, ces fissures constituent une voie favorable pour l'attaque des agents agressifs vers les armatures (Figure I.27-a).

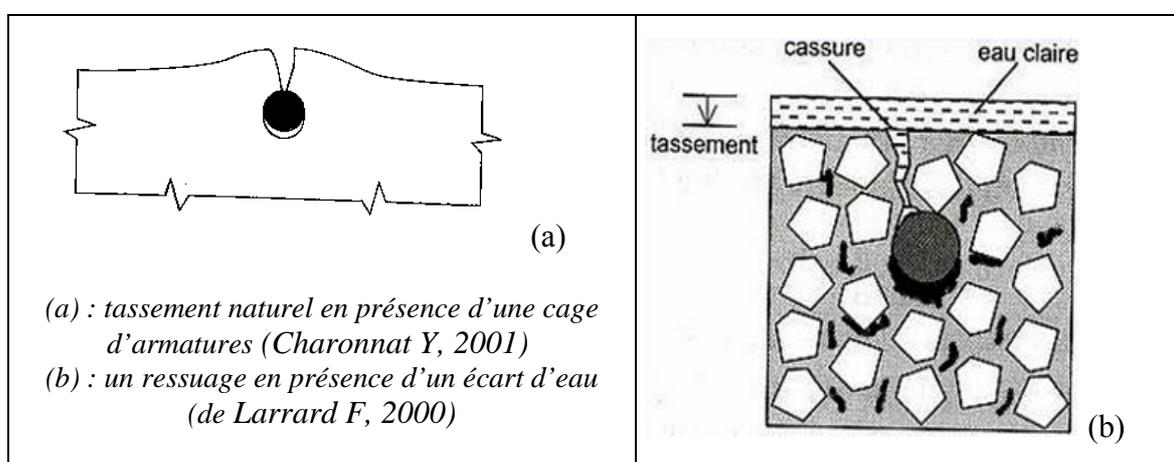


Figure I.27-Mécanisme du ressuage et du tassement



Figure I.28-Dégradation de la surface en uni par ressuage [17]

### **Ségrégation [82]**

On se place maintenant au niveau de la phase la plus grossière du béton : les gravillons. Dans un mélange de gravillons seuls, ces grains s'arrangent sous forme d'empilements dont l'écoulement est rendu difficile par les contacts frottants. Pour ramener les bétons à un affaissement mesurable, les espaces interstitiels de cette phase sont remplis de mortier.

Sous la sollicitation de la force de pesanteur, les grains les plus gros tels que les gravillons tendent à descendre, et à l'inverse le mortier remonte. Ce phénomène est connu sous le nom de ségrégation *statique* du béton. De manière générale, la ségrégation se définit comme une perte d'homogénéité du béton due à la répartition irrégulière des constituants plus grossiers. Le côté *dynamique* de la ségrégation est lié à la manipulation et au transport, voire au malaxage du béton. Une hauteur importante de chute de matériau à la mise en œuvre risque d'entraîner la séparation entre le gravillon et le mortier. Des chocs importants subis par le béton frais au cours du transport ou la forte vibration lors de la mise en œuvre entraînent aussi la ségrégation.

La présence en excès de l'eau augmente le volume du mortier dans le mélange, et réduit les forces de cohésion interne du béton. De ce fait, le béton devient plus sensible à toutes les sollicitations extérieures, ce qui favorise la ségrégation du béton [17].

Les conséquences sont, dans certains cas, sévères : formation de bouchons lors de l'amorçage des pompes, fissuration due à la déformation différée, défauts de parement de l'ouvrage... Afin de limiter ces effets préjudiciables, le béton doit être formulé de manière plus stable en choisissant bien les constituants, notamment la proportion des éléments fins.

### **1.3.2 Impact du malaxage**

A partir des constituants de nature et de dimension variées, initialement séparés, l'objectif du malaxage est de former un mélange homogène : le grain de ciment est entouré par l'eau, le grain inerte est enrobé par la pâte de manière à ce qu'aucun contact « sec » ne soit observé, et les gros constituants sont entourés par les plus petits constituants. Une telle structure permet un mouvement relatif facile entre les éléments constitutifs du matériau et assure par conséquent une bonne maniabilité. Le contact eau-ciment favorise une hydratation complète, et garantit une bonne résistance.

Les recherches dans ce domaine montrent que la dispersion des constituants évolue progressivement au cours du malaxage et que l'obtention d'une structure optimale est conditionnée à la fois par la composition du mélange ainsi que les paramètres caractéristiques du procédé: temps de malaxage, type de malaxeur, protocole de fabrication...

#### **1.3.2.a Mécanisme du malaxage**

Le déplacement individuel des grains dans le malaxeur est mal connu quantitativement. L'étude de l'homogénéité est donc réalisée au moyen de l'analyse granulométrique ou de la mesure de la résistance mécanique d'échantillons prélevés au cours du malaxage.

Des travaux de recherches dans ce domaine permettent de mettre en lumière des mécanismes intervenant dans l'homogénéisation du mélange. En effet, la cinétique de cette dernière est considérée, dans le malaxeur, selon deux niveaux différents (Chopin [44] ; Vandanjon [45]) :

- **homogénéisation à l'échelle macroscopique** : cette phase, correspondant à une échelle d'observation supérieure à la taille des gros granulats, est exprimée par la répartition homogène des constituants dans la cuve du malaxeur. Un mélange triphasique (solide, liquide et gaz) est rapidement obtenu avec la répartition régulière des constituants les plus gros après 10 à 30 s de malaxage ;

- **homogénéisation à l'échelle microscopique** : la deuxième phase, correspondant à une échelle d'observation à la taille des grains de ciment, consiste à disperser les éléments fins dans le mélange. En fait, les particules fines (ciment, addition) forment des agglomérats en présence de l'eau. Leur dispersion nécessite un taux de cisaillement et un temps de malaxage suffisants pour fragmenter ces unités. La dispersion des éléments fins à l'échelle microscopique est donc plus longue que durant la première phase.

### 1.3.2.b Observation de l'évolution d'homogénéité au cours du malaxage

Dans le cadre de la fabrication industrielle du béton, le suivi de l'évolution du béton au cours du malaxage est réalisé à l'aide du wattmètre. Cet appareil, qui est apparu en France des années 60 [37], permet de mesurer en continu la puissance consommée par le malaxeur à partir de l'introduction du premier constituant à la vidange (Figure I.29). Le remplissage des composants accroît la puissance demandée par le moteur d'entraînement du malaxage. Lorsque tous les constituants sont présentés, on observe une homogénéisation de l'ensemble, en particulier de l'eau et du ciment. Cette répartition entraîne une diminution du couple résistant et donc une réduction de la puissance nécessaire pour le malaxage. Au bout d'un certain temps, on a une stabilisation de cette puissance [42].

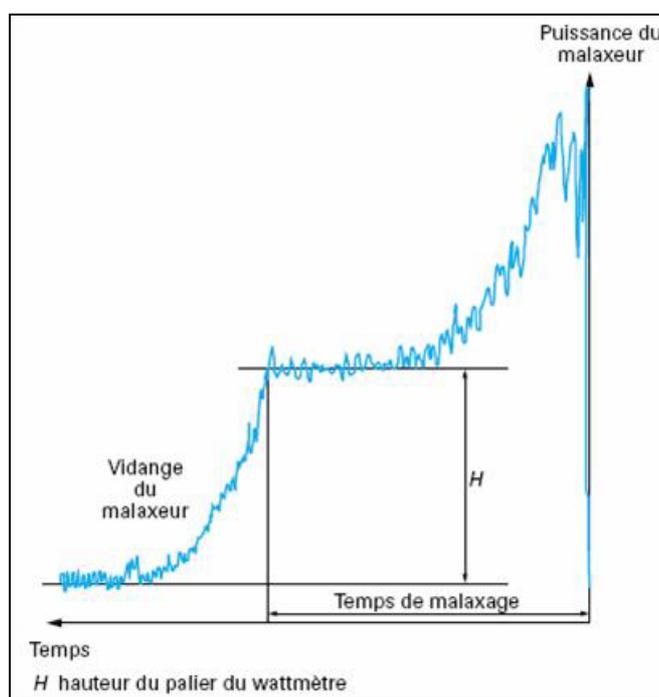


Figure I.29- Représentation d'une courbe de puissance consommée [42]

Dans une étude récente, Chopin [44] a assimilé la cinétique de l'homogénéisation du béton dans le malaxeur à l'évolution de la puissance consommée instantanée, après l'introduction du dernier constituant. La puissance mesurée est donc la superposition des deux composants (Figure I.30) : l'une,  $P_m(t)$ , liée à l'énergie consommée pour la répartition des constituants grossiers dans la cuve et l'autre,  $P_d(t)$ , désigne l'énergie pour la dispersion des éléments fins. Une formule qui contient peu de fines stabilise rapidement lors du malaxage. Par contre, pour un béton contenant beaucoup de fines, la puissance de malaxage se stabilise plus lentement. La courbe de puissance enregistrée en continu permet donc d'observer l'évolution de l'homogénéisation en temps réel du béton dans le malaxeur.

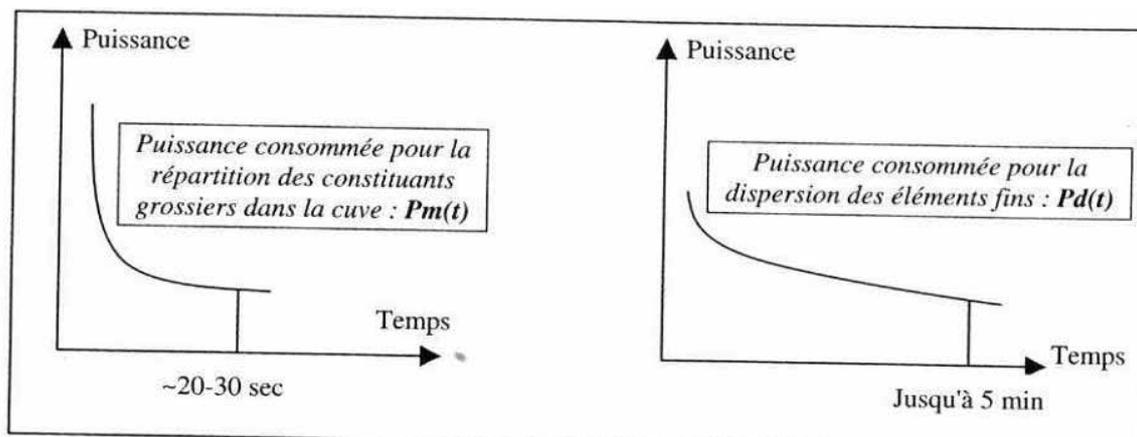


Figure I.30-Représentation des deux composantes supposées de la puissance [44]

### 1.3.2.c Effets des paramètres de malaxage

Pour une même composition, deux bétons peuvent présenter, après avoir été malaxés, des propriétés différentes en fonction du procédé de malaxage dont les paramètres peuvent varier.

#### ❖ Temps de malaxage

C'est un paramètre prédominant pour l'homogénéisation du béton lors du malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et libérer de l'eau et de l'air « piégés ». Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton (Figure I.31).

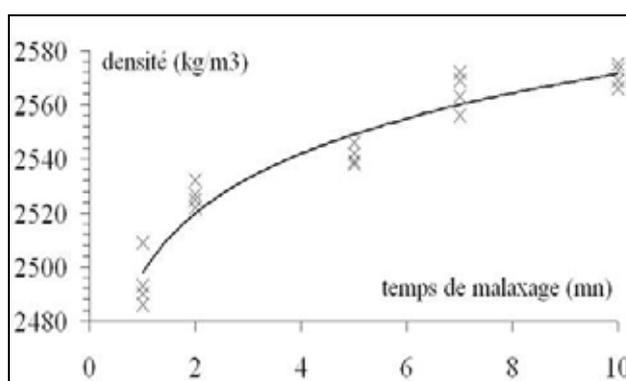


Figure I.31-Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage [92]

En utilisant l'évolution de la puissance instantanée comme indication du degré d'homogénéité du mélange obtenu au sein du malaxeur, Chopin [44] a proposé un critère quantitatif pour le temps de stabilisation «  $T_s$  ». Ce dernier peut être défini en fixant une limite pour la dérivée de la puissance normalisée par la puissance à l'infini :

$$T_s \text{ tel que } \left| \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{P(T_s)}{P_\infty} \right) \right| \leq \varepsilon, \varepsilon \text{ fixé} \quad (\text{I-22})$$

Il est considéré qu'au temps de stabilisation, le malaxage ne fait plus évoluer le mélange. La dispersion des particules fines optimise l'empilement granulaire. La désagglomération augmente la quantité de ciment accessible à la réaction d'hydratation, et donc assure une bonne résistance en compression. L'influence du temps de malaxage sur la résistance est notamment observée lors du malaxage des bétons adjuvés (Figure I.32). Une formule empirique a été recherchée par Chopin dans le cadre de sa thèse, permettant de déterminer la résistance à tout instant «  $t_m$  » :

$$R_c(t) = R_{c\infty} \left( 1 - \alpha \frac{T_s}{t_m} \right) \quad (\text{I-23})$$

où  $t_m$  : temps de malaxage (s)

$T_s$  : temps de stabilisation

$R_{c\infty}$  : résistance à l'infini (600 s de malaxage)

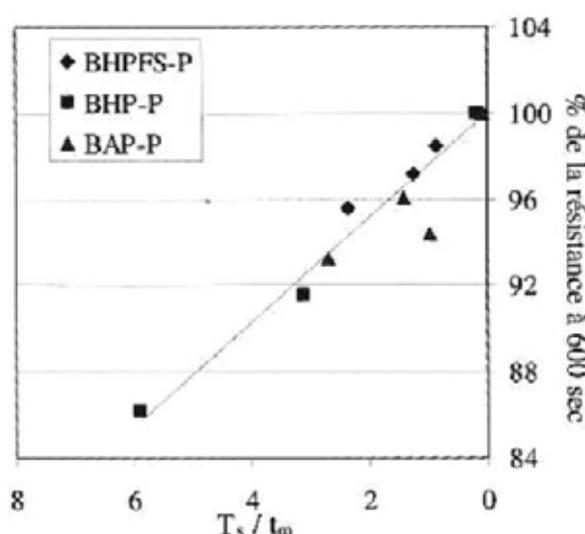


Figure I.32-Evolution de la résistance en compression avec le temps de malaxage

Bien que l'effet du temps de malaxage se manifeste sur l'aspect d'optimisation la microstructure du béton, les paramètres rhéologiques (déterminés au rhéomètre BTRheom) n'évoluent pas toujours de manière significative en fonction du temps de malaxage (Chopin [44], Cazacliu [53]). Parfois, une perte de la maniabilité du béton peut être observée lors de la prolongation du temps de malaxage. Ces phénomènes ont reçu des explications différentes selon les auteurs :

- selon Chopin (2003), l'effet de défloculation importante de l'adjuvant accroît le frottement et donc le seuil;
- selon Vandanjon (2000), l'augmentation de la surface spécifique des particules primaires, c'est à dire des amas qui restent groupés lors des mouvements de cisaillement dans le béton frais tend à accroître le seuil.

Dans le cadre du projet national BAP [53], des expériences ont montré toutefois que l'ouvrabilité du BAP mesurée par l'essai d'étalement est améliorée lorsque le temps de malaxage augmente. Plus le temps de malaxage est long, plus le béton présente un bon étalement (Figure I.33).

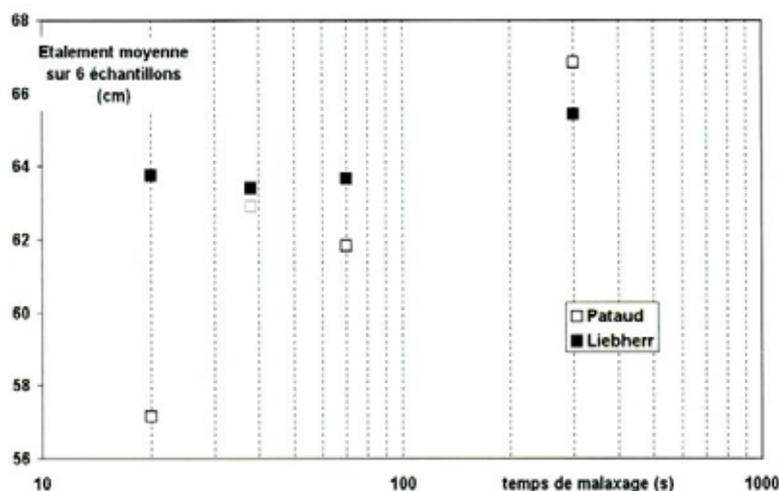


Figure I.33-Evolution de l'étalement en fonction du temps de malaxage [53]

Pour éclaircir le mécanisme physique intervenant, des études plus approfondies semblent être nécessaires.

#### ❖ Type de malaxeur

L'homogénéisation d'un mélange au cours du malaxage est assurée grâce au brassage du système des pales. Ces dernières délivrent de l'énergie pour mettre en mouvement les constituants en vue d'homogénéiser le mélange. La difficulté de cette opération réside dans le fait que les constituants ne présentent pas les mêmes aptitudes d'homogénéisation face à une énergie de brassage (Figure I.34). Dans la pratique, la vitesse de rotation des pales d'un malaxeur est un compromis. Cependant, l'optimum n'est pas le même pour tous les bétons.

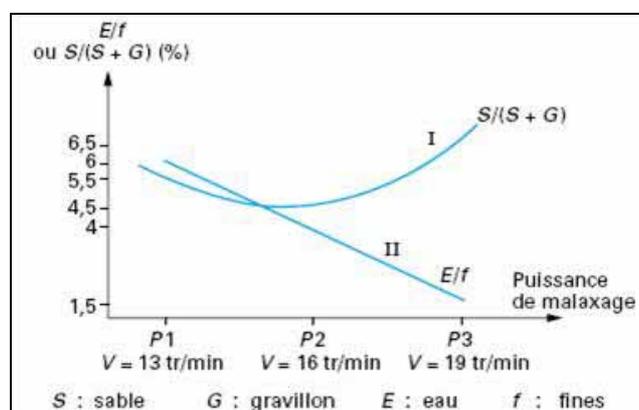


Figure I.34-Influence de la puissance de malaxage sur l'homogénéité d'un produit, exprimée par l'écart-type sur les paramètres de composition [38].

On constate, en effet, que différents malaxeurs, se distinguant par leurs modes de mouvement des pales, ne conduisent pas à la même façon d'homogénéisation d'un mélange [66]. Les conséquences immédiates sont alors une variation possible des propriétés d'une même formule de béton. La bétonnière, par exemple, n'a pas la même capacité de disperser les constituants qu'un mélangeur. Ce problème a été étudié systématiquement par Charonnat et ses collègues en 1987 [46], puis plus récemment dans le cadre du projet national Calibé par Geoffray et al. [47]. Pour les malaxeurs, il est connu depuis longtemps que des pales de tourbillon sont plus efficaces que les pales classiques

pour homogénéiser les constituants. L'expérience réalisée par Cazacliu et Dauvergne [53], en 2002, en est une bonne confirmation. Dans leurs travaux, une formule de BAP a été fabriquée avec deux malaxeurs différents : l'un, Pataud, est de type classique (annulaire avec mouvement de rotation simple) et l'autre, Liebherr, avec deux tourbillons. Les bétons sont prélevés pour effectuer des essais de caractérisation dans les laps de temps variables. Les résultats concernant l'ouvrabilité du béton sont représentés dans la Figure I.33. Ceci permet de constater que le Liebherr est plus efficace que le Pataud pour assurer la consistance du béton produit (pour les temps de malaxage inférieurs à 120 s). Pour un même temps de malaxage, l'étalement du béton fabriqué avec tourbillons est supérieur à celui malaxé avec le malaxeur classique.

La taille du malaxeur peut également conduire à des temps de stabilisation différents lors du malaxage des mélanges de même composition. En effet, l'expérience semble confirmer que les temps de malaxage sont systématiquement allongés sur les malaxeurs de laboratoires. Avant d'être transposés à l'échelle industrielle, des résultats obtenus en laboratoire nécessitent donc certaines modifications. Des études expérimentales sur ce sujet en vue d'obtenir une vérification définitive ont été effectuées dans le cadre de la thèse de Chopin [44]. Ce dernier a comparé les temps de stabilisation de 3 malaxeurs de 125, 330 et 1000 litres respectivement. Des relations empiriques obtenues (éq.26) permettent de constater que le temps de stabilisation est d'autant plus long que la capacité du malaxeur est faible.

$$T_{s(1m3)} \approx 0,703 T_{s(330L)} \quad \text{et} \quad T_{s(330L)} \approx 0,61 T_{s(125L)} \quad (\text{I-24})$$

#### ❖ *Protocole de fabrication*

Lors du malaxage, le béton se structure progressivement vers un état homogène optimal. Le degré d'homogénéité à un instant, pendant le malaxage, dépend de l'histoire de celui-ci à tout instant auparavant. Par conséquent, l'état d'hétérogénéité du mélange au démarrage du malaxage influence évidemment le temps nécessaire pour arranger les constituants dans une structure optimisée. Le temps de malaxage peut donc être optimisé avec un mode de remplissage spécifique. On sait que, pour des bétons traditionnels et dans un cycle de malaxage en industrie, l'introduction du ciment doit être légèrement retardée par rapport au granulat. Un malaxage à sec est toujours bénéfique à l'efficacité du brassage, l'eau est incorporée après les constituants solides. Enfin, les adjuvants sont généralement introduits avec l'eau [66].

Toutefois, aucune loi générale ne permet de définir de manière optimale un protocole de fabrication. L'optimisation du processus est empirique. Par exemple, selon certains auteurs, lorsque l'eau est introduite en pluie sur l'ensemble des constituants solides, cela permet d'obtenir une homogénéisation beaucoup plus rapide [66]. Cependant, des résultats allant dans le sens inverse ont été trouvés récemment au LCPC [94]. Le moment et le mode d'introduction de l'adjuvant ont également été étudiés. Une des idées est de délayer ce constituant dans le malaxeur. En fait, l'introduction retardée de 10 minutes après l'introduction d'eau peut améliorer la rhéologie de la pâte de ciment [69].

Une nouvelle technique de fabrication a été étudiée lors des dernières années. Il s'agit de malaxer les constituants en deux phases. La première consiste à homogénéiser une partie de l'eau avec les granulats et le ciment. La deuxième phase homogénéise ce mélange en ajoutant le reste d'eau et les autres constituants. A.K.Tamimi [67] explique que cette méthode permet d'enrober la surface des granulats par une couche de pâte de ciment à faible E/C (lors de la première phase de malaxage). Ceci conduit à améliorer la liaison

granulat-pâte et donc la résistance du béton, vis à vis d'un malaxage classique, à des mêmes dosages en eau et en ciment. La couche mince de pâte qui enveloppe les granulats durant la première phase joue le rôle de lubrifiant pour les granulats dans la deuxième. Ceci augmente alors la mobilité du mélange et accroît donc l'ouvrabilité du béton. L'expérience réalisée par cet auteur montre que le malaxage en deux phases permet d'augmenter la résistance en compression d'environ 15% pour le béton ordinaire, et de 12,5% pour le béton contenant de la fumée de silice. L'affaissement au cône d'Abrams de ces bétons est également fortement amélioré par rapport à la méthode de fabrication conventionnelle. Dans son travail, l'eau (25% masse du ciment) est introduite pour saturer les surfaces des grains du sable dans la première phase (Figure I.35).

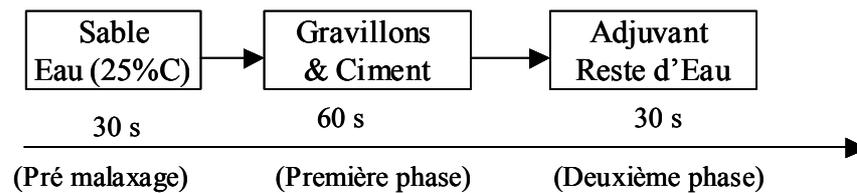


Figure I.35-Malaxage en deux phases [67]

Toutefois, aucune exigence n'oblige de fixer cette quantité. L'étude de Rougeron et ses collègues [68] sur le mortier et le béton montre qu'à dosage total en eau constant, il existe une humidité optimale du sable (dans la première phase) permettant d'obtenir une meilleure résistance. Dans le cadre de ses études, cette humidité pour le mortier et le béton est de 12 et de 10 %, respectivement. L'influence de l'humidité du sable se manifeste surtout pour les résistances à jeune âge ; elle est moins significative à long terme.

## I.4. Moyens de contrôle de la régularité de qualité du béton

La synthèse ci-dessus a montré que lors de la fabrication, plusieurs facteurs peuvent affecter la qualité des bétons produits. Le contrôle est l'opération dans laquelle les différentes démarches sont prises en compte pour maîtriser les facteurs qui entraînent des variations des propriétés prescrites.

### I.4.1 Réglementation normative

La norme européenne NF EN 206-1[39] s'applique aux bétons et à la production du béton prêt à l'emploi. Cette norme distingue deux types de béton, béton à propriété spécifiée (BPS) et béton à composition prescrite (BCP), pour lesquels la fabrication est soumise à des contrôles dont la nature et les fréquences sont précisément décrits dans cette norme. Les fournisseurs des BPE doivent effectuer à la fois le contrôle de conformité et le contrôle de production.

Le contrôle de conformité a pour but de vérifier que la centrale peut produire des bétons d'exigences (composition et/ou propriétés) conformes aux règles de reconnaissance de conformité pré-adoptées. Le contrôle de conformité fait partie intégrante du contrôle de production. Le producteur doit définir alors :

- les plans et lieux d'échantillonnage de façon à ce que la composition et les propriétés ne subissent pas de modification significative ;
- les familles de bétons ;
- la nature et la fréquence des essais établissant la conformité.

En cas de non-conformité, les mesures nécessaires suivantes doivent être prises en charge par le producteur :

- analyse et élimination des causes d'erreur ;
- exécution des actions correctives ;
- information du prescripteur et de l'utilisateur pour éviter les dommages ou limiter leurs conséquences ;
- traçabilité assurée de toutes ces opérations.

Le contrôle de production est mis en œuvre sous la responsabilité du producteur et a pour but de fabriquer tous les bétons soumis aux spécifications préconisées par la norme en vigueur (NF EN 206-1). Le système de contrôle de production regroupe toutes les procédures et les instructions internes à la chaîne de production, d'une part, et les fréquences d'essais et d'inspections prévues par le producteur, d'autre part. Le producteur prend donc toutes les mesures pour assurer la conformité du béton aux exigences spécifiées :

- la sélection des matériaux ;
- la formulation du béton (au cas des BPS) ;
- le suivi des conditions de fabrication ;
- les essais et inspections (constituants, bétons et matériels de fabrication) ;
- la maîtrise des résultats d'essais sur constituants, sur bétons frais et durcis et sur matériels.

#### **1.4.2 Enregistrement des paramètres de fabrication**

L'enregistrement des paramètres de production permet de détecter le fonctionnement des matériels dans la centrale et de rendre possible l'amélioration de la régularité de la qualité du béton. Cette démarche a lieu en France depuis quelques dizaines d'années. Dès 1967, Durrieu [80] a montré l'intérêt du suivi de la fabrication et du contrôle des bétons. Les contrôles traditionnels consistent à confectionner un nombre restreint d'éprouvettes, peu représentatif vis à vis de la quantité des bétons mis en place sur le chantier. Charonnat et Tricart [81], en utilisant des informations enregistrées sur une centrale à béton, ont pu détecter des gâchées à éliminer. Une méthode complète de dépouillement a été proposée par Brachet et al. [73]. Les paramètres à enregistrer sont divers :

- pesées des constituants ;
- durée et ordre du dosage des composants ;
- humidités des granulats ;
- puissance consommée par le malaxeur.

Les enregistrements des pesées permettent de vérifier à tout moment si les matériels de dosage respectent les tolérances imposées par les normes. On peut également obtenir des informations sur les qualités du béton durci sans attendre 28 jours, en analysant a posteriori les fluctuations des paramètres de composition, même si la qualité finale du béton dépend aussi des conditions de mise en œuvre et de cure. La durée du dosage des composants peut expliquer certaines anomalies dans le fonctionnement des bascules. Notamment, l'enregistrement continu de la puissance consommée par le malaxeur peut dégager plusieurs informations. En effet, le wattmètre possède six grandeurs particulières permettant de caractériser un cycle de fabrication d'une gâchée (Figure I.36) :

- la vitesse d'accroissement de la puissance lors du remplissage du malaxeur : celle-ci donne une information sur la régularité du remplissage et du fonctionnement des matériels dans la chaîne de dosage ;

- le pic maximal de la courbe : cette valeur est liée au volume de matériau contenu dans le malaxeur, à condition que le remplissage soit toujours effectué de la même façon ;
- la vitesse de décroissance de la puissance : cette information désigne l'efficacité du malaxeur pour homogénéiser le mélange ;
- le niveau de la puissance stabilisée : ce palier de puissance est corrélé au dosage en eau du béton (toutes choses égales par ailleurs) ;
- la vitesse de décroissance lors de la vidange : cette grandeur informe sur l'efficacité du système de vidange ;
- le niveau de puissance résiduelle après la vidange : celui-ci peut indiquer si du matériau est resté dans le malaxeur.

Une courbe de malaxage, obtenue sur plusieurs gâchées, renseigne sur diverses perturbations liées aux dosages ou/et au fonctionnement des automatismes. La Figure I.37 représente différents types de courbes du wattmètre mettant en évidence des perturbations du chargement des constituants.

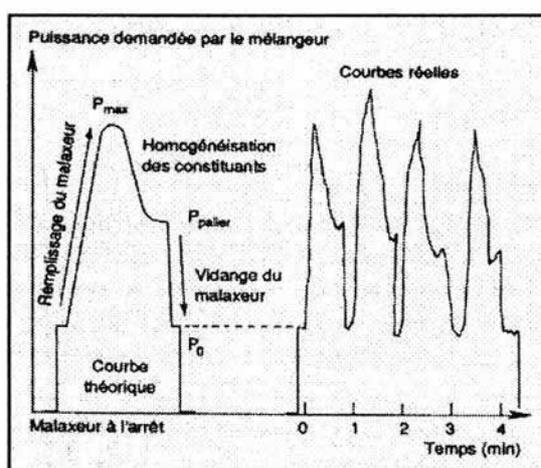


Figure I.36-Courbe de wattmètre réel et théorique [42]

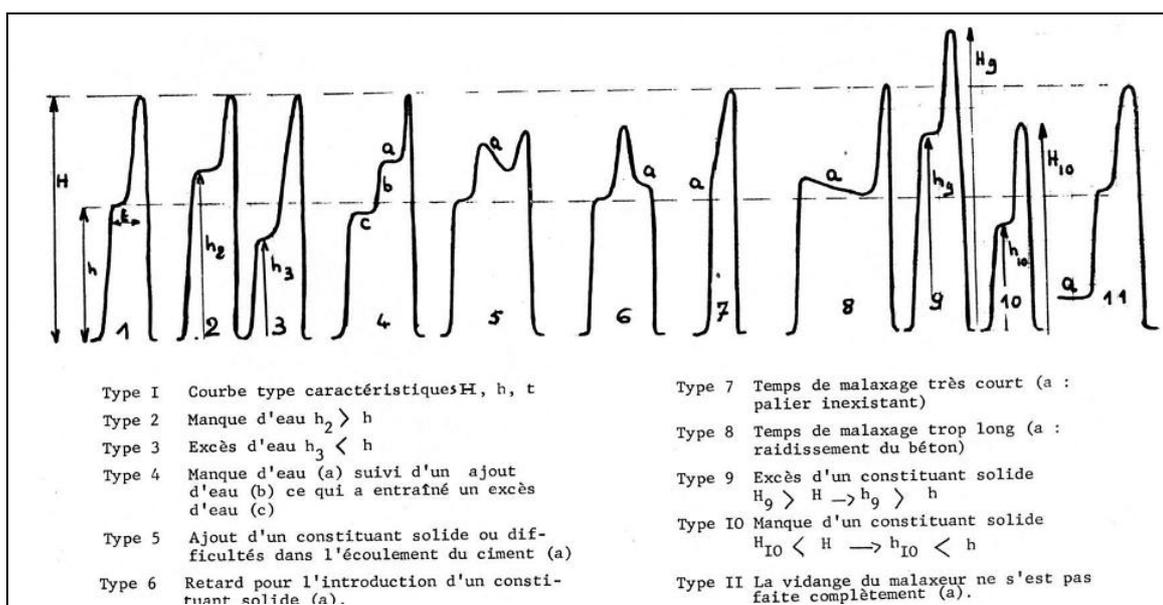


Figure I.37-Différents types de courbe de malaxage [73]

L'enregistrement des paramètres de production permet d'augmenter la traçabilité des bétons produits et de l'opération de fabrication car il peut être exploité à tout moment, à la fois par le producteur, le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre...

### **1.4.3 Contrôle de la teneur en eau du granulat**

Une bonne connaissance de l'humidité des granulats permet de bien doser l'eau lors de la fabrication d'une gâchée. L'utilisation des humidimètres permet de suivre en continu l'évolution de la teneur en eau des sables.

#### **1.4.3.a Principales méthodes de mesure de la teneur en eau**

Différentes techniques de mesure de la teneur en eau des granulats ont été étudiées dans le cadre du projet national Calibé [62] : des méthodes traditionnelles (méthodes gravimétriques) et des méthodes plus rapides (électriques, spectrométriques, chimiques, cf. Tableau I.12). Les principes de mesure de ces méthodes sont représentés dans la suite.

Méthode	Technique de mesure
Gravimétrique	Séchage à l'étuve
	Séchage à la poêle
	Séchage au four micro-onde
Electrique	Résistivité
	Permittivité
Spectrométrie	Radar
	Micro-onde
	Infra-rouge
	Neutron lent
Chimique	Pression de gaz

Tableau I.12-Principales méthodes de mesure de la teneur en eau [62]

#### **❖ Méthodes gravimétriques**

Les méthodes gravimétriques consistent à la double pesée du solide à l'état humide et à l'état anhydre, obtenu par la dessiccation thermique. La durée de séchage est d'environ 2 heures dans l'étuve pour obtenir une masse sèche constante. Ce temps peut être réduit à 15 minutes en utilisant la poêle à frire, ou à 10 minutes au four micro-ondes. Malgré cette diminution, le temps de séchage est encore long, compte tenu du besoin d'évaluation immédiate de la teneur en eau. Cet inconvénient conduit à développer d'autres méthodes plus rapides : méthodes électriques, spectrométriques et chimique. La méthode gravimétrique reste néanmoins la référence pour le calibrage des autres méthodes.

#### **❖ Méthodes électriques**

Les matériaux granulaires sont des corps non métalliques. Ceux-ci se comportent comme des isolants à l'état sec, dont la résistivité et les caractéristiques diélectriques sont connus. En présence d'eau, ces propriétés électriques varient de manière sensible et sont fonction univoque de la teneur en eau des matériaux. Les méthodes électriques consistent donc à mesurer la résistance ou la capacité d'un condensateur entre deux électrodes noyées dans les matériaux pour informer sur les humidités des granulats.

Les facteurs perturbateurs des méthodes électriques sont liés à la structure des matériaux, à la nature de l'eau et à la température.

#### ❖ *Méthodes spectrométriques*

Les méthodes spectrométriques consistent à mesurer l'absorption d'une onde électromagnétique transmise dans le matériau solide ou réfléchi à la surface. La différence entre l'absorption propre de nature sèche des matériaux et celle en présence d'eau permet de remonter à l'humidité des matériaux. Il existe alors deux types de mesure : par transmission ou par réflexion. Les ondes peuvent être émises dans le domaine du radar, des micro-ondes, ou des infrarouges. L'utilisation des sources radioactives produisant des rayonnements gamma, bêta ou des neutrons lents est possible, à condition de prendre certaines précautions.

La mesure par réflexion d'un rayon infrarouge n'est représentative de l'humidité moyenne que dans les cas d'échantillons de faible épaisseur ou de répartition granulaire homogène. La mesure du ralentissement neutronique peut être perturbée par la variation de la composition chimique ou de la densité sèche du matériau. Une onde de micro-ondes est influencée par la granulométrie et la densité des matériaux.

#### ❖ *Méthode chimique*

La méthode chimique consiste à mélanger dans un récipient clos une masse connue de matériau humide avec du carbure de calcium en excès, qui se combine avec l'eau pour former de l'acétylène. Cette quantité d'acétylène est proportionnelle à la teneur en eau du matériau soumis à un essai. En mesurant la pression d'acétylène, on a l'information sur le volume de gaz et donc la teneur en eau du matériau.

#### *1.4.3.b Mode de mesure et précision*

Les mesures d'humidité utilisant les techniques électriques ou spectrométriques peuvent s'appliquer aux matériaux au repos (mesure statique) ou en écoulement (mesure dynamique). Des facteurs conditionnant la réponse des sondes peuvent varier avec le mode de mesure, ce qui nécessite des calibrages différents.

Dans le cadre du projet Calibé [62], toutes les mesures de l'humidité sont effectuées dans le laboratoire et en régime statique. Une étude comparative de la précision des différentes méthodes est réalisée (Tableau I.13). Sur l'étendue d'humidité de 3 à 10 points de pourcentage, il est constaté que l'utilisation d'une sonde micro-ondes permet d'obtenir une meilleure précision. La mesure par résistance électrique ou par réaction chimique ne donne pas de résultats satisfaisants.

Le calibrage d'une sonde en mode statique peut poser des problèmes lors de son utilisation quand les matériaux sont en écoulement. En effet, une réponse différente selon le régime d'écoulement a été observée lors de la mise au point de l'humidimètre capacitif LPC autonettoyant [77]. Des écarts systématiques sont trouvés ; ils dépendent du type de matériau, mais sont généralement supérieurs à 1,5 %. Pour mieux évaluer les conditions d'utilisation dans les centrales industrielles, deux sondes, capacitive et micro-ondes, ont été choisies pour des calibrages en régime dynamique, dans le cadre du projet national PN-BAP [70]. Ces sondes étaient installées à deux positions : sur le doseur de la trémie et en position de jetée du matériau (Figure I.38). Les deux sondes sont testées avec des sables (0/3) roulés ou broyés et des granulats (2/4 et 10/14) (Figure I.39). Les mesures ont été

faites à trois teneurs en eau différentes, trois mesures étant effectuées à chaque valeur de teneur en eau. Le calcul de la courbe d'étalonnage est réalisé par l'électronique de l'appareil en test. Les mesures de l'humidité par ces sondes, réalisables pour les sables, sont toutefois difficiles voire impossibles à effectuer avec gravillons (10/14). Ceci s'explique par la porosité importante de ce type de matériau. La précision (au sens de l'écart type) de deux sondes est comparable, de l'ordre de 0,5 %.

Méthode de mesure	Etendue de mesure	Précision
Séchage	0% - saturation	+/-1.0%
Résistivité	3% - 12%	Faible précision
Permittivité	Sable: 3% - 10% Gravillon: 4% - 10%	+/-1.0%
Micro-onde	3% - 10%	+/-0.5%
Infra-rouge	0% - 30%	+/-2.0%
Neutron lent	1% - saturation	+/-2.0%: $t_{\text{mesure}} = 1\text{min}$ +/-1.0%: $t_{\text{mesure}} = 4\text{min}$
Chimique	0% - 12%: super speedy 0% - 20%: speedy	+/-3.0%

Tableau I.13-Précision et étendue de mesure (CALIBE - [62])

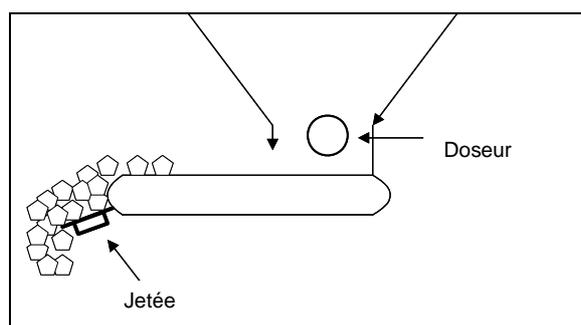


Figure I.38-Positions installées des dispositifs de mesure [70]

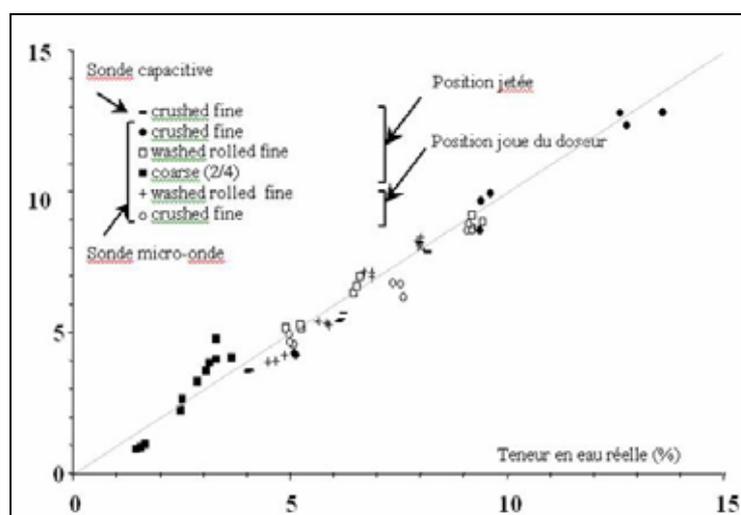


Figure I.39-Calibrage des sondes en régime dynamique [70]

Il faut noter que le dérèglement des sondes peut affecter cette précision. Ainsi, lors des essais de vérification, réalisés après étalonnage, plusieurs valeurs d'humidité mesurées par les sondes étaient différentes de celles de référence. De plus, la précision semble être meilleure lors de l'installation de la sonde dans la jetée des matériaux. Cette position permet d'effectuer les mesures dans le flot de matériau et d'éviter le colmatage, notamment avec les matériaux riches en éléments fins.

#### 1.4.4 Contrôle de l'humidité du béton frais dans le malaxeur

Une autre possibilité de contrôle du dosage en eau consiste à mesurer l'humidité du béton frais dans la gâchée courante. Certaines techniques de mesure, développées pour les granulats, restent valables pour le béton frais. De plus, des travaux des années 60-70 permettent de constater que le wattmètre peut également servir comme humidimètre à béton.

Plus récemment, quatre types de sonde (wattmètre, sonde résistive tournante, sondes micro-ondes fixes et tournantes) sont utilisées pour mesurer la teneur en eau du béton à la station d'essais de matériels routiers (SEMR), dans le cadre des travaux de l'axe 3-1 du projet national BAP [64, [71]. L'objectif de cette étude est de qualifier l'aptitude des systèmes de mesure à déterminer les variations de teneur en eau lors du malaxage. Trois configurations d'introduction d'eau ont été effectuées (en une seule fois, en trois fois et en palier de 10 L). Pour chaque fabrication, la teneur en eau des granulats est contrôlée et prise en compte. L'ensemble des résultats expérimentaux permet de déterminer la précision de chaque type de sonde, résumée dans le Tableau I.14.

Sondes \ Plages	0 – 60 L/m <sup>3</sup>	125 – 155 L/m <sup>3</sup>	165 - 195 L/m <sup>3</sup>
Micro-ondes fixe	<i>faible précision</i>	<i>faible précision</i>	<i>faible précision</i>
Wattmètre	<i>faible précision</i>	<i>faible précision</i>	+/-7,5 L/m <sup>3</sup>
Résistive tournante	+/-7,5 L/m <sup>3</sup>	<i>faible précision</i>	<i>faible précision</i>
μ-onde tournante	<i>faible précision</i>	+/-5,0 L/m <sup>3</sup>	<i>faible précision</i>

Tableau I.14-Précision des sondes différentes en fonction des plages de dosage d'eau

La sonde micro-onde fixe n'est en général pas suffisamment précise pour la mesure de l'humidité du béton. Une explication donnée par les auteurs est que le brassage des pales du malaxeur rend la réponse de cette sonde très bruitée. La sonde résistive peut obtenir une précision de 7,5 L/m<sup>3</sup> pour une plage de dosage en eau faible (0-60 L/m<sup>3</sup>). Cette sonde n'est clairement pas intéressante pour le BPE où le dosage en eau est supérieur. Le wattmètre a la même précision dans une certaine plage de dosage (165-195 L/m<sup>3</sup>). Le meilleur résultat est obtenu avec la sonde micro-onde tournante, mais la plage de dosage d'eau reste faible et ne couvre pas la quantité d'eau nominale. Malheureusement, la totalité des essais dans cette étude a été effectuée sur une seule formule de BAP, et en utilisant un granulats concassé ayant un coefficient d'absorption d'eau important (entraînant un volume total d'eau absorbée par les granulats égal à 60 L/m<sup>3</sup>). Celui-ci peut influencer le recouvrement de la plage de précision pour les sondes micro-onde et résistive qui mesurent le dosage d'eau total.

Une autre étude, réalisée par Brunquet et Cazacliu [78], avait pour but de chercher un matériel évolué, s'adaptant aux fabrications industrielles des BAP, capable de mesurer en ligne l'humidité du béton dans le malaxeur. Trois systèmes de mesure (wattmètre, sonde de teneur en eau à micro-ondes tournante, capteur de force) ont été testés avec trois types de

formules BAP différentes. Les bétons ont été fabriqués dans une usine de préfabrication dont les matériels et le protocole étaient comparables à ceux d'une centrale BPE. Les résultats (Figure I.40) montrent que, dans une plage de dosage 180 – 204 L/m<sup>3</sup> (courante pour le BAP), le capteur de force peut estimer le dosage en eau dans le malaxeur avec la précision de 1,2 L/m<sup>3</sup>. La sonde à micro-ondes peut avoir une précision de 2,5 L/m<sup>3</sup> dans une plage de validité plus large (170 – 204 L/m<sup>3</sup>), au prix d'une interprétation innovante des signaux. Le wattmètre, dans une même plage de dosage en eau, est moins précis (précision de 4,5 L/m<sup>3</sup>), à moins d'une exploitation particulière du signal qui lui confère une précision de 2,5 L/m<sup>3</sup>.

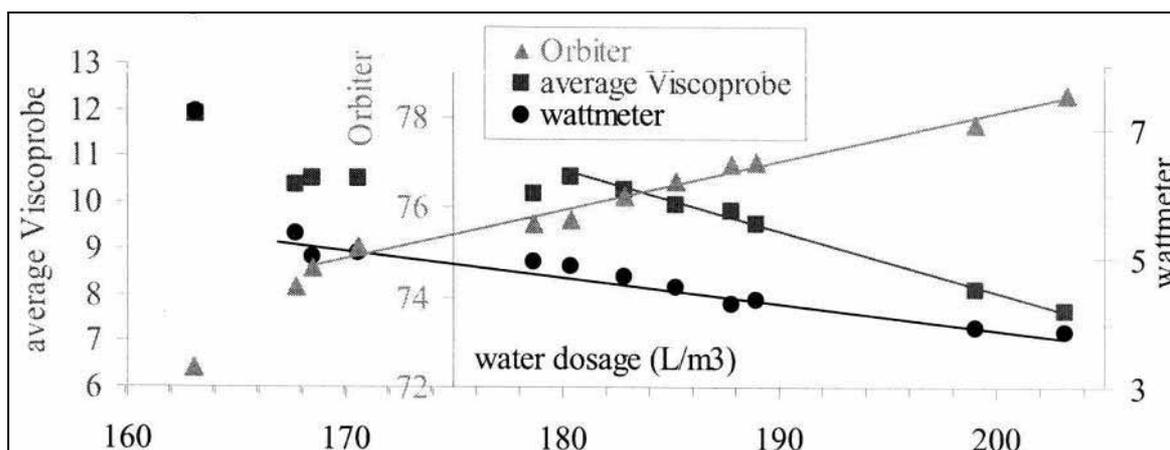


Figure I.40 - Evolution des indications des signaux en fonction du dosage en eau [78]

#### I.4.5 Contrôle de consistance effectuée sur la gâchée courante

L'ouvrabilité du béton est affectée par plusieurs facteurs dont l'eau est un des plus influents. Pour permettre le contrôle de l'ouvrabilité en ligne, d'une part le dosage en eau doit être maîtrisé, et d'autre part l'ouvrabilité doit être mesurée directement dans le malaxeur.

Le wattmètre est sans doute un bon indicateur pour la consistance du béton. Cet appareil est connu dans le milieu industriel du béton prêt à l'emploi depuis 1966, grâce aux travaux de Delude et Ambrosino [72]. Le wattmètre est la version évoluée de l'ampèremètre, qui était utilisé antérieurement pour le même l'objectif d'ajustement de la consistance du béton. Le wattmètre a été ensuite considéré comme un moyen permettant le contrôle de l'ouvrabilité dans les ouvrages (Brachet et al. [73] - 1976, Gorisse [74] - 1978, Teillet et al. [42] - 1991). Des études plus récentes au LCPC [44] ont permis d'établir une corrélation entre le niveau de stabilisation du wattmètre et la rhéologie du béton produit. Cazaciu et Dauvergne [53] ont retrouvé ces corrélations dans l'étude de la maniabilité initiale du béton autoplaçant. En fait, leurs expériences montrent qu'avec une formule nominale donnée, la variation de la puissance stabilisée peut informer sur la variation de la consistance du béton dans le malaxeur (Figure I.41).

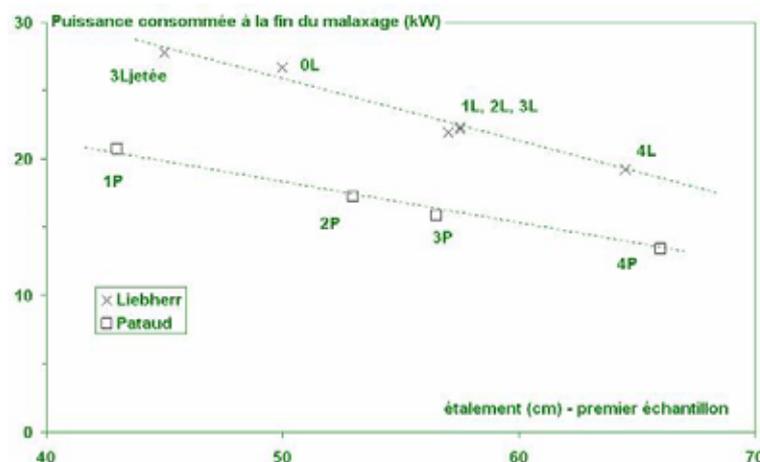


Figure I.41-Corrélations entre la puissance stabilisée et l'étalement du béton [53]

Le contrôle de l'ouvrabilité lors de la fabrication peut également être réalisé à l'aide d'autres types de matériels dont le servo-ouvrabilimètre du CEBTP<sup>(2)</sup> – cité par Cormon [37] – est un exemple. Cet appareil est basé sur la mesure de la vitesse de rotation du moteur du malaxeur. Pour une quantité de béton donnée, le moteur subit une chute de vitesse d'autant plus forte que le béton malaxé est de consistance plus ferme. La vitesse mesurée à tout moment du malaxage permet d'ajouter l'eau de manière automatique tant que la vitesse de consigne n'est pas atteinte (Figure I.42). Dans une autre étude en vue de contrôler le procédé de fabrication du béton, Alasalmi [76] a mis un capteur de force dans un malaxeur à tourbillon pour mesurer la pression exercée par le béton frais lors du malaxage. Cet auteur a montré que la pression mesurée est corrélée au temps d'écoulement du VB test, pour les bétons ayant des rapports e/c compris entre 0,3 et 0,6. Toutefois, des expériences supplémentaires doivent être effectuées pour permettre de conclure que l'ouvrabilité pourra être mesurée au moyen de la seule indication d'un capteur de pression.

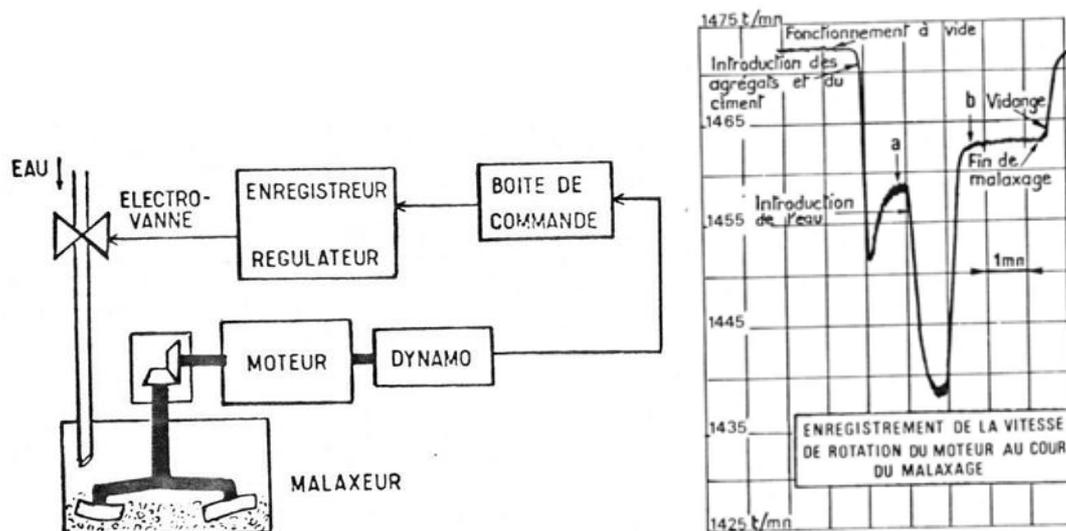


Figure I.42-Schéma de principe de fonctionnement du servo-ouvrabilimètre [37]

On peut également citer certains procédés de mesure en ligne de l'ouvrabilité en dehors de la fabrication (transport et mise en œuvre) ayant pour but la maîtrise de la régularité de

<sup>2</sup> Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics

cette propriété. Bouyat [75], par exemple, a développé dans les années 80 une sonde dite « Poisson de Bouyat », visant à mesurer une caractéristique du béton assimilable à une cohésion interne dans la goulotte de déchargement d'une bétonnière portée. Cette sonde était placée dans le lit du béton au moment de la vidange des bétonnières portées. Des capteurs implantés dans le corps de la sonde permettaient de mesurer les efforts exercés sur la pointe et sur la paroi latérale de la sonde (Figure I.43). Des essais réalisés ont permis à l'auteur de conclure que les deux types d'efforts (celui de pointe et de frottement) sont influencés par la vitesse et l'épaisseur de la veine de béton ainsi que par sa composition. En installant des capteurs pour mesurer la vitesse et l'épaisseur, l'effet de la consistance du béton était entièrement déduit. L'objectif visé en utilisant cette sonde était de corriger la consistance du béton en ajoutant de l'eau dans la bétonnière et d'ajuster la puissance de vibration du béton pour assurer le serrage optimal de ce dernier dans le coffrage. Récemment, Amziane et al. [61] ont eu l'idée d'évaluer l'ouvrabilité du béton fabriqué dans un malaxeur de type bétonnière portée en analysant cette dernière comme un rhéomètre. En effet, la variation du couple nécessaire pour mettre la toupie en rotation était proportionnelle à la vitesse de rotation pour un béton donné. Les deux paramètres (pente et ordonnée à l'origine) de la courbe « Couple – Vitesse » de la bétonnière étaient variés lors du changement de la composition du béton. Ces observations conduisent les auteurs à comparer les paramètres mesurés avec la bétonnière au seuil de cisaillement et à la viscosité du béton mesurés au rhéomètre ICAR. Le résultat a montré que ce procédé de mesure permettait de prédire le seuil de cisaillement mais non la viscosité (Figure I.44).

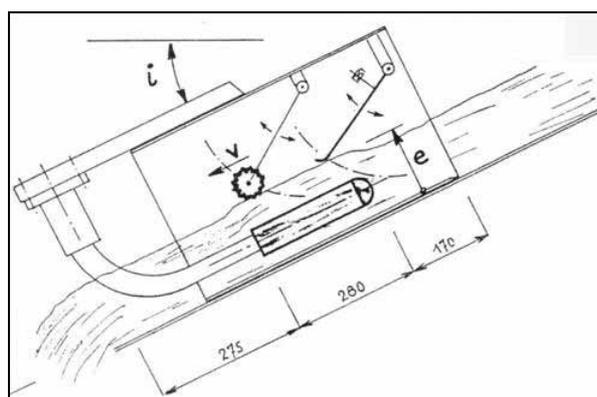


Figure I.43-Sonde à mesurer de la consistance du béton dans la goulotte de déchargement [75]

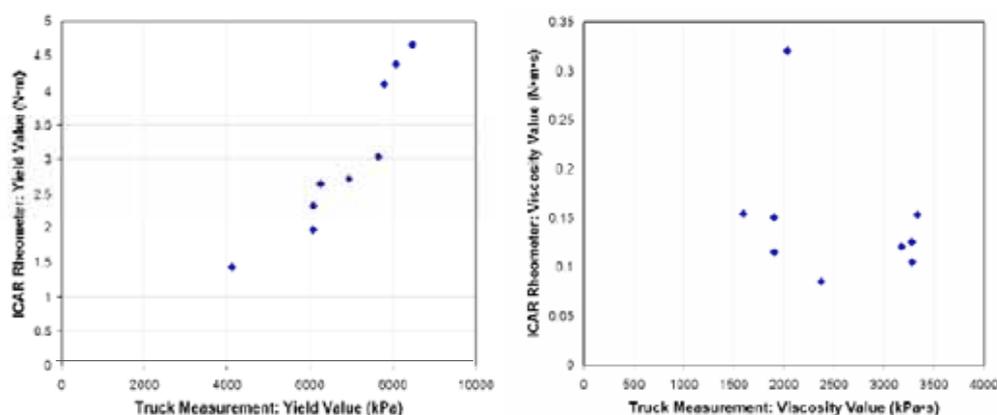


Figure I.44-Corrélation entre les mesures au rhéomètre et celles effectuées à la bétonnière [61]

## I.5. Besoins en recherche et objectifs de la thèse

Nous avons fait une revue générale du béton, de la formulation à la fabrication dans les centrales industrielles. La formulation, se basant sur les modèles qui relient la structure interne aux propriétés d'usage du béton, permet de déterminer une composition optimale tout en satisfaisant les conditions posées dans le cahier des charges. Dans la pratique, ce sont deux propriétés, l'ouvrabilité et la résistance mécanique, qui doivent être mises au point en premier lors de la formulation. En effet, l'ouvrabilité contrôle la mise en œuvre sur chantier tandis que la résistance mécanique conditionne la capacité portante de l'ouvrage. L'ouvrabilité est sensible au dosage en eau, en adjuvant et en fines. La résistance du béton est essentiellement contrôlée par la qualité du ciment et le rapport E/C. La fluctuation de ces paramètres de composition engendre des variations des propriétés prescrites.

Les bétons sont aujourd'hui fabriqués dans les centrales BPE et en usine de préfabrication. Les fournisseurs du béton doivent s'assurer que leurs produits sont à l'image d'une composition prescrite et/ou présentent les propriétés désirées. La fabrication du béton consiste à doser les constituants stockés au préalable, à partir d'une formule nominale, et puis à les mélanger, grâce à un malaxeur, permettant d'obtenir une bonne homogénéité. Nous avons vu que la difficulté de la fabrication réside dans le caractère variable des paramètres d'état des constituants (humidité des granulats, teneur en fines, classe et nature du ciment, qualité de l'adjuvant...) et des paramètres climatiques, qui peuvent faire fluctuer le dosage et les propriétés du béton. Toutefois, même si le dosage respecte bien la composition prescrite, le malaxage peut également faire évoluer les propriétés du béton lorsque les paramètres de malaxage (temps de malaxage, type de malaxeur, l'ordre de l'introduction des constituants...) varient.

Divers incidents en phase de production, liés aux fluctuations des paramètres susmentionnés, mettent en évidence la nécessité de recherches visant à améliorer le contrôle en cours de la fabrication, et la régularité de la qualité des bétons. Des travaux sont effectués :

- pour évaluer en ligne l'évolution des humidités des granulats et du béton, en vue d'une maîtrise du dosage en eau et donc du dosage en granulats ;
- pour évaluer en ligne l'évolution de l'ouvrabilité du béton, en vue d'une maîtrise de la régularité de cette propriété ;
- pour permettre de détecter les anomalies des opérations de dosage et de malaxage en vue d'une amélioration de la qualité et de la traçabilité des bétons et de l'opération de fabrication ;
- pour optimiser le processus de fabrication tout en respectant la qualité du béton à un coût réduit etc.

Dans cette thèse nous allons nous intéresser aux deux premiers axes de recherche, concernant le calibrage en ligne des sondes et la mesure de la consistance du béton dans le malaxeur. En effet, les sondes permettent d'évaluer en temps réel l'humidité du sable avec une précision, dans le meilleur des cas, d'environ 0,5 %. Les dérèglages des sondes faussent les informations sur les humidités mesurées et donc le dosage en eau du béton. D'un autre côté, depuis quelques dizaines d'années, le wattmètre est utilisé comme un matériel d'assistance au centralier dans l'ajustement du dosage en eau et de la consistance du béton. Toutefois, ce matériel doit être calibré pour chaque catégorie de béton à produire. Des progrès récents ont montré la possibilité d'analyser le malaxeur comme un rhéomètre,

ce qui rendra possible, si c'est le cas, l'évaluation en ligne de l'ouvrabilité appliquée à tous les mélanges, après certains essais simples de calibrage. Cette situation met en évidence un besoin de recherche concernant l'utilisation du wattmètre.

La thèse vise donc à étudier des algorithmes permettant de régulariser le dosage en eau lors de la fabrication du béton dans les centrales BPE, et à utiliser le malaxeur comme un rhéomètre en ligne, sans modification notable des matériels équipés en centrale. On cherche donc d'une part à contrôler la quantité d'eau totale dans le béton, et d'autre part à contrôler sa consistance (caractère en partie, mais en partie seulement, lié à la première grandeur).

## Partie II

# Contrôle du dosage en eau dans les centrales à béton

### II.1. Contexte général

La production de béton consiste à bien doser tous les constituants. L'objectif est de respecter au mieux la composition prescrite pour chaque formule. Le dosage implique une phase de calcul des consignes, une phase d'extraction des matériaux et une phase de pesage. Les matériels d'extraction et de pesage dans la chaîne de dosage sont vérifiés de manière périodique par un organisme d'état, qui assure la bonne conformité entre les quantités mesurées et celles affichées. Ceci n'évite pas un certain niveau d'erreur, admis par les normes. La connaissance sur l'état des constituants, composante du calcul de consigne, influence à son tour la précision de dosage.

L'eau, constituant qui intervient de manière importante sur la plupart des propriétés d'usage du béton, est la préoccupation principale lors de l'alimentation du malaxeur. La principale difficulté est associée à la présence de l'eau dans les granulats. L'humidité des granulats doit être prise en compte lors des calculs de consigne des dosages. Une mauvaise connaissance de cette humidité perturbe à la fois la composition du squelette granulaire et le dosage total en eau.

L'humidité de granulats est cependant très difficile à maîtriser, car sensible aux conditions de stockage et aux aléas climatiques... . En ce que concerne sa mesure, on manque de matériels fiables pour déterminer, gâchée par gâchée, les teneurs en eau des gravillons. Ces teneurs en eau sont alors estimées de manière forfaitaire par une moyenne des valeurs prélevées périodiquement. Ceci conduit à une imprécision sur la quantité d'eau apportée par les gravillons, de l'ordre de 5 L/m<sup>3</sup> (écart type déterminé sur des prélèvements effectués sur une centrale).

Pour le sable, l'utilisation des sondes permet de mesurer l'humidité avec une précision de l'ordre de 0,5 point<sup>3</sup> (écart type déterminé par une étude sur un banc d'essai échelle 1 à la SEMR Blois [71]). Une bonne mesure de teneur en eau nécessite un calibrage attentif de la sonde, répété à intervalles de temps réguliers. Le calibrage consiste à relier, éventuellement sous forme d'une expression affine, les signaux électriques aux humidités du sable, mesurées par une méthode de référence. Le plus souvent, la méthode de référence est basée sur le séchage d'échantillons de granulats. On doit donc faire varier la teneur en eau du sable et mesurer le signal en retour. Compte tenu du contexte de fabrication d'une centrale de BPE, cette opération est difficile à réaliser :

- au moment du calibrage, l'humidité du sable contenu dans la trémie est souvent stable et on dispose d'un seul point de la courbe reliant les signaux de la sonde avec l'humidité. Le calibrage immédiat est donc impossible;
- même si des variations d'humidité sont observées, les échantillons pour les mesures de référence (nécessaires à l'estimation de « humidité réelle ») sont difficiles à prélever et

---

<sup>3</sup> Un point est équivalent à 1 %

rarement représentatifs. On ne dispose pas vraiment d'une référence fiable, la solution étant de multiplier les points de calibrage ;

- l'approvisionnement journalier du conteneur de sable conduit à des variations de l'ordre de 1,5 à 2 points sur deux à trois jours. Ceci permet en principe le calibrage de la sonde. Toutefois, en l'absence d'une collection des données des humidités de référence et des traitements algorithmiques, les opérations liées au calibrage demandent du temps et du personnel pas toujours disponibles sur le site.

A présent, l'ajustement de la quantité d'eau d'ajout est réalisé manuellement par le « centralier », qui s'appuie sur des mesures de la puissance consommée fournies par un wattmètre. En se basant sur l'indication du wattmètre de la gâchée précédente, le centralier décide d'ajouter ou de retirer une certaine quantité d'eau pour les gâchées suivantes. Ce mode de correction permet dans une certaine mesure de compenser, à l'échelle d'une toupie, les incertitudes de dosage en eau. Cependant, l'identité de valeur de wattmètre ne correspond pas forcément à l'identité des teneurs en eau. Cette pratique mérite une étude rigoureuse pour mettre en lumière ses avantages et ses inconvénients.

De nos jours, les centrales BPE sont équipées d'un automate qui gère leur fonctionnement. De plus, la visualisation des courbes du wattmètre permet de suivre en temps réel l'évolution du béton dans le malaxeur. La mesure gâchée par gâchée par la sonde d'humidité du sable permet d'ajuster immédiatement son dosage. Ce contexte d'informatisation des centrales modernes ouvre la possibilité de l'implantation d'un algorithme capable d'automatiser le calibrage de la sonde à sable, visant l'amélioration de la précision du dosage et donc de la qualité du béton.

Dans ce contexte, cette partie traite des sujets suivants :

- statistiques de 10 mois de production d'une centrale de béton ;
- calibrage du wattmètre en tant que mesure de l'humidité du béton dans le malaxeur ;
- méthode d'amélioration de la régularité du dosage en eau en automatisant les corrections de type « centralier » ;
- méthode de calibrage des mesures d'humidité des granulats : humidimètre des sables et humidité forfaitaire des gravillons.

## **II.2. Description et statistique de production de la centrale analysée (centrale d'Argentan)**

Dans le cadre de la thèse, l'étude expérimentale à l'échelle industrielle a été réalisée sur la centrale Point P d'Argentan. Une brève présentation de la centrale et des statistiques de production sur une durée de 10 mois (de septembre 2005 à juin 2006) est d'abord effectuée. Ce chapitre permet de découvrir le fonctionnement de la centrale et la procédure d'ajustement du dosage en eau, et également d'étudier les dispersions de dosage des constituants.

### **II.2.1 Description des matériels de production**

La centrale d'Argentan, dont la vue générale est présentée dans la Figure II.1, comporte un malaxeur planétaire de 1,5m<sup>3</sup> (que nous allons détailler ultérieurement dans le paragraphe II.12.2), un centre de pilotage et des compartiments de stockage des constituants. Les granulats sont approvisionnés par le tapis transporteur et stockés à l'abri dans les trémies surplombant le tapis doseur. Un stock de sécurité existe sur le site de la centrale (Figure

II.2). En cas de nécessité, les granulats peuvent être approvisionnés par un chargeur. On dispose de cinq compartiments de granulats. Les deux destinés aux sables sont équipés par des humidimètres. Le tapis doseur à granulats se vide dans un skip, qui approvisionne le malaxeur. La centrale comporte des silos à pulvérulents, qui approvisionnent la bascule à pulvérulent par vis. La bascule à eau est alimentée par une pompe à travers des tuyaux. Le dosage des adjuvants stockés dans un local à côté des trémies à granulats est réalisé de manière volumétrique.

Les matériels de dosage sont contrôlés de manière périodique par un organisme d'état qui assure la fiabilité des mesures réalisées. Un plan d'assurance qualité interne est établi en vue de faire fonctionner la centrale tout en respectant les exigences des normes en vigueur dans le but d'assurer la régularité de la qualité du béton.

Le malaxeur est équipé d'un wattmètre différentiel qui sert à suivre l'évolution du béton dans le malaxeur lors de la fabrication. Le pilotage de la centrale est effectué de manière semi-automatique à l'aide d'un ordinateur (Figure II.3).



*Figure II.1-Vue générale de la centrale d'Argentan*



*Figure II.2-Tapis transporteur pour l'approvisionnement des granulats et stock de sécurité*



Figure II.3-Pilotage automatique (gauche) et commande manuelle (droite)

## II.2.2 Acquisition des données de production

Les données de fabrication sont enregistrées de manière permanente, puis organisées dans une base qu'on appellera par la suite « base RSAI » (nom de la société ayant développé le logiciel de pilotage). Cette base permet d'accéder a posteriori aux formules nominales, avec des pesées réelles de constituants et les humidités de granulats prises en considération au moment de la fabrication. Les numéros de gâchées et de toupies sont datés de manière chronologique. Le wattmètre acquiert 1 point toutes les deux secondes, à partir du début de l'introduction des constituants jusqu'à la fin de la vidange du malaxeur.

Au début de la période analysée, la société Couvrot a installé dans le malaxeur une sonde de mesure de l'humidité du béton Orbiter (de type tournante à micro-ondes) et un système d'acquisition indépendant du précédent, sans passage par l'automate. Les données acquises par ce deuxième système d'acquisition (« Klever ») sont stockées dans une base de données séparée (appelée par la suite « base Klever »). Klever enregistre avec une fréquence de 1 Hz le signal de la sonde sur le béton, le wattmètre ainsi que les signaux issus de deux sondes d'humidité à sable. Il enregistre de plus les états de circuits de dosage : position du skip (ON quand le skip est en haut du malaxeur), bascule à eau, ciment, filler, adjuvants (ON si la vanne est ouverte, pour chacun des matériaux précédent), ouverture et fermeture de la trappe de malaxeur. La synchronisation de ces deux bases fournit donc une représentation assez complète du dosage et de la fabrication du béton dans la centrale.

## II.2.3 Assurance de la qualité du béton

Au moins trois fois par mois, les bétons sont prélevés pour faire l'objet de contrôles, pour effectuer les essais de consistance, confectionner des éprouvettes (pour les essais de compression) et mesurer la température, l'air occlus... Les sables et les gravillons sont soumis à des contrôles hebdomadaires de teneur en eau, de propreté et de granulométrie. La nature et la classe de ciment sont aussi vérifiées de manière hebdomadaire.

Lors du dosage, les consignes sont calculées par l'automate en fonction des volumes de gâchage, des humidités des constituants et des corrections faites par le centralier. En fait, l'eau fixée par la formule théorique est l'eau efficace, qu'on doit doser le plus précisément dans le malaxeur. L'eau à ajouter est calculée alors en tenant en compte de l'eau apportée et absorbée par les granulats. Les coefficients d'absorption sont plus ou moins constants.

Les humidités, au contraire, varient. Elles font l'objet de suivis et de contrôles dans la centrale.

### II.2.3.a Contrôle de l'humidité des granulats

Le changement des humidités de gravillons dans l'automatisme est effectué tous les trimestres, en fonction de la moyenne des prélèvements hebdomadaires. La Figure II.4 présente des évolutions d'humidité des gravillons de 10/20 et de 4/10, selon les données de mesures manuelles hebdomadaires enregistrées (sur papier) en centrale. Les écarts types de ces évolutions, sur une période de 6 mois, sont de 0,5 % et de 0,6 % pour les granulats 10/20 et 4/10, respectivement.

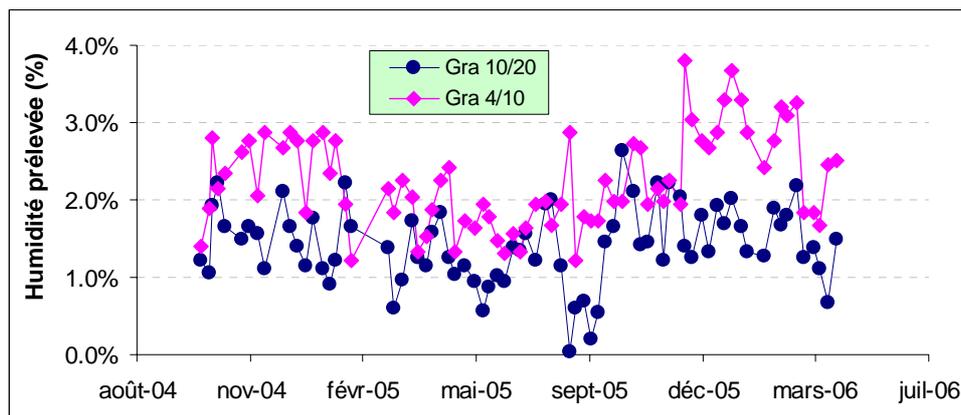


Figure II.4-Evolution de la teneur en eau des gravillons.  
Prélèvements hebdomadaires (09/2004 - 03/2006).

La procédure est plus compliquée pour les humidimètres à sable. Une droite de calibrage est prévue dans l'automatisme. Elle est définie à partir de deux points dont le signal numérisé correspond à une humidité connue, à introduire par l'opérateur sur la centrale : le point « minimal » ( $w_{\min}$ ,  $A_{\min}$ ) et le point « maximal » ( $w_{\max}$ ,  $A_{\max}$ ) – cf. Figure II.5. En principe, l'écart entre les deux humidités du sable  $w_{\min}$  et  $w_{\max}$  doit être suffisamment grand.

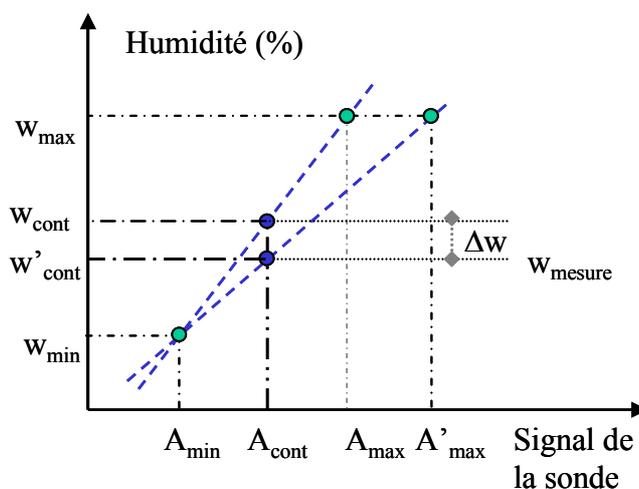


Figure II.5-Pratique du calibrage actuel des sondes

Donc pour calibrer correctement la sonde, il faut bien déterminer ces deux points en effectuant au moins deux mesures avec deux teneurs en eau différentes. Malheureusement, le contrôle d'humidité du sable est réalisé seulement une fois par semaine. On n'a donc pas deux humidités contrastées, car la teneur en eau du sable ne varie presque pas dans un temps aussi court. Ce contrôle a donc simplement pour but de vérifier si le prélèvement et l'affichage de la sonde sont écartés au moment où le contrôle est effectué. Si le décalage ( $\Delta w$ ) entre la teneur en eau mesurée par séchage ( $w_{\text{mesure}}$ ) et celle donnée par la sonde ( $w_{\text{cont}}$ ) est supérieure à 1 %, le centralier modifie la valeur  $A_{\text{max}}$  (en  $A'_{\text{max}}$ ) pour que le nouvel affichage ( $w'_{\text{cont}}$ ) corresponde bien à la mesure effectuée. Cette situation revient à redéfinir la droite d'étalonnage en changeant seulement sa pente. A titre d'exemple, la Figure II.6 montre le résultat de cette pratique appliquée à la sonde d'humidité installée sur la trémie numéro 5 (contrôle hebdomadaire entre novembre 2004 – avril 2006).

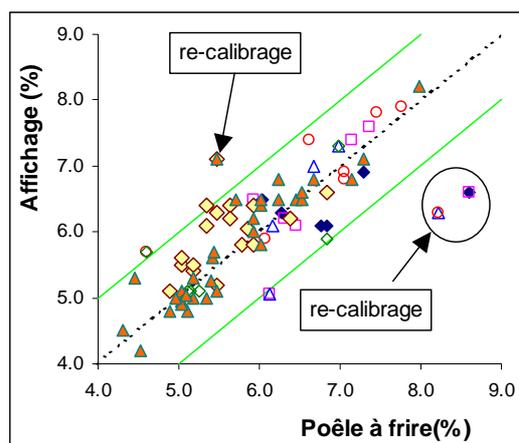


Figure II.6 - Correspondance entre la mesure et l'affichage de la sonde en trémie 5.  
Les points hors des lignes limite ( $\pm 1\%$ ) ont déclenché un re-calibrage

On peut observer le changement de la pente en comparant l'humidité du sable dans les deux bases de données (RSAI et Klever, Figure II.7). En effet, les paramètres de calibrage, lors de la mise en place de Klever (avant août 2005), ne sont plus changés par la suite dans cette base. La base RSAI enregistre, quant à elle, les humidités utilisant les données actualisées du calibrage. L'équation des droites, dans le plan ( $w_{s \text{ Rsai}}, w_{s \text{ Klever}}$ ) de la teneur en eau du sable RSAI en fonction de la teneur en eau du sable Klever reflètent les différences de calibrage entre les deux bases (cf. Figure II.7).

Alors que toutes ces droites passent par l'origine, on peut conclure que le point de calibrage minimal ( $w_{\text{min}}, A_{\text{min}}$ ), fixé pour tout calibrage, est en effet le point d'humidité nulle à qui correspond un signal nul de la sonde. Cependant, l'absence d'une ordonnée à l'origine est une hypothèse forte, qui génère sans doute des difficultés de calibrage sur la centrale.

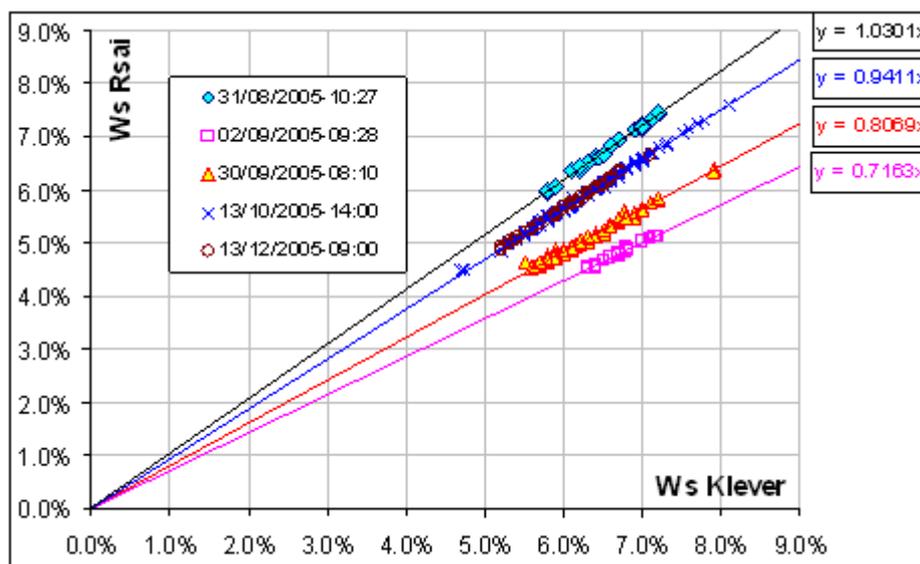


Figure II.7-Observation de l'effet de calibrage de la sonde

Ce graphe montre d'ailleurs que sur un mois et demi (entre le 31/08/2005 et 13/10/2005), la sonde a été calibrée quatre fois. Ceci confirme que le calibrage de la sonde est un vrai besoin dans la centrale.

### II.2.3.b Contrôle de l'ouvrabilité

Le wattmètre est utilisé comme moyen d'information du centralier sur l'évolution du béton dans le malaxeur, d'une gâchée à l'autre. En effet, la classe de consistance visée (selon la norme EN 206-1) est imposée pour chaque formule de béton. Pour chaque formule « importante », on dispose d'un niveau de référence du wattmètre (après 55 secondes de malaxage) correspondant à la consistance souhaitée. Cette liste (des formules nominales accompagnées de leur valeur au wattmètre) est entrée par le centralier, et parfois actualisée. En se basant sur ces valeurs, le conducteur de centrale corrige le dosage en eau de la prochaine gâchée de manière à atteindre un niveau de puissance proche de celui de référence. Lorsque la cadence de fabrication est serrée, une même correction d'eau est appliquée pour toutes les gâchées dans une toupie. Dans le cas de commandes spécifiques, la première gâchée de la toupie est ajustée avec soin. Le reste sera corrigé en fonction de cette première gâchée. Cette pratique de contrôle montre bien que le wattmètre est un matériel indispensable pour suivre l'ouvrabilité du béton. Les corrections sont faites par des écarts de l'eau d'ajout dans le malaxeur.

### II.2.4 Statistique de la production

Une centaine de formules de béton est enregistrée dans l'ordinateur de pilotage de la centrale. Une large gamme de dosage des constituants est proposée, de manière à répondre aux besoins, très variables dans la pratique, d'utilisation du béton : formules à un ou deux gravillons, rapport G/S de 0,8 à 1,2, dosages en ciment de 160 à 360 kg/m<sup>3</sup>, en filler de 0 à 90 kg/m<sup>3</sup>, dosages en eau efficace de 120 à 190 L/m<sup>3</sup>...

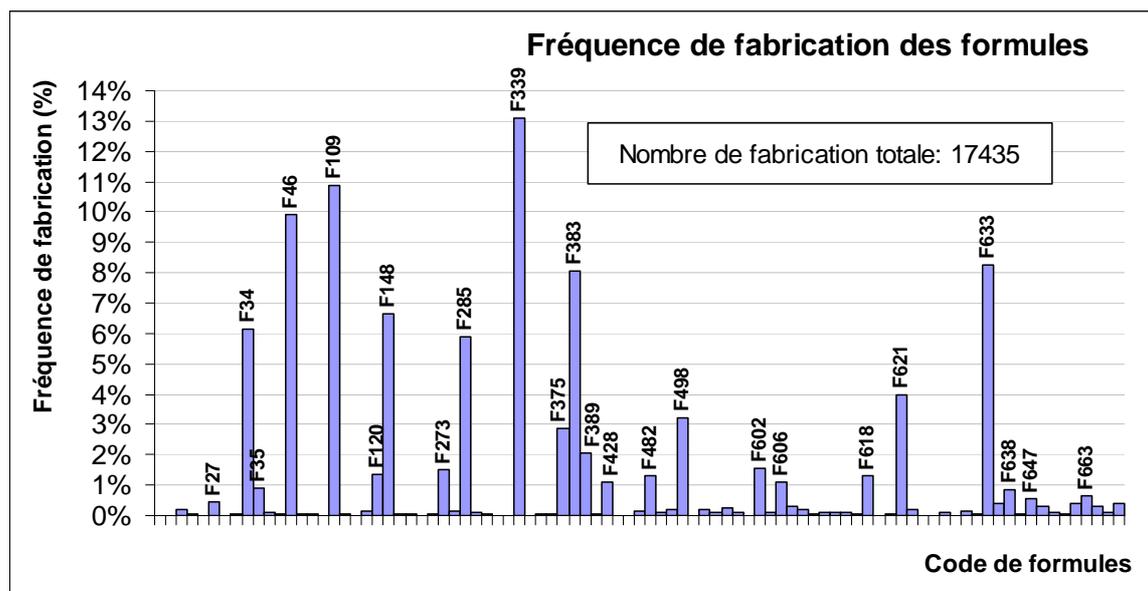


Figure II.8-Fréquence de fabrication des formules de béton

Certaines formules sont utilisées plus fréquemment. La Figure II.8, présentant la fréquence de formules sur un nombre de 17435 fabrications sur 10 mois, le montre. On remarque qu'il existe environ 19 formules nominales (leurs codes sont affichés dans la figure III.8) dont la fréquence de fabrication est supérieure à 1 %. La Figure II.9 analysant statistiquement les mêmes fabrications, permet d'observer que la production de 20 formules constitue environ 90% de l'activité (en nombre de gâchées), celle de 12 formules les plus fabriquées occupent environ 80 %, celle de 8 formules les plus utilisées 70 %, les 5 premières formules 50 % et les 3 formules les plus fabriquées 30 %.

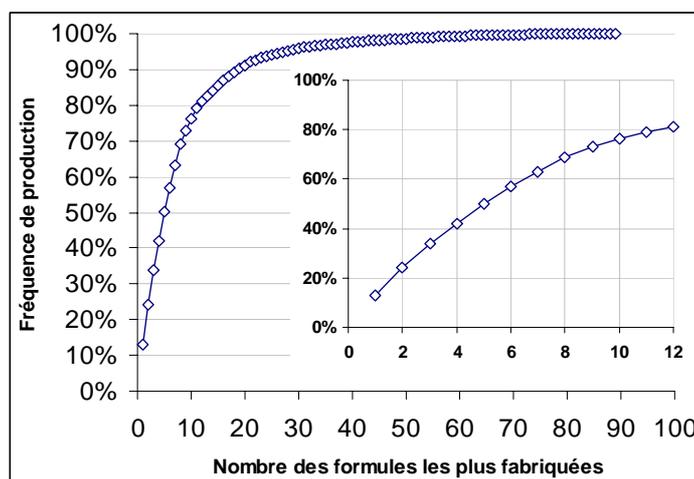


Figure II.9-Fréquence de fabrication des formules de béton

La composition nominale des 12 formules les plus représentées est donnée dans le tableau Tableau II.1) qui indique également la fréquence de chaque formule.

de	fo	e	de	fa	Composition en kg/m <sup>3</sup>	ns	ist	an	ce
----	----	---	----	----	----------------------------------	----	-----	----	----

		Granulats			Ciments			FILLER	EAU efficace	Adjuvants		
		10/20	4/10	0/4	CEM I 52.5	CEM II/A32	CEM III			SPHRE (*)	EA (**)	
F339	13.1%	712	223	854			330	21	170	1,47		S3
F109	10.9%	723	201	860	270			90	172	1,48		S3
F46	9.9%	675	280	835		305		65	172	1,85		S3
F633	8.2%		960	880	160			60	120	0,77		S2
F383	8.1%	684	248	850	335			45	174	1,98		S3
F148	6.7%	580	315	896			350		195	1,47	0,14	S4
F34	6.2%		950	860		330		45	180	1,95		S3
F285	5.9%	680	255	845		308		67	173	1,88		S3
F621	4.0%	685	280	910			250		182			S2
F498	3.2%	690	240	890			357		178	1,50		S3
F375	2.9%	775	166	847	325			40	172	1,79		S3
F389	2.0%		745	920		290	75	80	190	4,27	0,22	S5

(\*) superplastifiant réduction d'eau

(\*\*) entraineur d'air

Tableau II.1 - Formules concentrant 80 % de la production [en kg/m<sup>3</sup>]

On s'intéresse également aux évolutions temporelles de la production : le nombre de fabrications par semaine, par jour de la semaine et par tranche horaire. On fait alors les constats suivants :

- la production de mi-octobre jusqu'à mi-février est plus réduite en moyenne (de l'ordre de 40% en moins) que celle du reste de l'année (Figure II.10). Nous ne disposons pas des données des mois juillet et août, dont la production est traditionnellement plus faible ;
- la production est plus faible les lundis et les vendredis, jeudi étant le jour le plus productif (Figure II.11). Cependant, d'une semaine à une autre, la production d'un jour de la semaine peut fluctuer fortement (Figure II.12) ;
- en tranches horaires, deux périodes de la journée concentrent plus que trois quarts de la production : de 7 à 11 heures et de 13 à 16 heures. Le pic de production se trouve entre 8 et 9 heures (Figure II.13).

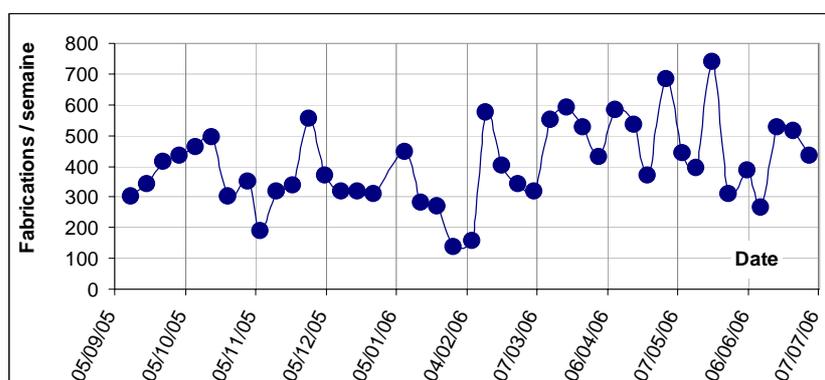


Figure II.10 - Nombre de fabrications par semaine

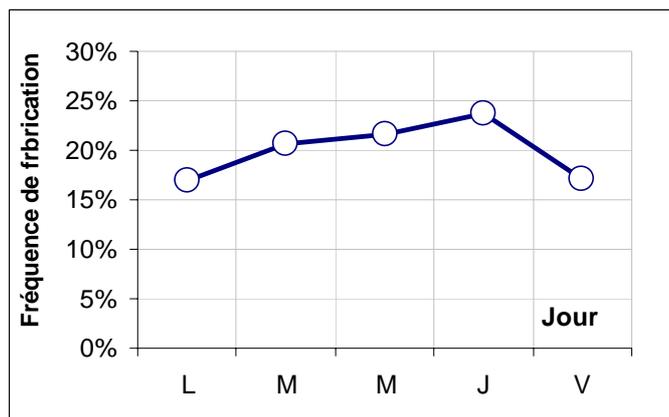


Figure II.11-Fréquence de fabrication selon le jour dans la semaine

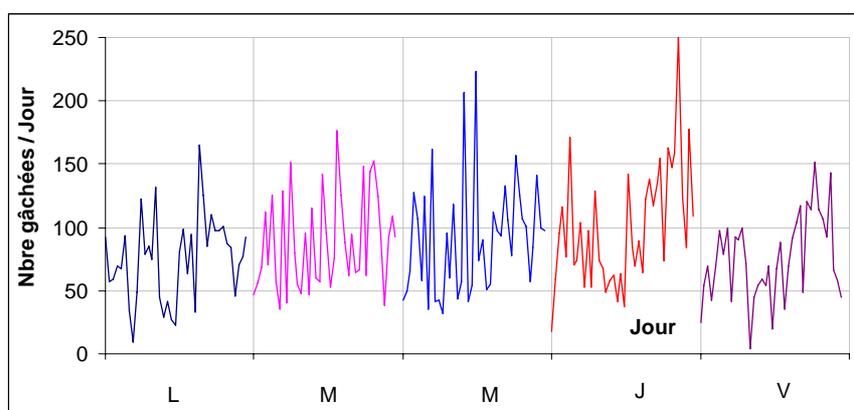


Figure II.12-Evolution de la fabrication/jour de chaque jour dans la semaine

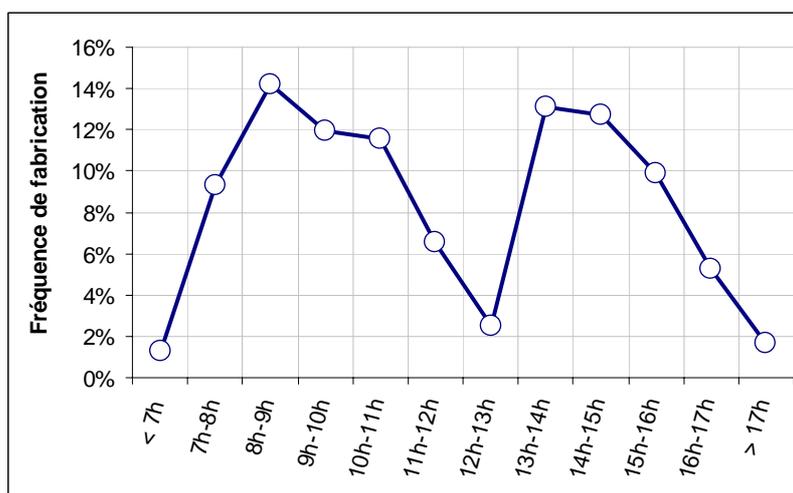


Figure II.13-Fréquence de fabrication en fonction du temps

Par rapport au volume des gâchées fabriquées, la production est répartie principalement en 3 classes (Figure II.14) : gâchées de 1,5 m<sup>3</sup> (capacité nominale du malaxeur), gâchées de 1 m<sup>3</sup> et gâchées de 0,5 m<sup>3</sup>. Les gâchées de 1,5m<sup>3</sup> sont les plus fréquentes, occupant 80% du nombre total des gâchées.

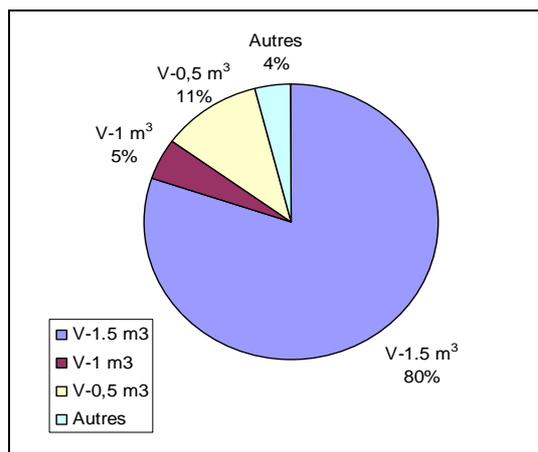
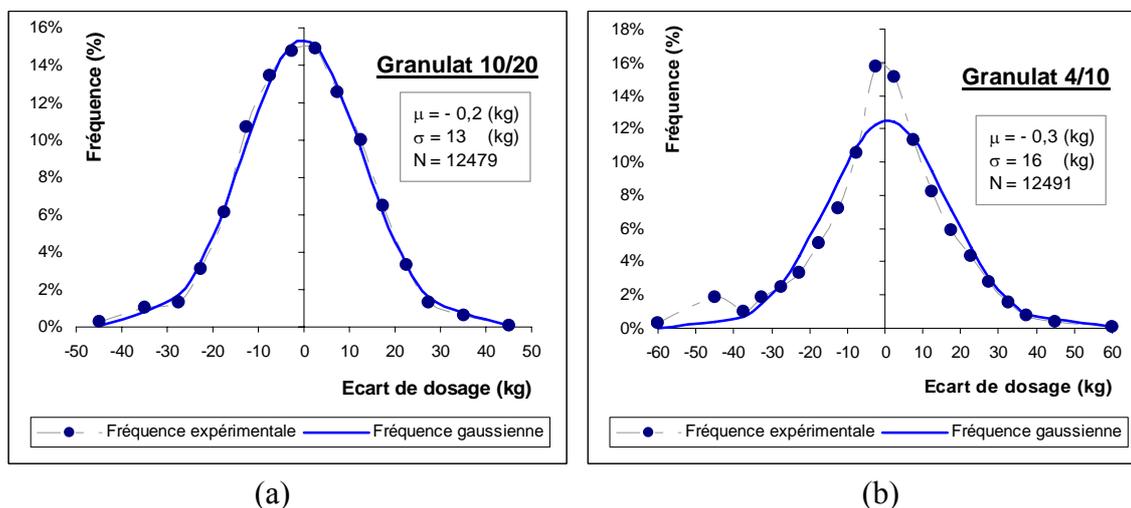


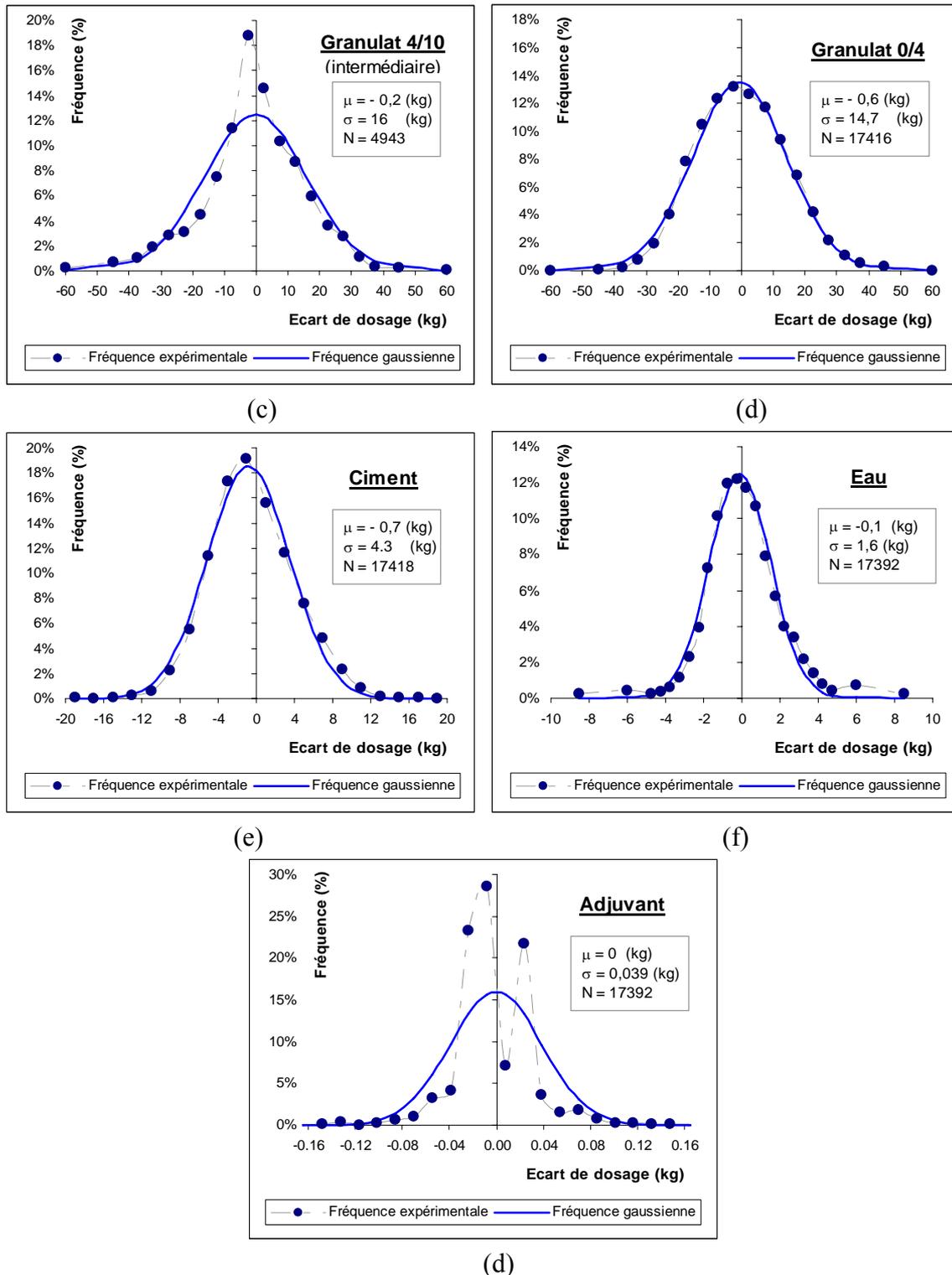
Figure II.14-Pourcentage des volumes de gâchées fabriquées

## II.2.5 Dispersion des écarts de dosage des constituants

L'erreur de mesure du poids réel par bascule (environ 0,1 % du poids pesé) est inférieure à l'erreur du matériel de dosage (environ 3 % - 10 % des valeurs à doser). A ce titre, on peut estimer l'écart entre les pesées et les consignes pour chaque constituant, en négligeant les erreurs de pesage. En traitant statistiquement ces écarts sur environ 17000 fabrications, on évalue les écarts types de dosages.

Une image de la distribution expérimentale des écarts des constituants est comparée (Figure II.15) à une distribution gaussienne de même moyenne et écart type (voir l'Annexe I- 2). On remarque que le dosage des granulats 10/20, 0/4, de l'eau et du ciment respecte très bien la loi gaussienne. Le dosage de granulat 4/10 respecte moins bien cette distribution. Le dosage de l'adjuvant suit une distribution bi-modale.





**Note :** **écart de dosage :** différence entre les pesées et les consignes ;  
 **$\mu$  et  $\sigma$  :** moyenne et écart type qui caractérisent la distribution expérimentale ;  
**N :** nombre de fabrication sur lequel on a reconstitué la distribution expérimentalement.

Figure II.15-Distribution des écarts de dosage des constituants

Cette statistique permet de conclure qu'il n'existe pas d'erreur systématique lors du dosage dans cette centrale. En effet le 0 fait partie de l'intervalle de confiance de la moyenne. Une exception est constituée par le ciment, dont le dosage est probablement faiblement

inférieur au dosage consigne (de l'ordre de 0,5 kg par gâchée). Les tolérances par rapport aux consignes sont données dans le Tableau II.2 pour un indice de confiance de 90 % et pour 100 % des cas.

Constituant	Dosage moyen [kg]	Ecart absolu		Ecart relatif		Référentiel NF	
		90 % confiance	100 % confiance	90 % confiance	100 % confiance	90 %	100%
Granulat 10/20	974	21	45	2,16%	4,62%	4%	8%
Granulat 4/10	1082	25	60	2,31%	5,54%	4%	8%
Granulat 4/10 (intermédiaire)	349	25	60	7,16%	17,19%	11%	22%
Granulat 0/4	1221	25	60	2,05%	4,91%	4%	8%
Pulvérulent	397	8	18	2,02%	4,53%	3%	6%
Eau	146	3,5	8,5	2,39%	5,82%	3%	6%
Adjuvant	2,21	0,078	0,14	3,53%	6,33%	-	5%

Tableau II.2 - Résumé des écarts de dosage

En comparant les tolérances réelles avec celles maximum fixées par le référentiel NF (également indiquées dans le Tableau II.2), on observe qu'on dose mieux que demandé les granulats et le ciment. L'eau est dosée correctement. Le dosage des adjuvants mériterait d'être amélioré.

### II.3. Calibrage des mesures dans le malaxeur

La corrélation entre le wattmètre et l'humidité du béton est connue depuis longtemps dans le domaine de la fabrication du béton, notamment à travers les travaux de Teiller et al [42], lesquels s'appuyaient sur des références antérieures des années 70, par exemple [80] et [73]. Le wattmètre est aujourd'hui accepté par les fabricants de BPE comme outil de surveillance de la production, et outil d'assistance pour le centralier dans la correction du dosage en eau du béton. Il est cependant rare qu'un calibrage en tant qu'humidimètre soit effectué, car on ne connaît pas à ce jour de protocole de calibrage efficace sur une centrale industrielle. Une méthode originale de calibrage en milieu industriel, proposée et réalisée dans le cadre de cette thèse, est présentée dans la suite.

Le but est de mesurer le plus précisément possible la teneur en eau du béton frais et de la mettre en parallèle avec les indications du wattmètre. Traditionnellement, l'humidité du béton frais est mesurée par séchage. Toutefois, une certaine quantité d'eau est fixée dans le processus d'hydratation de ciment, et ne pourra être évacuée par évaporation. La précision de la méthode a été estimée dans le projet national Calibé à 5 % du dosage en eau (soit une valeur absolue de l'ordre de 8,5 L/m<sup>3</sup> [62]). Cette précision est à l'évidence insuffisante pour permettre un calibrage précis d'une mesure en ligne de l'humidité du béton.

Lors d'une campagne d'essais sur la centrale d'Argentan, le dosage en eau du béton a été estimé en déterminant l'humidité des granulats dans le malaxeur et en utilisant le pesage de l'eau d'ajout. L'opération consiste à retarder l'introduction d'autres constituants que les granulats pendant environ une minute. Cet intervalle de temps est suffisant pour permettre d'homogénéiser les granulats dans le malaxeur en marche (environ 20 secondes) et pour prélever trois échantillons en utilisant une trappe d'échantillonnage. La fabrication se déroule ensuite normalement. Pour certaines gâchées, et pour le propos du calibrage, on

force le dosage en eau à des écarts de  $\pm 10 \text{ L/m}^3$ . Des gâchées successives d'une même toupie, avec des écarts de dosage opposés se compensent.

Dans ce paragraphe la méthode est d'abord présentée. Ensuite, la précision est analysée au moyen d'une étude d'homogénéité des mélanges de granulats prélevés. Enfin, le calibrage du wattmètre est réalisé en utilisant les humidités des bétons mesurés.

### II.3.1 Mesure du dosage en eau réel dans le malaxeur

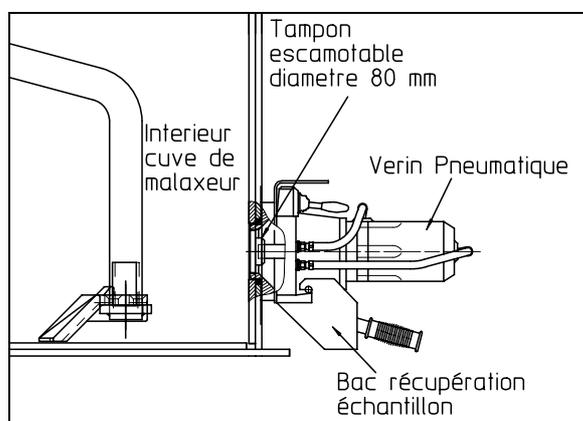
Le dosage en eau du béton est mesuré par prélèvement de granulats dans le malaxeur et, en tant que mesure de vérification, par séchage sur béton.

Afin de permettre la réalisation des essais, la centrale est utilisée en fonctionnement manuel (et non selon le fonctionnement automatique habituel). Les opérations retardent la production et il est nécessaire d'adapter le plan d'expérimentation au rythme de production admissible.

#### II.3.1.a Protocole d'échantillonnage

Tout d'abord, les granulats sont introduits dans le malaxeur, puis malaxés pour homogénéiser le mélange. On considère qu'un temps de malaxage de l'ordre de 20 secondes est suffisant pour obtenir une bonne homogénéité [44]. Des prélèvements de granulats dans le malaxeur sont effectués à l'aide d'une trappe d'échantillonnage développée par la société Couvrot. Cet appareil, fixé à la cuve proche du fond du malaxeur, est présenté dans la Figure II.16-a. La vue extérieure d'une installation réelle de l'appareil est illustrée dans la Figure II.16-b. Le principe de fonctionnement est simple. La commande pneumatique permet d'ouvrir ou de fermer le tampon escamotable grâce au vérin pneumatique pour commencer ou arrêter l'extraction de matériau dans le malaxeur. Le matériau extrait est reçu au moyen d'un bac de récupération puis introduit dans une boîte métallique.

En raison de la taille du granulat, la taille de l'échantillon est fixée à environ 1,5-3 kg. Compte tenu du volume de la trappe, de l'ordre de 0,7 litre, deux à trois prélèvements sont nécessaires pour constituer un échantillon. Cette opération prend environ 6 secondes. Trois échantillons consécutifs sont prélevés pour chaque mélange espacés d'au moins 6 secondes (durée d'une rotation de l'étoile de malaxage). L'opération d'échantillonnage dure au total plus de 30 secondes. Le retard d'introduction des autres constituants dans le malaxeur avoisine la minute.



a) Schéma de principe



b) Installation sur site

Figure II.16-Trappe d'échantillonnage.

### II.3.1.b Mesure des échantillons

Les boîtes métalliques tarées et codées au préalable (du nom de la gâchée) sont utilisées pour renfermer les échantillons, puis pesées au moyen d'une balance électrique de précision  $\pm 0,1$  g. Les échantillons sont transportés au laboratoire pour traitements ultérieurs.

Au laboratoire, les échantillons sont repesés après séchage en étuve à 110°C pendant 36 heures. Les granulats secs sont tamisés aux tamis normalisés de 10 ; 4 et 1 mm. Pour chaque échantillon, on dispose d'une teneur en eau et des quatre teneurs de fraction granulaire 10/20, 4/10, 1/4 et 0/1. Pour les formules à deux granulats, seuls les trois dernières classes sont tamisées.

Il est constaté que, lors du séchage, des éléments fins se sont collés aux gravillons. Avant le tamisage, les échantillons sont lavés sur le tamis de 0,5 mm pour enlever les éléments fins, puis re-séchés.

### II.3.1.c Mesure sur le béton

Dans les gâchées analysées, du béton est prélevé par la même trappe à la fin du malaxage. Ce béton permet de mesurer l'affaissement au cône d'Abrams et est utilisé aussi pour deux mesures d'humidité par séchage à la poêle à frire. Ces dernières mesures ont été réalisées par le laboratoire mobile de Calcia.

### II.3.1.d Résultats obtenus

Dans cette campagne expérimentale, 147 échantillons ont été prélevés sur 49 gâchées réparties dans 15 toupies et consistant en 7 mélanges granulaires différents. Le tableau (Tableau II.3) présente les proportions théoriques de chacun de ces 7 mélanges granulaires. Pour chaque gâchée, on dispose des bons de pesées permettant d'obtenir les proportions réellement dosées (Annexe I- 3)

Formule	Granulat 10/20 (kg)	Granulat 4/10 (kg)	Granulat 0/4 (kg)	Pulvé- rulent (kg)	Adjuvant (kg)	Eau (kg)	Nombre de gâchées
34	0	850	860	375	1,95	180	11
273	0	946	831	380	1,98	177	8
428	0	911	855	351	1,61	178	4
389	0	745	920	445	4,27	190	12
109	723	201	860	360	1,48	172	7
285	680	255	845	375	1,88	173	2
375	775	166	847	365	1,79	172	5

Tableau II.3 - Dosages théoriques des mélanges étudiés.

Les humidités et les granularités des 147 échantillons sont données dans le tableau (Tableau II.4), avec les notations suivantes :

-  $Gr_{10/20}$  ;  $Gr_{4/10}$  ;  $Gr_{1/4}$  ;  $Gr_{0/1}$  : proportion des fractions 10/20; 4/10; 1/4; 0/1 respectivement (déterminées par rapport du poids sec au poids sec total);

-  $w_{GRi}$ : humidité de l'échantillon « i » dans la gâchée.

Lors du tamisage, on a trouvé du béton dans le premier échantillon des gâchées suivantes : 13, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 28, 31, 33 mais également dans le deuxième échantillon des gâchées 3 et 13. Ce béton provenait de gâchées précédentes, qui n'avaient pas été totalement vidangées. Le pesage montre que les quantités de béton mélangé dans le granulat varient d'une dizaine à quelques centaines de grammes. Compte tenu de la taille de l'échantillon, de telles quantités de béton perturbent de manière notable à la fois l'humidité et la granulométrie du mélange. Les échantillons correspondants ont donc été éliminés de l'analyse statistique. En effet, lors du malaxage de la gâchée précédente et surtout lors de l'échantillonnage du béton, du béton colle sur la porte de la trappe d'échantillonnage (Figure II.16). Un premier prélèvement de granulats nettoie la trappe, et les échantillons suivant ne contiennent plus de béton. Pour des protocoles futurs, nous proposons de jeter systématiquement les premiers prélèvements.

### *II.3.1.e Estimation de la précision de la méthode*

Dans un premier temps, ce paragraphe vise à estimer la représentativité de l'échantillonnage. Une fois le niveau de représentativité établi, on détermine la précision de la détermination du dosage en eau dans une gâchée en utilisant la méthode présentée.

#### **❖ Représentativité de l'échantillonnage**

L'échantillonnage doit être capable de reproduire la granularité dans le malaxeur. Pour le vérifier, on compare les proportions des fractions granulaires obtenues par tamisage des échantillons, à celles issues des pesées de la gâchée. En effet, les courbes granulométriques des granulats (fiche technique des matériaux – Annexe I- 1) et les bons de pesées (Annexe I -3) permettent de remonter aux fractions 0/1, 1/4, 4/10 et 10/20.

N°	F	Echantillon 1					Echantillon 2					Echantillon 3				
		Gr <sub>10/20</sub>	Gr <sub>4/10</sub>	Gr <sub>1/4</sub>	Gr <sub>0/1</sub>	W <sub>GR1</sub>	Gr <sub>10/20</sub>	Gr <sub>4/10</sub>	Gr <sub>1/4</sub>	Gr <sub>0/1</sub>	W <sub>GR2</sub>	Gr <sub>10/20</sub>	Gr <sub>4/10</sub>	Gr <sub>1/4</sub>	Gr <sub>0/1</sub>	W <sub>GR3</sub>
1	34		50%	22%	28%	3.1%		50%	22%	28%	3.0%		49%	22%	28%	3.1%
2	34		49%	23%	28%	3.1%		51%	22%	28%	3.1%		52%	21%	27%	3.0%
3	34		50%	21%	29%	3.1%		52%	20%	27%	3.5%		52%	21%	28%	3.1%
4	34		51%	22%	28%	3.2%		49%	22%	28%	3.2%		50%	22%	28%	3.2%
5	34		54%	19%	27%	3.3%		51%	21%	28%	3.3%		52%	21%	27%	3.3%
6	34		51%	21%	28%	3.5%		53%	20%	27%	3.4%		49%	22%	29%	3.5%
7	34		51%	22%	28%	3.5%		49%	22%	29%	3.5%		51%	21%	28%	3.4%
8	34		51%	19%	29%	3.9%		51%	19%	30%	3.9%		49%	20%	31%	3.9%
9	34		49%	20%	31%	4.0%		50%	19%	30%	3.9%		49%	20%	31%	4.0%
10	34		51%	19%	30%	3.8%		53%	18%	29%	3.7%		49%	20%	31%	3.8%
11	34		51%	19%	30%	3.8%		52%	19%	30%	3.8%		53%	18%	29%	3.8%
12	109	37%	12%	20%	30%	2.7%	34%	12%	21%	32%	2.7%	35%	11%	21%	32%	2.8%
13	109	35%	14%	23%	28%	3.0%	34%	13%	23%	31%	2.9%	41%	13%	19%	27%	2.7%
14	109	38%	11%	20%	31%	2.8%	37%	12%	20%	31%	2.7%	39%	12%	19%	30%	2.7%
15	109	35%	11%	21%	33%	3.9%	38%	10%	20%	31%	3.7%	40%	10%	20%	30%	3.6%
16	109	39%	11%	20%	29%	3.7%	36%	11%	22%	31%	3.6%	42%	11%	19%	28%	3.4%
17	109	34%	15%	21%	30%	4.0%	40%	11%	19%	30%	3.6%	35%	12%	21%	32%	3.8%
18	109	37%	13%	20%	29%	3.8%	38%	12%	20%	31%	3.7%	38%	11%	20%	31%	3.7%
19	273		44%	26%	30%	3.3%		49%	23%	28%	2.9%		51%	22%	27%	2.9%
20	273		53%	20%	27%	2.9%		52%	21%	27%	2.9%		53%	21%	26%	2.9%
21	273		50%	22%	27%	3.0%		50%	22%	28%	2.9%		51%	22%	28%	2.9%
22	273		31%	29%	40%	3.3%		49%	22%	29%	3.0%		48%	23%	29%	3.1%
23	273		52%	20%	28%	3.6%		49%	21%	30%	3.6%		51%	20%	29%	3.6%
24	273		50%	22%	29%	4.0%		50%	21%	29%	3.6%		51%	20%	29%	3.6%
25	273		52%	20%	28%	3.7%		49%	21%	29%	3.7%		50%	21%	29%	3.7%
26	273		49%	21%	30%	3.6%		50%	20%	29%	3.6%		49%	21%	30%	3.5%
27	285	34%	15%	20%	31%	3.6%	34%	15%	20%	31%	3.6%	36%	15%	19%	30%	3.5%
28	285	31%	17%	20%	31%	3.8%	37%	14%	19%	30%	3.4%	36%	15%	19%	31%	3.4%
29	375	39%	12%	19%	30%	3.9%	41%	11%	19%	29%	3.9%	37%	10%	21%	32%	4.1%
30	375	36%	11%	22%	32%	4.1%	37%	10%	21%	32%	4.0%	39%	9%	20%	32%	4.0%
31	375	34%	14%	23%	29%	3.6%	35%	11%	21%	32%	3.5%	44%	10%	16%	29%	3.3%
32	375	34%	13%	22%	31%	3.7%	39%	11%	20%	30%	3.5%	37%	12%	20%	31%	3.5%
33	375	34%	12%	21%	32%	3.7%	38%	9%	21%	32%	3.6%	41%	10%	19%	30%	3.5%
34	389		42%	25%	32%	3.4%		42%	25%	32%	3.4%		41%	26%	32%	3.4%
35	389		40%	25%	34%	3.6%		41%	25%	34%	3.6%		41%	25%	35%	3.5%
36	389		44%	21%	35%	3.8%		42%	24%	34%	3.8%		41%	24%	35%	3.7%
37	389		43%	24%	33%	3.8%		42%	24%	34%	3.8%		44%	23%	33%	3.8%
38	389		42%	23%	35%	3.9%		42%	23%	35%	3.8%		40%	23%	37%	3.9%
39	389		42%	23%	35%	4.3%		41%	24%	35%	4.3%		42%	23%	35%	4.2%
40	389		42%	24%	34%	4.4%		43%	23%	34%	4.3%		43%	23%	34%	4.3%
41	389		44%	23%	33%	4.2%		41%	22%	37%	4.2%		44%	25%	32%	4.1%
42	389		41%	24%	34%	4.2%		43%	23%	33%	4.1%		41%	24%	35%	4.2%
43	389		40%	25%	35%	4.4%		41%	24%	35%	4.4%		41%	24%	35%	4.4%
44	389		41%	24%	35%	4.4%		43%	23%	34%	4.4%		41%	24%	35%	4.5%
45	389		46%	26%	34%	4.6%		42%	24%	34%	4.3%		41%	24%	35%	4.3%
46	428		50%	19%	31%	3.5%		52%	19%	29%	3.5%		52%	18%	29%	3.4%
47	428		53%	19%	28%	3.5%		50%	20%	30%	3.6%		49%	21%	30%	3.6%
48	428		52%	21%	28%	3.5%		49%	21%	29%	3.6%		50%	21%	29%	3.5%
49	428		51%	21%	29%	3.8%		50%	21%	29%	3.7%		52%	20%	28%	4.7%

Tableau II.4-Résultats de tamisage et de séchage

Cependant, les fractions granulaires dans le malaxeur sont déterminées en absence des mesures précises de l'humidité des granulats dosés. Néanmoins, la confrontation reste possible compte tenu que l'erreur sur l'humidité n'influence que marginalement les proportions granulaires sèches. On utilise une humidité moyenne dans la période de l'expérimentation.

Les fractions granulaires des échantillons sont déterminées par la moyenne des trois échantillons.

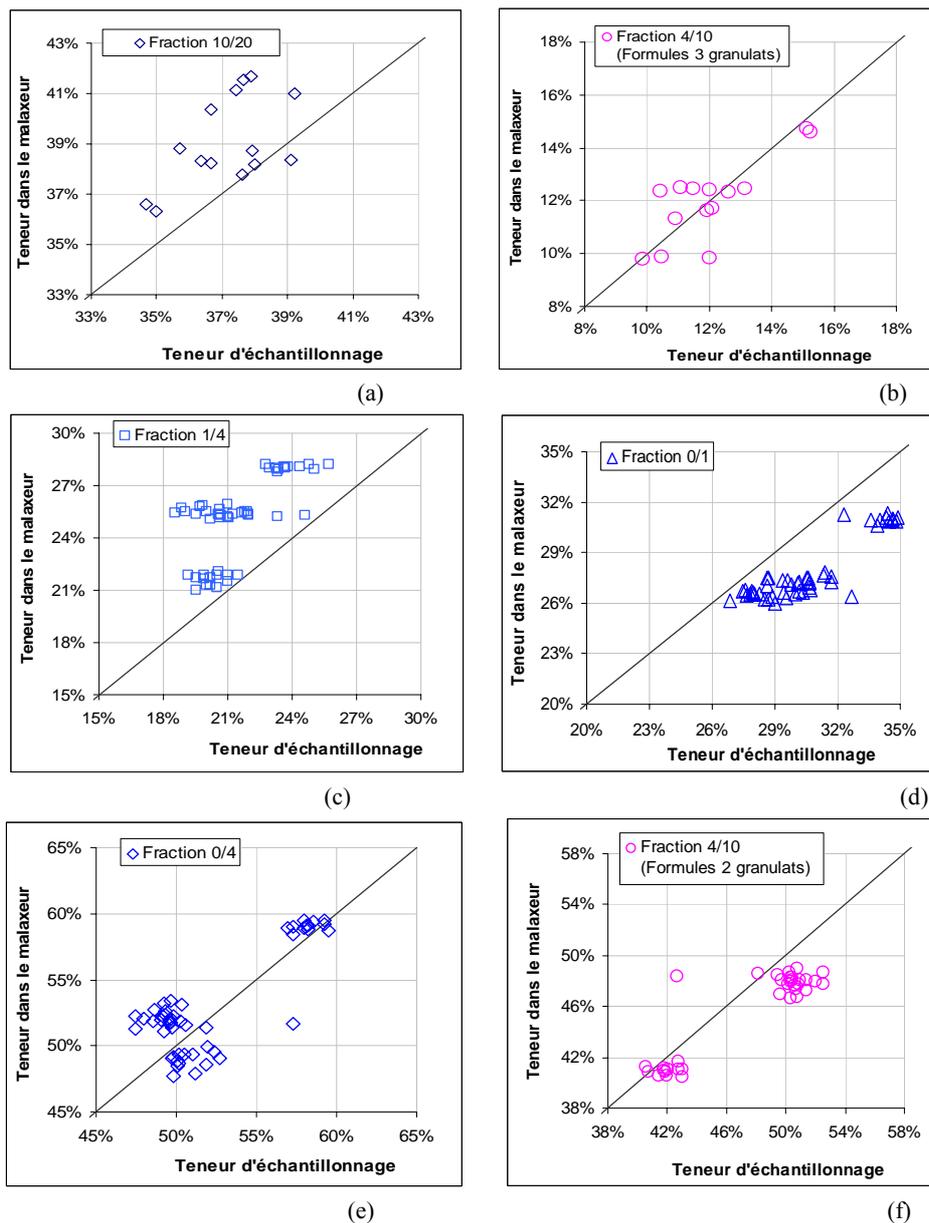


Figure II.17-Confrontation des fractions granulaires

Pour les fractions 0/1 et 1/4, on constate des erreurs systématiques de sens contraire, qui peuvent s'expliquer par un tamisage insuffisant sur le tamis de 1 mm. Dans la suite, on additionne ces fractions pour analyser la fraction 0/4 seulement (le sable).

Les écarts moyens entre la teneur granulaire 0/4, 4/10 et 10/20 dans le malaxeur et dans les échantillons sont de l'ordre de 2% (Tableau II.5). Ceci est vrai pour les formules de deux et trois granulates. En valeur relative (par rapport à la teneur moyenne des ces fractions), l'erreur reste faible (globalement inférieure à 5%).

Il faut rappeler que la comparaison est entre autres affectée par le choix de l'humidité des granulates et d'éventuelles incertitudes sur les fuseaux granulométriques dans les fiches techniques.

On conclut que l'échantillonnage est représentatif en moyenne, c'est-à-dire que l'erreur systématique est faible.

Formules	Classe de granulats	Moyenne dans le malaxeur	Dispersion* (90% confiance)	Moyenne dans les échantillons	Ecart des moyennes	En proportion à la moyenne
3 granulats	10/20	39,1%	1,55%	37,1%	- 2,0%	5,1%
	4/10	12,0%	0,47%	12,0%	0,0%	0,0%
	0/4	48,9%	0,63%	50,8%	1,9%	4,9%
2 granulats	4/10	45,5%	1,73%	47,4%	1,9%	4,2%
	0/4	54,5%	0,68%	52,6%	-1,9%	3,5%

\* Dispersion dans le malaxeur estimée à partir des fiches techniques des matériaux

Tableau II.5-Calculs des biais dus à l'échantillonnage

### ❖ Analyse d'homogénéité de mélanges prélevés

L'homogénéité des mélanges prélevés peut être traitée par des moyens statistiques. Lorsqu'on dispose d'une série de mesures aléatoires dans une gâchée (correspondant statistiquement à un lot d'une même population), l'écart entre deux mesures est relié à une fluctuation de la propriété mesurée dans la gâchée. Pour « n » échantillons d'une même gâchée, on a « n-1 » écarts (entre deux mesures) indépendants. Sur des gâchées réputées identiques, ces écarts font partie d'une même variable aléatoire qui est alors caractérisé par l'ensemble des écarts indépendants disponibles. On détermine la distribution expérimentale, et l'écart type de la mesure dans une gâchée. En effet, l'écart type de la mesure est obtenu en divisant l'écart type des écarts par  $\sqrt{2}$ .

Le traitement statistique des écarts consiste également à déterminer leur moyenne. Si l'échantillonnage est aléatoire, c'est-à-dire s'il décrit fidèlement la distribution statistique, celle-ci doit être nulle. Dans le cas contraire, cette opération est biaisée. Une moyenne est nulle si la valeur zéro se trouve dans l'intervalle de confiance de la moyenne calculée sur les écarts disponibles.

Cette démarche, calcul de l'écart type de la mesure et estimation du biais par la moyenne, est appliquée (Annexe I- 4) aux teneurs des classes granulaires et à l'humidité.

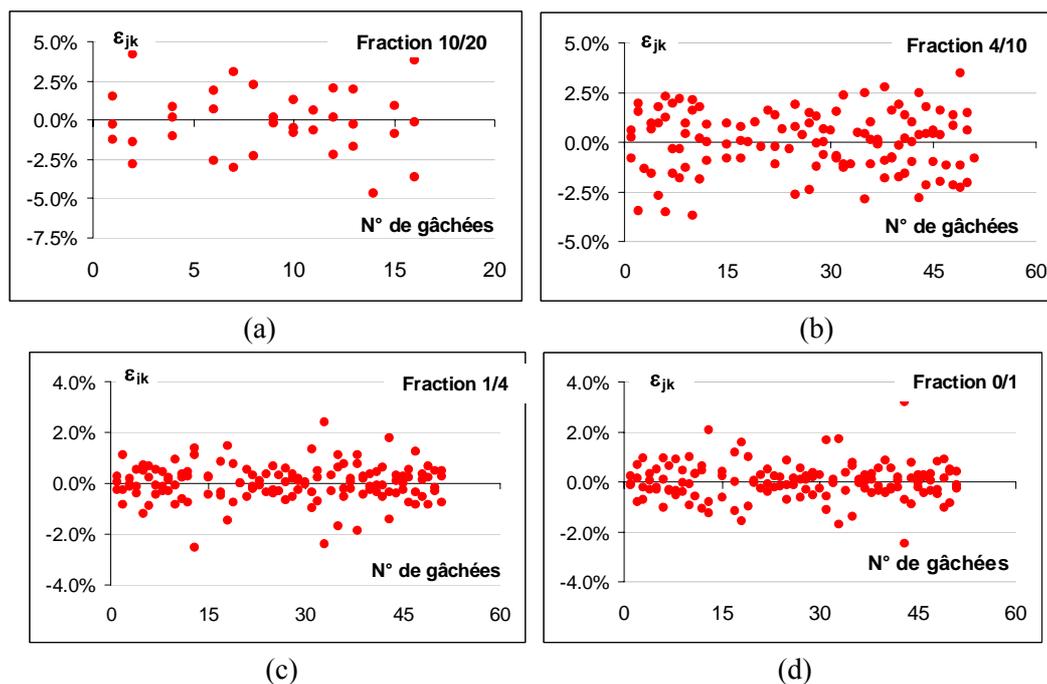
### Mesures de teneurs de fractions granulaires

Dans notre campagne, trois échantillonnages effectués pour chaque gâchée permettent de définir deux écarts de la manière suivante :

$$\begin{aligned}\varepsilon_{i1} &= \lambda_{i2} - \lambda_{i1} \\ \varepsilon_{i2} &= \lambda_{i3} - \lambda_{i2}\end{aligned}\tag{II-1}$$

où  $\lambda_{ij}$  est la teneur de la classe « i » de l'échantillon « j » de la même gâchée.

Les écarts entre des mesures dans la même gâchée pour des teneurs des fractions 10/20, 4/10, 1/4, 0/1 et 0/4 sont représentés dans la Figure II.18. L'écart type de la mesure, et les coefficients de variation relatifs à la teneur moyenne sont indiqués dans le Tableau II.6.

Figure II.18-Fluctuations de la variable  $\varepsilon_i$ 

		10/20	4/10	1/4	0/1	0/4
Formules à 3 granulats	Teneur moyenne	37,1%	12,0%	20,3%	30,6%	50,8%
	Ecart type mesure	2,41%	0,56%	1,12%	1,09%	2,18%
	Coef. Var. mesure	6,5%	4,6%	5,5%	3,6%	4,3%
	Précision mesure 90 %	3,97%	0,92%	1,85%	1,79%	3,59%
	Moyenne des écarts	1,20%	0,32%	0,54%	0,35%	-0,89%
	Indice de confiance k (<2 ?)	1,6	1,8	1,5	1,0	1,3
Formules à 2 granulats	Teneur moyenne		47,4%	21,9%	30,7%	52,6%
	Ecart type mesure		1,13%	0,69%	0,84%	1,13%
	Coef. Var. mesure		2,4%	3,2%	2,7%	2,4%
	Précision mesure 90 %		1,86%	1,14%	1,37%	1,86%
	Moyenne		0,08%	0,03%	0,04%	0,08%
	Indice de confiance k (<2 ?)		0,4	0,3	0,3	0,4

Tableau II.6-Précision dans l'estimation des fractions granulaires.

On remarque que plus le diamètre des granulats est grand, plus l'écart type est grand donc plus la précision diminue (dans le tableau, on indique l'intervalle de confiance à 90%). Il y a sans doute un effet du rapport entre la taille des granulats et celle de l'ouverture de la trappe d'échantillonnage. Le tampon escamotable de la trappe est de 8 cm. Il se peut également qu'une certaine ségrégation existe, et qu'elle affecte davantage les gros grains. Comme indiqué précédemment, la méthode statistique permet de vérifier si les prélèvements sont aléatoires. La moyenne des écarts de mesures successives  $\mu$  dans une même gâchée est indiquée dans le Tableau II.6. L'indice de confiance de l'hypothèse que 0 est la moyenne de ces écarts est :

$$k = \frac{|\mu|}{s} \sqrt{n}$$

où  $s$  est l'écart type de ces écarts de mesures dans une même gâchée et  $n$  est le nombre des écarts disponibles.

On rappelle que l'écart type de la mesure (Tableau II.6) est donné par  $s$  divisé par  $\sqrt{2}$ .

On considère dans la présente étude qu'un indice  $k$  inférieur à 2 est satisfaisant pour conforter l'hypothèse de mesures aléatoires (sans biais). Les mesures de toutes les fractions analysées s'inscrivent dans cette condition. On remarque toutefois que la présence des gros granulats semble perturber la régularité de l'échantillonnage, y compris celle des plus petits grains.

Pour vérifier l'influence des gros granulats sur l'échantillonnage des plus petits, on analyse l'homogénéité du mélange en excluant pour chaque échantillon les granulats de taille supérieure à la fraction analysée. Les résultats sont présentés dans le Tableau II.7 sous la forme des écarts types de la mesure et des coefficients de variation rapportant cet écart type à la teneur de la fraction dans le mode d'analyse respectif. Les écarts types des mesures des plus petites fractions (0/1 et 1/4) sont diminués, pour les formules à trois granulats. Ce phénomène est encore plus remarquable en comparant les coefficients de variation. Il ne semble pas y avoir d'effet du mode d'analyse sur la fraction 4/10 dans les formules à trois granulats, ni sur les fractions 1/4 et 0/1 des formules à deux granulats.

On conclut que les granulats 10/20 perturbent l'homogénéité d'échantillonnage des plus petits granulats alors que les gravillons inférieurs à 10 mm non pas d'effet quantifiable.

mode d'analyse		Ecart type mesure				Coefficient de variation			
		10/20	4/10	1/4	0/1	10/20	4/10	1/4	0/1
Formules à 3 granulats	tout 0/20	2,41%	0,56%	1,12%	1,09%	6,5%	4,6%	5,5%	3,6%
	sans 10/20		0,80%	0,68%	0,60%		4,2%	2,1%	1,2%
	sans 4/20			0,64%	0,64%			1,6%	1,1%
Formules à 2 granulats	tout 0/10		1,13%	0,69%	0,84%		2,4%	3,2%	2,1%
	sans 4/10			0,87%	0,87%			2,1%	1,5%

Tableau II.7-Ecart type et coefficient de variation des mesures des fractions granulaires

### Mesure de l'humidité

L'homogénéité doit être analysée également du point de vue de l'humidité, suivant la même démarche, en considérant que les échantillons restent représentatifs pour le mélange granulaire réel dans le malaxeur. Les différences entre deux mesures d'humidité successives sont présentés dans le graphique suivant.

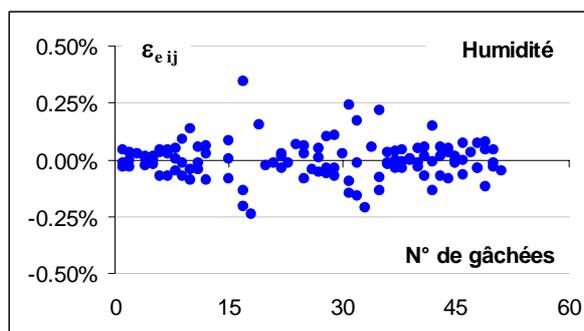


Figure II.19-Fluctuations de la variable  $\epsilon_e$

L'écart type de la mesure d'humidité sur un échantillon est de 0,06% (1,05L/m<sup>3</sup> en dosage). On dispose de trois échantillons par gâchée donc l'écart type de la connaissance de l'humidité dans la gâchée est de 0,035%. En effet, l'écart type est divisé par  $\sqrt{3}$ . Ceci conduit à une précision de mesure sur un échantillon (90% de confiance) de 0,07%, qui correspond à une connaissance de l'eau totale dans le malaxeur (avec les formules étudiées) de  $\pm 1,2 \text{ L/m}^3$ .

Toutefois, on a pu constater que des fluctuations de composition en fractions granulaires sont présentes, d'un échantillon à un autre. Ces fluctuations modifient l'humidité des échantillons car les gravillons n'ont pas la même humidité que le sable. En fait, une corrélation est observée (Figure II.20) entre :

- l'écart entre la teneur en gravillon de deux échantillons d'une même gâchée ;
- l'écart d'humidité de ces deux échantillons.

Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'eau se concentre sur les éléments fins, qui ont une surface spécifique plus forte : moins d'éléments grossiers, c'est plus d'éléments fins, d'où l'apparition d'une anti-corrélation.

Celle-ci est plus forte pour les formules 0/20 que pour les formules 0/10. Des corrections s'appuyant sur ces corrélations sont effectuées, afin d'améliorer la précision de la mesure de l'humidité.

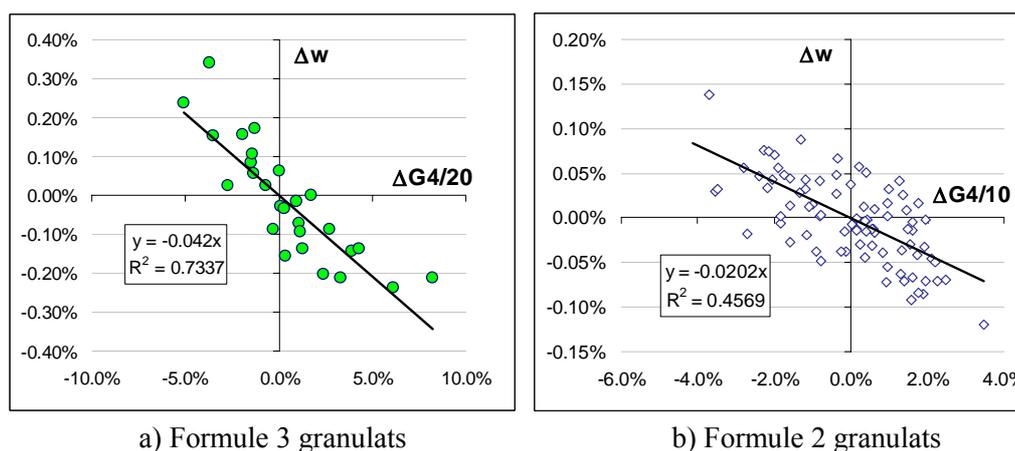


Figure II.20-Corrélation entre l'écart des fractions granulaires et l'écart de l'humidité

Pour établir une correction il est nécessaire d'explicitier l'origine de la pente des droites de régression dans la Figure II.20.

Les humidités des gravillons (ou mélange de gravillons dans le cas des bétons de 3 granulats)  $w_G$  et du sable  $w_S$  sont supposées constantes dans la gâchée. Lors du prélèvement, on mesure l'humidité de l'échantillon « j »,  $w_j$ . On a la relation suivante :

$$\alpha_{Gj} w_G + (1 - \alpha_{Gj}) w_S = w_j \quad (\text{II-2})$$

où :  $\alpha_{Gj}$  et  $1 - \alpha_{Gj}$  sont respectivement les proportions de gravillons et du sable dans l'échantillon

On obtient:

$$\alpha_{Gj} (w_G - w_S) + w_S = w_j \quad (\text{II-3})$$

En faisant la différence pour deux échantillons de même gâchée, on a :

$$(w_G - w_S) \Delta \alpha_{Gj} = \Delta w_j \quad (\text{II-4})$$

Donc, la pente de la droite de régression entre l'écart d'humidité  $\Delta w_j$  et celui de teneur en gravillon  $\Delta \alpha_{Gj}$  est la différence entre l'humidité des gravillons et celle du sable. L'équation (II-4) permet de déterminer la différence  $w_G - w_S$  moyenne, car dans la Figure II.20 les pentes de régression correspondent à des écarts  $\Delta w_j$  et  $\Delta \alpha_{Gj}$  sur plusieurs gâchées. On peut maintenant utiliser l'équation (II-3) pour calculer l'humidité du sable puis celle des gravillons dans chaque gâchée. Ces humidités et les pesées de granulats permettent de déterminer l'humidité et la fraction de granulats secs dans le malaxeur.

Au final, l'humidité corrigée  $w'_j$  peut s'exprimer :

$$w'_j = w_j + (w_G - w_S)(\alpha_{G,mlx} - \alpha_{Gj}) \quad (\text{II-5})$$

où  $w_j$  : humidité mesurée de l'échantillon (sans correction)

$\alpha_{G,mlx}$  : fraction des gravillons dans le malaxeur (calculé avec les bons de pesées).

Les différences entre deux mesures d'humidité successives dans une même gâchée avant et après correction sont représentées dans la figure (Figure II.21).

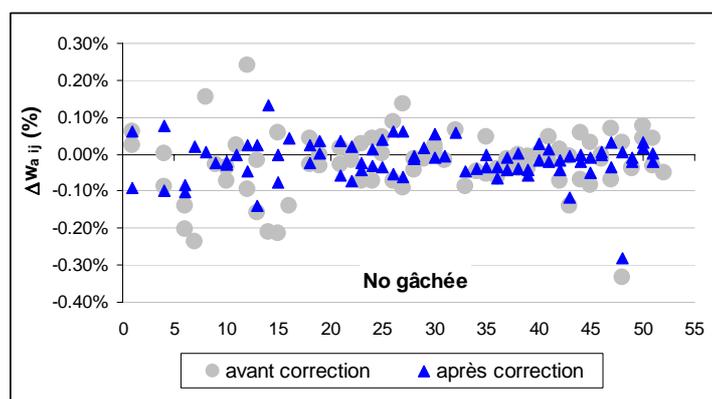


Figure II.21-Fluctuations de l'écart entre deux mesures d'humidité (avant et après correction)

On constate qu'après la correction, les mesures d'humidités sont moins fluctuantes dans une même gâchée qu'avant la correction. L'écart type de la mesure sur un échantillon devient 0,039% (environ 0,56 L/m<sup>3</sup>). On dispose de trois mesures par gâchée, donc l'écart type de la connaissance du dosage en eau dans le malaxeur est de  $\pm 0,32$  L/m<sup>3</sup> ou une précision (intervalle de confiance de 90%) de l'ordre de 0,65 L/m<sup>3</sup>. Par la correction, on améliore dans un rapport de 1,5 la précision de mesure de l'humidité.

La connaissance du dosage en eau dans le malaxeur est également conditionnée par l'erreur de mesure de la bascule à eau (de l'ordre de 0,2 litre) qui est cependant généralement négligeable.

#### ❖ Comparaison avec la méthode de séchage sur béton frais

L'humidité de deux échantillons d'environ 1,2 kg de béton frais est mesurée par séchage à la poêle à frire dont le résultat est présenté dans l'Annexe I- 5. La précision de la méthode est analysée, la méthode de référence étant celle de la mesure sur échantillons de granulats.

On calcule l'eau totale dans une gâchée en utilisant la moyenne des deux mesures d'humidité du béton par séchage. L'eau totale en utilisant l'humidité des granulats est également déterminée. La différence de ces estimations pour les gâchées analysées est représentée dans la Figure II.22 qui montre également les niveaux correspondant à la différence moyenne et à l'intervalle de confiance 90%. Après traitement statistique on obtient une moyenne de la différence de  $-9,8 \text{ L/m}^3$  et un écart type de  $5,3 \text{ L/m}^3$ . L'écart type de la mesure de séchage est de  $7,5 \text{ L/m}^3$  (on doit multiplier par  $\sqrt{2}$  car on analyse la moyenne de deux mesures).

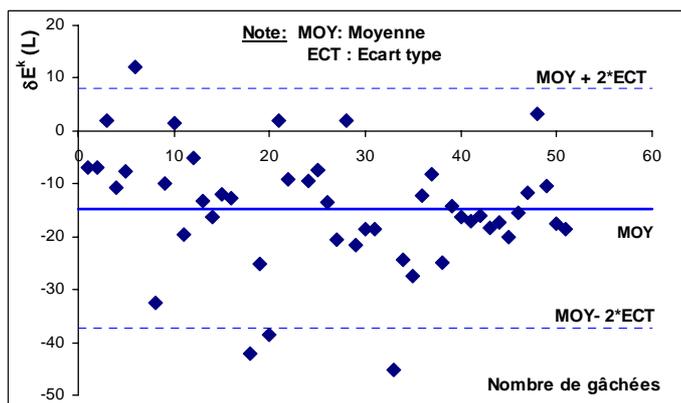


Figure II.22-Différences des estimations du dosage en eau (par séchage et par prélèvements des granulats)

Ce résultat montre que le séchage du béton frais sous-estime systématiquement la quantité d'eau totale dans le malaxeur. Une raison plausible est la fixation d'eau dans les hydrates de ciment lors de séchage de béton frais.

L'écart type de la mesure est lié à des erreurs aléatoires. L'effet de l'incertitude de la mesure de référence est négligeable. L'écart type déterminé est comparable à des données fournies dans la bibliographie, par exemple  $8 \text{ L/m}^3$  [88]. Cette étude propose une correction de la méthode. Elle utilise la teneur en gravillons des échantillons, mesurée par tamisage après séchage du béton. L'écart type après correction est de  $3 \text{ L/m}^3$ .

En conclusion, la méthode de séchage de béton frais s'avère beaucoup moins précise que la méthode par prélèvement des granulats.

### II.3.2 Calibrage du Wattmètre

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer une courbe de calibrage du wattmètre pour les formules de béton utilisées lors de la campagne d'essai. La mesure du dosage en eau de référence est celle utilisant des prélèvements de granulats, dont on a démontré la bonne précision (écart type de  $0,32 \text{ L/m}^3$ ).

#### II.3.2.a Protocole de calibrage de wattmètre

Un bon calibrage nécessite une plage de variation suffisante de l'humidité du béton. Cette condition n'est pas facile à remplir, car, à la fabrication, on souhaite au contraire des écarts faibles entre les gâchées. On peut cependant jouer sur les ajouts d'eau sur des gâchées destinées à une même toupie : première gâchée moins dosée en eau, la suivante compensant

par un dosage en eau plus grand (en s'assurant que le dosage en eau moyen dans la toupie est celui prescrit), et en faisant l'hypothèse que la toupie est capable de réhomogénéiser le béton.

Le protocole de principe appliqué lors de cette investigation est le suivant :

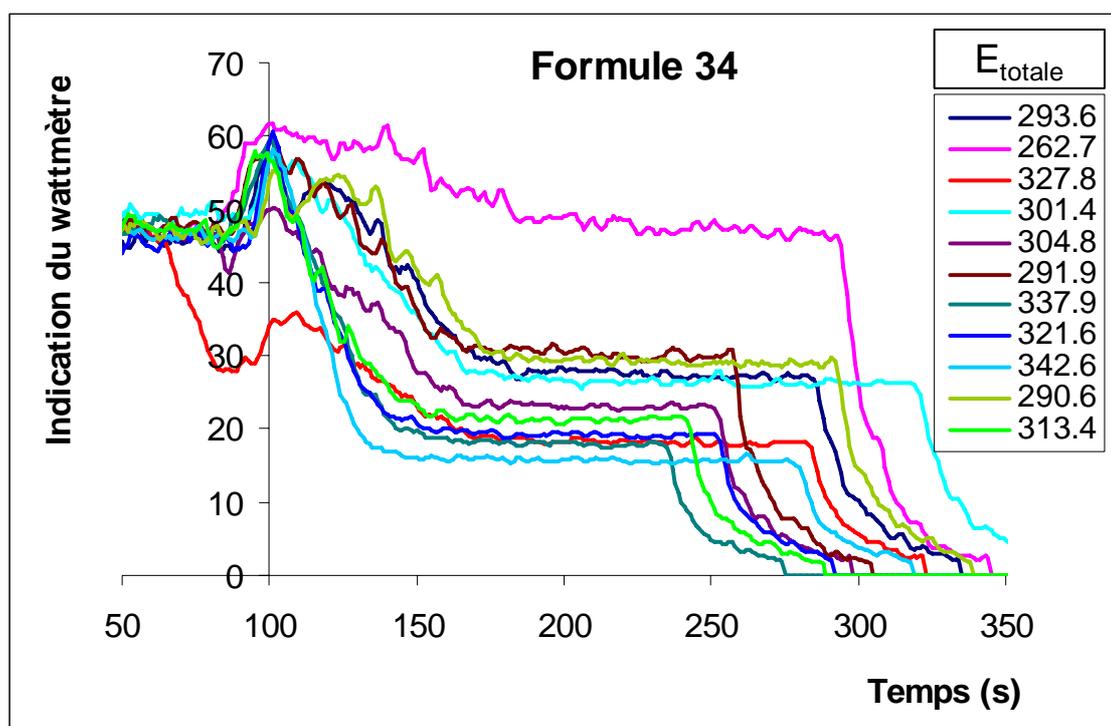
- la première gâchée de la toupie est fabriquée avec la formule nominale ;
- les gâchées suivantes ont des écarts d'eau imposés  $\Delta E_1$  ;  $-\Delta E_2$  ;  $+\Delta E_3$ ... avec la contrainte de respecter le dosage en eau prescrit dans la toupie.

Une fois les prélèvements de granulats effectués, les autres constituants sont introduits dans le malaxeur. Le temps de malaxage après la fin de l'introduction de tous les constituants est au minimum de 55 secondes. Le signal du wattmètre évolue tout le long du malaxage. La mesure de la puissance est alors prise au même temps de malaxage sur toutes les gâchées. Dans la pratique, et pour éviter une influence du bruit de mesure de la puissance, on fait la moyenne des mesures entre 40 à 50 secondes de malaxage avec tous les constituants.

### II.3.2.b Analyse des résultats

Le protocole décrit précédemment a été appliqué sur sept formules de béton différentes (Tableau II.3), dans 49 gâchées de 15 toupies. Les bons de pesées de ces gâchées sont données dans l'Annexe I- 3.

La Figure II.23 montre la variation de la courbe du wattmètre des deux formules typiques de deux granulats (formule 34) et de trois granulats (formule 109), ainsi qu'une formule BAP, en fonction des différents dosages en eau totale. L'ensemble des courbes obtenues est présenté dans l'Annexe I- 6. On remarque que la puissance de stabilisation baisse avec l'augmentation du dosage en eau, ce qui est connu par ailleurs.



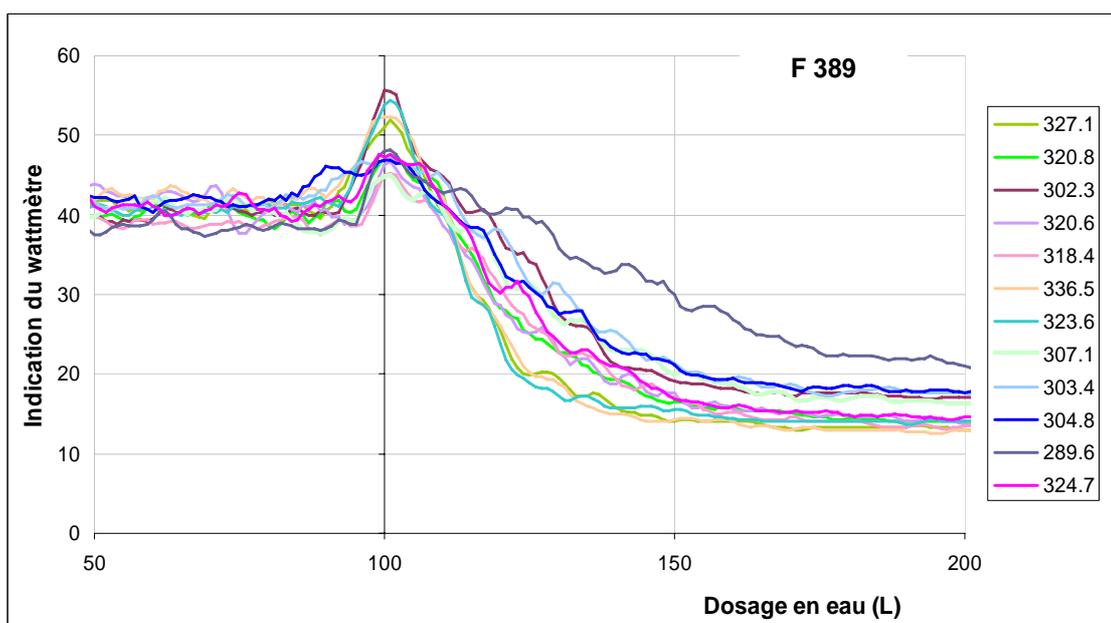
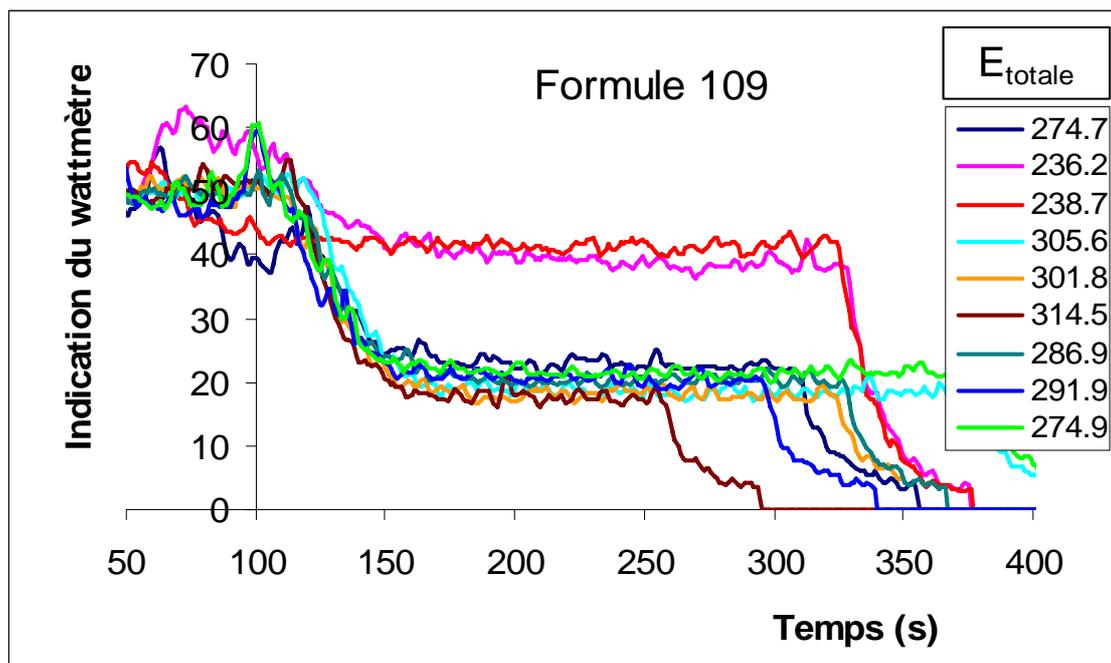


Figure II.23-Exemple des courbes de wattmètres à des différents dosages en eau

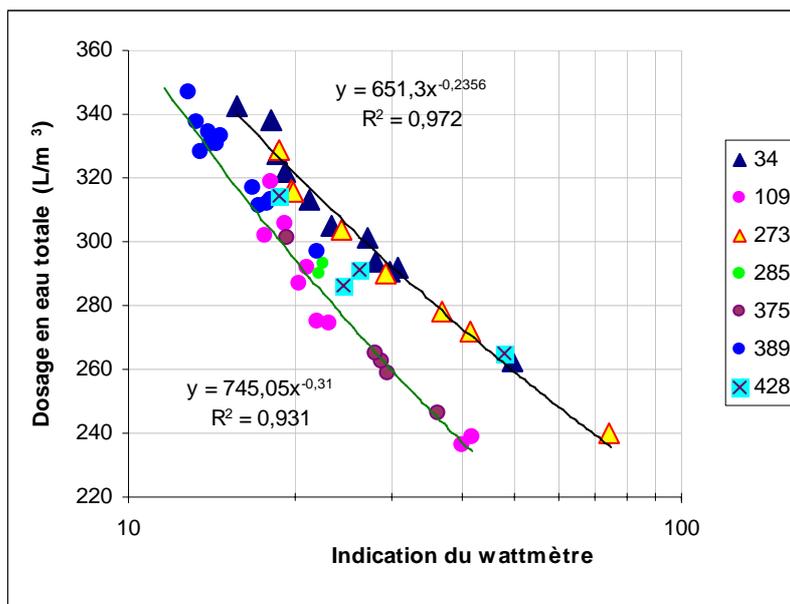


Figure II.24- Correspondance entre dosage en eau des formules type et l'indication du wattmètre

La relation entre le dosage en eau du béton et la puissance de malaxage est présentée dans la Figure II.24 pour les 7 formules. On observe des relations quasi-exponentielles, différentes d'une formule à une autre. Cependant, on peut trouver une nette différence entre les formules à deux et à trois granulats. Il est probable que cette différence est associée au diamètre maximum des granulats (10 et 20 mm, respectivement). La formule de béton autoplaçant 389 (fortement dosée en adjuvant, avec un rapport G/S plus faible et un rapport E/C inférieur) se comporte différemment des autres formules à deux granulats. C'est d'ailleurs également le cas de la formule 428, avec un comportement légèrement atypique. Il est possible que ce soit le dosage en ciment inférieur de cette formule (Tableau II.3) qui explique la différence. Toutefois, lorsqu'on remplace le dosage en eau par l'humidité du béton, il semble que les deux formules (BAP et 428) se regroupent mieux dans la famille des formules de deux granulats (Figure II.25). On remarque un changement de tendance de la sensibilité du wattmètre autour d'une indication de 25 pour les deux familles de formules.

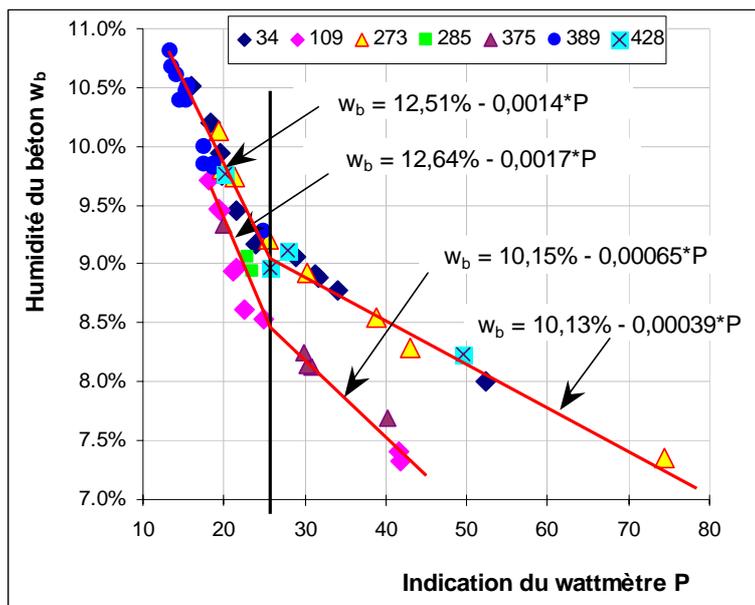


Figure II.25-Correspondance entre wattmètre et humidité de 7 bétons  
(Données - Annexe I- 7)

D'un point de vue pratique, on peut considérer de manière simplifiée que le dosage en eau est proportionnel à l'indication du wattmètre à l'intérieur d'une famille (deux ou trois granulats) et d'une zone (indication du wattmètre inférieure ou supérieure à 25).

En considérant ces relations, la correspondance entre l'humidité calculée à l'aide du wattmètre et celle mesurée expérimentalement est donnée dans la Figure II.26. L'erreur (au sens de l'écart type des résidus) liée à ces lissages (proportionnalités) est de 0,15% (points de pourcent d'eau). Ceci conduit à une précision (deux fois l'écart type) du wattmètre en tant que mesure d'humidité du béton de 4,5 L/m<sup>3</sup>.

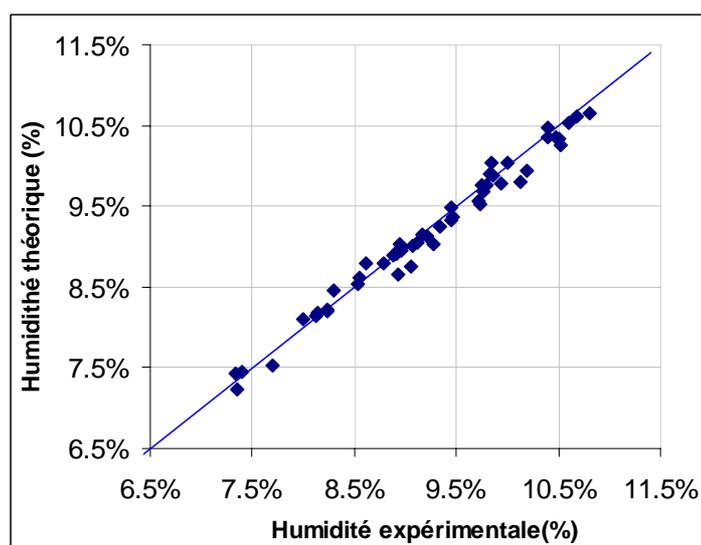


Figure II.26-Confrontation entre les humidités mesurées  
et celles calculées avec le wattmètre

Bien entendu, il ne faut pas perdre de vue que cette précision doit s'entendre pour un groupe de gâchées d'un béton fabriquées à la suite, à partir d'un même lot de constituant,



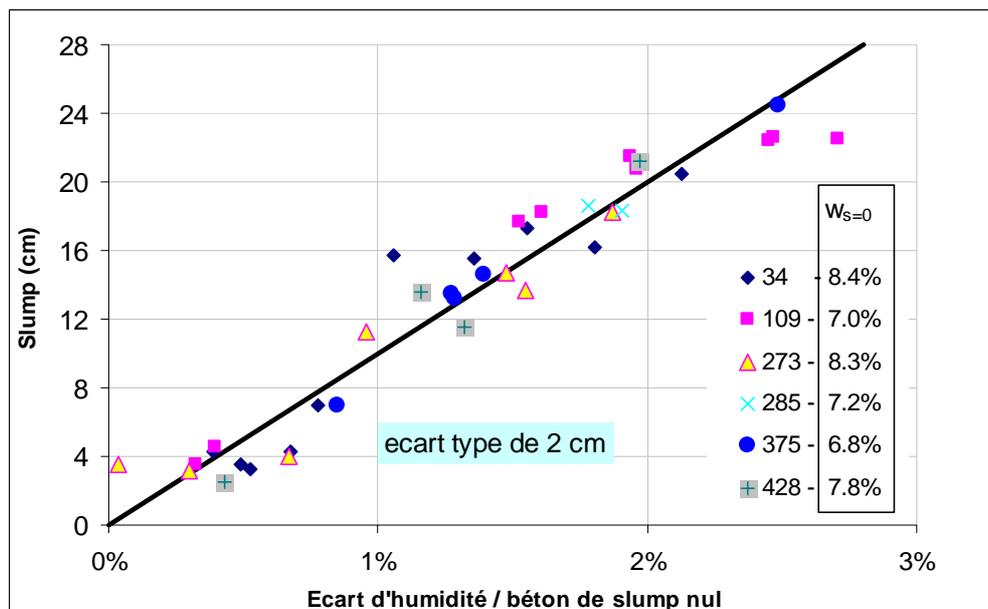


Figure II.28- Affaissement en fonction de l'écart d'humidité du béton par rapport à un béton d'affaissement nul

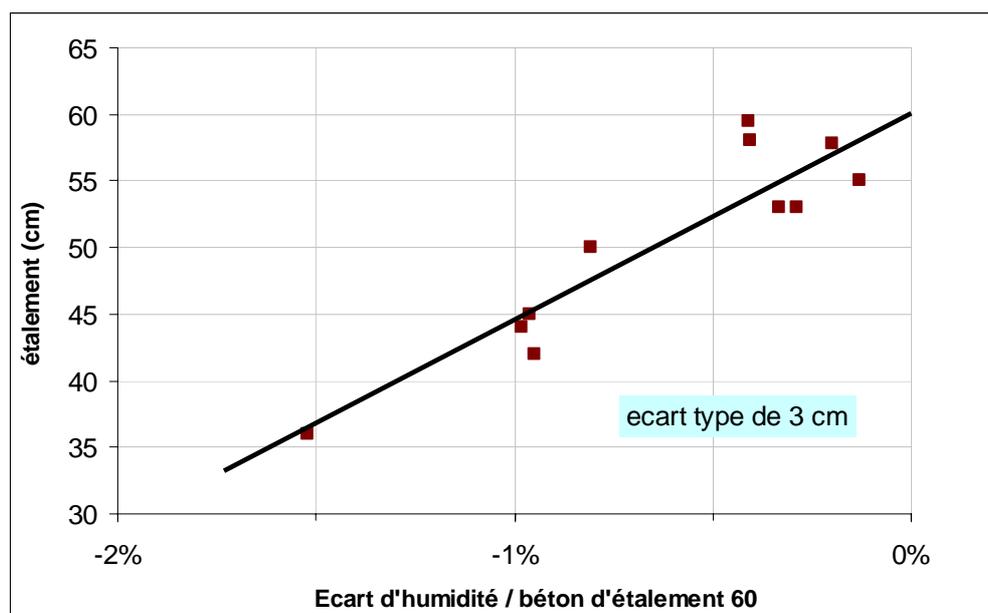


Figure II.29- Etalement en fonction de l'écart d'humidité du béton par rapport à un béton d'étalement de 60cm

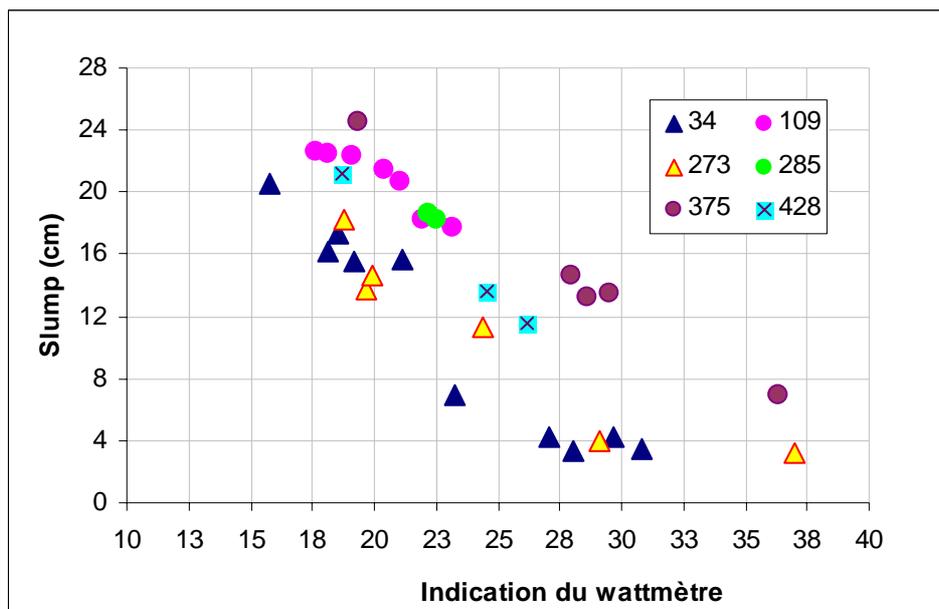


Figure II.30-Affaissement en fonction du wattmètre

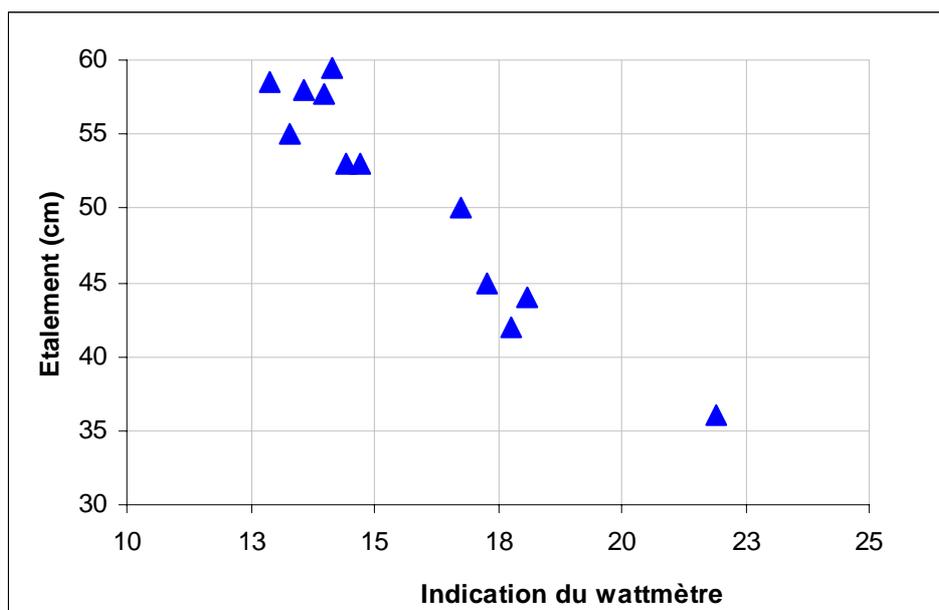


Figure II.31- Etallement (formule 389, BAP) en fonction du wattmètre

La corrélation entre l'indication du wattmètre et l'affaissement montre des relations affines pour une même formule (Figure II.30) tant que l'affaissement est supérieur à 7 cm. Ces relations rappellent fortement celles du dosage en eau en fonction de l'indication du wattmètre (Figure II.24) car on remarque les mêmes différences en fonction du diamètre maximum. De plus, la formule 428 est légèrement atypique. Le béton autoplaçant ne peut pas être comparé avec les autres formules car la mesure de la consistance est différente (étalement).

Il semble possible de prédire l'affaissement (si sa valeur est supérieure à 7 cm) à partir d'un calibrage du wattmètre. Le même constat est fait sur la mesure d'étalement (Figure

II.31). Un calibrage affine en fonction de l'indication du wattmètre permet de prédire des étalements supérieurs à 40 cm.

### **II.3.4 Conclusions**

La viscosité apparente devrait jouer le rôle principal sur le niveau de puissance de stabilisation. Le calibrage du wattmètre démontre, s'il en était besoin, que le niveau de la stabilisation du wattmètre est fortement lié à la teneur en eau du béton. En effet, celle-ci conditionne fortement la rhéologie. Un autre paramètre de première importance semble être la granularité du béton, en particulier le diamètre maximum du squelette granulaire.

Bien qu'il existe des zones de sensibilités du wattmètre au dosage en eau différentes, la relation humidité-wattmètre est univoque pour une formule sèche donnée, pour les dosages correspondant à des bétons.

Le calibrage du wattmètre en tant que mesure dans le malaxeur de l'humidité du béton nécessite une mesure de référence. La méthode originale mise au point dans cette investigation s'avère très précise (écart type de la mesure de l'ordre de 0,32 L/m<sup>3</sup>). La méthode requiert l'installation d'une trappe d'échantillonnage, mais ne perturbe que faiblement la production.

### **II.3.5 Proposition de protocole applicable industriellement**

Compte tenu des ces analyses, la méthode de prélèvement de granulats en vue du calibrage du wattmètre pourrait être appliquée industriellement. Nous proposons le protocole suivant pour de futures applications :

1. fabrication d'une gâchée à la formule nominale, et deux autres avec  $\pm 15 \text{ L/m}^3$  dans une même toupie ;
2. pour chaque gâchée :
  - a. introduction des granulats dans le malaxeur et mise en attente de l'entrée des autres constituants (environ 1 minute) ;
  - b. dès que possible, prélèvement en utilisant la trappe d'un premier échantillon d'environ 1 litre. Cet échantillon, qui sera jeté, est destiné à nettoyer la trappe d'éventuel béton résiduel ;
  - c. à partir de 20 secondes de malaxage, prélèvement de 3 autres échantillons d'environ 1 litre espacés de 6 s. Si possible, augmenter le nombre d'échantillons de la même gâchée (ce qui améliorera la précision de la mesure de l'humidité). Ces échantillons sont à peser sur place dans des boîtes métalliques couverte pré-tarées et codées (nom de la gâchée, ordre d'échantillonnage) ;
  - d. introduction des autres constituants et enregistrement des mesures du wattmètre, comme pour une gâchée normale, avec au moins 55 secondes de malaxage ;
  - e. séchage et tamisage éventuel des échantillons en laboratoire, puis application de l'algorithme de correction de l'humidité en fonction du rapport G/S des échantillons présenté dans le paragraphe II.3.1.e ;
3. calibrage du wattmètre filtré pour la formule :

établissement de la courbe de calibrage de l'humidité en fonction de la puissance en utilisant la moyenne des mesures entre 40 et 50 s de malaxage, sur au moins trois gâchées espacées en dosage en eau.

## II.4. Amélioration en ligne de la régularité du dosage en eau

La correction du dosage en eau actuellement utilisée dans les centrales à béton est effectuée par le centralier, qui s'appuie sur l'indication du wattmètre. Le plus souvent le centralier estime l'écart de dosage en eau de la première gâchée d'une toupie pour corriger les suivantes. Effectivement, nous avons montré dans le paragraphe (II.3.2) que le wattmètre fournit des informations relativement précises (surtout s'il est bien calibré) sur la teneur en eau du béton dans le malaxeur, ou en tout cas sur l'évolution de cette teneur en eau d'une gâchée à l'autre. On étudie ici l'effet de la méthode de correction du centralier. On discute également une amélioration de cette méthode et la possibilité d'automatisation.

### II.4.1 Analyse de la variation en eau apportée par les granulats à l'échelle d'une toupie

L'erreur du dosage en eau dans la gâchée « i » est définie par :

$$\Delta E_{bi} = E_{bi} - E_{bo} \quad (\text{II-6})$$

où  $E_{bi}$  est la mesure du dosage en eau avec le wattmètre (supposé réelle) et  $E_{bo}$  le dosage en eau théorique de la formule.

Cet écart est dû, d'une part à la correction du conducteur de la centrale et d'autre part à l'erreur d'estimation de l'eau apportée par les granulats. Sans intervention du centralier, l'écart d'eau est égal à l'erreur sur l'estimation de l'eau apportée par les granulats :

$$\Delta E_{ai} = E_{ai}^R - E_{ai}^A = E_{bi} - E_{bo} - \Delta E_i \quad (\text{II-7})$$

où  $\Delta E_i$  la correction du centralier,  $E_{ai}^R$  l'eau réelle apportée par les granulats et  $E_{ai}^A$  l'eau apportée par les granulats estimée par l'automate.

La correction du dosage d'eau pour une gâchée  $\Delta E_i$  est basée sur les gâchées précédentes car on n'a pas d'outil de suivi en temps réel de l'évolution des humidités de gravillons (au contraire des fractions sableuses). On peut donc constater que ceci n'est réalisable que si l'écart d'eau défini par l'expression (II-7) est répétable d'une gâchée à une autre. Autrement dit, la quantité d'eau apportée par les granulats doit être répétable. A long terme, cette condition n'est pas vérifiée, mais à court terme, à l'échelle d'une toupie, elle peut l'être. On a en effet à la fois un temps de fabrication court (inférieur à 10 minutes) et une quantité de granulats faible (inférieur à 6 m<sup>3</sup>) par rapport à la production journalière.

La Figure II.32 présente l'écart d'eau apportée par les granulats  $\Delta E_a$  des gâchées de 1,5 m<sup>3</sup> en juin 2006, selon la formule (II-7) dans laquelle  $E_{bi}$  est estimé grâce au wattmètre,  $E_{bo}$  provient de la formule nominale, et  $\Delta E_i$  est lu dans la base de données. On obtient un signal temporel dont l'amplitude des oscillations à court terme est inférieure à celle à long terme. La caractérisation de ces deux types d'évolutions est effectuée ici au moyen des écarts types (Figure II.32) :

- des écarts d'eau apportée par les granulats entre les gâchées d'une même toupie, dont la moyenne est de 3,0 L/m<sup>3</sup> ;
- des écarts d'eau apportée par les granulats entre les gâchées toute toupie confondue, 8,0 L/m<sup>3</sup>.

L'écart type de  $\Delta E_a$  dans une toupie est 2,6 fois inférieur à l'écart type de  $\Delta E_a$ , toute toupie confondue. On constate d'ailleurs que l'écart type d'eau dans la toupie est inférieur à  $5\text{L/m}^3$  dans 95% des cas.

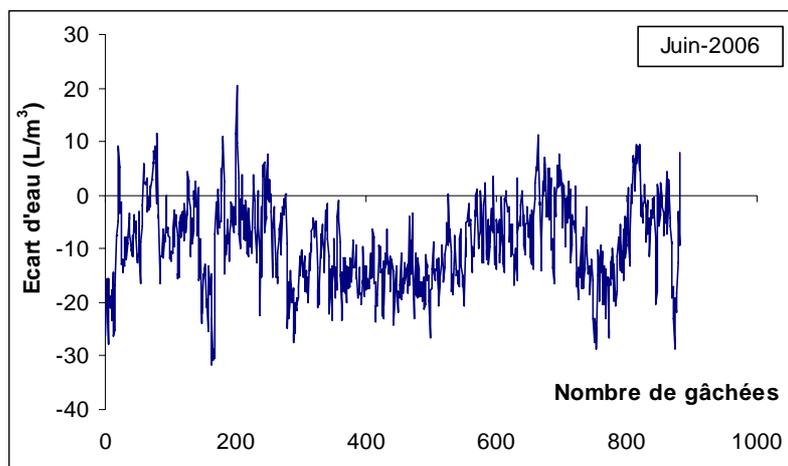


Figure II.32-Evolution des écarts d'eau dans le malaxeur (en 06/2006)

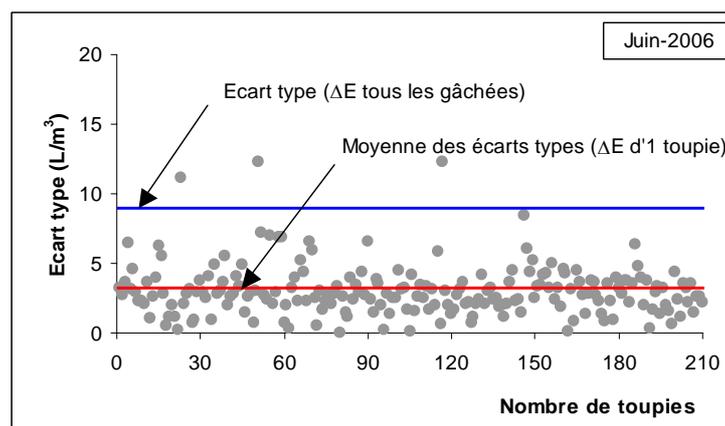


Figure II.33-Ecart type des  $\Delta E_a$  des gâchées de même toupie en juin 2006

Les mêmes tendances sont observées (Figure II.36) sur une période de fabrication plus longue (septembre 2005 – mai 2006). Les écarts d'eau dans une toupie sont proches (écart type de  $2,8\text{L/m}^3$ ) mais les écarts toutes toupies confondues sont plus importants (écart type de  $12,5\text{L/m}^3$ ). Cette augmentation peut être l'effet de saisons différentes. Toutefois, il faut rappeler que la mesure de l'écart d'estimation de l'eau apportée par les granulats est faite par l'intermédiaire d'une mesure au moyen du wattmètre. En juin 2006, le wattmètre est calibré correctement. Ceci n'est pas le cas sur la période plus longue. La question se pose sur l'éventuel dérèglement du wattmètre.

Une manière de visualiser l'éventuel dérèglement est de suivre les valeurs maximum de la puissance (lors d'une gâchée) sur la période. En effet, on peut supposer le pic de puissance comme fonction du volume de remplissage et de l'état d'usure ainsi que le réglage de l'entrefer des pales. On est moins influencé par la formulation du béton. En fixant le volume de la gâchée, l'évolution du pic de puissance d'une gâchée à une autre informe sur le niveau d'usure des pales du malaxeur.

La Figure II.34 montre l'évolution du pic de puissance entre septembre 2005 et juin 2006. A l'évidence, des dérèglages se manifestent. On peut même supposer que des valeurs de wattmètre plus élevées entre septembre et décembre 2005 (Figure II.34) correspondent à un écart d'eau calculé plus grand (Figure II.35).

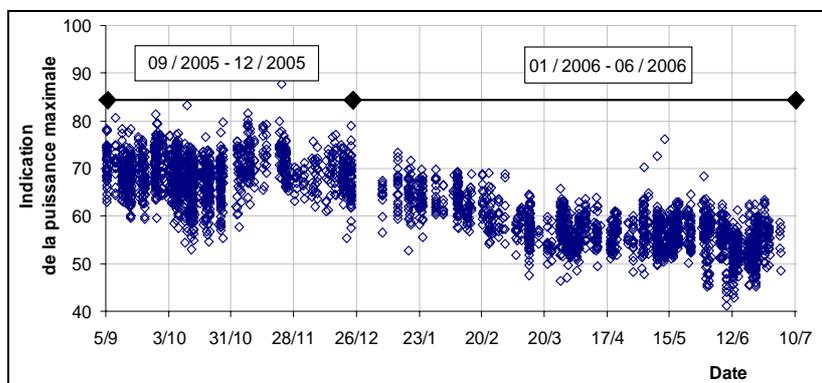


Figure II.34-Evolution du pic de puissance dans le temps

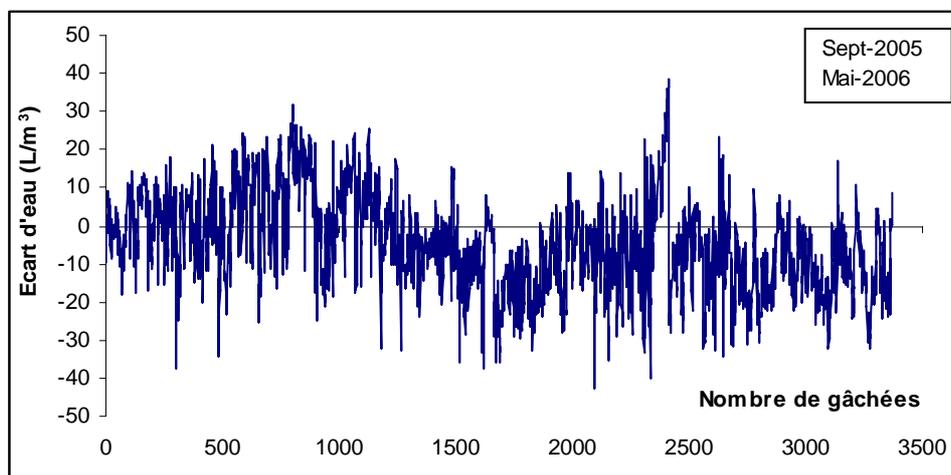


Figure II.35- Evolution des écarts d'eau dans le malaxeur (entre septembre 2005 et mai 2006)

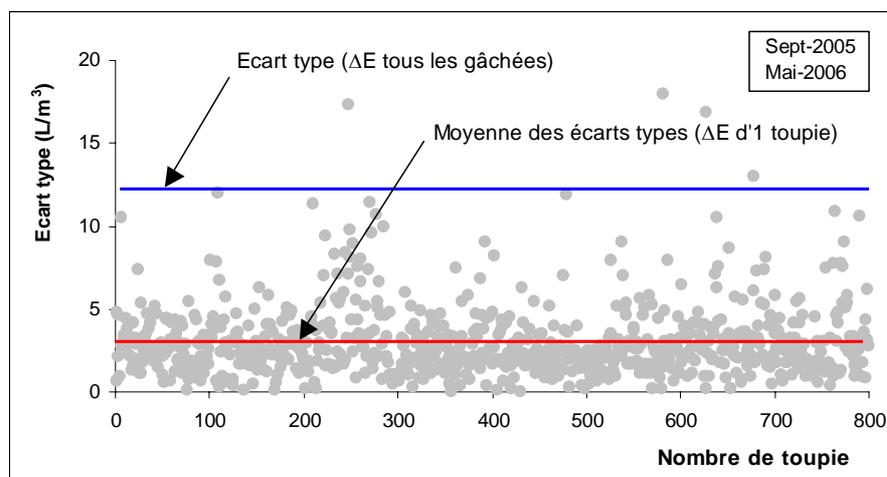


Figure II.36-Ecart type des  $\Delta E_a$  des gâchées de même toupie en 09/2005-05/2006

On constate que dans la plupart des cas, ce sont les premières toupies de la demi-journée qui correspondent à un écart type supérieur à 5 L/m<sup>3</sup>. La raison probable est l'égouttement dans les silos de stockage du sable et des éventuels gravillons mouillés lorsque le temps de repos de la centrale est long.

Ce phénomène peut dérégler la méthode de correction à partir de la première gâchée lors du démarrage de la centrale.

#### **II.4.2 Information automatisée sur les écarts de dosage en eau**

Compte tenu des résultats présentés dans le paragraphe précédent, un plan de correction du dosage en eau d'une gâchée à une autre semble possible (voire même automatisable) dans les centrales à béton. Deux démarches sont étudiées en parallèle. La première utilise la première gâchée pour proposer une correction pour le reste de la toupie. La deuxième corrige chaque gâchée en fonction de toutes les gâchées précédentes de la toupie.

##### **II.4.2.a Correction avec la mesure de la première gâchée**

En supposant qu'il n'y a pas de corrections effectuées par le centralier ( $\Delta E_i = 0$  pour la première gâchée), selon (II-7) on a:

$$\Delta E_{a1} = E_{b1} - E_{bo} \quad (\text{II-8})$$

qui répercute l'erreur d'estimation de l'humidité des granulats. On suppose cet écart identique dans les  $n-1$  autres gâchées de la toupie. Par conséquent, on corrige l'eau d'ajout dans ces autres gâchées par  $-\Delta E_{a1}/(n-1) - \Delta E_{a1}$ . Si l'hypothèse est vraie, le dosage en eau dans la toupie est  $E_{bo}$ , dosage en eau prescrit.

Cependant, d'une gâchée à l'autre, une variation supplémentaire de l'écart d'eau existe, estimée précédemment par un écart type de 3 L/m<sup>3</sup>. On écrit l'écart d'eau dans la gâchée  $i$ ,  $\Delta E_{ai}$  comme une somme d'une erreur systématique  $\Delta E_a$  et une erreur fluctuante de moyenne nulle et d'écart type 3 L/m<sup>3</sup>,  $\delta E_{ai}$ . L'écart d'eau dans la toupie (par rapport à la

formule nominale)  $\Delta E_t = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n (\delta E_{ai} - \Delta E_a)$  est d'espérance nulle. Son écart type est

$$\sigma(\Delta E_t) = \frac{\sqrt{2(n-1)}}{n} \sigma(\delta E_a)$$

Pour une toupie de 3 gâchées l'écart type de l'écart de l'eau est de l'ordre de 2 L/m<sup>3</sup>. Cette erreur est valable en considérant qu'on connaît exactement le dosage en eau dans chaque gâchée. Une erreur supplémentaire est introduite par la mesure du dosage en eau qui affecte l'écart type de la fluctuation. En considérant une mesure avec le wattmètre (écart type de la mesure de 2,5 L/m<sup>3</sup>) l'écart type de la fluctuation devient 3,9 L/m<sup>3</sup>. Pour une toupie de 3 gâchées l'écart type de l'écart de l'eau devient 2,6 L/m<sup>3</sup>.

Le résultat d'une simulation d'application de la correction (dont les détails sont décrits dans l'Annexe I- 8) sur les données d'acquisition pendant 10 mois (de septembre 2005 à juin 2006) est montré dans la Figure II.37 (environ 1000 toupies). Sur cette figure, l'ordonnée désigne l'écart d'eau dans la toupie (L/m<sup>3</sup>) avec correction en utilisant la mesure de la première gâchée et l'abscisse désigne la toupie correspondante numérotée de manière chronologique. L'écart d'eau dans la toupie corrigée à l'origine par le centralier est aussi présenté à titre comparatif.

L'écart avec correction est de moyenne nulle ( $0,1 \text{ L/m}^3$ ) et d'écart type  $3,6 \text{ L/m}^3$ , comparable, mais plus grand que la valeur estimée précédemment. La précision de dosage sur la première gâchée contribue à la précision totale autant que toutes les autres gâchées ensemble. Or, l'écart type de l'erreur de dosage sur les premières gâchées est plus grand que celui de toutes gâchées confondues ( $3 \text{ L/m}^3$ ). Ceci explique, à notre sens, l'écart type de la simulation, légèrement plus grand que celui estimé en supposant une distribution gaussienne des erreurs de dosage dans le malaxeur.

Les corrections du centralier sont beaucoup plus dispersées : erreur systématique (moyenne de  $-7,2 \text{ L/m}^3$ ) et fluctuations plus importantes (écart type de  $12,8 \text{ L/m}^3$ ). L'origine de l'erreur systématique dénote une différence entre la consistance de la formule nominale, indiquée dans l'automate, et le dosage en eau réellement nécessaire pour obtenir cette consistance. Il est probable que le centralier corrige la composition théorique seulement sur certaines fabrications, ce qui génère un écart type supplémentaire. Il est probable que la consistance du béton varie également avec les conditions climatiques à dosage en eau égale. Le centralier corrigeant la consistance l'écart type du dosage en eau augmente. Enfin, le wattmètre est considéré calibré et constant dans la simulation ce qui n'est pas la réalité de la fabrication.

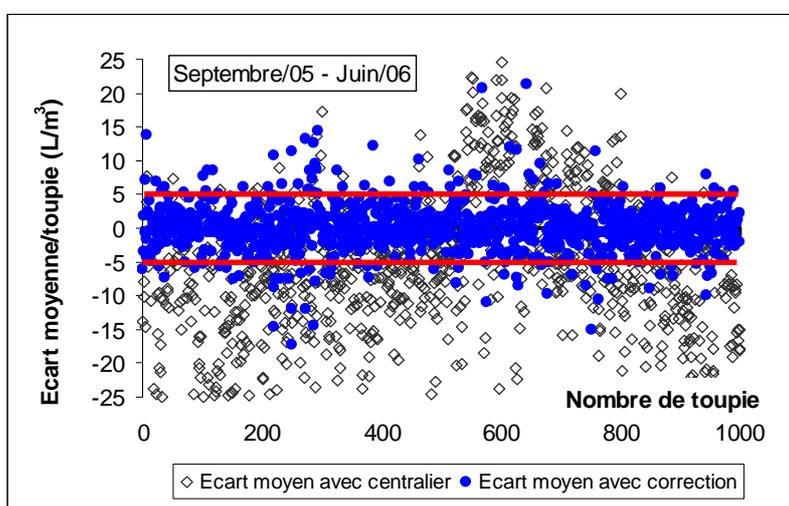


Figure II.37-Ecart d'eau moyen dans la toupie

#### II.4.2.b Correction sur les mesures des gâchées précédentes

Dans la Figure II.37, on observe des toupies dont l'écart d'eau est supérieur à  $10 \text{ L/m}^3$ . Cette situation montre que, dans certains cas, l'humidité des granulats varie fortement entre la première gâchée et les autres (voir aussi le paragraphe II.4.1). Pour rendre plus de souplesse à la correction, on propose de prendre les informations de toutes les gâchées précédentes de la toupie pour corriger la gâchée à venir. Avant chaque nouvelle gâchée, on estime l'écart d'eau dans la toupie à partir des mesures sur les gâchées de la toupie déjà fabriquées. L'erreur de dosage est compensée sur les gâchées restantes.

La précision de la méthode ne dépend pas des corrections faites sur les gâchées intermédiaires, et on peut estimer l'erreur sur le protocole proposant une seule correction sur la dernière gâchée. Avec les notations du paragraphe précédent, l'écart d'eau dans la

toupie (par rapport à la formule nominale) s'écrit  $\Delta E_t = \frac{1}{n} \left( \delta E_{an} - \sum_{i=1}^{n-1} \delta E_{ai} \right)$ . Il est d'espérance nulle et son écart type est

$$\sigma(\Delta E_t) = \frac{1}{\sqrt{n(n-1)}} \sigma(\delta E_a)$$

Pour une toupie de trois gâchées, l'écart type de l'écart de l'eau dans la toupie est de l'ordre de  $1,2 \text{ L/m}^3$ . En considérant comme précédemment une erreur de mesure avec le wattmètre, on obtient un écart type du dosage en eau dans la toupie de  $1,6 \text{ L/m}^3$ .

#### ❖ *Observation expérimentale a posteriori*

Le résultat d'une simulation d'application de la correction (dont les détails sont décrits dans l'Annexe I- 8) sur les données d'acquisition pendant 10 mois (de septembre 2005 à juin 2006) est montré dans la Figure II.38 (environ 1000 toupies). Sur cette figure, l'ordonnée désigne l'écart d'eau dans la toupie ( $\text{L/m}^3$ ) avec correction en utilisant la mesure de toutes les gâchées précédentes de la toupie et l'abscisse désigne la toupie correspondante numérotée de manière chronologique. L'écart d'eau dans la toupie corrigée, en utilisant seulement la première toupie, est aussi présenté à titre comparatif.

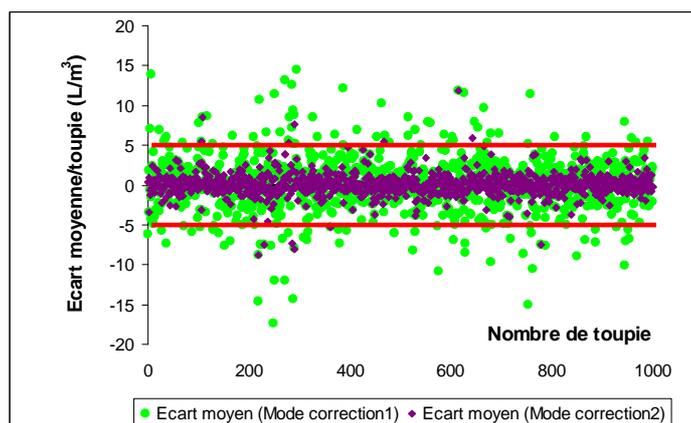


Figure II.38-Ecart d'eau moyen entre les toupies selon le premier et le deuxième mode de correction

Comme le calcul précédent le montre, le deuxième mode de correction fait diminuer la fluctuation de l'écart d'eau dans la toupie, par rapport au premier mode de correction. L'écart de dosage en eau dans la toupie est de moyenne nulle et a un écart type de  $1,4 \text{ L/m}^3$ . Cette valeur est proche de celle estimée par calcul. Il y a moins de biais par rapport à l'hypothèse d'une distribution gaussienne des écarts d'eau des gâchées d'une même toupie.

### II.4.3 Conclusions

Malgré l'évolution permanente de l'humidité des granulats, la quantité d'eau apportée par les granulats dans le temps de la fabrication d'une toupie fluctue moins que sur un temps long. La correction des gâchées à venir en utilisant les mesures de l'écart d'eau dans les gâchées précédentes améliore significativement l'erreur de dosage dans la toupie. Les algorithmes de correction proposés sont potentiellement automatisables. Le premier mode

de correction, basé sur la mesure de la première gâchée, conduit à une précision du dosage en eau dans la toupie (soit deux fois l'écart type) de l'ordre de  $\pm 7 \text{ L/m}^3$ . Le deuxième mode de correction, basée sur les mesures des toutes les gâchées précédentes, conduit à une précision de  $\pm 3 \text{ L/m}^3$ .

Cependant, ce mode de contrôle de dosage en eau totale n'assure pas la régularité des autres propriétés du béton. Donc, la question sur la qualité finale du béton est encore posée et des procédures permettant de mieux connaître le dosage en eau de la gâchée courante restent pertinentes.

## **II.5. Méthode de calibrage des mesures d'hygrométrie des granulats**

Bien qu'il soit possible de maîtriser le dosage en eau moyen dans la toupie par la correction d'eau d'ajout avec une erreur (au sens de l'écart type) inférieure à  $5 \text{ L/m}^3$ , cette méthode cependant n'implique pas un contrôle de composition du béton. En effet, une des origines de l'écart d'eau dans le malaxeur est la mauvaise connaissance des humidités des granulats lors du calcul des consignes. La proportion d'une formule nominale est exprimée en poids de granulats secs, tandis que les consignes de pesée sont données par les poids humides. La connaissance imprécise des hygrométries entraîne à la fois un écart d'eau et, également, un écart de proportion de granulats. Jusqu'à ce stade, on a pu corriger le dosage en eau totale, mais non la composition du mélange. Or, il est souhaitable de contrôler à la fois le dosage en eau et le dosage des granulats. Pour arriver à ce but, on doit connaître le mieux possible les humidités réelles des granulats.

Dans la pratique, la teneur en eau du sable varie dans une plage assez large, de l'ordre de 3 à 12 %. Dans les centrales, le rythme de fabrication demande un approvisionnement journalier du sable. Etant un facteur sensible de l'intempérie et des conditions de manutention, l'humidité du sable varie assez rapidement. C'est pour cela que les centrales de béton sont équipées d'une sonde d'humidité pour évaluer cette variation. Les humidités des gravillons, approuvées par les praticiens, varient annuellement dans une plage plus restreinte, de l'ordre de 0,5 à 3%. C'est pour cela que celles-ci sont estimées par des valeurs forfaitaires, et ne sont changées dans l'automate que de manière périodique, en fonction du suivi de ses évolutions par les prélèvements hebdomadaires dans les trémies de stockage. Cependant, dès que les moyennes des teneurs en eau de gravillons sont différentes des valeurs forfaitaires introduites dans l'automate, on a un écart systématique du dosage en eau. En considérant les fluctuations des humidités réelles de gravillons autour de ses moyennes comme des variables aléatoires, l'écart de dosage en eau lié à ces fluctuations fournit une source d'erreur aléatoire.

Les fractions sableuses sont en général équipées de sondes. L'utilisation de ces sondes implique un calibrage soigneux. Toutefois, comme on a vu, la sonde se dérègle souvent, ce qui constitue une autre source d'écart systématique pour le dosage en eau, avant intervention pour le re-calibrage.

Pour une chaîne de mesure donnée, l'erreur aléatoire liée à la méconnaissance précise de la teneur en eau des gravillons est incompressible. Toutefois, la partie systématique, liée au dérèglement des sondes dans les sables et à l'écart moyen de l'humidité forfaitaire des gravillons, peut être détectée puis annulée, si on possède l'outil de traitement efficace. Un algorithme de re-calibrage des hygrométries forfaitaires des gravillons et de la droite d'étalonnage de la sonde du sable a été élaboré pour cet objectif.

## II.5.1 Calibrage des mesures d'hygrométrie par régression multiple linéaire

Cet algorithme, élaboré à l'origine par Cazacliu [89] au sein du LCPC, vise à déterminer les erreurs systématiques dans l'estimation des humidités forfaitaires de gravillons et des coefficients de calibrage de la sonde. Partant des relations formelles qui relient les écarts des humidités des granulats et l'écart de la teneur en eau du béton, l'utilité de l'algorithme dans quatre scénarios différents de variation de la teneur en eau des granulats est étudiée numériquement, par des simulations de fabrications du béton. Les résultats sont encourageants, même si cette étude se limite au cas des formules à deux granulats. Egalement, les paramètres de simulation (erreurs de dosage et pesée et variation des humidités) sont donnés forfaitairement par l'auteur.

On présente ici de nouvelles simulations. On rappelle dans un premier temps les concepts de base de cet algorithme. Puis, dans un deuxième temps, on donne une validation de l'algorithme, par des simulations utilisant des paramètres validés statistiquement sur la production de la centrale d'Argentan, puis en utilisant des données réelles (bons de pesées, mesures au wattmètre).

### II.5.1.a Concepts théoriques

On présente les concepts théoriques basés sur la référence [89]. Des calculs d'incertitude liés au vecteur de solution sont étudiés pour compléter la méthode.

#### ❖ Relation infinitésimale et optimisation

Considérons une centrale qui fabrique « n » gâchées successives, à partir de « n<sub>g</sub> » types de gravillons et de « n<sub>s</sub> » types de sables. Supposons que toutes les trémies de sable sont équipées de sondes d'humidité étalonnées par des droites, et que des teneurs en eau de gravillons sont fixées forfaitairement. Pour une gâchée « i » quelconque, « G<sub>ij</sub> » est la pesée humide de gravillons « j » et « S<sub>ik</sub> » sont les pesées humides du sable « k » avec (1 ≤ j ≤ n<sub>g</sub>), et (1 ≤ k ≤ n<sub>s</sub>). La pesée des particules fines et éventuellement des adjuvants (extraits secs) est « F<sub>i</sub> ». Le poids humide total du béton de la gâchée i est donc appelé « B<sub>i</sub> ». Les humidités réelles des sables et des gravillons sont respectivement « w<sub>sik</sub><sup>R</sup> », « w<sub>gij</sub><sup>R</sup> ». La teneur réelle en eau du béton « w<sub>bi</sub><sup>R</sup> » est déduite à partir de l'équation de bilan de masse sèche ci-après :

$$\sum_{j=1}^{n_g} \frac{G_{ij}}{1 + w_{gij}^R} + \sum_{k=1}^{n_s} \frac{S_{ik}}{1 + w_{sik}^R} + F_i = \frac{B_i}{1 + w_{bi}^R} \quad (\text{II-9})$$

A présent, on fait l'hypothèse selon laquelle les sondes et les humidités forfaitaires sont dérégées comme présenté dans la Figure II.39.

Dans une gâchée « i » quelconque, « δw<sub>ij</sub> » et « δw<sub>ik</sub> » sont respectivement des dérégages des humidités de gravillons « j » (1 ≤ j ≤ n<sub>g</sub>) et de sables « k » (1 ≤ k ≤ n<sub>s</sub>). Les dérégages sont définis comme la différence entre les humidités réelles et celles utilisées par l'automate lors de calcul des consignes. Pour les sables, ce sont des mesures par les sondes « w<sub>sik</sub> » et pour les gravillons, les valeurs forfaitaires « w<sub>gij</sub> ». On a donc les relations suivantes :

- pour le gravillon « j » :  $\delta w_{ij} = w_{gij}^R - w_{gij}$  (II-10)

- pour le sable « k » :  $\delta w_{ik} = w_{sik}^R - w_{sik}$  (II-11)

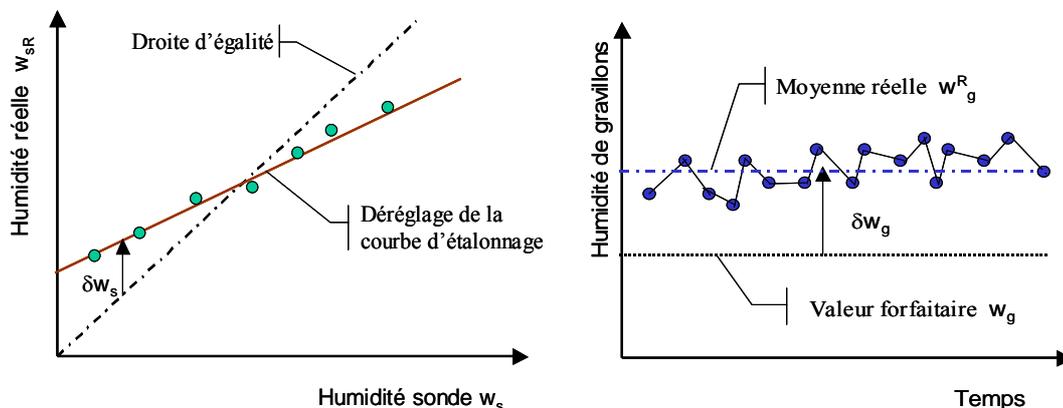


Figure II.39-Déréglage de la sonde et des humidités forfaitaires

Bien entendu, ces déréglements entraînent également un écart de teneur en eau du béton, défini suivant les deux relations ci-dessus :

$$\delta w_{bj} = w_{bj}^R - w_{bj} \quad (II-12)$$

avec :  $w_{bj}$  teneur théorique en eau du béton calculée en fonction des enregistrements et des hypothèses de l'automate et  $w_{bj}^R$  teneur en eau réelle du béton.

Remplaçons (II-10), (II-11) et (II-12) dans (II-9) et considérons que les déréglements sont faibles devant 1, on obtient une relation infinitésimale suivante :

$$\sum_{j=1}^{n_g} \frac{G_{ij} \delta w_{ij}}{(1 + w_{gij})^2} + \sum_{k=1}^{n_s} \frac{S_{ik} \delta w_{ik}}{(1 + w_{sik})^2} = \frac{B_i \delta w_{bi}}{(1 + w_{bi})^2} \quad (II-13)$$

Donc on peut réécrire :

$$\sum_{j=1}^{n_g} g_{ij} \delta w_{ij} + \sum_{k=1}^{n_s} s_{ik} \delta w_{ik} = \delta w_{bi} \quad (II-14)$$

avec :

$$g_{ij} = \frac{G_{ij}}{B_i} \frac{(1 + w_{bi})^2}{(1 + w_{gij})^2} \quad \text{et} \quad s_{ik} = \frac{S_{ik}}{B_i} \frac{(1 + w_{bi})^2}{(1 + w_{sik})^2} \quad (II-15)$$

Supposant qu'on dispose d'un matériel évolué, capable de mesurer avec précision la variation de la teneur en eau du béton. On peut alors détecter les parties systématiques dans les déréglements des gravillons et du sable. En effet, sur la Figure II.39, on constate que, pour les gravillons, la composante systématique peut être estimée par des constantes  $\Delta w_{ij} = A_{gi}$ . Pour les sables, ces composantes sont estimées par deux constantes, de la manière suivante :

$$\Delta w_{ik} = A_{sk} + B_{sk} w_{ik} \quad (II-16)$$

d'où :

$A_{sk}$  : constante exprimant le déréglement de l'origine de la droite d'étalonnage  
 $B_{sk}$  : constante exprimant le déréglement de la pente de la droite d'étalonnage.

En remplaçant «  $\delta w_{ij}$  » par «  $A_{gj}$  » et «  $\delta w_{ik}$  » par «  $\Delta w_{ik}$  » dans (II-14), la composante d'erreur aléatoire totale «  $\varepsilon_i()$  » est donnée par la différence :

$$\varepsilon_i(A_{gj}, A_{sk}, B_{sk}) = \delta w_{bi} - \sum_{j=1}^{n_g} g_{ij} A_{gj} - \sum_{k=1}^{n_s} s_{ik} A_{sk} - \sum_{k=1}^{n_s} w_{ik} s_{ik} B_{sk} \quad (\text{II-17})$$

On a donc  $n_g + 2n_s$  paramètres de calibrage, que l'on souhaite déterminer par optimisation. Il s'agit de minimiser les erreurs définies dans (II-17). La solution peut être obtenue en utilisant la technique classique de moindre carré. Donc, le choix optimal des  $(A_{gi}, A_{sk}, B_{sk})$  revient à minimiser la fonction suivante :

$$f(A_{gj}, A_{sk}, B_{sk}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 \quad (\text{II-18})$$

Cette minimisation conduit à des calculs matriciels dont le résultat final est équivalent à une régression multilinéaire. Sa forme générale est donnée comme suit:

$$y = X.A + \varepsilon \quad (\text{II-19})$$

Dans notre cas, nous précisons les différents termes<sup>4</sup>:

$$\begin{aligned} y &= \{\delta w_{bi}\}_{n,1} \\ X &= \left\| \left\| g_{ij} \right\|_{n,n_g} \left\| s_{ik} \right\|_{n,n_s} \left\| s_{ik} w_{ik} \right\|_{n,n_s} \right\|_{n,n_g+2n_s} \\ A &= \left\{ \left\{ A_{gj} \right\}_{n_g} \left\{ A_{sk} \right\}_{n_s} \left\{ B_{sk} \right\}_{n_s} \right\}_{n,n_g+2n_s} \\ \varepsilon &= \{\varepsilon_i\}_{n,1} \end{aligned}$$

La solution qui rend l'erreur minimale est donc [90]:

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} (X^T y) \quad (\text{II-20})$$

#### ❖ Estimation de l'incertitude de la solution [90]

Le « point de vue » statistique sera utilisé dans ce paragraphe pour traiter les incertitudes liées à la solution donnée par l'expression (II-20). En effet, le modèle linéaire (II-19) peut être interprété de manière à ce que le vecteur «  $y$  » soit une réalisation du vecteur fixe «  $X.A$  » avec une erreur de «  $\varepsilon$  ». Les sources d'erreurs portées à «  $\varepsilon$  » sont multiples : bruit de la sonde, erreur de pesage, erreur de mesure du wattmètre, l'évolution de l'humidité des gravillons... etc. Pour chaque réalisation, ceux-ci fournissent une valeur numérique de «  $\varepsilon$  » différente et non identifiable (de la source engendrée). Alors, on suppose que ce vecteur «  $\varepsilon$  » est purement aléatoire. On suppose en plus que chaque résidu «  $\varepsilon_i$  » a une espérance nulle et que tous les résidus ont la même variance, notée  $\sigma^2$ , et sont deux à deux non corrélés :

$$E(\varepsilon_i) = 0; \quad \text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2; \quad \text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$$

En termes de vecteurs aléatoires on aura :

$$E(\varepsilon) = 0 \quad (\text{II-21})$$

$$\text{Var}(\varepsilon) = E(\varepsilon \otimes \varepsilon^T) = \sigma^2 I_n \quad (\text{II-22})$$

Avec les interprétations ci-dessus, la solution donnée par (II-20) est considérée comme une estimation de «  $A$  » (fixée a priori). On peut réécrire :

<sup>4</sup> Les symboles encadrés par des doubles barres verticales représentent des matrices. Lorsqu'on juxtapose ces termes, on décrit des blocs de termes de la matrice. Ainsi, les termes  $g_{ij}$  correspondent aux  $n_g$  premières colonnes, les termes  $s_{ik}$  aux numéros de colonne compris en  $n_g+1$  et  $n_g + n_s$ , etc.

$$\hat{A} = (X^T X)^{-1} (X^T y) = (X^T X)^{-1} X^T (XA + \varepsilon) = A + (X^T X)^{-1} X^T \varepsilon \quad (\text{II-23})$$

Donc :

$$\hat{A} - A = (X^T X)^{-1} X^T \varepsilon \quad (\text{II-24})$$

La matrice des covariances du vecteur aléatoire  $\hat{A}$  est défini par :

$$\text{Var}(\hat{A}) = E\left\{(\hat{A} - A) \otimes (\hat{A} - A)^T\right\} \quad (\text{II-25})$$

Remplaçant (II-24) dans (II-25), on a :

$$\text{Var}(\hat{A}) = (X^T X)^{-1} X^T E\{\varepsilon \otimes \varepsilon^T\} X (X^T X)^{-1} \quad (\text{II-26})$$

D'après l'hypothèse (II-22), l'expression se simplifie en :

$$\text{Var}(\hat{A}) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} \quad (\text{II-27})$$

Jusqu'à ce stade, «  $\sigma^2$  » n'est a priori pas connu. Alors, on doit l'estimer. L'estimation est basée sur les résidus observés :

$$e_i = y_i - X_{ij} \hat{A}_j \quad (\text{II-28})$$

et on a donc une estimation simple de «  $\sigma^2$  » :

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum e_i^2 \quad (\text{II-29})$$

Finalement on obtient un estimateur « S » de la matrice des covariances du vecteur « A » :

$$S = \hat{\sigma}^2 (X^T X)^{-1} \quad (\text{II-30})$$

Les estimations individuelles des variances des coefficients «  $A_k$  » sont donc les termes diagonaux de la matrice « S ».

### II.5.1.b Simulation numérique

Il est intéressant d'illustrer les développements théoriques du paragraphe précédent par une étude numérique, au moyen d'une simulation de production. Cette voie permet de tenir compte des sources d'erreur lors de la fabrication du béton dans la centrale. Cette opération nous aide à estimer l'ordre de grandeur des écarts types des paramètres de calibrage, et à valider numériquement le concept de l'écart type de la solution ainsi que l'étude paramétrique conditionnant la précision de l'algorithme.

#### ❖ Objectifs de la simulation

Lors de l'évaluation de l'utilité de l'algorithme [89] par simulation pour des formules des deux granulats, Cazacliu a généré les fluctuations de mesure et de dosage selon une distribution gaussienne centrée. Les résultats montrent que, lorsque les erreurs dans la chaîne de dosage et de mesure sont fixées, l'écart type de la solution est conditionné par le nombre de fabrications effectuées et par le rapport G/S (poids du gravillon divisé par celui du sable). Dans le cas du sable, les paramètres de calibrage dépendent directement encore de l'étendue de la teneur en eau du sable.

Nous refaisons cette simulation en utilisant des paramètres de production statistique de la centrale d'Argentan. On doit vérifier que dans un contexte de fabrication réelle de la centrale, une fois que les paramètres de calibrage sont déréglés, l'algorithme permet de détecter de manière fiable ces déréglements. On doit voir aussi comment les fluctuations dans la chaîne de mesure (humidité du sable, humidité du béton) influencent la précision des paramètres de calibrage.

### ❖ Paramètres de simulation

Lors de la simulation, les formules nominales et leurs ordres de fabrication sont respectés. On rappelle cependant qu'environ 80 % de fabrications sont réalisées par gâchées d' $1,5 \text{ m}^3$  (cf. II.2.4) et que seule 21 % des formules nominales sont fabriquées fréquemment. On peut imaginer que l'algorithme soit appliqué à ces fabrications pour s'assurer que les coefficients de calibrage obtenus (la solution optimale) sont représentatifs. Alors, seuls des gâchées de  $1,5 \text{ m}^3$  des formules nominales dont la fréquence de fabrication est supérieure à 2% sont retenues pour la simulation. La composition [en  $\text{kg/m}^3$ ] de ces formules est donnée dans le tableau ci-dessus (Tableau II.8).

Code	Gra10/20	Gra4/10	Gra0/4	Ciment	Filler	Eau	Adjuvant1	Adjuvant2
34		950	860	330	45	180	1.95	
46	675	280	835	305	65	172	1.85	
109	723	201	860	270	90	178	1.48	
148	580	315	896	350	0	195	1.47	0.14
285	680	255	845	308	67	173	1.88	
339	712	223	854	330	21	170	1.47	
375	775	166	847	325	40	172	1.79	
383	684	248	850	335	450	174	1.98	
389		745	920	365	80	190	4.27	0.22
498	690	240	890	357	0	178	1.5	
621	685	280	910	250	0	182	0	
633		960	880	160	60	120	0.77	

Tableau II.8-Composition en  $\text{kg/m}^3$  des formules nominales utilisées

De même, la variation des humidités de granulats doit être la plus proche possible de la réalité. Lors de la simulation, la variation de la teneur en eau du sable « réelle » est une variable gaussienne, avec la moyenne et l'écart type issu de la statistique de la teneur en eau du sable dans la base de Klever. On estime que la sonde mesure bien les variations d'humidité, même mal calibrée. On n'a pas d'outil dans la pratique pour suivre l'évolution des humidités des gravillons (10/20 et 4/10). Des prélèvements hebdomadaires donnent une estimation de la plage de variation réelle de ces teneurs en eau. Lors de la simulation, les humidités de gravillons seront créées de manière aléatoire, avec les moyennes et les écarts types obtenus par statistique des prélèvements hebdomadaires. (cf. II.2.3.a). Le Tableau II.9 présente les caractéristiques statistiques des humidités utilisées.

	Gravillon 10/20	Gravillon 4/10	Sable 0/4
Moyenne	1,4 %	2,2 %	5,0 %
Écart-type	0,5 %	0,6 %	1,0 %

Tableau II.9-Moyenne et écart type des humidités de granulats

On impose ensuite des dérèglages initiaux pour générer les humidités présent en compte par l'automate lors des calculs des consignes. Soit respectivement  $A_{10}$ ,  $A_{20}$  et  $A_{s0}$ ,  $B_{s0}$  des paramètres dérèglés initiaux du gravillon 10/20, du 4/10 et du sable 0/4, ces quatre valeurs sont données dans le Tableau II.10. Dans le cas du sable, la mesure par la sonde est encore affectée par le bruit du signal. Dans un premier temps, on fixe à 0,1 % ce bruit (dans le sens de l'écart type de la teneur en eau mesurée).

Gravillon 10/20	Gravillon 4/10	Sable 0/4	
$A_{10} = 0,5 \%$	$A_{20} = - 0,5 \%$	$A_{s0} = - 1 \%$	$B_{s0} = 0,2$

Tableau II.10-Déréglages initiaux des humidités de granulats

Jusqu'à présent, il était possible de créer numériquement les teneurs en eau forfaitaires des gravillons et l'humidité du sable mesurée par la sonde. Le volume de chaque gâchée est toujours fixé à  $1,5 \text{ m}^3$ . Les consignes de dosage sont donc maintenant déterminées. Lors du remplissage du malaxeur, ces consignes sont affectées à la fois par les erreurs de dosage et de pesage. Le couplage de ces erreurs est déjà étudié au paragraphe II.2.4. Le Tableau II.11 résume les écarts types de ces erreurs. Les masses de constituants réellement dosés dans le malaxeur sont donc créées selon les variables aléatoires avec les moyennes, des consignes de dosage, et les écarts types des valeurs données dans le Tableau II.11.

Gravillon 10/20	Gravillon 4/10	Sable 0/4	Pulvérulents	Eau	Adjuvant
[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
13	13	13	3	1,5	0,05

Tableau II.11-Ecart type de dosage des constituants

A ce stade, on dispose de toutes les données nécessaires afin de déterminer numériquement la teneur en eau du béton calculée à partir des bons de pesées et celle réellement dans le malaxeur. La mesure de ce dernier est affectée par l'outil de mesure de l'humidité du béton. Supposons que ce matériel est un wattmètre différentiel, son écart type de mesure est donc de 0,15% (cf.II.3.2.b).

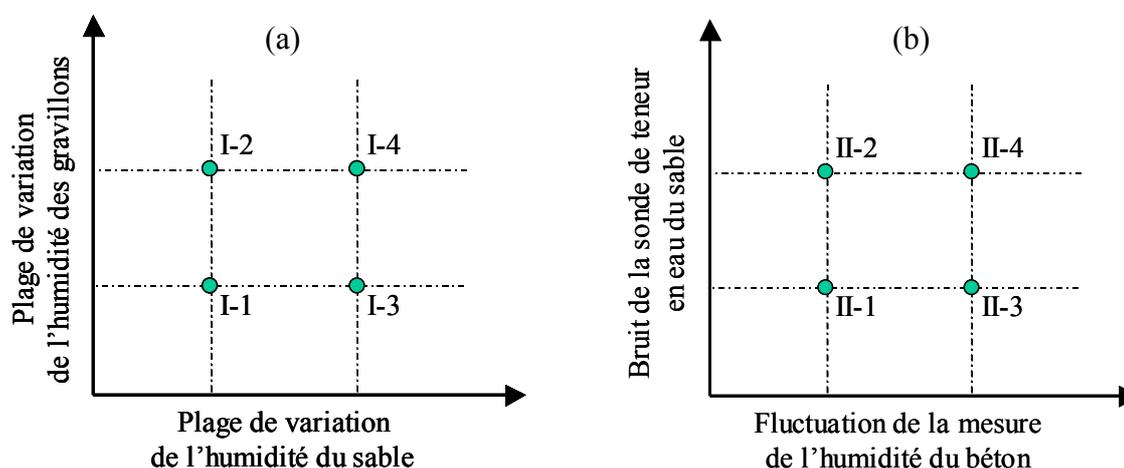


Figure II.40-Configurations de simulation

En ce qui concerne les objectifs susmentionnés, la simulation est effectuée selon deux schémas :

- les fluctuations dans la chaîne de dosage et de mesure sont fixées, et seules les humidités de granulats sont changées (Figure II.40-a) ;
- les plages de variation des humidités sont fixées, les fluctuations dans les mesures de l'humidité du sable et celle du béton sont variées (Figure II.40-b).

## ❖ Analyse des résultats de simulation

### ➤ Peut-on déterminer les dérèglages ?

Dans notre simulation, nous n'avons que des bétons à deux ou trois granulats. Donc, le système d'équations linéaires à quatre inconnues sous la forme de l'équation (19) est établi. Le nombre d'équations (donc le nombre de gâchées) utilisées est de 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, ..., 2000. Pour chaque palier, la résolution est répétée 500 fois. De cette manière, on possède 500 échantillons de solutions pour chaque palier, permettant de déterminer la moyenne et l'écart type de chaque paramètre de calibrage.

$$\bar{A}_k = \frac{1}{500} \sum A_{ki} \quad (\text{II-31})$$

$$\sigma^2(A_k) = \frac{1}{500} \sum (A_{ki} - \bar{A}_k)^2 \quad (\text{II-32})$$

«  $A_k$  » représente le composant « k » du vecteur de solution dont on explicite la signification :

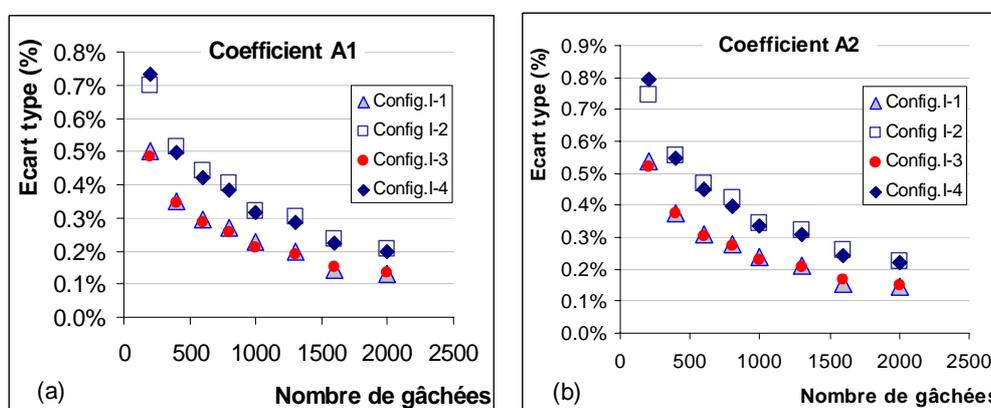
- $A_1$  : coefficient permettant le re-calibrage de l'humidité forfaitaire du gravillon 10/20
  - $A_2$  : coefficient permettant le re-calibrage de l'humidité forfaitaire du gravillon 4/10
  - $A_3$  et  $A_4$  : coefficient permettant le re-calibrage de la sonde de teneur en eau du sable.
- Pour faciliter la lecture dans la suite, nous les renommons respectivement  $A_s$  et  $B_s$ .

Le tableau suivant résume les valeurs numériques des paramètres de la simulation concernant les différentes configurations indiquées dans la figure ci-dessus (Figure II.40-a) dans le premier objectif de la simulation.

Configuration de simulation	Plage de variation		
	Humidité du 10/20	Humidité du 4/10	Humidité du 0/4
Configuration I-1	$\sigma_{G1} = 0,20 \%$	$\sigma_{G2} = 0,25 \%$	$\sigma_S = 0,30 \%$
Configuration I-2	$\sigma_{G1} = 0,50 \%$	$\sigma_{G2} = 0,60 \%$	$\sigma_S = 0,30 \%$
Configuration I-3	$\sigma_{G1} = 0,20 \%$	$\sigma_{G2} = 0,25 \%$	$\sigma_S = 1,00 \%$
Configuration I-4	$\sigma_{G1} = 0,50 \%$	$\sigma_{G2} = 0,60 \%$	$\sigma_S = 1,00 \%$

Tableau II.12-Paramètres de simulation (pour le premier but de simulation)

L'évolution des écarts types calculés selon l'expression (II-32) des paramètres de calibrage en fonction du nombre de gâchées est présentée dans les figures suivantes.



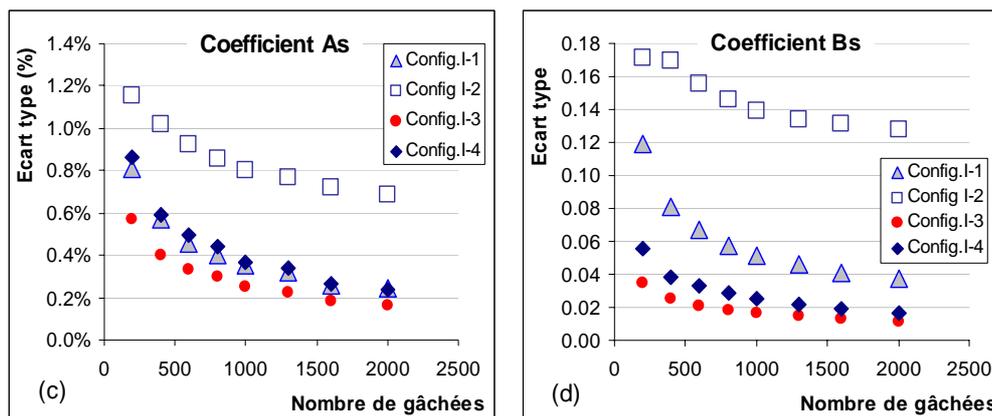


Figure II.41-Ecart type de la solution (pour le premier but de la simulation)

Sur la Figure II.41, on remarque une influence du nombre de gâchées utilisées sur l'écart type de la solution. En effet, on constate que l'augmentation du nombre de gâchées diminue de manière notable les écarts types de tous les paramètres de calibrage, quelle que soit la configuration de la simulation. Sur la Figure II.41-(a)&(b), le résultat très proche d'une part des configurations (I-1) et (I-3) et d'autre part, (I-2) et (I-4) confirme que la variation d'humidité du sable n'a pas d'effet sur l'écart type des  $A_1$  et  $A_2$  (coefficients de calibrage des gravillons). L'écart type de ces coefficients ne dépend que de la variation de l'humidité des gravillons. Plus celle-ci varie dans une plage serrée, plus les écarts types de «  $A_1$  » et «  $A_2$  » diminuent. La variation de l'humidité des gravillons présente une certaine influence sur l'écart type de «  $A_s$  » et «  $B_s$  » [Figure II.41-(c)&(d)]. Le coefficient «  $B_s$  » qui exprime le dérèglement de la pente semble plus sensible à la variation des humidités de gravillons que «  $A_s$  ». La détermination de ces deux coefficients est meilleure dans le cas où l'humidité du sable varie dans une plage large et celle des gravillons varie dans une plage serrée. Dans le cas contraire, les écarts types de «  $A_s$  » et «  $B_s$  » sont élevés.

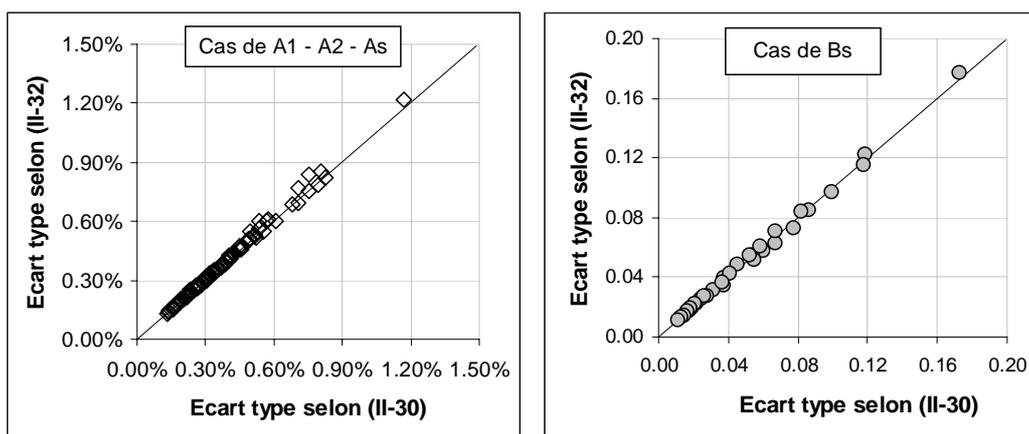


Figure II.42-Confrontation des écarts types

Les écarts types déterminés directement selon (II-32) à partir de la solution connue sont très proches (Figure II.42) de ceux estimés par l'expression (II-30) (on utilise la matrice moyenne de 500 échantillons). Ceci montre bien que l'expression (II-30) est établie dans l'hypothèse d'une matrice «  $X$  » non aléatoire. Cette condition n'est pas strictement respectée dans la simulation. A chaque fois qu'on réalise un échantillon, les humidités de

granulats ainsi que les dosages changent, ce qui conduit à des fluctuations aléatoires de la matrice « X ». Pour calculer les écarts types selon (II-30), on utilise la matrice moyenne (de 500 échantillons). Ce résultat valide les concepts de l'expression (II-30), qui sera utilisée comme un estimateur des incertitudes liées aux paramètres de calibrage dans le cas où cet algorithme serait appliqué réellement.

Les moyennes des coefficients de calibrage, estimation des dérèglages initiaux imposés, sont affichées dans la Figure II.43. Pour les deux coefficients de calibrage des gravillons, quelle que soit la configuration, la moyenne approche bien les valeurs dérèglées, alors que le nombre de gâchées augmente. Toutefois, la vitesse d'approche (au sens du nombre de gâchées utilisées) est différente en fonction de la configuration. Plus l'humidité des gravillons varie dans une plage large, plus le besoin est important d'avoir plusieurs gâchées pour que la moyenne de la solution estime bien les dérèglages initiaux. Quant au sable, seules deux configurations où la plage de variation de l'humidité est élevée donnent de bonnes estimations des valeurs dérèglées. Une remarque intéressante est que les moyennes des deux coefficients de calibrage du sable se stabilisent, dès que 400 gâchées ont été fabriquées.

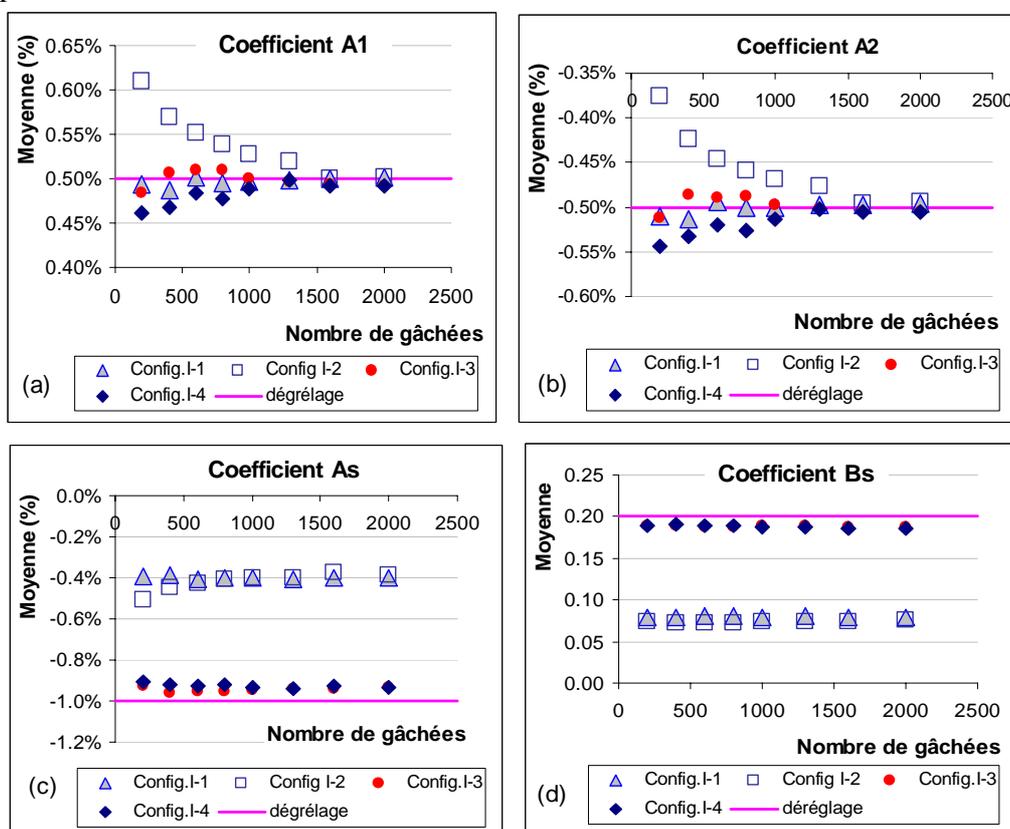


Figure II.43-Moyenne de la solution (pour le premier but)

Dans les configurations avec une plage d'humidité du sable serrée (I-1) & (I-2), Figure II.43, les coefficients « A<sub>s</sub> » et « B<sub>s</sub> » sont éloignés de manière notable du dérèglement initial alors que les coefficients « A<sub>1</sub> » et « A<sub>2</sub> » estiment bien leur dérèglement. Il semble que, dans ce cas, le calibrage de la sonde est impossible, par conséquent le sable doit être considéré comme un gravillon car seul le dérèglement moyen est bien estimé. En effet, on peut calculer le dérèglement moyen initial comme suit :

$$A_{s0} = A_{s0} + B_{s0} \bar{w}_s^R \quad (\text{II-33})$$

avec  $\bar{w}_s^R$  : humidité moyenne réelle du sable

Les moyennes des dérèglages optimisés sont donc calculées avec les moyennes des coefficients «  $A_s$  » et «  $B_s$  » illustrés dans les Figure II.43:

$$\bar{A}_3 = \bar{A}_s + \bar{B}_s \bar{w}_s \quad (\text{II-34})$$

avec  $\bar{w}_s$  : humidité moyenne du sable mesuré avec la sonde

Dans ce cas, «  $\bar{A}_3$  » doit bien estimer le dérèglement initial «  $A_{30}$  » quelle que soit la configuration de simulation. La comparaison entre ces deux valeurs est présentée dans la figure suivante (Figure II.44). Comme pour les gravillons, on constate qu'avec la configuration où l'humidité du sable varie dans une plage serrée et celle des gravillons dans une plage large, il faut un grand nombre de gâchées pour que le dérèglement moyen initial soit bien estimé. Les deux coefficients «  $A_s$  » et «  $B_s$  », dans tous les cas, peuvent être utilisés pour prédire le dérèglement de la teneur en eau moyenne du sable.

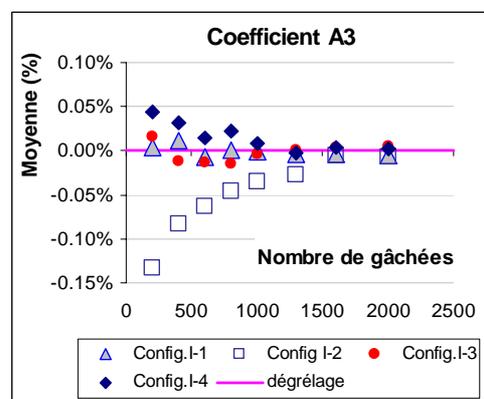


Figure II.44-Dérèglement moyen de l'humidité du sable

➤ *Influence des fluctuations dans la chaîne de mesure sur la précision de l'algorithme*

Dans ce paragraphe, on fixe la plage de variation de l'humidité du sable et des gravillons, et on introduit des fluctuations dans la chaîne de mesure de l'humidité du béton et du sable.

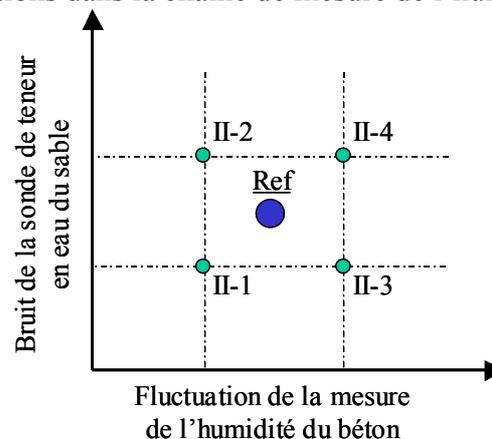


Figure II.45-Configuration de la simulation

On va utiliser la meilleure configuration (I-3) du cas précédent comme point de départ. On réutilise pour la nouvelle simulation l'ordre de fabrication, et tous les paramètres de

simulation de la configuration (I-3). Les bruits de mesures d'humidités du béton et du sable seront variés selon la Figure II.45. Les valeurs numériques de ces changements sont données dans le tableau suivant :

Configuration de simulation	Bruit de mesure (écart type)	
	Humidité du sable	Humidité du béton
Configuration Ref	$\sigma_S = 0,10 \%$	$\sigma_b = 0,15 \%$
Configuration I-1	$\sigma_S = 0,05 \%$	$\sigma_b = 0,10 \%$
Configuration I-2	$\sigma_S = 0,05 \%$	$\sigma_b = 0,20 \%$
Configuration I-3	$\sigma_S = 0,15 \%$	$\sigma_b = 0,10 \%$
Configuration I-4	$\sigma_S = 0,15 \%$	$\sigma_b = 0,20 \%$

Tableau II.13-Paramètres de simulation (pour le deuxième but de simulation)

Comme dans le cas précédent, on résout pour chaque configuration 500 fois le système d'équation. Les 500 solutions permettent de déterminer la moyenne et l'écart type. Les écarts types de 4 paramètres «  $A_1$  » ; «  $A_2$  » ; «  $A_s$  » et «  $B_s$  » sont présentés dans la Figure II.46 en fonction de la configuration de simulation. Tous les écarts types des paramètres de calibrage dépendent aussi bien des bruits des mesures des humidités du béton que celles du sable. La tendance de l'évolution avec la configuration de la simulation est identique pour les quatre paramètres.

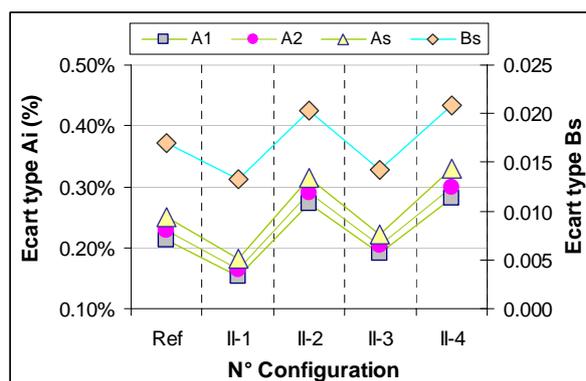


Figure II.46-Evolution des écarts types des paramètres de calibrage. Détermination sur un nombre de 1000 gâchées

Les écarts types des paramètres de calibrage semblent plus sensibles au bruit de mesure d'humidité du béton qu'à celui du sable. En effet, la configuration (II-4) a la même fluctuation dans la mesure d'humidité du béton (0,20%) que la configuration (II-2) tandis que le bruit de la sonde de teneur en eau du sable est trois fois supérieur (0,15% contre 0,05%); les écarts types des paramètres de calibrage sont cependant proches. Entre la configuration (II-3) et (II-4), il n'existe aucune différence au niveau du bruit de la sonde. Par contre, la mesure d'humidité du béton, moins variable pour la configuration (II-3) entraîne des écarts types des paramètres de calibrage nettement inférieurs à ceux obtenus avec les deux configurations (II-4) et (II-2). Donc, si on souhaite déterminer les paramètres de calibrage avec une meilleure précision, on devrait clairement améliorer la qualité de mesure de la teneur en eau du béton, un fait qu'on peut aussi confirmer de manière intuitive.

Quel est le rôle du bruit de la sonde de teneur en eau du sable ? Pour répondre à cette question, on considérera les solutions moyennes représentées dans la Figure II.47 en fonction des configurations de simulation, à gauche pour les gravillons et à droite pour le sable.

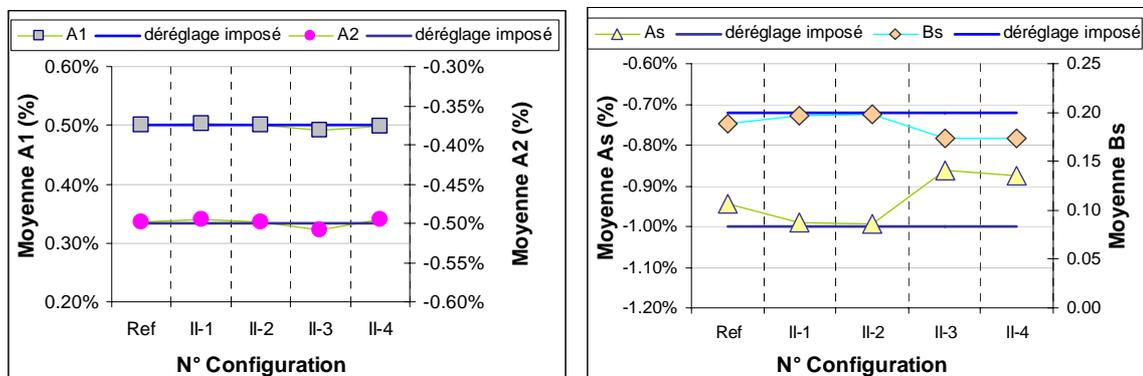


Figure II.47-Moyennes des paramètres de calibrage

On remarque, dans le cas des gravillons, que les deux solutions moyennes estiment très bien les dérèglages initiaux, quelle que soit la configuration de la simulation, et donc les bruits de mesure. Ce n'est plus le cas pour le sable. On constate que seules deux configurations (II-1) et (II-2) donnent de bonnes estimations des dérèglages imposés. Les configurations de référence, (II-3) et (II-4) fournissent des estimations biaisées. Dans la section précédente, on a trouvé que les deux configurations de simulation (I-1) et (I-2) conduisent au même problème. Il semble que le rapport entre la plage de variation de l'humidité du sable et le bruit de mesure conditionne ces biais.

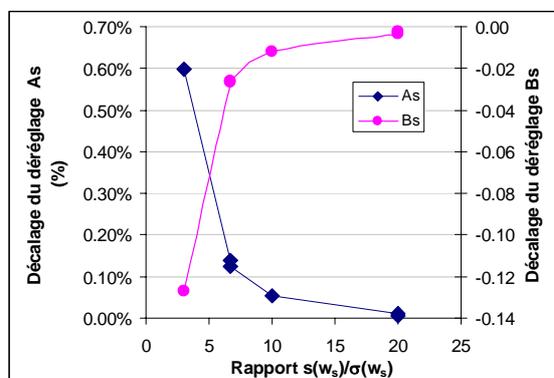


Figure II.48-Influence du bruit de la sonde sur le biais du dérèglement

En fait, la Figure II.48 confirme cette constatation. Dans cette figure, l'abscisse représente le rapport entre la plage de variation de la teneur en eau du sable «  $s[w_s]$  » et le bruit de mesure «  $\sigma[w_s]$  » ; tandis que les deux ordonnées représentent les décalages entre les dérèglages imposés pour deux paramètres ( $A_s$ ,  $B_s$ ) et leurs estimations (moyennes des 500 solutions). Plus ce rapport est important, meilleure est l'estimation. Donc, pour un bon calibrage en présence des erreurs de mesure d'humidités (béton et sable), l'humidité du sable doit varier dans une plage suffisamment large. Dans le cas contraire, les deux coefficients de calibrage de la sonde peuvent être utilisés seulement pour déterminer l'erreur moyenne de l'humidité du sable, comme on l'a présenté plus haut.

### II.5.1.c Conclusions

L'évaluation de la précision de l'algorithme par calcul et par simulation numérique permet de montrer qu'il est possible de détecter des erreurs systématiques des humidités forfaitaires des gravillons ainsi que le dérèglement de la sonde d'humidité du sable. En augmentant le nombre de gâchées, les écarts types diminuent et les moyennes tendent vers les dérèglements initiaux. Toutefois, dans les cas défavorables, les bruits de mesures conduisent à des biais non négligeables liés aux paramètres de calibrage. C'est en particulier le cas de la sonde d'humidité du sable. Un bon calibrage de celle-ci nécessite un rapport entre la plage de variation d'humidité et le bruit de la sonde d'humidité supérieur à 5 ou 6.

### II.5.2 Validation « virtuelle » de l'algorithme

Dans la section précédente, on a estimé la précision de l'algorithme en considérant que les fluctuations des dosages, des humidités et de leur mesure suivent des distributions gaussiennes. Les résultats semblent confirmer numériquement l'intérêt de l'algorithme. On évalue dans ce paragraphe l'algorithme avec le jeu de données réelles (dosages des constituants, humidité du sable mesurée par la sonde...) acquises sur la centrale avec les teneurs en eau du béton estimées à partir des indications du wattmètre. L'objectif est de vérifier si l'algorithme peut bien déterminer des coefficients de calibrage lors de son application aux données réelles.

Par rapport à l'évaluation par simulation, on ne dispose pas de la bonne solution. Celle-ci est estimée théoriquement par l'équation matricielle (II-20). La précision de l'algorithme est donnée par l'équation matricielle proposée théoriquement (II-30).

Le processus d'optimisation est similaire à celui utilisé lors de la simulation. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'il existe une différence importante entre la simulation et les fabrications réelles : lors de la simulation, le dérèglement des mesures d'humidité est constant, quel que soit le nombre des fabrications. Ce n'est pas le cas avec les données réelles, le dérèglement pouvant évoluer au cours du temps. L'augmentation du nombre de gâchées peut impliquer une évolution du dérèglement et peut nuire à la convergence des solutions. Aussi, le dérèglement détecté par l'algorithme pour une période n'est pas strictement valable pour la période qui suit.

#### II.5.2.a Sélection des formules à tester

Les formules de volume  $1,5 \text{ m}^3$  les plus fabriquées sont sélectionnées pour tester l'algorithme, Tableau II.14.

Code	Gra10/20	Gra4/10	Gra0/4	Ciment	Filler	Eau	Adjuvant1	Adjuvant2
34		950	860	330	45	180	1,95	
46	675	280	835	305	65	172	1,85	
109	723	201	860	270	90	178	1,48	
285	680	255	845	308	67	173	1,88	
339	712	223	854	330	21	170	1,47	
375	775	166	847	325	40	172	1,79	
389		745	920	365	80	190	4,27	0,22
498	690	240	890	357	0	178	1,5	

Tableau II.14 - Composition des formules nominales les plus fabriquées, en  $\text{kg/m}^3$ .

Pour obtenir une bonne solution, une mesure fiable de l'humidité du béton est nécessaire. Il a été montré (cf.II.4.2) que le calibrage du wattmètre évolue (Figure II.34). La période d'acquisition est aussi une question pour le choix. En effet, la détermination de l'humidité réelle du béton est réalisée au moyen du wattmètre. On choisit des fabrications qui semblent relever de la même période de calibrage, entre mars et juin 2006. On dispose ainsi d'environ 2100 gâchées des formules susmentionnées, nombre suffisant pour tester l'efficacité de l'algorithme.

### II.5.2.b Optimisation

On divise les 2100 gâchées suivant trois périodes dans le temps (Figure II.49) : famille 1 (numéro de gâchées 0-1500) ; famille 2 (numéro de gâchées 300-1800) ; famille 3 (numéro de gâchées 600-2100). On applique l'algorithme dans chaque famille de formules pour observer la tendance de stabilisation de la solution ainsi que l'ordre de grandeur et l'écart type des paramètres de calibrage pour chaque famille.

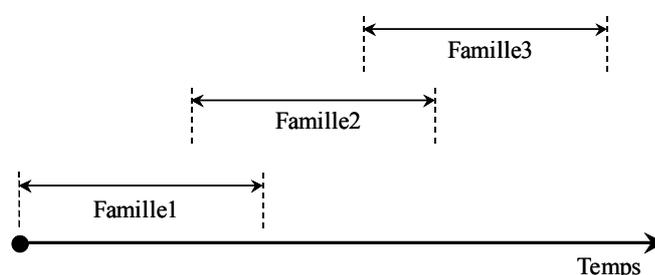
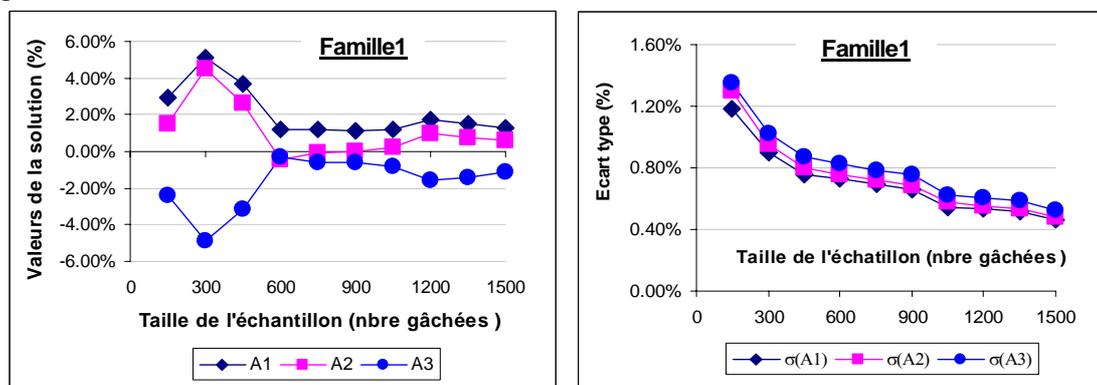


Figure II.49-Séparation des données en famille

Dans la période mars-juin 2006, on ne dispose malheureusement pas des mesures de l'humidité du sable. Dans la base RSAI, cette dernière est imposée de manière forfaitaire par le centralier, qui estime que la sonde est mal calibrée. Dans la base Klever, l'acquisition de l'humidité du sable est disponible seulement pour le mois de juin 2006, à cause d'une panne de matériel. En dehors de ce mois, on ne peut pas déterminer les paramètres de la sonde ( $A_s$ ,  $B_s$ ). Dans ces conditions, on applique l'algorithme en traitant le sable comme un gravillon : on supprime le paramètre «  $B_s$  » et le vecteur de solution possède seulement 3 composants ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) correspondant aux trois dérèglages des humidités moyennes respectivement de gravillons 10/20, 4/10 et du sable 0/4. L'algorithme est appliqué en augmentant le nombre de gâchées dans chaque famille : 150 - 300 - 450...1500. Les paramètres ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) et ses écarts types sont donnés dans la Figure II.50.



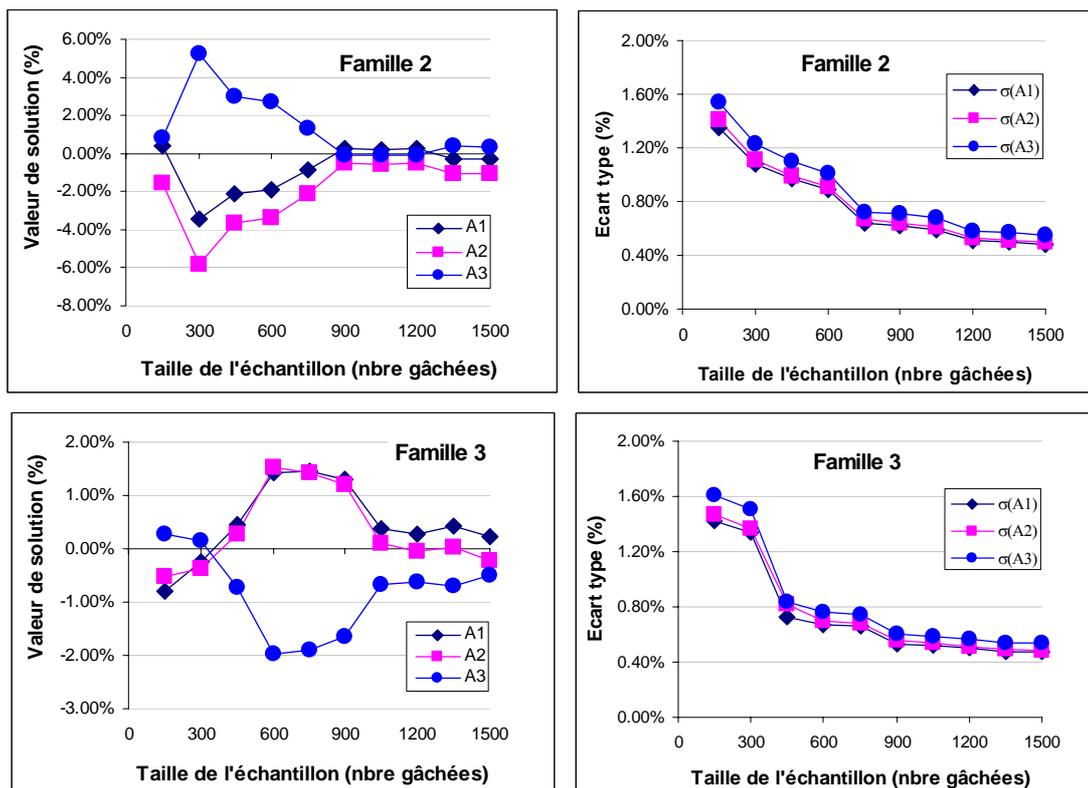


Figure II.50-Evolution de la solution en fonction du nombre de gâchées

En augmentant le nombre de gâchées utilisées, la solution se stabilise à partir de 600 fabrications pour la famille 1, 900 pour la famille 2 et 1000 pour la famille 3. Une même tendance est observée pour les écarts types.

On applique à nouveau l'algorithme à des échantillons de taille fixe (1000 gâchées – nombre qui semble suffisant pour une stabilisation de la solution) obtenus en se déplaçant de façon continue sur les données organisées de manière chronologique. Une solution glissante constante permet d'utiliser les paramètres de calibrage pour les fabrications ultérieures. Ceci ne présume pas d'une solution exacte. On propose de considérer le coefficient défini par :

$$\rho = \sqrt{1 - \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2[y]}} \quad (\text{II-35})$$

où  $\sigma[y]$  : écart type des réalisations, « y » définit dans (II-19)

$\hat{\sigma}$  : écart type des résidus

Dans le cas où le problème physique modélisé par (II-19) serait parfaitement linéaire, «  $\hat{\sigma}$  » s'annulerait, et donc «  $\rho$  » serait égal à 1. Dans le cas contraire, le modèle mathématique n'a aucun lien avec le problème physique, «  $\hat{\sigma}$  » est égal à «  $\sigma[y]$  », et donc «  $\rho$  » est égal à 0. Alors, ce coefficient «  $\rho$  » permet d'évaluer la qualité de la régression. On considère que la solution est physique si «  $\rho$  » tend vers 1.

La solution glissante, son écart type et le coefficient «  $\rho$  » sont présentés dans la Figure II.51.

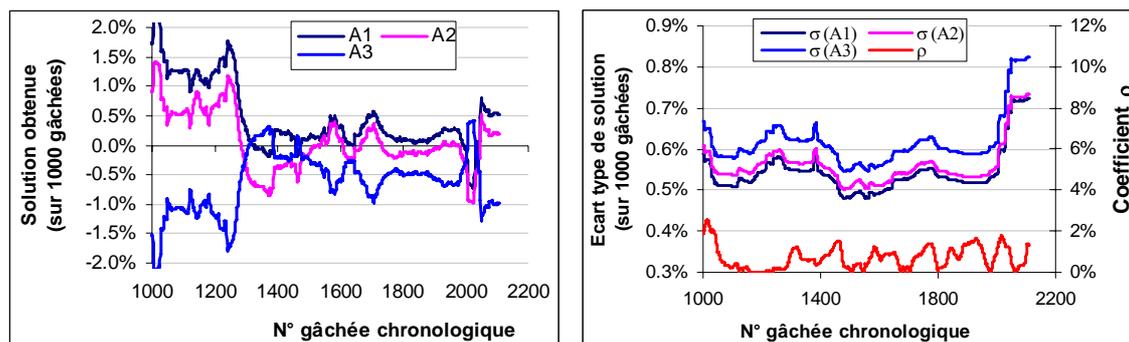
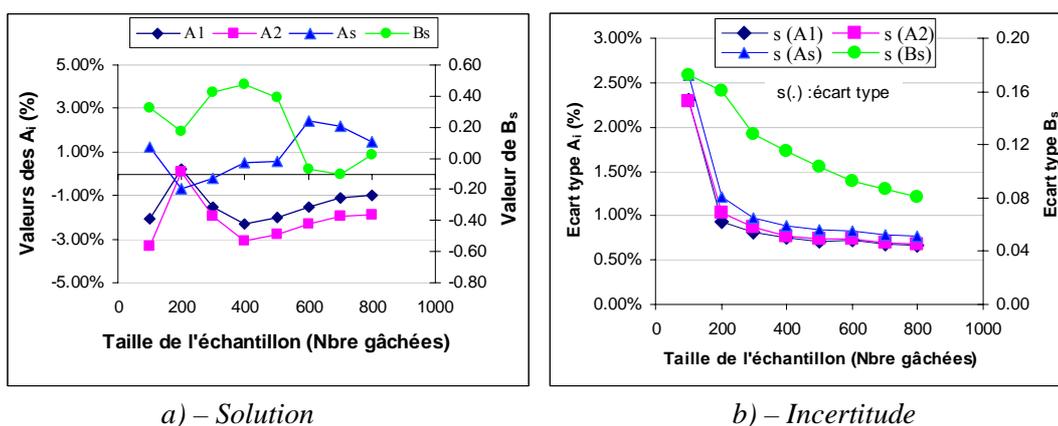


Figure II.51 - Résultats d'optimisation sur des échantillons mobiles.

On remarque que le coefficient «  $\rho$  » est faible (inférieur à 0,02) et l'écart type de la solution grand, de même ordre de grandeur que la solution. Les paramètres de calibrage proposés par l'algorithme ne sont pas physiquement fiables.

Avant de conclure à l'impossibilité d'application de l'algorithme, on vérifie que l'absence de mesure par la sonde n'affecte pas sa pertinence. La vérification peut porter sur 800 gâchées en juin 2006. Le système de quatre inconnues (deux dérèglages de la teneur en eau des gravillons «  $A_1$  », «  $A_2$  » et deux autres de la sonde à sable «  $A_s$  » et «  $B_s$  ») offre une solution et un écart type qui ne sont pas convaincants, Figure II.52.



a) – Solution

b) – Incertitude

Figure II.52-Résultats d'optimisation avec humidité du sable mesurée par la sonde

### II.5.2.c Discussions

On peut conclure qu'en augmentant le nombre de gâchées utilisées, les incertitudes (au sens de l'écart type) sont diminuées et se stabilisent dès 500 gâchées. Toutefois, ces incertitudes sont encore importantes en vue d'aider le centralier à décider de changer systématiquement les humidités forfaitaires des gravillons et les paramètres de calibrage de la sonde à sable. Une des raisons qui peut expliquer en partie la mauvaise précision de l'algorithme est le rapport G/S qui ne varie que faiblement [89].

Cet algorithme déduit les valeurs moyennes des humidités en minimisant les erreurs avec la méthode de moindre carré. La somme des carrés des erreurs peut être mathématiquement minimisée, mais la solution semble se situer en dehors des zones de signification physique.

Un algorithme plus robuste doit être proposé en gardant à l'esprit l'idée de calibrer la sonde et les humidités forfaitaires.

### II.5.3 Calibrage des humidités « paramètre par paramètre »

La majeure partie de la production d'une centrale de béton fait appel à un sable et à deux gravillons, cas qu'on va traiter comme suit. Le point de départ de la méthode est le bilan de l'eau apportée par les granulats dans le malaxeur. Pour la fabrication « j » on a :

$$\frac{G_{1j}w_{1j}}{(1+w_{1j})} + \frac{G_{2j}w_{2j}}{(1+w_{2j})} + \frac{S_j w_{sRj}}{(1+w_{sRj})} = \frac{G_j w_{gj}}{(1+w_{gj})} + \frac{S_j w_{sRj}}{(1+w_{sRj})} = \frac{G_{aj} w_{aj}}{(1+w_{aj})} \quad (\text{II-36})$$

avec :

$G_{1j}, G_{2j}, S_j$  : poids des gravillons et du sable de la gâchée « j » ;  
 $w_{1j}, w_{2j}, w_{sRj}$  : humidités réelles des granulats correspondants ;  
 $G_j$  et  $w_{gj}$  : la masse totale des gravillons et l'humidité de ce mélange de gravillons ;  
 $G_{aj}, w_{aj}$  : poids du mélange granulaire de la gâchée « j » et son humidité.

En définissant les variables suivantes:

$$E_g = \frac{G w_g}{(1+w_g)}$$

$$E_{sR} = \frac{S w_{sR}}{(1+w_{sR})} \quad (\text{II-37})$$

$$E_a = \frac{G_a w_a}{(1+w_a)}$$

l'équation (II-36) s'écrit:

$$E_a = E_g + E_{sR} \quad (\text{II-38})$$

Dans la pratique, la sonde est souvent dérégulée. On propose une relation entre l'humidité réelle du sable «  $w_{sR}$  » et la mesure de la sonde «  $w_s$  » de la forme :

$$\frac{w_{sR}}{1+w_{sR}} = \alpha_0 + \beta_0 \frac{w_s}{1+w_s} \quad (\text{II-39})$$

En négligeant les termes en  $w_s^2$  et  $w_{sR}^2$ , cette relation permet un calibrage simple de la sonde (Figure II.39) de la forme :

$$w_{sR} \approx \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} + \frac{\beta_0 - \alpha_0}{(1-\alpha_0)^2} w_s \quad (\text{II-40})$$

En multipliant chacune côté de (II-39) par la masse du sable « S », on a :

$$\frac{S w_{sR}}{1+w_{sR}} = S \alpha_0 + \beta_0 \frac{S w_s}{1+w_s} \quad (\text{II-41})$$

Qu'on peut mettre sous la forme :

$$E_{sR} = E_0 + \beta_0 E_s \quad (\text{II-42})$$

Avec  $E_s = \frac{S w_s}{(1+w_s)}$

La relation entre «  $E_{sR}$  » et «  $E_s$  » est une droite (Figure II.53-a) dans l'espace «  $E_{sR}$ - $E_s$  ». Elle devient la bissectrice (pente unité) dans le cas d'une sonde parfaitement réglée.

Dans la suite, on va présenter une méthode pour déterminer «  $\beta_0$  », «  $\alpha_0$  » et les humidités réelles moyennes des gravillons. On détermine d'abord la pente de la sonde  $\beta_0$ . Une fois la pente connue, on détermine le décalage à l'origine  $\alpha_0$  de la sonde. Enfin, en utilisant le nouveau calibrage de la sonde, on détermine les humidités moyennes des gravillons.

### II.5.3.a Détermination de la pente

#### ❖ Aspect théorique

En présence de gravillons, l'eau apportée par le mélange granulaire «  $E_a$  » est calculée par :

$$E_a = E_g + E_{sR} = E_g + E_0 + \beta_0 E_s \quad (\text{II-43})$$

Dans l'espace «  $E_a - E_s$  », on a un nuage des points dispersés autour d'une droite de pente  $\beta_0$ , à cause principalement de la fluctuation de l'humidité des gravillons. En principe,  $\beta_0$  peut être obtenu par régression linéaire. Toutefois, la forte dispersion des points dans la direction  $E_a$  (expérimentalement déterminée par un écart type de l'humidité des gravillons de 0,5 points de pourcent) par rapport à la plage de variation de  $E_s$  (teneur en eau du sable variant sur une plage de l'ordre à 1%) fait qu'on n'est pas précis pour déterminer  $\beta_0$  par régression. Ceci explique entre autres pourquoi la méthode de résolution par régression multiple présentée dans le paragraphe précédent ne fonctionne pas.

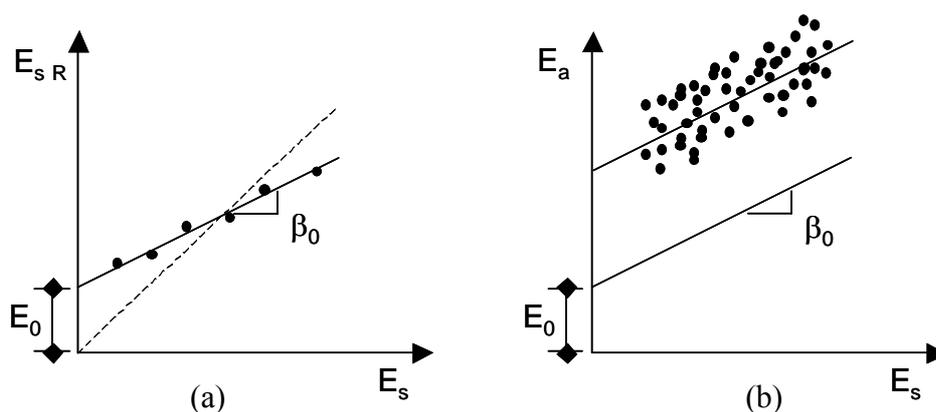


Figure II.53-Dispersion des points dans l'espace  $E_{sR} - E_s$  et  $E_a - E_s$

Comment déterminer  $\beta_0$  sans connaître  $E_g$  gâchée par gâchée? Si on trouve au moins deux points dont la quantité  $E_g$  est constante, la pente de la droite passant par ces points est  $\beta_0$ . Nous nous proposons de trouver ces points de manière statistique. En fixant une valeur de  $E_s$ , la fluctuation des valeurs correspondantes de  $E_a$  se fait autour d'une espérance  $E(\cdot)$  connue :

$$E(E_a) = E_g + E_{sR} = E(E_g) + E_0 + \beta_0 E_s \quad (\text{II-44})$$

En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de corrélation entre  $E_g$  et  $E_s$ , on déduit que  $E(E_g)$  est indépendant de  $E_s$ . Pour deux valeurs distinctes de  $E_s$  et par différence on détermine  $\beta_0$  :

$$\beta_0 = \frac{\Delta E(E_a)}{\Delta E_s} \quad (\text{II-45})$$

Dans la pratique, on prend la moyenne des valeurs  $E_a$  disponibles pour  $E_s$  donné. Ceci induit une incertitude dans la détermination de l'espérance de  $E_a$  et donc celle de  $\beta_0$ . Une solution pour améliorer cette incertitude est de prendre plusieurs  $E_s$  fixés (ou variant peu)

et de déterminer  $\beta_0$  par régression linéaire. On améliore encore plus la précision de détermination de  $\beta_0$  en analysant en même temps l'ensemble de valeurs  $E_s$  disponible. En effet, en écrivant la relation (II-44) avec les moyennes comme estimateur des espérances puis par différence avec la relation (II-43), et en multipliant le tout par  $E_{si} - \bar{E}_s$ , on obtient :

$$(E_{ai} - \bar{E}_a)(E_{si} - \bar{E}_s) = \beta_0(E_{si} - \bar{E}_s)(E_{si} - \bar{E}_s) + (E_{gi} - \bar{E}_g)(E_{si} - \bar{E}_s) \quad (\text{II-46})$$

En moyennant (II-46), on obtient :

$$\text{Cov}(E_a, E_s) = \beta_0 \sigma^2[E_s] + \text{Cov}(E_g, E_s) \quad (\text{II-47})$$

où  $\sigma[.]$ , dénote l'écart type et  $\text{Cov}(a, b)$  signifie la covariance de  $a$  et de  $b$ .

Dans l'hypothèse faite précédemment

$$\text{Cov}(E_g, E_s) = 0 \quad (\text{II-48})$$

on peut déduire :

$$\beta_0 = \frac{\text{Cov}(E_a, E_s)}{\sigma^2[E_s]} \quad (\text{II-49})$$

La relation (II-43) permet d'estimer la variance de  $E_a$ , et en utilisant (II-48) :

$$\sigma^2[E_a] = \sigma^2[E_g] + \beta_0^2 \sigma^2[E_s] + 2\beta_0 \text{Cov}(E_g, E_s) = \sigma^2[E_g] + \beta_0^2 \sigma^2[E_s] \quad (\text{II-50})$$

on introduit  $\beta_0$  de la relation (II-49) :

$$\sigma^2[E_g] = \sigma^2[E_a] - \frac{\text{Cov}^2(E_a, E_s)}{\sigma^2[E_s]} \quad (\text{II-51})$$

### ❖ Application numérique avec régression linéaire sur trois valeurs de $E_s$

Comme indiqué dans le chapitre II.5.2.b, on dispose à la fois de la mesure de la sonde et d'un wattmètre calibré seulement lors d'une période de quelques semaines en juin 2006. L'analyse est portée à d'autres périodes, octobre 2005, novembre-décembre 2005 et janvier-février 2006, mais sur ces périodes le wattmètre n'est clairement pas bien calibré (Figure II.34).

Seules les gâchées avec un squelette granulaire proche sont utilisées. En effet,  $E_0$  étant considéré comme constant, l'équation (II-41) impose un dosage en sable constant. Aussi, l'humidité moyenne est différente entre un gravillon 4/10 et un mélange des gravillons 4/20. En principe, il faut analyser séparément les formules à 2 et à 3 granulats. On a choisi d'appliquer l'algorithme aux gâchées de formules de 3 granulats, leur fabrication étant prédominante.

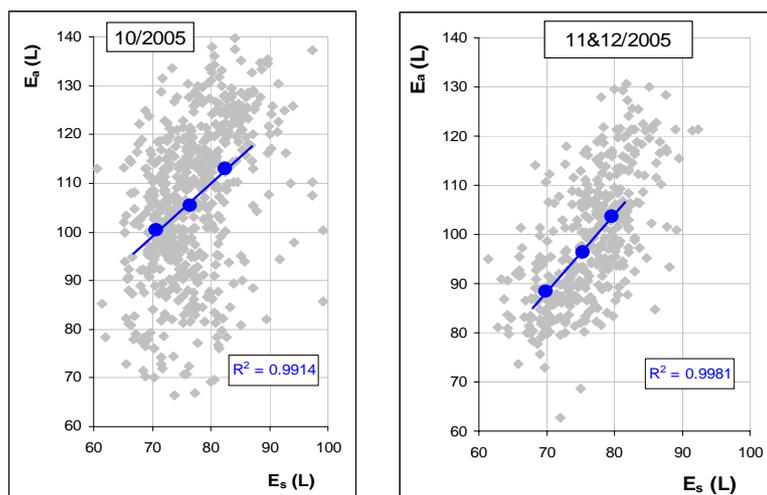
La démarche est la suivante :

On calcule  $E_a$  et  $E_s$  pour chaque fabrication et on représente les points correspondants dans l'espace «  $E_a$ - $E_s$  ».

On fait la moyenne des  $E_a$  pour trois niveaux de  $E_s$ . Pour chaque niveau,  $E_s$  est choisi dans une plage serrée avec un écart type d'environ 1 L/m<sup>3</sup>.

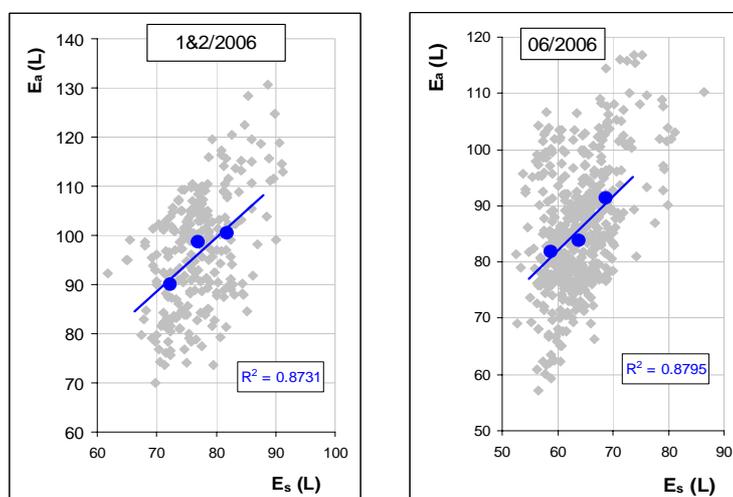
On détermine  $\beta_0$  par la pente de la régression linéaire appliquée aux trois points définis par les moyennes de  $E_s$  et celles de  $E_a$ . Accessoirement, on détermine le coefficient de corrélation de la régression.

La Figure II.54 présente les résultats de l'application de cette méthode aux données réelles. Les valeurs numériques de  $\beta_0$  sont données dans le Tableau II.15.



a. Données octobre 2005

b. Données novembre et décembre 2005



c. Données janvier et février 2006

d. Données juin 2006

Figure II.54-Résultats d'application aux données

En observant les points expérimentaux on remarque que les fluctuations du  $E_a$  pour un  $E_s$  restent d'une même amplitude. Ces fluctuations sont générées par la variation de l'humidité des gravillons, par le bruit de mesure du wattmètre et celui de la sonde du sable.

	Période	Pente $\beta_0$	N° Gâchées	Moyenne $E_s$ ( $L/m^3$ )	Ecart type $E_s$ ( $L/m^3$ )	Plage de variation ( $6\sigma_{E_s}$ )
Calibrage du wattmètre incertain	Oct. 2005	1,08	500	51	4,3	26
	Nov-Déc.2005	1,58	380	51	3,7	22
	Jan-Fév.2006	1,10	255	51	3,5	21
	Juin.2006	0,96	499	43	3,5	21

Tableau II.15-Résultats numériques

Dans le contexte du calibrage du wattmètre, on donne du crédit seulement à l'analyse du mois de juin 2006. La valeur de la pente est de 0,96. Les autres analyses permettent d'appuyer quelques informations supplémentaires, plus générales :

- l'eau apportée en moyenne par le sable en été (en juin) est inférieure de  $8 \text{ L/m}^3$  à celle en hiver, mais l'écart type est le même. On signale cependant que ces données sont celles fournies par la sonde et non les valeurs réelles. Ceci a son intérêt pour l'algorithme car la détermination de la pente de la sonde  $\beta_0$  dépend de l'écart type mais non de la moyenne de  $E_s$ ;
- il semblerait que le nombre des gâchées nécessaires pour déterminer  $\beta_0$  puisse être de l'ordre de 250 à 500.

#### ❖ *Application numérique avec traitement de covariance*

Les formules explicites (II-49) et (II-51) permettent de calculer la pente de la sonde  $\beta_0$  et l'écart type de la quantité d'eau apportée par les gravillons. L'analyse est réalisée sur les périodes indiquées ci-dessus. Le Tableau II.16 présente les résultats.

	Période	Pente $\beta_0$ géométrique	Pente $\beta_0$ analytique	Ecart type $E_g$ ( $\text{L/m}^3$ )
Calibrage du wattmètre incertain	Oct. 2005	1,08	0,96	9,4
	Nov-Déc.2005	1,58	1,44	6,5
	Jan-Fév.2006	1,10	1,05	6,7
	Juin.2006	0,96	0,96	6,5

Tableau II.16 - Résultats numériques.

Au mois de juin 2006, on obtient la même pente de la sonde  $\beta_0$ , soit 0,96. L'écart type de  $E_g$  est d'environ  $6,5 \text{ L/m}^3$ . En utilisant les incertitudes sur l'humidité des gravillons (cf. II.2.3.a), celle du wattmètre (cf. II.3.2.b) et le bruit de la sonde (0,2 points) on obtient un écart type sur  $E_g$  d'environ  $5 \text{ L/m}^3$ , inférieur mais comparable à celui obtenu par l'équation (II-51). Ceci confirme entre autre que, sur la centrale d'Argentan, la variation de la quantité d'eau apportée par les gravillons est plus grande que celle apportée par le sable. C'est une particularité de l'alimentation en granulats de la centrale : les camions transportant les granulats ne sont pas couverts. Les gravillons ont tendance à sécher en surface (effet du vent et du soleil). Dans le camion même, on a à la fois des gravillons secs et d'autres parfois très humides. Des systèmes d'alimentation des granulats différents conduisent à des variations d'humidité des gravillons moins grandes, ce qui pourrait faciliter l'application de la méthode d'optimisation par régression linéaire multiple. Toutefois, on estime que la méthode paramètre par paramètre est plus robuste, et donc recommandable dans tous les cas.

#### II.5.3.b *Détermination des humidités moyennes de gravillons et du décalage d'origine de sonde*

Une fois la pente de la sonde  $\beta_0$  connue, on détermine les autres paramètres : le décalage à l'origine  $\alpha_0$  et les humidités moyennes de gravillons.

#### ❖ *Méthodologie*

Le bilan de l'eau apportée par les granulats est :

$$G \frac{w_g}{1+w_g} + S \left( \alpha_0 + \beta_0 \frac{w_s}{1+w_s} \right) = E_a \quad (\text{II-52})$$

On peut écrire cette équation sous la forme :

$$\frac{w_g}{1+w_g} + \frac{S}{G} \alpha_0 = \frac{E_a}{G} - \beta_0 \frac{S}{G} \frac{w_s}{1+w_s} \quad (\text{II-53})$$

En définissant :

$$w = \frac{w_g}{1+w_g} \quad \text{et} \quad s = \frac{S}{G} \quad (\text{II-54})$$

$$e = \frac{E_a}{G} - \beta_0 \frac{S}{G} \frac{w_s}{1+w_s} = (1+s) \frac{w_a}{1+w_a} - \beta_0 s \frac{w_s}{1+w_s}$$

où «  $w$  » est appelé « concentration en eau »

L'expression (II-53) devient :

$$w + s \alpha_0 = e \quad (\text{II-55})$$

On fait la différence de l'équation (II-55) pour deux fabrications successives

$$\delta w_i + \delta s_i \alpha_0 = \delta e_i \quad (\text{II-56})$$

puis la moyenne de l'équation (II-56) sur la période analysée :

$$E(\delta w) + \alpha_0 E(\delta s) = E(\delta e) \quad (\text{II-57})$$

Par différence (II-56) et (I-57) puis par multiplication par  $\delta s_i - E(\delta s)$  on obtient:

$$[\delta w_i - E(\delta w)][\delta s_i - E(\delta s)] + \alpha_0 [\delta s_i - E(\delta s)]^2 = [\delta e_i - E(\delta e)][\delta s_i - E(\delta s)] \quad (\text{II-58})$$

La moyenne de ces équations peut s'écrire :

$$Cov(\delta w, \delta s) + \alpha_0 \sigma^2[\delta s] = Cov(\delta e, \delta s) \quad (\text{II-59})$$

Dans l'hypothèse des variables  $\delta w$  et  $\delta s$  a priori indépendantes,

$$Cov(\delta w, \delta s) = 0 \quad (\text{II-60})$$

et

$$\alpha_0 = \frac{Cov(\delta e, \delta s)}{\sigma^2[\delta s]} \quad (\text{II-61})$$

A partir de l'équation (II-55), on déduit la concentration en eau moyenne des gravillons :

$$\bar{w} = \bar{e} - \bar{s} \alpha_0 \quad (\text{II-62})$$

et on estime son écart type :

$$\sigma^2[w] = \sigma^2[e] - 2\alpha_0 Cov(e, s) + \alpha_0^2 \sigma^2[s] \quad (\text{II-63})$$

La concentration en eau moyenne (II-62) est celle du mélange de deux gravillons (10/20 et 4/10). Pour déterminer la concentration en eau de chaque gravillon, il est nécessaire de résoudre également le système des formules à deux granulats. Ce type de formule est fabriqué moins fréquemment, mais on connaît déjà les paramètres de calibrage de la sonde, ce qui permet de retrouver facilement la moyenne de la concentration en eau du granulat 4/10,  $\bar{w}_2$ , et son écart type  $\sigma^2[w_2]$ . Après quelques opérations simples, on détermine les caractéristiques statistiques pour la classe 10/20,  $\bar{w}_1$  et  $\sigma^2[w_1]$ .

Il faut maintenant reconstituer les moyennes et les écarts types de teneurs en eau des gravillons à partir de ceux des concentrations en eau. Des développements mathématiques détaillés en Annexe I- 9 permettent d'établir des relations suivantes (II-64) – (II-65).

Pour l'humidité des deux gravillons 4/10 ( $i = 1$ ) et 10/20 ( $i = 2$ ), on a :

$$\text{- Moyenne : } \bar{w}_{gi} = \frac{\bar{w}_i}{1 - \bar{w}_i} + \frac{\sigma^2[w_i]}{(1 - \bar{w}_i)^2} \quad (\text{II-64})$$

$$\text{- Ecart type : } \sigma[w_{gi}] = \frac{\sigma[w_i]}{(1 - \bar{w}_i)^2} \quad (\text{II-65})$$

### II.5.3.c Estimation des incertitudes des paramètres

On doit estimer l'incertitude des paramètres afin de vérifier si ceux-ci permettent un calibrage des humidités forfaitaires des gravillons et de la sonde du sable. Au niveau des humidités des gravillons, cette opération est simple. En effet, on connaît pour chaque humidité de gravillon sa moyenne et son écart type. Donc l'incertitude d'estimation de la moyenne (écart type) de  $n$  fabrications est donnée par :

$$s[\bar{w}] = \frac{\sigma[w]}{\sqrt{n}} \quad (\text{II-66})$$

Pour les deux paramètres concernant la sonde à sable, on rappelle que les coefficients «  $\alpha_0$  » et «  $\beta_0$  » sont déterminés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} \beta_0 = \frac{\text{Cov}(E_a, E_s)}{\sigma^2[E_s]} \\ \alpha_0 = \frac{\text{Cov}(\delta e, \delta s)}{\sigma^2[\delta s]} \end{cases} \quad (\text{II-67})$$

Dans l'hypothèse où les incertitudes sur  $E_s$  et  $\delta s$  sont négligeables par rapport à celles sur  $E_a$  et  $\delta e$ , on s'intéresse à l'incertitude des termes  $\text{Cov}(E_a, E_s)$  et  $\text{Cov}(\delta e, \delta s)$  seulement. Des développements présentés dans l'Annexe I- 10 permettent de proposer les relations :

$$\begin{cases} s[\beta_0] = \frac{\sigma[Z_\beta]}{\sigma^2[E_s]\sqrt{n}} \\ s[\alpha_0] = \frac{\sigma[z_\alpha]}{\sigma^2[\delta s]\sqrt{n}} \end{cases} \quad (\text{II-68})$$

où

$$\begin{aligned} Z_\beta &= (E_a - \bar{E}_a)(E_s - \bar{E}_s) \\ z_\alpha &= (\delta e)(\delta s) \end{aligned} \quad (\text{II-69})$$

### II.5.3.d Validation aux données réelles

On applique les concepts théoriques ci-dessus sur des données de fabrication réelles. Le schéma ci-après résume le calcul :

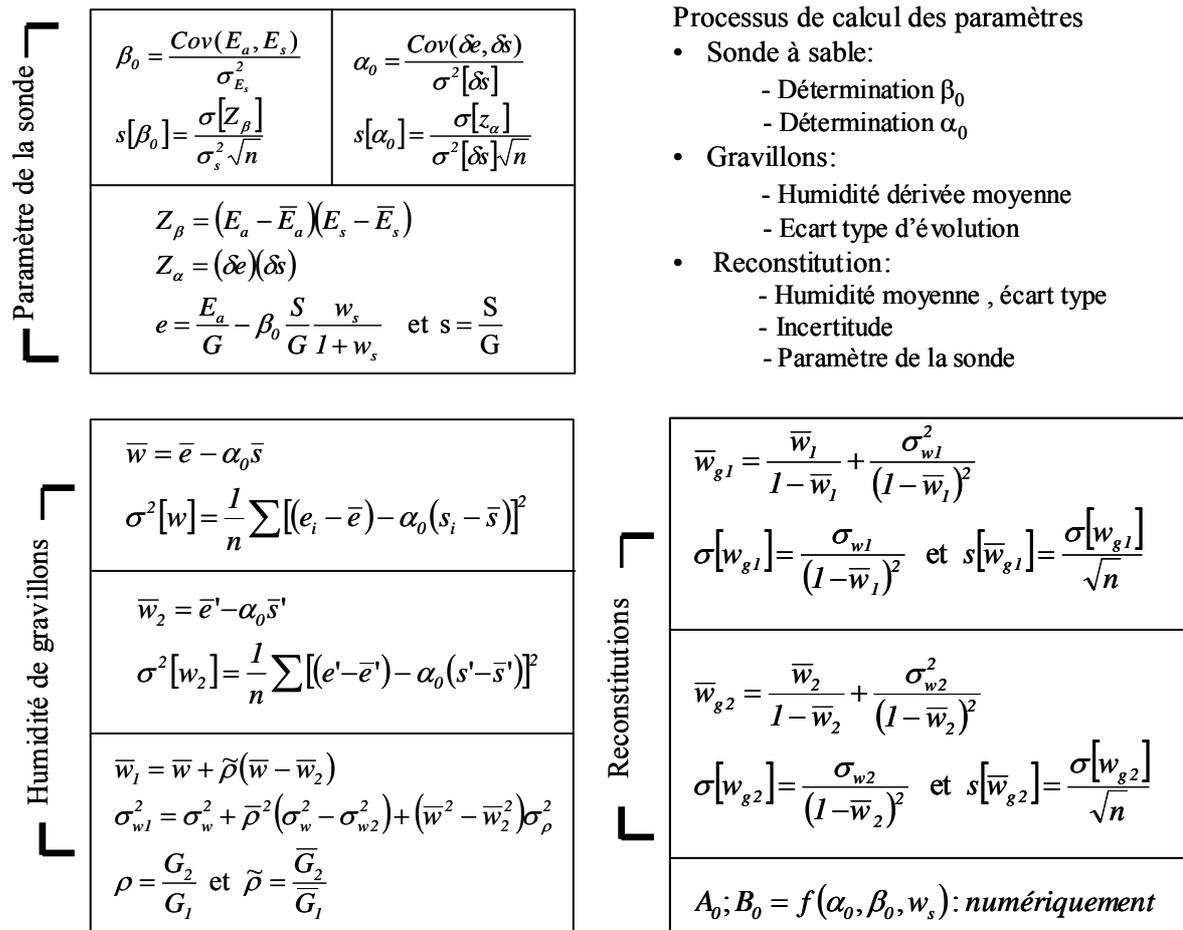


Figure II.55-Processus de calculs des paramètres.

L'algorithme est appliqué aux données de juin 2006, qui seules respectent la condition de calibrage du wattmètre. Les calculs sont effectués avec une variable  $e$  (définie dans l'équation II-54) dont le bruit est diminué par filtrage à l'aide d'une moyenne mobile sur 5 points (Figure II.56).

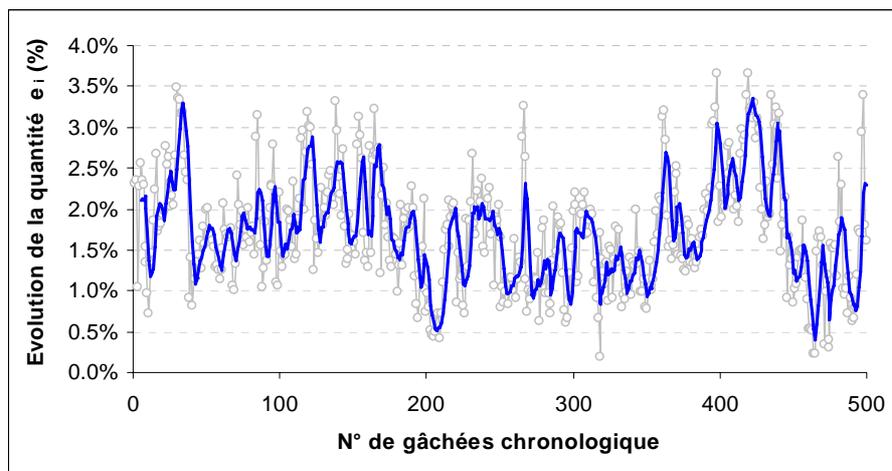


Figure II.56-Filtrage par moyenne mobile.

Le tableau ci-après représente des résultats de calculs:

Paramètre	Valeur numérique	Incertitude	Distribution (Ecart type)
Pente de la sonde : $\beta_0$	0,96	$\pm 0,12$	-
Décalage d'origine : $\alpha_0$	0,26 %	$\pm 0,23$ %	-
Concentration en eau du mélange: w	1,48 %	$\pm 0,03$ %	0,69 points
Concentration en eau Granulat 4/10: $w_2$	1,99 %	$\pm 0,05$ %	0,63 points
Concentration en eau Granulat 10/20 : $w_1$	1,32 %	$\pm 0,03$ %	0,70 points

Tableau II.17-Résultats appliqués aux données en 06/2006

Le résultat proposé par l'algorithme (Tableau II.17) semble physique, et les humidités moyennes utilisées par le centralier sont 1,23 % pour le gravillon 10/20 de 2,6 % pour le gravillon 4/10. Les incertitudes confirment aussi cette validité. La sonde semble bien calibrée, mais il est probable qu'un décalage à l'origine soit nécessaire. On discute ici du calibrage en juin 2005, celui retenu dans la base « Klever », qui est différent de celui utilisé par le centralier au moment des fabrications analysées. En effet, un nombre important de re-calibrages est intervenu depuis.

Les résultats en juin 2006 semblent confirmer la robustesse de l'algorithme « paramètre par paramètre », bien qu'une validation sur d'autres données avec des mesures fiables de l'humidité du béton soit souhaitable. Malheureusement nous n'en disposons pas.

## II.6. Conclusion du chapitre

Le but de cette partie était d'étudier des solutions pour la maîtrise du dosage en eau lors de la fabrication de béton en centrale. Lors d'une campagne d'essai destinée au calibrage du wattmètre, une méthode originale pour la mesure de la teneur en eau du béton dans le malaxeur est mise au point, par prélèvement du mélange granulaire. Cette méthode est beaucoup plus précise que la méthode traditionnelle, par séchage de béton frais. Elle permet de connaître le dosage en eau totale dans le malaxeur avec un écart type de l'ordre de 0,3 L/m<sup>3</sup>. Lors du calibrage du wattmètre, on a trouvé que celui-ci permet une mesure de la teneur en eau du béton, avec un écart type de l'ordre de 2,25 L/m<sup>3</sup>, dans l'hypothèse où les constituants ne varient pas (autrement que par leur teneur en eau) et que la température est à peu près constante. L'ensemble de ces résultats permet de valoriser la trappe d'échantillonnage sur le malaxeur, outil qui facilite le prélèvement dans le contexte d'une fabrication industrielle. Le calibrage en milieu industriel des outils de mesure en ligne semble envisageable.

Pour améliorer la régularité du dosage en eau, deux variantes d'un algorithme de correction sur la gâchée suivante sont proposées. L'écart type du dosage en eau dans la toupie pourrait théoriquement diminuer jusqu'à 1,5 L/m<sup>3</sup>. Cette démarche n'évite cependant pas des incidents de fabrication, notamment dus à une sonde d'humidité du sable mal calibrée. Elle nécessite entre autres un calibrage systématique de l'outil de mesure en ligne de l'humidité du béton, ce qui est rarement fait dans la pratique.

Une deuxième démarche vise à calibrer les mesures d'humidité de granulats. Deux techniques de résolution sont étudiées: celle de la régression linéaire, et celle du calibrage "paramètre par paramètre" (par calcul de la covariance). La deuxième semble plus robuste, mais mérite des validations supplémentaires.

Suivi de l'ouvrabilité en ligne du béton frais

## II.7. Contexte général

Les fournisseurs de béton doivent assurer la qualité de leur produit en sortie de centrale. Deux propriétés sont en général exigées lors de la fabrication du béton: son ouvrabilité à l'état frais et sa résistance en compression à l'état durci. Nous allons principalement nous focaliser sur le suivi de l'ouvrabilité dans cette partie.

En amont de la réalisation d'un ouvrage, les méthodes d'exécution sont fixées et mises en place par les intervenants du projet. Elles imposent en général une ouvrabilité qui reste le principal critère de réception du béton sur le chantier. Un béton trop raide lors de la livraison sera donc refusé, ou encore trop souvent fluidifié à l'eau sur site, bien que cela soit interdit par la norme. En effet, un apport d'eau a des conséquences néfastes sur la résistance et la durabilité du béton. Afin de réduire les rejets de bétons, voire les malfaçons, il apparaît donc intéressant de contrôler l'ouvrabilité du béton en amont du chantier, notamment au moment de sa fabrication. Pour atteindre cet objectif, un système capable d'informer précisément et en temps réel le pilote de la centrale sur l'ouvrabilité du béton, dans le malaxeur, doit donc être préalablement développé.

Actuellement, la surveillance de la fabrication du béton dans la plupart des centrales est réalisée au moyen de la courbe du wattmètre. Pour chaque formule, le centralier peut établir une valeur de puissance stabilisée à viser. Le dosage en eau sera alors ajusté d'une gâchée à l'autre pour que le wattmètre soit le plus proche possible de la valeur cible.

Des travaux réalisés dans le génie des procédés (Metzner et Otto [56] ; Calderbank et Moo-Yoong [59]; Su et Holland [60]...) ont permis d'établir de manière empirique des relations simples entre la puissance consommée lors du mélange d'un fluide non newtonien et ses caractéristiques rhéologiques. Dans le génie civil, le béton à état frais est assimilé à un fluide de Bingham depuis les travaux de Tattersall dans les années 1970. Une étude récente menée au LCPC (Chopin [44]) a confirmé la dépendance de la puissance stabilisée lors du malaxage, vis-à-vis de la rhéologie du béton.

Il résulte de ce constat que la valeur de wattmètre ne dépend pas que de l'affaissement du béton (lié au seuil de cisaillement) mais également de sa viscosité. En conséquence, il n'existe pas pour un malaxeur donné de relation valable pour tous les bétons entre l'affaissement et la valeur du wattmètre. Ceci oblige donc le centralier à établir cette relation pour chacune des formules, ce qui peut s'avérer lourd à réaliser.

Après avoir exposé les bases d'un modèle de puissance en fonction des paramètres rhéologiques du béton, nous allons, au travers de deux campagnes expérimentales de laboratoire et deux campagnes sur centrales à béton à l'échelle industrielle, montrer dans quelle mesure il est possible de l'intégrer dans le processus de fabrication pour évaluer l'affaissement du béton juste avant la fin de son malaxage.

## II.8. Modèle de puissance consommée du malaxeur

Dans le cas d'un fluide newtonien, un problème d'agitation fait intervenir un certain nombre de variables [54]:

- trois caractéristiques du fluide à agiter : la masse volumique «  $\rho$  » ( $\text{kg/m}^3$ ), la viscosité dynamique «  $\nu$  » (Pa.s) et la tension superficielle «  $\gamma$  » (N/m) ;

- trois caractéristiques cinématiques et dynamiques : la vitesse de rotation de l'agitateur « N » (tr/s), l'accélération de la pesanteur « g » (prise en général égale à  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) et la puissance absorbée pour vaincre les forces résistantes « P » (W) ;
- des caractéristiques géométriques «  $\zeta$  » de l'agitateur et de l'appareil.

La relation entre ces variables peut être mise sous la forme générale suivante :

$$f(\rho, \nu, \gamma, N, g, P, \zeta) = 0 \quad (\text{III- 1})$$

Expliciter la fonction  $f$  semble impossible en raison de la complexité de l'écoulement dans le mélangeur ainsi que de la diversité des géométries existantes. Cependant, l'analyse dimensionnelle permet de mettre en évidence des nombres représentatifs des phénomènes apparaissant dans le mélangeur. On peut citer le :

- **nombre de Reynolds**,  $N_{Re} = \frac{Nd^2\rho}{\nu}$ , qui caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité, où « d » est une longueur caractéristique de l'écoulement ;

- **nombre de puissance**,  $N_p = \frac{P}{\rho N^3 d^5}$ , qui caractérise l'effet de traînée de l'agitateur dans le fluide ;

- **nombre de Froude**,  $N_{Fr} = \frac{N^2 d}{g}$ , qui caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité ;

- **nombre de Weber**,  $N_{We} = \frac{\rho N^2 d^3}{\gamma}$ , qui caractérise l'action des forces de tension superficielle du fluide.

Pour un procédé fixé (la géométrie du mélangeur étant fixée), on suppose que la relation (III-1) peut être exprimée sous la forme suivante:

$$N_p = \Psi(N_{Re}, N_{Fr}, N_{We}) \quad (\text{III- 2})$$

La fonction  $\Psi$  dépend alors de la géométrie du mélangeur.

Lorsque l'effet des forces de tension superficielle est négligeable vis-à-vis d'autres phénomènes, et que la pesanteur joue un rôle mineur vis-à-vis de la viscosité du fluide, l'équation ci-dessus se réduit à :

$$N_p = \psi(N_{Re}) \quad (\text{III- 3})$$

Dans le cas des cuves-agitateurs et en l'absence de vortex, la courbe caractéristique (III-3) est présentée dans la Figure II.57. On constate que l'allure de cette courbe est une fonction unique du nombre de Reynolds. Ainsi, cette courbe permet de caractériser le régime d'écoulement dans le mélangeur.

Metzner et Otto [56] proposent d'appliquer ces principes au domaine des mélanges des fluides non newtoniens, en définissant la viscosité apparente moyenne «  $\mu_a$  » comme égale à celle d'un fluide newtonien qui nécessite la même puissance dans les mêmes conditions

géométriques et opératoires. Ces auteurs ont également proposé le concept du gradient de vitesse effective  $\dot{\gamma}_e$ , proportionnelle à la vitesse de rotation de l'agitateur :

$$\dot{\gamma}_e = k_s N \quad (\text{III- 4})$$

avec «  $k_s$  » constante fonction de la géométrie du mélangeur.

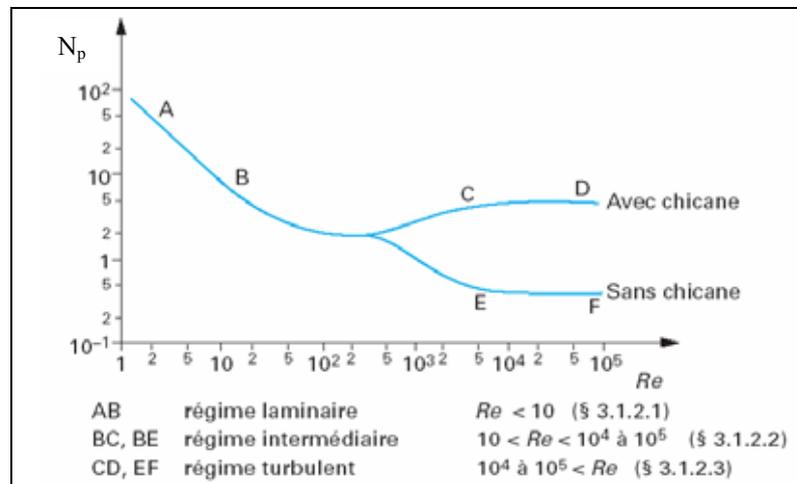


Figure II.57- Courbe caractéristique de puissance pour un fluide newtonien. Cas des systèmes cuves- agitateur en présence ou non d'une chicane fixée à la cuve [54]

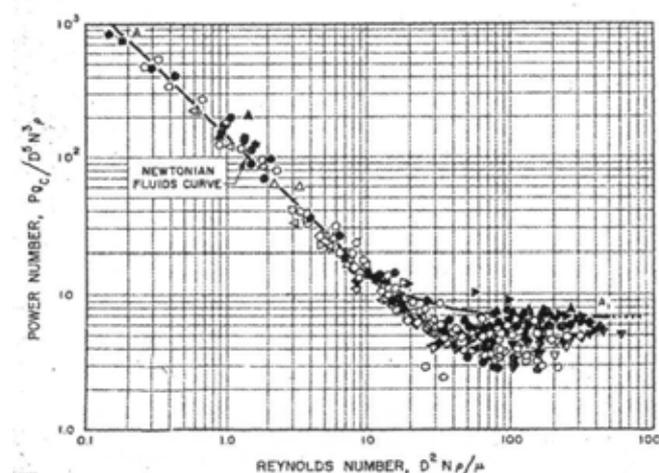
Cette méthode revient à définir un nombre de Reynolds apparent :

$$N'_{Re} = \frac{Nd^2\rho}{\mu_a} \quad (\text{III- 5})$$

ce qui permet de généraliser la relation (III-3) dans les cas des fluides non newtoniens. Il s'agit ensuite de tracer la courbe reliant le nombre de puissance au nombre de Reynolds apparent :

$$N_p = \psi'(N'_{Re}) \quad (\text{III- 6})$$

Les concepts proposés par Metzner et Otto sont vérifiés en génie des procédés à travers de nombreux travaux ([57] ; [58] ; [59] ; [60]). Les courbes caractéristiques ainsi que la constante «  $k_s$  » ont été déterminées pour divers types fluides non newtoniens et différents mélangeurs. On présente dans les graphiques suivants certains résultats de ces recherches.



(a)

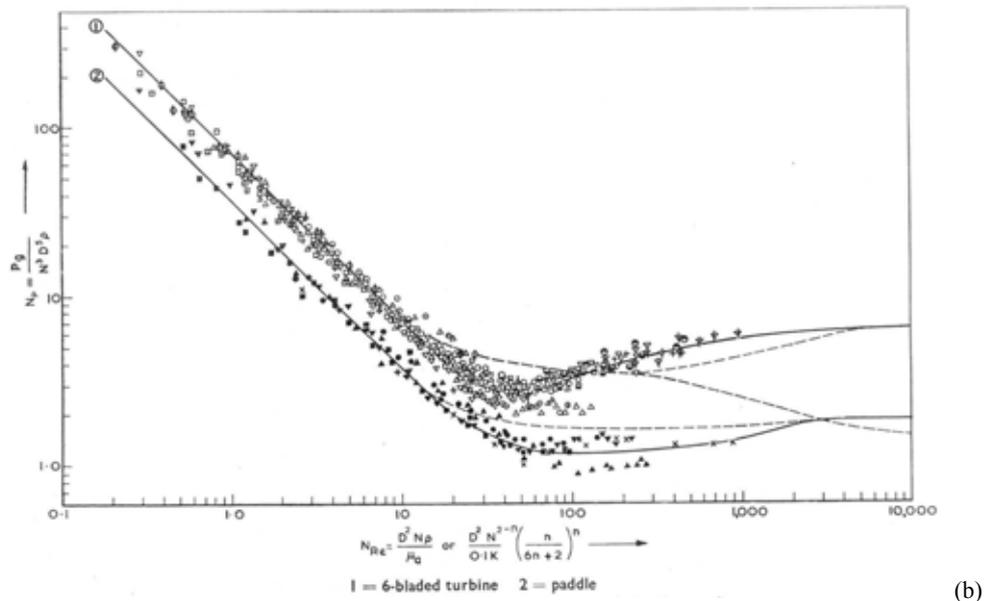


Figure II.58-Courbes caractéristiques de puissance pour les fluides non newtoniens  
(a) - [58] et (b) - [59]

Ces résultats montrent que les courbes de puissance dans le domaine non newtonien semblent présenter des caractéristiques similaires à celles obtenues lors de l'agitation de fluides newtoniens. En régime laminaire (dont le nombre de Reynolds est inférieure à 10, et uniquement dans ce cas, comme on peut l'observer sur la Figure II.58), le produit entre le nombre de puissance et le nombre de Reynolds apparent est une constante :

$$N_p N'_{Re} = K_p \quad (\text{III- 7})$$

S'appuyant sur la relation (III-7), Tattersall [3] a développé un appareil, présenté sous la forme d'un malaxeur, permettant de caractériser l'écoulement du béton frais. Sur le plan du comportement rhéologique, l'essai « two-point test » montre bien que ce matériau peut être assimilé à un fluide de Bingham. L'équation fondamentale s'écrit alors :

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (\text{III- 8})$$

où :

$\tau$  : la contrainte de cisaillement (Pa)

$\tau_0$  : le seuil de cisaillement (Pa)

$\mu$  : la viscosité plastique (Pa.s)

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

En utilisant le principe présenté dans (III-4), on peut déterminer la viscosité apparente du fluide dans le mélangeur en fonction du gradient de vitesse «  $\dot{\gamma}_e$  »:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_e} = \frac{\tau_0 + \mu(k_s N)}{k_s N} \quad (\text{III- 9})$$

ce qui permet de réécrire la relation (III-7) sous la forme :

$$\frac{P}{\rho N^3 d^5} \times \frac{Nd^2 \rho}{(\tau_0 + \mu.k_s N) / k_s N} = K_p \quad (\text{III- 10})$$

La puissance nécessaire pour mélanger un fluide de Bingham à une vitesse donnée est donc prédite par :

$$P = K_p d^3 \left( \mu + \frac{\tau_0}{k_s N} \right) N^2 \quad (\text{III- 11})$$

avec « d », longueur caractéristique de l'écoulement du fluide dans le mélangeur.

Il faut souligner que le terme «  $K_p d^3$  » est homogène à un volume. On peut donc remplacer «  $K_p d^3$  » par  $\alpha_m V$  dans un procédé réalisé avec un mélangeur donné dont la configuration géométrique de l'agitateur est fixée.  $V$  est le volume du matériau dans le mélangeur et  $\alpha_m$  une constante du malaxeur. On a enfin un modèle de prédiction de la composante de la puissance liée à la dissipation visqueuse dans le fluide de Bingham :

$$P = \alpha_m V \left( \mu + \frac{\tau_0}{k_s N} \right) N^2 \quad (\text{III- 12})$$

On cherche maintenant à intégrer l'expression (III-12) au procédé de malaxage du béton. Dans les centrales à béton, la puissance consommée par le malaxeur est mesurée au moyen d'un wattmètre. Cependant, les malaxeurs à béton consomment une énergie non négligeable due aux frottements à vide des pièces mécaniques du moteur (axes, engrenages...) et des pales sur la cuve par l'intermédiaire des granulats, comme le montre l'illustration de Cormon [37]. Par conséquent, la puissance totale mesurée doit être décomposée en deux parties : l'une liée aux frottements,  $P_f$  et l'autre liée à la dissipation visqueuse, quantifiée grâce à l'expression (III-12). Le modèle de puissance consommée dans le malaxeur est donc explicité sous la forme :

$$P_{tt} = P_f(N) + \alpha_m V \left( \mu + \frac{\tau_0}{k_s N} \right) N^2 \quad (\text{III- 13})$$

où

- $P_f$  (en W) est la somme de la puissance à vide et de la puissance de frottement des pales. On suppose a priori que cette puissance dépend de la vitesse de rotation ;
- $\alpha_m$  est une constante dépendant de la géométrie du malaxeur (en  $\text{tr}^{-2}$ );
- $k_s$  est une constante dépendant également de la géométrie du malaxeur (en  $\text{tr}^{-1}$ ) ;
- $V$  est le volume de béton dans le malaxeur (en  $\text{m}^3$ ).

Dans une simulation, par la méthode aux éléments finis, de l'écoulement du béton frais dans le malaxeur (utilisé dans la troisième campagne - II.11.2) en vue de vérifier les concepts de Metzner et Otto, Roquet [55] a montré que  $\alpha_m$  et  $k_s$  ne sont pas strictement constants, mais qu'ils ne varient que faiblement (Figure II.59) dans la gamme des bétons étudiés (seuil de cisaillement compris entre 0 et 2500 Pa, viscosité comprise entre 30 Pa.s et 250 Pa.s). A noter toutefois que ces simulations ont été faites en supposant qu'il y a adhérence parfaite entre le béton et les parois du malaxeur. Ceci est une hypothèse sans doute forte pour les bétons secs, mais elle est imposée par les possibilités du logiciel.

On peut également mettre l'expression (III-13) sous la forme :

$$P_{tt} = P_f(N) + \frac{\alpha_m}{k_s^2} V (\tau_0 + \mu k_s N) k_s N \quad (\text{III- 14})$$

$$\text{ou } P_{tt} = P_f(N) + C_m V (\tau_0 + \mu \dot{\gamma}_m) \dot{\gamma}_m \quad (\text{III- 15})$$

avec  $C_m = \frac{\alpha_m}{k_s^2}$

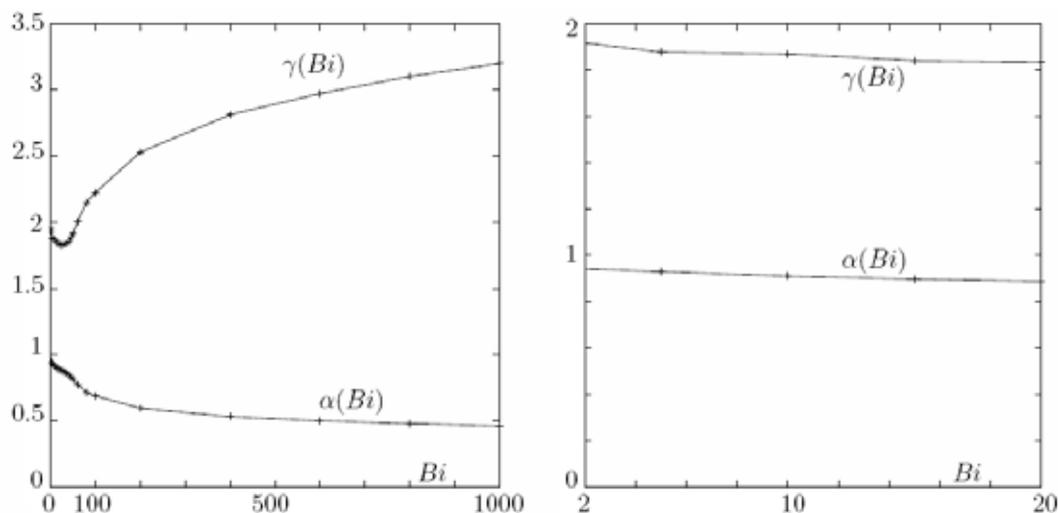


Figure II.59-Variation des deux constantes  $\alpha_m$  et  $k_s$  avec  $Bi$  (nombre de Bingham,  $\tau_0/\mu N$ ).  
Sur la figure,  $\gamma(Bi)$  désigne  $k_s$  et  $\alpha(Bi)$  désigne  $\alpha_m$ . [55]

On remarque que l'équation (III-15) est l'expression que Chopin [44] a mise en évidence dans le cadre de sa thèse. Cette expression permet d'exprimer l'approximation suivante: tout se passe comme si l'énergie dissipée dans le béton lors de son malaxage servait à cisailier un volume constant  $C_m V$  à une vitesse de cisaillement moyenne  $\dot{\gamma}_m$ .  $C_m$  désigne alors le pourcentage du volume de béton cisailé dans le malaxeur.

Pour revenir au problème de départ (détermination des constantes rhéologiques du béton à partir de la mesure de puissance dans le malaxeur), on voit qu'en mesurant la puissance à au moins deux vitesses, la formule (III-14) fournira un système d'équations en  $\tau_0$  et  $\mu$ , grâce auxquelles ces paramètres devraient pouvoir être calculés.

## II.9. Etude préliminaire sur un malaxeur du laboratoire

### II.9.1 Objectifs

On a rappelé dans la section précédente la construction d'un modèle reliant la puissance consommée par un malaxeur aux deux paramètres de Bingham du béton malaxé,  $\tau_0$  et  $\mu$ .

L'objectif de ce chapitre est de valider la forme de ce modèle, sur un malaxeur de laboratoire dans un premier temps. Il s'agit également d'évaluer la puissance consommée par les frottements et de proposer une fonction permettant de la prédire. Cette fonction dépendra probablement de la vitesse de malaxage. Enfin, cette campagne d'essais vise à vérifier si un malaxeur peut être utilisé pour évaluer la rhéologie d'un béton à partir de la puissance de malaxage.

## II.9.2 Description des matériels

### II.9.2.a Malaxeur

Le malaxeur est un Skako-Couvrot prototype, de type planétaire à axe vertical. Il est constitué de trois composants principaux : un moto-réducteur dans la partie supérieure, une cuve fixe de 50 litres (dont la capacité nominale est de 40 L) dans la partie inférieure et des outils de malaxage. L'ensemble du moto-réducteur comprend un carter fixant le moteur électrique à la cuve par des boulons, un plateau porte-outil tournant motorisé grâce à un système de réduction à dentures, actionnant les outils de malaxage. Les outils de malaxage comprennent une pale de raclage en bord de cuve et un train valseur. La cuve est complétée par une trappe de vidange manuelle. Les vues de dessus et de côté du malaxeur sont présentées sur la figure (Figure II.60). Une photographie de l'appareil est présentée sur la figure (Figure II.61).

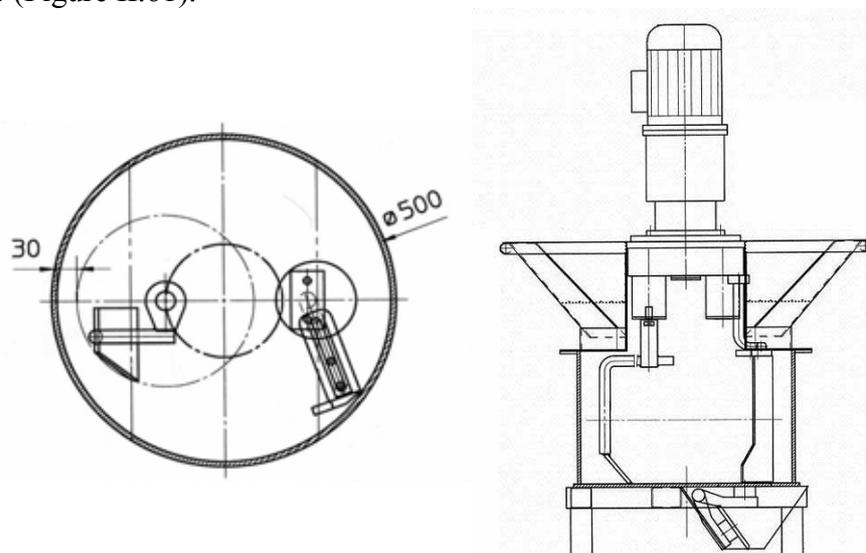


Figure II.60-Schéma du malaxeur.



Figure II.61-Malaxeur Skako-Couvrot

La figure suivante présente l'intérieur de la cuve. Le montage mécanique du malaxeur impose une vitesse angulaire de la pale du train valseur égale à 4,18 fois la vitesse angulaire du racleur.

Dans la suite de ce chapitre; lorsque l'on parlera de vitesse de malaxage, cela sous-entendra la vitesse de rotation du racleur.



Figure II.62-Pales du malaxeur et volume du malaxage

### II.9.2.b Acquisition de la vitesse et de la puissance du malaxeur

Le moteur du malaxeur est raccordé à un variateur Danfoss VTL (Série 5000, Figure II.64). Ce dernier sert à faire varier la vitesse de rotation des pales grâce à un potentiomètre, et à mesurer la puissance consommée. Une carte d'acquisition permet d'enregistrer en temps réel à 100 Hz les signaux de puissance et de fréquence sous la forme d'un voltage. Le logiciel DAISYLab 7.0 est utilisé pour gérer l'acquisition des données ainsi que la visualisation des courbes wattmétriques. Le schéma du système d'acquisition est présenté sur la Figure II.63. L'étalonnage de la vitesse de rotation et de la puissance sont présentés dans l'Annexe II- 1.

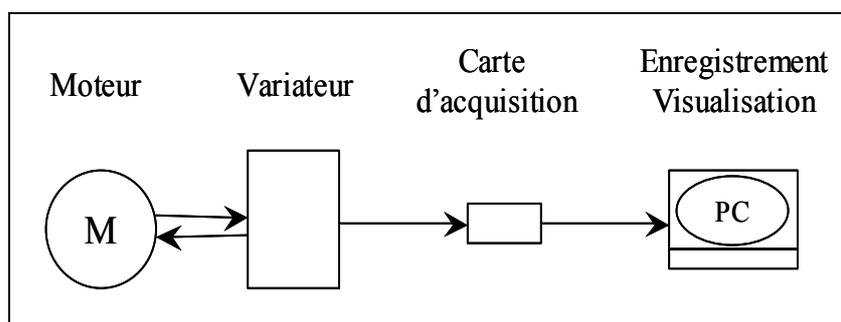


Figure II.63-Schéma d'acquisition des données



Figure II.64-Variateur Dansfoss VTL (Série 5000)

### II.9.2.c Rhéomètre BTRhéom

Cet appareil a été développé au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Sa description et le mode de dépouillement des deux paramètres rhéologiques de Bingham ont été présentés dans le paragraphe I.1.1.b.

Les incertitudes liées au seuil de cisaillement et à la viscosité plastique pour BTRHEOM sont respectivement 60 Pa et 30 Pa.s [8].

Dans toutes les campagnes expérimentales présentées ci-dessous, nous avons utilisé le protocole suivant:

- une pré-vibration de 15 secondes à 50 Hz afin de s'assurer du bon compactage du béton dans la cuve et de l'évacuation de l'air piégé;
- deux séries de six paliers de vitesse sont effectuées en faisant décroître la vitesse de rotation de 0,8 tr/s à 0,2 tr/s

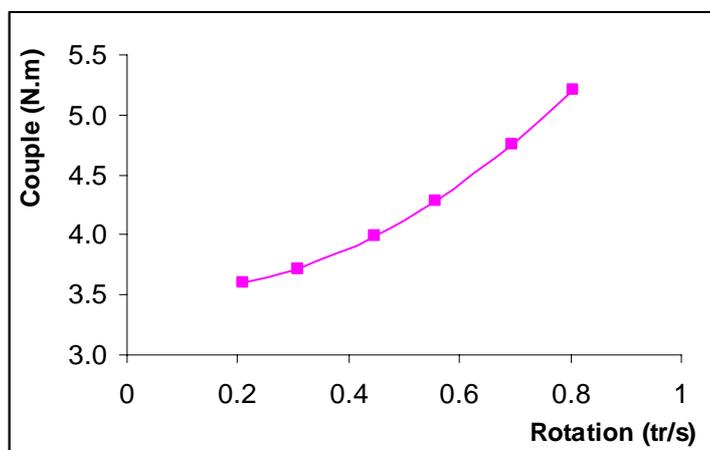


Figure II.65-Exemple de mesure effectuée par BTRhéom

Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique sont déduits à partir de la première série de mesures. La deuxième série n'a pour but que de vérifier la répétabilité de la courbe de couple et ainsi garantir que le béton n'est pas ségrégeant.

La Figure II.65 représente un exemple de courbe de couple en fonction de la vitesse de rotation obtenue.

### II.9.3 Réalisation du plan d'expérience

Comme décrit plus haut, l'idée générale est de tester la possibilité d'utiliser le malaxeur comme rhéomètre. Pour cela, on va mesurer la puissance consommée pour différentes vitesses de malaxage. Les propriétés rhéologiques des bétons seront alors déduites de l'équation (III-14) et comparées aux valeurs fournies grâce au BTRHEOM. L'ouvrabilité, mesurée ici par l'affaissement, conformément à la norme EN NF – 12350-2, pourrait alors être déduite du seuil de cisaillement grâce à l'équation (I-5).

#### II.9.3.a Protocole de caractérisation des bétons

Dans un premier temps, on réalise un malaxage classique à 80 % de la vitesse nominale suivant le protocole suivant:

- 1' de malaxage à sec;
- pendant 30', introduction de l'eau contenant le superplastifiant, le cas échéant;
- 2'30" de malaxage complémentaire.

On réalise ensuite la mesure de la puissance pour trois paliers vitesses du racleur : 0,48 – 0,35 et 0,25 tr/s. Une durée de 30' pour chaque palier a été choisie car elle est suffisamment longue pour obtenir des courbes stabilisées et suffisamment courte pour limiter les risques d'évolution du béton. Le béton est ensuite vidangé pour effectuer les mesures d'affaissement et de rhéologie.

A titre d'exemple, la Figure II.66 présente l'allure de la puissance consommée (gâchée DLG3) échantillonnée 100 fois par seconde.

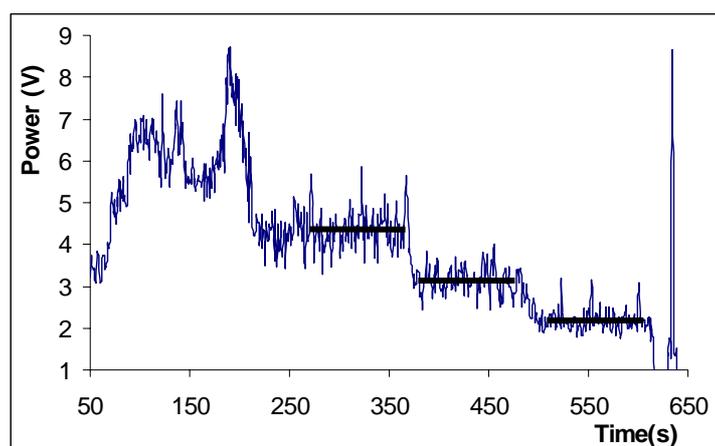


Figure II.66-Courbe wattmétrique (de la gâchée DLG3)

On remarque que le signal de puissance au niveau de chaque palier présente des oscillations régulières dont le mouvement du train valseur est une des causes. En effet, en se référant au schéma de l'outil de malaxage (Figure II.60) et à l'image de la trajectoire du

train valseur (Figure II.67), on voit que la vitesse linéaire relative de la pale par rapport au béton fluctue régulièrement en fonction de la position de la pale dans la cuve lors du malaxage. Les pics de puissance plus aléatoires sont, quant à eux, probablement dus au fait que les granulats dont le diamètre est inférieur ou égal à la hauteur de l'entrefer entre le bas des pales et le fond de la cuve peuvent se coincer sous le mouvement de la pale, ce qui nécessite ponctuellement un surplus de puissance.

L'analyse du comportement des bétons est faite sur les valeurs moyennes de la vitesse et de la puissance calculées sur chaque palier.

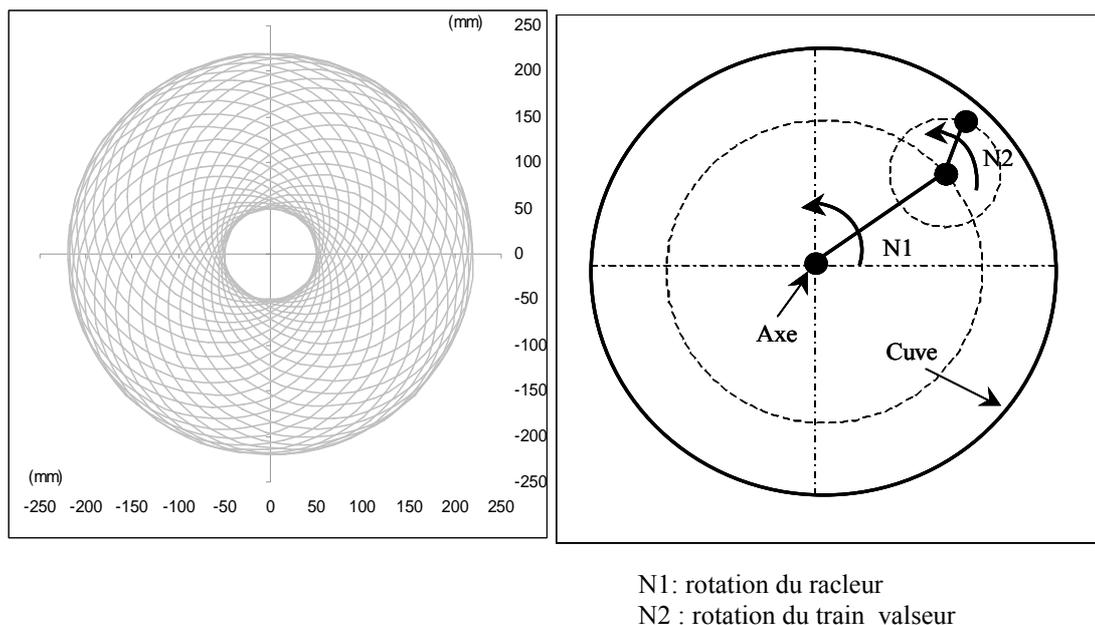


Figure II.67-Courbes de trajectoire du train de valseur

### II.9.3.b Mesure de la puissance de frottement

Comme indiqué ci-dessus, la présence des granulats dans l'entrefer entre les pales et le fond de la cuve génère un frottement fluctuant autour d'une valeur moyenne. La rotation du système de réduction à engrenages du malaxeur fournit une deuxième source de frottement permanent. La puissance de frottement totale est la somme de ces deux composantes. Chopin dans le cadre de sa thèse [44] a considéré que cette puissance est constante. Cette hypothèse est probablement simpliste, mais se justifie par le fait que l'auteur n'avait fait des mesures de puissance qu'à une seule vitesse.

En fait, comme une partie du frottement est lié aux coincements des granulats dans l'entrefer, ce frottement pourrait dépendre du volume de gravillons et donc de la composition du béton. De plus, on peut envisager une dépendance linéaire du frottement en fonction de la vitesse de malaxage, ce qui est classique en mécanique pour estimer la dissipation d'énergie due au frottement lors du déplacement relatif d'un objet par rapport à une surface. Cependant, notre problème est plus compliqué : quand le train valseur est mis en mouvement à des vitesses variables, le matériau lui-même est brassé à des niveaux différents et donc la texture granulaire au fond de la cuve ne reste pas la même. Nous ne savons pas si ce phénomène entraîne une évolution de la force de frottement non linéaire en fonction de vitesse.

Pour apporter des éléments de réponse, nous avons rempli le fond du malaxeur de granulats utilisés dans les formules des bétons étudiés. Le volume de granulats était suffisant pour combler l'espace entre le train valseur et le fond de la cuve mais assez faible pour limiter le contact avec les pales. Dans cette configuration, nous avons fait l'hypothèse que la puissance était essentiellement consommée par le frottement et non pas par le brassage du mélange granulaire. Cette approche est forcément simplificatrice puisqu'elle ne prend pas en compte le fait que le squelette granulaire du béton est en suspension dans une pâte.

Les cinq configurations suivantes ont été testées:

- 8kgGr : le malaxeur est rempli de 8 kg de graviers 6,3/10 ;
- 4kgGr : le malaxeur est rempli de 4 kg de graviers 6,3/10 ;
- 4kgGrSb : le malaxeur est rempli de 4 kg du mélange de 50 % de graviers 6,3/10 et de 50 % de sable 0/4 ;
- 8kgGrSb : le malaxeur est rempli de 8 kg du mélange de 50 % de graviers 6,3/10 et de 50 % de sable 0/4 ;
- 8kgGrSbE : le malaxeur est rempli de 8 kg du mélange de 50% de graviers 6,3/10 et de 50 % de sable 0/4 + 1litre d'eau.

La figure (Figure II.68) présente les résultats de ces essais. On remarque que la puissance de frottement varie peu avec l'épaisseur de remplissage ce qui confirme que l'on mesure essentiellement une puissance de frottement. On constate également que la puissance de frottement est une fonction linéaire de la vitesse de rotation. Cette fonction semble par contre dépendre de la composition du squelette granulaire. Ceci semble assez logique car si une partie de la puissance est consommée pour lutter contre les coincements des granulats dans l'entrefer entre les pales et le fond de la cuve, elle doit être fonction de la courbe granulométrique.

Enfin, la présence d'eau ne semble par modifier de façon drastique la puissance de frottement.

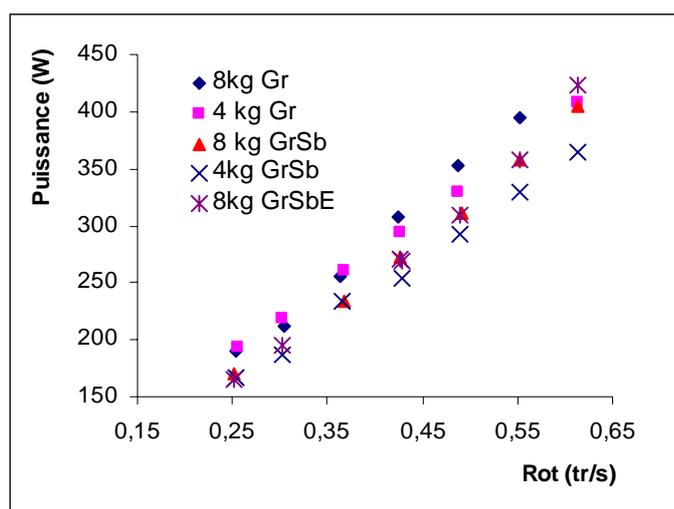


Figure II.68-Résultats des essais de frottement

### II.9.3.c Formulation des bétons

Le choix des formules de béton est une étape cruciale dans ce travail. Nous avons utilisé un gneiss concassé 6,3/10 mm de la carrière des Pontreaux et un sable silico-calcaire roulé 0/4 roulé du Pilier. Le liant était le ciment CEM I 52,5 de Saint Pierre La cour. Enfin le superplastifiant Chrysofluid GT a été systématiquement utilisé dans toutes les formules. Les fiches techniques des constituants sont présentées en Annexe II- 5.

Les bétons testés devaient couvrir la gamme des bétons utilisés dans la pratique. Les paramètres de contrôle de la formulation des différents bétons étaient leurs paramètres rhéologiques (et par conséquent leur affaissement). Ainsi, avec le jeu de constituants choisis, nous avons généré des bétons suivant la configuration exposée dans la Figure II.69. La formule centrale a été testée 5 fois pour évaluer la répétabilité de nos mesures.

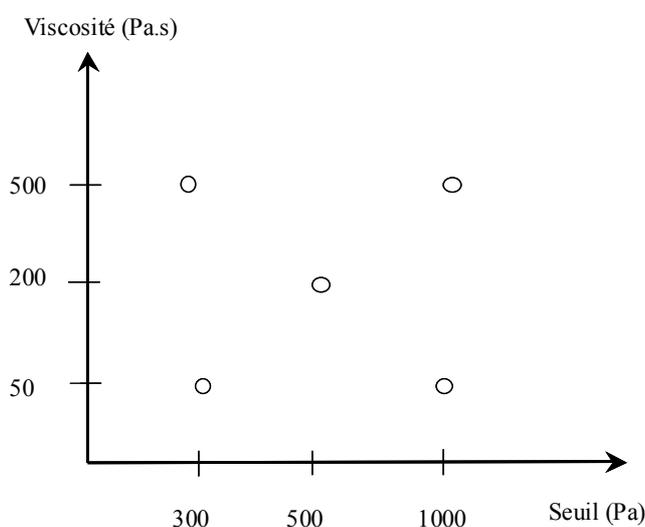


Figure II.69-Principe de choix des bétons testés.

Le squelette granulaire des bétons a été optimisé avec le logiciel BetonlabPro2 [86] en vue d'atteindre une compacité maximale et de minimiser les risques de ségrégation. Les formules ont été dégrossies à l'aide du logiciel, puis ajustées en laboratoire pour obtenir les plages de seuil et de viscosité visées.

Un total de 17 gâchées ont fait l'objet d'une caractérisation complète. Elles sont présentées dans le Tableau II.18 .

La première gâchée (référéncée DLG2) avait été formulée afin d'obtenir un affaissement compris entre 15 cm et 20 cm, un seuil entre 400 Pa et 600 Pa et une viscosité plastique entre 150 Pa.s et 200 Pa.s. Les mesures effectuées sur le béton frais ont donné les résultats suivants : affaissement = 22 cm ; seuil = 359 Pa et viscosité de 98 Pa.s. Une réduction de 10 litres d'eau sur cette formule a permis d'obtenir la formule centrale qui a été réalisée sur 5 gâchées (DLG3 ; DLG4 ; DLG5 ; DLG6 ; DLG8) en vue des essais de répétabilité.

Pour les bétons trop raides, (affaissement inférieur à 8 cm), l'essai au rhéomètre n'a pas été réalisé. En effet la mesure rhéologique n'a de sens que pour des bétons suffisamment fluides (en général avec un affaissement supérieur à 10 cm, Hu [6]). Le seuil de 3500 Pa (gâchée DLG 13b), trop important vis-à-vis d'un affaissement 8,5cm, semble résulter

d'une erreur de mesure et par conséquent sera éliminé de l'analyse (Figure II.70). Les résultats des essais de caractérisation sont donnés dans le Tableau II.19. On constate qu'on n'a pu obtenir toute la gamme de viscosités plastiques que l'on souhaitait.

Gâchée	Pontreaux 6,3/10	Pilier 0/4	Ciment 52,5	Chrysofluid GT	Eau
DLG2	924	842	410	8,2	184
DLG3	933	850	415	8,3	176
DLG4	933	850	415	8,3	176
DLG5	933	850	415	8,3	176
DLG6	933	850	415	8,3	176
DLG7	948	864	421	8,4	163
DLG8	933	850	415	8,3	176
DLG9	857	801	564	11,3	174
DLG10	836	781	550	11,0	195
DLG10b	847	791	557	11,1	184
DLG11	819	764	662	13,2	170
DLG12	787	734	636	12,7	202
DLG13	793	739	641	12,8	197
DLG13b	799	745	646	12,9	190
DLG13c	797	743	644	12,8	193
DLG13d	797	743	644	12,8	193
DLG14	895	844	416	2,7	197

Tableau II.18-Compositions des différentes formules en  $\text{kg/m}^3$

Essais	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa.s)	Slump (cm)
DLG2	359	98	22
DLG3	574	191	17
DLG4	356	187	19
DLG5	519	179	20
DLG6	452	188	20.5
DLG7	1740	222	9.5
DLG8	413	154	20.5
DLG9	--	--	4.5
DLG10	505	74	25
DLG10b	2017	133	12.5
DLG11	--	--	0
DLG13	971	87	21.5
DLG13b	3500	33	8.5
DLG13c	1973	69	14.5
DLG14	1288	136	13

Tableau II.19-Résultats des mesures rhéologiques et de l'affaissement

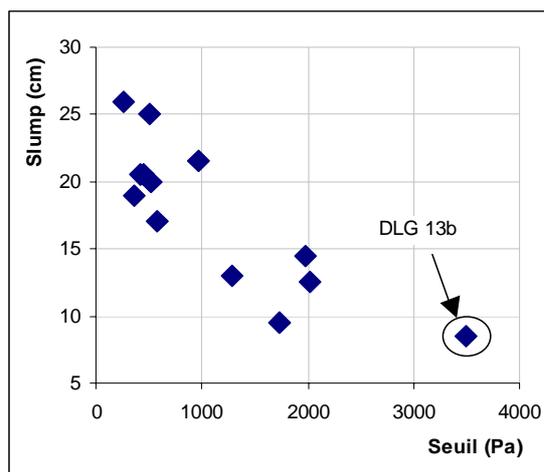


Figure II.70-Relation entre le seuil et l'affaissement

### II.9.4 Analyses des résultats

L'ensemble des résultats de mesures du wattmètre sont résumés dans le Tableau II.20.

Les essais de répétabilité menés sur les gâchées DLG3, DLG4, DLG5, DLG6 et DLG8 conduisent aux résultats suivants (moyenne  $\pm$  écart type) :

- pour le seuil,  $\tau_0 = 463 \pm 86$  Pa ;
- pour la viscosité,  $\mu = 180 \pm 15$  Pa.s ;
- pour le slump,  $SL = 19 \pm 1,5$  cm.
- pour le wattmètre (pour les 3 vitesses de rotation du racleur) :
  - +  $N = 0.48$  tr/s,  $P = 466 \pm 4$  W
  - +  $N = 0.37$  tr/s,  $P = 342 \pm 4$  W
  - +  $N = 0.26$  tr/s,  $P = 238 \pm 4$  W

Les écarts-types observés sur les mesures rhéologiques et d'affaissement sont cohérentes avec la littérature (Hu [6] et Sedran [8]). L'écart-type observé sur la mesure de la puissance est faible (inférieur à 2 % pour le pallier le plus bas). On en déduit donc que le protocole adopté est répétable.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, la puissance de frottement est proportionnelle à la vitesse de rotation (Figure II.68). Bien que le coefficient de proportionnalité semble dépendre de la composition du squelette granulaire, il semble difficile à ce stade et en l'absence de mesures directes du frottement pour chaque béton de prendre en compte ce paramètre. On écrira donc  $P_f(N) = f.N$ ,  $f$  étant une constante. On obtient alors:

$$P_{tt} = f.N + \alpha_m.V.\left(\mu + \frac{\tau_0}{k_s N}\right).N^2 \quad (\text{III- 16})$$

Les trois paramètres ont été calés à l'aide de la méthode des moindres carrés en minimisant l'erreur quadratique sur les 45 données expérimentales. On obtient:

- $f = 697$  (N.m/tr)
- $\alpha_m = 140$  (tr<sup>-2</sup>)
- $k_s = 36$  (tr<sup>-1</sup>)

Essai	Rotation du racleur (tr/s)	Puissance consommée (W)
DLG3	0,46	472
	0,35	343
	0,25	237
DLG4	0,48	486
	0,35	344
	0,25	241
DLG5	0,48	488
	0,35	342
	0,25	235
DLG6	0,48	484
	0,35	338
	0,25	231
DLG7	0,48	595
	0,35	401
	0,25	284
DLG8	0,48	497
	0,35	340
	0,25	247
DLG10	0,47	396
	0,35	281
	0,24	203
DLG10b	0,53	582
	0,47	498
	0,38	361
	0,29	293
	0,25	249
DLG12	0,47	415
	0,35	283
	0,24	200
DLG13	0,47	444
	0,35	304
	0,25	210
DLG13c	0,54	563
	0,47	479
	0,35	340
	0,28	272
DLG14	0,47	434
	0,40	373
	0,35	304
	0,28	260
	0,54	507

Tableau II.20-Résultat de mesures de la puissance consommée

L'erreur du modèle (au sens de l'écart type) est de l'ordre de 18 W et le coefficient de corrélation  $R^2 = 0,95$ . La confrontation des puissances calculées avec le modèle et les mesures est présentée dans la Figure II.71.

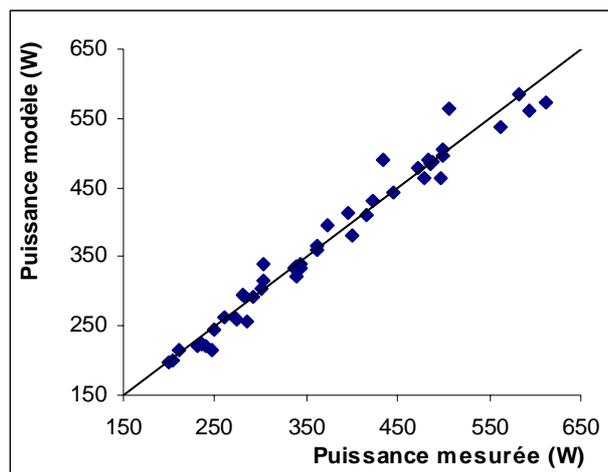


Figure II.71 - Corrélation entre les valeurs théoriques de puissance et les valeurs expérimentales

On déduit de la valeur de  $k_s$  que la plage du gradient de vitesse effectif dans le malaxeur est de l'ordre de 9 à 18  $s^{-1}$ . Il faut noter que dans le BTRHEOM, le gradient maximal est d'environ 7  $s^{-1}$ .

Pour vérifier le sens physique des paramètres obtenus par le lissage du modèle, on peut s'interroger sur le coefficient exprimant le volume relatif du béton cisailé dans le malaxeur selon les relations (III-14) et (III-15):

$$C_m = \frac{\alpha_m}{k_s^2} \quad (\text{III- 17})$$

L'application numérique donne une valeur de l'ordre de 11%, ce qui signifie qu'en moyenne seulement 11% du béton est cisailé.

Pour le malaxeur étudié, la vitesse de rotation du train valseur est d'environ 4,18 fois supérieure à celle du racleur. En plus, la conception du train permet de brasser un volume de matériau plus important que le racleur (Figure II.62). On suppose donc que le gradient de cisaillement et par conséquent le volume cisailé se concentrent principalement dans l'espace limité par le train valseur. On en déduit que le rapport entre le volume cisailé et le volume total du béton peut être approché par le rapport entre la surface des deux cercles dont les rayons sont donnés dans la Figure II.62.

Ce rapport est égal à  $\frac{r^2}{R^2}$  qui vaut 11,6 %, valeur comparable à celle de  $C_m$ .

L'hypothèse d'un écoulement laminaire est également vérifiée. En effet, dans ce cas, la relation  $N_p-N_{Re}$  est une droite dans un repère bi-logarithmique. On calcule :

$$N_p = \frac{P - P_f}{\rho N^3 d^5} \quad \text{et} \quad (\text{III- 18})$$

$$N_{Re} = \frac{Nd^2 \rho}{\mu_e} \quad \text{avec} \quad \mu_e = \frac{\tau_0 + k_s N \mu}{k_s N} \quad (\text{III- 19})$$

Le nombre de Reynolds effectif et le nombre de puissance sont déterminés en utilisant les deux paramètres  $f$  et  $k_s$  issus du modèle. Le résultat est présenté dans la Figure II.72. On constate que le nombre de Reynolds est faible (inférieur à 10) et que les données sont bien

dispersées autour d'une droite. Ceci confirme le régime laminaire de l'écoulement du béton frais dans le malaxeur.

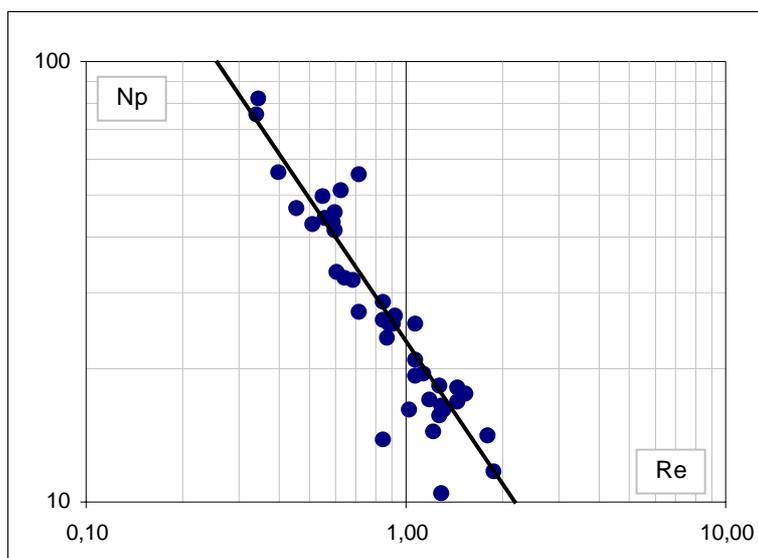


Figure II.72-Relation  $N_p - N_{Re}$

La bonne corrélation entre la puissance mesurée et celle issue du modèle montre qu'il est possible de prédire précisément la puissance consommée, à partir des mesures de la rhéologie, pour une vitesse quelconque du malaxeur. Toutefois, notre objectif est de déterminer la rhéologie à partir des mesures de la puissance. En définissant la puissance liée à la rhéologie comme la différence entre la puissance totale et la puissance de frottement, on obtient :

$$P_{\text{rhéo}} = P_{\text{tt}} - P_{\text{fr}}$$

La détermination des deux paramètres  $\tau_0$  et  $\mu$ , à partir du modèle (III-16), nécessite au moins deux valeurs de puissance mesurées à deux vitesses, permettant d'en déduire deux puissances de dissipation visqueuse dans le béton. Les deux paramètres de Bingham sont alors calculés aisément grâce aux équations suivantes:

$$\mu = \frac{1}{\alpha_m V} \times \frac{P_{\text{rhéo}2}/N_2 - P_{\text{rhéo}1}/N_1}{N_2 - N_1} \quad \text{(III- 20)}$$

$$\tau_0 = \frac{k_s}{\alpha_m V} \times \left( \frac{N_2 \times P_{\text{rhéo}2}/N_1 - N_1 \times P_{\text{rhéo}1}/N_2}{N_2 - N_1} \right)$$

Malheureusement, comme le montre la figure (Figure II.73), ce calcul ne permet pas de prédire de façon satisfaisante les paramètres rhéologiques des bétons. On obtient même des valeurs négatives pour le seuil de cisaillement.

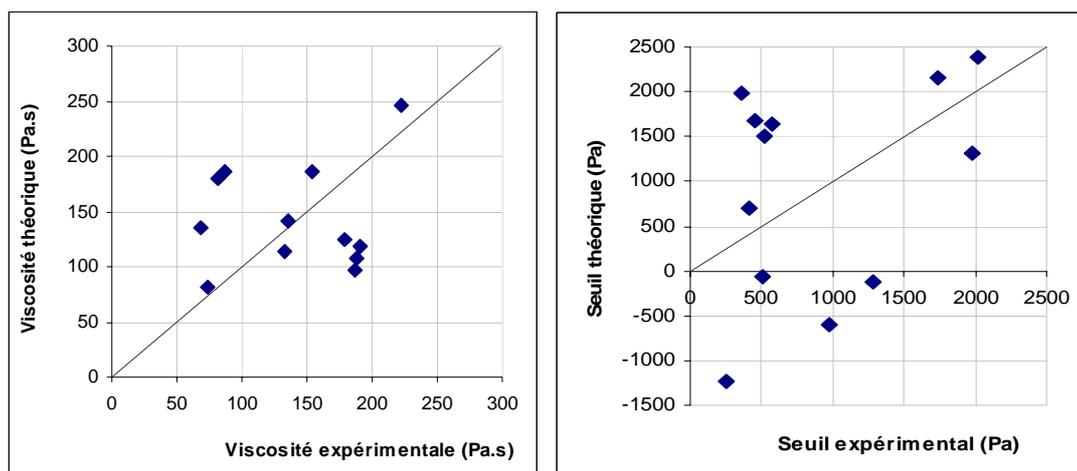


Figure II.73-Confrontation des paramètres rhéologiques expérimentaux (mesurés par le BTRHEOM) et théoriques (déduits de la courbe wattmétrique)

### II.9.5 Discussion

Bien qu'il soit possible de prédire la puissance de malaxage à partir des propriétés rhéologiques avec une erreur (au sens de l'écart type) limitée à 18 W, le calcul inverse conduit à des erreurs importantes, voire à des valeurs inexploitable dans le cas du seuil. On obtient des erreurs quadratiques des modèles par rapport aux mesures effectuées à l'aide du BTRHEOM de l'ordre de 67 Pa.s pour la viscosité et de 1132 Pa pour le seuil.

Premièrement, il est possible que les paramètres du modèle soient mal calés ou qu'ils ne respectent pas très bien la réalité physique. Si c'est le cas, c'est le paramètre « f » décrivant l'effet de frottement, qui doit être revu. En fait, on a supposé que le frottement est proportionnel à la vitesse et que le coefficient de proportionnalité est une constante f unique pour tous les mélanges. Nous avons vu que c'était une hypothèse forte puisque ce facteur dépend notamment de la composition du squelette granulaire et donc probablement du béton malaxé. Il doit donc exister une fluctuation de f lorsqu'on passe d'un mélange à l'autre.

En fait, le lissage des données expérimentales des essais pour estimer la loi d'évolution de la puissance de frottement vis-à-vis de la vitesse (cf. II.9.3.b) donne l'équation (Figure II.74-a):  $P_{fr} = 657N$ . C'est une valeur très proche de celle issue du modèle sur bétons ( $f = 697$ ). Curieusement, l'erreur quadratique due à cette simplification est égale à 19 W (Figure II.74-b) et est presque identique à l'erreur constatée pour le modèle sur bétons. Ce résultat permet alors de supposer que l'erreur liée à la puissance de frottement est le premier facteur qui affecte la précision du modèle de puissance totale, compte tenu que l'erreur de mesure sur la puissance totale est limitée à 4 W. Ceci s'explique probablement par le fait qu'en prenant une valeur de  $f = 697$ , la puissance de frottement représente 75% de la puissance totale de malaxage.

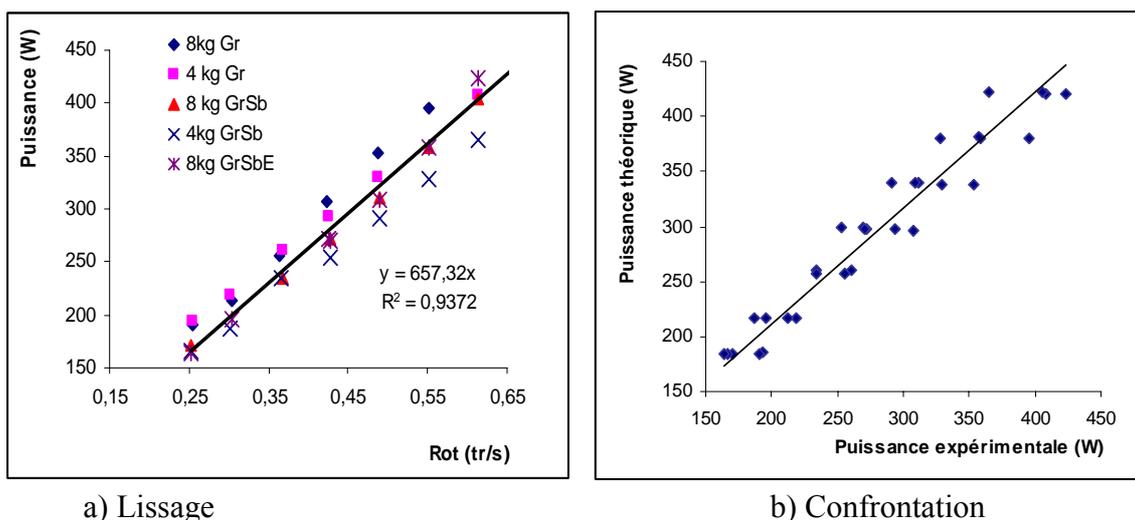


Figure II.74-Lissage et confrontation des puissances de frottement mesurées sur granulats

On cherche maintenant à évaluer les écarts types de  $\mu$  et de  $\tau_0$  lors de leur détermination selon (III-20). Pour faciliter le calcul, on suppose que le volume  $V$  du béton et la rotation  $N$  sont déterminés précisément. Calculons l'écart type de  $\mu$  et  $\tau_0$  dans ce cas :

$$\sigma[\mu] = \sigma[P_{rheo}] \times \frac{I}{\alpha_m V} \sqrt{\frac{I}{N_1^2} + \frac{I}{N_2^2}} \quad (III-21)$$

$$\sigma[\tau_0] = \sigma[P_{rheo}] \times \frac{k_s}{\alpha_m V} \sqrt{\frac{N_2^2}{N_1^2} + \frac{N_1^2}{N_2^2}}$$

Dans le malaxeur, la vitesse de rotation du racleur est de l'ordre de 0,55 tr/s à 50Hz (fréquence du courant d'alimentation du moteur). Cette fréquence peut être abaissée à 20 Hz (valeur minimum) à l'aide du variateur. A ce niveau, la vitesse est de l'ordre de 0,25 tr/s. Donc, la différence entre ces deux valeurs ne dépasse pas 0,30 tr/s. Dans notre campagne d'essai, le volume de matériau fabriqué est de l'ordre de 20 L (0,02 m<sup>3</sup>). A ce stade, l'écart type lié à l'estimation de la puissance de rhéologie peut être évalué en utilisant l'écart type de puissance de frottement et l'écart type de mesure de la puissance totale respectivement de 19 W et 4 W :

$$\sigma[P_{rheo}] = \sqrt{\sigma^2[P_{fr}] + \sigma^2[P_{tt \text{ mesuré}}]} \approx 19,5 \text{ W} \quad (III-22)$$

L'application numérique à l'équation (III-21) donnant l'ordre de grandeur des erreurs liées aux calculs de «  $\mu$  » et de «  $\tau_0$  » est présentée dans le Tableau II.21.

$\alpha_m = 140 \text{ tr}^{-2}$ ; $k_s = 36 \text{ tr}^{-1}$ $V = 0,02 \text{ m}^3$ ; $N_1 = 0,25 \text{ tr/s}$ ; $N_2 = 0,5 \text{ tr/s}$ $\sigma_p = 19,5 \text{ W}$	$\sigma[\mu] = 118 \text{ (Pa.s)}$
	$\sigma[\tau_0] = 1961 \text{ (Pa)}$

Tableau II.21-Ecarts- types des paramètres de Bingham calculés

Bien que ces écarts types soient supérieurs à ceux obtenus lors de la comparaison avec les mesures par BTRHEOM, ces valeurs importantes (Tableau II.21) peuvent expliquer pourquoi le calcul inverse dans cette campagne ne permet pas d'obtenir des bonnes prédictions du seuil et de la viscosité. En effet, l'expression (III-21) puis (III-22) permettent de constater que l'incertitude liée à l'estimation de la puissance de frottement est la cause principale qui conditionne l'imprécision du modèle. Le volume de matériau très faible conduit également à augmenter les erreurs sur les modèles rhéologiques.

## **II.10. Etude complémentaire sur le malaxeur de laboratoire modifié**

La première campagne a permis de valider le modèle de la puissance consommée dans le malaxeur à partir des paramètres rhéologiques ainsi que l'hypothèse d'écoulement laminaire dans le malaxeur. Toutefois, à partir de la puissance mesurée, il est difficile de remonter aux paramètres rhéologiques, alors que c'est ce qui présente un intérêt industriel. Ceci semble lié aux incertitudes de mesure de la puissance consommée par les frottements. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude complémentaire sur le même malaxeur de laboratoire, pour évaluer plus précisément les parts respectives des différentes composantes de la puissance consommée lors du malaxage.

### **II.10.1 Objectifs**

Dans cette campagne, on cherche à décomposer expérimentalement, pour chaque fabrication, les différentes composantes de puissance : puissance à vide, puissance liée au frottement du train valseur et du racleur de bord, et enfin puissance liée à la rhéologie du béton. L'objectif final de cette étude est de vérifier si l'ouvrabilité du béton frais peut être déterminée à partir de la composante de puissance liée à la rhéologie.

### **II.10.2 Matériels et protocoles**

Tous les matériels présentés lors de la première campagne expérimentale sont réutilisés dans cette deuxième campagne.

Quelques ajustements sont toutefois réalisés. Le malaxeur est équipé d'une dynamo permettant de mesurer précisément la vitesse de rotation de l'arbre du moteur, et d'en déduire celle des pales (Figure II.76). En effet, lors de la première campagne, la vitesse de rotation du moteur était déterminée grâce à un signal « conventionnel » issu du variateur (calculé grâce à la fréquence du courant d'alimentation du malaxeur). Ce mode de mesure peut être affecté par le glissement de l'arbre du moteur qui est variable en fonction de la charge du malaxeur. L'utilisation de la dynamo permet d'éviter ce problème. Cette dernière est installée sur le moteur du malaxeur de façon à faire coïncider l'axe de rotation de l'arbre du moteur et celui de la dynamo. Le courant continu fourni par cette dynamo est proportionnel à sa vitesse de rotation et donc à celle du moteur du malaxeur.

La Figure II.75 représente la droite d'étalonnage de la dynamo. Cette droite a été construite en comparant le signal de sortie de la dynamo, à la mesure de la vitesse de rotation de l'axe du moteur mesurée à l'aide d'un tachymètre étalonné (précision 2 tr/mn). Après cet étalonnage, le signal fourni par la dynamo est acquis en continu lors des expérimentations, permettant d'avoir en temps réel la vitesse de rotation du moteur.



Figure II.75-Installation de la dynamo à vitesse

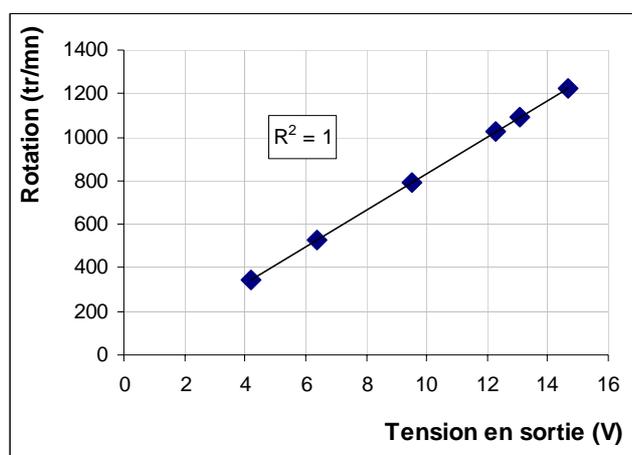


Figure II.76 - Calibrage de la dynamo servant à mesurer la vitesse de rotation de l'arbre du moteur du malaxeur.

### II.10.2.a Mise au point des différentes configurations expérimentales

En configuration normale, les pales du malaxeur (racleur et pale du train valseur) sont fixées au plateau tournant. Lors du malaxage, le frottement est en partie généré par les pièces mécaniques du moteur (puissance à vide) mais également par le coincement des granulats dans l'entrefer. Pour déterminer la puissance de frottement, l'idée générale est d'installer des pales de longueurs différentes et de mesurer la puissance de malaxage en utilisant ces pales. Un train valseur de configuration géométrique identique à celui initialement installé dans le malaxeur a été reproduit. Une autre pale plus courte ainsi qu'une pale avec la tige seule, ont également été fabriquées pour le train valseur (Figure II.77). Pour que les pales puissent être interchangeables rapidement durant l'essai, un porte outil a été fabriqué. Des bavettes de caoutchouc ont été mises en place devant les pales et le racleur, dans la partie basse, pour les protéger contre les chocs « durs » des granulats dus au coincement et minimiser ainsi le frottement. Le système de fixation des bavettes est réalisé au moyen de boulons pour permettre un éventuel ajustement au fur et à mesure de leur usure.

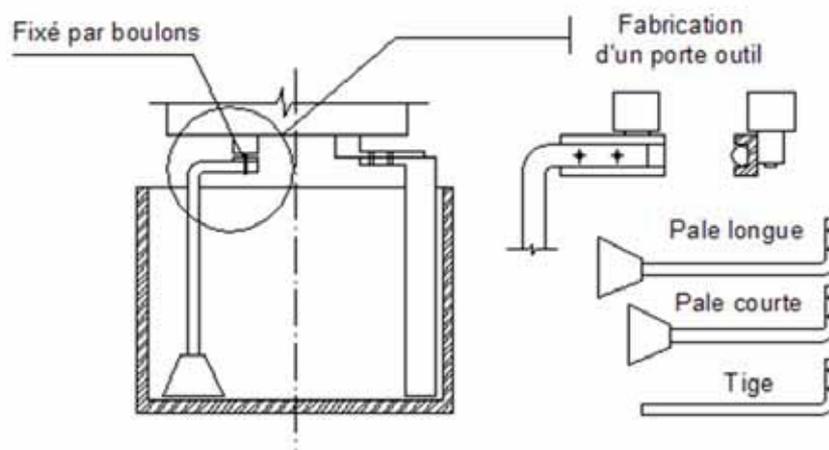


Figure II.77-Fabrication des pales et porte-outil

L'ensemble des modifications susmentionnées permet de définir six configurations d'essais (Figure II.78) en vue de décomposer la puissance totale. La configuration Cfg0, réalisée une seule fois, permet d'évaluer la puissance à vide (dans cette configuration, on s'est assuré que le racleur ne touchait aucune paroi). Les autres (Cfg1 à Cfg6) sont répétées pour chaque fabrication.

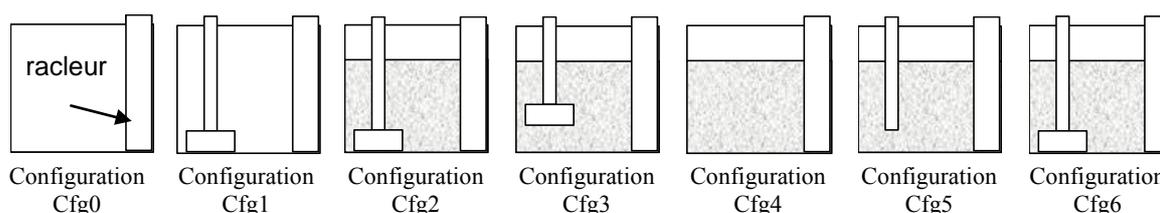


Figure II.78 - Configurations expérimentales pour chaque fabrication.

La réalisation des essais avec les différentes configurations a pour but de déterminer les différents termes de puissance lors du malaxage :

- la configuration Cfg1 (avec les deux pales normales, sans matériau) permet de mesurer la puissance à vide et celle due au frottement des pales sans présence de matériau ;
- la configuration Cfg2 (avec les deux pales normales) permet de fabriquer la gâchée et de mesurer la puissance totale ;
- la configuration Cfg3 (avec le train valseur à pale courte et le racleur) permet d'évaluer la puissance de malaxage sans frottement du train valseur ;
- la configuration Cfg4 (avec le racleur seul) permet d'évaluer la puissance de malaxage avec la présence du racleur seul ;
- la configuration Cfg5 (avec la tige et le racleur seul) permet d'évaluer l'influence de la tige (du train valseur) sur la puissance de malaxage ;
- la configuration Cfg6 (avec les deux pales normales) permet de vérifier que le matériau dans le malaxeur n'a pas évolué de manière significative pendant la durée des mesures effectuées dans les configurations intermédiaires.

La décomposition en différents termes de puissance est effectuée par superposition, en supposant que le matériau, lors du passage d'une configuration d'essai à l'autre (dans une même gâchée), reste toujours le même, et que le champ de vitesse dans le béton est également semblable à proximité des pales et du racleur. La première hypothèse peut

s'avérer fausse lorsque le béton ségrège suite à un long malaxage, qu'il subit un entrainement d'air ou un raidissement d'origine chimique. Pour éviter ce dernier point, nous avons utilisé du retardateur de façon systématique dans les formules de bétons. Cette hypothèse de stabilité des bétons doit donc être vérifiée expérimentalement pour chaque gâchée (ce point sera discuté plus loin lors de l'analyse des résultats – cf.II.11.4). La superposition permet de déterminer les composantes suivantes (voir équations III-22 – III-23 – III-24).

Puissance de frottement du train valseur :

$$P_{f1} = (Cf g 2 - Cf g 3) - (Cf g 5 - Cf g 4) \frac{\Delta}{l} \quad (\text{III- 23})$$

Où (Figure II.79):

$\Delta$  est la différence entre la tige du train valseur (Cf g 2) et celle dans la configuration 5 (Cf g 3)

$l$  est l'intervalle de la tige plongée dans le béton (Cf g 5)

Puissance de frottement du racleur :

$$P_{f2} = Cf g 4 - Cf g 0 \quad (\text{III- 24})$$

Puissance de malaxage (lié à la rhéologie) :

$$P_{rheo} = Cf g 2 - \left( (Cf g 2 - Cf g 3) - (Cf g 5 - Cf g 4) \frac{\Delta}{l} \right) - Cf g 4 \quad (\text{III- 25})$$

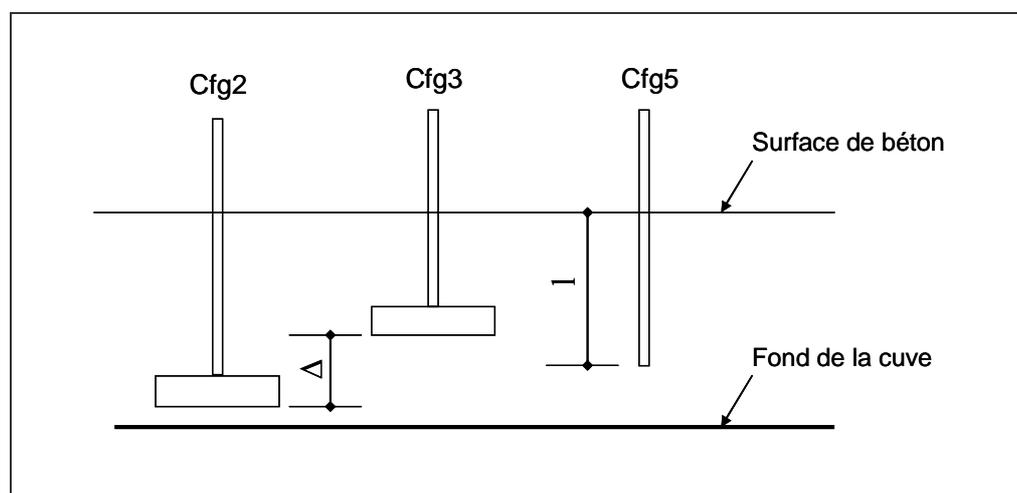


Figure II.79-Interprétation géométrique de  $\Delta$  et  $l$

### II.10.2.b Protocole expérimental

Pour cette campagne, on augmente le nombre de paliers de vitesse par rapport à la première campagne pour améliorer la précision des calculs lors de l'analyse des résultats. Le protocole de fabrication et de malaxage, pour les différentes configurations (Cf g 1- Cf g 6), est illustré sur la Figure II.80. L'acquisition des données (puissance, vitesse) est réalisée séparément pour chaque configuration.

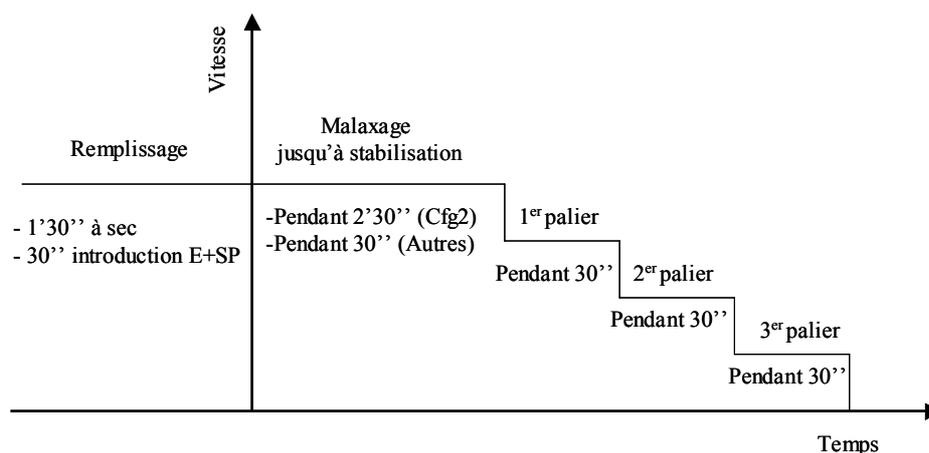


Figure II.80-Protocole de malaxage

Pour chaque gâchée, la configuration Cfg1 est tout d'abord réalisée en quatre paliers de vitesse de 30 secondes. La configuration Cfg2 débute par l'introduction des matériaux dans le malaxeur. La vitesse est réglée à 80 % de la vitesse nominale. Le temps de malaxage est de 2 minutes 30 secondes après l'introduction de l'eau et des adjuvants.. A la fin de cette étape, le béton est prélevé pour effectuer les mesures au rhéomètre BTRHEOM (selon le protocole utilisé lors de la première campagne – cf.II.9.2.c). A la fin de la mesure, le matériau est mis en attente dans le BTRHEOM, sans rotation. Après le prélèvement, on relance le malaxage pour mesurer la puissance aux quatre paliers de vitesse (80 % - 60 % - 40 % - 30 %) durant 30 secondes chacun. Dès que le malaxage de Cfg2 est terminé, le malaxeur et l'acquisition sont arrêtés momentanément pour passer en configuration Cfg3 en effectuant le remplacement de la pale longue (train valseur) par la courte. Après ce changement, les données sont acquises pour chacun des quatre paliers de vitesse. La procédure est ensuite répétée pour les autres configurations (Cfg4 – Cfg6) en remplaçant les outils (comme indiqué sur la Figure II.80). A la fin du malaxage de la configuration Cfg6, la mesure au BTRHEOM est redémarrée pour vérifier l'évolution de la rhéologie. Tous les essais sont réalisés dans une salle à température constante à 20°C.

### II.10.3 Formules de bétons

La plupart des formules de bétons utilisées lors de la première campagne ont été réutilisées pour cette deuxième campagne. En raison d'un long malaxage, le retardateur est utilisé systématiquement pour chaque mélange. Le Tableau II.22 présente les formules testées.

Nous avons utilisé des mélanges riches en ciment (supérieur à 400 kg/m<sup>3</sup>), des dosages en superplastifiant variables (0,17 %, ou 0,50 % de la masse du ciment) et des rapports E/C variables (0,30 à 0,49) pour générer des matériaux de rhéologies différentes. Les paramètres rhéologiques mesurés au BTRHEOM à la fin de la configuration Cfg2 et à la fin de la configuration Cfg6 ainsi que l'affaissement mesuré à la fin Cfg6 sont présentés dans le Tableau II.22.

Cette deuxième campagne ne jouant qu'un rôle complémentaire pour l'étude préliminaire et le nombre d'opérations pour chaque fabrication étant important, nous avons initialement décidé de n'exécuter que huit mélanges (B2-1 à B2-8). Ces bétons présentent des caractéristiques rhéologiques relativement variables : le seuil varie de 174 Pa (domaine d'un BAP) à 1080 Pa (béton de structure) et la viscosité varie de 35 Pa.s à 235 Pa.s. Néanmoins, l'affaissement de la plupart des bétons est important (supérieur à 17 cm). Nous

avons décidé alors de réaliser les trois autres gâchées (B2-9, B2-10 et B2-11) pour obtenir des affaissements courants (10 cm – 15 cm). L'affaissement de la gâchée B2-9 n'a pas été mesuré pour cause d'oubli lors de l'expérimentation. Ces trois gâchées supplémentaires ne sont effectuées que pour trois configurations Cfg1, Cfg2 et Cfg3. Ainsi, le temps de malaxage des bétons est plus court, comparé aux huit autres gâchées. De plus, le retardateur est supprimé et la mesure au BTRHEOM n'est réalisée qu'une seule fois à la fin de la configuration Cfg2.

	Eau	Gravier 6/10	Sable 0/4	Ciment	Super- plastifiant	Retardateur	Densité
B2-1	174	922	840	410	8,2	3,1	2,36
B2-2	202	864	848	414	8,3	3,1	2,34
B2-3	200	802	778	549	11,0	4,1	2,34
B2-4	206	790	737	638	12,8	4,8	2,39
B2-5	190	837	730	632	12,6	4,7	2,41
B2-6	188	862	838	413	2,7	3,1	2,31
B2-7	192	869	788	556	11,1	4,0	2,42
B2-8	181	934	842	415	2,8	3,1	2,38
B2-9	176	930	847	413	8,3	0,0	2,37
B2-10	197	892	851	415	8,3	0,0	2,36
B2-11	198	895	844	416	2,8	0,0	2,38

Tableau II.22-Dosage des constituants en kg/ m<sup>3</sup> de béton

Nom de gâchée	Fin de Cfg2		Fin de Cfg6		Affaissement (cm)
	Seuil	Viscosité	Seuil	Viscosité	
	(Pa)	(Pa.s)	(Pa)	(Pa.s)	
B2-1	219	27	566	81	24,0
B2-2	900	184	blocage	blocage	17,5
B2-3	1080	116	1269	141	14,5
B2-4	423	82	143	93	18,0
B2-5	174	85	130	93	26,0
B2-6	494	35	564	89	20,0
B2-7	776	235	581	152	2,0
B2-8	550	74	640	82	18,0
B2-9	1135	95	-	-	-
B2-10	1915	178	-	-	14,5
B2-11	1321	163	-	-	15,0

Tableau II.23-Paramètres mesurés sur les bétons frais

#### II.10.4 Dépouillement à l'aide du couple de malaxage

Le modèle de puissance de malaxage présenté dans l'équation (III-13) a été validé à l'issue de la première campagne. Ce modèle est écrit sous la forme d'une parabole en fonction de la vitesse de rotation. L'ajustement des paramètres peut être difficile, compte tenu du nombre limité de points expérimentaux disponibles dans la pratique. Il est souhaitable de mettre ce modèle sous une forme plus facile à analyser. Ceci est réalisable en décrivant la relation physique en terme de couple. En effet, en supposant que la puissance de frottement a été mesurée au préalable, on obtient :

$$P_{rhéo} = P_u - P_f(N) = \alpha_m \cdot V \cdot \left( \mu + \frac{\tau_0}{k_s N} \right) \cdot N^2 \quad (\text{III- 26})$$

En divisant (III-26) par  $2\pi N$ , cette équation revient à exprimer le couple de malaxage en fonction de la rhéologie et de la vitesse de rotation:

$$C_{rhéo} = \frac{P_{rhéo}}{2\pi N} = \frac{\alpha_m V}{2\pi k_s} \tau_0 + \frac{\alpha_m V \mu}{2\pi} N = C_0 + \eta N \quad (\text{III- 27})$$

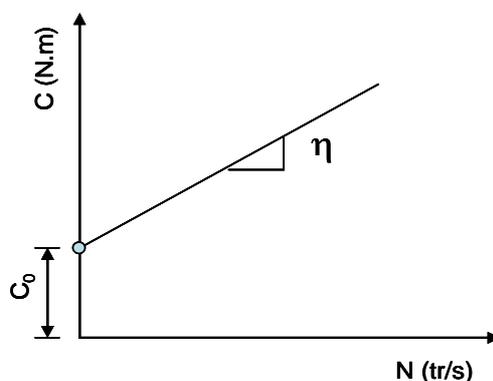


Figure II.81-Couple de malaxage en fonction de la vitesse du racleur

Pour un matériau donné, cette équation est une relation affine (Figure II.81) en fonction de la vitesse de rotation. La pente et l'ordonnée à l'origine dépendent des paramètres rhéologiques et de constantes du malaxeur. On retrouve ici l'approche adoptée dans l'analyse du béton frais avec des appareils de type « two-point test ». La relation entre les deux paramètres définissant la courbe de couple et la rhéologie des matériaux est donnée par :

$$C_0 = \frac{\alpha_m V}{2\pi k_s} \tau_0 \quad (\text{III- 28})$$

$$\eta = \frac{\alpha_m V}{2\pi} \mu$$

Cette transformation facilite le dépouillement des résultats obtenus avec un nombre restreint de données expérimentales. En effet, une fois que la linéarité est vérifiée, les deux paramètres  $C_0$  et  $\eta$  sont déterminés aisément pour chaque essai. En comparant ces valeurs aux paramètres rhéologiques mesurés par le BTRHEOM, il est alors possible de déduire les termes  $\alpha_m$  et  $k_s$  dans (éq.III-27).

### II.10.5 Analyse des résultats

Les résultats de cette campagne (puissance et vitesse de rotation) dans chaque configuration d'essai sont représentés dans l'Annexe II- 2. Ces derniers sont utilisés pour déterminer les couples de malaxage. Dans un premier temps, on cherchera à vérifier que le matériau, durant le changement des configurations d'essai, n'a pas évolué de manière significative. Dans un deuxième temps, on effectuera la superposition pour déterminer les composantes de couple et permettre l'analyse des résultats obtenus selon la procédure décrite dans le paragraphe précédent.

### II.10.5.a Validation des formules

Pour vérifier que les matériaux ne voient pas leurs caractéristiques rhéologiques trop varier pendant les mesures, les deux configurations Cfg2 et Cfg6 sont confrontées. La courbe du couple de malaxage à vitesses variables sert de critère de jugement. Pour la comparaison, on détermine l'écart relatif pour chaque vitesse de rotation (Figure II.82).

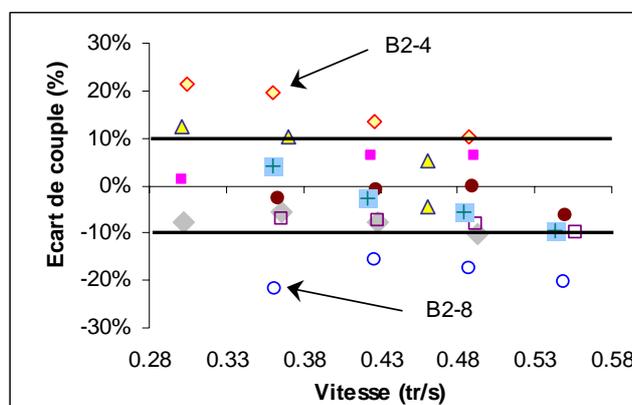


Figure II.82-Ecart de couple de malaxage entre Cfg2 et Cfg6

En considérant qu'un écart de  $\pm 10\%$  reste acceptable, on identifie deux gâchées problématiques (B2-4 et B2-8) pour lesquelles les écarts sont plus importants.

L'évolution du couple de malaxage peut également être affectée par l'évolution des frottements. Ceci est particulièrement vrai pour la gâchée B2-8. En effet, en raison d'un mauvais calage, la bavette de caoutchouc serrait trop le fond du malaxeur en début d'essai (donc le couple de frottement était important), et s'est retrouvée complètement écrasée à la fin de l'essai (donc le frottement était moins élevé). Ce constat peut expliquer les écarts calculés pour cette gâchée et présentés dans la Figure II.82.

Concernant la gâchée B2-4, en configuration Cfg6, on observe un comportement inexplicable du couple qui diminue lorsque la vitesse augmente (Figure II.83). Ce comportement est probablement lié à une mauvaise position de la bavette et à l'évolution du frottement, plus qu'à l'évolution du béton comme on peut le voir ci-dessous

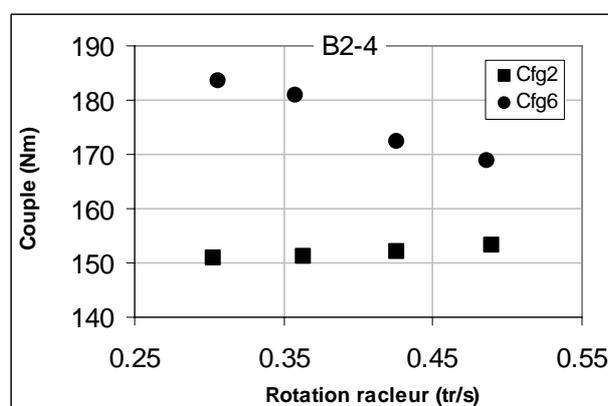


Figure II.83-Evolution du couple de malaxage (gâchée B2-4)

Pour obtenir une confirmation plus pertinente, l'évolution du matériau est jugée en utilisant les paramètres rhéologiques mesurés, même si, entre deux configurations, le béton est mis

au repos dans le rhéomètre, sans subir de malaxage. La Figure II.84 représente les mesures de seuil et de viscosité de sept bétons (à l'exclusion du béton B2-2, faute de mesure à cause d'un blocage du BTRhéom) à la fin de Cfg2 et de Cfg6. On remarque que le béton B2-1 présente une évolution observable à la fois au niveau du seuil et de la viscosité. Le béton B2-7 montre une variation importante sur la viscosité. Toutefois, la tendance de variation des paramètres rhéologiques entre la première mesure et la deuxième, reste comparable. Cette observation conduit à constater que la rhéologie des bétons, entre deux configurations, n'évolue pas de manière significative.

On conclut que l'évolution du matériau dans le malaxeur, lors du passage entre les différentes configurations d'essai, restent acceptable. Ce qui permet d'effectuer une superposition des configurations en vue de décomposer la puissance totale ou le couple total.

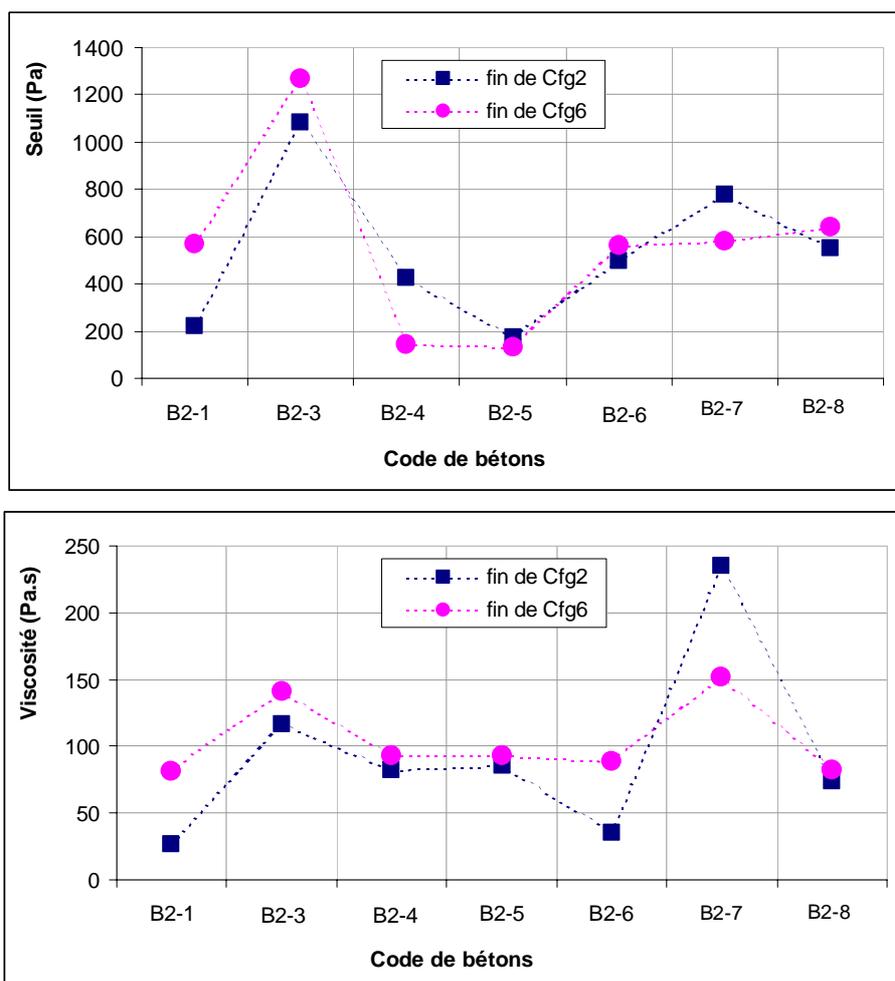


Figure II.84-Evolution de la rhéologie entre les deux configurations Cfg2 et Cfg6 (selon les mesures effectuées au BTRhéom)

### II.10.5.b Analyse

Les expressions de superposition proposées dans le paragraphe II.10.2.a pour la puissance restent valables pour le couple. L'ensemble des courbes de couples superposées est présenté dans l'Annexe II- 3.

A titre d'exemple, on présente sur la Figure II.85 la variation de couple (calculé à partir de la puissance mesurée) selon la vitesse de rotation, pour les six configurations d'essais de la gâchée B2-2. En lissant les données de chacune des configurations par une droite, on obtient deux paramètres  $C_0$  et  $\eta$  pour chaque configuration. La superposition des configurations, permettant de déterminer les différents termes de couple (couple de frottement du racleur, couple de frottement de la pale du train valseur, couple de malaxage lié à la rhéologie du béton), consiste donc à définir les nouvelles droites dont les deux paramètres  $C_0$  et  $\eta$  sont superposés. La Figure II.85 présente les résultats de calculs obtenus dans le cas du béton B2-2. Les courbes de couple à vide et de couple total sont également représentées à titre comparatif.

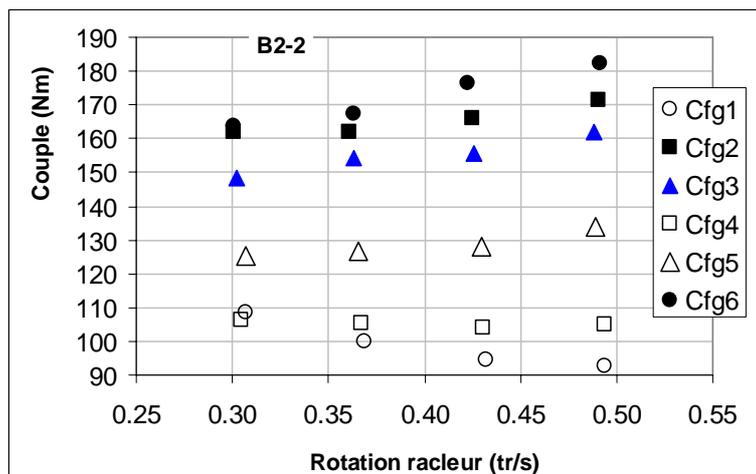


Figure II.85-Couples en fonction de la vitesse de rotation du racleur (pour six configurations d'essai)

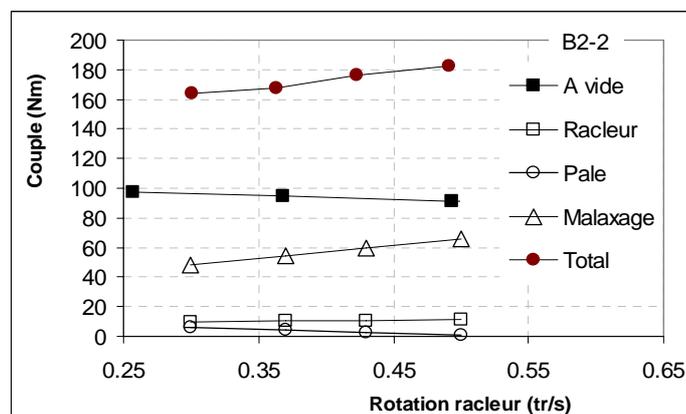


Figure II.86-Différents termes de couples (B2-2)

On constate que le couple à vide occupe une proportion importante dans le couple total. Curieusement, le couple de frottement de la pale et celui du racleur restent proches entre eux mais faibles vis à vis du couple à vide. Une tendance similaire est observée pour les autres bétons, sauf dans le cas du béton B2-8 (Figure II.87) pour lequel le couple de frottement de la pale est nettement supérieur à celui du racleur. Ce résultat permet de confirmer le constat précédent (cf.II.10.5.a) sur le fait que la bavette de caoutchouc frottait de façon excessive sur le fond de la cuve, à cause d'un mauvais calage.

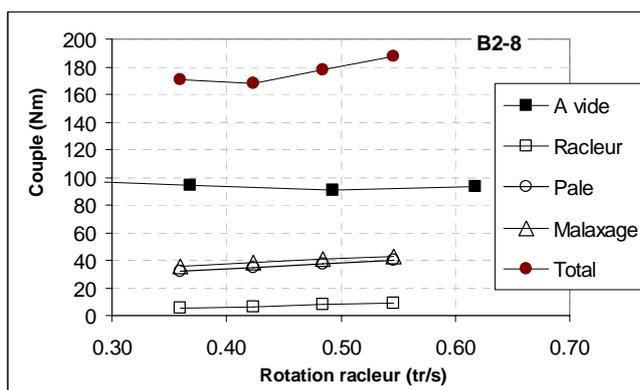


Figure II.87-Différents termes de couples (B2-8)

On s'intéresse à la répartition moyenne des différents termes de couple, permettant d'estimer l'ordre de grandeur d'intervention de chacun des phénomènes. Leurs parts respectives sont représentées sur la Figure II.88. Le Tableau II.24 représente, en moyenne, la répartition relative des différentes composantes dans le couple total. Ce résultat confirme la contribution majeure du couple à vide pour l'opération de malaxage utilisant le malaxeur de laboratoire. La contribution mineure du couple de frottement des pales peut s'expliquer par la protection des pales avec des bavettes de caoutchouc.

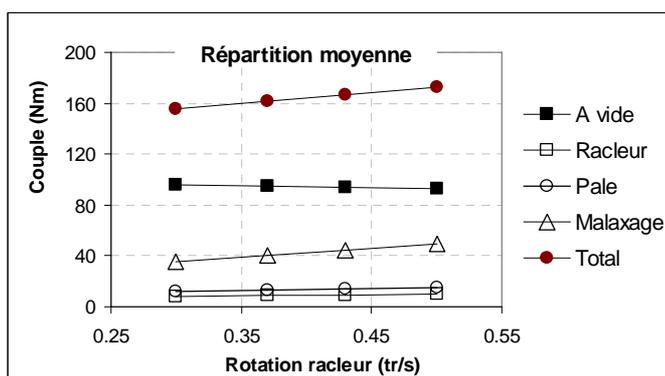


Figure II.88-Différentes composantes du couple (moyennes sur l'ensemble des bétons)

Couple à vide	Couple de frottement de la pale	Couple de frottement du racleur	Couple lié à la rhéologie
60%	8%	5%	27%

Tableau II.24-Répartition des composantes du couple total (en %)

Lors de la première campagne, on a constaté que la puissance de frottement (somme de la puissance à vide et de frottement de la pale et du racleur) dépend du matériau. La Figure II.89. confirme qu'il peut exister des écarts de puissance de frottement importants entre les différents mélanges, justifiant ainsi la nécessité de leur détermination.

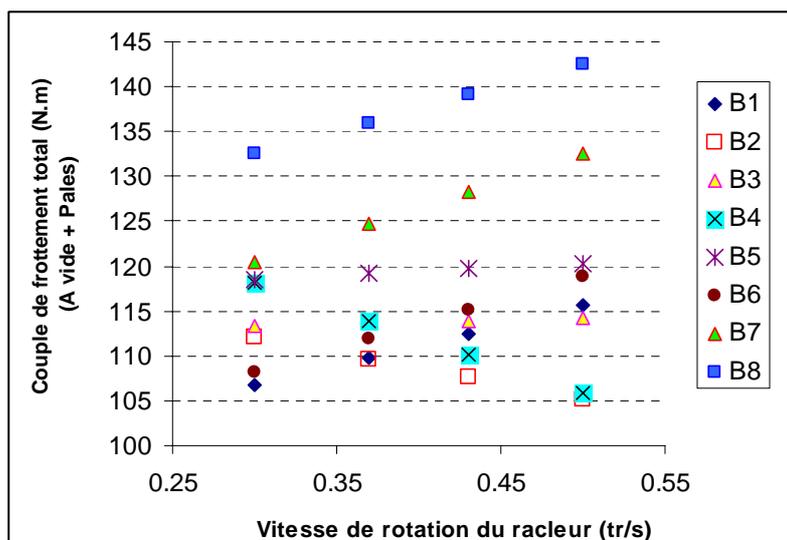


Figure II.89-Courbe de couple de frottement total (A vide + pales)

Après la décomposition du couple total, gâchée par gâchée, c'est le couple lié à la rhéologie du béton qui doit être confronté aux modèles théoriques, détaillés dans le paragraphe II.10.4. Dans un premier temps, les deux paramètres  $C_0$  et  $\eta$  définissant la courbe de couple de malaxage  $C_{\text{rhéo}}$  de chaque béton sont présentés (Tableau II.25).

	B2-1	B2-2	B2-3	B2-4	B2-5	B2-6	B2-7	B2-8	B2-9	B2-10	B2-11
$C_0$	32,2	22,2	9,9	10,6	-10,4	2,6	21,1	20,6	19,4	38,2	31,1
$\eta$	37,5	86,9	66,4	73,2	99,9	60,6	109,9	41,1	77,6	86,7	80,3

Tableau II.25-Paramètres  $C_0$  et  $\eta$  des courbes de couple lié à la rhéologie

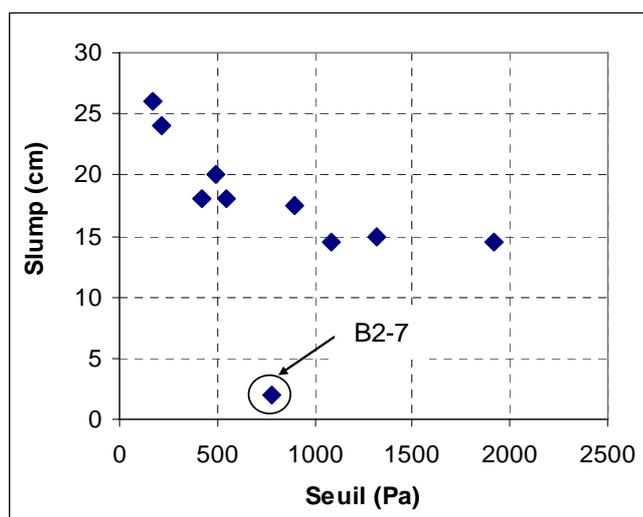


Figure II.90-Relation entre le seuil – l'affaissement

Dans un deuxième temps, les relations entre  $\tau_0$  et  $C_0$  ainsi qu'entre  $\mu$  et  $\eta$  sont établies. Selon l'expression (III-27), si les constantes du malaxeur  $\alpha_m$  et  $k_s$  sont indépendantes des matériaux, ces relations sont linéaires. Du fait que l'affaissement, SL, est contrôlé par le

seuil de cisaillement, la relation SL en fonction de  $C_0$  est également établie en excluant un béton d'affaissement 2 cm (cette valeur semble anormalement basse au regard de la valeur de seuil correspondant, comme indiqué sur la Figure II.90).

Les figures suivantes représentent ces relations. On constate que les deux bétons de seuils faibles (B2-1, B2-5) se comportent d'une façon particulière. Ces deux bétons ne sont pas corrélés au niveau de seuil (Figure II.91). B2-1 sort également de la tendance pour l'affaissement (Figure II.92) mais se regroupe bien dans le cas de la viscosité (Figure II.91)). Cependant, le béton B2-5 se comporte de manière inverse.

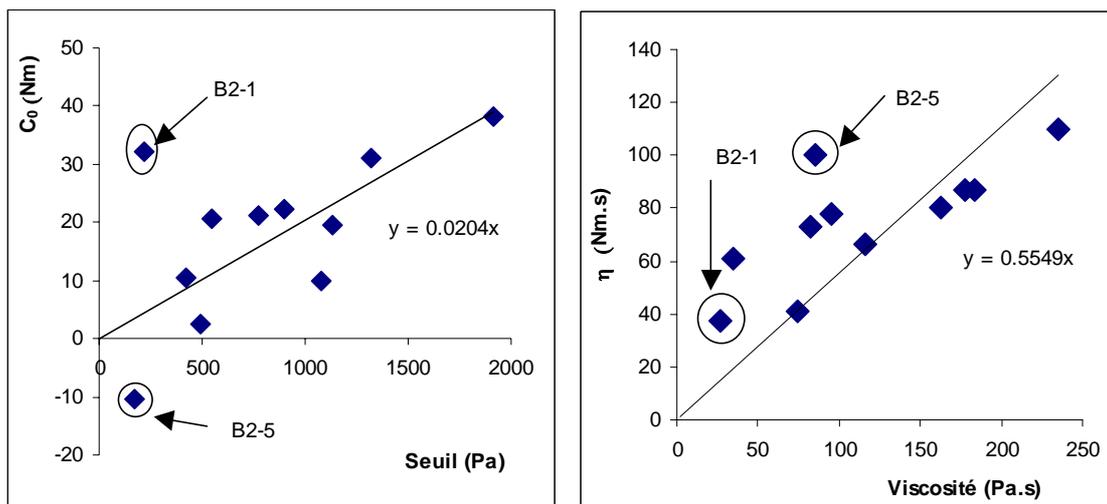


Figure II.91-Relations entre seuil -  $C_0$  et entre viscosité -  $\eta$

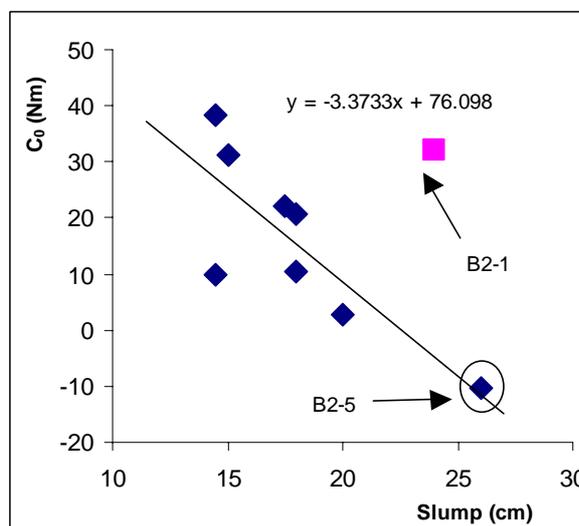


Figure II.92-Relation entre affaissement et  $C_0$

En considérant que ce sont des écarts résultant d'erreurs de mesures et des évolutions possibles des matériaux, le lissage des données ci-dessus est effectué (sans exclure les points anormaux), permettant de déterminer les seuils, les viscosités et les affaissements théoriques. La confrontation avec les mesures expérimentales est présentée sur la Figure II.93. Deux constantes du malaxeur sont également calculées (le volume de remplissage  $0,03 \text{ m}^3$ ):

$\alpha_m = 116$  et  $k_s = 27$ .

Ceci conduit à un volume de cisaillement relatif,  $C_m = \frac{\alpha_m}{k_s^2}$ , soit 15,7 %.

Ces trois valeurs sont comparables avec celles obtenues lors de la première campagne.

L'erreur de lissage (au sens de l'écart type) pour l'affaissement, le seuil de cisaillement et la viscosité sont respectivement de l'ordre de 2 cm, 255 Pa et 78 Pa.s.

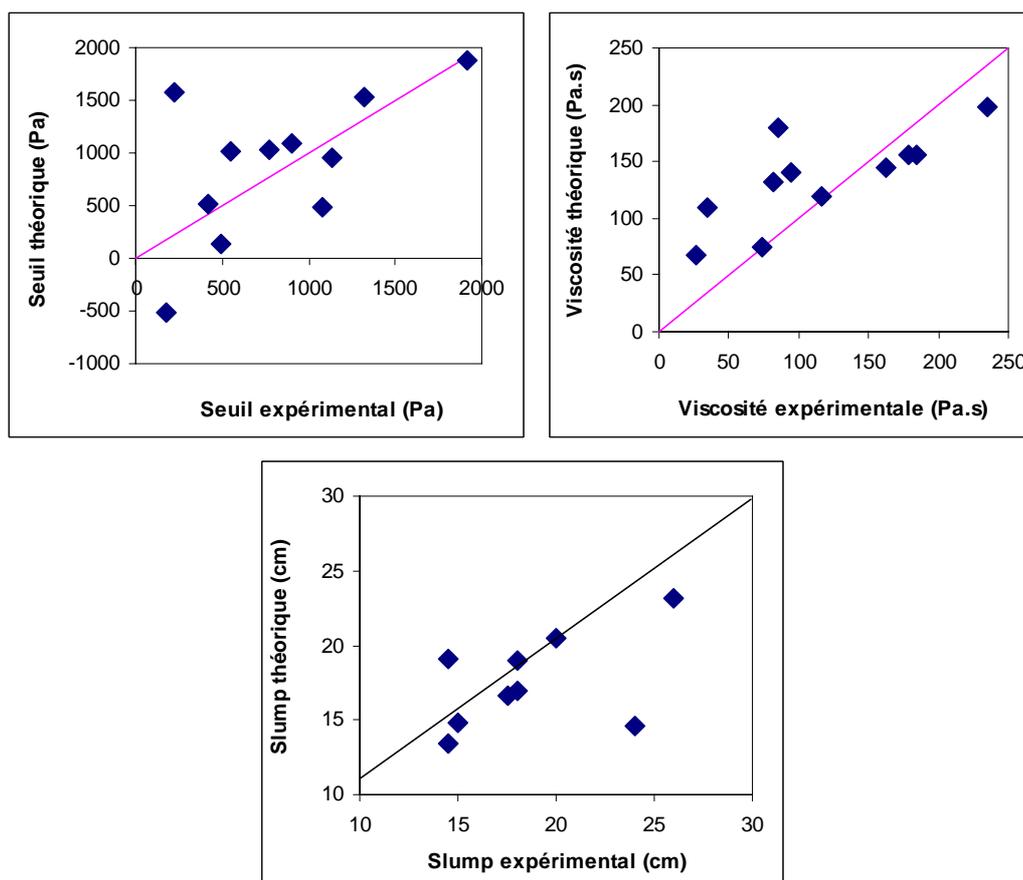


Figure II.93-Confrontation entre les mesures et les calculs

### II.10.6 Discussion

A la fin de la première campagne expérimentale, la question de l'influence du frottement sur la détermination des paramètres rhéologiques s'est posée. Dans cette campagne complémentaire, un protocole original, permettant de décomposer le couple total mesuré, a été mis en place. Bien qu'une telle procédure soit impossible à utiliser, du point de vue pratique, et que sa pertinence puisse être discutée (problèmes de constance du matériau, de l'usure des pales, de différences dans les champs de vitesse à l'intérieur du matériau), la décomposition a permis de mieux dépouiller les données expérimentales, vis à vis de la première campagne. Ce résultat permet de confirmer de manière définitive que le frottement est un des facteurs affectant la précision des calculs inverses.

Dans le malaxeur de laboratoire la puissance à vide occupe, en moyenne, 60 % de la puissance totale de malaxage. La part de la puissance de frottement des pales est beaucoup plus faible, représentant environ 13 % (grâce notamment à la mise en place de raclettes en caoutchouc évitant les coincements de granulats). La puissance liée à la rhéologie du béton contribue pour seulement 27 % dans la puissance totale. Cette répartition explique pourquoi la fluctuation de la puissance de frottement total (somme de celle à vide et de frottement des pales) conditionne la précision de la méthode. Il est évident que l'amélioration de cette dernière nécessite de diminuer la fluctuation de la puissance de frottement comme, par exemple, par la mesure « directe » dans cette expérience. Toutefois, sur le plan de l'utilisation du malaxeur dans la pratique, on ne possède aucun moyen permettant d'évaluer la puissance de frottement. Cette puissance, dépend du réglage de l'entrefer et du coincement par les granulats dont la granularité peut être un paramètre influant.

Sans amélioration de la connaissance sur le frottement total, une manière pour diminuer sa répercussion est d'augmenter le volume de malaxage. En effet, l'analyse de l'incertitude proposée dans le paragraphe II.9.5 montre que l'écart type lors de la détermination des paramètres rhéologiques est inversement proportionnel au volume utilisé. Supposant tous les autres paramètres constants, l'utilisation d'un malaxeur d'un mètre cube peut diminuer de 50 fois l'incertitude du problème, par rapport à celui de vingt litres. Une campagne d'essais pour tester cette possibilité sera proposée en utilisant un malaxeur à l'échelle industrielle.

## **II.11. Validation sur le malaxeur à l'échelle industrielle**

### **II.11.1 Introduction**

Les deux campagnes précédentes montrent qu'à partir des mesures de puissance à différentes vitesses de malaxage, on peut prédire l'ouvrabilité du béton dans le malaxeur. Un des paramètres affectant la précision de mesure est la fluctuation du frottement d'une gâchée à l'autre. La deuxième campagne a proposé une manière originale de l'estimer directement pour chaque fabrication, et ainsi de mieux dépouiller les résultats. Cette campagne a également proposé une procédure pour traiter les données expérimentales de manière graphique par l'intermédiaire du couple de malaxage.

L'objectif final de cette campagne d'essai est de vérifier si la procédure proposée est applicable à un malaxeur industriel. Ce résultat permettra de confirmer si le malaxeur peut être utilisé comme un grand rhéomètre lors de la fabrication du béton.

### **II.11.2 Matériels et protocoles d'expérience**

Cette campagne est effectuée dans la station d'étude du malaxage du LCPC. Elle permet la fabrication du béton à l'échelle industrielle comme dans une centrale de béton prêt à l'emploi, mais dans des conditions expérimentales très contrôlées. En contrepartie, elle ne permet pas de produire du béton à grand rendement. La centrale possède un système de pesage et de dosage industriels, un logiciel de pilotage ouvert permettant de paramétrer entièrement un cycle de malaxage, un système d'acquisition permettant l'installation de capteurs divers (wattmètre, tachymètre, sonde d'humidité, capteur de température....) dont le wattmètre différentiel. Elle dispose d'un variateur de vitesse pour le malaxeur et d'un

tapis d'échantillonneur semi-automatique permettant de prélever aisément le béton fabriqué. En outre, une plate-forme permet le changement rapide du malaxeur (300 à 1000 litres) pour des essais comparatifs.



*Figure II.94-Vue générale de la station d'étude du malaxage*



*Figure II.95-Logiciel de pilotage*

Dans notre campagne, un malaxeur annulaire d'une capacité de  $1 \text{ m}^3$ , Pataud, a été utilisé. Les figures suivantes présentent ce matériel.



*Figure II.96- Vue extérieure du malaxeur Pataud de  $1 \text{ m}^3$*



Figure II.97- Vue intérieure du malaxeur Pataud de 1 m<sup>3</sup>

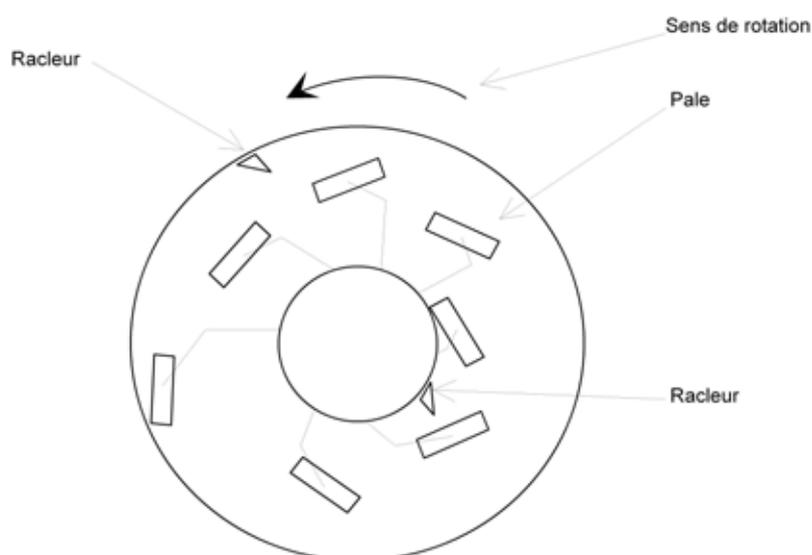


Figure II.98- Géométrie du malaxeur Pataud de 1 m<sup>3</sup>

Le diamètre de la cuve  $D_0$  est de 2,80 m. Le diamètre de l'anneau central  $d_0$  est 1,20 m. Il y a 7 pales de même largeur de 33 cm, orientées différemment et deux racleurs, un contre la paroi centrale et l'autre contre la paroi extérieure de la cuve. La distance entre l'axe de rotation et les différentes pales sont de 0,78 – 0,85 – 1,00 – 1,02 – 1,02 – 1,22 et 1,32 m. La hauteur du béton pour une gâchée de 1000 litres est d'environ 20 cm.

### II.11.2.a Calibrage de la vitesse du malaxeur

Le variateur permet de fonctionner en boucle ouverte ou en boucle fermée. Dans ce dernier cas, le malaxeur est muni d'un codeur qui enregistre la vitesse réelle et le variateur la corrige par comparaison à la consigne. Dans notre cas, le variateur a été utilisé en boucle ouverte, c'est-à-dire qu'il s'ajuste à la consigne mais sans que la vitesse réelle ne soit mesurée. C'est une configuration moins précise que la solution en boucle fermée.

Un calibrage du signal de vitesse issu du variateur (par rapport à la vitesse de rotation du malaxeur, obtenue par le comptage du nombre de tours en un temps donné) a été réalisé. Cette opération a permis de calculer les coefficients d'étalonnage qui ont ensuite été

rentrés au niveau du système d'acquisition. Pour s'assurer de la fidélité de la réponse, la consigne a été comparée à nouveau à la vitesse de rotation réelle (obtenue par le comptage - Figure II.99). On constate une bonne conformité du signal fournit par le variateur.

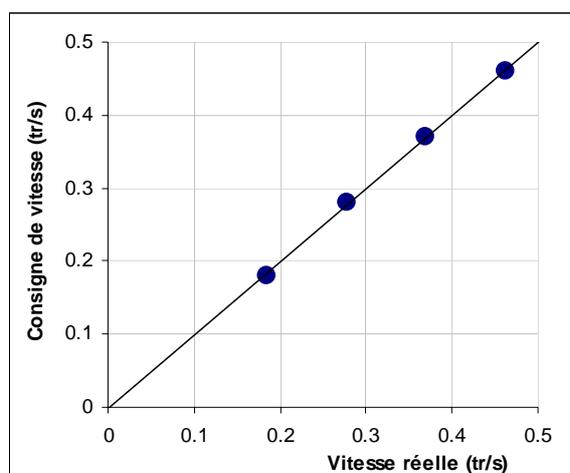


Figure II.99-Correspondance entre la vitesse réelle et la consigne de vitesse

### II.11.2.b Détermination de la puissance à vide

La puissance à vide est affectée par les frottements dans le malaxeur. Ces derniers sont dépendants des éventuels dépôts de béton solidifiés restants dans le malaxeur après un nettoyage imparfait. En préalable à notre campagne, plusieurs essais à vide ont été réalisés pour décaper le fond de la cuve de notre malaxeur et s'assurer que les valeurs de puissance étaient stables.

Au cours de ces mesures, il est rapidement apparu qu'un autre paramètre intervenait : la température de l'huile du réducteur. Le contexte expérimental ne permettant pas de travailler en permanence avec de l'huile à température constante (cette dernière dépendant de la température ambiante et du temps d'utilisation du malaxeur), l'idée générale a été d'établir au préalable une relation univoque entre la puissance à vide et la température de l'huile. Un enregistrement en continu de cette température, lors de l'exécution des essais, permet ensuite de déduire les puissances à vide correspondantes.

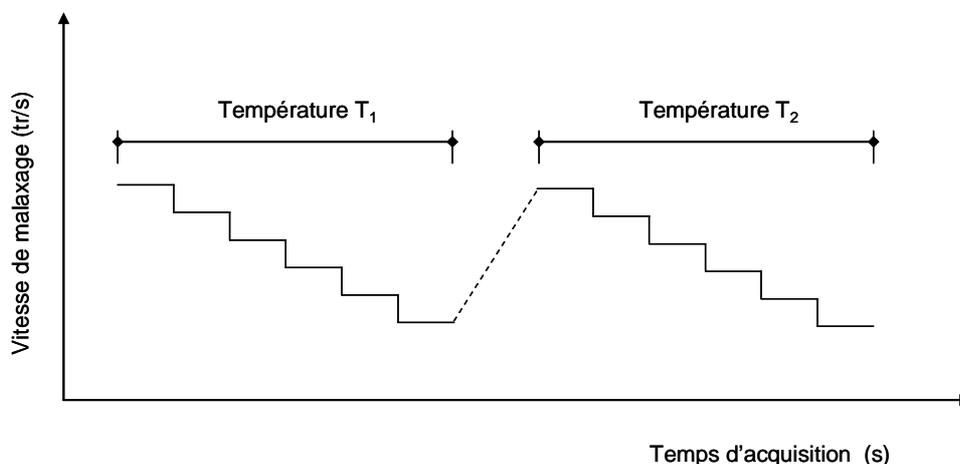


Figure II.100-Mesure de la puissance à vide aux vitesses et températures variables

La mesure de température a été faite par l'intermédiaire d'un thermocouple de type T plongé d'environ 5 cm dans l'huile du réducteur. Les données ont été rapatriées, via le système d'acquisition, de manière synchronisée avec les signaux de puissance et de vitesse du malaxeur. Dans une configuration à frottements minimales, un enregistrement de puissance à vide et de température, à vitesse variable, a été effectué. Le protocole de mesure est illustré dans la Figure II.100.

La procédure consiste à acquérir la puissance et la température à six paliers de vitesse de 30 secondes. Celle-ci est répétée tant que la température augmente. Dans la pratique, lors de la diminution de la vitesse (pour la durée de 30 s à chacun palier), la température est quasiment constante. Donc, on laisse le malaxeur tourner à vitesse nominale, après chaque paquet de six paliers de vitesse. Quand la température augmente de 1°C, on relance une nouvelle série de six paliers de vitesse.

La Figure II.101 montre que la température de l'huile intervient davantage dans la puissance à grande vitesse. A contrario, pour la puissance à vitesse la plus faible (0,11 tr/s), l'intervention de la température est presque négligeable.

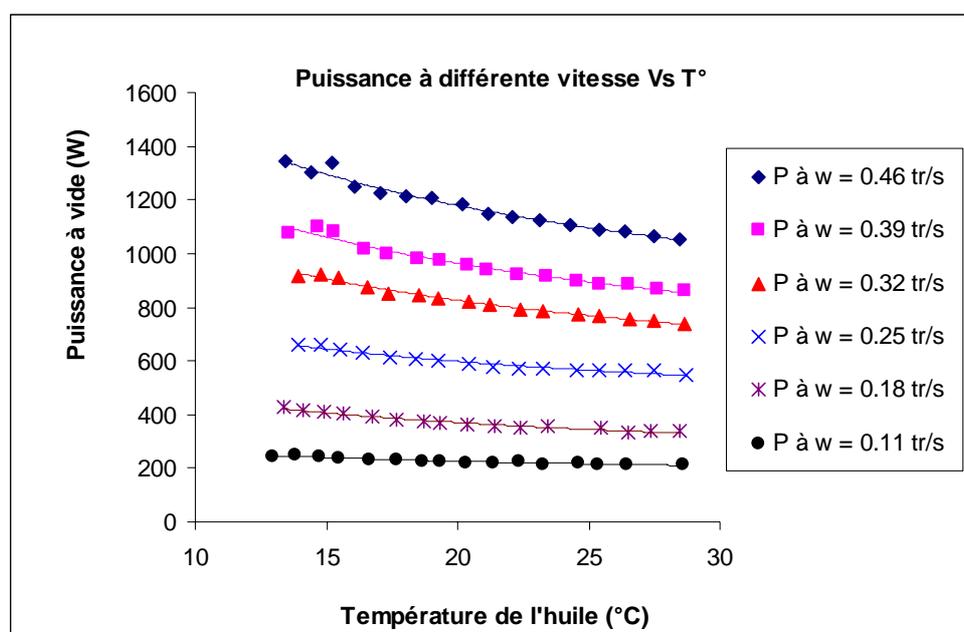


Figure II.101-Puissance en vide à différentes vitesses en fonction de la température de l'huile (Données -Annexe II- 4).

Les relations établies au préalable, basées sur les données présentées dans la figure ci-dessus, permettent d'évaluer la puissance à vide, pour un palier de vitesse donné, à partir des températures enregistrées en continu.

A titre d'information, les courbes de couple à vide obtenues pour différentes températures sont également présentées dans la Figure II.102. On constate que la variation du couple en fonction de la vitesse est d'autant plus forte que la température est basse.

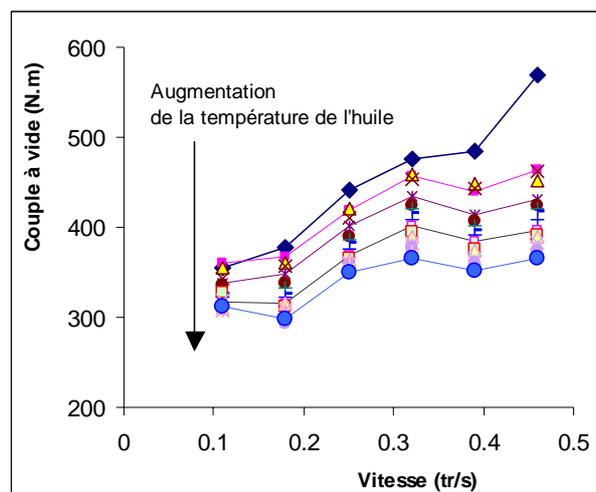


Figure II.102-Variation du couple à vide en fonction de vitesse et de la température  
(Données –Annexe II- 4)

### II.11.2.c Fabrication des gâchées et caractérisation du béton frais

Dans cette campagne, les matériaux sont introduits dans le malaxeur selon un cycle industriel. Les humidités des granulats, prélevés dans la trémie, sont mesurées à l'aide d'un four micro-ondes, avant chaque fabrication, en vue de maîtriser le dosage en eau. Les signaux de température, de puissance et de vitesse sont acquis dès le démarrage du remplissage. Le volume des gâchées est fixé à 900 litres. Après 2 minutes et 30 secondes de malaxage (à partir de la fin de l'introduction d'eau) à la vitesse de 0,46 tr/s, cinq autres paliers de vitesse (0,39 – 0,32 – 0,25 – 0,18 – 0,11 tr/s respectivement) de 30 secondes, sont effectués. A la fin du malaxage, la vitesse de rotation est ramenée à 0,46 tr/s pour la vidange. Ce protocole est illustré dans la figure ci-après.

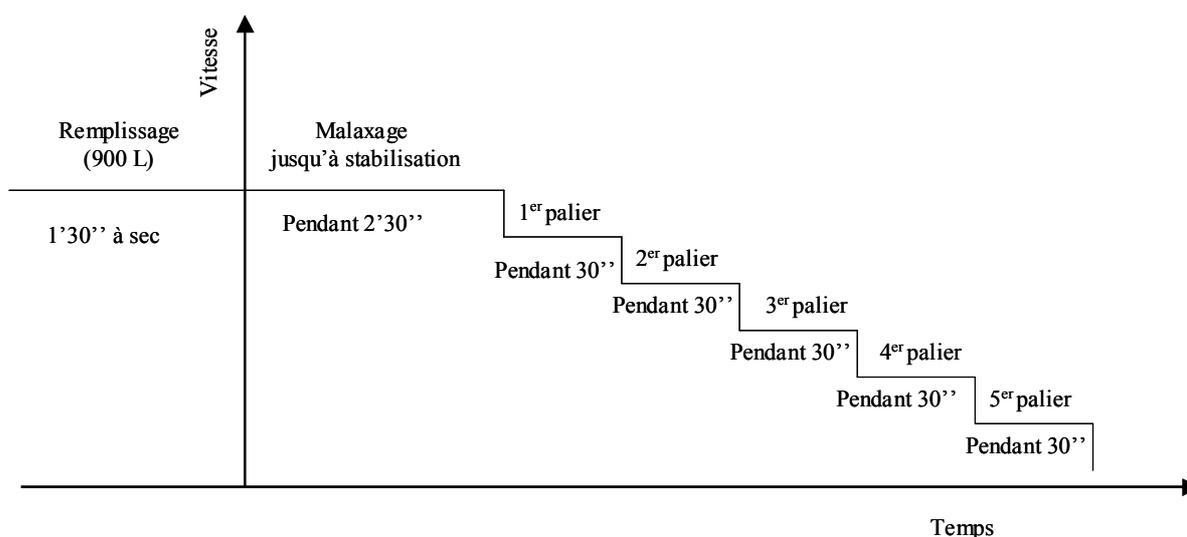


Figure II.103-Protocole de malaxage à différentes vitesses

Le prélèvement du béton est réalisé au moyen de l'échantillonneur de la centrale. Les premiers deux cents litres sont jetés. Les deux cents litres suivants sont prélevés pour les essais de caractérisation. On met alors en œuvre :

- deux mesures de l’affaissement au cône d’Abrams ;
- un essai au BTRhéom ;
- une mesure de la masse volumique au moyen de l’aéromètre;
- une mesure de la température du béton.

La mesure de l’affaissement est effectuée deux fois pour diminuer la variabilité due à l’échantillonnage. La moyenne est utilisée pour les traitements ultérieurs.

Le protocole de mesure au rhéomètre est le même que celui appliqué lors de la première campagne expérimentale. Il s’agit d’effectuer deux séries descendantes, précédées par une pré-vibration à 50 Hz pendant 15 secondes. La vitesse de rotation est réglée entre 0,2 et 0,8 tr/s.

La mesure de la masse volumique du béton frais a pour but de bien déterminer le volume réel dans le malaxeur. Cet essai consiste à peser le bol de l’aéromètre seul puis rempli de matériau. Le volume de remplissage est de 5,2 litres. Le serrage du béton est réalisé par piquage.

### **II.11.3 Expérimentations**

L’Annexe II- 6 détaille tous les résultats obtenus dans cette campagne.

#### **II.11.3.a Formulation des bétons**

Les constituants utilisés sont les suivants (voir les fiches techniques dans l’Annexe II- 5):

- Gravillons Pontreaux 10/20
- Gravillons Pontreaux 6,3/10
- Sable Pilier 0/4
- Ciment CEM I 52,5
- Chrysofluid GT

Nous avons utilisé des gneiss concassés, un 6,3/10 mm et un 10/20 mm, de la carrière des Pontreaux et un sable silico-calcaire 0/4 roulé du Pilier. Le liant était le ciment CEM I 52,5 de Saint Pierre La cour. Enfin le superplastifiant Chrysofluid GT a été utilisé dans la plupart des formules.

Pour cette campagne, vingt et un mélanges ont été fabriqués dont trois mortiers, trois bétons de granularité 0/20 et quinze bétons de granularité 0/10. Le dosage en ciment varie de 409 kg/m<sup>3</sup> à 711 kg/m<sup>3</sup> et le dosage en adjuvant varie de 0 % à 0,45 % du poids de ciment. Le rapport E/C est compris entre 0,28 et 0,77. Ces dosages variables ont pour but de générer des bétons de rhéologies variables. Le Tableau II.26 présente la composition des bétons utilisés. Les propriétés rhéologiques, l’affaissement, la masse volumique et la température de ces matériaux sont présentés dans le Tableau II.27. Pour les bétons dont l’affaissement est faible (inférieur à 5 cm), aucune mesure rhéologique n’a été effectuée. La Figure II.104 représente la répartition des matériaux dans le plan seuil – viscosité.

On constate que, malheureusement, tout l’espace de ce plan n’a pu être couvert, comme lors des essais précédents avec le malaxeur de laboratoire. La difficulté dans le contrôle du dosage en eau lors de la fabrication des gâchées semble être une cause probable.

Béton	Eau	Gra- villon 10/20	Gra 6/10	Sable 0/4	Ciment 52,5	Chryso GT
	(kg)		(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
B3-1	194	0	898	846	419	2.81
B3-2	207	0	892	842	415	2.79
B3-3	209	0	896	845	417	1.40
B3-4	221	0	885	832	418	2.76
B3-5	222	0	876	835	422	2.74
B3-6	238	0	878	828	409	0.00
B3-7	221	0	879	834	408	0.00
B3-8	217	0	897	846	416	0.00
B3-9	187	0	848	798	562	11.18
B3-10	196	0	840	789	557	11.11
B3-11	205	0	841	788	556	11.08
B3-12	209	0	963	897	285	0.00
B3-13	223	0	960	900	288	0.00
B3-14	194	612	231	670	699	13.95
B3-15	282	0	0	1252	710	0.00
B3-16	285	0	0	1360	609	9.13
B3-17	204	711	272	517	711	14.18
B3-18	216	706	271	516	704	14.08
B3-19	271	0	0	1356	609	9.13
B3-20	207	711	273	516	708	18.72

Tableau II.26-Dosage en  $\text{kg/m}^3$  des bétons utilisés

Béton	Seuil	Visco	Slump	Tempé- rature	MV	Volume	Note
	(Pa)	(Pa.s)	(cm)	(°C)	( $\text{kg/m}^3$ )	(L)	
B3-1	2307	238	7,50	8	2359	898	
B3-2	827	146	16,50	11	2359	903	
B3-3	1795	220	8,50	9	2368	899	
B3-4	921	143	17,25	11	2359	912	
B3-5	860	91	17,75	13	2358	919	
B3-6	561	67	19,25	14	2353	917	
B3-7	743	70	18,00	17	2343	918	
B3-8	1539	138	9,50	13	2376	899	
B3-9	2423	178	9,00	15	2406	894	
B3-10	1757	184	11,25	16	2393	899	
B3-11	1006	125	16,50	16	2401	902	
B3-12	-	-	3,50	17	2354	886	
B3-13	1867	209	6,50	16	2370	881	
B3-14	-	-	0,00	14	2420	903	
B3-15	952	3	19,25	17	2244	888	
B3-16	331	33	58,0	14	2264	887	étalement
B3-17	-	-	0.00	18	-	900	
B3-18	1161	207	16.00	17	2426	895	
B3-19	383	9	64.00	16	2245	887	étalement
B3-20	796	112	20.00	17	2434	890	

Tableau II.27-Caractéristiques des bétons confectionnés

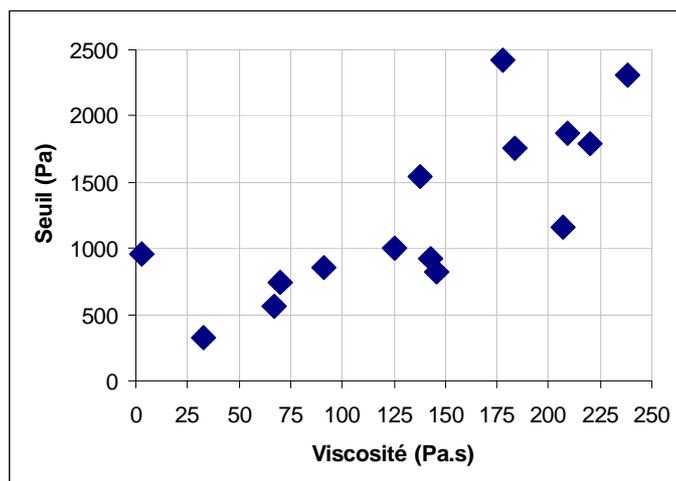


Figure II.104-Répartition dans l'espace seuil de cisaillement et viscosité plastique des bétons étudiés.

### II.11.3.b Température de l'huile, puissance et vitesse de malaxage

L'acquisition en continu à une fréquence de 12 Hz des signaux (température de l'huile, puissance et vitesse de malaxage) permet d'accéder en temps réel aux variations de ces derniers. On constate une faible variation de température durant chaque palier de vitesse. Une moyenne arithmétique (correspondant à une durée de 25 secondes par palier de vitesse) de chacun des signaux est effectuée, permettant d'obtenir trois grandeurs : puissance consommée, vitesse de rotation et température de l'huile. Ces dernières sont données dans le Tableau II.28.

Palier	Données de puissance (W)						Données de température de l'huile (°C)					
	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11
	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)
B3-1	6142	5010	3996	3026	2128	1271	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-2	4769	3863	3010	2127	1432	808	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-3	6317	5004	3933	2955	2071	1207	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
B3-4	4955	3923	3047	2149	1444	810	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-5	4430	3493	2680	1891	1256	691	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
B3-6	4151	3168	2415	1680	1109	632	31,3	31,9	31,3	31,3	31,2	31,2
B3-7	4675	3687	2736	1934	1294	739	30,8	31,0	31,0	31,0	30,9	30,8
B3-8	6013	4767	3678	2706	1854	1100	27,5	27,7	27,7	27,9	27,9	27,7
B3-9	7072	5485	4199	3106	2163	1259	27,2	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3
B3-10	6208	4832	3717	2640	1782	1018	26,6	26,8	27,0	27,0	27,0	27,0
B3-11	5457	4238	3187	2180	1427	803	14,5	15,3	15,7	15,9	16,1	15,8
B3-12	8462	6476	5106	3902	2787	1651	15,2	15,8	16,2	16,4	16,6	16,7
B3-13	6623	5139	3918	2830	1942	1137	20,4	20,8	21,0	21,1	21,2	21,1
B3-14	10723	8303	6444	4880	3466	2120	13,5	13,8	14,2	14,3	14,7	14,4
B3-15	5390	4240	3329	2520	1779	1077	19,3	19,7	19,9	20,0	20,1	20,0
B3-16	3332	2420	1821	1266	820	453	19,6	19,9	20,0	20,1	20,2	20,8
B3-17	10583	8237	6400	5302	3978	2451	18,9	19,2	19,5	20,0	20,1	19,9
B3-18	6614	4997	3770	2637	1737	985	17,4	17,9	18,1	18,2	18,5	18,3
B3-19	3189	2375	1771	1241	796	426	19,9	20,2	20,4	20,4	20,5	20,4
B3-20	6683	5124	3827	2779	1746	1036	15,3	15,8	15,9	16,1	16,3	16,3

Tableau II.28 - Puissances et températures moyennes à chaque palier de vitesse.

Il faut noter que le signal de température de l'huile n'a été acquis qu'à partir du béton B3-6. Il manque les données pour les cinq premiers bétons (B3-1 à B3-5). Toutefois, l'observation des autres données acquises montre que la température de l'huile, durant l'abaissement de la vitesse, n'évolue pas de manière significative, et que la température moyenne de l'huile est supérieure à celle du béton frais d'environ 1,5°C. Par conséquent, la température moyenne de l'huile pour ces cinq bétons est déduite à partir de la température mesurée sur le béton frais, et fixée égale pour les six paliers de vitesse.

### II.11.4 Analyse des résultats

La procédure d'analyse développée dans le paragraphe II.10.4 est appliquée ici. Il s'agit de déterminer les courbes de couple de malaxage en fonction de la vitesse de malaxage pour en déduire les constantes du malaxeur, puis les propriétés rhéologiques des bétons. Pour cette campagne, les informations acquises sur la température de l'huile dans le réducteur du malaxeur permettent de retrancher directement le couple à vide des mesures de couple. Les valeurs de couple présentées dans la suite ne sont donc que la somme de deux composantes : celle liée au frottement des pales et celle liée à la rhéologie.

A titre d'exemple, on présente, sur la Figure II.105, les courbes obtenues pour des bétons d'affaissement divers (16,5 – 11,5 – 8,5 – 0,0 cm respectivement).

L'Annexe II- 6 représente toutes les courbes de couples obtenus pour cette campagne expérimentale.

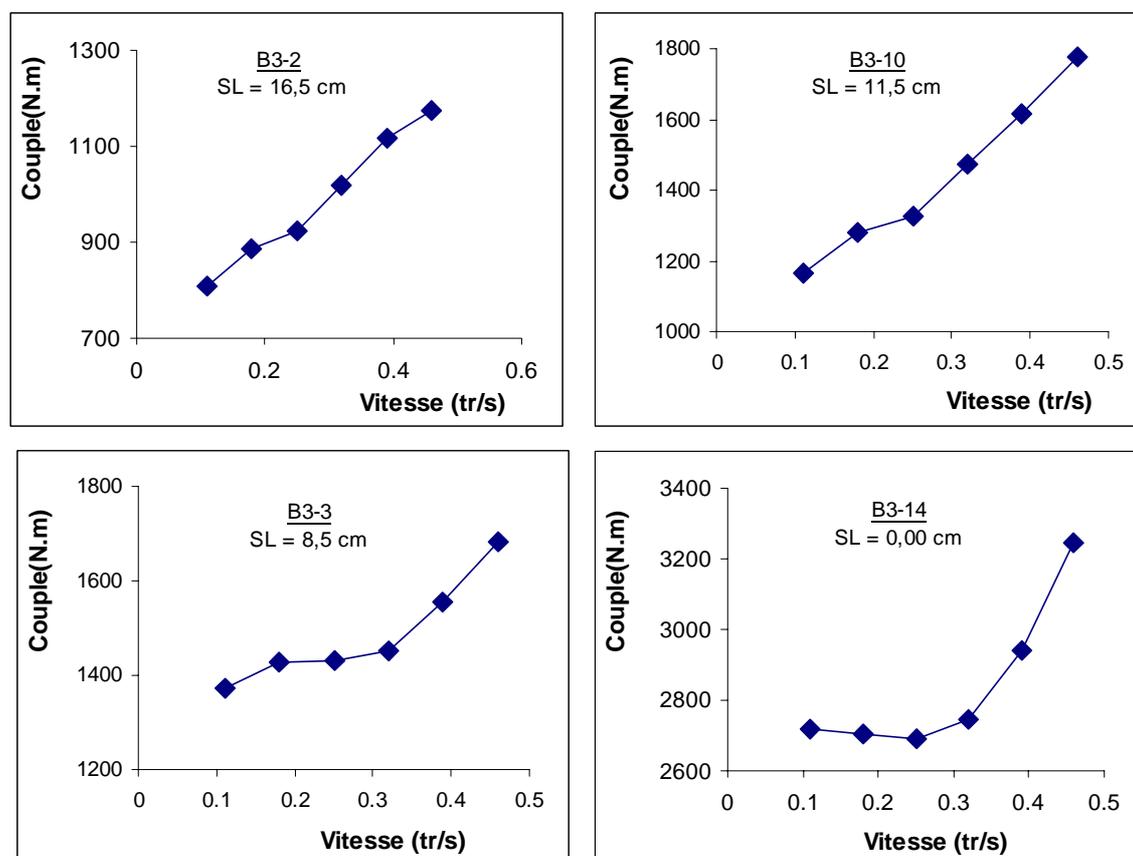


Figure II.105-Courbes de couple pour des bétons de consistances variables.

Cette observation permet de constater que la linéarité de la courbe de couple n'est vérifiée que pour les bétons de consistance suffisante. Nous fixons ici un affaissement critique forfaitaire de 7,0 cm en dessous duquel la méthode proposée, basée sur le lissage des données expérimentales par une droite, n'est plus valable. Ce critère est vérifié pour la majorité des bétons fabriqués dans cette campagne (Annexe II- 6). Il n'est toutefois pas satisfaisant pour le mortier (Figure II.106). Il semblerait qu'il faille des mortiers plus fluides que les bétons pour permettre d'obtenir la linéarité de la courbe de couple. Par conséquent, dans la suite, le mortier B3-15 ne sera pas pris en compte dans l'analyse.

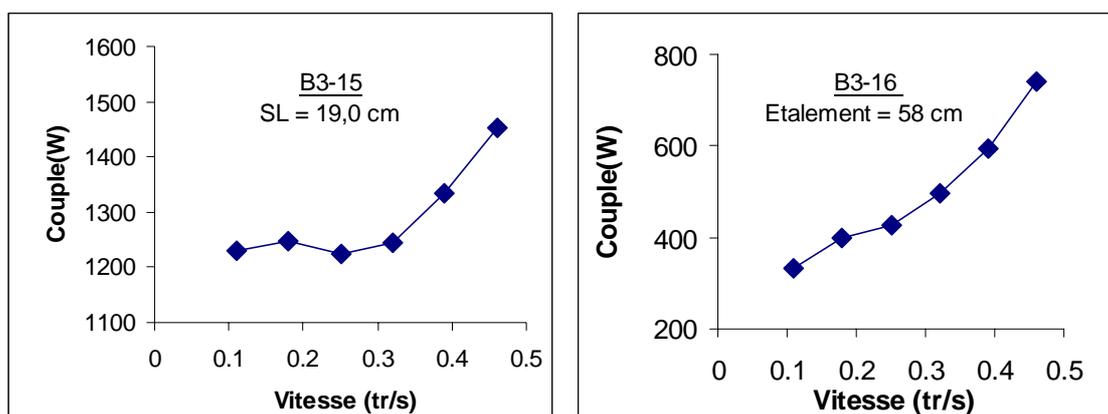


Figure II.106-Courbes de couple pour les mortiers

Le couple de malaxage, dans le domaine de validité, peut être exprimé par une droite:

$$C_{mal} = C_{tt} - C_{vide} = C_{fr} + C_{rhéo} = C_0 + \eta N \quad (\text{III- 29})$$

Compte tenu des résultats obtenus dans les deux premières campagnes expérimentales, on suppose la forme du couple de frottement des pales (faute de pouvoir faire mieux d'un point de vue pratique):

$$C_{fr} = a + bN \quad (\text{III- 30})$$

ce qui conduit à établir les relations suivantes (en tenant compte des éq. III-29 et III-27)

$$C_0 = \frac{\alpha_m V}{2\pi k_s} \tau_0 + a \quad (\text{III- 31})$$

$$\eta = \frac{\alpha_m V}{2\pi} \mu + b$$

Ces relations expérimentales sont présentées dans les figures (Figure II.107 - Figure II.108 - Figure II.109).

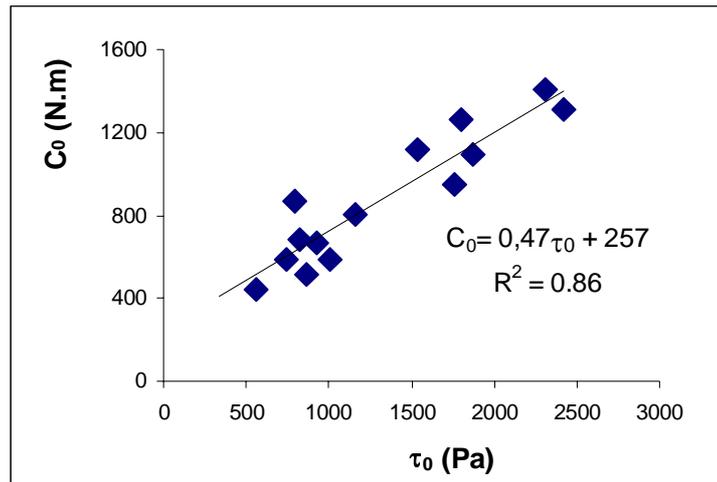


Figure II.107-Relation entre  $C_0$  et  $\tau_0$  pour les bétons

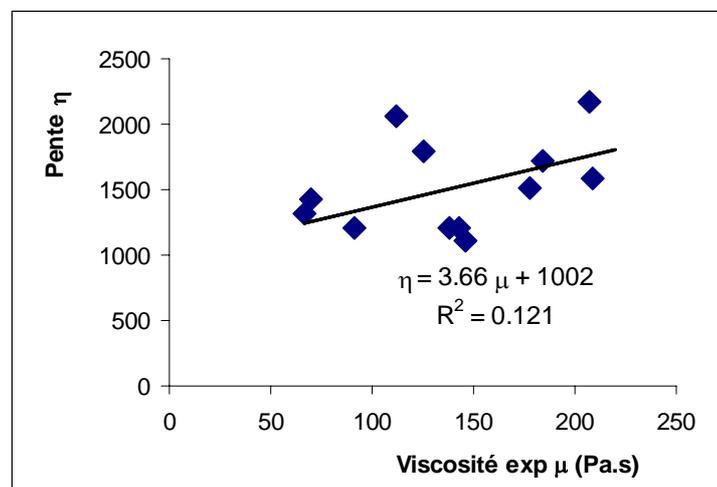


Figure II.108-Relation entre  $\eta$  et  $\mu$  pour les bétons

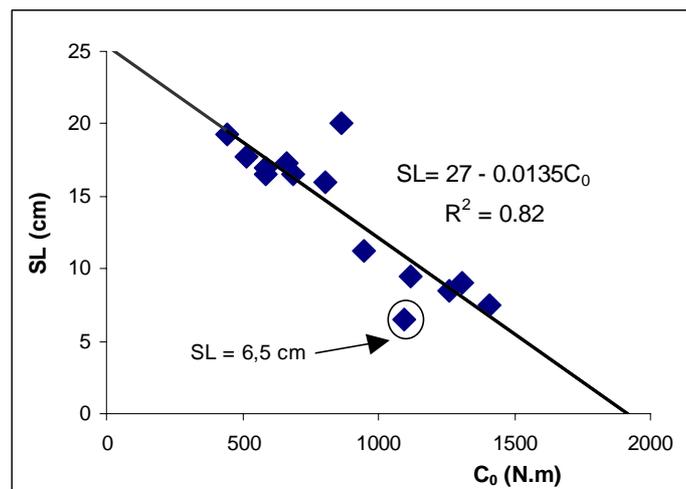


Figure II.109-Relation entre  $C_0$  et l'affaissement pour les bétons

On constate qu'il existe une bonne corrélation entre le seuil et l'ordonnée à l'origine de la courbe de couple. Ce qui explique pourquoi  $C_0$  est également corrélé à l'affaissement. Dans le cas de la viscosité, on observe une tendance claire: la pente de la courbe de couple est d'autant plus grande que la viscosité est importante. Toutefois, le coefficient de corrélation n'est pas très bon.

La Figure II.110 et la Figure II.111 montrent la qualité de la prédiction des propriétés d'écoulement des bétons mais également des mortiers. Toutefois, compte tenu de leur faible diamètre maximum, on suppose que les mortiers génèrent un frottement nettement plus faible au niveau des pales que les bétons. Pour les calculs de leur propriétés on a donc fixé un frottement sans seuil ( $a = 0$  et  $b$  calé sur les bétons dans éq III-31) et utilisé les constantes du malaxeur calées pour les bétons.

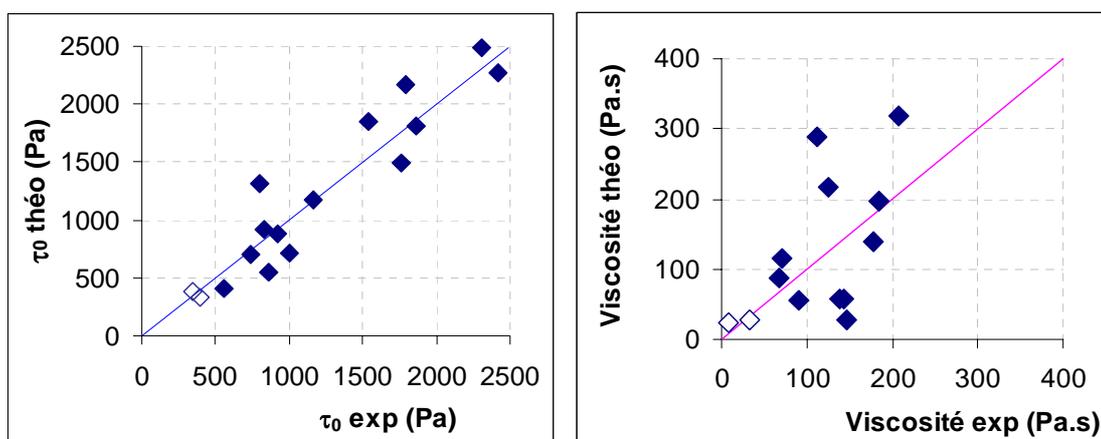


Figure II.110-Confrontation entre propriétés rhéologiques mesurées et celles déduites des mesures de puissance (en plein les bétons, en creux les mortiers).

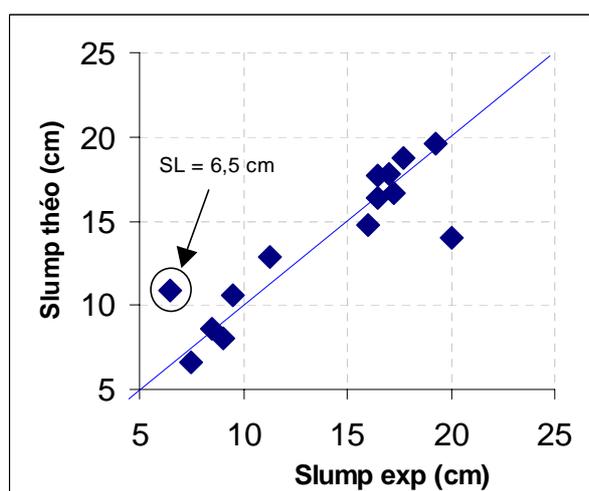


Figure II.111-Confrontation entre l'affaissement mesuré et celui calculé

L'erreur (au sens de l'écart type) pour le seuil, la viscosité et l'affaissement est respectivement de 256 Pa, 100 Pa.s et 2,3 cm. Les deux constantes du malaxeur sont également déterminées, à partir de deux équations reliant  $C_0$  à  $\tau_0$  et  $\eta$  à  $\mu$ , soit  $\alpha_m = 25,55$

$$k_s = 7,90$$

Ceci permet d'en déduire le volume de cisaillement relatif pour le malaxeur utilisé, 41 %, et la plage du gradient de vitesse, pour la vitesse de rotation varie entre 0,11 tr/s et 0,46 tr/s, est compris entre 0,87 à 3,64 s<sup>-1</sup>, soit dans la plage couverte par le BTRHEOM.

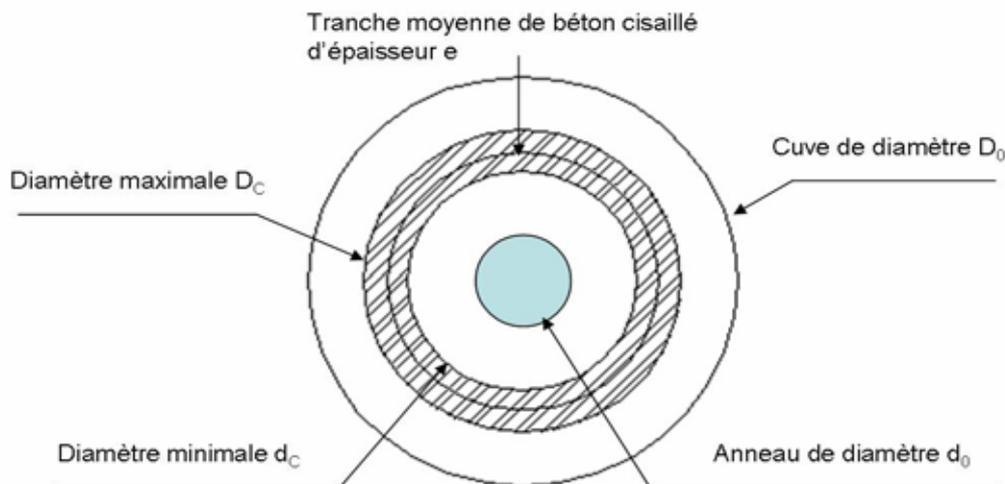


Figure II.112-Tranche moyenne de béton cisailé

D'après la Figure II.98, le rayon moyen parcouru par les 7 pales est de 1,03 m. Du fait que les pales sont orientées de manière différente, la zone cisailée moyenne peut être considérée comme une tranche de matériau dont le rayon moyen est égal à 1,03 m et l'épaisseur moyenne égale à la largeur d'une pale (mis perpendiculairement à la rotation), soit  $e = 0,33$  m. On a donc le diamètre maximal  $D_C$  et minimal  $d_C$  qui limitent la zone cisailée moyenne :  $D_C = 2,45$  m et  $d_C = 1,79$  m (Figure II.112).

Le volume cisailé relatif est aisément déterminé par le rapport  $\frac{D_C^2 - d_C^2}{D_0^2 - d_0^2}$  qui est illustré sur la Figure II.112. L'application numérique donne la valeur de 43,7 %, qui est comparable à celle calculée par le modèle, 41%.

### II.11.5 Discussion

La contribution moyenne de chacun des termes de puissance (puissance à vide, puissance de frottement des pales et puissance liée à la rhéologie) est déterminée dans le Tableau II.29.

Puissance à vide	Puissance de frottement	Puissance de rhéologie
21 %	56 %	23 %

Tableau II.29-Répartition des différents termes de puissance

On constate une contribution majeure de la puissance de frottement des pales par rapport à la puissance à vide mais également que la contribution globale des frottements (à vide et des pales) est la principale cause de la dissipation de la puissance lors du malaxage. La valeur obtenue ici (77 %) est comparable à celle obtenue sur le malaxeur de laboratoire (73

%). La puissance liée à la rhéologie du béton reste donc faible (23 %). Toutefois, on peut constater que la prédiction du seuil et de l'affaissement sont satisfaisants. Ceci s'explique probablement par les trois faits suivants:

- la mesure de la puissance à vide a été faite avec précision grâce à la mesure de la température de l'huile;
- la dépendance du frottement des pales vis-à-vis de la granularité du béton est probablement plus faible que dans le malaxeur de laboratoire (mis à part pour les mortiers) car l'entrefer est moins étroit. L'hypothèse d'une fonction unique de frottement de pales ne dépendant que de la vitesse de rotation est donc probablement moins fautive;
- le volume important de béton cisailé diminue la sensibilité des propriétés aux mesures, comme on l'a vu dans les équations (III-21).

La viscosité semble plus difficile à déduire précisément comme le montre la Figure II.111. Ceci peut s'expliquer pour deux raisons:

- la répétabilité du BTRhéom pour la viscosité est de 40 Pa.s (Hu [6], Sedran [8]). Or les bétons utilisés dans cette campagne ont une viscosité comprise entre 50 et 250 Pa.s. Ceci conduit à un bruit de 20 % sur la plage de variation, qui est beaucoup plus important que celui du seuil de cisaillement qui est de 3 % seulement.
- nous n'avons pas considéré dans ce travail le rôle du glissement du béton aux parois du malaxeur. Or l'apparition d'un glissement modifie le champ des contraintes de cisaillement et donc la puissance consommée pour une vitesse de rotation des pales donnée. Le glissement apparaît pour les vitesses de rotation élevées ; c'est pourquoi il a probablement plus d'impact sur le modèle de viscosité que sur le modèle d'affaissement.

Les résultats obtenus pour la prédiction du seuil et de l'affaissement sont encourageants. Toutefois, la procédure de mesure utilisée (6 paliers de vitesse de 30 secondes) semble être très contraignante pour des applications industrielles. En effet, la majorité des bétons sont malaxés pendant moins d'une minute, sauf pour les bétons très adjuvantés comme les bétons à hautes performances et les bétons autoplaçants. Afin de ne pas nuire à la productivité des centrales à béton, il serait donc intéressant de réduire le nombre de paliers de vitesse.

Nous avons donc vérifié la possibilité de n'utiliser que deux paliers pour prédire les propriétés d'ouvrabilité: le palier à vitesse nominale ( $N_1 = 0,46$  tr/s) et un second palier à la vitesse moyenne ( $N_2 = 0,32$  tr/s). Les résultats de calculs sont indiqués dans la Figure II.113. On constate que la prédiction des propriétés du béton frais sur la base de deux points de mesure de la puissance conduit à des erreurs proches des calculs effectués sur six paliers de vitesse, notamment pour le seuil et l'affaissement. Signalons toutefois que l'analyse sur deux points est plus délicate sur les mortiers car il faut être sûr de faire l'analyse sur une partie linéaire de la courbe de couple en fonction de la vitesse (Figure II.106).

En conclusion, il semble que deux vitesses soient suffisantes pour prédire convenablement le seuil et l'affaissement des bétons en cours de fabrication.

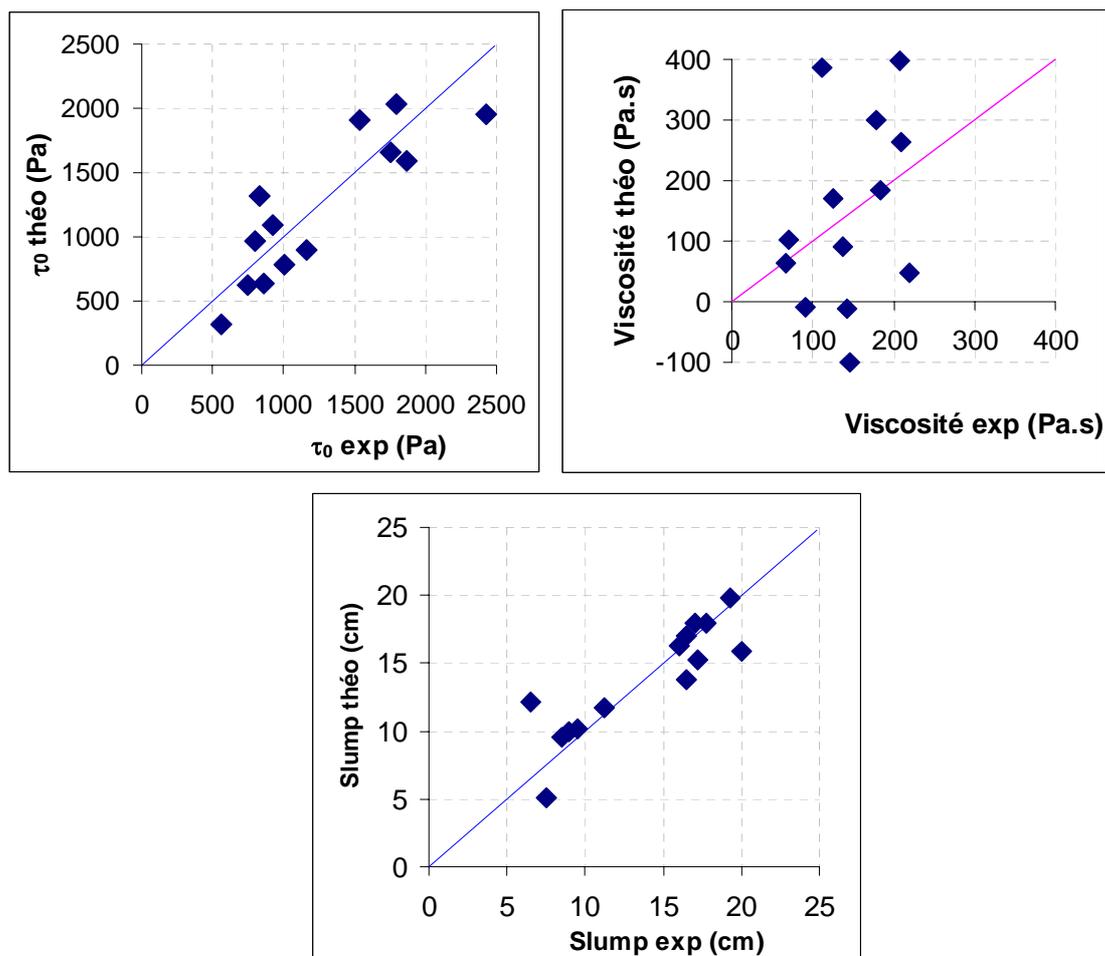


Figure II.113-Relation, pour les bétons, entre les propriétés mesurées et les paramètres de la courbe de couple en utilisant seulement deux paliers de vitesse.

Dans les centrales actuelles, le malaxeur ne fonctionne en général qu'à une seule vitesse nominale. L'installation d'un variateur dans une centrale BPE a un prix et, à travers les expériences que nous venons de décrire, nous constatons que seuls l'affaissement et le seuil de cisaillement peuvent être convenablement prédits grâce aux courbes de puissance à plusieurs vitesses de rotation, mais pas la viscosité. Se pose alors l'intérêt de l'utilisation d'un variateur.

En fait, lorsqu'on considère la puissance stabilisée à la vitesse nominale (0,46 tr/s), on constate que la corrélation avec l'affaissement n'est pas bonne (Figure II.114). Certes, sur une centrale sans variateur, les centraliers peuvent se servir de la mesure de la puissance stabilisée en comparaison avec une valeur cible fixée pour chaque formule. Ceci leur permet d'identifier un excès ou un manque d'eau dans la gâchée en cours. Par contre, ils ne peuvent pas prédire l'affaissement de la gâchée en cours, à moins d'avoir établi une relation puissance-teneur en eau pour chaque formule. Ceci est évidemment très fastidieux. A contrario, l'utilisation d'un variateur permet une évaluation directe de l'affaissement quelle que soit la formule et quelle que soit la cause de variation de sa composition.

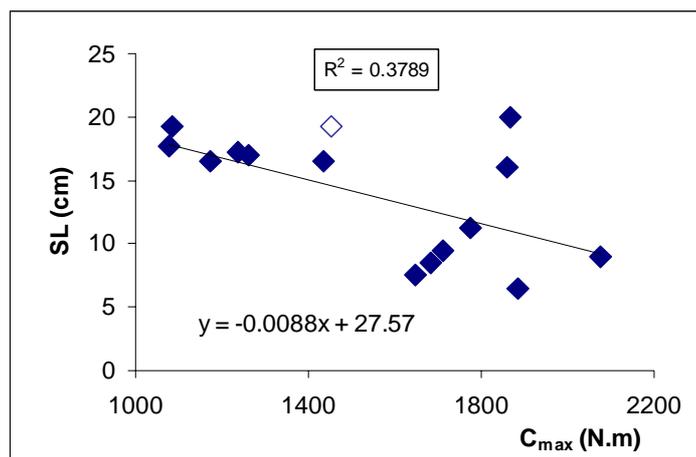


Figure II.114-Corrélation entre l'affaissement et couple à vitesse constante (en plein les bétons, en creux le mortier).

### II.11.6 Proposition de calibrage d'un malaxeur équipé d'un wattmètre différentiel

Pour calibrer un malaxeur équipé d'un wattmètre différentiel, il faut dans un premier temps équiper le moteur d'une sonde de température et établir la courbe de couple à vide en fonction de la température de l'huile du moteur.

On suggère ensuite, sur un certain nombre de formules différentes produites dans la centrale, de procéder aux étapes suivantes:

- malaxer à vitesse nominale jusqu'à la stabilisation, puis abaisser la vitesse de rotation à 70 % de la vitesse nominale pendant 30 secondes ;
- acquérir les données de puissance, de vitesse et de température ;
- rétablir la vitesse nominale pour la vidange du béton;
- prélever du béton et effectuer une mesure de l'affaissement au cône d'Abrams ;
- établir la courbe de couple de malaxage en fonction de la vitesse (à l'aide de la courbe watt-métrique et de la température mesurée) pour déterminer l'ordonnée à l'origine  $C_0$  ;

On peut alors établir la relation entre  $C_0$  et l'affaissement sur l'ensemble des données recueillies qui permettra de prédire l'affaissement à partir des mesures de wattmètre à deux vitesses de rotation.

Il peut s'avérer fastidieux d'attendre la fabrication de formules différentes dans la centrale pour établir la corrélation entre  $C_0$  et l'affaissement. On peut donc concentrer les essais de la façon suivante:

- choisir deux formules à dosage en superplastifiant et E/C différents (pour avoir des comportements rhéologiques différents) ayant un affaissement autour de 15 cm.
- imposer des écarts d'eau de -10, -5, 0, +5, +10 L/m<sup>3</sup> aux différentes gâchées constitutives d'une toupie de manière à ce que l'écart d'eau dans la toupie soit nul et que le béton puisse être livré;
- mesurer l'affaissement et la courbe de puissance en fonction de la vitesse pour chaque gâchée (à l'aide du préleveur Couvrot par exemple – cf.II.3.1.a). Ceci nécessite toutefois d'avoir la possibilité d'effectuer un échantillonnage sur chaque gâchée.

C'est cette dernière méthode que nous nous proposons de tester sur une centrale BPE, dans le chapitre suivant.

## II.12.Faisabilité de la procédure de mesure sur une centrale BPE

### II.12.1 Objectif

Cette campagne d'essais vise à vérifier si la méthode de prédiction en ligne de l'affaissement développée au laboratoire puis sur la station d'étude du malaxage du LCPC pouvait être transposée sur une centrale à béton en condition réelle de fonctionnement.

Par manque de temps et parce que l'affaissement reste le critère de réception le plus développé pour le béton frais, nous n'avons pas fait de mesures rhéologiques lors de cette campagne expérimentale.

### II.12.2 Matériels et protocoles

Cette campagne a été réalisée sur la centrale Point P d'Argentan. Une présentation de cette centrale est faite au chapitre II.2.1. Le malaxeur est présenté dans les figures suivantes. C'est un malaxeur à train valseur de volume nominal 1,5 m<sup>3</sup>.



Figure II.115 - Vue extérieure du malaxeur.



Figure II.116 - Vue intérieure du malaxeur.

Pour les besoins de cette campagne, un variateur de vitesse et des capteurs USB de température (pour mesurer la température ambiante et celle de l'huile du moteur) ont été installés par Couvrot. Le variateur permet de régler manuellement la vitesse du moteur.

La puissance est automatiquement enregistrée dans la base de production RSAI. La température de l'huile du moteur est enregistrée sur un matériel d'acquisition dédié (boîtier USB). La convergence de ces fichiers et de la feuille d'essai est faite par horodatage.

Pour cette campagne, il n'a pas été possible d'effectuer le calibrage de la vitesse du malaxeur. De même, la puissance consommée a été exprimée non pas en watts, mais en pourcentage de la puissance nominale du moteur.

### *II.12.2.a Fabrication des gâchées et mesure de l'affaissement*

Le choix de bétons au préalable était impossible pour cette campagne, compte tenu du contexte de production de la centrale. Il a donc fallu s'adapter aux bétons commandés au moment des essais. Sur 15 toupies représentant plusieurs formules de béton, on a forcé les variations de teneurs en eau suivantes pour les quatre gâchées constitutives de chacune des toupies : 0 L, +15L, -15L, 0L. L'écart d'eau théorique était ainsi théoriquement nul dans la toupie.

Chaque gâchée est réalisée normalement à la vitesse nominale (variateur à 50Hz). Le temps de malaxage doit rester le plus constant possible pour une formule et doit permettre une stabilisation de la puissance. A la fin du malaxage, une série de 4 paliers de vitesses de 30 secondes est effectuée (réglage du variateur à 40 – 30 – 20 – 12 Hz). Lors de la vidange, environ sept litres de béton sont prélevés pour effectuer la mesure de l'affaissement. Le prélèvement est réalisé à l'aide de la trappe d'échantillonnage (Figure II.16 – paragraphe II.3.1.a).

La campagne d'essais s'est étalée sur trois jours sur le site de fabrication. Au total, 37 gâchées, réparties dans 10 toupies et concernant 5 formules nominales différentes, ont été réalisées. Le Tableau II.30 représente les dosages nominaux des bétons utilisés lors de l'expérience. Les pesées réelles de chacune des 37 fabrications sont données dans l'Annexe II- 7. Le Tableau II.31 présente l'indication de puissance moyenne à différentes vitesses et l'affaissement obtenu pour chaque gâchée.

Code	Granulat 10/20	Granulat 4/10	Granulat 0/4	Ciment	Filler	Eau	Adjuvant	Nombre de gâchées
18	0	928	880	300	41	174	1,71	28
46	675	280	835	305	65	172	1,85	2
109	723	201	860	270	90	178	1,48	2
339	712	223	854	330	21	170	1,47	3
375	775	166	847	325	40	172	1,79	4

*Tableau II.30-Dosages nominaux des bétons utilisés (kg/m<sup>3</sup>)*

Palier	Indication de puissance / palier de fréquence					Slump (cm)
	50Hz	40Hz	30Hz	20Hz	12Hz	
B4-1	29,2	19,3	12,1	6,3	2,2	4,5
B4-2	24,7	15,6	9,1	4,0	1,0	14,7
B4-3	60,1	45,7	29,6	18,4	10,3	7,0
B4-4	30,8	18,3	11,4	6,2	2,0	14,0
B4-5	23,1	14,3	9,0	4,0	1,0	17,0
B4-6	18,9	12,1	6,4	3,6	0,4	22,0
B4-7	41,8	27,2	17,0	9,6	4,2	4,5
B4-8	29,9	19,2	12,0	6,2		4,0
B4-9	24,8	16,1	10,0	4,8		14,0
B4-10	52,0	38,7	26,8	17,3		1,0
B4-11	27,5	18,1	11,4	6,3	2,1	3,5
B4-12	21,8	14,3	9,0	4,1	1,0	15,0
B4-13	42,8	30,6	20,0	11,8	6,3	1,0
B4-14	40,3	26,7	18,2	10,7	5,5	1,0
B4-15	48,9	36,7	24,4	15,6		1,0
B4-16	22,2	14,5	8,7	4,0	1,0	17,0
B4-17	21,0	13,4	8,2	3,6	0,7	17,0
B4-18	21,5	13,9	8,1	3,9	0,8	19,5
B4-19	25,8	13,3	6,8	2,8		5,0
B4-20	39,7	27,5	18,1	10,8	5,6	4,0
B4-21	21,0	13,5	8,1	3,7	0,8	18,0
B4-22	42,8	27,5	17,1	9,5	0,0	7,0
B4-23	41,8	25,8	16,0	8,3	3,1	12,0
B4-24	42,4	26,7	16,4	8,4	3,4	16,0
B4-25	18,5	11,9	6,6	2,2		19,0
B4-26	15,9	9,8	5,1	1,6		22,5
B4-27	20,7	13,7	7,9	3,4		20,0
B4-28	35,3	22,4	14,3	7,5		4,0
B4-29	38,3	25,5	16,2	9,3	4,2	3,0
B4-30	25,1	16,1	9,8	4,6	1,0	6,0
B4-31	23,6	15,3	9,2	4,0	1,0	14,0
B4-32	19,8	12,7	7,0	3,0		16,5
B4-33	18,1	11,5	6,1	2,0		20,0
B4-34	19,9	12,8	7,1	2,5		23,5
B4-35	22,8	14,6	8,4	3,4		22,0
B4-36	30,7	18,5	11,2	5,5	1,7	20,0
B4-37	51,9	34,8	21,9	12,7	6,0	4,0
B4-38	20,6	13,5	7,7	3,0	0,1	21,0
B4-39	28,9	18,4	10,7	5,1	1,1	19,5

Tableau II.31-Puissance à différente vitesse et l'affaissement mesuré

### II.12.2.b Mesure de la puissance à vide

La mesure de la puissance à vide du malaxeur devait être réalisée (avec un malaxeur le plus propre possible) pour les mêmes paliers de vitesses que précédemment, mais d'une durée d'une minute pour avoir une bonne stabilisation. La série de cinq paliers de vitesse devait être répétée à plusieurs températures d'huile (par exemple en début de journée et après un nombre important de gâchée). On visait idéalement six courbes de couple à vide (pour cinq températures différentes et une répétition sur la température moyenne) pour permettre une bonne prédiction ultérieure.

Malheureusement, deux problèmes sont survenus lors des essais, qui nous ont privés de cette information pour l'analyse des résultats:

- sur la centrale d'Argentan, l'acquisition des données de fabrication est enregistrée à priori automatiquement, lors de la présence d'un numéro de commande de béton, saisi par le centralier. Lors de l'exécution des mesures à vides aucun numéro n'a été rentré et l'acquisition de la puissance n'a malheureusement pas été effectuée (la vérification a été réalisée a posteriori dans la base de données);
- en outre, les signaux de température se sont avérés inexploitable suite à un mauvais fonctionnement des capteurs, qui semblaient saturés.

### II.12.3 Analyse des résultats

Comme nous n'avons pas calibré la mesure de la vitesse, nous définissons un indicateur de vitesse forfaitairement en divisant par 10 la consigne donnée en Hz au variateur (pour des commodités d'échelle). A partir des indications du wattmètre, et celle de la vitesse, l'indication du couple est déterminée. On présente dans la Figure II.117 certaines courbes de couple de bétons ayant des affaissements différents.

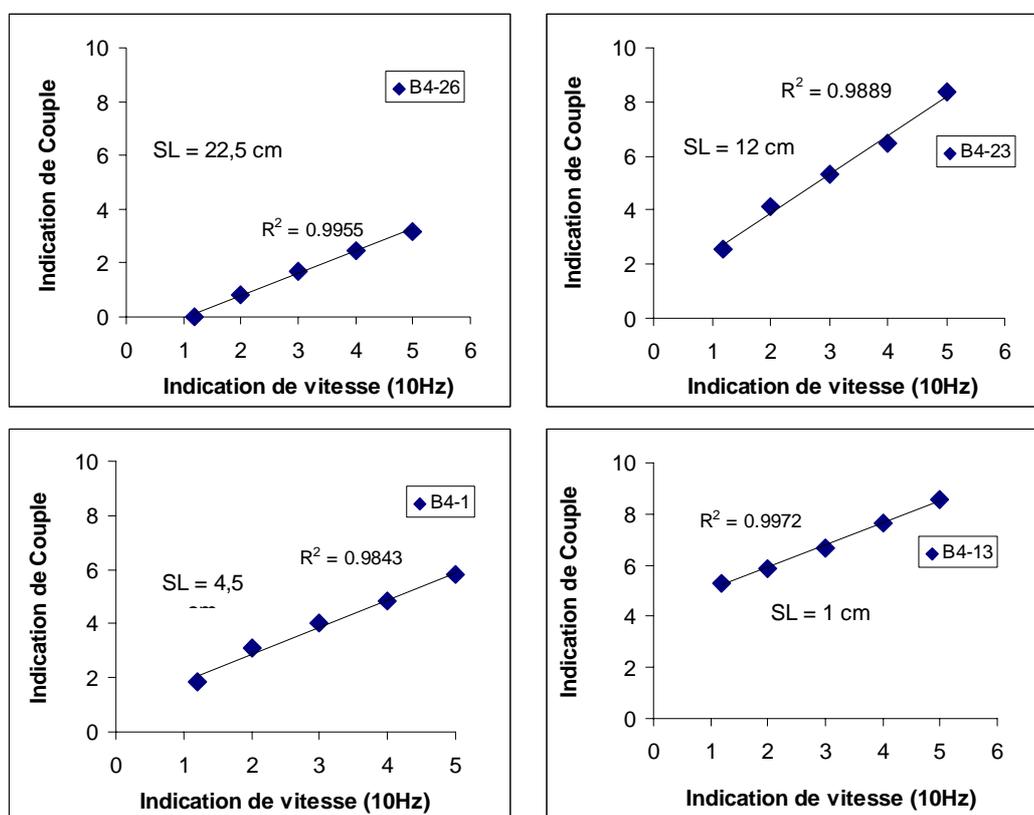


Figure II.117-Exemples d'évolution du couple de malaxage

Curieusement, on observe l'apparition d'ordonnées à l'origine négatives, qui n'ont apparemment pas de sens physique. Ce point sera discuté au paragraphe II.12.4. L'ensemble des courbes obtenues est donné dans l'Annexe II- 8.

On constate également que, pratiquement, toutes les courbes de couple sont linéaires, même pour des affaissements inférieurs à 8 cm, contrairement à ce qui avait été observé dans la 3<sup>ème</sup> campagne sur la station d'étude du malaxage pour une même plage de vitesses

(de 1 à 0,24 fois la vitesse nominale). Seules quelques non-linéarités sont apparues pour la vitesse la plus basse. Deux constats peuvent être avancés pour expliquer cela:

- les couples présentés ici, contiennent une composante de frottement à vide qui occupe un pourcentage important dans la puissance totale. De plus, d'après la campagne précédente, la puissance à vide est une fonction linéaire de la vitesse de rotation. Ceci peut masquer d'éventuelles non-linéarités liées à la rhéologie;
- le malaxeur est à train valseur, ce qui limite l'effet de zone morte ou de sillon que l'on peut observer pour des affaissements faibles dans les malaxeurs annulaires et qui peuvent être source de non linéarité aux basses vitesses de rotation.

Comme la mesure à basse vitesse manquait pour quelques bétons et pour éliminer les quelques non-linéarités constatées, l'analyse des résultats a été réalisée sur les 4 vitesses supérieures. La figure (Figure II.118) montre la relation entre l'indication de  $C_0$  et l'affaissement.

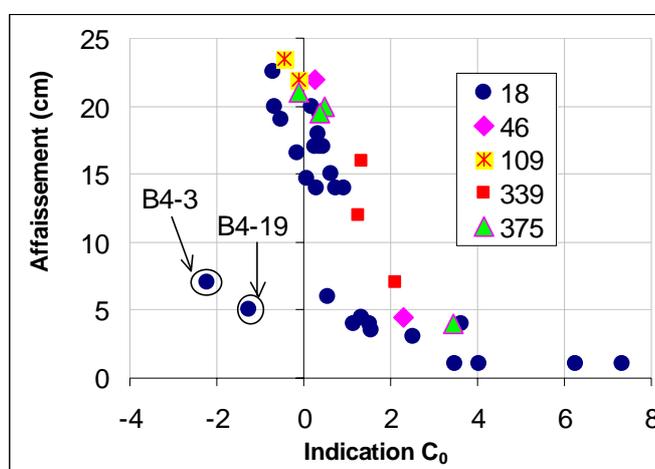


Figure II.118-Relation entre l'affaissement et l'indication  $C_0$

Les deux bétons B4-3 et B4-19 semblent présenter des comportements anormaux que nous allons tenter d'expliquer en examinant l'évolution de chaque formule de béton en fonction de sa teneur en eau. En effet, entre les gâchées d'une toupie, seul le dosage en eau est ajusté pour obtenir des bétons d'affaissements variables. L'affaissement, lorsque tous les paramètres sont fixés, est localement une fonction de la teneur en eau du béton. Il doit en être de même pour la valeur de  $C_0$ . On constate sur la Figure II.119 que c'est bien le cas sauf pour les bétons B4-19 et B4-3. Aucune explication n'a été trouvée à ce fait, mais on pourrait soupçonner un problème de zéro sur la mesure de puissance. Quoi qu'il en soit, ce constat nous permet de considérer ces deux résultats comme aberrants et de les négliger dans notre analyse.

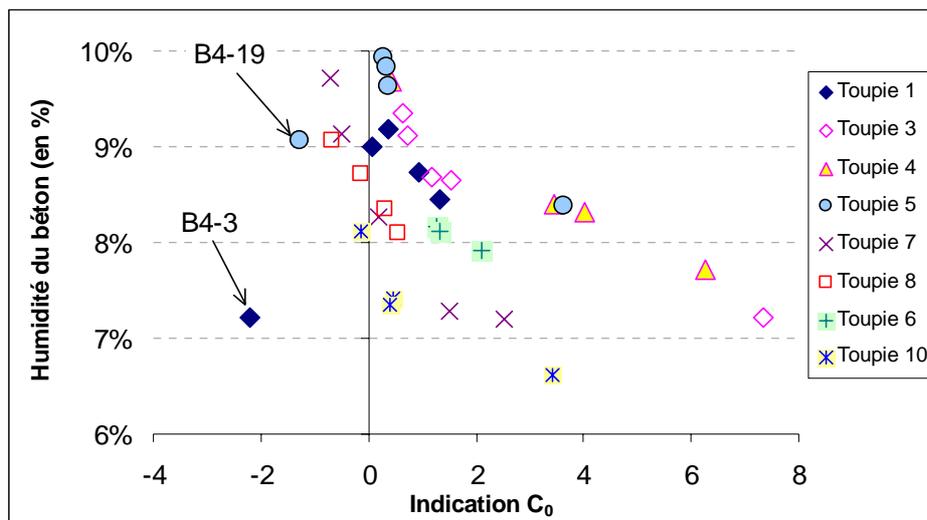


Figure II.119-Relation entre l'indication  $C_0$  et l'humidité du béton

En limitant aux bétons d'affaissement supérieur à 7 cm, et en effectuant la corrélation entre l'affaissement de ces bétons et leur indication de  $C_0$ , les affaissements théoriques sont déduits (Figure II.120). Ces opérations permettent de déterminer l'écart type de mesure de l'ordre de 2,5 cm.

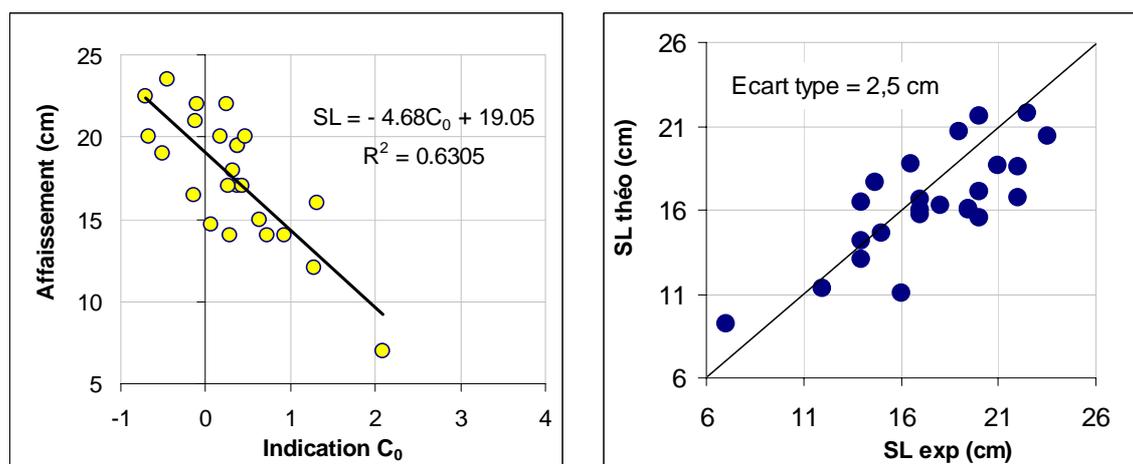


Figure II.120-Corrélation l'affaissement (supérieur à 7 cm) et l'indication  $C_0$   
Confrontation entre les mesures et les calculs

Les mêmes données sont représentées dans la Figure II.121 en remplaçant l'indication  $C_0$  par l'indication du wattmètre à la vitesse nominale. Comme déjà démontré lors de la troisième campagne expérimentale, la prédiction sur la base d'une seule valeur de wattmètre est nettement moins bonne (en particulier lorsque l'on change de formule de béton).

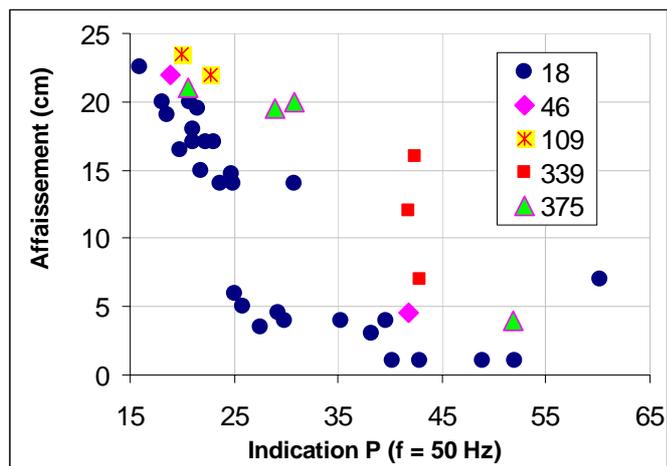


Figure II.121 - Relation entre l'affaissement et l'indication de la puissance nominale.

### II.12.4 Discussion

Dans un premier temps, on tente d'expliquer l'apparition des ordonnées à l'origine négatives de la courbe de couple. En effet, la courbe de couple, lors la représentation en unités classiques (couple en Nm et vitesse de rotation en tr/s), prend la forme d'équation affine pour laquelle à l'origine est positive. Dans cette campagne, les signaux correspondants au couple et à la vitesse de rotation ne sont pas calibrés pour permettre de les transformer en grandeurs physiques. L'absence de cette opération nous conduit à utiliser leurs indications. Ceci peut être une des causes entraînant l'apparition des valeurs négatives observées. En outre, dans la réalité, le béton n'est assimilable à un fluide Bingham que pour des plages de gradients de vitesse réduites. Dans les malaxeurs à train valseur comme celui utilisé dans cette centrale, le gradient de vitesse lors du malaxage peut être important. Si la plage observée de gradient est éloignée de l'origine, un modèle linéaire conduit à une valeur négative de  $C_0$  (Figure II.122), comme ce peut être également le cas dans un rhéomètre avec un béton rhéoépaississant [91]. Malheureusement, dans nos expériences, il n'est pas possible d'identifier la gamme de cisaillements observés, en l'absence de mesure directe de la vitesse et du couple. Enfin, le réglage du zéro de la mesure de puissance peut être une dernière cause.

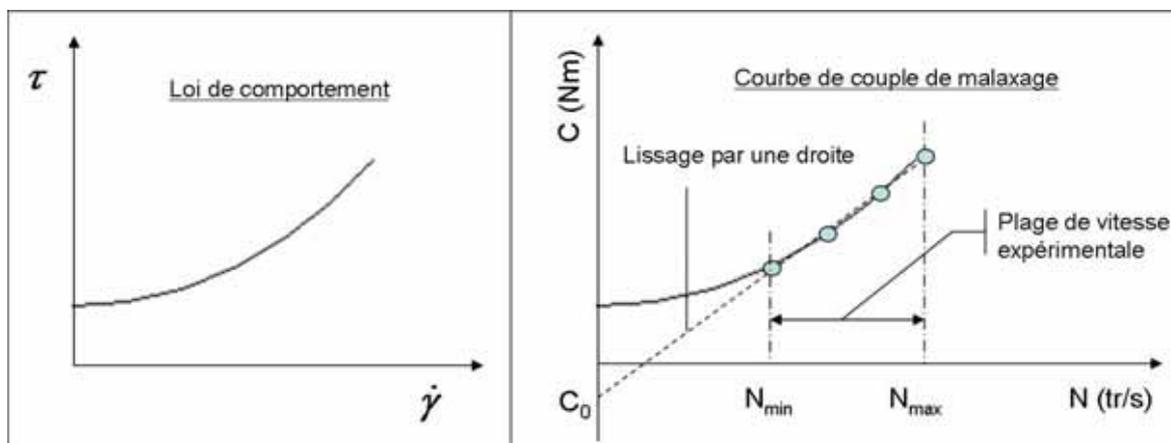


Figure II.122-Linéarisation de la courbe de couple

L'erreur de prédiction de l'affaissement est ici légèrement plus forte (écart type de 2,5 cm) que dans la campagne précédente. Ceci peut être lié à la variation de la puissance à vide d'une gâchée à l'autre, qui n'est pas prise en compte dans cette campagne. En fait, le rythme de fabrication dans une centrale industrielle conduit à la variation de la température de l'huile du moteur dans une plage assez large dont le pic maximal, connu par les praticiens, peut atteindre 60°C. La température variable de l'ambiance dans la journée est également une autre source de variation. La Figure II.102 tirée des essais sur la station d'étude du malaxage (au LCPC), confirme que cela peut avoir influence notable sur la puissance à vide.

Notons toutefois que si l'on n'avait pas évalué directement la puissance à vide en fonction de la température dans la 3<sup>ème</sup> campagne sur le Pataud, nous aurions obtenu les paramètres suivants qui donnent une erreur quadratique de prédiction de l'affaissement de 2,3 cm (en utilisant 6 paliers de vitesse) et de 2,75 cm (pour l'analyse avec 2 paliers de vitesse):

$$\alpha_m = 23,49 ;$$

$$k_s = 7,01.$$

Ce résultat est aussi bon que dans l'analyse complète. Ceci est probablement lié au fait que la puissance à vide ne représente que 27 % des frottements totaux (Tableau II.29). Il n'est pas possible dans le cas du malaxeur d'Argentan d'évaluer la part de la puissance à vide et donc de son importance sur la précision des prédictions.

Quoi qu'il en soit, il semble relativement facile et utile de réaliser la calibration de la puissance à vide en fonction de la température pour améliorer la précision de la prédiction de l'affaissement.

## II.13. Conclusion

Sur la base de concepts utilisés dans le génie des procédés et en étudiant les frottements dans un malaxeur, nous avons testé dans ce chapitre la possibilité de prédire les paramètres rhéologiques ainsi que l'affaissement du béton à partir de la puissance consommée lors de son malaxage à différentes vitesses. Ce modèle suppose que le béton se comporte comme un fluide de Bingham et que l'écoulement du béton dans le malaxeur est laminaire. On est également conduit à faire l'hypothèse que, dans un malaxeur, tout se passe comme si une proportion constante du volume du malaxeur était cisailée à une vitesse homogène, proportionnelle à la vitesse de rotation des pales.

Une campagne préliminaire, réalisée sur un malaxeur de laboratoire (40 L) et sur 15 mélanges différents, a permis de valider le modèle de puissance consommée, et de confirmer l'hypothèse de départ concernant l'écoulement laminaire dans le malaxeur. La puissance totale enregistrée par le wattmètre est une somme de deux composantes : la puissance liée aux frottements et celle dissipée dans le béton cisailé, liée à la rhéologie du béton. En supposant que la puissance de frottement est proportionnelle à la vitesse de rotation, et que le coefficient de proportionnalité est constant quel que soit le béton, on peut prédire la puissance, à partir de la rhéologie mesurée au rhéomètre, avec une erreur de 5 % (au sens du coefficient de variation). A l'inverse, il n'est malheureusement pas possible de prédire les propriétés rhéologiques à partir de la puissance mesurée, par méconnaissance de la composante de frottement.

Une seconde campagne a été réalisée sur le même malaxeur, mais dans six configurations d'outils de malaxage différentes. La superposition de ces configurations a permis de déterminer les proportions de puissance consommée respectivement par les frottements (à vide, et ceux des pales) et la rhéologie du béton. Les résultats montrent que les frottements dépendent de la granulométrie du béton, et qu'en moyenne la part de puissance liée à la rhéologie ne représente que 27 % de la puissance totale consommée. On a également montré qu'en déterminant ainsi séparément la puissance consommée par la rhéologie, il était possible de prédire le seuil de cisaillement avec une erreur quadratique de 250 Pa et l'affaissement avec une erreur de 2 cm. Par contre, la prédiction de la viscosité plastique n'est pas satisfaisante (erreur de 78 Pa.s).

Une troisième campagne a été réalisée sur le malaxeur annulaire de 1 m<sup>3</sup> de la station d'étude du malaxage du LCPC. Nous avons constaté que la puissance à vide consommée dépend de la température de l'huile du moteur. Nous avons donc étalonné cette dépendance et suivi la température pendant les essais. Nous avons réalisé 19 gâchées de 900 L de bétons couvrant une large plage de seuils de cisaillement et de viscosité plastique. Pour chaque gâchée, nous avons mesuré la puissance consommée pour six vitesses de rotation différentes. Ne pouvant pas faire de mesure directe des frottements des pales, nous avons fait l'hypothèse qu'ils ne dépendent que de la vitesse de rotation, bien que la deuxième campagne ait montré une dépendance vis-à-vis de la formule du béton. Malgré cette hypothèse simplificatrice, l'analyse des courbes de puissance en fonction de la vitesse de rotation a permis de prédire de façon satisfaisante l'affaissement (erreur quadratique égale à 2,3 cm), le seuil de cisaillement (erreur de 256 Pa), mais pas la viscosité plastique (erreur de 100 Pa.s). Il faut souligner que même pour ce malaxeur d'1 m<sup>3</sup>, la puissance liée à la rhéologie reste faible (23 %) en regard de la puissance due au frottement des pales (56 %). Malgré tout, l'utilisation d'un volume important de béton permet une utilisation satisfaisante du modèle de puissance inverse (voir eq. III-21)

Une quatrième campagne d'essais a été réalisée sur la centrale Point P d'Argentan équipée d'un malaxeur de 1,5 m<sup>3</sup> à train valseur et d'un variateur de vitesses installé pour l'occasion. Lors des essais, seul l'affaissement a été mesuré, étant donnés les résultats décevants obtenus lors des campagnes précédentes pour la prédiction de la viscosité plastique. Cette campagne a permis de confirmer qu'il est possible de prédire l'affaissement à partir des courbes de puissance en fonction de la vitesse de rotation (sur la base de 4 points) avec une erreur quadratique de 2,5 cm. Une panne lors des essais ne nous a pas permis de suivre la température de l'huile du moteur, ce qui nous aurait probablement permis de diminuer cette erreur.

En conclusion, pour des bétons ayant des affaissements compris entre 7 et 23 cm, il semble possible de prédire l'affaissement d'un béton à 2,5 cm près à partir de la relation linéaire obtenue en mesurant le couple en fonction de la vitesse de malaxage. De la même façon, on peut prédire son seuil de cisaillement à environ 250 Pa près (pour une plage de 500 à 2500 Pa).

A contrario, la prédiction de la viscosité plastique n'est pas satisfaisante. L'apparition d'un glissement entre la paroi du malaxeur et le béton, négligé dans notre approche, est probablement une des causes de ce résultat. Il serait intéressant d'analyser l'influence de ces glissements par des calculs aux éléments finis prenant en compte des lois de glissement béton-acier comme proposé par exemple par Kaplan [19].

Le calage du modèle de puissance nous a permis de déterminer la proportion de volume de béton équivalent cisailé, dans une configuration de malaxeur de laboratoire à train valseur et une configuration de malaxeur industriel annulaire. Par des considérations géométriques, nous avons pu retrouver directement ces volumes, et leur donner une signification physique.

Enfin, la détermination de la relation linéaire entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation a nécessité l'installation d'un variateur de vitesses et la définition de 4 à 6 paliers de vitesses d'environ 30 secondes.

On montre ici:

- qu'utiliser la seule puissance à la vitesse nominale, comme cela est fait en général, ne permet pas de prédire l'affaissement des bétons lorsque l'on passe d'une formule à l'autre, et qu'il est donc nécessaire d'avoir au moins deux vitesses de rotation, et donc un variateur de vitesses;
- que la durée des paliers peut être réduite car la puissance se stabilise en général au bout d'environ 10 secondes;
- que la détermination de la puissance pour deux vitesses est suffisante. On prendra la vitesse nominale et la moitié de cette valeur (descendre plus bas peut conduire à des non- linéarités de la courbe couple/vitesse, et donc fausser les résultats).

## **Partie III**

# **Conclusion générale**

Cette recherche avait pour but d'améliorer la régularité de la qualité du béton, fabriqué dans les usines de l'industrie des bétons prêts à l'emploi. Certains résultats que nous espérons intéressants vont être résumés dans la suite. Ce travail a permis également d'ouvrir d'autres voies, avant qu'une régulation globale de la fabrication du béton puisse être obtenue, conduisant à une maîtrise presque parfaite de la qualité des bétons en production.

### **III.1. Apports de la thèse**

A l'issue de ce travail, nous confirmons que le wattmètre est un matériel précieux, permettant le contrôle du dosage en eau et/ou de l'ouvrabilité du béton en cours de fabrication.

#### **III.1.1 Régulation du dosage en eau**

Dans l'usage courant d'une centrale de béton prêt à l'emploi, le wattmètre est utilisé pour corriger le dosage en eau d'ajout. Toutefois, aucun protocole de calibrage efficace dans le contexte de la fabrication industrielle n'est connu jusqu'à présent. Au mieux, les utilisateurs règlent la « lecture » moyenne du wattmètre sur le résultat de la production de plusieurs semaines, suivant des procédures plus ou moins formalisées.

Un calibrage doit faire appel à la connaissance du dosage d'eau de référence dans la gâchée en cours. Une procédure originale est proposée ici. Elle permet de déterminer le dosage en eau dans la gâchée par la mesure de l'humidité des granulats sur des échantillons prélevés dans le malaxeur, à l'aide d'une trappe d'échantillonnage. La granularité des échantillons prélevés est représentative du mélange dans le malaxeur. Des perturbations de l'humidité des échantillons sont toutefois constatées, dont l'origine est la fluctuation de la teneur en gros granulats. Après la correction de cette erreur, la connaissance du dosage en eau dans la gâchée est réalisée avec une précision de l'ordre de  $0,64 \text{ L/m}^3$  au sens de l'intervalle de confiance à 90 %. Même sans correction, cette méthode offre l'estimation la plus précise du dosage en eau, gâchée par gâchée, en milieu industriel, disponible à ce jour. Ces résultats ont conduit à proposer un protocole de calibrage industrialisable qui a été appliqué pour le calibrage du wattmètre sur une centrale BPE. La précision de mesure obtenue du dosage en eau par le wattmètre est de  $4,5 \text{ L/m}^3$  (au sens de l'intervalle de confiance à 90 %).

L'évolution de l'affaissement est comparée à celle de l'humidité du béton dans les conditions industrielles de fabrication de type BPE, c'est-à-dire lorsque la variation du dosage en eau est prédominante par rapport à la variation, d'une gâchée à une autre, des autres constituants. Cette comparaison a permis de montrer que l'écart de la consistance du béton est proportionnel à l'écart de l'humidité du béton si on prend comme référence un béton dont l'humidité est la plus grande lui conférant un affaissement nul. En connaissant l'humidité du béton, l'affaissement peut alors être déduit, dans le cas présent avec un écart type de 2 cm. Ce constat est valable pour toutes les formules de béton vibré expérimentées. Ce résultat n'est pas nouveau, mais confirme et qualifie, en milieu industriel, le contrôle d'affaissement à la fabrication en utilisant le wattmètre pour des formules d'une même famille de bétons.

La méthode de mesure du dosage en eau par prélèvement de granulats dans le malaxeur n'est pas une mesure en ligne car on dispose de résultats dans le meilleur des cas une demi-heure après le prélèvement. De plus, la méthode est de nature à allonger le temps de fabrication et peut être appliquée sans perturbation significative du cycle de production sur

seulement quelques gâchées d'une journée de production. Les algorithmes présentés dans la suite nécessitent des mesures du dosage en eau, gâchées par gâchées, dont la précision influe fortement sur l'efficacité de ces algorithmes. La méthode de calibrage est alors un outil essentiel dans la démarche d'amélioration de la régularité de la production, car les humidimètres doivent être régulièrement calibrés, par exemple pour le wattmètre en raison des dérèglages du système de brassage du malaxeur, ainsi que de son remplacement.

Deux types de démarches sont développés et évalués ici, en s'appuyant sur la mesure de dosage en eau calibrée du wattmètre.

La démarche de type « centralier automatique » vise à la régularisation du dosage d'eau dans chaque toupie. Les mesures sur les gâchées déjà fabriquées permettent de corriger le dosage en eau d'ajout sur les gâchées de la toupie qui restent à fabriquer. Les deux variantes de correction d'eau proposées ont pu théoriquement ramener l'écart d'eau dans la toupie à une moyenne nulle, avec un écart type pour ces deux variantes respectivement de l'ordre de  $3,6 \text{ L/m}^3$  et de  $1,4 \text{ L/m}^3$ . Ces précisions encouragent de futures applications.

Le deuxième démarche est de type « calibrage des mesures d'hygrométrie de granulats en ligne », et fait appel à des traitements algorithmiques des données de production. Deux techniques de résolution ont été mises au point, l'une par régression multiple linéaire et l'autre par calcul des covariances. Cette dernière technique de résolution semble plus robuste, s'adaptant bien à la fabrication du béton prêt à l'emploi. Cet algorithme ne permet pas de détecter immédiatement des fluctuations des humidités des gravillons et des dérèglages de sondes à sable, mais sur le long terme, le dosage en eau est amélioré par une procédure de calibrage adaptatif. La combinaison entre les modes de correction de type « centralier automatique » et l'algorithme de calibrage de mesures d'hygrométrie, permettra une solution souple et complète pour le problème de régulation du dosage en eau.

### **III.1.2 Amélioration du contrôle d'ouvrabilité**

Des travaux réalisés en génie des procédés ainsi qu'en génie civil ont permis de montrer que la puissance consommée pour mélanger un fluide non newtonien est conditionnée par les caractéristiques rhéologiques du matériau, la géométrie du mélangeur ainsi que la cinétique de l'agitateur. Dans le malaxeur à béton, cette puissance a également une composante liée au frottement du système mécanique du malaxeur et des pales contre la cuve, par l'intermédiaire des granulats. Selon ce modèle de puissance, il est possible, en variant la vitesse du malaxeur, de mettre en lumière les paramètres rhéologiques du béton dont le comportement est assimilable à un fluide de Bingham. Pour ce faire, le malaxeur doit être équipé d'un variateur de vitesse.

Deux campagnes expérimentales réalisées dans un malaxeur de laboratoire ont montré que la puissance consommée par un malaxeur peut être correctement prédite à partir des caractéristiques rhéologiques du matériau. A contrario, à partir des mesures du wattmètre à différentes vitesses, l'ouvrabilité du béton est difficile à déduire. Sur le petit malaxeur, le calcul inverse est essentiellement affecté par la fluctuation des termes de frottement et le faible volume de béton étudié. La connaissance des différentes sources de frottement améliore sensiblement le dépouillement des paramètres d'ouvrabilité du béton (seuil de cisaillement, viscosité plastique et affaissement). Les résultats expérimentaux ont permis également de confirmer la contribution majeure de la puissance de frottement dans la puissance brute.

Dans les malaxeurs industriels, l'évolution de la puissance à vide est conditionnée par la variation de la température de l'huile contenue dans le moteur de réducteur. Des relations peuvent être établies, permettant d'évaluer facilement en temps réel la puissance à vide au travers de la mesure de la température. La campagne expérimentale réalisée à la station d'étude du malaxage au LCPC, dont les équipements sont comparables à ceux d'une centrale BPE, et qui intègre un capteur de température, a permis d'en déduire, avec une bonne précision, l'affaissement et le seuil de cisaillement. On constate par ailleurs que deux paliers de vitesse semblent suffisants pour obtenir ces résultats. Par contre, il n'a pas été possible de déterminer correctement la viscosité plastique. En ce sens, nos travaux recoupent l'expérience internationale: un malaxeur peut être considéré comme un grand rhéomètre de type « two point test » en ligne, sachant que ce type de rhéomètre permet de déterminer à une corrélation près l'affaissement et le seuil, mais non la viscosité plastique [83]. Enfin, la fiabilité de ce nouveau « rhéomètre », selon notre expérience, est limitée aux bétons d'affaissement supérieur à 7 cm.

Afin d'étudier la possibilité de transposition de ces résultats dans l'industrie, une étude de faisabilité de la mesure d'affaissement a été réalisée sur une centrale BPE. Malgré des difficultés lors de l'exécution de l'expérience (panne du capteur de température, défaut d'étalonnage de la vitesse et de la mesure à vide...) et en se limitant aux bétons d'affaissement supérieur à 7 cm, on a vérifié que cette propriété pouvait être prédite avec un écart type de 2,5 cm.

En conclusion, le malaxeur, équipé d'un variateur, peut donc servir à évaluer en ligne l'ouvrabilité du béton frais, à l'aide du wattmètre. L'implantation d'un module de calcul de l'affaissement pour informer le centralier en temps réel semble assez facilement réalisable au sein des automatismes de centrale, sur la base des équations proposées dans ce travail. Par contre, à la vue des résultats obtenus dans cette thèse, la mesure nécessitera probablement un rallongement du temps de malaxage d'au minimum 10 secondes (temps pour effectuer un palier à basse vitesse).

## **III.2. Besoin en recherche**

A l'issue de ce travail, il apparaît que plusieurs études complémentaires doivent être poursuivies, afin de valider totalement les résultats de la thèse, et de les prolonger vers un contrôle rationnel et global de la qualité du béton.

### **III.2.1 Validation supplémentaire des hypothèses et des résultats de la thèse**

#### 1. Echantillonnage des mélanges granulaires et mesure de l'humidité du béton

Compte tenu des résultats obtenus lors de la campagne de calibrage du wattmètre, la trappe d'échantillonnage ainsi que les protocoles industrialisés doivent être valorisés. Toutefois, la proposition d'un tel protocole ne repose que sur une seule campagne expérimentale, lors de laquelle certains échantillons de granulats ont été mélangés à des bétons. Une ou plusieurs campagnes complémentaires, avec des échantillons non pollués, semblent nécessaires.

L'algorithme permettant de limiter l'effet d'hétérogénéité lié aux fluctuations des gros granulats doit être également reformulé. En effet, cette procédure, qui a été appliquée à un

grand nombre d'échantillons de diverses formules, collectés pendant trois jours, semble peu applicable dans un contexte industriel, dans lequel le nombre d'échantillons sera nécessairement plus restreint. Sur une nouvelle étude, on pourra donc se focaliser sur une seule formule, pour laquelle le nombre d'échantillons sera fixé entre 6 et 10 et la quantité de matériau prélevé prévue afin d'éviter un déséquilibre de la gâchée courante. Ces échantillons augmenteront le degré de confiance sur la correction de la fluctuation des gros granulats, et donc sur la mesure de l'humidité.

## 2. Calibrage de l'humidimètre

La procédure de calibrage du wattmètre en tant qu'humidimètre peut être élargie à n'importe quel type de sonde (capteur de force, sonde de teneur en eau...). Dans le cas où le wattmètre est utilisé, des études visant à vérifier la fidélité de son information sur le dosage en eau sont nécessaires. A côté de la variation du signal dû à l'usure des pales, les essais réalisés au cours de ce travail ont montré que le wattmètre est encore influencé par l'évolution de la température de l'huile dans le moteur du réducteur. Compte tenu de la variation importante de la température de l'air et de l'huile pendant une journée, le signal du wattmètre peut être variable, pour un même béton d'humidité constante. Dans ce cas, le capteur de température peut être utilisé pour éliminer l'effet de la variabilité de la puissance à vide et donc améliorer la qualité de l'information sur l'eau délivrée par le wattmètre. Des comparaisons avec les signaux bruts permettront de conclure sur le caractère significatif de l'influence de la température.

De plus, des formules de bétons semblables (en termes de  $D_{max}$ , E/C, S/G, dosage en adjuvant) semblent pouvoir être groupées en famille, selon le point de vue du comportement de leur humidité par rapport au wattmètre. L'opération de calibrage serait alors nettement allégée pour une centrale, après un simple classement des formules utilisées en formules types. Une étude d'un critère de création d'une formule type est alors nécessaire.

## 3. Ouvrabilité du béton fonction de son humidité

L'expérience dans le domaine confirme que l'affaissement du béton varie en fonction de l'humidité. Nos résultats expérimentaux valident également cette constatation. Plus spécialement, dans la gamme de formules étudiées, la variation de l'affaissement de tous les bétons peut être normée par l'humidité maximale pour laquelle l'affaissement est nul. Sur une plage de variation d'humidité relativement large (3 %, ou 70 L/m<sup>3</sup>) devant les fluctuations liées aux variations de l'humidité des matériaux, la relation est linéaire, et permet de prédire l'affaissement avec un écart type de 2 cm ; elle est valable même pour les bétons de consistance ferme (affaissement compris entre 1 et 5 cm). Ce résultat ne peut pas être généralisé à tous les types de bétons ; il reste cependant applicable à chaque formule type (soit l'ensemble des bétons qui ont à peu près la même formule sèche). L'efficacité d'une telle approche est évidemment contrôlée par le bon fonctionnement de l'humidimètre. Une validation sur des matériaux plus variables permettra d'obtenir des confirmations définitives.

## 4. Algorithme de correction du dosage d'eau

Bien que des simulations a posteriori sur les données acquises donnent des résultats encourageants, un programme de validation sur une centrale en vraie grandeur doit être effectué. Des prélèvements de matériaux pourraient être réalisés pour fournir un moyen de jugement de l'efficacité de l'algorithme, par comparaison avec les fabrications sans application de cet algorithme.

Au cas où l'expérience validerait l'algorithme, l'automatisation de cette opération devrait être alors poursuivie.

#### 5. Algorithme de calibrage des hygrométries de granulats

Cet algorithme est résolu par deux techniques différentes : par régression et par calcul de covariance. Cette dernière technique est fondée sur l'hypothèse selon laquelle les quantités d'eau apportées par les gravillons et par le sable sont décorréées, hypothèse qui doit être vérifiée expérimentalement. De plus, des validations sur les données plus fiables et sur un intervalle de temps plus large sont nécessaires, de façon à confirmer si cet algorithme est toujours robuste, et s'il permet de détecter les dérèglages de la sonde et des erreurs dans l'estimation de l'humidité forfaitaire des gravillons.

La précision de cet algorithme est contrôlée par celle de l'humidimètre. Dans le cas de l'utilisation du wattmètre, la perte de précision peut être significative lorsque le remplissage de certains constituants est retardé, notamment celui du ciment. En effet, dans le traitement du signal de wattmètre, on suppose que la séquence d'introduction de tous les constituants est toujours la même. Malheureusement, ce n'est pas le cas dans la pratique. Des perturbations lors du remplissage du ciment sont souvent observées en centrale, faisant varier la réponse du wattmètre. Ceci pourrait alors fausser la mesure de l'humidité du béton.

Pour éviter ce problème, soit on doit éliminer ces gâchées, soit on doit appliquer d'autres techniques moins influencées par le retard d'introduction du constituant. La détermination du point de fluidification [93] pourrait être une bonne solution en la matière. En effet, l'apparition de ce point semble ne dépendre que de l'humidité totale du mélange. Par ailleurs, d'autres humidimètres, donnant une meilleure précision sur l'estimation de la teneur en eau, pourraient également être utilisés à cet effet.

#### 6. Mesure en ligne de l'ouvrabilité

Des campagnes expérimentales sur des centrales industrielles doivent être effectuées avec mesures de température de l'huile dans le moteur de réducteur et caractérisation rhéologique du béton frais, afin de vérifier si on est capable de réduire l'incertitude de prévision. Lors de ces expérimentations, on cherchera à confirmer le résultat acquis dans la troisième campagne de cette thèse, selon lequel deux paliers de vitesse sont suffisants pour parvenir à une précision acceptable dans l'estimation de l'affaissement du béton.

Un des points particuliers à souligner est que, lors du passage au second palier de vitesse, l'homogénéité du matériau dans le malaxeur ne doit plus évoluer sensiblement. Cette condition semble critique lors de la fabrication en centrale. En effet, lorsqu'une gâchée est sous dosée en eau, le temps de stabilisation peut être supérieur au temps de malaxage couramment adopté, égal à 55 secondes [49]. Si la vitesse du malaxeur est abaissée trop tôt, avant la stabilisation, les résultats obtenus pourront être faussés. C'est pourquoi un critère concernant le moment d'abaissement de la vitesse pour obtenir des mesures fiables semble nécessaire. D'une façon plus générale, il faudra des procédures pour déterminer le nombre et la durée de chaque palier, selon les bétons considérés.

Le problème de glissement du matériau sur la paroi du malaxeur n'a pas été pris en compte dans ce travail. Toutefois, la compréhension de ce phénomène pourrait apporter des améliorations dans la prédiction du seuil mais surtout de la viscosité plastique. Une

---

approche numérique de ce problème avec prise en compte de loi de glissement (certaines sont disponibles dans la littérature) pourrait être utile.

### **III.2.2 Vers une régulation globale de la fabrication des bétons**

Une régulation globale de la qualité du béton est souhaitable lors de sa fabrication. Il s'agit d'assurer que le béton, à la sortie du malaxeur, possède les propriétés spécifiées dans son cahier des charges, malgré les variations qualitatives de ses constituants.

L'estimation précise du dosage en eau est, sans doute, l'opération centrale à mener dans un premier temps. Les algorithmes proposés dans ce travail peuvent aider à résoudre ce problème. L'algorithme de correction d'eau permet de maîtriser le dosage en eau pour une toupie courante. L'algorithme de calibrage de l'hygrométrie des granulats aidera à détecter et à corriger en ligne les dérèglages des sondes. La connaissance précise du dosage d'eau pour la gâchée courante informera sur la composition réelle du béton dans le malaxeur, compte tenu de la précision des balances. L'acquisition en cours des dosages des constituants et des paramètres de malaxage permettra ensuite d'évaluer, pour une précision donnée, la résistance en compression. En effet, selon l'état actuel des connaissances, la précision des modèles reliant formulation et résistance en compression rend cette opération réalisable [7] ; l'effet du malaxage sur la résistance en compression finale est également quantifiable [44]. Ensuite, comme on l'a montré dans cette thèse, on peut appréhender la consistance du béton de la gâchée courante. L'élaboration d'un algorithme global permettant d'obtenir des propriétés de consistance et de résistance désirées, à partir des informations calculées et/ou mesurées, permettra alors la régulation des propriétés d'usage du béton en cours de fabrication, comme on le fait couramment pour le ciment produit dans les cimenteries modernes.

## Bibliographie

- [1] Dreux G., Festa J., 1998, « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles, Paris
- [2] Faury J., 1958, « Le béton. Influence de ses constituants inertes », Dunod, Paris
- [3] Tattersall G.H., 1991, “Workability and quality control of concrete”, E & FN SPON, London.
- [4] Baron J., 1982, « La nécessité d’une démarche pragmatique: idée de maniabilité et sa mise en pratique », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [5] Coussot P., Ancy C., 1999, « Rhéophysique des pâtes et des suspensions, EDP Sciences », Les Ulis.
- [6] Hu C., 1995, « Rhéologie des bétons fluides », Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA16, Paris
- [7] de Larrard F., 2000, « Structures granulaires et formulation des bétons », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA34, Paris.
- [8] Sedran T., 1999, « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants », Thèse de doctorat de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [9] Legrand C., 1982, « Le comportement rhéologique des suspensions de ciment », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [10] Saak A.W., Jennings H., and Shah S., 2004, “A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow”, Cement and concrete research, Vol 34, 363-371.
- [11] Tattersall G.H., 1990, “Progress in measurement of workability by the two-point test”, (in “*Properties of fresh concrete*”), Proceedings of the RILEM colloquium, Hanover.
- [12] de Larrard F., Ferraris C., 1998, « Rhéologie du béton frais remanié : Plan expérimental et dépouillement des résultats », Bulletin liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°213, pp 73-89
- [13] Gorisse F., 1982, « Les essais mécaniques », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [14] Acker P., Adam M., Mamilan M. et Saulnier J., 1986, « Caractères du béton », Technique de l’ingénieur, C 2 240.
- [15] Lecomte A., de Larrard F. et Mechling J.M., 2001, « Résistance à la compression de bétons hydrauliques au squelette granulaire non optimisé », Bulletin liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°234
- [16] Bernier G., 1986, « Formulation des bétons », Technique de l’ingénieur, C 2 210.
- [17] Charonnat Y., Benichou E., Darcel M., Geoffray J.M., Gonzalez J.C., Launaire Y., 2001, « Maîtrise de l’eau dans le béton hydraulique », Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Guide technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris.
- [18] Geoffray J.M., « Mise en œuvre », Technique de l’ingénieur, Série de béton hydraulique, C 2 230

- [19] Kaplan D., 2000, « Pompage des bétons », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA36 (édition LCPC, 2001), Paris
- [20] Chapdelaine F., 2006, « Etude fondamentale et pratique sur le pompage du béton », Thèse de doctorat de l'université de Laval, Québec
- [21] Powers T.C., 1968, "The properties of fresh concrete", John Wiley & Sons, Inc
- [22] de Larrard F., Acker P. et Malier Y., 1987, « Béton à très hautes performances : du laboratoire au chantier », Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N°149, pp 71-74
- [23] Cassar L., 2005, « Nouveaux matériaux bétons », Ecole thématique CNRS – ATILH « Matériaux cimentaires » du 25 – 30 septembre 2005, La Colle – sur–Loup
- [24] Nagaraj T.S., Shashiprakash S.G., 1990, "Generalized Abrams' law", (in "Properties of fresh concrete"), Proceedings of the RILEM colloquium, Chapman and Hall, London
- [25] Regourd M., 1982, « L'hydratation du ciment Portland », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [26] Folliot A., Buil M., 1982, « La structuration progressive de la pierre de ciment » (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [27] Maso J.C., 1982, « La liaison pâte – granulat », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [28] Coussot P., Grossierord J-L., 2002, « Comprendre la rhéologie de la circulation du sang à la prise du béton », EDP Sciences, pp.167-175.
- [29] Baissa A., Bigas J.P. et Gallias J.L., 2001, « Le rôle des additions minérales et de l'adjuvantation sur le comportement des mortiers à l'état frais », (dans « *Rhéologie. Génie civil et environnement* »), 36<sup>e</sup> colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, pp.347-352.
- [30] Legrand C., 1982, « La structuration des suspensions de ciment », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [31] Fukuda M., Mizunuma T., Izumi T. and Iizuka M., 1990, "Slump control and properties of concrete with a new superplasticizer. I: Laboratory studies and test methods", (in « *Admixtures for Concrete: Improvement of Properties* »), Proceedings of the International RILEM Symposium, Chapman and Hall, London
- [32] Baron J., 1982, « Les principes de composition du béton de porosité minimale », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [33] Saada R., Barrioulet M. et Legrand C., 1990, « Influence des fluidifiants sur les caractéristiques rhéologique des pâtes de ciments fillerisés », (in « *Admixtures for Concrete: Improvement of Properties* »), Proceedings of the International RILEM Symposium, Chapman and Hall, London
- [34] Calibé (ouvrage collectif), 2002, « Pompage des bétons », Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Guide technique, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris
- [35] Paillere A.M., Serrano J.J., 1990, « Influence du dosage et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de la maniabilité optimum des bétons à hautes performances avec et sans fumées de silice », (in « *Admixtures for Concrete:*

- Improvement of Properties* »), Proceedings of the International RILEM Symposium, Chapman and Hall, London
- [36] Agarwal S.K., Masood I., Malhotra S.K., 2000, "Compatibility of superplasticizers with different cements", *Construction and Building Materials* Vol.14, pp 253-259
- [37] Cormon P., 1977, « La fabrication du béton », Eyrolles, Paris
- [38] Charonnat Y., 1980, « Fabrication du béton hydraulique », *Technique de l'ingénieur, traité Construction*, C 2 225
- [39] CIMbéton, 2006, « Norme béton NF EN 206-1 », Commentaire et texte
- [40] Fascicules 65A, « Béton et mortier », pp 61- 83
- [41] Geoffray J., Lopez F., Rageade L., Rousset M., 2004, « Centrale de fabrication des bétons – Automatisation de nouvelle génération », (dans « *Résultats et Recommandations du projet national CALIBE* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [42] Teillet R., Bruneaud S., Charonnat Y., 1991, « Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges : une nouvelle jeunesse pour le wattmètre différentiel », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Pont et Chaussées*, N°174
- [43] Charonnat Y., 1982, « La fabrication et la mise en œuvre. Les contrôles », (dans « *Le béton hydraulique, connaissance et pratique* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [44] Chopin D., 2003, « Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants. Optimisation du temps de fabrication », thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 41.
- [45] Vandanjon J.O., de Larrard F., Dehousse B., Villaine G., Maillot R., Laplante P., 2000, « Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue. Influence de temps de malaxage et du mode d'introduction des additions minérales », *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 228
- [46] Boussion R., Charonnat Y., 1987, « Les bétonnières portées sont-elles des mélangeurs ? », *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N° 149
- [47] Chanu S., Joubert G., Eyrygnoux J.M., Geoffray G.M., 2004, « Malaxage en centrale et en camion », (dans « *Résultats et Recommandations du projet national CALIBE* »), Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [48] Chang P-K. and Peng Y-N., 2001, "Influence of mixing technique on properties of high performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp 87-95
- [49] Chopin D., de Larrard F. et Cazacliu B., 2004, "Why do HPC and SCC require a longer mixing time?", *Cement and Concrete Research*, (article in presse)
- [50] Williams D.A., Saak A.W., Jennings H.M., 1999, "The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.29
- [51] Baskoca A., Ozkul M.H. and Artima S., 1998, "Effect of chemical admixtures on workability and strength properties of prolonged agitated concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.28
- [52] Erdogdu S., 2005, "Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing", *Cement and Concrete Research*, Vol.35
- [53] Cazacliu B. et Dauvergne M., 2002, « Malaxage de bétons auto-plaçants. Influence du temps de malaxage et du type de malaxeur », *Rapport de contrat pour le projet national BAP*, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
- [54] Roustan M., Pharamond J.C., Line A., "Agitation. Mélanges : Concepts théoriques de base, *Technique de l'ingénieur* », traité Génie des Procédés, J 3 800.

- [55] Roquet N., 2006, « Modèle de puissance consommée dans le malaxeur », Communication privée.
- [56] Metzner A.B., Otto E.R., 1957, “Agitation of Non-Newtonian Fluids”, A.I.Ch.E. Journal, Vol.3, N°3
- [57] Calderbank P.H., Moo-Yoong M.B., 1959, “The prediction of power consumption in the agitation of non-newtonian fluids”, Trans. Instn Chem. Engrs. Vol.37
- [58] Metzner A.B., Feehs R.H., Hector Lopez Ramos, Otto R.E. and Tuthill J.D., 1961, “Agitation of Viscous Newtonian and Non-Newtonian Fluids”, A.I.Ch.E. Journal, Vol.7, N°1
- [59] Calderbank P.H., Moo-Yoong M.B., 1961, “The power characteristics of agitators for the mixing of Newtonian and non-newtonian fluids”, trans. Instn Chem. Engrs. Vol.39
- [60] Su Y.S., Holland F.A., 1968, “Agitation and Mixing of non-newtonian fluids”, Chemical and Process Engineering. (Part 1 et 2 - Vol. August – September /1968)
- [61] Amziane S., Ferraris C.F., Koehler E.P., 2005, “Measuring of workability of fresh concrete using a mixing truck”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology **110** (1), 55-66
- [62] Escadeillas G., Beinisch H., Esteve J.P., Cadoret G., Coquillat G., Frel G., 2004, « Maîtrise de la teneur en eau à la fabrication des bétons », (dans « *Résultats et Recommandations du projet national CALIBE* »), Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [63] Geoffray J.M., « Qualité du béton. Exigences normatives », Technique de l’ingénieur C 2 275
- [64] Château E., Cazacliu B., 2001, « Mesure de la teneur en eau dans le malaxeur », rapport de recherche SEMR pour le projet national PN-BAP
- [65] Cazacliu B., 2005, « Mesures en ligne lors de la fabrication du béton », Récents progrès en Génie des Procédés, N°92, Ed Lavoisier, Paris.
- [66] Charonnat Y., 1996, “Quality control in concrete mixing”, (in “*Production Methods and Workability of Concrete*”), Edited by P.J.M.Bartos, D.L.Marrs and D.J.Cleland, E & FN Spon, London.
- [67] Tamimi A.K., 1996, “The effects of mixing technique on microsilica concrete”, (in “*Production Methods and Workability of Concrete*”), Edited by P.J.M.Bartos, D.L.Marrs and D.J.Cleland, E & FN Spon, London.
- [68] Rougeron P., Tagnit-Hamou A. et Laplante P., 1996, “Strength development of mortar and concrete prepared by the “sand enveloped with cement” method”, (in “*Production Methods and Workability of Concrete*”), Edited by P.J.M.Bartos, D.L.Marrs and D.J.Cleland, E & FN Spon, London.
- [69] Aiad I., Abd El-Aleem S., El-Didamony H., 2002, “Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes”, Cement and Concrete Research, Vol.32, pp.1839-1843
- [70] Château E. et Semelle P., 2000, « Essais de sondes de mesure de la teneur en eau », Programme de recherche FNTP 2000, SEMR
- [71] Château E. et Cazacliu B., 2002, « Mesure de la teneur en eau avec une sonde micro-ondes », rapport de recherche SEMR pour le projet national PN-BAP
- [72] Delude P. et Ambrosino R., 1966, « Le contrôle du béton. Méthode du Laboratoire Régional de Bordeaux », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 20
- [73] Brachet M., Ray M. et Charonnat Y., 1976, « Vers un contrôle de qualité non conventionnel des bétons hydrauliques », Annales ITBTP, N°336 de février
- [74] Gorisse F., 1978, « Essai et contrôle des bétons », Eyrolles, Paris

- [75] Bouyat C., 1983, « Contrôle de la qualité du béton sur chantier », Annales ITBTP, N°412 de février
- [76] Alasalmi M., 1988, “Concrete production process control”, Nordic concrete research, N°7, pp 7-19
- [77] Torchet B., 1983, « Humidimètre capacitif LPC autonettoyant implanté sur tapis de doseur à granulats », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 126 de juillet-Aout
- [78] Brunquet E. et Cazacliu B., 2007, “In-situ on-line control of SCC production regularity”, 5<sup>th</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium
- [79] Ray M., Charonnat Y., Vaguelsy D., Delude P., Prost J. et Bersissi R., 1975, « Les formules régionales de béton. Etude de l’influence de la variabilité naturelle des composants. Plan d’expérience », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 30 de mars-avril
- [80] Durrieu J., 1968, « Les centrales de béton routier. Contrôle encours de fabrication et contrôles a posteriori », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 76 de mars-avril
- [81] Charronnat Y. et Tricart Y., 1970, « Enregistrement des paramètres de fabrication sur les centrales à béton », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 76 de novembre
- [82] de Larrard F., Baroghel-Bouny V., Le Roy R., Raharinaivo A. et Torrenti J-M., 2002, « Construire en béton », Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [83] Banfill P., Beaupre D., Chapdelaine F., de Larrard F., Domone P., Nachbaur L., Sedran T., Wallevik O., Wallevik J. E., 2001, “Comparison of concrete rheometers: International Tests at LCPC (Nantes, France) in October, 2000”, C.F. Ferraris and L.E. Brower, editors, NISTIR 6819, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- [84] Ferraris C.F. and Brower L.E., 2003, “Comparison of concrete rheometers: International test at MB (Cleveland OH, USA) ”, National Institute of Standards and Technology, USA.
- [85] Roussel N., Staquet S., D’Aloia Schwarzenruber L., Le Roy R. et Toutlemonde F., 2006, SCC casting prediction for the realization of prototype VHPC-precambered composite beams, Materials and Structures (accepted).
- [86] Sedran T. et de Larrard F., 2000, « BétonlabPro2. Logiciel de formulation des bétons, version 2.0 exécutable sous Windows, logiciel et notice », Presses de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [87] Cazacliu B., Chopin D., Shell R., Château E., de Larrard F., 2005, “Water Control, Homogenization Control, Transport: Three Critical Stages to Obtain Consistent SCC”, Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the 4<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Chicago, USA
- [88] Schell R., 2006, « Etude en milieu industriel sur la précision et la potentialité d’utilisation dans la fabrication des BAP de sondes micro-ondes tournantes », Rapport pour le projet national BAP
- [89] Cazacliu B., 2006, « Amélioration de la régularité du dosage en eau des bétons lors de la fabrication », Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, N° 265 de Octobre-Décembre

- [90] Lebart L., Morineau A., Fénelon J-P., 1982, « Traitement des données statistiques – méthode et programme », Dunod, Paris
- [91] de Larrard F., Ferraris C.F., Sedran T., 1998, Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material, Technical note, Materials and Structures, Vol. 31, No. 211, August-September
- [92] Cazacliu B., Guieysse B., Garcin O., Buisson F., Baudru Y., Chanut S., Lallemand-Gamboa I., 2006, « Laboratory evaluation of 9 mixers », rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 71 p
- [93] Cazacliu B., Brunquet E., 2007, “On-line mixing end-point detection by power consumption measurement”, 5<sup>th</sup> International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp 481-494, Ghent
- [94] Cazacliu B., Guieysse B., Garcin O., Chanut S., 2006, « Evaluation de quatre principes de mélange innovants », rapport LCPC pour le projet européen Innoconcrete, 44 p, juillet

# Annexes



			
N° 1165			
		<b>CARRIERES DE VIGNATS</b> Cidex NY 450 61160 NECY Tél : 02.33.67.88.00 Fax : 02.33.35.28.92 Tél labo : 02.33.67.88.13	
<b>04</b>			
N° 1165-CPD-2004-G-021			
EN 13043 – Granulats pour mélanges hydrocarbonés EN 12620 – Granulats pour béton			
<b>Produit 10/20 – Code B251</b>			
		EN 13043	EN 12620
Composition		Grès quartzite	
Granulométrie	Désignation	Gc 85/15	Gc 85/20
	Catégorie de tolérance	G25/15	G15
Teneur en fines	Catégorie	f1	f1.5
Qualité des fines	Catégorie	VBF NT	
Forme des gravillons	Catégorie	FI20	
Pourcentage de concassage	Catégorie	C100/0	
Résistance à la fragmentation des gravillons	Catégorie	LA20	
Résistance au polissage des gravillons	Catégorie	Psv 50	
Résistance à l'usure	Catégorie	MDE 15	
Absorption d'eau	Catégorie	APD	
Résistance au gel / dégel	Catégorie	APD	
Masse volumique réelle	Valeur déclarée	APD	
Teneur en éléments coquilliers	Catégorie	SC10	
Soufre total	Valeur déclarée	APD	
Sulfate soluble dans l'acide	Valeur déclarée	APD	
Réaction alcali-silice	Valeur déclarée	NR	



05-09-05:15:10 :

# 4 / 4



N° 1165



**CARRIERES DE VIGNATS**  
 Cidex NY 450 61160 NECY  
 Tél : 02.33.67.88.00 Fax : 02.33.35.28.92  
 Tél labo : 02.33.67.88.13

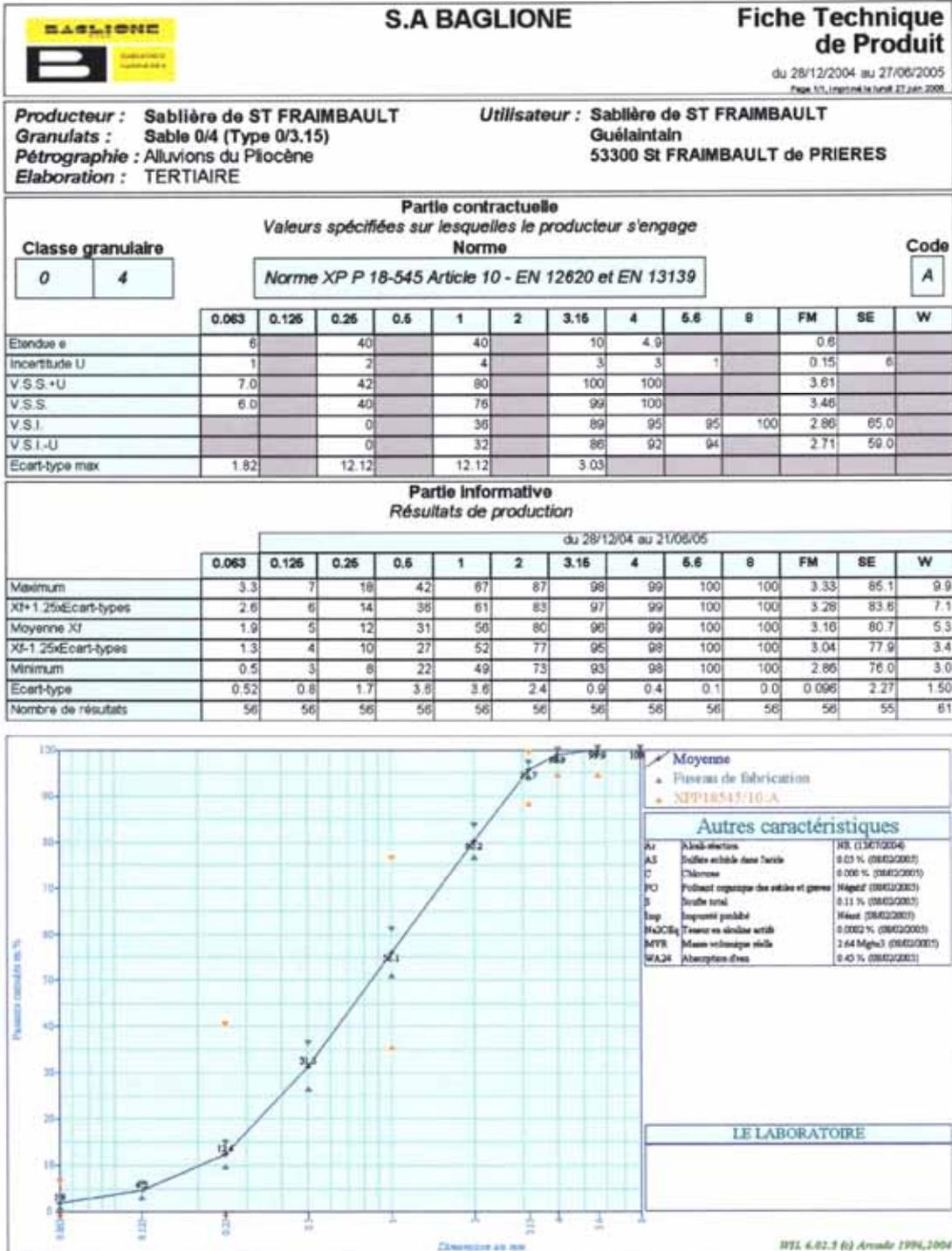
04

N° 1165-CPD-2004-G-021

EN 12620 – Granulats pour béton

Produit 4/10 – Code B051

Composition	Désignation	Grès quartzite
Granulométrie	Catégorie de tolérance	Gc 85/20
	Catégorie	Gr15
Teneur en fines	Catégorie	fi.5
Qualité des fines	Catégorie	VBF NT
Forme des gravillons	Catégorie	FI20
Pourcentage de concassage	Catégorie	C100/0
Résistance à la fragmentation des gravillons	Catégorie	LA20
Résistance au polissage des gravillons	Catégorie	Psv 50
Résistance à l'usure	Valeur déclarée	MDE 15
Absorption d'eau	Catégorie	0.98 %
Résistance au gel / dégel	Valeur déclarée	APD
Masse volumique réelle	Catégorie	2.60 T/m3
Teneur en éléments coquilliers	Valeur déclarée	SC10
Soufre total	Valeur déclarée	0.05 %
Sulfate soluble dans l'acide	Valeur déclarée	< 0.01 %
Réaction alcali-silice		NR



**• Constituants et composition du ciment**

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs sur sec (%)	
Clinker	98,5	Filler	1,5	Gypse	5	Agent de mouture ou TDA 7385	0,04 0,04
						Agent réducteur Cr VI	Sulfate de Fer 0,11

**• Caractéristiques physiques et mécaniques**

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197- 1)		Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002)	
		minimum	maximum	minimum	maximum
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	34,5	18		18	
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	67,1	50			
Retrait à 28 jours (µm/m)	540				
Début de prise (min)	156	40		60	
Stabilité (mm)	0,6		10		10
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3,135				
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3600				
Q12h (J/g)	229				
Q41h (J/g)	317				

**• Caractéristiques chimiques (%)**

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
SiO <sub>2</sub>	20,80		S--	0,01	0,20	Insolubles	0,15	5,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,96		Cl-	0,06	0,10	CO <sub>2</sub>	0,10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,80		Perte au feu	1,41	5,00	CaO libre	0,63	
CaO	65,43		TiO <sub>2</sub>	0,23		Alcalins actifs	0,27	
MgO	0,89		MnO	0,06				
K <sub>2</sub> O	0,27		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,50				
Na <sub>2</sub> O	0,10		Non dosé	-0,31				
SO <sub>3</sub>	3,80	4,50						
<b>Total : 100</b>								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ : Caractéristique modifiée / fiche précédente ND : non dosé

Révision N° : 11 du 28/02/2005

Ingénieur Technico-commercial : **Jérôme LONGO**  
 Direction des Ventes Vallée de Seine  
 31, rue de Seine 94400 VITRY SUR SEINE  
 Téléphone : 01 47 18 36 46  
 Télécopie : 01 46 81 25 83  
 Site internet : www.lafarge-ciments.fr

Le Havre : livraison en vrac  
 Cormellies : livraison en vrac / sacs  
 Bonneuil : livraison en vrac  
 Wissous : livraison en vrac



**Ciments Calcia**  
Italcementi Group

Direction Industrielle  
et Technique  
Les Technodes  
B.P. 01  
78931 Guerville cedex

Direction Commerciale  
Assistance  
et Prescription Clients  
Tel : 01 34 77 79 81  
Fax : 01 30 98 73 50

Version de : 14/01/2005

N° certifiés CE : 0049-CPD-5203

Fiche produit de

**Villiers au Bouin**  
**CEM II/A-LL 32,5 R CE CP2 NF**

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Retrait en µm/m à 28j	eau pâte pure en %	Débit de prise en mm	Chaleur en J/g à 41h	Surface Blaine en cm <sup>2</sup> /g	Masse Volumique en g/cm <sup>3</sup>	Stabilité en mm	Maniabilité sur mortier CEN en s
1j	2j	7j	28j								
	23.2	38.8	48.9	600	26.1	179	287	3970	3.03	1.0	

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants		
Perte au feu	8.12	<b>Principaux</b>		<b>Nature</b>	<b>Caractéristiques</b>	
SiO <sub>2</sub>	17.93	Clinker (K) de Villiers	82.0	<b>Clinker (K) Villiers</b>	CaO/SiO <sub>2</sub>	3.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.74	Laitier (S)			MgO (%)	4.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.95	Cendres (V)			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4.62
TiO <sub>2</sub>	0.20	Calcaire (L)	18.0		S <sup>-</sup> (%)	nd
MnO	0.02	Fumées de silice (D)			Insoluble (%)	nd
CaO	61.30	<b>Secondaires</b>			C <sub>3</sub> S (%)	70.7
MgO	3.39	Calcaire (L)			C <sub>2</sub> S (%)	7.6
SO <sub>3</sub>	2.56	Fillers (F)			C <sub>3</sub> A (%)	8.2
K <sub>2</sub> O	0.59	Total	100.0		C <sub>4</sub> AF (%)	7.3
Na <sub>2</sub> O	0.16	<b>Sulfate de calcium</b>			<b>Laitier (S)</b>	Laitier vitreux (%)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	Gypse	4.0	(CAO+MgO)/SiO <sub>2</sub>		
S <sup>-</sup>	< 0.02	Anhydrite		<b>Cendres (V)</b>	CAO+MgO+SiO <sub>2</sub> (%)	
Cl <sup>-</sup>	0.01	<b>Additifs</b>			PF (%)	
Insoluble CEN	nd	Agens réducteur		CaO réactive (%)		
Na <sub>2</sub> O eq. actif	0.49	Sulfate de fer	0.15	SiO <sub>2</sub> réactive (%)		
Colorimétrie (W*)	66.21			<b>Calcaire (L)</b>	CaCO <sub>3</sub> (%)	87.29
					Adsorption bleu méthylène (g/100g)	0.76
					TOC (%)	0.11
				<b>Fumées de silice (D)</b>	SiO <sub>2</sub> amorphe (%)	
					PF (%)	
					Aire massique BET (m <sup>2</sup> /kg)	

Mouture	
Broyeurs(s)	1

Stockage	
Silo(s)	cf plan de stockage

Points de vente	Vrac	Sac
Usine de Villiers au Bouin	Oui	Oui

Valeurs moyennes année 2004 données à titre indicatif



Site local  
N° de téléphone  
78931 Guerville  
Tel : 01 34 77 79 81  
Fax : 01 30 98 73 50

SAJ au capital de 910 000,000 €  
SIREN 524 004 005 RCS - Nanterre

**• Constituants et composition du ciment**

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs sur sec (%)	
Clinker	35	Fillers Calcaire	2	Gypse	1,8	Agent de mouture AMA82	0,04
Laitier (S)	62	Fillers	1	Anhydrite	1,8	ou TDA7385	0,04
						Sels chlorés	0,55

**• Caractéristiques physiques et mécaniques**

	Valeur usine moyenne	Limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1)		Limites applicables à chacun des résultats (Réf : annexe 1 du règlement de certification NF002)	
		minimum	maximum	minimum	maximum
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	18,3	8		10	
Résistance à la compression 7 jours (MPa)	40				
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	57,9	40		40	
Retrait à 28 jours ( $\mu\text{m/m}$ )	910				
Début de prise (min)	200	50		60	
Stabilité (mm)	0,4		5		5
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3,05				
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4300				
Q 12h (J/g)	87				
Q 41h (J/g)	240				

**• Caractéristiques chimiques (%)**

MAXI : Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NF EN 197-1, NF P 15-318)

	Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI		Valeur usine moyenne	MAXI
SiO <sub>2</sub>	28,60		S-	0,53	0,70	Insolubles	0,44	5,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,80		Cl-	0,40	0,60	CO <sub>2</sub>	0,10	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,07		Perte au feu	1,41	5,00	CaO libre	0,38	
CaO	50,40		TiO <sub>2</sub>	0,25		Alcalins actifs	0,56	
MgO	5,40		MnO	0,17				
K <sub>2</sub> O	0,52		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18				
Na <sub>2</sub> O	0,22		Non dosé	-0,22				
SO <sub>3</sub>	2,27	4,50						
<b>Total : 100</b>								

Ces valeurs, extraites de notre autocontrôle, permettent de vérifier la conformité de notre produit aux spécifications normatives et donnent une indication pour les caractéristiques complémentaires. Elles ne constituent pas un engagement sur les résultats à venir.

■ : Caractéristique modifiée / fiche précédente ND : non dosé

Révision N° : 13 du 28/02/2005

 Ingénieur Technico-commercial : **Jérôme LONGO**

Direction des Ventes Vallée de Seine

31, rue de Seine 94400 VITRY SUR SEINE

Téléphone : 01 47 18 36 46

Télécopie : 01 46 81 25 83

Site internet : www.lafarge-ciments.fr

**Le Havre : livraison en vrac et en sacs**
**Bonneuil : livraison en vrac**
**Corneilles : livraison en vrac**
**Brest : livraison en vrac**



1.1-14

## CHRYSO® Fluid Optima 203

Plastifiant – Réducteur d'eau



### Descriptif

CHRYSO® Fluid Optima 203 est un plastifiant – réducteur d'eau à fonction Superplastifiant de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est particulièrement adapté pour l'obtention de long maintien d'ouvrabilité avec des ciments pour lesquels cette propriété est difficilement réalisable.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi.

CHRYSO® Fluid Optima 203 permet la réalisation des bétons auto-plaçants homogènes.

### Caractéristiques

- Nature : liquide
- Couleur : crème laiteux
- Densité  $1,04 \pm 0,01$
- pH :  $7 \pm 2$
- Teneur en ions  $\text{Cl}^-$  :  $\leq 0,1 \%$
- $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent :  $< 1,0 \%$
- Extrait sec :  $21,5 \pm 1$

### Contidionnement

Vrac  
Cubitainer  
Fût plastique de 215 L  
Tonnelet de 60 L

### Conformité

CHRYSO® Fluid Optima 203 est un plastifiant haut réducteur d'eau qui satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site internet.

CHRYSO® Fluid Optima 203 est également conforme au référentiel de certification NF-085, dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF-EN 934-2.

Adresse AFVOT – 11 avenue F. de Pressensé – 92571 Saint Denis La Plaine Cedex

### Applications

#### Domaines d'application

- B.P.E.
- B.H.P., B.T.H.P.
- Bétons plastiques ou fluides
- Bétons auto-plaçants

#### Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,3 à 3 kg pour 100 kg de ciment.

CHRYSO® Fluid Optima 203 peut être utilisé dans l'eau de gâchage ou en différé sur le béton.

Utilisé en temps que "fluidifiant", il est nécessaire de malaxer à grande vitesse 1 mn par  $\text{m}^3$  de béton (avec un minimum total de 6 mn).

### Précautions

Stocker à l'abri du gel.

En cas de gel, le produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation est nécessaire.

Conditionnement et stockage en matériaux plastiques, hors PVC.

Durée de vie : 9 mois.



1.6-7

## CHRYSO® Air D

### Entraîneur d'air



#### Descriptif

CHRYSO® Air D est un entraîneur d'air permettant la formation de microbulles d'air stables dans les bétons et mortiers.

Dans le béton frais, CHRYSO® Air D provoque un effet plastifiant, ainsi qu'une réduction d'eau à plasticité constante. Il limite la ségrégation et diminue, voire supprime, tout ressuage.

Le réseau de bulles uniformément réparti diminue les phénomènes de capillarité.

Ce produit a été élaboré pour limiter les risques d'erreurs dus aux surdosages.

#### Caractéristiques

- Nature : liquide
- Densité :  $1,005 \pm 0,005$
- Couleur : jaune
- pH :  $9 \pm 2$
- Point de congélation :  $-1^{\circ} \text{C}$  environ
- Teneur en ions  $\text{Cl}^-$  :  $\leq 0,1 \%$
- $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent :  $\leq 0,5 \%$
- Extrait sec (EN 480-8) :  $2,05 \pm 0,15 \%$
- Extrait sec (halogène) :  $2,00 \pm 0,15 \%$

#### Conditionnement

Vrac  
Fûts de 215 L  
Tonnelets de 60 L

#### Conformité

CHRYSO® Air D est un entraîneur d'air qui satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site internet.

CHRYSO® Air D est également conforme au référentiel de certification NF085, dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.

#### Applications

##### Domaines d'application

- Tous types de ciments.
- Dalles d'autoroutes, pistes d'aéroports.
- Barrages, réservoirs.
- Ouvrages d'art, ouvrages à la mer.
- Correction de la granulométrie des sables naturels pauvres en fines.
- Bétons exposés au gel.
- Bétons extrudés.

##### Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,08 à 0,8 kg pour 100 kg de ciment. Il est courant de doser ce produit à 0,3 % du poids du ciment.

CHRYSO® Air D est totalement miscible à l'eau. Il doit être incorporé préalablement à l'eau de gâchage ou sur les granulats. La quantité d'eau doit être déterminée en fonction de la plasticité souhaitée.

L'efficacité maximale de CHRYSO® Air D doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.

L'air entraîné est essentiellement un granulats fin fictif. On doit le considérer comme tel et effectuer les réductions de sable correspondant au volume supplémentaire d'air entraîné.

Le taux d'air entraîné total doit être vérifié périodiquement dans les bétons car il varie avec la nature des granulats et le rapport E/C.

#### Précautions

En cas de gel, le produit conserve ses propriétés une fois dégelé et homogénéisé par agitation légère.

Durée de vie : 18 mois.

#### Essais

Exemple de résultats obtenus selon les modalités définies par la norme ISO 4848 en matière d'air occlus. Béton à base de CEM I 42,5 (SSB :  $3200-4000 \text{ cm}^3/\text{kg}$  et  $\text{C}_2\text{A}$  : 7-11 %).

Essais réalisés à consistance égale.

	Consistance	Air occlus en %	Résistance (MPa à 28j)
Témoin	Slurp 5cm	1,6	33,3
Témoin + 0,2% CHRYSO® Air D	slurp 5cm	5,2	35,2



## Annexe I- 2. Lissage de l'histogramme

La distribution gaussienne d'une variable «  $x_m$  » quelconque est caractérisée par deux paramètres statistiques : l'espérance mathématique «  $\mu$  » et la variance «  $\sigma^2$  » dont la fonction de la densité probable est définie par :

$$f(x_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_m - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{A.1})$$

Soit  $\mu$  et  $\sigma$  sont respectivement la moyenne arithmétique et l'écart type de la distribution expérimentale obtenue par le lissage de l'histogramme ;  $x_m$  et  $\Delta x$  (Figure A.I- 1) sont respectivement valeur numérique de la variable qui suit cette distribution et l'intervalle de variation de  $x_m$  avec laquelle on a déterminé l'histogramme. La fréquence théorique correspondante en supposant que cette variable suivant la distribution gaussienne peut être calculée de manière approximative par :

$$F(x_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_m - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \times \Delta x \quad (\text{A.2})$$

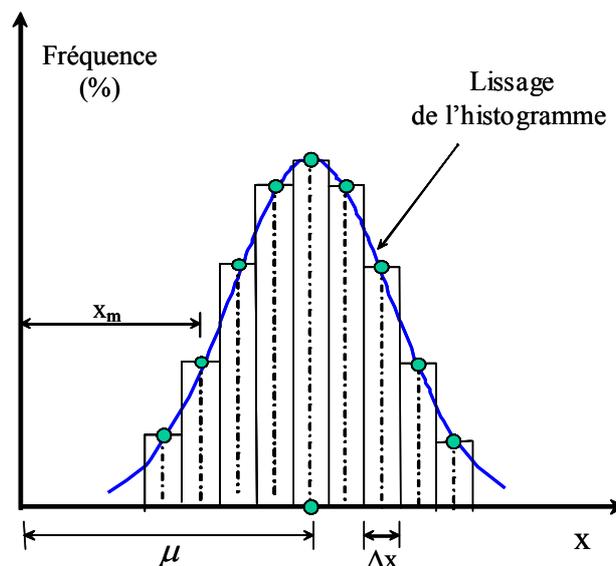


Figure A.I- 1-Lissage de l'histogramme

Annexe I- 3. **Dosage réel des bétons expérimentaux**

N°	Granulat 10/20	Granulat 04/10	Granulat 0/4	Pulvérulent	Eau ajout	Adjuvant1	Adjuvant2
1		977	880	383	127	2,00	
2		977	877	377	106	2,00	
3		973	890	385	149	1,97	
4		960	873	383	163	2,00	
5	743	190	910	351	133	1,47	
6	717	207	890	361	109	1,50	
7	727	210	903	363	154	1,47	
8		977	900	374	138	1,97	
9		970	910	365	118	1,90	
10		977	900	377	161	1,97	
11		980	917	377	141	1,97	
12		763	987	439	137	4,27	0,20
13		767	960	445	159	4,23	0,27
14		763	963	444	142	4,30	0,20
15		767	970	452	142	4,27	0,23
16	737	190	910	353	134	1,47	
17	727	210	900	363	128	1,50	
18	790	180	890	363	129	1,80	
19	773	140	893	365	93	1,80	
20	787	140	880	375	111	1,77	
21	777	190	890	359	111	1,80	
22	797	143	897	371	113	1,77	
23		980	917	379	142	1,90	
24		980	903	371	130	1,97	
25		983	913	375	160	1,97	
26		757	977	437	139	4,30	0,23
27		767	963	445	146	4,23	0,20
28		777	957	445	150	4,27	0,23
29		770	973	446	147	4,27	0,20
30		763	973	436	146	4,30	0,27
31		773	987	454	154	4,27	0,20
32		763	970	440	146	4,27	0,23
33		753	977	453	136	4,23	0,20
34	740	210	923	363	127	1,50	
35	733	207	897	356	117	1,50	
36	693	267	897	369	127	1,90	
37	683	263	897	376	134	1,87	
38		983	873	375	127	2,00	
39		963	867	384	145	2,00	
40		970	887	376	117	1,97	
41		967	877	383	145	1,97	
42		987	910	373	141	1,93	
43		947	920	375	156	1,97	
44		980	917	379	123	1,97	
45		987	917	377	138	1,93	
46		940	900	352	128	1,60	0,43
47		940	920	351	111	1,63	0,40
48		933	920	354	145	1,60	0,43
49		943	900	352	126	1,60	0,40

Tableau A.I- 1-Pesées pour 1 m<sup>3</sup> de béton

N°	Humidité 10/20	Humidité 4/10	Humidité 0/4	Absorption 10/20	Absorption 4/10	Absorption 0/4
1		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
2		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
3		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
4		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
5	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
6	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
7	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
8	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
9		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
10		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
11		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
12		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
13		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
14		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
15		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
16	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
17	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
18	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
19	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
20	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
21	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
22	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
23	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
24		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
25		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
26		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
27		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
28		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
29		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
30		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
31		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
32		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
33		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
34	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
35	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
36	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
37	1,23 %	2,60 %	5,60 %	1,39 %	1,98 %	0,54 %
38		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
39		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
40		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
41		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
42		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
43		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
44		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
45		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
46		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
47		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
48		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %
49		2,60 %	5,60 %		1,98 %	0,54 %

Tableau A.I- 2-Humidité et absorption utilisées pour déterminer des consignes.

## Annexe I- 4. Méthode d'analyse de l'homogénéité

Avant d'être prélevé, le mélange granulaire a été malaxé pendant une vingtaine de secondes. Le brassage des pales du malaxeur ainsi que les mouvements relatifs des matériaux permettent de former un mélange granulaire dont les petits grains enrobent bien les gros grains. Pour un volume représentatif, la présence d'une classe granulaire quelconque est probablement égale dans toutes les positions du malaxeur. A l'échelle de taille de l'échantillon (environ de 1kg – 4kg), on suppose que ce mélange est parfaitement homogène.

La fraction granulaire de la classe « i » dans le malaxeur est déterminée par :

$$G_i^k = \lambda_i^k \text{GRA}^k \quad (\text{A.3})$$

où  $\text{GRA}^k$  : quantité du mélange sec de la gâchée « k » dans le malaxeur  
 $\text{gra}_j^k$  : quantité du mélange sec « k » de l'échantillon « j » ( $j = 1 - 3$ )  
 $\lambda_i^k$  : fraction de la classe « i » dans le malaxeur, gâchée « k »

Dans un échantillon « j », la fraction granulaire est déterminée par tamisage, peu différente de l'un à l'autre échantillon :

$$g_{ij}^k = \alpha_{ij}^k \text{gra}_j^k \quad (\text{A.4})$$

où  $\alpha_{ij}^k$  : fraction de la classe « i » de l'échantillon « j », gâchée « k »  
 $G_i^k$  : quantité de la classe « i » dans le malaxeur, gâchée « k »  
 $g_{ij}^k$  : quantité de la classe « i » dans l'échantillon « j », gâchée « k »

Supposant que l'opération d'échantillonnage ne perturbe pas de manière notable l'homogénéité du mélange, on obtient:

$$\alpha_{ij}^k = \lambda_i^k + \delta\alpha_{ij}^k \quad (\text{A.5})$$

Avec  $\delta\alpha_{ij}^k$  : perturbation de  $\lambda_i^k$  dans l'échantillon « j »

Du fait que tous les échantillons sont réalisés au moyen d'un même préleveur, d'un même opérateur, certaines fois «  $\alpha_{ij}^k$  » est supérieur à «  $\lambda_i^k$  », et d'autres fois inférieures. Alors «  $\delta\alpha_{ij}^k$  » sont fluctués au tour de « 0 ». On peut donc poser une hypothèse que toutes ces perturbations «  $\delta\alpha_{ij}^k$  » sont des réalisations concrètes d'une seule variable aléatoire centrée «  $\delta\alpha_i$  ». Deux caractéristiques de cette variable sont les suivantes :

$$\text{Espérance : } E(\delta\alpha_i) = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\text{Variance : } \text{Var}(\delta\alpha_i) = \sigma^2 [\delta\alpha_i]$$

Au cas où trois prélèvements sont réalisés, on obtient 3 valeurs «  $\alpha_{ij}^k$  » écartées de quantités «  $\delta\alpha_{ij}^k$  » vis à vis de la valeur réelle «  $\lambda_i^k$  ». La meilleure estimation de «  $\lambda_i^k$  » est la moyenne de ces trois valeurs «  $\alpha_{ij}^k$  ». Alors, on peut définir «  $\lambda_i^{E_k}$  » estimateur de «  $\lambda_i^k$  » de manière :

$$\lambda_i^{E_k} = \frac{1}{3}(\alpha_{i1}^k + \alpha_{i2}^k + \alpha_{i3}^k) = \lambda_i^k + \frac{1}{3}(\delta\alpha_{i1}^k + \delta\alpha_{i2}^k + \delta\alpha_{i3}^k) \quad (\text{A.7})$$

En posant :  $\delta\lambda_i^{E_k} = \frac{1}{3}(\delta\alpha_{i1}^k + \delta\alpha_{i2}^k + \delta\alpha_{i3}^k)$ , ce terme peut être exprimé comme la perturbation de l'estimation «  $\lambda_i^k$  » par «  $\lambda_i^{E_k}$  » dans la gâchée « k ». Du fait que tous les «  $\delta\alpha_{ij}^k$  » sont générés de manière aléatoire par une seule source «  $\delta\alpha_i$  », normale, centrée, «  $\delta\lambda_i^{E_k}$  » sont aussi interprété comme des réalisations concrètes d'une variable «  $\delta\lambda_i^E$  » qui suit une loi normale centrée  $N(0; \sigma[\delta\lambda_i^E])$ . La variance de cette variable «  $\delta\lambda_i^E$  » est déterminée facilement :

$$\sigma^2[\delta\lambda_i^E] = \frac{1}{3} \sigma^2[\delta\alpha_i] \quad (\text{A.8})$$

Selon les propriétés d'une distribution gaussienne, dans 95% des cas, l'expression (A.7) devient :

$$|\lambda_i^{E_k} - \lambda_i^k| \leq 2\sigma[\delta\lambda_i^E] \quad (\text{A.9})$$

On considère donc la valeur  $2\sigma[\delta\lambda_i^E]$  comme la précision  $\text{Pr}(\lambda_i)$  de la méthode de prélèvement par la trappe pour estimer la fraction granulaire réelle «  $\lambda_i$  » dans le malaxeur :

$$\text{Pr}(\lambda_i) = 2\sigma[\delta\lambda_i^E] = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma[\delta\alpha_i] \quad (\text{A.10})$$

Comment peut-on déterminer  $\sigma[\delta\alpha_i]$  et puis  $\text{Pr}(\lambda_i)$  ?

Pour une gâchée « k » quelconque, on définit la différence entre deux échantillons de la manière suivante :

$$\varepsilon_{i1}^k = \alpha_{i2}^k - \alpha_{i1}^k = \delta\alpha_{i2}^k - \delta\alpha_{i1}^k \quad (\text{A.11})$$

$$\varepsilon_{i2}^k = \alpha_{i3}^k - \alpha_{i2}^k = \delta\alpha_{i3}^k - \delta\alpha_{i2}^k$$

Toutes les valeurs «  $\alpha_{ij}^k$  » sont obtenues par le tamisage permettant de déterminer expérimentalement «  $\sigma^2[\varepsilon_i]$  ». De plus, des réalisations «  $\delta\alpha_{ij}^k$  » et donc «  $\varepsilon_{ij}^k$  » dans (A.11) sont générées par deux variables aléatoires «  $\varepsilon_i$  » et «  $\delta\alpha_i$  » conduisant à :

$$\sigma^2[\delta\alpha_i] = \frac{1}{2} \sigma^2[\varepsilon_i] \quad (\text{A.12})$$

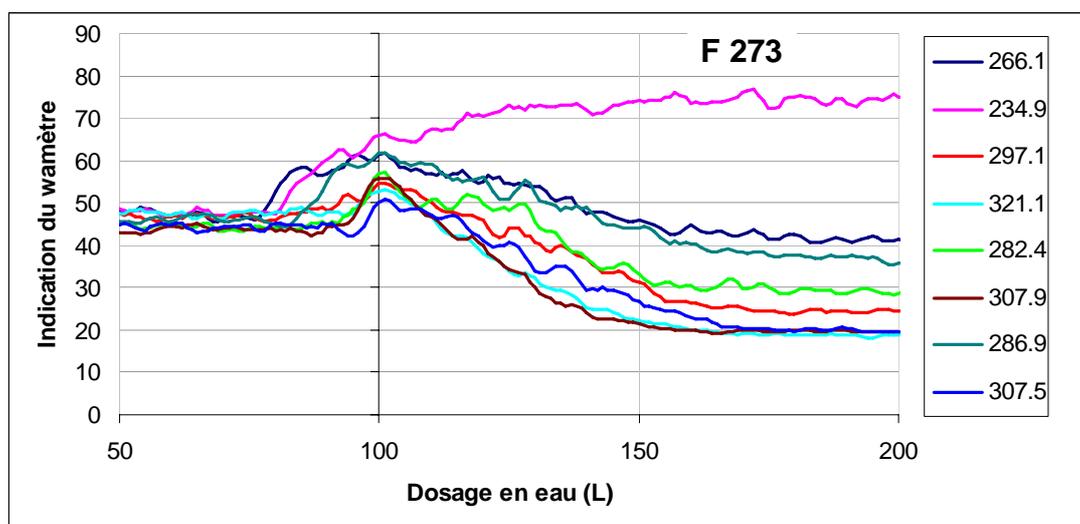
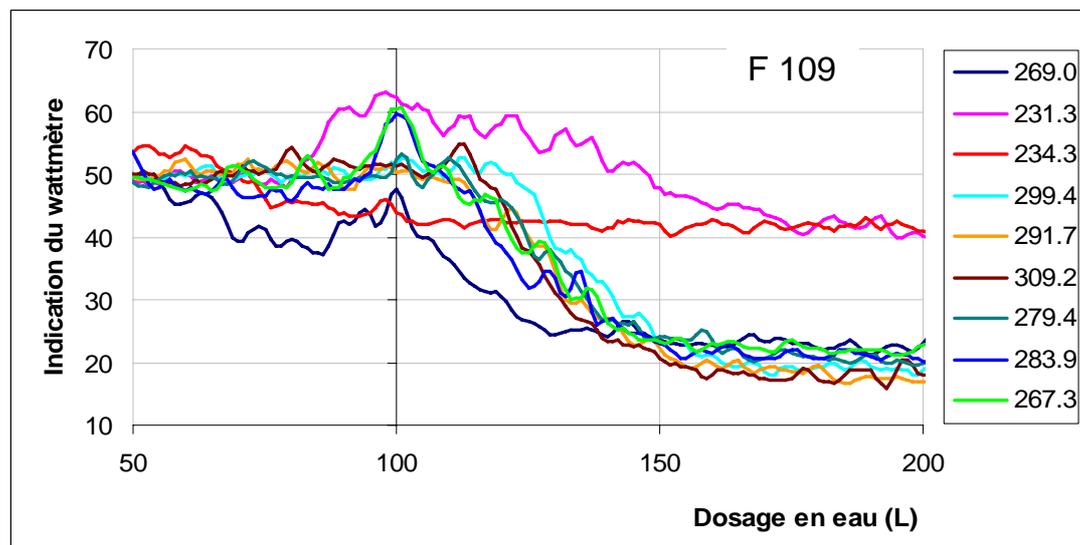
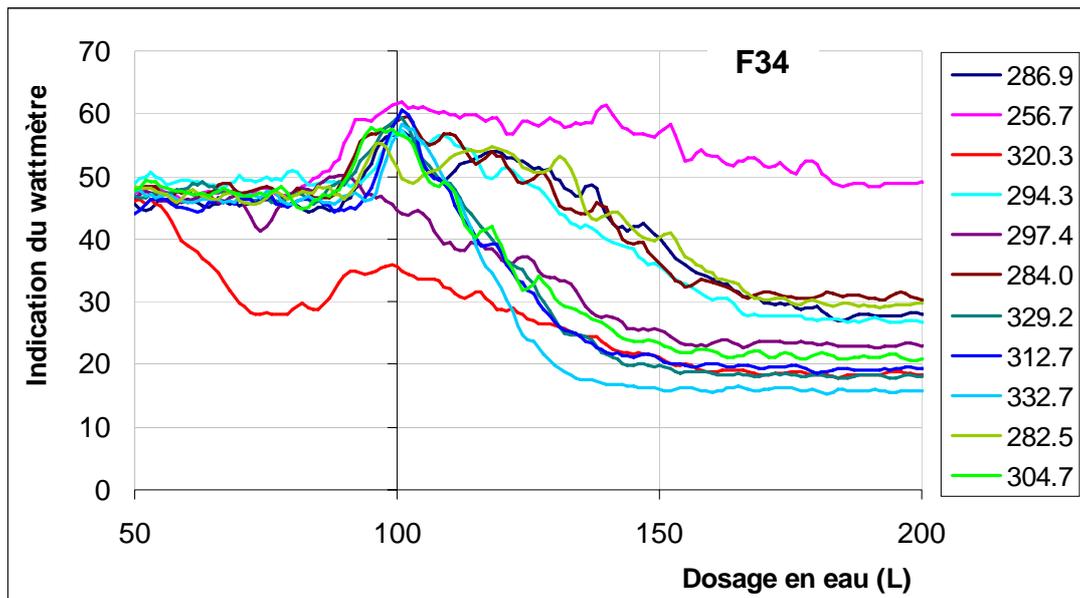
Finalement, la précision de la méthode de prélèvement dans l'estimation de la fraction granulaire «  $\lambda_i$  » est de :

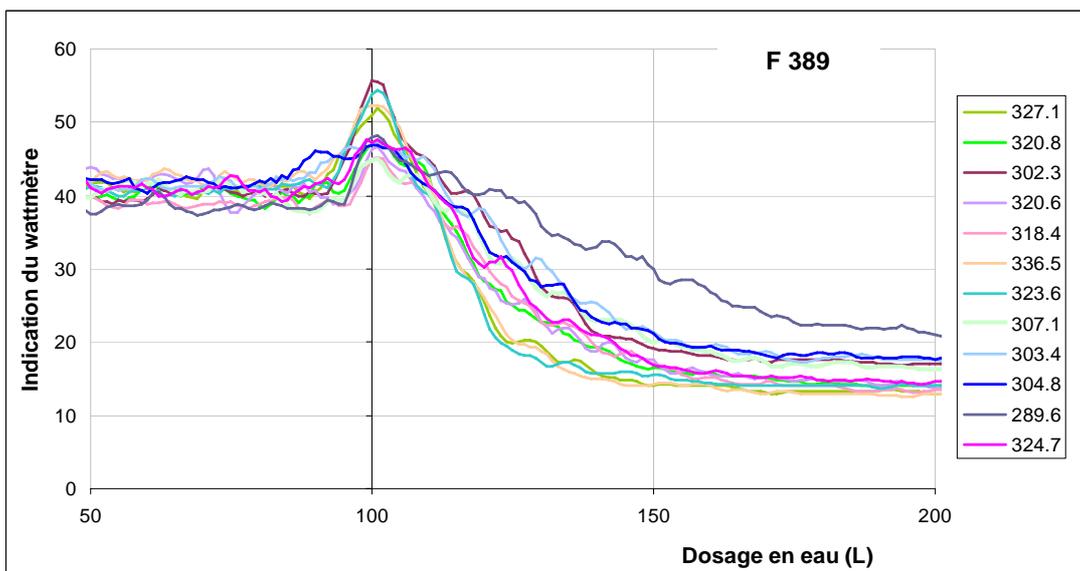
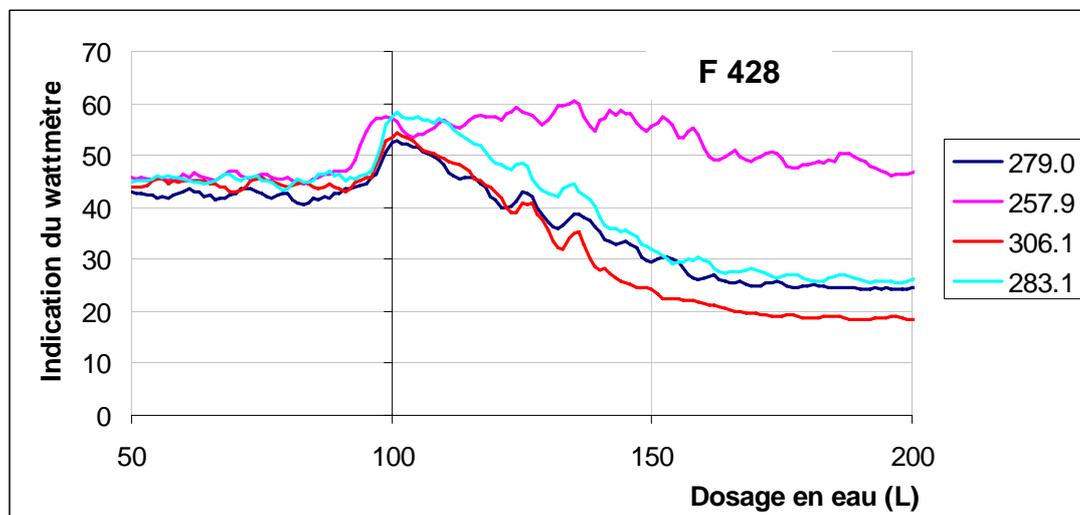
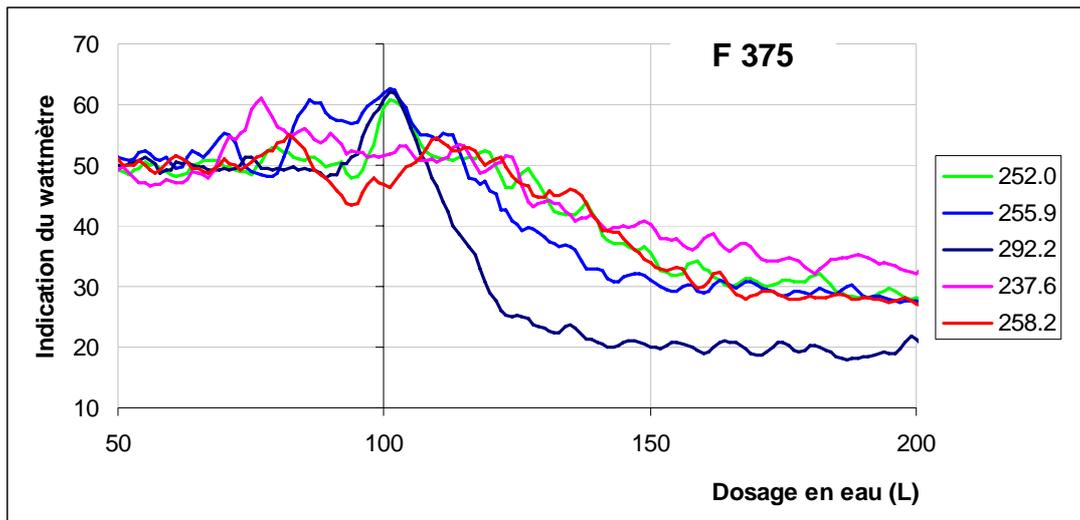
$$\text{Pr}(\lambda_i) = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma[\varepsilon_i] \quad (\text{A.13})$$

Annexe I- 5. **Humidité obtenus par séchage des bétons frais**

N°	Formule	Echantillon 1	Echantillon 2	N°	Formule	Echantillon 1	Echantillon 2
1	34	8,61 %	8,56 %	36	389	9,49 %	9,39 %
2	34	8,08 %	8,01 %	37	389	9,58 %	9,19 %
3	34	9,31 %	9,28 %	38	389	9,92 %	9,91 %
4	34	8,96 %	8,84 %	39	389	-	9,71 %
5	34	9,17 %	8,68 %	40	389	10,00 %	10,04 %
6	34	8,54 %	8,33 %	41	389	9,80 %	9,70 %
7	34	9,41 %	9,62 %	42	389		
8	34	9,19 %	9,17 %	43	389	8,96 %	9,58 %
9	34	9,85 %	9,83 %	44	389	9,56 %	9,94 %
10	34	8,41 %	8,14 %	45	389	8,90 %	9,22 %
11	34	8,99 %	9,15 %	46	428	8,92 %	9,21 %
12	109	8,38 %	8,18 %	47	428	7,84 %	7,92 %
13	109	7,81 %	7,81 %	48	428	9,08 %	9,27 %
14	109	8,48 %	8,26 %	49	428	8,58 %	8,40 %
15	109	9,07 %	8,84 %				
16	109	8,42 %	8,45 %				
17	109	8,53 %	8,59 %				
18	109	8,27 %	8,40 %				
19	273	7,96 %	6,77 %				
20	273	7,12 %	7,11 %				
21	273	8,99 %	9,56 %				
22	273	9,80 %	9,74 %				
23	273	8,45 %	8,32 %				
24	273	9,27 %	9,18 %				
25	273	8,09 %	7,95 %				
26	273	9,04 %	9,19 %				
27	285	8,09 %	8,13 %				
28	285	8,59 %	8,57 %				
29	375	7,72 %	8,37 %				
30	375	7,56 %	8,19 %				
31	375	7,68 %	7,94 %				
32	375						
33	375	8,07 %	7,77 %				
34	389	8,85 %	8,82 %				
35	389	9,91 %	10,00 %				

Tableau A.I- 3-Humidités des échantillons obtenus par séchage

Annexe I- 6. **Courbes de wattmètre des bétons expérimentés**



Annexe I- 7. **Données des mesures du wattmètre et des humidités du béton**

N°	Formule	Wattmètre	Humidité du béton	Affaissement / Etalement (cm)
1	34	31,4	8,9%	3,3
2	34	52,3	8,0%	1,0
3	34	19,5	9,9%	17,3
4	34	28,8	9,1%	4,3
5	34	24,0	9,2%	7,0
6	34	31,6	8,9%	3,5
7	34	18,3	10,2%	16,2
8	34	19,7	9,8%	15,5
9	34	16,1	10,5%	20,5
10	34	34,2	8,8%	4,3
11	34	21,6	9,5%	15,7
12	109	24,9	8,5%	17,7
13	109	41,6	7,4%	4,6
14	109	19,5	9,5%	22,4
15	109	18,1	9,7%	22,5
16	109	21,2	8,9%	21,5
17	109	21,5	9,0%	20,7
18	109	22,6	8,6%	18,2
19	273	42,9	8,3%	3,5
20	273	74,4	7,3%	0,5
21	273	25,5	9,2%	11,3
22	273	19,4	10,1%	18,2
23	273	30,4	8,9%	4,0
24	273	19,7	9,8%	13,7
25	273	38,7	8,6%	3,2
26	273	21,4	9,7%	14,7
27	285	23,4	8,9%	18,6
28	285	22,9	9,1%	18,3
29	375	19,9	9,3%	24,5
30	375	40,3	7,7%	7,0
31	375	30,9	8,1%	13,5
32	375	30,3	8,1%	13,2
33	375	29,8	8,2%	14,6
34	389	24,8	9,3%	36,0
35	389	15,5	10,5%	53,0
36	389	18,8	9,9%	42,0
37	389	18,7	9,8%	44,0
38	389	17,6	9,8%	45,0
39	389	15,3	10,5%	53,0
40	389	13,5	10,7%	55,0
41	389	15,3	10,4%	59,5
42	389	14,5	10,4%	58,0
43	389	13,3	10,8%	58,5
44	389	14,1	10,6%	57,8
45	389	17,6	10,0%	50,0
46	428	30,4	9,0%	13,6
47	428	49,6	8,2%	2,5
48	428	20,2	9,8%	21,2
49	428	27,9	9,1%	11,5

Annexe I- 8. **Simulation de l'effet de correction du dosage en eau**1. Correction avec la mesure de la première gâchée

Le mode de calcul respecte ce qu'on a développé théoriquement. Le tableau ci-après résume la procédure de simulation (Tableau A.I- 4). Afin d'exprimer l'effet imprécis dans la mesure de l'eau totale, on ajoute un terme qui génère des fluctuations aléatoires. Pour l'eau théorique, on doit additionner à l'eau fixée par la formule un terme qui exprime l'eau absorbée de granulats, une quantité souvent ajoutée dans la phase de calcul des consignes en centrale.

$$E_{tti} = E_{mesuré i} + N(0 ; \sigma_{watt}) - \Delta E_i \quad (A.14)$$

$$E_{t0} = E_{théo} + E_{abs} \quad (A.15)$$

d'où :

$E_{mesuré i}$  : Eau totale de la gâchée « i » mesurée par le wattmètre ;

$\Delta E_i$  : Eau ajouter par le centralier dans la gâchée « i » ;

$N(.)$  : générateur aléatoire de l'effet de mesure par le wattmètre.

$\sigma_{watt}$  : erreur de répétitivité du wattmètre (2,5L/m<sup>3</sup>)

$E_{théo}$  : eau fixée par la formule théorique

$E_{abs}$  : eau absorbable par les granulats

N° gâchée	Correction actuelle	$E_{total}$	Ecart avec correction	Ecart moyen	Prochaine correction
1	0	$E_{tt1}$	$\Delta E_{tt1} = E_{tt1} - E_{t0}$	$\Delta E_{tt1}$	
2	$\Delta E_{aj}$	$E_{tt2}$	$\Delta E_{tt2} = E_{tt2} - E_{t0}$	$1/2(\Delta E_{tt1} + \Delta E_{tt2})$	$\Delta E_{aj} = -\frac{n}{n-1} \Delta E_{tt1}$
....	....	....	....	....	
n	$\Delta E_{aj}$	$E_{ttn}$	$\Delta E_{ttn} = E_{ttn} - E_{t0}$	$1/n(\Delta E_{tt1} + \dots + \Delta E_{ttn})$	

Tableau A.I- 4- Mode correction sur mesure de la première gâchée

2. Correction avec la mesure des gâchées précédentes

Une simulation est aussi appliquée aux données expérimentales qu'on a réalisées avec le premier mode de correction. La procédure de calcul est présentée dans le tableau (Tableau A.I- 5).

N°	Corr. actuelle	$E_{total}$	Ecart avec correction	Ecart sans correction	Ecart moyen	Prochaine correction
1	0	$E_{tt1}$	$\Delta E_{tt1} = E_{tt1} - E_{t0}$	$\delta e_{tt1} = \Delta E_{tt1} - 0$	$\Delta E_{m1} = \Delta E_{tt1}$	$\Delta E_{aj2} = -\left(\delta e_{tt1} + 1 \frac{\Delta E_{m1}}{n-1}\right)$
2	$\Delta E_{aj2}$	$E_{tt2}$	$\Delta E_{tt2} = E_{tt2} - E_{t0}$	$\delta e_{tt2} = \Delta E_{tt2} - \Delta E_{aj2}$	$\Delta E_{m2} = 1/2(\Delta E_{tt1} + \Delta E_{tt2})$	$\Delta E_{aj3} = -\left(\delta e_{tt2} + 2 \frac{\Delta E_{m2}}{n-2}\right)$
...	....	....	....	....	....	....
n	$\Delta E_{aj n}$	$E_{ttn}$	$\Delta E_{ttn} = E_{ttn} - E_{t0}$	$\delta e_{ttn} = \Delta E_{ttn} - \Delta E_{aj n}$	$\Delta E_{m n} = 1/n(\Delta E_{tt1} + \dots + \Delta E_{ttn})$	

*Tableau A.I- 5-Mode de correction sur les mesures des gâchées précédentes*

Il s'agit de fabriquer la première gâchée sans correction. Ensuite, les écarts d'eau avec correction, sans correction, l'écart moyen dans la toupie est calculé à la fin de chaque gâchée. La quantité d'eau de correction pour la prochaine gâchée sera proposée en fonction de l'écart sans correction de la gâchée actuelle et de l'écart d'eau total actuel dans la toupie.

## Annexe I- 9. Reconstitution des paramètres

On a calculé donc les moyennes, les écarts types pour le variable « y ». On devrait convertir maintenant ces résultats en variable « x ». On va développer mathématiquement les formules permettant cette transformation.

$$y = \frac{x}{1+x} \quad (\text{A.16})$$

Réciproquement, on en déduit:

$$x = \frac{y}{1-y} = \frac{y}{1-\bar{y} + (\bar{y}-y)} \quad (\text{A.17})$$

La quantité  $(\bar{y}-y)$  est très petit vis à vis 1 (d'environ 50-1000 fois), on peut donc utiliser l'approximation par la différentielle :

$$x \approx \frac{y}{1-\bar{y}} + \frac{y(\bar{y}-y)}{(1-\bar{y})^2} = \frac{y}{1-\bar{y}} + \frac{y^2 - y\bar{y}}{(1-\bar{y})^2} \quad (\text{A.18})$$

En moyennant (A.18), on a équation suivante :

$$\bar{x} \approx \frac{\bar{y}}{1-\bar{y}} + \frac{\bar{y}^2 - \bar{y}^2}{(1-\bar{y})^2} = \frac{\bar{y}}{1-\bar{y}} + \frac{\sigma_y^2}{(1-\bar{y})^2} \quad (\text{A.19})$$

qui permet de calculer la moyenne de « x » à partir de moyenne et l'écart type de « y ».

En ce qui concerne l'écart type, on prend la différentielle de l'équation (A.17) :

$$dx = d\left(\frac{y}{1-y}\right) = \frac{dy}{(1-y)^2} \quad (\text{A.20})$$

En considérant que la fluctuation des humidités au tour du point moyenne  $(\bar{x}; \bar{y})$  est petite, on peut prendre :

$$dx = x - \bar{x} \text{ et } dy = y - \bar{y} \quad (\text{A.21})$$

La différence infinitésimale de « x » au tour de sa moyenne est donc déterminée par :

$$x - \bar{x} = \frac{y - \bar{y}}{(1-\bar{y})^2} \quad (\text{A.22})$$

Ou bien encore :

$$(x - \bar{x})^2 = \frac{(y - \bar{y})^2}{(1-\bar{y})^4} \quad (\text{A.23})$$

En moyennant cette équation, on détermine la relation l'écart type entre deux humidités « x » et « y » :

$$\sigma^2[x] = \frac{\sigma^2[y]}{(1-\bar{y})^4} \quad (\text{A.24})$$

Annexe I- 10. **Incertitude de la covariance**

Soit A et B deux variables aléatoire donc l'espérance et la variance sont respectivement «  $A_0$  », «  $B_0$  » et  $\sigma^2[A]$ ,  $\sigma^2[B]$ . Il s'agit que pour chaque réalisation, on a :

$$\begin{aligned} A_i &= A_0 + \delta A_i \\ B_i &= B_0 + \delta B_i \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

Ces deux variables «  $\delta A$  » et «  $\delta B$  » ont des espérances nulles et les variances  $\sigma^2[A]$ ,  $\sigma^2[B]$ .

Dans un premier temps, on calcule la covariance empirique entre deux variables A et B selon la formule suivante :

$$Cov(A, B) = \overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B} \quad (\text{A.26})$$

On va estimer l'écart type de la distribution de cette covariance. On explicite tout d'abord les termes dans (A.26)

$$\begin{aligned} \overline{AB} &= \overline{(A_0 + \delta A_i)(B_0 + \delta B_i)} = \overline{A_0 B_0 + A_0 \delta B + B_0 \delta A + \delta A \delta B} \\ &= A_0 B_0 + A_0 \overline{\delta B} + B_0 \overline{\delta A} + \overline{\delta A \delta B} \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

En terme l'espérance mathématique, on a  $E(\overline{\delta A}) = E(\overline{\delta B}) = 0$ . Ce qui conduit à :

$$E(\overline{AB}) = A_0 B_0 + E(\overline{\delta A \delta B}) \quad (\text{A.28})$$

En prenant (A.27)-(A.28), on a :

$$\overline{AB} - E(\overline{AB}) = A_0 \overline{\delta B} + B_0 \overline{\delta A} + \overline{\delta A \delta B} - E(\overline{\delta A \delta B}) \quad (\text{A.29})$$

Pour le terme du produit de deux moyennes, on a :

$$\begin{aligned} \bar{A} \cdot \bar{B} &= \overline{(A_0 + \delta A)} \cdot \overline{(B_0 + \delta B)} = \overline{(A_0 + \delta A)(B_0 + \delta B)} \\ &= A_0 B_0 + A_0 \overline{\delta B} + B_0 \overline{\delta A} + \overline{\delta A \delta B} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

Au niveau de l'espérance mathématique, on a :

$$E(\bar{A} \cdot \bar{B}) = A_0 B_0 + E(\overline{\delta A \delta B}) \quad (\text{A.31})$$

En prenant (A.30)-(A.31), on a :

$$\bar{A} \cdot \bar{B} - E(\bar{A} \cdot \bar{B}) = A_0 \overline{\delta B} + B_0 \overline{\delta A} + \overline{\delta A \delta B} - E(\overline{\delta A \delta B}) \quad (\text{A.32})$$

On remarque, lors que « n » est suffisamment grand, on a :

$$\overline{\delta A} \approx 0 \quad \text{et} \quad \overline{\delta B} \approx 0$$

Alors :  $\overline{\delta A} \cdot \overline{\delta B} \approx 0$  donc,  $E(\overline{\delta A \delta B}) \approx 0$

On peut donc avoir une approximation :

$$\bar{A} \cdot \bar{B} - E(\bar{A} \cdot \bar{B}) \approx A_0 \overline{\delta B} + B_0 \overline{\delta A} \quad (\text{A.33})$$

En prenant (A.32)-(A.33), on a finalement :

$$\overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B} - E(\overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B}) \approx \overline{\delta A \delta B} - E(\overline{\delta A \delta B}) \quad (\text{A.34})$$

Ou bien :

$$E[\overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B} - E(\overline{AB} - \bar{A} \cdot \bar{B})]^2 \approx E[\overline{\delta A \delta B} - E(\overline{\delta A \delta B})]^2 \quad (\text{A.35})$$

Selon (A.26), l'équation (A.35) exprime la variance de la covariance entre A et B :

$$\sigma^2[Cov(A, B)] \approx E[\overline{\delta A \delta B} - E(\overline{\delta A \delta B})]^2 = \sigma^2[\overline{\delta A \delta B}] = \frac{\sigma^2[\delta A \delta B]}{n} \quad (\text{A.36})$$

La variance  $\sigma^2[\delta A \delta B]$  peut être estimée de manière expérimentale. En effet, on possède « n » réalisations de « A » et « B ». Ce qui permet d'estimer «  $A_0$  » et «  $B_0$  » par les moyennes arithmétiques, on peut calculer donc :

$$Z_i = (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B}) \quad (\text{A.37})$$

La variance  $\sigma^2[\delta A \delta B]$  est déterminée simplement par :

$$\sigma^2[\delta A \delta B] = \frac{\sigma^2[Z]}{n} = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{n} \sum_i Z_i^2 - \bar{Z}^2 \right) \quad (\text{A.38})$$

Finalement, on peut estimer la variance de la Cov(A,B) :

$$\sigma^2[\text{Cov}(A, B)] = \frac{\sigma^2[Z]}{n} \quad (\text{A.39})$$

d'où  $Z = (A - \bar{A})(B - \bar{B})$

La partie droite est utilisée comme l'incertitude liée à l'estimation de la covariance entre deux variables aléatoires mais pas indépendant.

$$s[\text{Cov}(A, B)] = \frac{\sigma[Z]}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.40})$$

## Annexe II- 1. Etalonnage du malaxeur et du variateur

La vitesse de rotation de l'arbre du moteur est mesurée à l'aide d'un tachymètre étalonné de précision +/- 2tr/mn.

Fréquence du courant d'alimentation (Hz)	Vitesse de rotation de l'arbre du moteur (tr/mn)
20,7	609
25	736
30	884
35	1036
40	1184
45	1333
50	1481

Tableau A.II- 1-Données d'étalonnage de vitesse du malaxeur

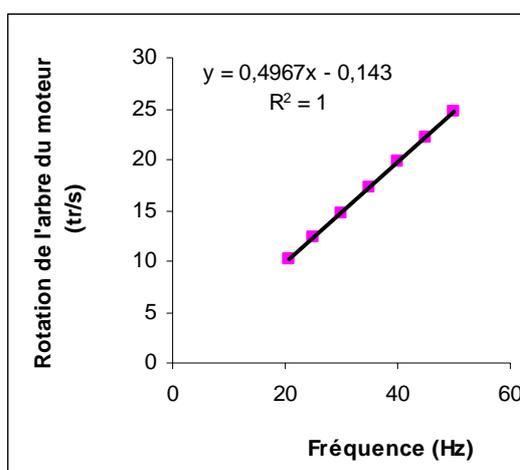


Figure A.II- 1-Relation entre la vitesse de rotation mesurée sur l'arbre du moteur et la fréquence du courant d'alimentation

Le rapport entre la vitesse de rotation de l'arbre du moteur et celle du racleur est de 40 (valeur donnée par Couvrot). Le rapport entre la vitesse de rotation du train valseur et celle du racleur est obtenu par le comptage à 25 Hz.

Temps (s)	Nombre de tours du train valseur	Nombre de tours du racleur	Rapport de vitesse
82	100	24	4,18
122	150		

Tableau A.II- 2-Rapport entre la vitesse du train valseur et celle du racleu

## Annexe II- 2. Données de la campagne préliminaire sur le malaxeur de laboratoire

Config.	Béton B2-1		Béton B2-2		Béton B2-3	
	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)
Cfg1	330	0,49	287	0,49	312	0,49
	283	0,43	257	0,43	271	0,43
	246	0,37	231	0,37	231	0,37
	209	0,31	209	0,31	197	0,31
Cfg2	520	0,50	528	0,49	466	0,43
	431	0,43	443	0,42	487	0,49
	356	0,37	367	0,36	351	0,37
	288	0,30	306	0,30	273	0,30
Cfg3	452	0,49	496	0,49	440	0,49
	388	0,43	417	0,43	319	0,37
	326	0,37	352	0,36	255	0,30
	275	0,30	282	0,30	371	0,43
Cfg4	310	0,49	326	0,49	322	0,49
	271	0,43	282	0,43	282	0,43
	235	0,37	243	0,37	241	0,37
	199	0,31	203	0,30	206	0,31
Cfg5	360	0,49	411	0,49	367	0,49
	311	0,43	345	0,43	311	0,43
	263	0,37	291	0,37	264	0,37
	224	0,31	241	0,31	221	0,31
Cfg6	462	0,49	563	0,49	519	0,50
	397	0,43	468	0,42	443	0,43
	336	0,37	382	0,36	379	0,37
	265	0,30	310	0,30	303	0,30

Tableau A.II- 3-Données d'acquisition des bétons B3-1, B3-2 et B3-3

Config.	Béton B2-4		Béton B2-5		Béton B2-6	
	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)
Cfg1	345	0,49	369	0,56	411	0,55
	295	0,43	317	0,49	351	0,49
	253	0,37	274	0,43	304	0,43
	210	0,31	240	0,38	263	0,37
Cfg2	471	0,49	586	0,56	549	0,55
	407	0,43	488	0,49	452	0,49
	345	0,36	412	0,43	384	0,43
	287	0,30	335	0,37	315	0,37
Cfg3	446	0,49	505	0,55	468	0,55
	373	0,43	427	0,49	403	0,49
	307	0,37	359	0,43	340	0,43
	252	0,30	-	-	284	0,36
Cfg4	320	0,49	369	0,55	355	0,55
	284	0,43	323	0,49	314	0,49
	240	0,37	279	0,43	271	0,43
	203	0,30	240	0,37	233	0,37
Cfg5	390	0,49	426	0,56	393	0,55
	333	0,43	369	0,49	338	0,49
	297	0,37	308	0,43	291	0,43
	264	0,30	-	-	-	-
Cfg6	516	0,49	526	0,56	517	0,55
	461	0,43	443	0,49	453	0,49
	407	0,36	380	0,43	383	0,43
	353	0,31	310	0,37	304	0,36

Tableau A.II- 4-Données d'acquisition des bétons B3-4, B3-5 et B3-6

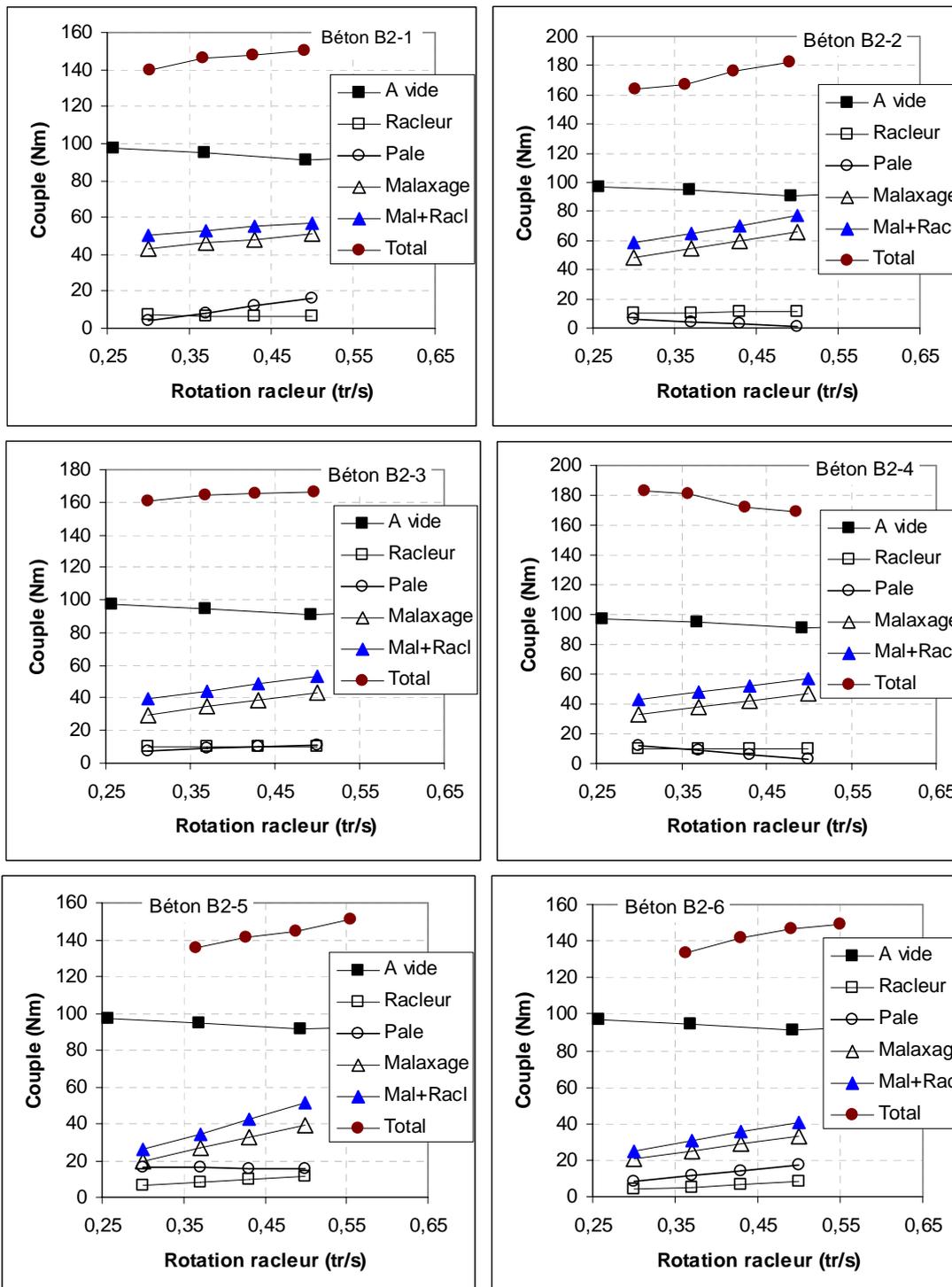
Config.	Béton B2-7		Béton B2-8		Béton B2-9	
	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)
Cfg1	309	0,56	321	0,56	369	0,56
	272	0,49	282	0,49	324	0,49
	239	0,43	247	0,43	278	0,43
	208	0,37	217	0,37	240	0,37
Cfg2	734	0,54	643	0,55	641	0,56
	621	0,48	541	0,48	530	0,49
	515	0,42	448	0,42	454	0,43
	419	0,36	386	0,36	-	-
Cfg3	628	0,55	492	0,55	604	0,55
	539	0,49	430	0,49	517	0,49
	451	0,42	367	0,43	438	0,43
	-	-	308	0,36	364	0,37
Cfg4	380	0,55	355	0,55		
	335	0,49	314	0,49		
	294	0,43	271	0,43		
	-	-	233	0,37		
Cfg5	485	0,55	393	0,55		
	424	0,49	338	0,49		
	356	0,43	291	0,43		
	-	-	-	-		
Cfg6	674	0,55	517	0,55		
	587	0,48	453	0,49		
	503	0,42	383	0,43		
	438	0,36	304	0,36		

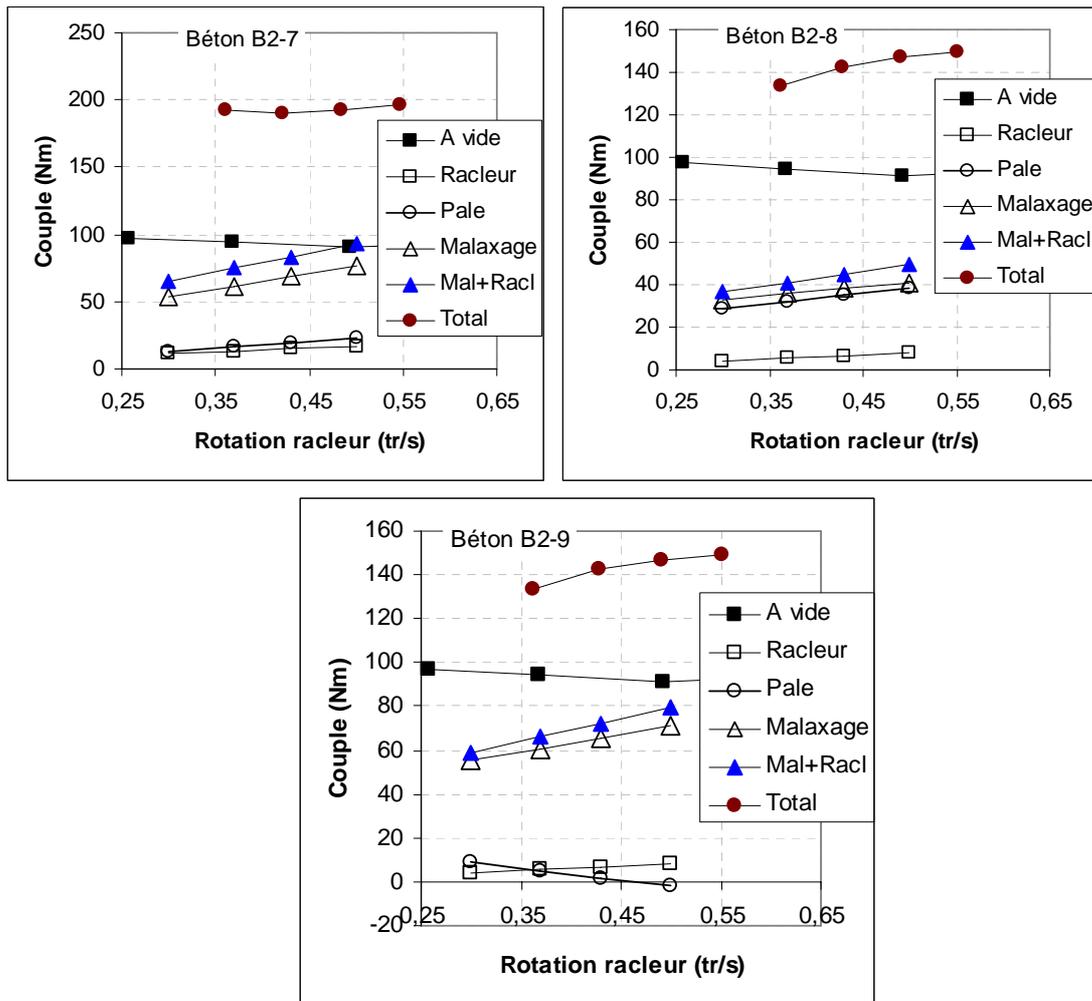
Tableau A.II- 5-Données d'acquisition des bétons B3-7, B3-8 et B3-9

Config.	Béton B2-10		Béton B2-11	
	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)	Puissance (W)	Vitesse (tr/s)
Cfg1	372	0,56	390	0,56
	318	0,49	335	0,49
	274	0,43	285	0,43
	236	0,37	-	-
Cfg2	714	0,55	599	0,55
	596	0,49	518	0,49
	506	0,42	450	0,43
	425	0,36	380	0,36
Cfg3	668	0,55	601	0,55
	580	0,49	518	0,49
	500	0,42	440	0,43
	419	0,36	-	-

Tableau A.II- 6-Données d'acquisition des bétons B3-10 et B3-11

### Annexe II- 3. Courbes des couples obtenus sur le malaxeur de laboratoire modifié





#### Annexe II- 4. Puissance à vide pour différente vitesse et de la température de l'huile dans le malaxeur Pataud

Palier	Données de puissance (W)						Donnée de température (°C)					
	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11
	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)
Série 1	1643	1185	955	694	427	246	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 2	1342	1079	917	658	416	249	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 3	1305	1098	923	661	408	245	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Série 4	1336	1084	910	644	403	238	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 5	1247	1015	873	631	393	233	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Série 6	1224	997	852	613	381	233	31,3	31,9	31,3	31,3	31,2	31,2
Série 7	1214	983	846	606	376	224	30,8	31,0	31,0	31,0	30,9	30,8
Série 8	1206	973	835	601	369	225	27,5	27,7	27,7	27,9	27,9	27,7
Série 9	1183	960	823	590	364	223	27,2	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3
Série 10	1148	941	808	579	356	219	26,6	26,8	27,0	27,0	27,0	27,0
Série 11	1133	920	793	574	354	227	14,5	15,3	15,7	15,9	16,1	15,8
Série 12	1125	915	784	571	356	215	15,2	15,8	16,2	16,4	16,6	16,7
Série 13	1106	896	771	564	352	220	20,4	20,8	21,0	21,1	21,2	21,1
Série 14	1090	888	765	565	349	212	13,5	13,8	14,2	14,3	14,7	14,4
Série 15	1082	884	758	564	332	215	19,3	19,7	19,9	20,0	20,1	20,0
Série 16	1063	868	748	562	337	-	19,6	19,9	20,0	20,1	20,2	20,8
Série 17	1056	860	735	550	337	216	18,9	19,2	19,5	20,0	20,1	19,9

Palier	Données de couple (N.m)						Donnée de température (°C)					
	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11
	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)
Série 1	568	484	475	442	377	356	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 2	464	440	456	419	368	360	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 3	452	448	459	421	361	355	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
Série 4	462	442	453	410	357	344	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
Série 5	431	414	434	402	347	338	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
Série 6	424	407	424	390	337	337	31,3	31,9	31,3	31,3	31,2	31,2
Série 7	420	401	421	386	332	325	30,8	31,0	31,0	31,0	30,9	30,8
Série 8	417	397	415	382	326	326	27,5	27,7	27,7	27,9	27,9	27,7
Série 9	409	392	409	375	322	322	27,2	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3
Série 10	397	384	402	369	315	317	26,6	26,8	27,0	27,0	27,0	27,0
Série 11	392	376	395	365	313	328	14,5	15,3	15,7	15,9	16,1	15,8
Série 12	389	373	390	363	315	311	15,2	15,8	16,2	16,4	16,6	16,7
Série 13	383	366	384	359	-	318	20,4	20,8	21,0	21,1	21,2	21,1
Série 14	377	362	381	360	309	306	13,5	13,8	14,2	14,3	14,7	14,4
Série 15	374	361	377	359	293	311	19,3	19,7	19,9	20,0	20,1	20,0
Série 16	368	354	372	358	298	-	19,6	19,9	20,0	20,1	20,2	20,8
Série 17	365	351	366	350	298	312	18,9	19,2	19,5	20,0	20,1	19,9

## Annexe II- 5. Fiches techniques des matériaux utilisés

01/008
Mise à jour: 12/01/2001



**SERVICE QUALITE**  
 Carrière des Maraichères  
 Route de Pornic  
 44340 DOUGUENNAIS  
 Tel. 02 - 40 - 65 - 18 - 34

### FICHE TECHNIQUE PRODUIT

Norme XP P 18-540, article 8. Gravillon pour chaussées: couches de roulement utilisant des filants hydrocarbonés.

---

Produit: **6.3/10 catégorie B III**

Type Pétrographique: **ROCHE MASSIVE COMPLEXE**

Nature: **GNEISS**

Carrière: **PONTREAUX**

Société: **ENTREPRISE NOUËL**

1 Eriv Géologique

---

#### PARTIE NORMATIVE

	0,63d 4mm	d 6,3mm	D 10mm	1,65D 16mm	2D 20mm	100CPA- LA+MDE	LA+MDE	CPA	A	P
VSS	5	19	91	-	-	-	40	-	25	2
VSI	-	9	81	99	100	15	-	0.45	-	-
Limite Xu Max.	6	24	100	-	-	-	44	-	29	2.5
Limite Xu Min.	-	4	76	98	99	10	-	0.40	-	-
Etendue	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-

---

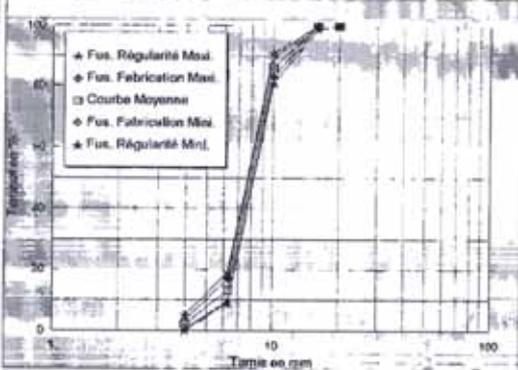
#### PARTIE INFORMATIVE

	0,63d 4mm	d 6,3mm	D 10mm	1,65D 16mm	2D 20mm	100CPA- LA+MDE	LA+MDE	CPA	A	P
Maximum	4.5	18.1	91.0	100	100	25	26	-	21.3	1.8
Xf + 1.25sf	3.3	16.9	89.5	100	100	-	-	-	18.5	1.4
Moyenne Xf	2.7	13.0	88.3	100	100	25	26	0.51	18.8	1.7
Xf - 1.25sf	0.9	9.1	83.1	100	100	-	-	-	14.1	0.7
Minimum	0.9	8.2	82.2	100	100	25	26	-	13.0	0.6
Ecart-type sf	1.0	3.1	2.6	0.0	0.0	-	-	-	2.2	0.3

---

Essais réalisés	Nombre d'essais	Période de référence	Date du prélevement si essai unique
Analyses granulométriques selon P18-560:	19	01/07/00 au 31/12/00	-
Coefficient d'aplatissement A selon P 18-561:	16	01/07/00 au 31/12/00	-
Propreté superficielle P selon P18-591:	18	01/07/00 au 31/12/00	-
Coefficient Los Angeles LA selon P18-573:	1	-	14/09/00
Coefficient Micro Deval MDE selon P18-672:	1	-	14/09/00
Coefficient de poliss. accéléré CPA selon P18-575:	1	-	10/07/00

---



Autres caractéristiques:

---

Remarques particulières:

---



Mise à jour: 12/01/2001

Sable jointable PACES

01/037

**FICHE TECHNIQUE PRODUIT**

Norme XP P 18-540, article 10. Sable pour bétons hydrauliques.

Produit:	SABLE BETON 0/4 catégorie A	Cisement:	FILIER
Type Pétrographique:	SABLE MARIN	Société:	SDN CHEVRE
Nature:	SILICO-CALCAIRE		

**PARTIE NORMATIVE**

	D							1.580		20		MF	f	PS	Ab	S	SA
	80µm	150µm	315µm	630µm	1.25mm	2.5mm	4mm	5mm	6.3mm	8mm							
V S S	-	-	-	-	-	-	99	-	-	-	-	2.80	3.1	-	2.5	0.4	0.2
V S I	-	-	-	-	-	-	85	-	99	100	2.20	0.1	60	-	-	-	-
Limite Xu Max.	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	2.95	4.1	-	-	-	-	-
Limite Xu Min.	-	-	-	-	-	-	83	-	98	99	2.05	0.0	80	-	-	-	-
Etendue	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6	3	-	-	-	-	-
Etendue/3.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	-	-

**PARTIE INFORMATIVE**

Alcali-Réaction:  
Détermination des alcalins solubles dans l'eau de chaux suivant la méthode LPC n°37. Prélèvement du 21/08/2000

% CaO libre	% Na2O libre	% Na2O Eq.
0.0081	0.0027	0.0098

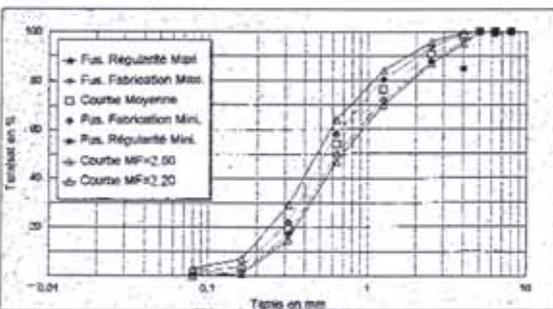
Qualification vis à vis de l'alcali-réaction: NR

	D							1.580		20		MF	f	PS	Ab	S	SA
	80µm	150µm	315µm	630µm	1.25mm	2.5mm	4mm	5mm	6.3mm	8mm							
Maximum	2.0	3.8	23.3	61.6	83.0	96.5	99	100	100	100	2.71	2.6	89	0.7	0.048	-	-
XI + 1.25af	1.9	3.8	21.9	58.1	80.5	95.7	99.0	100	100	100	2.68	2.1	89.1	-	-	-	-
US-PTC9	1.3	2.3	19.4	54.0	76.2	90.7	97.7	99.8	100	100	2.57	1.4	86	0.7	0.048	-	-
XI - 1.25af	0.7	1.3	16.5	49.9	72.0	87.7	96.5	99.0	100	100	2.46	0.5	82.9	-	-	-	-
Minimum	0.1	0.7	15.3	47.4	70.5	86.1	94.7	99.1	100	100	2.35	0.1	81	0.7	-	-	-
Ecart-type af	0.5	0.8	2.0	3.3	3.4	2.4	1.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.8	2.5	-	-	-	-

- Selon le paragraphe 5.8 de la norme, le taux d'impuretés prohibées est inférieur à 0.1%. Un manuel sur 23 échantillons soumis à l'analyse granulométrique durant la période de référence.

Matières Organiques: Test Négatif Prélèvement du 21/08/2000

Er	Nombre d'essais	Période de référence	Date du prélèvement si essai unique
Analyses granulométriques selon P18-540:			
Analyses granulométriques selon P18-540:	23	01/07/00 au 31/12/00	-
Module de Finesse selon P 18-540:	23	01/07/00 au 31/12/00	-
Teneur en fines I de la fraction 0/4:	23	01/07/00 au 31/12/00	-
Propriété des sables PS selon P18-597:	15	01/07/00 au 31/12/00	-
Coefficient d'absorption d'eau Ab selon P18-588:	1	-	08/08/00
Teneur en Soufre Total S selon P18-582: [S]	1	-	21/08/00
Teneur en Sulfates SA selon NF EN 196-2: [SO3]	-	-	-



Autres caractéristiques:

Teneur en chlore = 0.002%, prélèvement du 21/08/2000.

Masse Volumique Réelle MVR = 2.62 t/m3, prélèvement du 06/09/2000.

Remarques particulières:

Fax reçu de : 33 8251884879

LAFARGE CEMENTS NANT

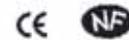
22/05/01 16:14 Pg: 4

**LAFARGE**  
**CEMENTS**  
 Usine de SAINT  
 PIERRE LA COUR

**CEM I 52,5 R CE CP2 NF**

NF EN 197-1 NF P 15 318

Fiche produit



• Constituants et composition du ciment

Principaux (%)		Secondaires (%)		Sulfate de calcium (%)		Additifs sur sec (%)	
Clinker	97	Calcaire (LL)	1	Gypse	6	Agent de mouture	TD/780 0,16
		Filler (F)	2			ou	AMA11 0,16

• Caractéristiques physiques et mécaniques

	Valeur usine moyenne	Valeur de la norme NF	
		minimum	maximum
Résistance à la compression 1 jour (MPa)	27,5		
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	41,4	30,0	
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	65,5	52,5	
Début de prise (min)	150	60	
Stabilité (mm)	0,2		10
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3,13		
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3970		
Q12h (J/g)	296		
Q41h (J/g)	381		

• Caractéristiques chimiques (%)

	Valeur usine			Valeur usine			Valeur usine	
	moyenne	norme NF maxi		moyenne	norme NF maxi		moyenne	norme NF maxi
SiO <sub>2</sub>	20,1		S <sup>-</sup>	< 0,01	0,20	Insolubles	0,21	5,00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,85		Cl <sup>-</sup>	< 0,02	0,05	CO <sub>2</sub>	0,60	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,75		Perte au feu	1,60	5,00	CaO libre	1,30	
CaO	64,0		TiO <sub>2</sub>	ND		Alcalins actifs	0,80	
MgO	0,90	5,00	MnO	ND				
K <sub>2</sub> O	0,98		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25				
Na <sub>2</sub> O	0,16		Non dosé	0,89				
SO <sub>3</sub>	3,60	4,00						
Total : 100								

! : Caractéristique modifiée / fiche précédente

ND : non dosé

Révision N° : 2

du 01/04/2001

Ingenieur Technico-commercial : **Jean-Marie BORDAS**  
 AGENCE COMMERCIALE  
 1, rue Michaël Faraday - "Le Kepler" 44812 Saint Herblain  
 Cedex  
 Téléphone : 02 51 80 40 70  
 Télécopie : 02 51 80 40 79  
 Site internet : www.lafarge-ciments.fr

St Pierre la Cour : livraison en  
 vrac

**CHRYSO**

LA SOLUTION DE CONCRETS

**CHRYSO® Fluid GT****Superplastifiant - Haut réducteur d'eau****Descriptif**

CHRYSO® Fluid GT est un superplastifiant de synthèse à base de polyméline sulfonée modifiée, spécifiquement mis au point pour être utilisé avec les liants hydrauliques. Sa structure chimique particulière lui confère une efficacité remarquable :

- une forte action dispersante vis-à-vis des éléments fins du béton (amélioration importante de la maniabilité des bétons).
- une catalyse des réactions d'hydratation des liants. Ceci permet par une réduction d'eau très importante l'obtention de résistances mécaniques élevées dès les plus jeunes âges.

**Caractéristiques**

- Nature : liquide
- Couleur : violet
- Densité (20 °C) : 1,15 ± 0,01
- pH : 9,5 ± 1,0
- Point de congélation : - 2 °C environ
- Teneur en ions Cl<sup>-</sup> : ≤ 0,10 %
- Na<sub>2</sub>O équivalent : ≤ 3,05 %
- Extrait sec (24h, 105 °C) : 30 % ± 1 %
- Extrait sec (EN 480-8) : 30,5 % ± 1,5 %

**Conditionnement**

- Vrac
- Fûts de 215 L
- Tonnelets de 60 L

**Conformité**

CHRYSO® Fluid GT est un superplastifiant – haut réducteur d'eau qui satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site internet.

CHRYSO® Fluid GT est également conforme au référentiel de certification NF 085, dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.

CHRYSO® Fluid GT est conforme à la norme ASTM C 494 – type F.

CHRYSO® Fluid GT ne favorise pas la corrosion de l'acier dans du béton (test électrochimique selon la norme DIN V 18996 : 2002-11).

Adresse AFNOR – 11 Avenue F. de Pressensac – 93571 Saint Denis La Plaine Cedex

**Application****Domaines d'application**

- Tous types de ciments (sauf blancs)
- BHP et BTHP
- Bétons plastiques, très plastiques, fluides
- Bétons pour ouvrages très ferrailés
- Bétons précontraints
- Dallages, sols industriels
- Coulis d'injection

**Mode d'emploi**

Plage de dosage : 0,6 à 5,0 kg pour 100 kg de ciment.  
Il est courant de doser ce produit à 1 % du poids du ciment.  
CHRYSO® Fluid GT est totalement miscible à l'eau. Il peut être introduit dans l'eau de gâchage ou en fin de malaxage. Dans le cas du béton prêt à l'emploi où le produit peut être introduit directement dans le malaxeur du camion toupie, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse 1 minute par m<sup>3</sup> de béton (avec un minimum total de 6 minutes).  
La réalisation de bétons fluides, grâce à l'utilisation de

CHRYSO® Fluid GT se fait sans modification notable des temps de prise des bétons. La granulométrie doit comporter une proportion d'éléments fins plus importante que celle des bétons courants, comparables à celle des bétons pompés.

Le temps durant lequel le béton reste fluide est variable selon la température, la consistance des bétons avant ajout de CHRYSO® Fluid GT, la nature du ciment, le dosage. Cette durée peut être déterminée par un essai préalable in situ.

De même, l'efficacité maximale de CHRYSO® Fluid GT doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.

**Précautions**

- Ne pas utiliser CHRYSO® Fluid GT sur les bétons blancs ou clairs.
- Eviter l'exposition prolongée du produit à de fortes chaleurs.
- En cas de gel, le produit conserve ses propriétés une fois dégelé et homogénéisé par agitation.
- Durée de vie : 12 mois.

CHRYSO : 19, place de la Résistance - 92446 Issy Les Moulins Cedex France - Tél : 01 41 17 18 19 - Fax : 01 41 17 18 93



Notice technique  
Edition octobre 2006  
Numéro 1.12  
Version n°120.2006  
PLASTIRETARD

## PLASTIRETARD

Retardateur de prise pour béton.

Conforme à la norme NF EN 934.2 tab. 8



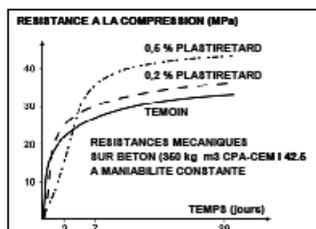
### Présentation

Le PLASTIRETARD est un retardateur de prise pouvant être utilisé dans tous les bétons.  
Employé à certains dosages, il se comporte comme un réducteur d'eau.

### Domaines d'application

**Amélioration des résistances mécaniques.**  
Grâce à une réduction d'eau de 10 à 15%, le PLASTIRETARD augmente les résistances mécaniques du béton à long terme de 20 à 30%.  
Il améliore aussi considérablement la compacité.  
Il est particulièrement adapté :

- aux bétons armés et précontraints,
- aux bétons des réservoirs.



### Bétonnage par temps chaud ou en grande masse

L'effet retardateur de prise du PLASTIRETARD permet d'éviter une brusque élévation de la température du béton lors de la prise et rend son emploi indispensable lorsque la température est élevée, pour les bétons en grande masse : barrages, etc.

### Reprises de bétonnage.

Grâce au retard de prise important que peut provoquer le PLASTIRETARD, il est possible d'effectuer des reprises de bétonnage après plusieurs heures d'interruption sans autre précaution particulière que la protection contre la dessiccation.

### Transports de longue durée du béton

L'utilisation de PLASTIRETARD permet de transporter sans problème tous les bétons sur de grandes distances quelles que soient les conditions (températures, risques d'embouteillage, etc).

Sika®

## Annexe II- 6. Résultats obtenus pour la troisième campagne de laboratoire

Béton	Eau (kg)	Gra 10/20	Gra 6/10 (kg)	Sable 0/4 (kg)	Ciment 52,5 (kg)	Chryso GT (kg)
B3-1	194	0	898	846	419	2,81
B3-2	207	0	892	842	415	2,79
B3-3	209	0	896	845	417	1,40
B3-4	221	0	885	832	418	2,76
B3-5	222	0	876	835	422	2,74
B3-6	238	0	878	828	409	0,00
B3-7	221	0	879	834	408	0,00
B3-8	217	0	897	846	416	0,00
B3-9	187	0	848	798	562	11,18
B3-10	196	0	840	789	557	11,11
B3-11	205	0	841	788	556	11,08
B3-12	209	0	963	897	285	0,00
B3-13	223	0	960	900	288	0,00
B3-14	194	612	231	670	699	13,95
B3-15	282	0	0	1252	710	0,00
B3-16	285	0	0	1360	609	9,13
B3-17	204	711	272	517	711	14,18
B3-18	216	706	271	516	704	14,08
B3-19	271	0	0	1356	609	9,13
B3-20	207	711	273	516	708	18,72

Tableau A.II- 7-Dosage des bétons utilisés

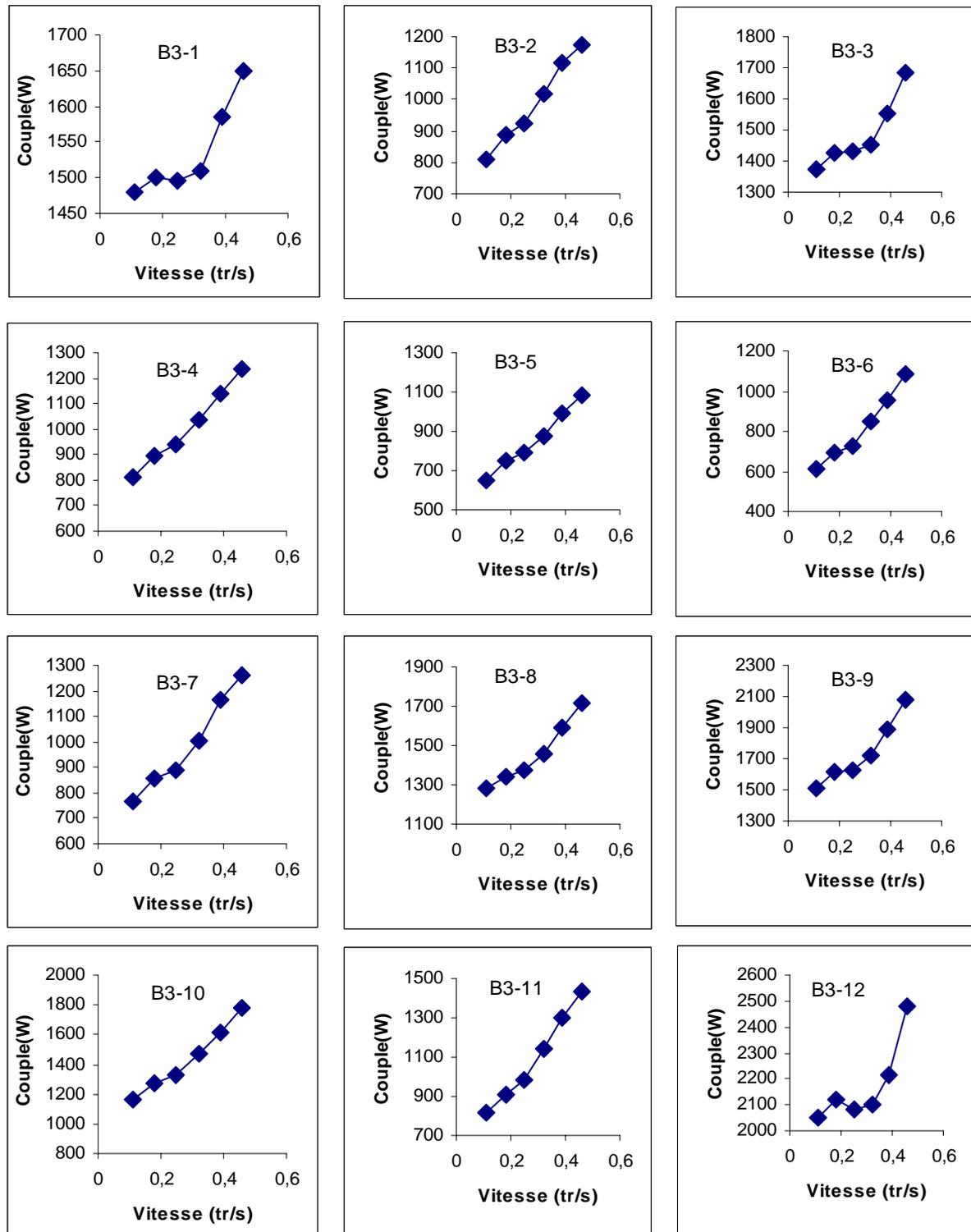
Béton	Seuil	Visco	Slump	Tempé- rature	MV	Volume	Note
	(Pa)	(Pa.s)	(cm)	(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(L)	
B3-1	2307	238	7,50	8	2359	898	Vibration en excès
B3-2	827	146	16,50	11	2359	903	
B3-3	1795	220	8,50	9	2368	899	
B3-4	921	143	17,25	11	2359	912	
B3-5	860	91	17,75	13	2358	919	
B3-6	561	67	19,25	14	2353	917	
B3-7	743	70	18,00	17	2343	918	
B3-8	1539	138	9,50	13	2376	899	
B3-9	2423	178	9,00	15	2406	894	
B3-10	1757	184	11,25	16	2393	899	
B3-11	1006	125	16,50	16	2401	902	
B3-12	-	-	3,50	17	2354	886	
B3-13	1867	209	6,50	16	2370	881	
B3-14	-	-	0,00	14	2420	903	
B3-15	952	3	19,25	17	2244	888	
B3-16	331	33	58,0	14	2264	887	étalement
B3-17	-	-	0,00	18	-	900	
B3-18	1161	207	16,00	17	2426	895	
B3-19	383	9	64,00	16	2245	887	étalement
B3-20	796	112	20,00	17	2434	890	

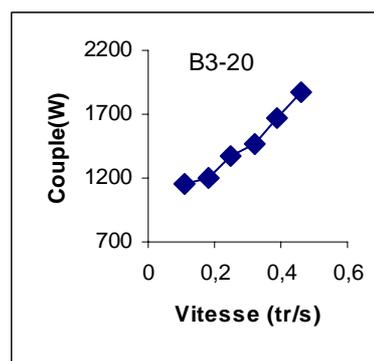
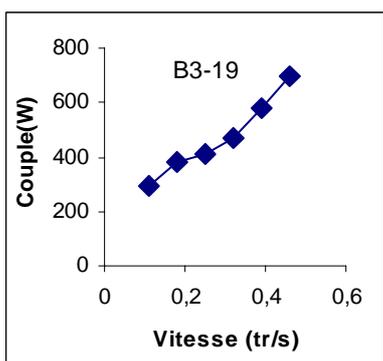
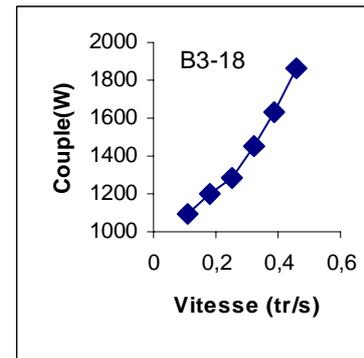
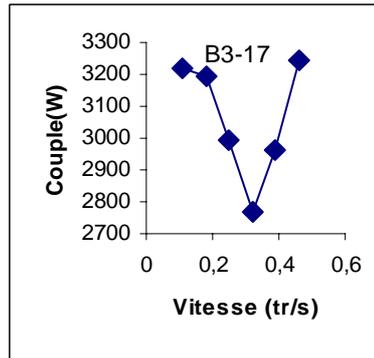
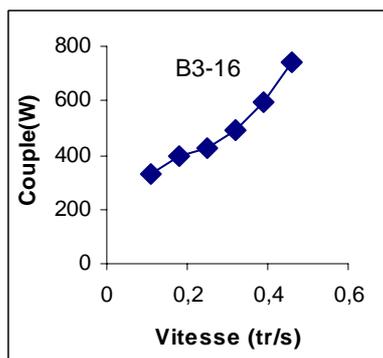
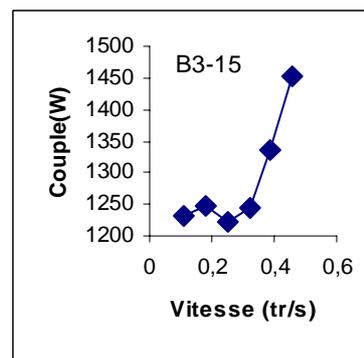
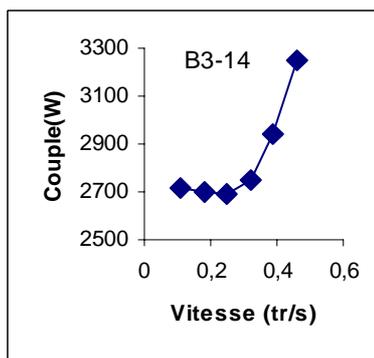
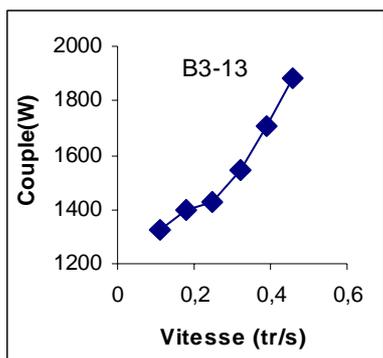
Tableau A.II- 8-Caractéristiques des bétons utilisés

Palier	Données de puissance						Données de température de l'huile					
	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11	0,46	0,39	0,32	0,25	0,18	0,11
	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)	(tr/s)
B3-1	6142	5010	3996	3026	2128	1271	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-2	4769	3863	3010	2127	1432	808	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-3	6317	5004	3933	2955	2071	1207	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5	10,5
B3-4	4955	3923	3047	2149	1444	810	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
B3-5	4430	3493	2680	1891	1256	691	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
B3-6	4151	3168	2415	1680	1109	632	31,3	31,9	31,3	31,3	31,2	31,2
B3-7	4675	3687	2736	1934	1294	739	30,8	31,0	31,0	31,0	30,9	30,8
B3-8	6013	4767	3678	2706	1854	1100	27,5	27,7	27,7	27,9	27,9	27,7
B3-9	7072	5485	4199	3106	2163	1259	27,2	27,4	27,4	27,4	27,3	27,3
B3-10	6208	4832	3717	2640	1782	1018	26,6	26,8	27,0	27,0	27,0	27,0
B3-11	5457	4238	3187	2180	1427	803	14,5	15,3	15,7	15,9	16,1	15,8
B3-12	8462	6476	5106	3902	2787	1651	15,2	15,8	16,2	16,4	16,6	16,7
B3-13	6623	5139	3918	2830	1942	1137	20,4	20,8	21,0	21,1	21,2	21,1
B3-14	10723	8303	6444	4880	3466	2120	13,5	13,8	14,2	14,3	14,7	14,4
B3-15	5390	4240	3329	2520	1779	1077	19,3	19,7	19,9	20,0	20,1	20,0
B3-16	3332	2420	1821	1266	820	453	19,6	19,9	20,0	20,1	20,2	20,8
B3-17	10583	8237	6400	5302	3978	2451	18,9	19,2	19,5	20,0	20,1	19,9
B3-18	6614	4997	3770	2637	1737	985	17,4	17,9	18,1	18,2	18,5	18,3
B3-19	3189	2375	1771	1241	796	426	19,9	20,2	20,4	20,4	20,5	20,4
B3-20	6683	5124	3827	2779	1746	1036	15,3	15,8	15,9	16,1	16,3	16,3

Tableau A.II- 9-Données des mesures des puissances

Figure A.II- 2 - Courbes des couples (couple de rhéologie + couple de frottement des pales)





## Annexe II- 7. Dosages des bétons fabriqués

Bétons	Granulat 10/20	Granulat 4/10	Granulat 0/4	Pulvérulent	Eau	Adjuvant
B4-1	0	1430	1370	508	168,5	2,55
B4-2	0	1430	1385	520	187,5	2,55
B4-3	0	1420	1385	509	128,5	2,55
B4-4	0	1385	1385	510	175,0	2,55
B4-5	0	1435	1400	524	194,5	2,55
B4-6	1005	425	1295	553	192,5	2,75
B4-7	1025	430	1340	556	148,0	2,80
B4-8	0	1425	1430	506	177,0	2,55
B4-9	0	1435	1410	508	191,5	2,55
B4-10	0	1410	1360	511	128,0	2,55
B4-11	0	1420	1375	521	175,5	2,55
B4-12	0	1420	1395	515	198,0	2,55
B4-13	0	1425	1400	514	165,0	2,55
B4-14	0	1420	1380	506	166,5	2,55
B4-15	0	1390	1405	509	143,5	2,55
B4-16	0	1435	1395	526	211,0	2,55
B4-17	0	1405	1410	504	215,5	2,55
B4-18	0	1420	1375	515	206,5	2,55
B4-19	0	1395	1400	506	186,5	2,55
B4-20	0	1435	1395	503	167,0	2,55
B4-21	0	1420	1375	513	212,5	2,55
B4-22	1050	345	1360	521	159,0	2,20
B4-23	1065	345	1345	529	168,0	2,20
B4-24	1125	285	1360	524	167,0	2,20
B4-25	0	1420	1395	498	189,5	2,55
B4-26	0	1415	1385	513	209,0	2,55
B4-27	0	1390	1415	515	162,0	2,55
B4-28	0	1445	1380	508	132,0	2,55
B4-29	0	1415	1395	508	128,0	2,55
B4-30	0	1420	1385	511	157,0	2,55
B4-31	0	1435	1410	504	166,0	2,60
B4-32	0	1420	1375	512	177,0	2,55
B4-33	0	1385	1400	516	187,0	2,55
B4-34	1115	345	1375	535	194,5	2,25
B4-35	1060	315	1365	534	169,5	2,20
B4-36	1190	210	1335	556	146,0	2,65
B4-37	1165	285	1330	537	121,0	2,70
B4-38	1165	265	1360	549	170,0	2,65
B4-39	1185	260	1335	560	146,5	2,70

## Annexe II- 8. Courbes de l'indication de couple

