

Doc 3672

CETE
Normandie
Centre

Centre
d'Études
Techniques
de l'Équipement

Station d'Essai
de Matériaux
Routes

Les Rapports

01/01/02

Mesure de la teneur en eau dans un malaxeur

Rapport de recherche

Eric CHATEAU
Bogdan CAZACLIU
Février 2002

DOCUMENTATION

DIRECTION DE LA RECHERCHE
ET DES AFFAIRES SCIENTIFIQUES
ET TECHNIQUES



Commande LC/01/BAP/3.1/3.11

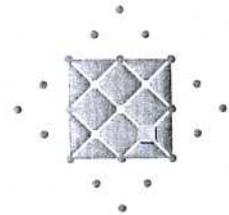
R02/BAP/3.1/3.11

Service des
Matériaux
Routiers

CETE
Normandie
Centre

31, rue Laplace
CS 2912
41029 Blois cedex
téléphone :
02 54 55 49 60
télécopie :
02 54 55 48 72
mél : semr.cete-nc@equipement.gouv.fr

Réseau
Scientifique
et Technique
de l'Équipement



SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. OBJECTIF DE L'ETUDE	1
2. PLAN D'EXPERIMENTATION	1
2.1 Essais préliminaires	2
2.2 Essais avec introduction de l'eau d'ajout en une phase	2
2.3 Essai avec introduction de l'eau d'ajout en trois phases	2
2.4 Essais avec introduction de l'eau d'ajout par paliers	2
3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL	3
3.1 Le malaxeur	3
3.2 Les sondes de mesures de la teneur en eau	5
4. BETON AUTOPLACANT UTILISE	6
4.1 Formule du béton	6
4.2 Stockage des constituants	6
4.3 Mesure de la teneur en eau réelle des granulats	6
5. LES PROTOCOLES D'ESSAIS	7
5.1 Protocole commun de préparation des essais	7
5.2 Protocoles spécifiques	7
5.2.1 Essais préliminaires (P1, P2, P3)	8
5.2.2 Introduction d'eau en une phases (B1, B2, B3)	8
5.2.3 Introduction d'eau en trois phases (B0)	8
5.2.4 Introduction d'eau par paliers (E1, E2, E3, E4)	9
5.2.5 Introduction d'eau et superplastifiant par paliers (S1, S2, S3)	9
5.2.6 Introduction d'eau, superplastifiant et agent de cohésion par paliers (A1)	9
6. RESULTATS DES ESSAIS	11
6.1 Essais préliminaires	11
6.2 Introduction d'eau en une phase	11
6.3 Introduction d'eau en trois phases	12
6.4 Introduction d'eau par paliers	13
7. CADRE D'ANALYSE DES DONNEES	15
7.1 Teneur en eau et dosage en eau	15
7.2 Caractérisation des erreurs	15
7.2.1 Stabilisation du signal	15
7.2.2 Bruit du signal	15
7.2.3 Courbe de calibrage	16
7.2.4 Répétabilité des mesures	16
7.2.5 Sensibilité des capteurs	16
7.3 Précision de mesure	16

7.4	Limites de la démarche	17
8.	INTERPRETATION DES RESULTATS	18
8.1	Sonde résistive	18
8.2	Sonde micro-ondes	20
8.3	Wattmètre	23
8.4	Remarques sur l'évolution des courbes wattométriques	24
	CONCLUSION	26

INTRODUCTION

Le développement des Bétons Autoplaçants se heurte à des problèmes de maîtrise du dosage en eau à la fabrication. Ces formules sont plus sensibles aux variations de l'eau et exigent un matériel spécifiquement adapté. On considère que la précision actuelle du dosage en eau à la fabrication des bétons est au mieux de $\pm 10 \text{ l/m}^3$, alors qu'une précision de $\pm 5 \text{ l/m}^3$ serait souhaitable.

La variation du dosage en eau des bétons à la fabrication est principalement liée à la connaissance insuffisante de l'eau apportée par les granulats. La teneur en eau des granulats est généralement *mesurée* pour les sables (au moyen d'une sonde) et *estimée* pour les gravillons, avant leur introduction dans le malaxeur. Ces mesures et estimations sont entachées d'erreurs et ne permettent pas un calcul suffisamment précis du volume d'eau d'ajout nécessaire pour obtenir le dosage en eau nominal du béton à fabriquer. Pour mémoire, une précédente étude dans le cadre de ce projet a été dédiée à l'évaluation de systèmes de mesure de la teneur en eau des granulats avant introduction dans le malaxeur.

Les systèmes de fabrication du béton en usine incluent parfois des mesures de la teneur en eau dans le malaxeur. Afin que l'ajustement de l'eau puisse être réalisé pour la gâchée courante, il est nécessaire d'effectuer un pré-malaxage des constituants solides à un dosage en eau inférieur au dosage nominal de la formule (malaxage en deux phases).

A défaut d'un ajustement en temps réel, la mesure du dosage en eau à la fin du malaxage peut également s'avérer intéressante pour être utilisée afin d'ajuster la gâchée suivante.

Ce rapport présente la campagne expérimentale réalisée à la Station d'Essais de Matériels Routiers dans le cadre des travaux de l'axe 3-1 du projet national BAP. On précise le matériel utilisé, on décrit les protocoles d'essais et on récapitule les résultats obtenus. Dans une deuxième étape, on interprète et analyse les résultats afin d'estimer la précision de la mesure de la teneur en eau pour les différentes configurations, et de proposer un classement des différents systèmes.

1. OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif métrologique est de qualifier l'aptitude, de systèmes de mesure, à déterminer les variations de teneur en eau lors du malaxage d'un béton en cours de fabrication.

Les différentes étapes de cette étude sont :

- L'étalonnage des sondes et leur positionnement dans le malaxeur.
- La détermination de la plage de teneur en eau pour laquelle les sondes présentent la meilleure sensibilité.
- L'étude de la répétabilité de la mesure de la teneur en eau du béton.
- Estimer si le superplastifiant et l'agent de cohésion ne modifient pas le calibrage des sondes.

2. PLAN D'EXPERIMENTATION

Lors de cette étude, on se place en dehors de considérations liées à l'influence d'un malaxage en plusieurs phases sur la durée d'un cycle de fabrication ou sur la rhéologie du produit fabriqué. L'utilisation des mesures de teneur en eau en amont du processus de fabrication ne fait pas non plus partie de cette étude. On se limite ici à l'estimation de la précision de différents systèmes de mesure de la teneur en eau dans le malaxeur, sur *une* formule de béton autoplaçant fournie par le projet national BAP.

Les mesures sont faites dans l'hypothèse d'une composition constante du mélange solide mesuré. Ainsi, les caractéristiques physiques et chimiques des constituants et les dosages des constituants

solides sont identiques pour toute la série d'essais.

La teneur en eau naturelle des granulats est contrôlée et est prise en compte pour chaque essai réalisé. Ce paramètre n'est toutefois pas étudié explicitement ici.

Les sondes évaluées lors de cette campagne sont les sondes présentes sur le marché de matériels destinés à la fabrication des bétons. Nous avons également évalué l'aptitude de la mesure de puissance à fournir une image du dosage en eau du matériau malaxé.

Le plan d'expérimentation fixé au cours des réunions du projet national BAP prévoit quatre catégories d'essais.

2.1 Essais préliminaires

L'objectif de ces essais est la vérification de la mise en place et du bon fonctionnement du malaxeur, des capteurs (sondes de mesure de teneur en eau et wattmètre) ainsi que du système d'acquisition de données chargé d'enregistrer les mesures au cours des essais.

A cette fin, trois essais sont réalisés sur un sable avec des fines. L'eau est le seul constituant liquide utilisé. Elle est introduite par incréments de 10 l/m^3 à partir de la valeur de la teneur en eau naturelle ou initiale du sable.

2.2 Essais avec introduction de l'eau d'ajout en une phase

L'objectif de ces essais est de qualifier l'aptitude des systèmes de mesure à déterminer le dosage en eau du mélange « à sec » et du béton fabriqué, si un *protocole type industriel BPE* d'introduction de constituants est utilisé.

Les trois essais sont réalisés à partir de la formule sèche du béton autoplaçant proposé par le projet national BAP. L'introduction de l'eau est effectuée en une seule phase, à partir de la teneur en eau initiale des granulats (« à sec »), jusqu'au dosage de la formule nominale (175 l/m^3). Les adjuvants sont introduits suivant un protocole de type industriel.

2.3 Essai avec introduction de l'eau d'ajout en trois phases

Lors de *fabrications de béton en usine* l'introduction de l'eau est parfois réalisée en plusieurs phases. L'objectif de l'essai est de valider la sensibilité et la précision des systèmes de mesure de la teneur en eau à un dosage en eau efficace intermédiaire aux mélanges « à sec » et à celui de la formule nominale. Cet essai pourrait également mettre en évidence l'effet d'un malaxage en plusieurs phases sur la rhéologie finale du béton fabriqué.

L'essai est réalisé sur la formule sèche de béton autoplaçant avec l'introduction de l'eau en trois étapes – jusqu'à 80 l/m^3 , 90 l/m^3 et 175 l/m^3 (dosage nominal de la formule) d'eau efficace. Les adjuvants sont introduits avec le dernier ajout d'eau.

2.4 Essais avec introduction de l'eau d'ajout par paliers

Dans le même cadre de réflexion sur le *malaxage en deux phases*, l'objectif des ces essais est d'étudier la sensibilité et la précision des différents systèmes de mesure de la teneur en eau, sur une plage étendue de dosages en eau inférieure à la formule nominale. Ces essais devaient également mettre en évidence l'effet des adjuvants sur la mesure de la teneur en eau dans le mélange.

Les huit essais sont réalisés sur la même formule de béton autoplaçant. L'introduction de l'eau est effectuée par incréments de 10 l/m^3 . Pour quatre de ces essais, l'eau est le seul constituant liquide utilisé. Pour les autres, des adjuvants sont introduits pré-mélangés à l'eau dans le mélange :

- superplastifiant seul pour trois essais
- superplastifiant et agent de cohésion pour un dernier essai.

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Les essais sont réalisées sur un malaxeur Skako-Couvrot de capacité 250 litres (figure 3.1 et 3.2). Le malaxeur est équipé d'une sonde tournante résistive Hydrostop (figure 3.3), d'une sonde fixe micro-ondes Skako (figure 3.4) et d'une sonde fixe micro-ondes Bikotronic ainsi que d'un wattmètre. Une seule sonde micro-ondes, la sonde SKAKO, est étudiée, la deuxième fournissant des signaux qui ne sont pas exploitables.

Un système d'acquisition de données (figure 3.5), permet l'enregistrement en continu, lors de la fabrication, des trois mesures de teneur en eau et de la puissance indiquée par le wattmètre. Des mesures de la température du béton sont également délivrées par la sonde Skako.

Les granulats et les pulvérulents ont été pesés avec une balance de précision ± 20 grammes, les composants liquides ont été pesés avec une balance de précision $\pm 0,1$ gramme.

3.1 Le malaxeur

Le malaxeur est constitué de 2 parties principales : un moto-réducteur à la partie supérieure et le malaxeur proprement dit à la partie inférieure.

Le moto-réducteur comprenant :

- le carter supérieur fixe
- le moteur électrique M
- une réduction primaire entraînée par M constituée d'une réduction souple à poulies et courroies trapézoïdales et d'un réducteur ordinaire à denture hélicoïdale à un étage de réduction

Le malaxeur comprenant :

- la cuve liée au carter supérieur
- 4 raclettes de malaxage et 16 liées au plateau de l'arbre valseur du réducteur épicycloïdal
- une pale de nettoyage de bord de cuve et une raclette pendulaire de vidange liées au carter pivotant par l'intermédiaire d'une l'équerre
- une trappe de vidange à commande hydraulique.

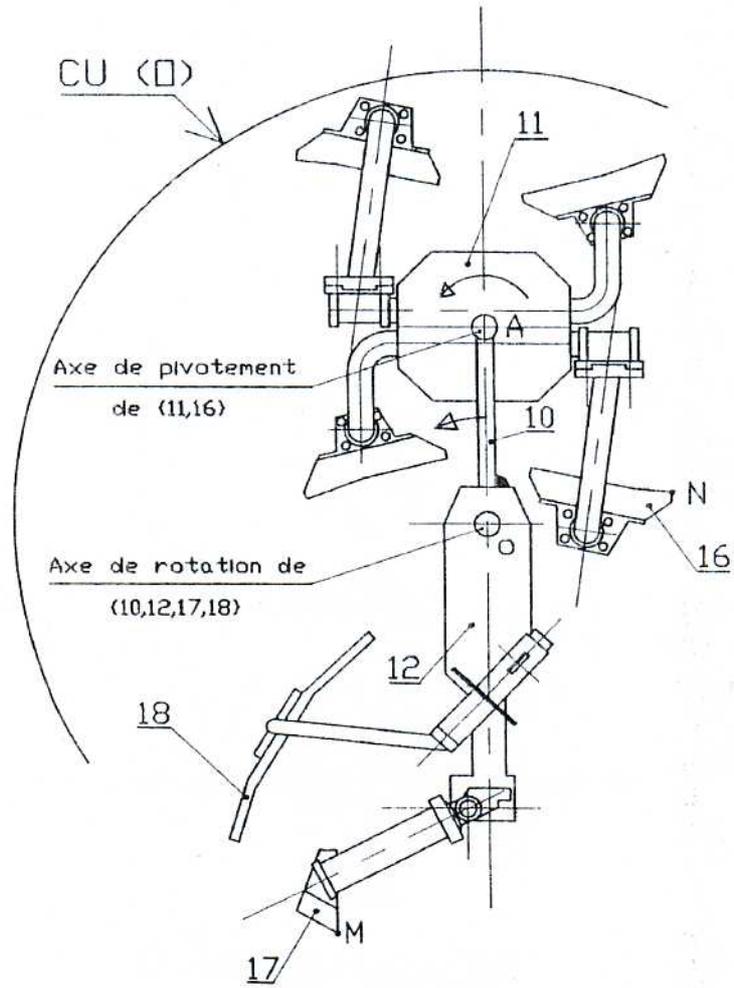


Figure 3.1 Schéma du malaxeur

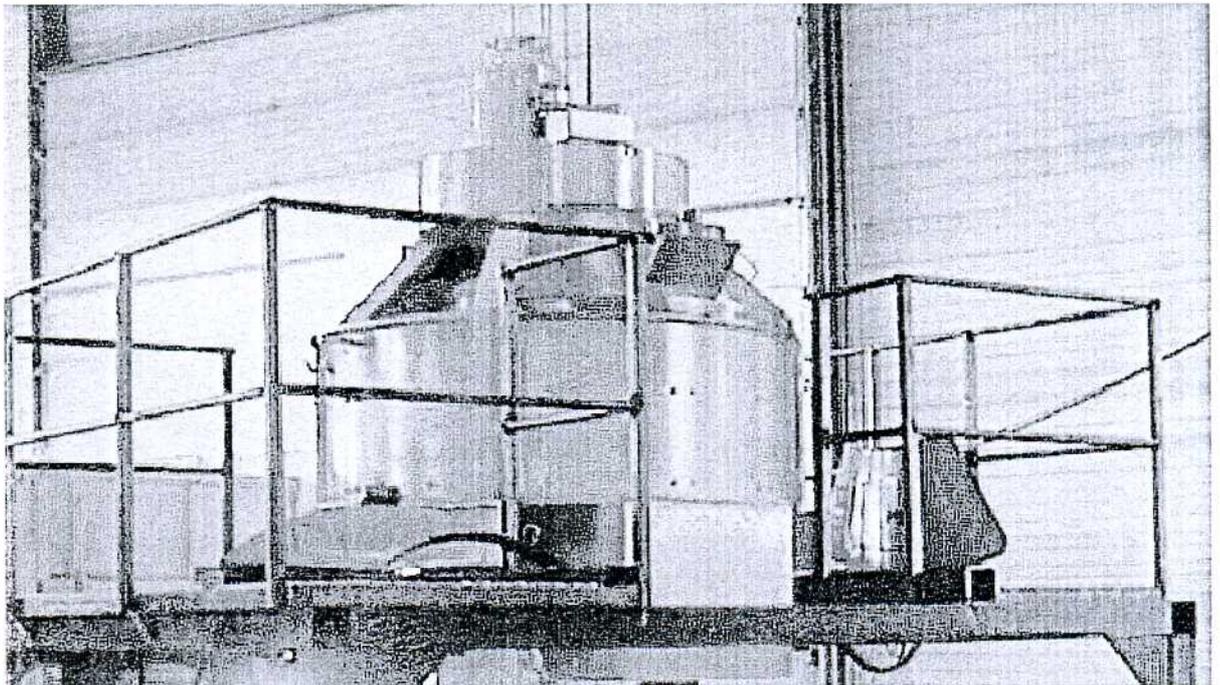


Figure 3.2 Malaxeur SKAKO - COUVROT

3.2 Les sondes de mesures de la teneur en eau

Les sondes sont choisies en conformité avec le matériel existant sur le marché de la fabrication des bétons. Un troisième type existant, les sondes résistives fixes, n'a pas été sélectionné compte tenu de leurs faibles performances (réunion du comité restreint de l'axe 3-1 du 28 février 2001).

Le principe de ces sondes a été détaillé dans le précédent compte-rendu de recherche 2000 intitulé « Essais de sondes de mesure de la teneur en eau ».

Nous avons également évalué lors de cette campagne expérimentale l'aptitude de la mesure du wattmètre à fournir une image du dosage en eau du matériau malaxé.

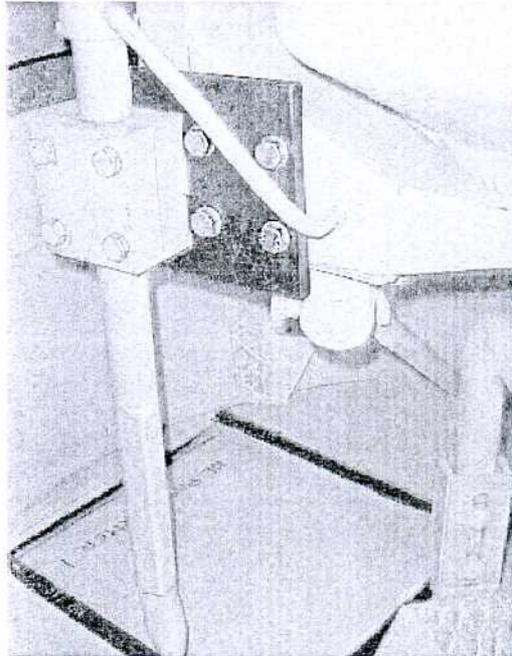


Figure 3.3 Sonde résistive tournante HYDROSTOP



Figure 3.4 Sonde micro-ondes fixe SKAKO

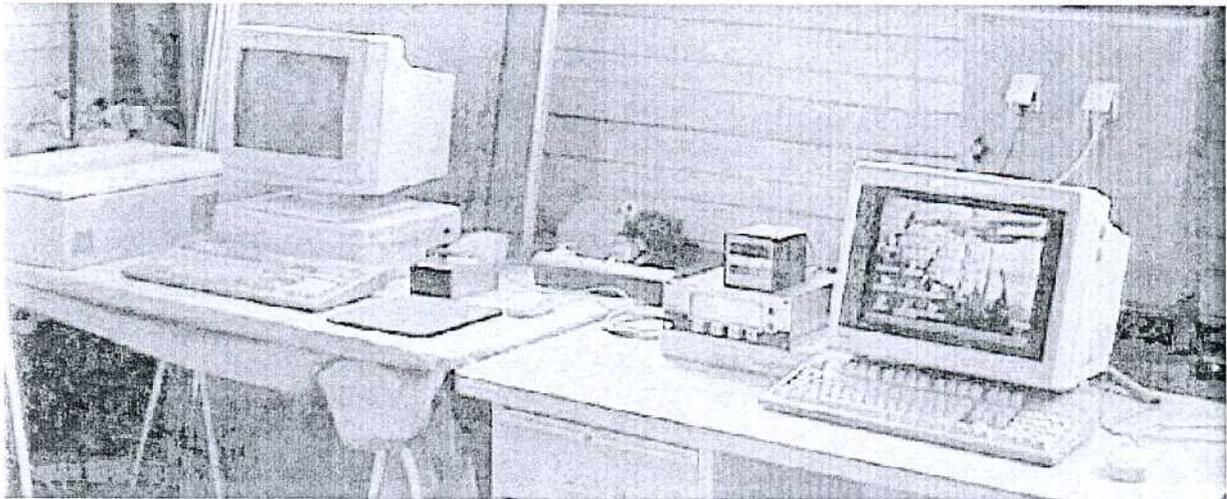


Figure 3.5 Acquisition des données

4. BETON AUTOPLACANT UTILISE

L'axe 2-1 du Projet National BAP propose cinq formules de béton autoplaçant qui répondent aux caractéristiques fixées. Pour la présente étude, il a été utilisé la formule F11 fabriquée par ORSA BETONS.

4.1 Formule du béton

Les constituants utilisés pour la fabrication de la formule F11 sont :

- gravillons 5/10 silico-calcaire alluvionnaire semi-concassé
- sable 0/4 alluvionnaire
- ciment CPA
- cendres volantes surschiste
- superplastifiant
- agent de cohésion
- eau.

La formule nominale est celle qui nous a été fournie par le fabricant de béton, et en terme de dosage en eau elle correspond à 175 l/m³ d'eau efficace.

4.2 Stockage des constituants

Le stockage des constituants solides se fait dans un hall fermé afin d'assurer des conditions d'essai quasi constantes pendant la campagne expérimentale.

4.3 Mesure de la teneur en eau réelle des granulats

Avant chaque essai la teneur en eau réelle des matériaux a été mesurée par prélèvements. Les prélèvements étaient séchés dans un four à micro-ondes. Le temps de séchage dépendait de la teneur en eau, mais dans tous les cas le matériau était séché par paliers de 10 minutes puis pesé après chaque palier. Le séchage du matériau était arrêté lorsque entre deux paliers le poids restait constant à la précision de pesage près, ce qui signifiait que le matériau était sec. Toutes les pesées ont été faites avec une balance de précision $\pm 0,1$ gramme.

5. LES PROTOCOLES D'ESSAIS

5.1 Protocole commun de préparation des essais

Les essais sont réalisés sur la base de gâchées de 0,25 m³ de béton.

- On introduit dans le malaxeur une quantité de sable à teneur en eau naturelle voisine de la quantité demandée pour la gâchée et on l'homogénéise. On arrête le malaxeur et on prélève deux échantillons de sable en deux points diamétralement opposés dans le malaxeur. On mesure la teneur en eau par séchage au four micro-ondes, sur les deux échantillons de 1 kg. La quantité exacte de sable humide à introduire dans le malaxeur est calculée en tenant compte de la teneur en eau réelle mesurée, de manière à ajuster la masse de sable sec pour la formule nominale. Le complément de sable humide est pesé et introduit dans le malaxeur. Après séchage, les deux échantillons de sable ainsi que la quantité d'eau évaporée sont également réintroduits dans le malaxeur.
- Des gravillons sont pré-homogénéisés dans une bétonnière. On arrête la bétonnière et on pèse deux échantillons de 1 kg de gravillons prélevés aléatoirement dans la bétonnière. On mesure leur teneur en eau par séchage au four à micro-ondes. La quantité exacte de gravillon humide à introduire dans le malaxeur est calculée en tenant compte de la teneur en eau réelle mesurée, de manière à avoir la quantité indiquée de gravillon sec pour la formule nominale.
- On pèse les constituants dans une trémie, en valeur cumulée, dans l'ordre suivant
 - la moitié des gravillons,
 - la totalité du ciment,
 - la totalité des cendres volantes,
 - la deuxième moitié des gravillons.
- Les constituants sont introduits dans le malaxeur.
- Les quantités correspondant aux différentes introductions de constituants liquides sont pré-pesées dans des récipients séparés. De manière à obtenir le maximum de précision dans nos mesures, le remplissage des récipients est effectué comme suit : on sèche et on mouille le récipient (en le remplissant puis le vidant d'eau), on tare et on remplit avec la quantité calculée correspondante d'eau, on tare de nouveau le récipient et on ajoute, à l'aide d'une pipette, la quantité de superplastifiant nécessaire calculée pour l'introduction prévue. Le cas échéant, on tare une troisième fois le récipient et on ajoute la quantité nécessaire d'agent de cohésion. On bouche et homogénéise la solution.
Dans le cas où le superplastifiant et l'agent de cohésion sont rajoutés indépendamment, on tient compte, de la même manière, de la quantité nécessaire au mouillage du récipient. Dans le cas de l'agent de cohésion, le mouillage est réalisé avec le produit lui-même.
- L'eau efficace prend en compte l'eau contenue dans le superplastifiant.

A partir de cette étape, on démarre le malaxeur et le système d'acquisition, puis on introduit dans le malaxeur les quantités nécessaires d'eau, de superplastifiant, et d'agent de cohésion suivant des protocoles spécifiques détaillés pour chaque essai dans la suite de ce compte-rendu.

5.2 Protocoles spécifiques

On rappelle ici les différentes phases du plan d'expérimentation. Les différents modes d'introduction des composants ont été réalisés pour analyser le fonctionnement des sondes de mesure de teneur en eau et non pour qualifier le béton.

5.2.1 Essais préliminaires (P1, P2, P3)

Ces essais sont les seuls réalisés sur un sable avec des fines. L'introduction de l'eau est réalisée par paliers de 10 l/m^3 , à partir du dosage correspondant à la teneur en eau naturelle initiale des granulats. Il n'y a pas d'introduction d'adjuvants liquides.

5.2.2 Introduction d'eau en une phases (B1, B2, B3)

Trois essais sont réalisés sur la formule F11 de béton autoplaçant, l'introduction de l'eau étant effectuée en une seule phase, à partir du dosage en eau correspondant à la teneur en eau naturelle initiale des granulats (« à sec »), jusqu'au dosage nominal de la formule (175 l/m^3). Les adjuvants sont introduits suivant un protocole de type industriel 15 secondes après le début de l'introduction de l'eau d'ajout. L'objectif de ces essais est de qualifier l'aptitude des systèmes de mesure à déterminer la teneur en eau du mélange « à sec » et du béton fabriqué. Ces essais permettent également de vérifier que la formule de béton choisie a les caractéristiques d'étalement correspondante à un béton autoplaçant.

- A la différence des autres essais, pour les essais B2 et B3 (de même que pour B0) les granulats sont pré-mouillés par trempage dans l'eau dans une trémie pendant 24 heures puis égouttés naturellement. L'objectif est de réaliser des essais sur des granulats dont la teneur en eau initiale est supérieure à leur taux d'absorption. Dans les trois cas, la préparation de l'essai se réalise suivant le protocole commun précisé précédemment.
- Le malaxeur et le système d'acquisition sont démarrés, puis les matériaux sont malaxés pendant 2 minutes.
- Introduction de l'eau à concurrence de 175 l/m^3 d'eau efficace (fonction de la teneur en eau initiale des granulats) pré-mélangés avec la quantité de superplastifiant de la formule.
- Introduction de l'agent de cohésion 15s après le début de l'introduction de l'eau.
- Arrêt du malaxeur et prélèvement de béton après 2 minutes de malaxage à partir du début de l'introduction de l'eau.
- Mise en marche du malaxeur puis arrêt après 2 minutes de malaxage pour nouveau prélèvement de béton.
- Pour l'essai B1, cinq autres prélèvements de produit dans le malaxeur sont effectués espacés de 2 minutes de malaxage.

Des essais d'étalement sont réalisés sur les échantillons de béton prélevés.

5.2.3 Introduction d'eau en trois phases (B0)

Cet essai est réalisé sur la formule F11 de béton autoplaçant avec l'introduction de l'eau en trois phases : jusqu'à 80 l/m^3 , jusqu'à 90 l/m^3 et jusqu'au dosage nominal de la formule 175 l/m^3 (dosages en eau efficace). Le superplastifiant est introduit avec le dernier ajout d'eau, alors que l'agent de cohésion est introduit 15 secondes après le début de la dernière introduction de l'eau. A la fin de l'essai des introductions successives supplémentaires de 10 l/m^3 sont réalisées pour permettre de vérifier la sensibilité des mesures de teneur en eau autour de la formule nominale du béton, ce qui porte la quantité totale d'eau à 225 l/m^3 .

- Les granulats sont pré-mouillés par trempage dans l'eau dans une trémie pendant 24 heures puis égouttés naturellement.
- Le malaxeur et le système d'acquisition sont démarrés, puis les matériaux malaxés pendant 2 minutes.

- Introduction de l'eau à concurrence de 80 l/m^3 d'eau efficace (fonction de la teneur en eau initiale des granulats) sans adjuvant, suivie par 2 minutes de malaxage.
- Introduction de 10 l/m^3 d'eau sans adjuvant, suivie par 2 minutes de malaxage.
- Introduction de 85 l/m^3 d'eau pré-mélangée avec la quantité de superplastifiant correspondant à la formule nominale, suivie par 2 minutes de malaxage.
- Introduction de l'agent de cohésion 15 s après le début de la troisième introduction d'eau.
- Arrêt du malaxeur et prélèvement de béton dans le malaxeur.
- 5 introductions de 10 l/m^3 d'eau sans adjuvant, espacées par 2 minutes de malaxage sont ensuite réalisées pour vérifier la sensibilité des mesures de teneur en eau autour de la formule nominale du béton.

5.2.4 Introduction d'eau par paliers (E1, E2, E3, E4)

Ces essais sont réalisés sur la formule F11 de béton autoplaçant.

- La quantité d'eau nécessaire pour obtenir 15 l/m^3 d'eau efficace (fonction de la teneur en eau naturelle du matériau) est introduite dans le malaxeur. Cette quantité tient compte des 60 l/m^3 d'eau absorbable par les granulats.
- Le malaxeur et le système d'acquisition sont démarrés, puis les matériaux malaxés pendant 2 minutes.
- 17 introductions de 10 l/m^3 d'eau sans superplastifiant et sans agent de cohésion, espacés par 2 minutes de malaxage.

5.2.5 Introduction d'eau et superplastifiant par paliers (S1, S2, S3)

Ces essais sont réalisés sur la formule sèche de béton autoplaçant.

- La quantité d'eau nécessaire pour obtenir 15 l/m^3 d'eau efficace (fonction de la teneur en eau naturelle du matériau) est introduite dans le malaxeur. Cette quantité tient compte des 60 l/m^3 d'eau absorbable par les granulats.
- Le malaxeur et le système d'acquisition sont démarrés, puis les matériaux malaxés pendant 2 minutes.
- Introduction de 10 l/m^3 d'eau sans superplastifiant et sans agent de cohésion, puis 2 minutes de malaxage.
- Introduction de 10 l/m^3 d'eau et d'extrait sec de superplastifiant correspondant à 35 l/m^3 d'eau efficace, sans agent de cohésion, puis 2 minutes de malaxage.
- 10 introductions de 10 l/m^3 d'eau et de la quantité de superplastifiant correspondant à 10 l/m^3 d'eau, sans agent de cohésion, espacées et suivies par 2 minutes de malaxage.

5.2.6 Introduction d'eau, superplastifiant et agent de cohésion par paliers (A1)

Cet essai est similaire aux derniers présentés, avec une introduction d'agent de cohésion en proportion, dans le mélange.

- La quantité d'eau nécessaire pour obtenir 15 l/m^3 d'eau efficace (fonction de la teneur en eau naturelle du matériau) est introduite dans le malaxeur.

- Le malaxeur et le système d'acquisition sont démarrés, puis les matériaux malaxés pendant 2 minutes.
- Introduction de 10 l/m³ d'eau sans superplastifiant et sans agent de cohésion, puis 2 minutes de malaxage.
- Introduction de 10 l/m³ d'eau et d'extrait sec de superplastifiant correspondant à 35 l/m³ d'eau efficace, sans agent de cohésion, puis 2 minutes de malaxage.
- 3 introductions de 10 l/m³ d'eau et de la quantité de superplastifiant correspondant à 10 l/m³ d'eau, sans agent de cohésion, espacées et suivies par 2 minutes de malaxage.
- Introduction de 10 l/m³ d'eau, de la quantité de superplastifiant correspondant à 10 l/m³ d'eau et de la quantité d'agent de cohésion correspondant à 65 l/m³ d'eau efficace, puis 2 minutes de malaxage.
- 7 introductions de 10 l/m³ d'eau, de la quantité de superplastifiant correspondant à 10 l/m³ d'eau et de la quantité d'agent de cohésion correspondant à 10 l/m³ d'eau, espacées et suivies par 2 minutes de malaxage.

6. RESULTATS DES ESSAIS

6.1 Essais préliminaires

Les essais P1, P2 et P3 sont des tests préliminaires réalisés sur un sable broyé avec fines (alors que pour tous les autres essais, on utilise les constituants solides correspondant à la formule F11 de béton autoplaçant). L'introduction de l'eau est réalisée par incréments de 10 l/m^3 , à partir d'un dosage en eau qui correspond à la teneur en eau naturelle ou initiale du sable. La figure 6.1 présente le dosage en eau et les réponses des sondes et du wattmètre correspondantes, lors du déroulement des essais.

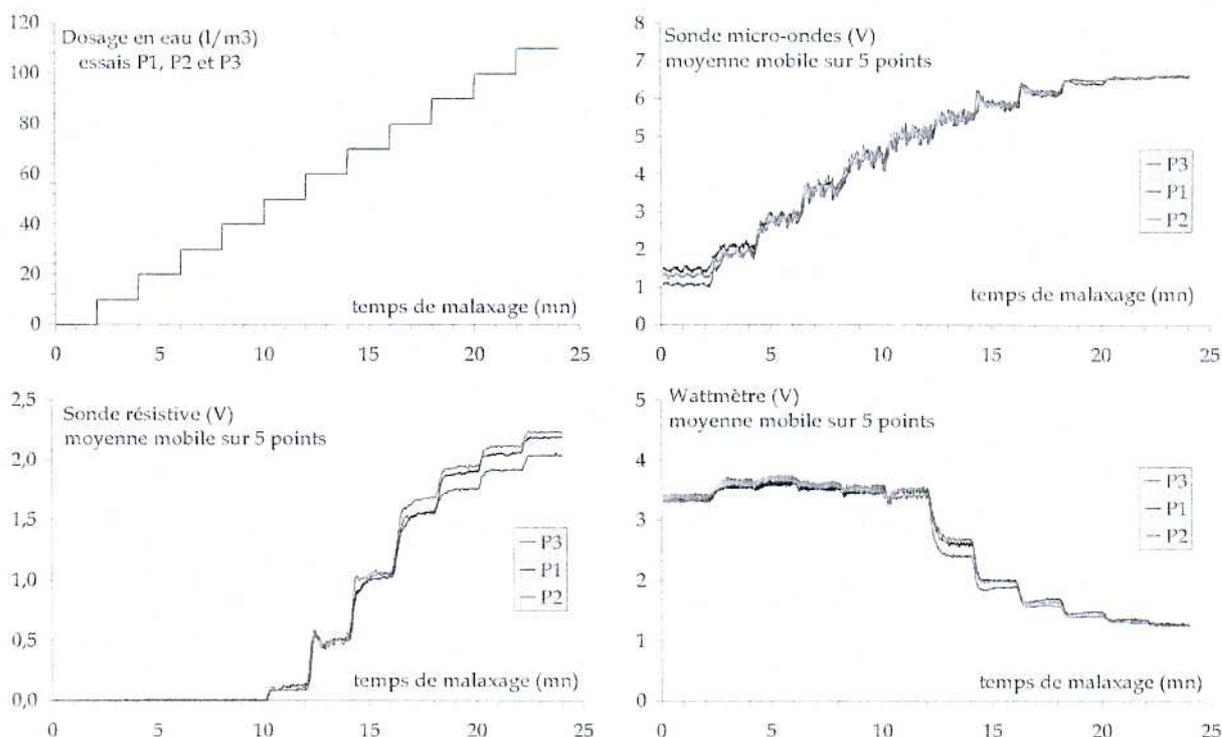


Figure 6.1 Introduction de l'eau et réponse des sondes et du wattmètre pour les essais préliminaires

6.2 Introduction d'eau en une phase

Les essais B1, B2 et B3 sont réalisés avec une séquence d'introduction de constituants liquides typiques de la fabrication d'un Béton Prêt à l'Emploi, en une phase. Le dosage en eau initial est une conséquence de la teneur en eau naturelle ou initiale des granulats. Il est respectivement de 8 l/m^3 , 39 l/m^3 et 32 l/m^3 d'eau efficace pour les essais B1, B2 et B3.

La figure 6.2 présente le dosage en eau et les réponses correspondantes des sondes et du wattmètre, lors du déroulement des essais. Les périodes d'absence de l'enregistrement du wattmètre correspondent aux périodes où le malaxeur est à l'arrêt afin de permettre le prélèvement d'échantillons pour la mesure de l'étalement.

Des essais d'étalement sont réalisés après 2 et 4 minutes de malaxage. Les valeurs de l'étalement (tableau 6.1) sont comparables pour les 3 fabrications (B1, B2 et B3), aussi bien après 2 minutes (56, 55 et 57 cm respectivement) qu'après 4 minutes (63, 63 et 64 cm respectivement) de malaxage. On remarque que le matériau fabriqué est bien un béton

autoplaçant (du moins au sens de l'étalement), mais que pour obtenir l'étalement visé un malaxage supérieur à 2 minutes est nécessaire.

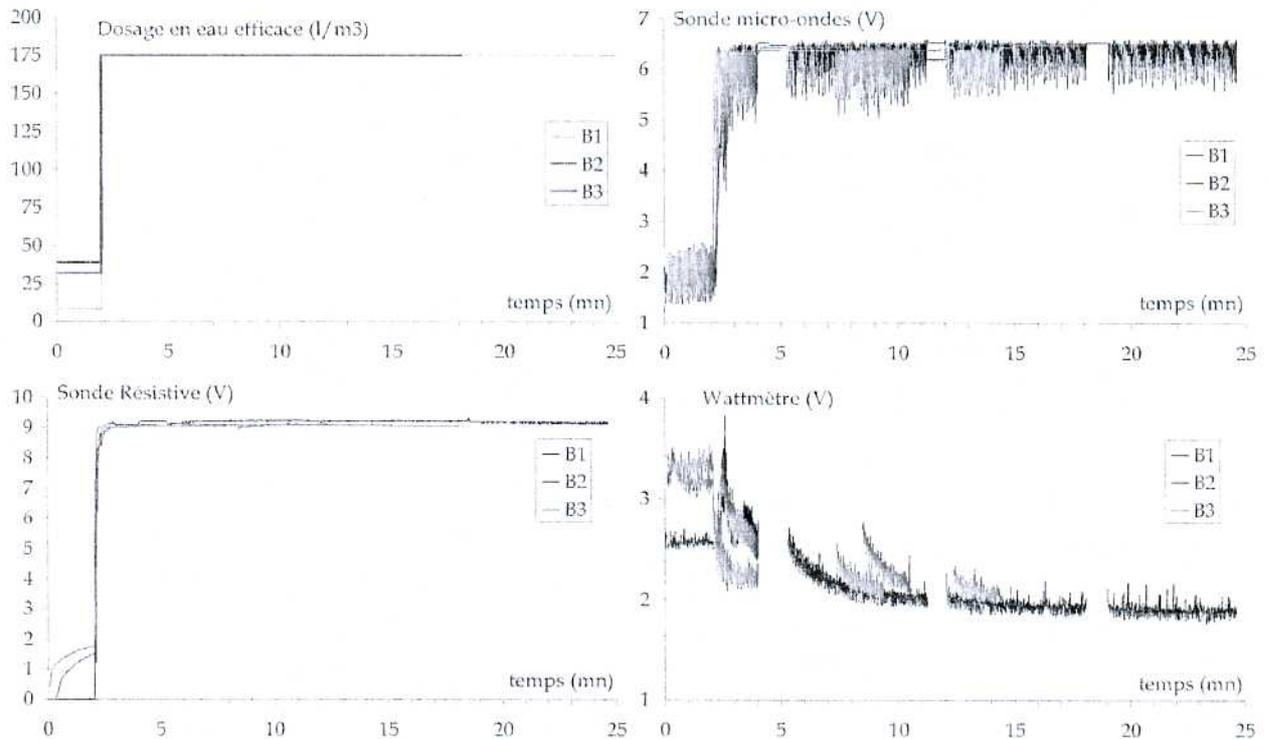


Figure 6.2 Introduction de l'eau et réponse des sondes et du wattmètre pour les essais type BPE

essai	temps de malaxage	2 min	4 min	10 min	16 min	22 min	28 min	34 min	40 min
B1	étalement (cm)	57	64	64	58	47	42	34	30
B2	étalement (cm)	55	63						
B3	étalement (cm)	56	63						

Tableau 6.1 Etalement mesuré sur les essais B1, B2 et B3 en fonction du temps de malaxage avec dosage nominal en eau (175 l/m^3)

Pour l'essai B1 le malaxage est prolongé jusqu'à 40 minutes. Une diminution très importante de l'étalement (en s'amplifiant avec le temps de malaxage) est constatée à partir de 10 minutes de malaxage (Tableau 6.1), due probablement à l'activité chimique du ciment. Ce constat a son importance pour le schéma d'introduction de constituants liquides des essais E1-4, S1-3 et A1, présentés dans le paragraphe 6.4. Pour ces essais, dont la durée totale de malaxage est importante, nous ne pouvons pas obtenir un béton autoplaçant, même si le dosage nominal de tous les constituants est bien respecté.

6.3 Introduction d'eau en trois phases

L'essai B0 est réalisé avec 3 paliers de dosage en eau efficace de : 80, 90 et 175 l/m^3 . Le dosage initial dû à la teneur en eau naturelle ou initiale des granulats est de 48 l/m^3 . La figure 6.3 présente le dosage en eau et les réponses des sondes et du wattmètre correspondantes, lors du déroulement de l'essai. Comme pour les essais B1, B2 et B3, la période d'absence de l'enregistrement du wattmètre correspond à la période où le malaxeur est à l'arrêt afin de permettre le prélèvement de l'échantillon pour la mesure de l'étalement.

La mesure d'étalement réalisée 2 minutes après la troisième introduction d'eau est bien inférieure (45 cm) aux valeurs obtenues pour les essais avec introduction d'eau en une seule phase.

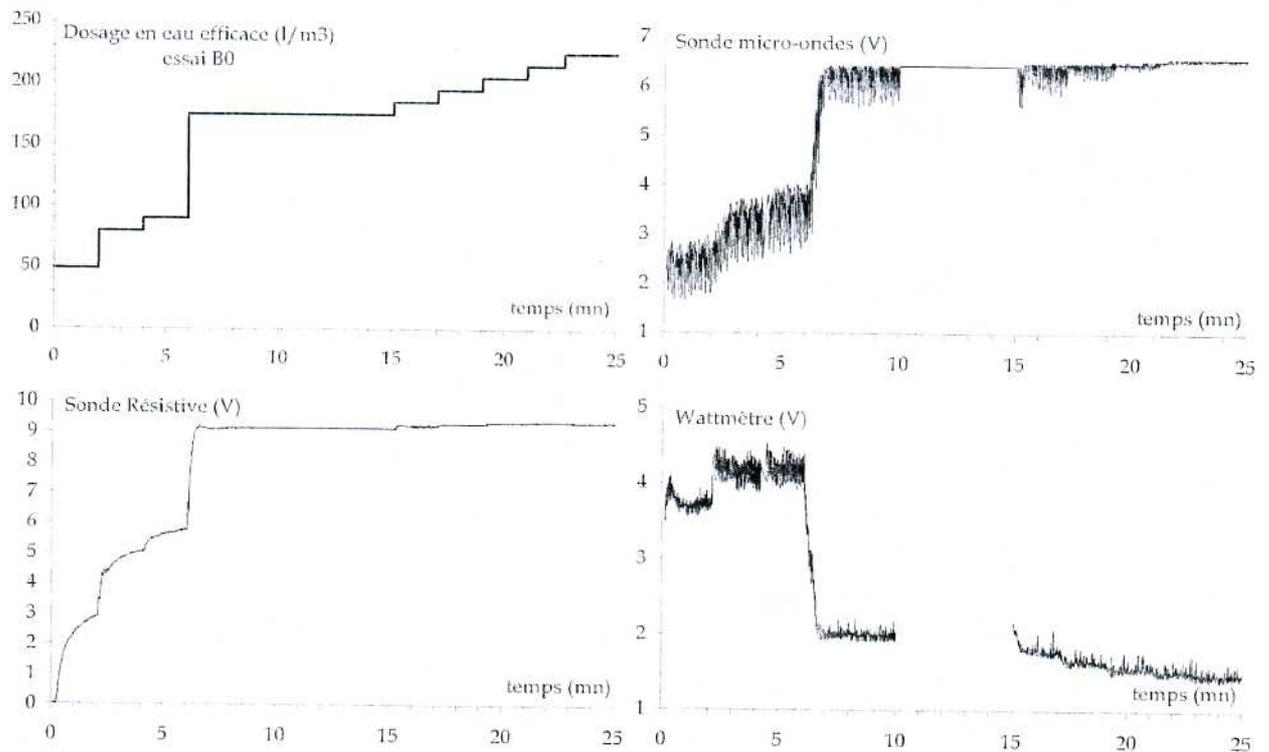


Figure 6.3 Introduction de l'eau et réponse des sondes et du wattmètre pour l'essai B0

6.4 Introduction d'eau par paliers

Lors de ces essais, l'introduction de l'eau est réalisée par incréments de 10 l/m^3 , à partir d'un dosage en eau initial, du mélange, fixé à 15 l/m^3 d'eau efficace, compte tenu des 60 l/m^3 d'eau absorbable par les granulats. Pour les essais E1 à E4 l'eau est le seul constituant liquide introduit dans le mélange. Pour les essais S1 à S3 le superplastifiant est pré-mélangé à l'eau qui est introduite à partir du palier correspondant à 35 l/m^3 d'eau efficace. Pour l'essai A1 l'agent de cohésion est également pré-mélangé à l'eau et introduit à partir du palier de dosage en eau efficace de 65 l/m^3 (protocole d'introduction décrit au paragraphe 5).

Ces schémas d'introduction d'eau ont été définis afin de permettre le calcul de la précision de mesure de la teneur en eau et la sensibilité des capteurs (courbe d'étalonnage) sur la totalité de leur plage de mesure. L'objectif n'est pas l'obtention d'un béton autoplaçant à la fin de l'essai. Cependant, pour que ces essais soient pertinents, il faut que la mesure considérée ne soit sensible qu'à la teneur en eau à l'instant t , indépendamment du scénario de mouillage du mélange.

Les valeurs de teneur en eau naturelle ou initiale des granulats pour les huit essais sont données dans le tableau 6.2. Ce tableau présente également ces mêmes valeurs mesurées lors des essais B0 à B3.

essai	date réalisation	eau efficace initiale (l/m ³)	teneur en eau naturelle ou initiale moins taux d'absorption		Température mélange	
			sable	gravillon	moyenne (°C)	écart type (°C)
B0	17-oct	49,0	4,3%	1,9%	20,9	0,7
B1	13-juin	8,3	1,8%	-0,8%	26,2	0,5
B2	18-oct	39,7	2,8%	2,2%	20,5	0,1
B3	19-oct	32,6	2,7%	1,5%	19,2	0,2
E1	23-mai	12,4	1,7%	-0,1% *	25,4	1,5
E2	23-mai	12,4	1,7%	-0,1% *	26,6	1,7
E3	28-mai	0,3	1,0%	-1,0% *	30,5	1,7
E4	07-juin	-1,8 *	0,9%	-1,1% *	25,3	1,7
S1	01-juin	-0,3 *	1,2%	-1,2% *	24,2	1,0
S2	01-juin	-0,3 *	1,2%	-1,2% *	25,7	1,1
S3	05-juin	-1,3 *	1,0%	-1,2% *	26,7	1,1
A1	06-juin	-1,6 *	0,9%	-1,2% *	24,4	1,1

* Matériau non saturé

Tableau 6.2 Teneur en eau naturelle ou initiale des granulats (exprimée après soustraction du taux d'absorption) et limites de température du mélange lors des essais sur formule de béton

La figure 6.4 présente le dosage en eau et les réponses des sondes et du wattmètre correspondantes, lors du déroulement des essais. On indique les incréments pour lesquels des adjuvants sont également introduits dans le mélange.

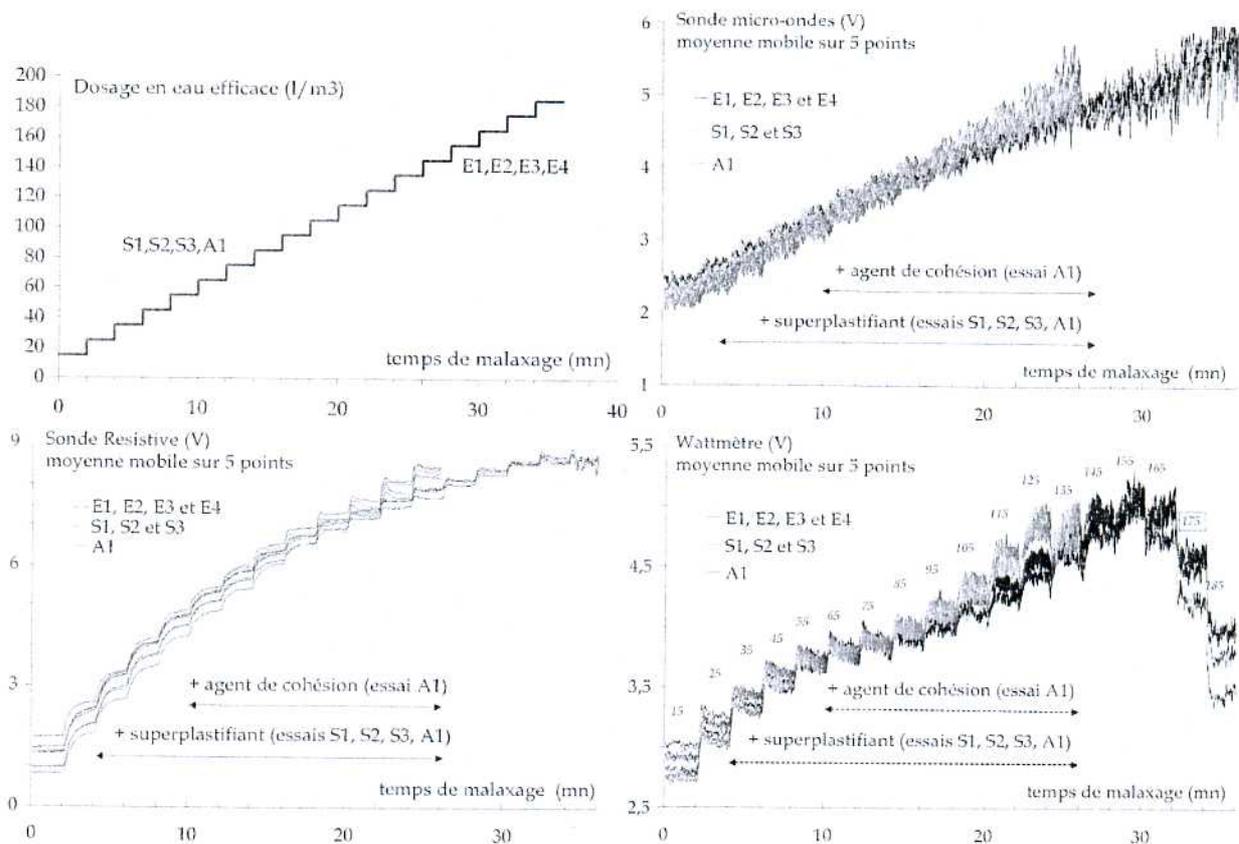


Figure 6.4 Introduction de l'eau et réponse des sondes et du wattmètre pour les essais avec introduction de l'eau par paliers

7. CADRE D'ANALYSE DES DONNEES

7.1 Teneur en eau et dosage en eau

La mesure des sondes de teneur en eau est traditionnellement exprimée en pourcentage. Elle est définie par le rapport du poids de l'eau et celui du composant sec. Pour préciser la concentration d'eau dans le béton, nous utilisons ici le dosage en eau mesuré en l/m^3 . C'est l'usage dans le domaine du béton prêt à l'emploi.

Dans ce document on fait toujours référence au dosage en eau efficace. L'eau efficace est définie à partir de l'eau totale (eau libre apportée par les granulats + eau d'ajout + eau apportée par le superplastifiant) en s'affranchissant de l'eau pouvant être absorbée par les granulats.

7.2 Caractérisation des erreurs

Les données présentées précédemment sont analysées afin d'estimer la précision de mesure de la teneur en eau par les différents systèmes de mesure utilisés. On présente dans ce paragraphe le cadre théorique de cette analyse.

Toute la campagne a été réalisée avec le même réglage des différents systèmes de mesure. On détermine la réponse des différents capteurs sur une échelle de 0 – 10V à des dosages en eau (efficace) imposés dans le malaxeur. Le système de mesure en place permet une acquisition des signaux des capteurs toutes les secondes.

Deux types de variation du signal peuvent être observées : une en basse fréquence et une en haute fréquence.

7.2.1 Stabilisation du signal

La variation en basse fréquence semble associée, de manière générale, à l'homogénéisation de l'eau dans le mélange granulaire : après chaque introduction de constituants liquides, la moyenne mobile varie rapidement, puis a tendance à se stabiliser en quelques minutes. L'erreur due à une stabilisation insuffisante de la mesure est négligée, faute de pouvoir l'évaluer.

Lors d'une acquisition en continu, il serait possible de se satisfaire de mesures prises sans attendre la stabilisation de la mesure, en extrapolant les mesures prises dans la zone non-stabilisée pour anticiper la réponse lors de la stabilisation.

7.2.2 Bruit du signal

La variation du signal des sondes en haute fréquence génère une erreur de mesure que nous allons appeler erreur due au bruit (du signal). Cette erreur est évaluée ici sur 20 mesures successives dans une zone stabilisée (en basse fréquence) de la réponse du capteur. La valeur moyenne de ces mêmes mesures est calculée. Cette valeur est la mesure de l'échantillon considéré, prise en considération pour le capteur (voir paragraphe 7.2.3).

L'erreur due au bruit du signal correspond aux mesures rapprochées dans le temps sur un même échantillon de matériau, dont la teneur en eau réelle ne change pas pendant la mesure.

Lors d'une acquisition en continu l'erreur due au bruit du signal peut être diminuée en réalisant des moyennes mobiles (ou en traitement de signal plus complexe par application de filtre de TCHEBICHEV par exemple).

7.2.3 Courbe de calibrage

En mettant en relation la mesure donnée par un capteur (moyenne de 20 mesures successives dans une zone stabilisée) avec la valeur du dosage en eau imposé dans le malaxeur à l'instant de la mesure on construit la courbe de calibrage du capteur.

7.2.4 Répétabilité des mesures

Les points de la courbe de calibrage diffèrent d'un essai à l'autre. En effet, la mesure sur des échantillons différents d'un même matériau (avec entre autres un même dosage en eau), dans la même configuration d'essai et avec la même sonde, donne des résultats différents. Cette variation est le reflet d'une imprécision que nous allons appeler erreur de répétabilité. Elle est estimée ici pour les teneurs en eau pour lesquelles on dispose d'au moins quatre essais sur des matériaux réputés identiques (même formule sèche et même dosage en eau).

7.2.5 Sensibilité des capteurs

Le calcul de la sensibilité des capteurs est réalisé ici à partir de deux points voisins (de 10 l/m³) de la courbe de calibrage. La sensibilité est déterminée pour un essai et un dosage en eau donnés. La sensibilité est calculée autour de tous les points de mesure (dosages en eau) où cela est possible. Si plusieurs valeurs sur des échantillons réputés identiques sont disponibles on détermine la sensibilité moyenne et l'écart-type pour le dosage en eau respectif.

7.3 Précision de mesure

On utilise les notations suivantes :

$E(.)$, $s(.)$ et $cv(.)$ – moyenne, écart-type et coefficient de variation estimés de la variable aléatoire « . » ;

$p(d)$ – sensibilité du capteur autour du dosage en eau « d » – en (l/m³)/V ;

$r(d)$ – réponse du capteur lors de la mesure du dosage « d » – en V ;

$m(d)$ – mesure du dosage en eau « d » – en l/m³ ;

précision(d) – précision de mesure du dosage « d ».

La précision de mesure est définie ici de manière à ce que 90% de mesures soient plus près de la valeur réelle à mesurer que la précision de mesure. On suppose dans la suite les différents types d'erreur de mesure, aléatoires, indépendantes et se distribuant suivant une gaussienne.

On peut écrire :

$$s(m) = s(r p) = [E(r)^2 s(p)^2 + s(r)^2 E(p)^2]^{1/2}$$

Mais :

$$d \approx E(m(d)) = E(r(d).p(d)) = E(r(d)).E(p(d))$$

La précision de mesure est estimée alors par la relation :

$$\text{précision}(d) = \pm 1,64 s(m(d)) \approx \pm 1,64 [d^2 cv(p(d))^2 + s(r(d))^2 E(p(d))^2]^{1/2}$$

La présente campagne expérimentale permet d'estimer les précisions due au bruit du signal $r(d)$ et à sa répétabilité qu'on appellera dans la suite « précision due au bruit » et « précision de répétabilité ». On ignore les autres sources d'erreur : Compte tenu de l'acquisition en continu, on suppose que le bruit de mesure a un effet négligeable dans l'erreur de calcul de la sensibilité du capteur. Il en résulte la relation :

$$S(r(d))^2 = s^2_{\text{répétabilité}} r(d) + s^2_{\text{bruit}} r(d)$$

Compte tenu de l'acquisition en continu, les sensibilités $p(d)$ sont calculées sur des valeurs moyennes du signal $r(d)$ pour différents dosages d . On suppose alors que le bruit de mesure a un effet négligeable dans l'erreur de calcul de la sensibilité du capteur. Il en résulte la relation :

$$Cv(p(d)) = cv_{\text{répétabilité}}(p(d))$$

Et nous pouvons noter :

$$\text{Précision}(d)^2 \approx \text{précision}_{\text{sensibilité}}(d)^2 + \text{précision}_{\text{répétabilité}}(d)^2 + \text{précision}_{\text{bruit}}(d)^2$$

où,

$$\text{précision}_{\text{sensibilité}}(d) \approx \pm 1,643 d cv_{\text{répétabilité}}(p(d))$$

$$\text{précision}_{\text{répétabilité}}(d) \approx \pm 1,643 s_{\text{répétabilité}}(r(d)) E(p(d))$$

$$\text{précision}_{\text{bruit}}(d) \approx \pm 1,643 s_{\text{bruit}}(r(d)) E(p(d)).$$

7.4 Limites de la démarche

- Des considérations statistiques montrent qu'une bonne estimation de l'écart type nécessite au moins 15 réalisations de la variable aléatoire (15 mesures). Pour qualifier l'erreur de répétabilité, on utilise ici seulement 4 mesures.
- L'estimation de la sensibilité d'un capteur est également entachée d'erreur. Cela est dû au nombre limité d'essais disponibles, et aux variations que la sensibilité peut avoir avec le dosage en eau mesuré.
- De manière évidente, nos expériences ne fournissent pas d'information sur la reproductibilité des mesures qui correspond aux mesures de matériaux différents réputés identiques, prise dans des configurations d'essais différentes, en termes de sites, de sondes et d'opérateur. On ignore dans notre analyse cette source d'erreur.
- En considérant les sources d'erreur indépendantes, on néglige, entre autres, l'influence que le site et les conditions d'essais peuvent avoir sur la résolution et la répétabilité des mesures. Par exemple, un site où le calibrage des capteurs est plus difficile va générer des erreurs de répétabilité plus grandes que celles déterminées ici. Un site où les sondes sont intégrées dans un malaxeur d'une plus grande capacité pourrait voir les erreurs de résolution diminuer.
- L'erreur due à un mauvais calibrage des capteurs (difficultés dues à la non-linéarité de la courbe de calibrage, dérive du signal, erreurs de l'opérateur ...) est également négligé dans notre analyse, faute de pouvoir l'évaluer.

On en conclut que les précisions de mesure déterminées dans cette étude sont des ordres de grandeur et sont maximales compte tenu que toutes les erreurs ont été attribuées aux capteurs.. Il faut donc analyser le classement des différentes erreurs de mesures obtenues.

8. INTERPRETATION DES RESULTATS

Les essais E1 à E4, S1 à S3 et A1 permettent une estimation de la précision due au bruit et de la répétabilité. En valeur absolue ces estimations ne sont pas suffisamment significatives pour être exploitées. (voir les explications fournies au paragraphe 7.4). On retient donc uniquement les performances en valeurs relatives (« classement ») d'un système de mesure par rapport à un autre et d'un système de mesure sur une plage de mesure de la teneur en eau par rapport une autre plage de mesure.

Ce classement est valable si on suppose une influence faible des conditions d'essai. En effet, on raisonne sur des résultats obtenus pour une seule formule de béton, et pour un mode d'introduction des constituants particulier. Les essais P1 à P3 et B0 à B3 permettent d'amender ces conclusions statistiques, bien qu'ils ne fournissent pas des données statistiquement valables.

8.1 Sonde résistive

La figure 8.1 représente les réponses de la sonde résistive tournante lors des essais P1, B0, B2, E1 et A1. On observe que la stabilisation du signal de la sonde est, de manière générale, plus longue que 2 minutes. Le signal se stabilise rapidement au dosage nominal de 175 l/m^3 . A ce dosage la sonde résistive a une sensibilité de mesure réduite. Toutefois, dans l'essai B0 on peut distinguer au moins le premier ajout d'eau de 10 l/m^3 au-delà du dosage nominal de 175 l/m^3 .

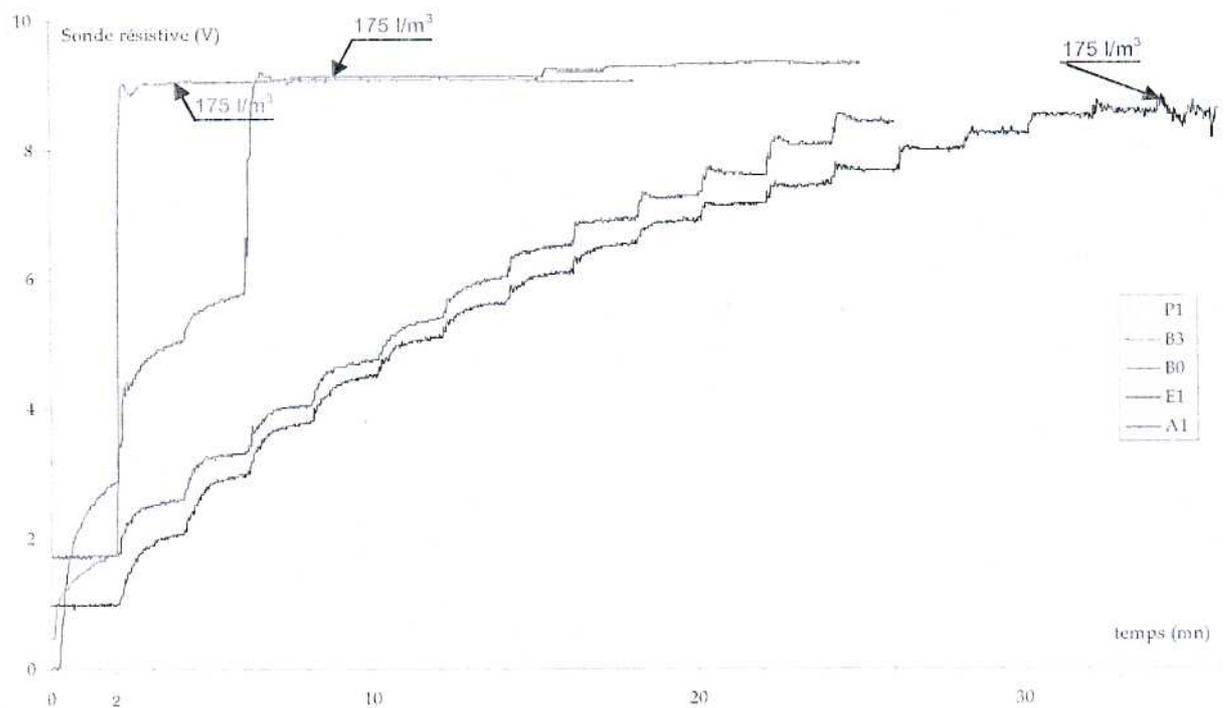


Figure 8.1 Mesure de la sonde résistive comparée pour les différents types d'essais

essais	dosage en eau efficace l/m ³	précision de la sonde résistive (l/m ³)		
		due au bruit	de répétabilité	de la sensibilité
	15	0,3	4,9	–
	25	0,3	4,2	3,2
	35	0,3	4,9	4,5
	45	0,2	4,8	3,2
	55	0,4	5,0	3,7
E1	65	0,4	5,3	5,3
E2	75	0,5	6,0	11,1
E3	85	0,4	5,4	18,7
E4	95	0,5	5,0	18,5
S1	105	0,8	6,7	14,6
S2	115	0,8	7,3	40,0
S3	125	0,9	9,4	61,3
A1	135	1,0	13,3	84,2
	145	1,1	3,7	59,5
	155	1,3	4,7	61,2
	165	1,2	2,5	57,3
	175	7,7	11,6	134
	185	373	479	5922
B0 à B3	175	11,8	32,8	–

Tableau 8.1 Précision de mesure de la sonde résistive

Le tableau 8.1 recense les précisions de mesure du dosage en eau efficace avec la sonde résistive, déterminées sur les essais E1 à E4, S1 à S3 et A1. On y intègre les précisions de bruit et de répétabilité déterminées lors de la mesure sur la formule nominale du béton (175 l/m³) avec les essais B0 à B3.

On remarque que :

- La sensibilité de la sonde résistive est insatisfaisante pour des dosages en eau élevés.
- L'erreur due au bruit est faible pour toute la plage de mesure de la sonde.
- Les trois types de précision indiquent des erreurs simultanément réduites pour des dosages en eau efficace inférieurs à 65 l/m³.

On représente figure 8.2 les points connus des courbes de calibrage de la sonde résistive.

On remarque que la répétabilité de la mesure par la sonde résistive est mise en défaut lorsque les séquences d'introduction des constituants liquides sont modifiées (en comparant les essais B0 à B3 avec les essais E, S et A).

On constate l'influence des adjuvants sur la réponse de la sonde résistive pour des dosages en eau supérieurs à 85 l/m³. La mesure surestime le dosage en eau en présence des adjuvants liquides (si le calibrage est effectué sans adjuvant).

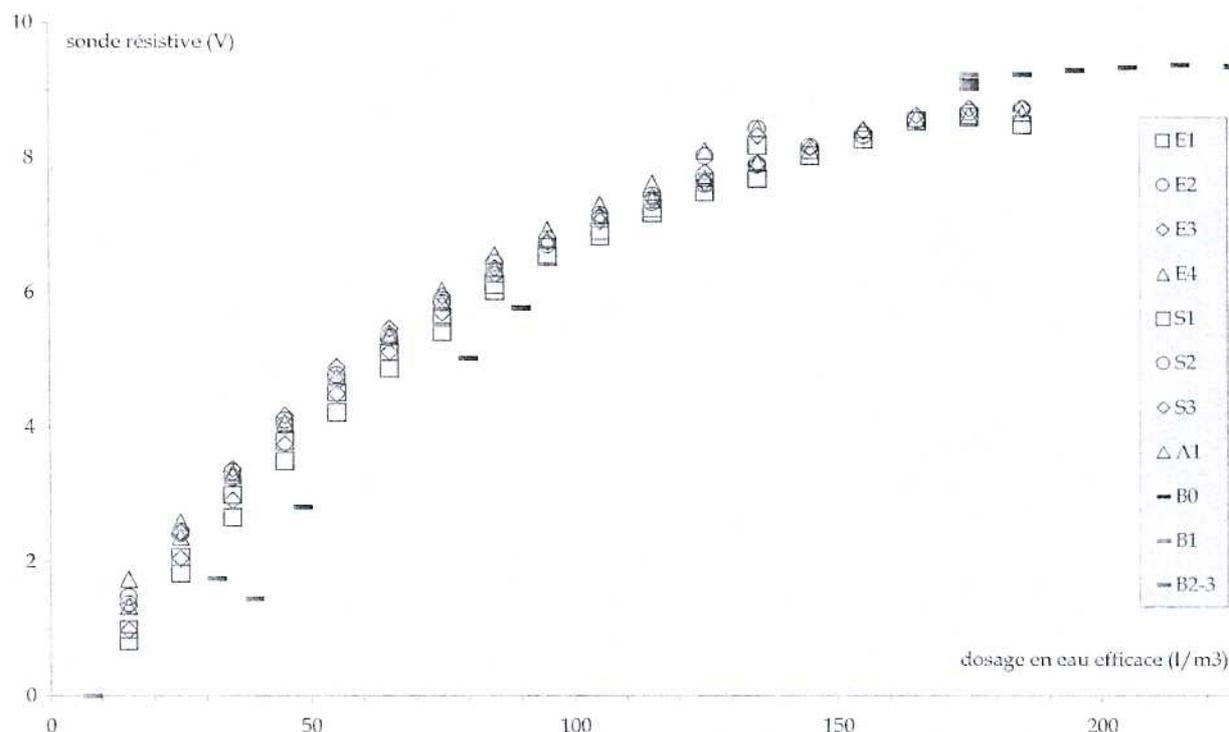


Figure 8.2 Points de calibrage pour la sonde résistive

Pour l'essai B1, on remarque que la sonde n'indique pas de présence d'eau au point initial. A ce point initial le taux de saturation des granulats est inférieur à 1 (le taux d'humidité des granulats est inférieur au taux d'absorption) et le matériau ne contient que très peu d'eau libre. Il semblerait donc que la sonde mesure seulement l'eau interstitielle (eau efficace) et n'est pas sensible à l'eau absorbée par les granulats. Par contre il se pourrait qu'un granulat dont la teneur en eau initiale est inférieure au taux d'absorption puisse contenir à la fois de l'eau absorbée et de l'eau libre.

Enfin, lors des essais P1 à P3 (figure 6.1) la sonde résistive tournante ne donne pas de mesure avant un dosage en eau important (supérieur à 50 l/m^3). Même pour des dosages supérieurs à 50 l/m^3 le signal de la sonde est inférieur à ce qu'il serait pour la formule béton. L'absence du liant hydraulique (basicité) est probablement la cause d'une forte sous-estimation du dosage en eau mesurée.

8.2 Sonde micro-ondes

La réponse de la sonde micro-ondes lors de différents types d'essais est représentée figure 8.3. La stabilisation du signal intervient plus rapidement que pour la sonde résistive (après environ 1 minute). Le bruit du signal est lui très important. Un filtrage du signal semble ici nécessaire pour pouvoir exploiter les résultats de ce type de sonde. Il n'y a pas de bruit de mesure lors de l'arrêt du malaxeur (celui-ci étant probablement associé au passages des pales du malaxeur au voisinage de la sonde).

Les précisions de mesure sont indiquées tableau 8.2. On remarque que mise à part l'erreur due au bruit de mesure, la sonde pourrait donner des mesures acceptables des dosages en eau efficace faibles (inférieurs à 35 l/m^3). La précision de cette sonde se dégrade beaucoup avec l'augmentation de la teneur en eau mesurée.

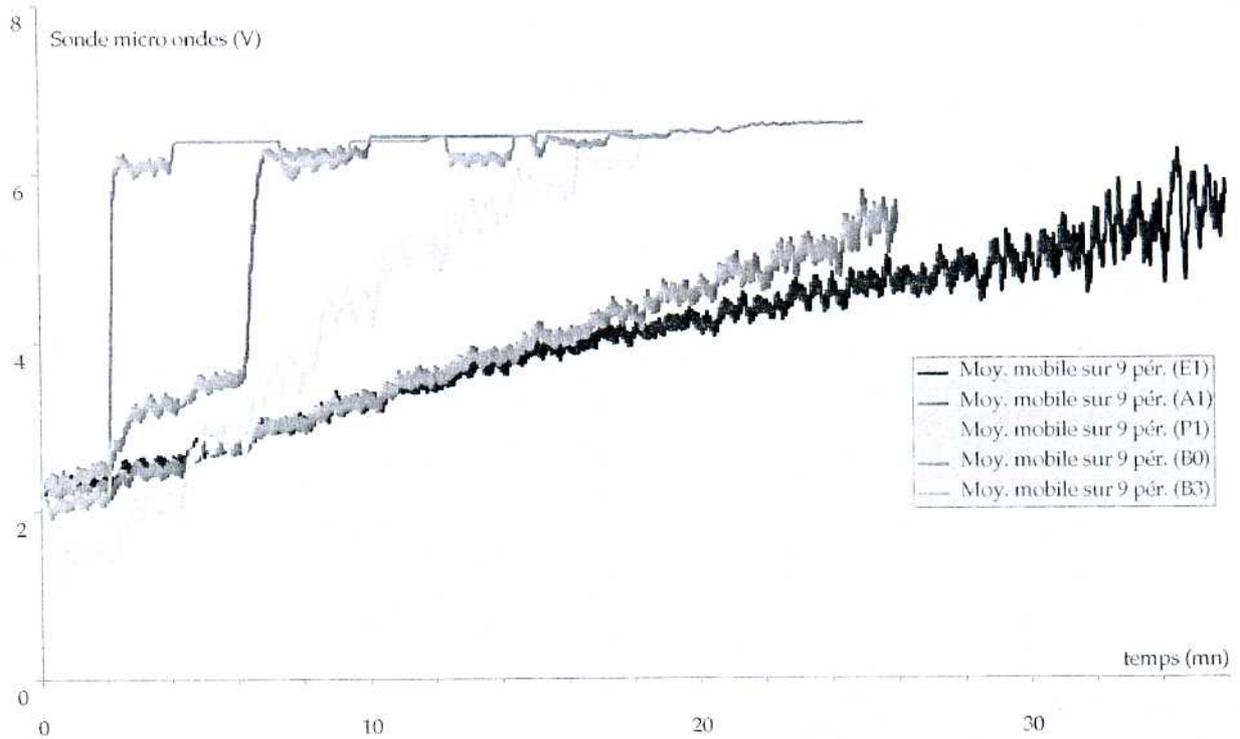


Figure 8.3 Mesures de la sonde micro-ondes

Comme pour la sonde résistive on remarque (figure 8.4) que :

- La répétabilité de la mesure par la sonde micro-ondes est mise en défaut lorsque les séquences d'introduction des constituants liquides sont modifiées (en comparant les essais B0 à B3 avec les essais E, S et A).
- La mesure surestime la teneur en eau en présence des adjuvants liquides, pour des dosages en eau supérieurs à 85 l/m^3 .

La mesure des granulats dont le taux de saturation est inférieur à 1 (essai B1) montre que la sonde micro-ondes est sensible à l'eau absorbée dans les granulats.

essais	dosage en eau	précision de la sonde micro-ondes (l/m^3)		
	l/m^3	due au bruit	de répétabilité	de la sensibilité
E1 E2 E3 E4 S1 S2 S3 A1	15	23,7	9,0	—
	25	25,9	9,2	2,6
	35	21,8	6,7	3,5
	45	24,7	7,6	8,2
	55	26,1	7,9	9,3
	65	27,6	6,9	16,3
	75	29,8	6,9	10,8
	85	31,3	6,5	19,1
	95	34,6	10,0	46,9
	105	35,5	10,7	54,3
	115	50,1	13,1	59,6
	125	48,9	12,7	61,5
	135	45,6	14,9	107
	145	118	12,7	206
	155	92,8	10,0	38,4
	165	113	14,4	151
	175	58,7	5,3	113
	185	115	6,7	201
B0 à B3	175	13,6	53,3	—

Tableau 8.2 Précision de mesure de la sonde micro-ondes

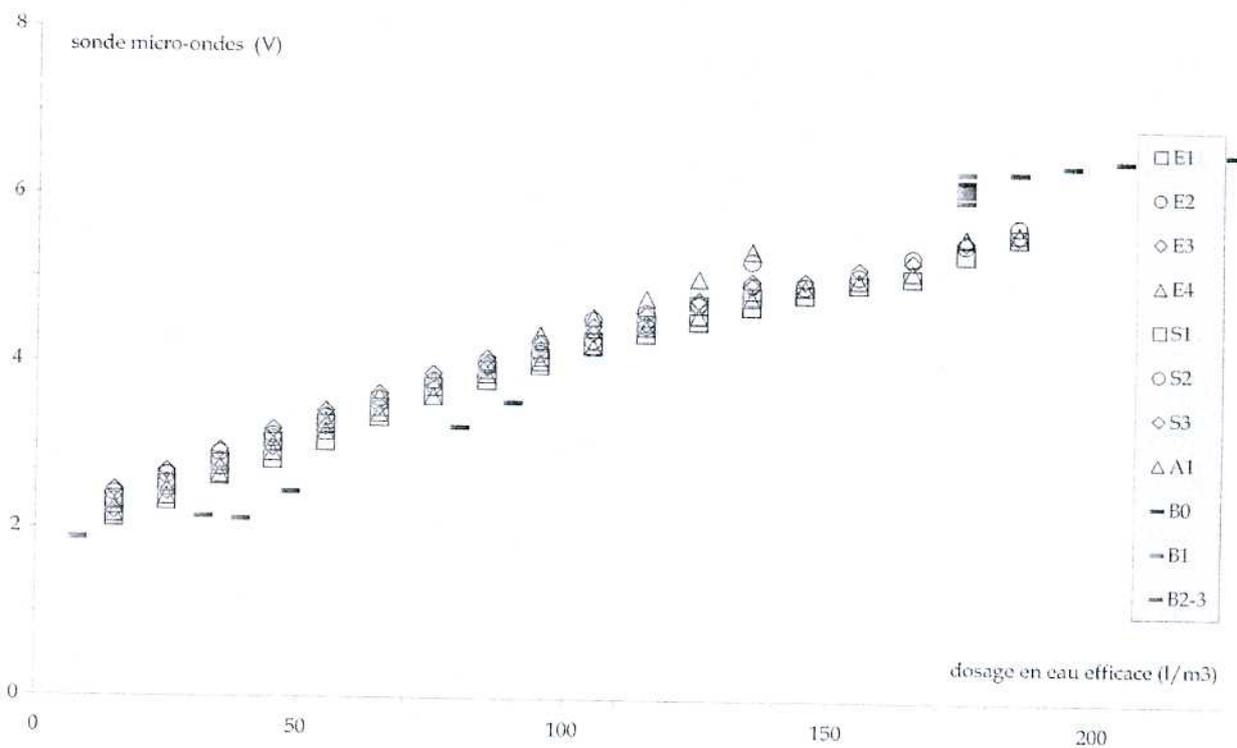


Figure 8.4 Points de calibrage pour la sonde micro-ondes

8.3 Wattmètre

Le temps de stabilisation de la puissance pour chaque incrément de 10 l/m³ d'introduction d'eau est inférieur à 2 minutes, mais cette stabilisation est longue lors de l'introduction d'une quantité plus importante d'eau et d'adjuvants.

Les précisions de mesure de l'estimation du dosage en eau par le wattmètre sont indiquées tableau 8.3. On remarque que la précision de l'estimation du dosage en eau par le wattmètre se situe à des valeurs acceptables pour un dosage en eau faible (inférieur à 45 l/m³ – malaxage « à sec ») ou, pour les composantes dues au bruit et de répétabilité, dans le voisinage immédiat (± 10 l/m³) de la formule nominale (175 l/m³). Cependant la précision de sensibilité est insatisfaisante autour de la formule nominale.

essais	dosage en eau l/m ³	précision du wattmètre (l/m ³)		
		due au bruit	de répétabilité	de sensibilité
E1 E2 E3 E4 S1 S2 S3 A1	15	2,6	6,0	–
	25	3,2	5,0	3,6
	35	4,8	4,8	6,8
	45	7,4	4,5	7,9
	55	11,8	4,3	14,8
	65	23,5	7,5	30,7
	75	27,8	5,5	36,9
	85	26,0	7,8	52,5
	95	19,6	7,7	25,5
	105	16,8	8,2	29,9
	115	17,9	12,8	73,5
	125	16,0	12,1	41,1
	135	43,2	20,9	310
	145	21,8	8,3	24,0
	155	26,4	7,3	79,7
	165	34,4	16,9	214
	175	8,5	7,0	43,7
185	3,5	6,0	29,9	
B0 à B3	175	10,3	6,8	–

Tableau 8.3 Précision de mesure du wattmètre

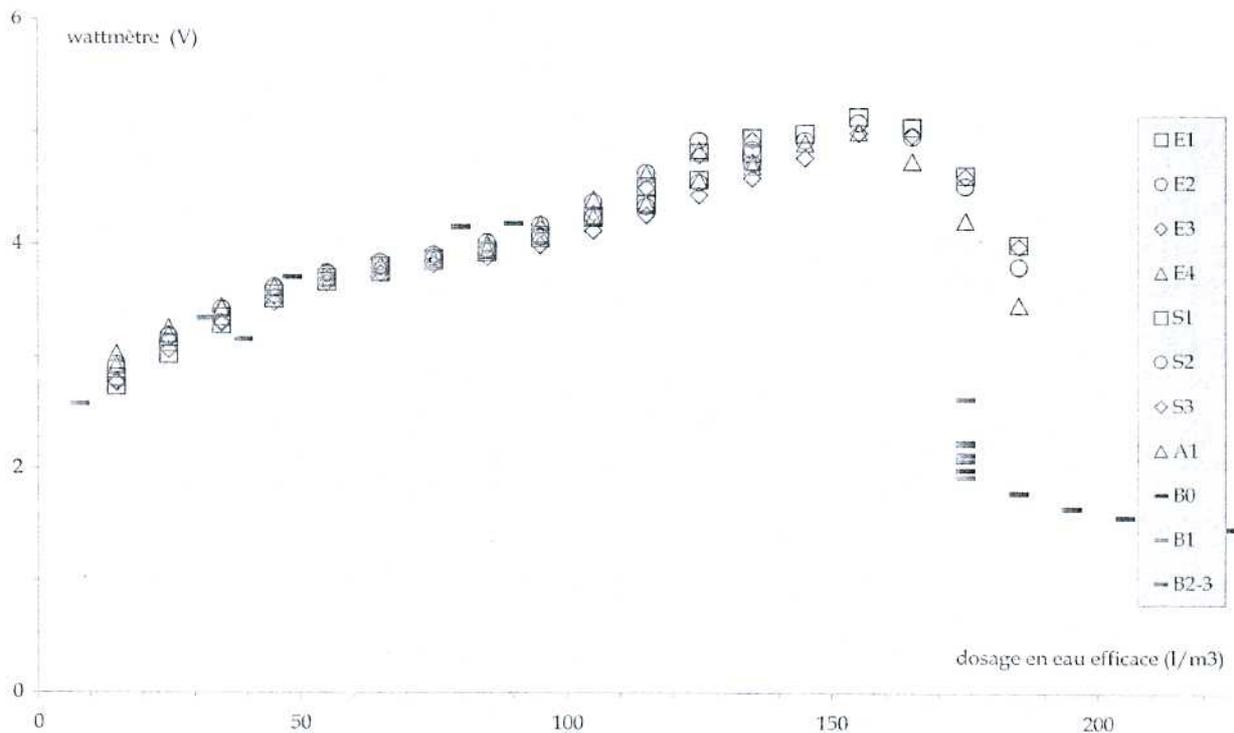


Figure 8.5 Points de calibrage pour la mesure au wattmètre

Comme pour les sondes résistive et micro-ondes, sur les mesures au wattmètre nous remarquons (figure 8.5) l'influence du mode (séquences) d'introduction des constituants et l'influence des adjuvants sur les mesures de puissance quand le dosage en eau dépasse les 85 l/m³ (environ 50% de la formule nominale). Cependant, la répétabilité de mesures au wattmètre des dosages en eau inférieurs à 100 l/m³ est meilleure que celle des sondes.

8.4 Remarques sur l'évolution des courbes wattométriques

La figure 8.6 présente les enregistrements au wattmètre lors des essais B0 à B3, où on diminue le bruit (moyenne mobile sur 3 points) et on supprime les périodes d'arrêt du malaxeur.

Pour B1 à B3 on observe que l'évolution de la courbe wattométrique lors de l'introduction des constituants liquides est différente pour les trois essais. Plusieurs facteurs peuvent en être responsables :

- La teneur en eau naturelle ou initiale des granulats est différente entre les essais B2 et B3 (granulats largement saturés) et l'essai B1 (granulats non saturés).
- Les enregistrements montrent que le début de l'introduction de l'eau est le même pour les trois essais. Cependant, le point d'introduction (par rapport à la position du train valseur du malaxeur) et la durée de l'introduction de l'eau peuvent être légèrement différents, d'un essai à l'autre.
- L'arrivée de l'agent de cohésion dans le mélange est certainement aléatoire compte tenu de la faible quantité introduite et de sa viscosité.

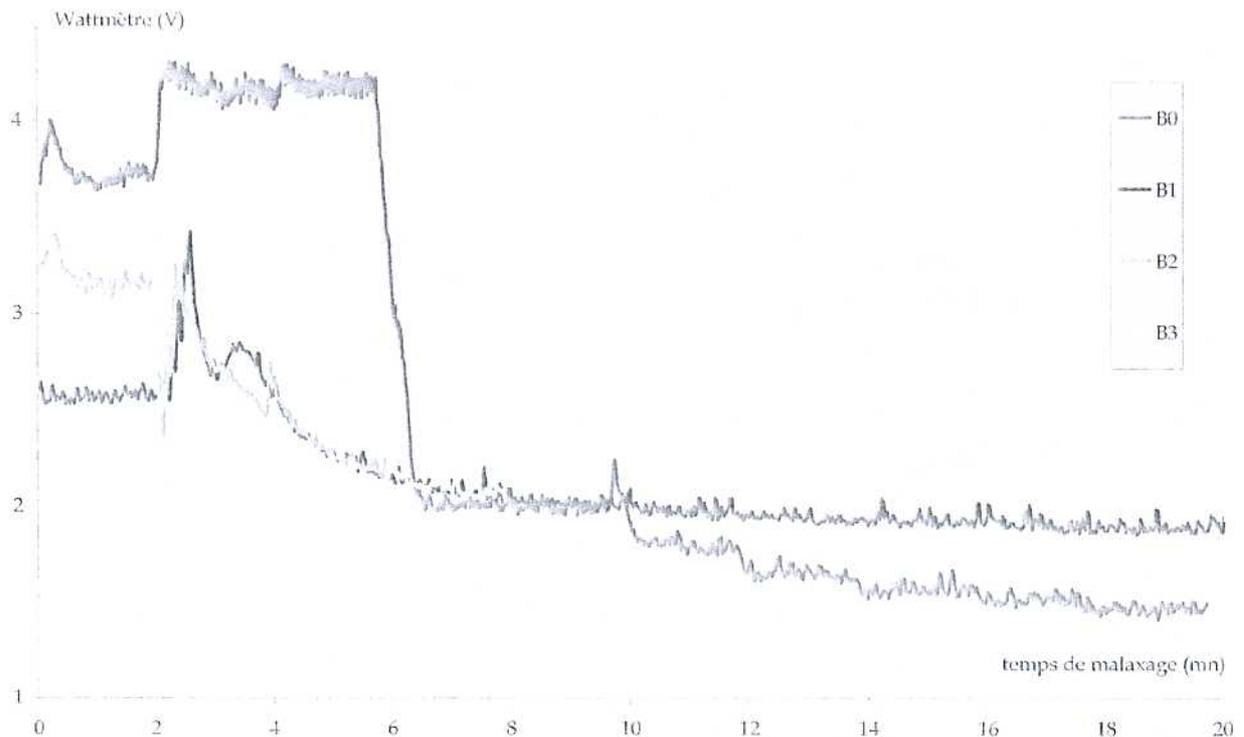


Figure 8.6 Mesure au wattmètre pour les essais B0 à B3

Malgré cette évolution différente lors de l'introduction des constituants liquides, les 3 courbes convergent vers un même niveau de stabilisation. L'étalement du béton après la stabilisation de la courbe wattmétrique est le même pour les trois essais. On constate que la prédiction du dosage en eau à partir de mesures wattmétriques est délicate avant la stabilisation du signal.

D'autre part, après 2 minutes de malaxage avec l'eau, l'étalement du béton est similaire pour les trois essais alors que les puissances de malaxage à l'instant du prélèvement sont différentes. L'étalement n'est alors pas de manière générale corrélé à la puissance consommée instantanée. A formule identique, l'étalement pourrait être plus lié au temps de malaxage qu'à la puissance consommée instantanée.

Pour l'essai B0 la puissance se stabilise au même niveau que lors des essais B1, B2 et B3 au dosage en eau nominal (175 l/m^3). En comparant les paliers de puissance à 175 l/m^3 pour les essais B0 à B3 avec le palier de puissance à 185 l/m^3 pour l'essai B0, on peut considérer que la puissance de stabilisation est sensible à un écart de teneur en eau inférieur à 10 l/m^3 .

Malgré une puissance stabilisée similaire, l'étalement du béton B0 après la stabilisation de la puissance est bien inférieur aux valeurs trouvées pour les essais B1, B2 et B3. On confirme que, dans le cas général, l'étalement ne pourrait être mis en relation avec la puissance consommée instantanée au moment du prélèvement, même pour une formule fixée.

CONCLUSION

- Le signal de la sonde micro-ondes fixe est excessivement bruité. Ce bruit est probablement lié au passage des pales du malaxeur au voisinage de la sonde et à la variation de densité du matériau ainsi induite. Malgré une répétabilité comparable à la sonde tournante résistive, et d'une stabilisation relativement rapide de la valeur moyenne du signal, le bruit des mesures fait que la précision de la sonde micro-ondes fixe est en dehors des limites acceptables. La précision de la sensibilité de la sonde micro-ondes fixe semble acceptable uniquement à de très faibles dosages en eau.
- La sonde tournante résistive présente un très faible bruit du signal et une répétabilité comparable à la sonde micro-ondes, dans les conditions de nos essais. La stabilisation des signaux, après une introduction, d'eau est sensiblement plus longue pour la sonde tournante résistive que pour la sonde fixe micro-ondes. La précision sensibilité de la sonde tournante résistive semble acceptable à des faibles dosages en eau.
- La précision globale de la sonde tournante résistive est acceptable dans une plage de faible dosage en eau dans le malaxeur (inférieur à 65 l/m^3). Toutefois, des observations faites lors des essais préliminaires réalisés sur un autre type de matériau (sable avec fines) laissent supposer que des variations du dosage en liant hydraulique peuvent être beaucoup plus défavorables au système résistif qu'au système micro-ondes (toutefois, nos investigations sont largement insuffisantes pour pouvoir conclure sur ce point).
- Pour la zone de dosage en eau nominal (175 l/m^3) nous observons qu'une sensibilité existe pour les deux systèmes. Toutefois celle-ci semble réduite.
- Pour les deux types de sondes les séquences d'introduction d'eau ont une forte influence sur la répétabilité des mesures. Il semble tout à fait probable que le calibrage des sondes doit être réalisé pour une séquence précise de malaxage.
- Le superplastifiant et l'agent de cohésion l'influencent la réponse des sondes pour des dosages en eau supérieurs à 85 l/m^3 . La mesure surestime le dosage en eau en présence des adjuvants liquides.
- Lors de cette étude nous avons également évalué l'aptitude de la mesure de puissance à fournir une estimation du dosage en eau du matériau malaxé. Ce système de mesure semble donner des résultats acceptables, pour les très faibles dosages en eau (inférieurs à 35 l/m^3) et, sauf en ce qui concerne la précision de la sensibilité, pour des dosages voisins du dosage nominal de la formule proposée.

Il semblerait que la seule solution industrielle pour atteindre la précision sur le dosage en eau demandé, avec les systèmes de mesure que nous avons étudiés, est le malaxage en deux phases : mesure de la teneur en eau dans le malaxeur à l'état naturel des granulats (ou un très faible rajout d'eau), puis ajout de l'eau pour obtenir la formule nominale. En utilisant la sonde tournante résistive la précision globale à espérer dans notre cas d'étude pourrait être de 5 l/m^3 (tableau 8.1 pour la mesure d'un dosage de 25 l/m^3). Cette valeur est toutefois optimiste, puisqu'on ne prend pas en compte la reproductibilité des mesures. Ce système de mesure présente l'inconvénient d'une stabilisation lente du signal (temps de mesure long). Egalement, les mesures ne semblent sensibles que si le taux de saturation en eau des granulats est supérieur à 1. Ces inconvénients pourraient être palliés par l'utilisation d'une sonde tournante micro-ondes, système qui n'existait pas au moment de ces essais, mais qui existe sous la forme d'un prototype aujourd'hui.

Remarques :

- Les séquences d'introduction de l'eau jouent un rôle important dans l'obtention de propriétés d'usage du produit final, en particulier pour ce qui concerne sa rhéologie. C'est d'ailleurs un fait bien connu des formulateurs, pour tous les bétons adjuvantés. Ce constat ne devrait cependant

pas exclure l'introduction de l'eau en deux phases, avec par exemple un dosage en eau lors de la première phase de malaxage à faible teneur en eau (malaxage « à sec »).

- Nous avons évalué la précision de mesure et la sensibilité de deux types de sondes de mesure de la teneur en eau dans le malaxeur lors de la fabrication des bétons : une sonde tournante résistive et une sonde fixe micro-ondes. L'évaluation est réalisée sur une seule formule de béton autoplaçant dans des conditions fixées de mise en place du système de malaxage et du système de mesure. Plusieurs types de séquences de remplissage de malaxeur sont étudiés, mais d'autres types de séquences d'introduction des constituants peuvent être imaginés. Nous n'avons pas non plus déterminé l'influence d'autres paramètres de la fabrication sur la répétabilité des mesures (par exemple variation du dosage en ciment, du mouillage initial des granulats...). Les résultats obtenus sont donc à considérer compte tenu de ces limitations.

De plus, le calcul des données statistiques est réalisé sur un nombre réduit d'expérimentations. La confiance dans les valeurs réelles de la précision et de la sensibilité obtenues est limitée par ce biais également. Toutefois, la comparaison de différents systèmes de mesure et de leur précision et sensibilité, pour les différents zones de dosage en eau où ces valeurs sont déterminées, nous paraît pertinente.