

Bogdan CAZACLIU
Laboratoire central des ponts et chaussées
bogdan.cazaciu@lcpc.fr

Amélioration de la régularité du dosage en eau des bétons lors de la fabrication

■ RÉSUMÉ

La principale source d'incertitude dans le dosage en eau des bétons est liée à la mauvaise connaissance de l'humidité des granulats. Il est montré que les informations disponibles sur une centrale à béton peuvent être utilisées pour proposer un meilleur calibrage des humidimètres et des humidités forfaitaires utilisées lors de la fabrication. Il deviendrait alors possible de diminuer d'un facteur deux à trois les écarts de dosage en eau lors de la production. À cette fin, il est nécessaire d'analyser un nombre suffisamment grand de gâchées fabriquées sur la centrale, en estimant sur chacune l'écart d'humidité du béton par rapport au dosage en eau prévu. Les corrections proposées pour les gâchées qui suivent le lot analysé sont comparées aux résultats de simulations numériques d'une production de centrale à béton. Bien que la simulation numérique tienne compte de valeurs typiques de diverses erreurs commises lors d'une fabrication industrielle, une validation et une mise au point sur une base de données industrielles sont nécessaires avant d'envisager l'utilisation de l'algorithme pour un cas réel.

Improvement in the regularity of water proportions during the concrete production process

■ ABSTRACT

The primary source of uncertainty in the concrete water proportionning stems from poor knowledge of aggregate moisture. This article shows that the information available on a concrete mixing plant may be used to propose an improved calibration of sand moisture probes and the set aggregates moisture allocations applied in the fabrication process. It would then be possible to reduce, by a factor of two to three, the deviations in water proportionning during production. In this aim, it is necessary to analyze a sufficiently large number of batches at the plant, by estimating the concrete moisture deviation on each mix with respect to the anticipated water content. Corrections proposed for the mixes that follow the test group are then compared with results from numerical simulations of mixing plant operations. Although numerical simulations are able to take into account typical values of various errors committed during industrial fabrication, both a validation and adjustment using an industrial database prove necessary prior to the projected use of an algorithm for an actual given case.

INTRODUCTION

On sait fabriquer du béton de longue date. De composition simple, le béton classique est également de fabrication facile puisque, après seulement quelques mouvements de brassage, les constituants s'agencent dans une structure favorable, qui permet à la fois l'écoulement du béton frais et l'obtention de résistances mécaniques satisfaisantes pour le béton durci. Pourtant, le mécanisme de formation d'une telle structure granulaire à partir de constituants aussi différents que l'eau, le ciment et les granulats reste complexe.

Bien que, pour l'usage courant, toute formule de béton réponde plus ou moins au besoin, il existe des proportions des constituants meilleures que d'autres. De nombreux travaux récents concernent, d'une part la mise au point de méthodes de formulation rationnelles, et d'autre part l'utilisation de nouveaux constituants. Ces derniers sont destinés à mieux concilier des propriétés parfois contradictoires du béton : ouvrabilité et résistance mécanique, résistance au jeune âge et diminution du retrait, durabilité et résistance au feu, etc. Alors que la fabrication des formules usuelles reste facile, on est parfois surpris des difficultés rencontrées lors de la production de formules de plus en plus complexes. La solution souvent proposée est d'ajouter de nouveaux constituants facilitant la fabrication, par exemple des rétenteurs d'eau pour diminuer la sensibilité aux écarts de dosage en eau. Il semble également intéressant d'essayer d'améliorer le procédé de fabrication, car c'est dans ce domaine que le retard est le plus manifeste. Une mise à niveau des outils de production paraît de ce fait indispensable pour les nouveaux bétons.

Un cas concret posé aux fabricants de béton prêt à l'emploi¹ (BPE) est celui des bétons autoplaçants, dont le marché est actuellement en expansion. Ces bétons, ne nécessitant pas de vibration lors de la mise en œuvre, apportent un gain de productivité et une diminution des nuisances sonores. En contrepartie, leur production ne souffre pas l'approximation. La sensibilité aux variations de dosage en eau est souvent signalée. Un béton classique peut généralement subir des variations de dosage en eau de 10 ℓ/m^3 sans perte significative de ses propriétés. Pour un béton de bâtiment bien formulé avec un affaissement de 5 à 10 cm, la variation de consistance est inférieure à 2 cm et la variation de résistance de l'ordre de 1 MPa [1]. Il n'en est pas de même pour un béton autoplaçant. En effet, pour ce type de béton, 10 ℓ/m^3 d'eau en plus peuvent entraîner la ségrégation des gros granulats alors que 10 ℓ/m^3 d'eau en moins peuvent diminuer de manière notable les propriétés d'ouvrabilité [2]. D'autres variations des paramètres du procédé de fabrication peuvent entraîner une perte du caractère autoplaçant : la teneur en fines, le respect du cycle d'introduction des constituants liquides, l'usure des malaxeurs, etc.

L'apparition de nouveaux bétons est le principal défi de la production de BPE actuelle. On peut lui ajouter d'autres contraintes industrielles engendrant une demande d'évolution du procédé de fabrication. L'impact environnemental de la production est ainsi de plus en plus pris en considération ; le recyclage des eaux usées de la production est en train de se développer, l'objectif étant de n'avoir aucun rejet [3]. Les incertitudes sur la composition de ces bétons (nature et teneur en éléments fins) engendrent *de facto* des incertitudes sur le dosage en eau et sur le dosage en éléments fins ou plus largement sur les propriétés d'usage.

Sur un autre plan, les centrales modernes ont de moins en moins de personnel. De ce fait, l'opérateur de la centrale prend en charge les tâches administratives et son intervention sur la centrale est de moins en moins complétée par celles d'autres employés. Ainsi, des opérations courantes mais nécessitant du temps, comme le calibrage et la vérification des humidimètres, sont de moins en moins réalisables, et leur utilité (pourtant indéniable) est ignorée. Les imprécisions introduites sont corrigées par l'opérateur de la centrale, qui modifie le dosage en eau d'une gâchée à l'autre de manière à obtenir la bonne composition dans la cuve de malaxage. Cette information n'est cependant pas exploitée plus largement et le défaut de production paraît se reproduire de manière répétitive, qu'il soit détecté ou non. À l'évidence, les corrections gagneraient à être diminuées et automatisées.

Une analyse numérique des irrégularités de dosage lors de la production est présentée ici. L'accent est mis ensuite sur l'influence du dérèglement des appareils de mesures d'humidité des granulats sur la précision du dosage en eau. Un algorithme permettant le calcul de coefficients de calibrage de ces mesures est d'abord formalisé, puis ses limites d'application sont déterminées sur des fabrications simulées numériquement. Enfin, un schéma d'application de l'algorithme et de ses limites est discuté en vue de l'application sur une centrale à béton.

¹ On discute ici surtout le cas des centrales BPE. La problématique de la production du béton en usine est légèrement différente.

L'analyse traite explicitement de la fabrication des bétons dans une centrale de béton prêt à l'emploi. Toutefois, la majorité des résultats et des conclusions est transposable à d'autres types de production du béton : usine d'éléments préfabriqués, centrales mobiles, etc.

RÉGULARITÉ DE LA PRODUCTION D'UNE CENTRALE DE BÉTON

■ Incertitudes lors du dosage des constituants

D'une gâchée à une autre d'une même formule, on peut avoir quelques pour-cent d'écart sur le dosage des constituants solides (granulats, ciment, etc.) [4]. Ces défauts de dosage sont généralement inférieurs à 3 % des quantités pesées. Les valeurs de pesage indiquées sur le bon de fabrication sont à leur tour affectées par des incertitudes de mesure. Une valeur typique de la précision² de pesage est de 0,2 % de la valeur mesurée. La précision de pesage étant le plus souvent meilleure que la précision de dosage, le pesage rend compte de la variation de dosage. Ces considérations restent en principe valables pour les constituants liquides. On remarque toutefois que dans les centrales actuelles, la précision de dosage en eau d'ajout et en adjuvant est bien meilleure que celle des constituants solides.

Dans le calcul du dosage en eau, il faut tenir compte de l'eau apportée par les granulats ; leur humidité doit alors être connue gâchée par gâchée.

Pour les granulats fins (sables), l'humidité est généralement mesurée en ligne par des humidimètres. Leur calibrage est une opération délicate qui peut entraîner des erreurs sur la courbe d'étalonnage du capteur. En dehors de l'erreur de calibrage, le signal de l'humidimètre est perturbé par un bruit de mesure (appelé par la suite résolution de l'humidimètre), pouvant avoir des origines multiples : fluctuations électriques, limite de résolution lors de la numérisation ou de la lecture, variations de la granularité ou, parfois, de la densité du matériau mesuré, etc. Une valeur typique de la résolution d'un humidimètre est de 0,2 points³ [5]. Pour un système de mesure (élément sensible et chaîne de mesure), le bruit de mesure est une erreur incompressible, alors qu'on peut toujours espérer une amélioration du calibrage (en diminuant le dérèglement de l'humidimètre). Dans l'hypothèse d'une courbe d'étalonnage linéaire, l'erreur systématique de mesure d'une humidité peut être annulée en déterminant la transformation linéaire de la mesure qui ramène la courbe d'étalonnage à celle la plus probable. Cette transformation linéaire de la droite de calibrage est définie par les coefficients de réglage de l'humidimètre : décalage à l'origine A_{so} et pente B_{so} (voir ci-dessous).

Pour les granulats plus grossiers, l'humidité est estimée par l'expérience ou mesurée sur des échantillons prélevés sur les tas de granulats, puis fixée pour plusieurs fabrications, pendant au moins quelques jours voire quelques semaines, sous l'appellation d'humidité forfaitaire. L'amplitude de la fluctuation de l'humidité réelle autour d'une humidité moyenne est une limite intrinsèque de la précision de l'humidité forfaitaire, ici fixée à 0,2 points. L'imprécision est le plus souvent plus grande car l'humidité forfaitaire ne coïncide pas avec l'humidité moyenne. Le décalage entre les humidités moyenne et forfaitaire introduit une erreur systématique dans la prise en compte de l'humidité des gravillons, le coefficient de réglage étant noté ici A_{go} (voir ci-dessous).

La teneur en éléments fins des sables connaît à son tour des fluctuations pouvant aller jusqu'à quelques points. La concentration massique en éléments fins de l'eau chargée est également généralement mal connue ; l'usage est de lui fixer une valeur, puis de s'assurer par des mesures (sondes à micro-ondes, opacimètres) que la concentration ne dépasse pas un seuil imposé par la norme.

² La précision est caractérisée dans cet article par l'écart type (exprimé dans l'unité même de la grandeur dont on caractérise la variabilité) ou par l'écart type normalisé (divisé par la valeur moyenne) appelé également coefficient de variation (exprimé en %).

³ L'unité de mesure de l'humidité est ici le point correspondant à 1 %. On évite ainsi les confusions pouvant apparaître avec l'écart type normalisé (exprimé en %).

D'autres imprécisions influencent la régularité des caractéristiques du béton. Elles sont liées au respect de la qualité des constituants (température, etc.) et des paramètres du procédé de fabrication (temps de malaxage, séquence de remplissage, etc.), ainsi qu'à l'état du matériel (usure des pales, colmatage des circuits, etc.). Ces derniers facteurs ne sont pas pris en considération dans cette étude.

■ Effets sur la composition du béton produit

Les écarts de production d'une centrale sont déterminés statistiquement sur une formule typique de béton prêt à l'emploi ($p_{so} = 650 \text{ kg/m}^3$ de sable, $p_{go} = 1\,200 \text{ kg/m}^3$ de gravillon, $p_{eo} = 200 \text{ l/m}^3$ d'eau et $p_{co} = 350 \text{ kg/m}^3$ de ciment). Des fabrications virtuelles sont générées suivant le protocole de simulation indiqué dans l'annexe 1. Le dosage de la gâchée comporte huit incertitudes (décrites dans le paragraphe précédent) :

1. la variation de concentration en fines de l'eau chargée,
2. la résolution de l'humidimètre,
3. la fluctuation de l'humidité du gravillon,
4. les erreurs de pesage sur tous les constituants,
5. les défauts de dosage sur les constituants solides (sable, gravillon, ciment),
6. la variation de teneur en fines du sable,
7. le décalage de l'humidité du gravillon (coefficient de réglage de l'humidité A_{go}),
8. le dérèglement de l'humidimètre (coefficients de réglage, à l'origine A_{so} et pente B_{so}).

L'humidité des granulats est choisie de manière aléatoire entre 0,5 et 4 points pour le gravillon et entre 1 et 10 points pour le sable.

Pour chaque fabrication, on calcule les valeurs effectives du dosage en eau, de la teneur en fines et du rapport g/s (rapport des dosages massiques du gravillon et du sable). La variabilité (moyenne et écart-type) de ces caractéristiques du béton est déterminée sur un lot de 10 000 fabrications virtuelles. La contribution de chaque incertitude est déterminée en considérant de nouveaux lots de 10 000 fabrications virtuelles, où une seule incertitude est considérée à la fois. Les variations de caractéristiques du béton qui en résultent sont indiquées dans le **tableau 1**. Trois autres scénarios de simulation sont rajoutés (lots supplémentaires de 10 000 fabrications) : sans utilisation d'eau de recyclage (2-8), avec un réglage optimal des valeurs d'humidité de granulats (coefficients A_{go} , A_{so} et B_{so} nuls, 2-6), avec un réglage d'humidité optimal et en utilisant de l'eau pure (1-6).

tableau 1

Effets de différents scénarios d'altération de la production : chaque altération indépendamment (1 à 8), les incidents 2 à 6 ensemble (2-6), les incidents 1 à 6 ensemble (1-6), les incidents 2 à 8 ensemble (2-8) et tous les incidents ensemble (1-8). - g/s : gravillons/sable.

Effet sur des paramètres de dosage		1 Teneur en fines de l'eau de recyclage	2 Résolution de l'humidimètre	3 Fluctuation de l'humidité du gravillon	4 Défaut de pesage	5 Défaut de dosage	6 Teneur en fines du sable	7 Dérèglement de l'humidimètre	8 Décalage d'humidité du gravillon	2-6	1-6	2-8	1-8
Écart de dosage en eau l/m³	moyenne	2,2	0	0	0	0	0	0,5	0	0	2,2	0,6	2,7
	écart type	2,9	1,4	2,6	0,3	0	0	5,6	6,6	2,9	4,1	9,2	9,6
g/s	moyenne	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
	écart type	0	0	0	0,01	0,08	0,01	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08
Teneur en fines kg/m³	moyenne	375	371	371	371	371	371	371	371	371	375	371	375
	écart type	3	1	1	1	11	5	1	1	12	12	12	12

Du point de vue du rapport g/s, seules les imprécisions de dosage apportent des fluctuations importantes. Le défaut de dosage a également un impact sur la teneur en fines du béton, paramètre sensible aussi aux imprécisions sur la teneur en fines du sable et sur la charge de l'eau recyclée. Les irrégularités de la teneur en fines et du rapport g/s restent toutefois acceptables dans le cas des bétons courants, compte tenu de l'effet estimé sur les propriétés d'usage du béton produit.

En ce qui concerne la régularité du dosage en eau, on constate que le décalage de l'humidité du gravillon et le dérèglement de l'humidimètre du sable ont un effet prédominant. L'écart type du dosage en eau du béton produit est plus que triple dans le scénario 2-8 que dans le scénario 2-6 qui correspond à des mesures fidèles d'humidité de granulats. L'effet de l'utilisation de l'eau de recyclage est du second ordre : négligeable sur une centrale avec des mesures d'humidité mal réglées (scénario 1-8), il peut devenir important lors d'un réglage optimal de l'humidité des granulats.

On doit remarquer que l'imprécision globale sur le dosage en eau (scénario 1-8) est réaliste par rapport aux chiffres avancés par des industriels ($\pm 10 \text{ } \ell/\text{m}^3$). Pour abaisser cette imprécision jusqu'aux valeurs nécessaires à une production de béton autoplaçant, il semble suffisant de connaître avec précision l'humidité des granulats (humidité forfaitaire pour les gravillons et calibrage des humidimètres pour le sable). Enfin, un écart type de 3 à 4 ℓ/m^3 semble constituer une irrégularité incompressible des centrales à béton au niveau d'équipement actuel.

Compte tenu de ces observations, l'analyse est orientée exclusivement sur l'effet prédominant du manque de fidélité des mesures d'humidité des granulats sur le dosage en eau du béton. La fidélité des mesures d'humidité des granulats est désignée ici, par abus de langage, par l'appellation « état de réglage d'humidités » de la centrale. Il est défini par les coefficients de réglage (A_{go} , A_{so} et B_{so}) qui permettent d'obtenir théoriquement le réglage optimal.

À ce stade, le problème est encore davantage simplifié en s'affranchissant de l'utilisation de l'eau de recyclage (problème qui pourrait être traité dans un deuxième temps) et des fluctuations de la teneur en fines du sable (qui n'affecte pas le dosage total en eau).

■ Conséquences sur la production en centrale

Un point de fonctionnement d'une centrale est défini lorsque le réglage des humidités (coefficients A_{go} , A_{so} et B_{so}) et les humidités des granulats ne varient pas de manière notable pour plusieurs fabrications. Le **tableau 2** présente les intervalles de confiance de l'écart type du décalage (écart entre la moyenne et la valeur visée) du dosage en eau effectif à un point de fonctionnement donné, obtenus lors de la simulation numérique décrite dans l'annexe 2.

À un point de fonctionnement donné, le dosage en eau effectif du béton a une variation aléatoire caractérisée par un écart type inférieur à 5 ℓ/m^3 mais qui diffère du dosage en eau visé pour le béton fabriqué, ce décalage pouvant être aussi grand que 20 ℓ/m^3 .

Ce résultat permet de fournir une explication, au moins partielle, à quelques observations de la pratique industrielle.

À chaque fois qu'une formule de béton préparée en laboratoire est introduite sur une centrale industrielle, un ajustement du dosage en eau est nécessaire. En effet, le dosage en eau nominal défini sur la centrale doit compenser un manque ou un surplus d'eau généré en fonction du réglage des valeurs d'humidité des granulats au moment des essais de définition de la formule.

tableau 2
Intervalle de confiance de l'écart type et du décalage du dosage en eau (écart entre la moyenne et la valeur visée) lors d'une variation des coefficients de calibrage ou de l'humidité.

Intervalle de confiance (95 %)			min (ℓ/m^3)	max (ℓ/m^3)
Variation	Humidité	Décalage du dosage en eau	- 17	17
		Écart type du dosage en eau	1,9	5,2
	Calibrage	Décalage du dosage en eau	- 20,8	- 8,7
		Écart type du dosage en eau	2,7	3

Lors de la fabrication du béton, le point de fonctionnement évolue par rapport au point initial déterminé lors de la définition de la formule. Lorsque les « conditions de fabrication » ne varient pas, il n'y a pas de problème de régularité du dosage en eau du béton (écart type inférieur à 5 ℓ/m^3) mais des corrections de dosage en eau d'ajout sont systématiquement nécessaires, le dosage en eau effectif pouvant varier sensiblement d'un point de fonctionnement à un autre.

Des fortes variations de l'humidité du sable entraînent souvent des pertes de régularité du dosage en eau du béton produit, celui-ci étant sensible au changement du point de fonctionnement. C'est en particulier le cas lors des premières gâchées du matin (avec un sable très humide).

Il est à remarquer que des changements peuvent intervenir aussi lors d'un changement des coefficients de réglage de l'humidimètre. Ces coefficients sont sensibles non seulement à une évolution de l'humidimètre mais aussi à une évolution de la granularité du sable, de l'écoulement dans la trémie, etc.

Un réglage optimal des valeurs d'humidité de granulats réduirait les variations du dosage en eau, qui différerait toutefois du dosage en eau visé. En effet, la formule est généralement établie avec un réglage des valeurs d'humidité différent de celui qui serait optimal. Le décalage par rapport au dosage en eau visé peut être différent d'une formule à une autre, car des rapports g/s différents (voire l'utilisation de granulats différents) répercutent différemment un défaut de calibrage des humidités. Un réglage optimal des valeurs d'humidité permet alors de diminuer les écarts de production mais une redéfinition des formules nominales (visées) pourrait être encore nécessaire.

MÉTHODE DE RÉGLAGE DES VALEURS D'HUMIDITÉS

Des systèmes de suivi de la qualité du béton permettent de déterminer des défauts de production importants et de repérer des accidents majeurs comme par exemple des inversions dans le stockage des granulats ou des fluctuations trop importantes de la qualité de certains constituants (ciments, adjuvants, sables, etc.) [6]. Ces systèmes sont cependant peu adaptés pour la correction de fluctuations plus rapides de la production. La discussion du paragraphe précédent montre que, parmi les sources d'erreurs possibles, la mauvaise connaissance de l'humidité des granulats semble jouer un rôle important. Elle influence essentiellement la régularité du dosage en eau, phénomène de plus en plus préjudiciable, comme déjà souligné, avec l'apparition des nouveaux bétons.

Pour décider de la correction éventuelle du dosage en eau d'ajout, l'opérateur d'une centrale en cycle discontinu utilise la mesure de la puissance consommée lors du malaxage. Traditionnellement, cette mesure est réalisée par un ampèremètre, dont la précision est relativement modeste. Sur les nouvelles centrales, l'ampèremètre est désormais de plus en plus remplacé par le wattmètre différentiel, instrument de mesure plus évolué [7]. D'autres systèmes fiables de mesure en ligne de la teneur en eau du béton produit sont aujourd'hui disponibles. Les sondes à micro-ondes tournantes de malaxeurs en sont des exemples récents. Ces systèmes de mesure, bien calibrés, pourraient avoir des précisions (écarts types) de l'ordre de 0,15 à 0,25 points (soit 3 à 5 ℓ/m^3) [8]. Même en l'absence de matériels de mesure évolués, l'opérateur de la centrale peut fournir une estimation de l'écart de dosage en eau dans le malaxeur avec un écart type que l'on peut estimer à 0,5 points (10 ℓ/m^3).

La méthode présentée ici est destinée à calibrer toutes les informations concernant l'humidité des granulats. Le calibrage s'adresse à la fois à la minimisation des erreurs lors du choix d'une humidité forfaitaire pour les granulats qui ne sont pas mesurés par humidimètre ainsi qu'à l'optimisation du calibrage des humidimètres pour les autres. Pour appliquer la méthode, il est nécessaire de disposer d'une estimation de l'écart de teneur en eau du béton (ou de sa consistance) par rapport à la consigne. Il est bien évidemment préférable de disposer d'une acquisition automatique (par capteur), mais la simple information sur la décision de l'opérateur de la centrale pour la gâchée courante (diminuer ou augmenter l'eau d'ajout) pourrait être une indication exploitable.

■ Détermination des coefficients de réglage

On considère une centrale de béton utilisant n_g granulats dont n_s ont l'humidité mesurée par un humidimètre, dénotés ici par sables, les autres étant nommés gravillons. On analyse n_f fabrications rapprochées dans le temps. Pour chaque fabrication j , on dispose des masses des granulats mouillés p_{jk} (k entre 1 et n_g), de l'eau d'ajout e_j dans la gâchée (en incluant l'eau apportée par les adjuvants) et de la somme q_j des masses des autres constituants solides (ciment, extraits secs des adjuvants, éventuellement autres fines et ajouts, etc.). L'humidité estimée du granulat k pour la fabrication j , w_{jk} [exprimée en kg d'eau par kg de granulat sec] est soit la mesure de l'humidimètre (pour les sables), soit une valeur forfaitaire prédéfinie dans l'automate de la centrale (pour les gravillons). Les valeurs forfaitaires et les calibrages des humidimètres ne doivent pas changer sur le lot de fabrications pris en compte. Le bilan de la masse des solides est :

$$\frac{P_j}{1 + w_{bj}} = \sum_{k=1}^{n_s+n_g} \frac{p_{jk}}{1 + w_{jk}} \quad (1)$$

avec P_j la masse de la gâchée (somme de p_{jk} , e_j et q_j) et w_{bj} la teneur en eau estimée du béton. L'humidité effective des granulats lors de la fabrication diffère cependant (de manière infinitésimale $-\delta w_{jk}$) de celle prise en compte (humidité estimée $-w_{jk}$). Cette imprécision engendre une variation de la teneur en eau du béton dans le malaxeur δw_{bj} respectant la relation :

$$\frac{P_j \delta w_{bj}}{(1 + w_{bj})^2} = \sum_{k=1}^{n_s+n_g} \frac{p_{jk} \delta w_{jk}}{(1 + w_{jk})^2} \quad (2)$$

On suppose ici que l'écart de teneur en eau dans le malaxeur δw_{bj} est estimé à partir d'une mesure dans le malaxeur ou sur échantillon de béton et on souhaite déterminer l'écart entre l'humidité effective des granulats et celle estimée avec le (mauvais) calibrage actuel. Il est considéré par définition comme étant de la forme :

$$dw_{jk} = A_k + B_k w_{jk} \quad (3a)$$

Pour les gravillons, B_k est imposé nul :

$$dw_{jk} = A_k \quad (3b)$$

Avec ces hypothèses, l'écart de dosage en eau s'écrit :

$$\sum_{k=1}^{n_g} \frac{p_{jk}}{(1 + w_{jk})^2} A_k + \sum_{k=1}^{n_s} \frac{p_{jk} w_{jk}}{(1 + w_{jk})^2} B_k = \frac{P_j \delta w_{bj}}{(1 + w_{bj})^2} \quad (4)$$

A_k et B_k constituent $n_g + n_s$ inconnues d'un système de n_f équations pouvant s'écrire :

$$T \cdot X = E \quad (5)$$

$$\text{où } T = \left\| \left\| \frac{p_{jk}}{(1 + w_{jk})^2} \right\|_{nf, ng} \left\| \frac{p_{jk} w_{jk}}{(1 + w_{jk})^2} \right\|_{nf, ns} \right\|_{nf, ng+ns}$$

$$E = \left\{ \frac{P_j \delta w_{bj}}{(1 + w_{bj})^2} \right\}_{nf} \quad (6)$$

$$X = \left\{ \left\{ A_k \right\}_{ng} \left\{ B_k \right\}_{ns} \right\}_{ng+ns}$$

$\{a_j\}_n$ dénote une matrice colonne de n lignes, $1 \leq j \leq n$ et $T = \|a_{jk}\|_{n,m}$ une matrice de n lignes et m colonnes, $1 \leq j \leq n$ et $1 \leq k \leq m$.

Il convient de minimiser la fonctionnelle :

$$F(X_1, \dots, X_{n_g+n_s}) = \sum_{j=1}^{n_f} \left[\sum_{k=1}^{n_g+n_s} T_{jk} X_k - E_j \right]^2 \quad (7)$$

le système d'équations résultant

$$\frac{\partial F}{\partial X_m} = 0, m = 1, \dots, n_g + n_s \quad (8)$$

s'écrit :

$$T^T T X = T^T E \quad (9)$$

Pour que le système admette une solution unique, il est nécessaire et suffisant que son déterminant ne soit pas nul. Ce n'est pas le cas si toutes les fabrications ont un même dosage (mesuré) de granulats secs ou si l'humidité mesurée par un humidimètre est constante lors des fabrications.

On peut remarquer que, dans les calculs présents, les coefficients de réglage A_k et B_k sont déterminés à partir des valeurs des pesées et des indications d'humidité ou des valeurs forfaitaires (sans oublier qu'une imprécision affecte les grandeurs respectives). L'équation (9) est l'expression d'une régression linéaire. La précision du résultat dépend du nombre des points (fabrications) et de leur étalement dans l'espace d'optimisation (humidités, rapports g/s, etc.).

■ Simulation numérique de la détermination des coefficients de réglage

La précision de la correction des valeurs d'humidités des granulats est discutée ici par simulation numérique d'une application sur deux granulats dont un sable. Bien que simple, ce cas reste néanmoins applicable dans la pratique, car rien n'empêche l'application de l'algorithme à des formules de béton utilisant seulement les mêmes deux granulats.

Huit configurations de fabrication sont simulées lors du calibrage en croisant :

- 4 variations de l'humidité du sable (écart type de 0,3, 1, 2 ou 3 points) : distribution uni-modale de l'humidité du sable (en $\bar{w}_b = 5$ points) ou bi-modale ($\bar{w}_b = 4$ et 6 points, 3 et 7 points ou 2 et 8 points, chaque mode ayant une même probabilité d'apparition) ;
- fabrication d'une formule de béton (béton courant) ou de deux formules de béton avec des rapports g/s différents (tirée au sort avec la même probabilité avant chaque fabrication, un béton courant et un béton autoplaçant).

Les huit configurations de fabrication et les formules des bétons considérées sont indiquées dans le **tableau 3**.

Dans chaque configuration, les coefficients de réglage sont déterminés par l'équation (9), sur $n_f = 10, 20, 30, 50, 100$ ou 200 fabrications virtuelles (phase de calibrage). L'équation (9) fournirait la solution exacte des coefficients de réglage si les mesures sur la centrale étaient exactes. Ceci n'étant pas le cas, l'équation (9) donne une estimation des coefficients qui sont appelés « de correction ». En les utilisant comme dans les équations (3), on obtient un nouvel état de réglage de l'humidité de la centrale (après correction). L'écart type des coefficients de réglage après correction est estimé numériquement et donne la précision de la correction des valeurs d'humidités.

tableau 3

Les huit configurations de simulation.
BO : 650 kg/m³ sable, 1200 kg/m³ gravillon, 350 kg/m³ ciment, 200 l/m³ eau.
BAP : 850 kg/m³ sable, 800 kg/m³ gravillon, 550 kg/m³ ciment, 200 l/m³ eau.

Configuration	Type de béton	Humidité moyenne du sable	Écart type humidité du sable
1B-0	BO	5 %	0,3 %
1B-1	BO	4 % ou 6 %	1 %
1B-2	BO	3 % ou 7 %	2 %
1B-3	BO	2 % ou 8 %	3 %
2B-0	BO ou BAP	5 %	0,3 %
2B-1	BO ou BAP	4 % ou 6 %	1 %
2B-2	BO ou BAP	3 % ou 7 %	2 %
2B-3	BO ou BAP	2 % ou 8 %	3 %

Suivant les conditions de réglage de l'humidité après correction, la précision du dosage en eau s'améliore ou non. L'écart type du dosage en eau effectif après correction est déterminé numériquement, à titre de vérification. Le protocole de simulation du calibrage et de la vérification est indiqué dans l'annexe 3.

Au regard de l'équation (9), la précision de l'estimation du dosage en eau dans le malaxeur se répercute linéairement sur la précision de la correction proposée. Les simulations présentées ici font l'hypothèse d'une estimation de la teneur en eau du béton avec un écart type de 0,15 point (soit environ 3,5 l/m³).

La précision de la correction ne dépend pas de la fidélité des mesures d'humidité des granulats avant correction. Ce constant (évident d'après l'équation 9) est vérifié sur la **figure 1** : les écarts types des coefficients de réglage de l'humidité après correction sont sensiblement identiques pour deux réglages d'humidité de la centrale avant correction. Le protocole de l'annexe 3 est appliqué dans la configuration avec 2 bétons et un écart type d'humidité du sable de 3 points (2B-3), pour $n_f = 10, 20, 30, 50, 100$ ou 200 fabrications, avec deux réglages avant correction très différents : centrale dérégulée (avec un écart type élevé des coefficients de réglage, de 1 point pour A_{so} et A_{go} et 0,2 pour B_{so}) et centrale bien réglée (avec un écart type serré des coefficients de réglage, de 0,1 point pour A_{so} et A_{go} et 0,02 pour B_{so}).

En revanche, la précision de la correction a une évolution décroissante avec le nombre de fabrications de calibrage, dans toutes les configurations de fabrication (l'exposant est la pente des décroissances observées sur la **figure 2**) :

$$\sigma(A_s, A_g, B_s) \propto n_f^{-2/3}$$

figure 1

Comparaison de l'écart type du déréglage après calibrage pour une centrale initialement bien réglée et une centrale initialement dérégulée ; l'écart type du déréglage après calibrage est déterminé sur un nombre de fabrications de 10 à 200.

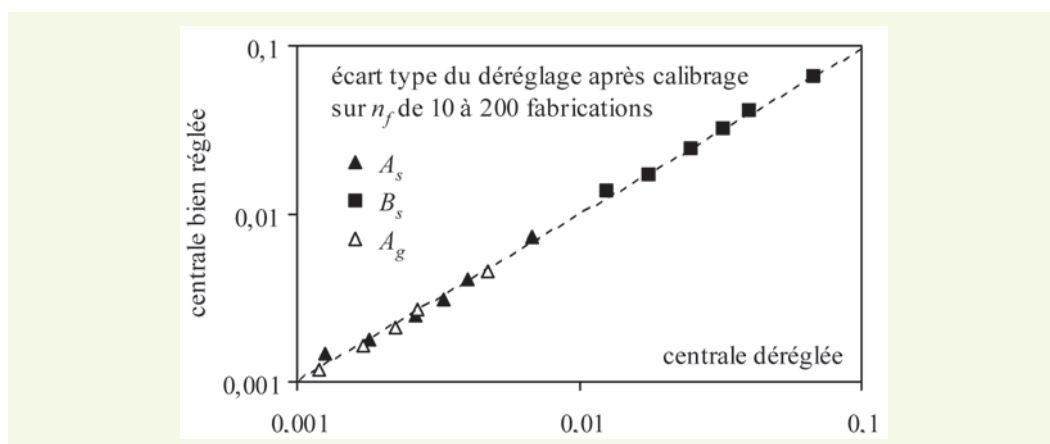
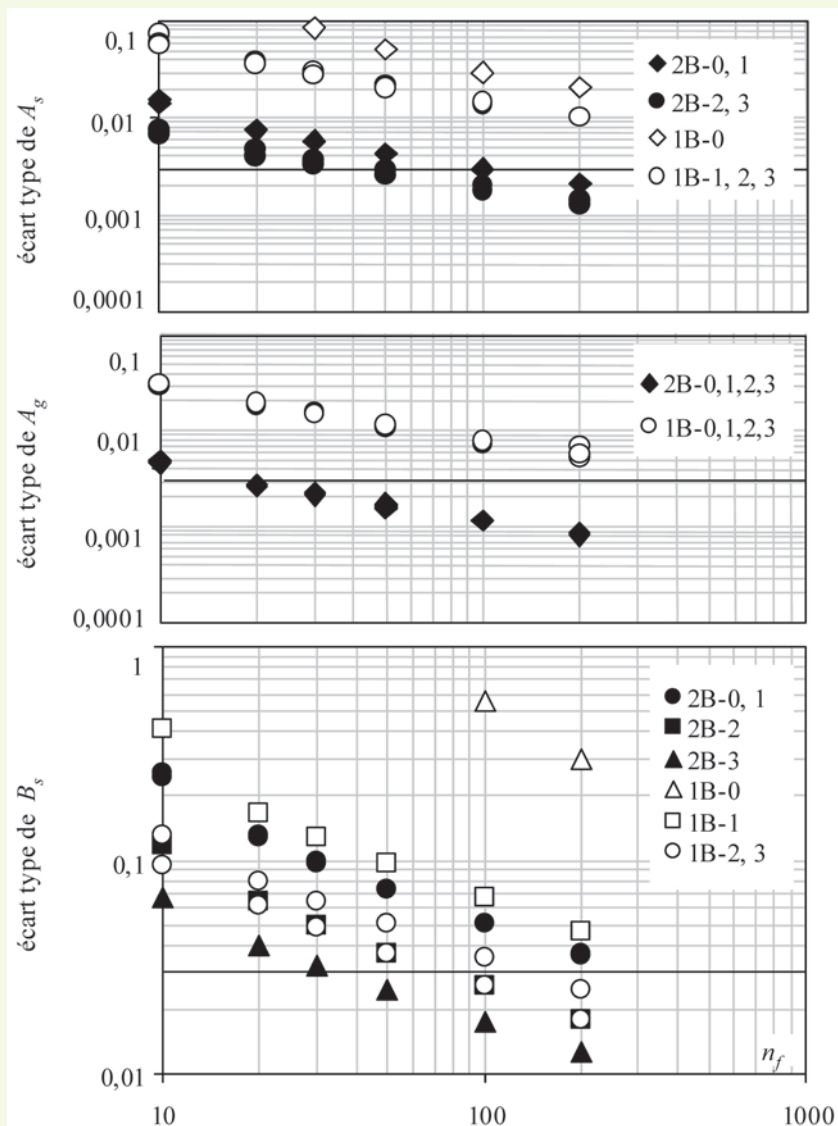


figure 2

Évolution de l'écart type des coefficients A_s , A_g et B_s après correction, avec le nombre de fabrications de calibrage n_f pour les huit configurations de simulation indiquées dans le tableau 3.



La correction de l'humidité du gravillon (A_g) semble insensible aux variations d'humidité du sable lors du calibrage mais s'améliore environ d'un facteur 7 si, lors du calibrage, on fabrique deux formules de béton (effet de l'augmentation notable de l'écart type du rapport g/s entre les fabrications de calibrage). Cette nette amélioration de la précision dans les configurations à deux bétons est également valable pour le décalage à l'origine de l'humidimètre, A_s . La détermination de la correction de l'origine de l'humidimètre (A_s) est toutefois environ deux fois moins précise que celle de l'humidité du gravillon (A_g). De plus, l'amplitude de la variation de l'humidité du sable se répercute sur la précision du réglage de l'humidimètre. C'est en particulier le cas pour la configuration avec une formule de béton et une humidité serrée du sable (1B-0). Cette configuration est de loin la plus défavorable pour tous les coefficients.

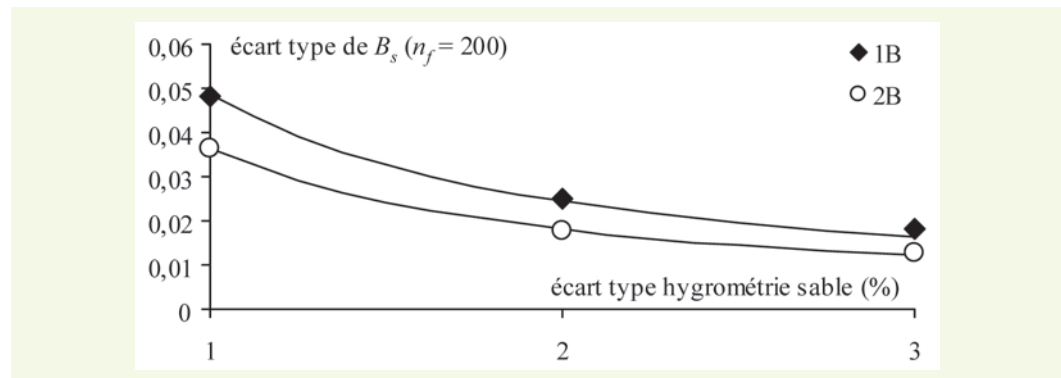
La précision de correction de la pente de l'humidimètre (coefficient B_s) semble dépendre de l'inverse de l'écart type de l'humidité du sable (figure 3). Elle est moins sensible à la présence de deux formules de béton lors du calibrage (on gagne seulement 40 % lors de la fabrication de deux formules).

Dans la pratique d'une centrale industrielle le réglage des mesures d'humidité n'est pas connu. Toute correction proposée par l'équation (9) pourrait être prise pour bonne, alors que dans les faits il est possible qu'une erreur encore plus grande soit introduite. Les graphiques de la figure 2 montrent par exemple qu'en calibrant dans la configuration 2B-1 sur 30 fabrications, le décalage à l'origine

de l'humidimètre (A_s) est compris entre $-1,1$ et $+1,1$ points et sa pente (B_s) entre $-0,2$ et $+0,2$ (ces intervalles sont déterminés avec un indice de confiance 0,95). Pour ce cas précis, il ne semble pas opportun de calibrer l'humidité, car le risque d'un réglage moins bon de la centrale après correction est important.

figure 3

Écart type du coefficient B_s pour un nombre de fabrications de calibrage (n_f) de 200, en fonction de la variation de l'humidité du sable (interpolation 1/x).



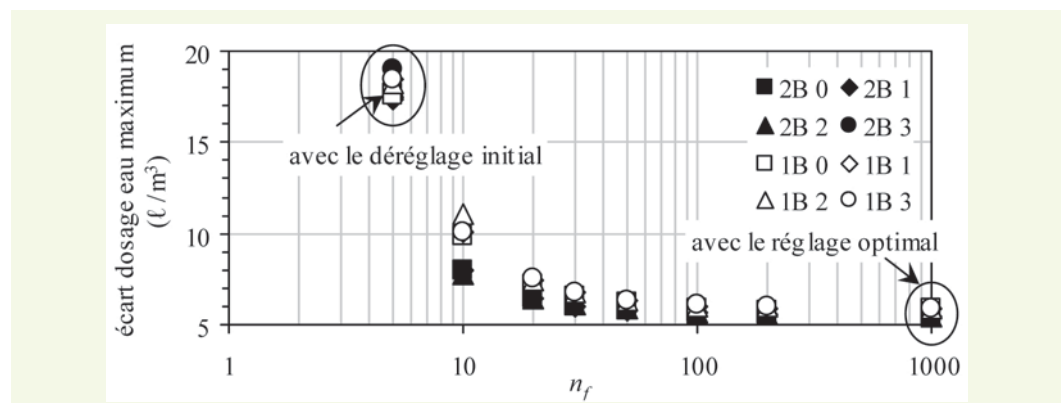
Il convient alors de fixer pour chaque coefficient un écart type à partir duquel la correction proposée est considérée comme pertinente. À titre d'exemple, on a choisi 0,3 points pour A_s et A_g , 0,03 pour B_s ; ces limites sont indiquées sur la **figure 2**. Il n'est alors pas possible de proposer une correction pertinente de l'humidité avec moins de 200 fabrications, pour les configurations avec un seul béton (1B). Par contre, pour les configurations à deux bétons, il est possible de proposer une correction de l'humidité forfaitaire du gravillon après seulement 20 fabrications, et une correction de l'humidimètre après 60 fabrications (configuration 2B-2 et 2B-3) ou 220 fabrications (configurations 2B-0 et 2B-1).

La valeur maximum du décalage du dosage en eau effectif (par rapport à la valeur visée) avant et après correction est comparée sur la **figure 4**. Même pour une centrale dont le dérèglement initial avant correction est réduit (dans cet exemple un écart type serré des coefficients de réglage est choisi, de 0,1 point pour A_{so} et A_{go} et 0,02 pour B_{so}), le décalage de dosage en eau peut attendre 17 à 19 ℓ/m^3 , suivant la configuration de fabrication (avec un indice de confiance de 0,95). Après correction sur 10, 20, 30, 50, 100 ou 200 fabrications, l'écart maximum décroît et approche rapidement l'écart maximum incompressible d'une centrale bien réglée (5 à 6 ℓ/m^3 , également indiqué sur la **figure 4**). Ces constantes sont valables lorsque les fabrications corrigées sont du même type que celles utilisées lors du calibrage (mêmes formules de béton dans les mêmes plages d'humidité des granulats). En effet, comme on l'a vu, ces corrections ont peu de chance d'être correctes et les mesures d'humidité restent mal réglées après correction.

Il semble néanmoins possible de proposer une correction du dosage en eau pour une fabrication donnée tant que les « conditions de fabrication » ne changent pas. Cette correction doit cependant être considérée avec précaution car elle pourrait introduire une erreur importante si le rapport g/s ou les humidités des granulats changent sensiblement après la correction.

figure 4

Écart maximum (indice de confiance 0,95) du dosage en eau effectif par rapport à la formule nominale, avec le dérèglement initial, après un calibrage sur n_f fabrications, et avec le réglage optimal.



DISCUSSION ET CONCLUSION

Une analyse numérique des irrégularités de dosage des constituants sur une centrale à béton met en évidence l'effet prédominant des mesures d'humidité des granulats, qui affectent principalement le dosage en eau totale du béton produit. Il est montré que le calibrage optimal des humidimètres et le choix approprié des humidités des gravillons avant les fabrications peuvent réduire d'un facteur 2 la précision du dosage en eau sur les centrales de béton.

Une méthode pour améliorer la connaissance de l'humidité des granulats, susceptible de pouvoir être automatisée, est ensuite détaillée. Elle se traduit par une relation qui permet de déterminer les coefficients de correction des mesures d'humidité à partir des données connues lors de la fabrication : poids des constituants et humidités pris en considération lors du dosage. Une mesure en ligne de la teneur en eau du béton dans le malaxeur est également nécessaire pour appliquer la méthode. L'utilisation de l'indication de la puissance consommée lors du malaxage semble être une donnée suffisante dans l'état actuel de l'équipement des centrales. Une amélioration des mesures de teneur en eau dans le malaxeur (utilisation de sondes, meilleur calibrage du wattmètre) aboutirait à une amélioration proportionnelle de la précision de la correction des données d'humidité des granulats.

Dans son principe, la méthode répète la mesure de l'écart de dosage en eau dans le malaxeur (le nombre des répétitions augmentant la précision de mesure) pour obtenir une référence précise visant à calibrer la prise des mesures d'humidité (humidimètres et valeurs forfaitaires).

La fiabilité de la correction ne dépend pas de la précision des mesures d'humidité avant correction. Elle dépend cependant du contexte de fabrication lors du calibrage ; on constate en effet que :

- la précision de la correction augmente avec le nombre de fabrications utilisées lors du calibrage (avec un exposant deux tiers) ;
- la diversité des compositions de béton fabriquées lors du calibrage, en particulier une dispersion importante du rapport g/s , favorise l'estimation correcte de l'humidité des gravillons et du décalage à l'origine des humidimètres (en gardant leur sensibilité inchangée) ;
- une variabilité importante de l'humidité du sable permet d'améliorer le calibrage de l'humidimètre correspondant. La précision de la correction est inversement proportionnelle à l'écart type de l'humidité du sable.

Le (dé)réglage avant correction sur une centrale réelle n'est pas connu et il n'est pas possible de déterminer directement la fiabilité d'une correction proposée dans la pratique. Toutefois, une simulation numérique dans la configuration de calibrage (compositions fabriquées, variabilité de l'humidité des sables, précision de la mesure de teneur en eau dans le malaxeur, éventuellement l'amplitude des autres incertitudes) permet d'estimer le nombre des fabrications nécessaires pour obtenir une correction d'une précision prédéfinie. Une fois cette correction obtenue, il est possible de proposer un calibrage (correction systématique) des mesures d'humidité : humidimètres et humidités forfaitaires.

Suite aux propriétés énumérées ci-dessus, la simulation numérique peut être réalisée en supposant un réglage optimal des mesures d'humidité pour un nombre de fabrications donné. La relation entre la précision des coefficients et le nombre de fabrications permet ensuite de déterminer le nombre de gâchées à prendre en considération pour une estimation fiable des coefficients de correction.

Si on ne dispose pas d'un nombre suffisant de fabrications, il est toutefois possible de proposer des solutions intermédiaires. Par exemple, on peut envisager d'améliorer seulement les humidités forfaitaires et le « zéro » des humidimètres. Il est également possible de proposer une correction du dosage en eau gâchée par gâchée, tant que les conditions de fabrication et la composition du béton produit ne changent pas. Cette dernière démarche doit cependant être considérée avec précaution.

Le nombre de fabrications nécessaire pour le calcul d'une correction de mesures d'humidité semble réaliste pour une production industrielle. Une indication pour des fabrications similaires pourrait être proposée dans la journée (après une dizaine de gâchées) et il semble possible d'obtenir une correction fiable des mesures d'humidité lors de la production sur une semaine complète (après une centaine de gâchées). De toute manière, le nombre de fabrications nécessaires peut être diminué en augmentant la précision de l'estimation du dosage en eau dans le malaxeur.

L'étude présentée ici étant exclusivement numérique, une comparaison avec l'expérience est nécessaire avant toute conclusion définitive. On peut déjà signaler quelques aspects qui ne sont pas considérés ci-dessus :

- Les hypothèses sur la normalité des variations et la linéarité des courbes d'étalonnage sont sans doute irréalistes. Il semble toutefois que le principal défaut de la démarche est à chercher plutôt dans un possible dérèglement lent mais continu des systèmes de mesure. Le temps d'acquisition du nombre de fabrications suffisant pour déterminer la correction ne doit pas être plus long que le temps caractéristique du dérèglement des systèmes de mesure.
- De fortes variations accidentelles peuvent également nuire au calcul précis des coefficients de correction. Par exemple, un bruit électrique extérieur, la rupture d'une pale du malaxeur ou le colmatage d'un tuyau d'alimentation peuvent introduire des erreurs exceptionnelles sur une fabrication. Un algorithme industriel doit inclure des techniques de traitement du signal capables de détecter ces erreurs.
- Le dosage en eau totale réel peut différer de celui indiqué par la formule nominale. En effet, le dosage en eau nominal compense les erreurs de dosage faites lors des essais de définition de la formule. Tant que l'on commet les mêmes erreurs sur la mesure de l'humidité des granulats, le béton reste « bien » formulé. En améliorant la mesure de l'humidité des granulats, on peut s'éloigner de la rhéologie souhaitée. Il faut envisager la correction de la formule nominale, mais cette démarche ne peut être qu'itérative.

REMERCIEMENTS

L'algorithme décrit dans cet article est élaboré suite à des essais réalisés par la SEMR Blois dans le cadre du Projet national B@P axe 3-1. L'auteur remercie tous les participants à ces essais ainsi que Christian Stéfani du LCPC et Jean-Marie Geoffroy du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand pour leurs conseils dans l'élaboration de ce document.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **CHARONNAT Y.**, *Guide technique : La maîtrise de l'eau dans le béton hydraulique*, LCPC, coll. Techniques et méthodes des LPC, **2001**.
- 2 Recommandations provisoires des bétons autoplaçants, *Bulletins scientifiques et techniques*, AFPC-AFGC, juillet **2000**.
- 3 **LE PORT J.-P.**, **MASSY-DELHOTEL É.**, Béton de France : nouvelle recette automate, *Mines & Carrières*, vol. **84**, **2002**, pp. 17-19.
- 4 **CHARONNAT Y.**, Fabrication du béton hydraulique, *Techniques de l'ingénieur*, **C 2225**, **1999**.
- 5 **CHATEAU E.**, **SEMELLE PH.**, **UDIN J.**, **CAZACLIU B.**, *Mesure de la teneur en eau des granulats*, Rapport de recherche pour le projet national BAP, SEMR, **2001**, 24 pages.
- 6 **DAY K.-W.**, *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, E&FN Spon, **1995**, pp. 109-157.
- 7 **TEILLET R.**, **BRUNEAUD S.**, **CHARONNAT Y.**, Suivi et contrôle de la fabrication des mélanges. Une nouvelle jeunesse pour le wattmètre différentiel, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **174**, **1991**, pp. 5-16.
- 8 **CHATEAU E.**, **CAZACLIU B.**, *Mesure de la teneur en eau dans le malaxeur*, Rapport de recherche pour le projet national BAP, SEMR, **2002**, 26 pages.

ANNEXE 1 : PROTOCOLE DE SIMULATION D'UNE FABRICATION

On choisit l'humidité effective des granulats :

$$w_g^e = n[\bar{w}_g | 0,002] \text{ et } w_s^e = n[\bar{w}_s | 0,003]$$

où \bar{w}_g et \bar{w}_s sont des valeurs moyennes fixées avant la fabrication virtuelle, et $n[m | s]$ signifie une réalisation de la variable aléatoire normale de moyenne m et d'écart type s .

On choisit un décalage entre l'humidité moyenne et forfaitaire du gravillon et un dérèglement linéaire de l'humidimètre du sable :

$$A_{go} = n[0 | 0,005], A_{so} = n[0 | 0,005] \text{ et } B_{so} = n[0 | 0,1]$$

permettant de déterminer l'humidité forfaitaire du gravillon w_g , puis l'humidité mesurée par l'humidimètre w_s :

$$w_g = \bar{w}_g - A_{so} \text{ et } w_s = n\left[\frac{w_s^e - A_{so}}{1 + B_{so}} \mid 0,002\right]$$

À partir des dosages de gravillon sec, sable sec, ciment et eau prescrits par la formule (p_{go} , p_{so} , p_{co} et p_{eo} fixés avant la fabrication) on détermine les masses mesurées pour la fabrication virtuelle d'un m^3 en introduisant une erreur de dosage :

$$p_g = n[p_{go}(1 + w_g) \mid 0,03p_{go}(1 + w_g)]$$

$$p_s = n[p_{so}(1 + w_s) \mid 0,03p_{so}(1 + w_s)]$$

$$p_c = n[p_{co} \mid 0,03p_{co}]$$

$$p_e = n\left[p_{eo} - \frac{p_g w_g}{1 + w_g} - \frac{p_s w_s}{1 + w_s} \mid 0,03\left(p_{eo} - \frac{p_g w_g}{1 + w_g} - \frac{p_s w_s}{1 + w_s}\right)\right]$$

On détermine les masses effectives en considérant une erreur de mesure :

$$p_g^e = n[p_g \mid 0,002p_g]$$

$$p_s^e = n[p_s \mid 0,002p_s]$$

$$p_c^e = n[p_c \mid 0,002p_c]$$

$$p_e^e = n[p_e \mid 0,002p_e]$$

On calcule l'humidité effective du béton :

$$p_e = \frac{p_e^e + \frac{p_g^e w_g^e}{1 + w_g^e} + \frac{p_s w_s^e}{1 + w_s^e}}{p_c^e + \frac{p_g^e}{1 + w_g^e} + \frac{p_s}{1 + w_s^e}}$$

Pour les fabrications introduisant une incertitude de la teneur en fines du sable la valeur effective est :

$$f^e = n[3 \text{ points} \mid 0,65 \text{ points}]$$

alors que la valeur forfaitaire est fixée à 2 points.

La concentration massique en fines de l'eau chargée est fixée à 2 points alors que les valeurs effectives varient suivant une distribution équiprobable entre 0 et 7 points.

ANNEXE 2 : SIMULATION DE L'EFFET STATISTIQUE D'UN RÉGLAGE D'HUMIDITÉS

Un point de fonctionnement (les coefficients A_{go} , A_{so} et B_{so} et les humidités moyennes des granulats) est choisi de façon aléatoire et un lot de 3 000 fabrications virtuelles est généré avec ces paramètres fixés (le protocole de simulation étant celui indiqué dans l'annexe 1, choix des coefficients A_{go} , A_{so} et B_{so} mis à part). Ce lot de fabrications virtuelles permet de déterminer la moyenne et l'écart type du dosage en eau effectif du béton au point de fonctionnement.

La moyenne et l'écart type du dosage en eau du béton sont déterminés pour 1000 autres points de fonctionnement choisis aléatoirement, en gardant constants soit l'humidité moyenne (ici 2 points pour le gravillon et 5 points pour le sable), soit les coefficients de réglage (ici $A_{so} = A_{go} = 0,5$ points, $B_{so} = 0,2$). Ces 1000 valeurs permettent de déterminer les intervalles de confiance (indice 0,95).

La moyenne du dosage en eau effectif permet de déterminer le décalage par rapport au dosage en eau visé.

ANNEXE 3 : SIMULATION DU CALIBRAGE ET DE LA VÉRIFICATION DU RÉSULTAT

■ Calibrage

Une distribution des coefficients de réglage avant correction et la configuration de fabrication (formules à fabriquer virtuellement et la distribution de l'humidité moyenne du sable) sont fixées.

Des coefficients de réglage sont choisis avant chaque lot de n_f fabrications.

Une formule de béton et l'humidité moyenne du sable sont choisis avant chaque fabrication virtuelle.

Pour chaque fabrication virtuelle, le protocole de simulation indiqué en annexe 1 (choix des coefficients de calibrage mis à part) est complété par le choix de la mesure de la teneur en eau du béton :

$$w_b = n[w_b^e | 0,0015]$$

où w_b^e est la teneur en eau effective dans le malaxeur, affectée ici par une incertitude de mesure.

Les coefficients de correction sont déterminés par l'équation (9) sur les n_f fabrications du lot, puis le nouveau réglage de mesures d'humidité de la centrale est calculé en appliquant les équations (3).

La distribution statistique des coefficients de réglage après correction est déterminée sur 10 000 lots de n_f fabrications.

■ Vérification

Les 10 000 trinômes de coefficients de réglage après correction disponibles sont utilisés pour créer 10 000 nouvelles fabrications dans la même configuration de la centrale que lors de leur détermination. L'écart type et le décalage du dosage en eau effectif après correction sont déterminés sur ces 10 000 nouvelles fabrications.