

UNE NOUVELLE APPROCHE DE LA FORMULATION DES BETONS

F. de Larrard, T. Sedran

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

INTRODUCTION

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué dans les années récentes. Tout d'abord, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments. Ensuite, on s'est intéressé à un nombre croissant de propriétés d'usage du matériau, en relation avec la totalité de son cycle de vie (depuis son comportement rhéologique à l'état frais jusqu'à sa durabilité dans différentes ambiances). Enfin, la gamme des propriétés que l'on peut atteindre avec les moyens industriels modernes s'est singulièrement élargie. Pour ne citer que les deux aspects les plus communément étudiés d'une formule de béton, à savoir la maniabilité et la résistance en compression, on sait aujourd'hui formuler des bétons secs (d'affaissement nul) comme des bétons autocompactants (ou autonivelants); de même, on peut aussi viser des résistances de 1 à 2 MPa (pour des matériaux ré-excavables destinés au remplissage de tranchées) comme des résistances supérieures à 200 MPa (pour des mortiers à ultra-haute résistance destinés à la fabrication de conteneurs de déchets radioactifs, par exemple). En résumé, le problème de la formulation des bétons comporte davantage de variables, davantage de dimensions et l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste.

Face à ces réalités, provenant toutes d'un progrès normal de la technologie, le formulateur est soumis à une pression croissante en termes de délais et de coûts. Il n'est malheureusement pas rare de voir des études de béton démarrer moins de 28 jours avant le démarrage d'un chantier; de plus, le marché du béton restant très concurrentiel dans notre pays, les entreprises n'ont que des budgets relativement restreints à consacrer à la formulation des bétons, même si de cet acte fondateur découle une grande partie des caractéristiques du chantier et de l'ouvrage futur. Ces considérations nous ont poussé, il y a quelques années, à imaginer la construction de logiciels d'aide à la formulation des bétons. Un premier produit nommé BETONLAB [1], proposé en 1992 dans sa première version, a été développé dans un but au départ pédagogique. L'idée consistait à proposer aux utilisateurs une sorte de "laboratoire électronique", qui lui permette de "gâcher du béton sur son bureau" [2]. L'accent était mis sur la simplicité d'utilisation. Après remplissage d'un nombre très limité de cases relatives aux constituants, on pouvait simuler la réalisation de gâchées de laboratoire, avec pour inconvénient une précision limitée des résultats, mais pour avantage l'obtention instantanée des caractéristiques des bétons. Plutôt qu'une prévision fidèle des résultats expérimentaux, on recherchait, avec BETONLAB, à donner à l'utilisateur une compréhension du fonctionnement du "système béton", lui permettant de réagir efficacement dans une situation réelle. Le produit a été largement diffusé en France, et garde son intérêt dans le contexte actuel, notamment en formation initiale et continue.

A l'étranger, d'autres logiciels d'aide à la formulation des bétons ont été proposés, dont on trouvera une revue assez complète dans la référence [3]. Certains produits sont essentiellement

une "mise en musique informatique" de méthodes conventionnelles telles que la méthode de l'American Concrete Institute (ACI 211 [4]), ou, en France, la méthode Dreux-Gorisse [5]. Un nombre plus restreint d'exemples concerne des approches originales, comme celle de Day, plus axée sur le contrôle de la qualité en production que sur la formulation de départ [6], ou celle de Dewar [7], basée sur un modèle ternaire d'empilement granulaire. Cependant, aucune de ses méthodes ne repose sur un corpus scientifique à la fois solide et explicite.

Or, étant donné les progrès de l'informatique, l'utilisation pratique de modèles numériques ne présente plus aujourd'hui de difficultés. Le cœur du problème ne réside donc plus dans l'assemblage des modèles permettant de formuler un béton, mais bien, plutôt, dans la construction même de ces modèles, illustrant le plus fidèlement possible les relations existant entre la composition d'un mélange et des propriétés d'usage. C'est pourquoi le LCPC s'est lancé, il y a plusieurs années, dans la construction d'un tel ensemble de modèles, au travers notamment d'un certain nombre de thèses de doctorat [8-13], synthétisées, assemblées et enrichies dans un ouvrage récent [14-15]. Le présent article décrit dans les grandes lignes la démarche scientifique d'ensemble, ainsi que son pendant informatique, le logiciel BETONLAB-PRO [16]. Ce dernier n'est cependant qu'une application informatique particulière des modèles décrits. Un utilisateur peut les programmer directement à partir des références [14-15], en utilisant par exemple un logiciel de type tableur.

CONTENU SCIENTIFIQUE

L'approche scientifique du béton sous-tendant le logiciel s'appuie principalement sur une analyse de la structure granulaire du matériau. Trois étapes sont successivement parcourues: celle de l'empilement sec, dont on cherche à prévoir la compacité et la ségrégabilité; celle de l'empilement humide (béton frais), intéressant par ses propriétés rhéologiques; enfin, celle de l'empilement constitué du squelette du granulat noyé dans une matrice de pâte de ciment durcie. L'exposé complet de cette approche, avec ses développements mathématiques, peut être trouvé dans les références [14-15].

MODELE D'EMPILEMENT GRANULAIRE

Le modèle actuel, appelé Modèle d'Empilement Compressible (MEC), est la troisième génération de modèles développés au LCPC, visant à prévoir la compacité d'un mélange à plusieurs classes, à partir de la connaissance des compacités des tranches monodimensionnelles, de la distribution granulaire du système et de l'énergie fournie pendant la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle et d'indice de serrage.

Compacité virtuelle d'un empilement

Pour une population de grains donnée, on sait que la compacité, rapport du volume solide au volume total, dépend du mode de mise en place du mélange. On appelle conventionnellement *compacité virtuelle* la valeur maximale qu'il est possible d'atteindre en plaçant les grains un à un dans le mélange, tout en respectant leur intégrité. Les mélanges industriels, mis en place aléatoirement et avec une énergie finie, conduisent toujours à des compacités réelles plus faibles.

On appelle par convention classe monodimensionnelle un ensemble homogène de grains dont la grosseur est comprise entre deux tamis successifs de la série normalisée (série de Renard). Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange à n classes monodimensionnelles (mais non

nécessairement sphériques), on commence par distinguer la *classe dominante*, qui forme une phase continue dans le mélange et qui en assure le serrage (cf. figure 1). Cette classe i étant caractérisée par la compacité qu'elle atteint lorsqu'elle est empilée isolément (β_i), on calcule la compacité d'ensemble en exprimant que les grains i occupent "en masse" tout l'espace laissé disponible par les classes plus grossières, et que leur porosité est partiellement comblée par les classes les plus fines. On doit au passage tenir compte de deux types d'interaction granulaire: l'effet de paroi exercé par les gros grains, et l'effet de desserrement (ou d'interférence) exercé par les grains plus fins. Une hypothèse forte du modèle est de considérer ces interactions comme additives, ce qui revient à supposer la non-intersection des zones de l'empilement des grains i perturbées par les classes étrangères.

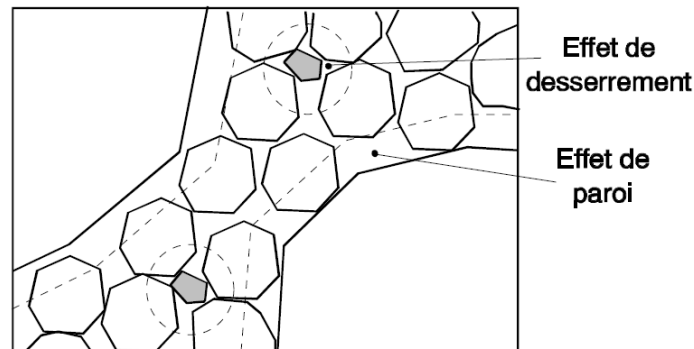


Figure 1: Classe dominante dans un mélange ternaire (ici, la classe de taille intermédiaire).

Compacité réelle: notion d'indice de serrage

Les considérations précédentes permettent, pour une combinaison donnée de n classes granulaires, de calculer n expressions de la compacité virtuelle, chacune correspondant au cas où la classe i serait dominante. La "vraie compacité virtuelle" est la plus faible de ces n valeurs. Pour calculer la compacité réelle, on se dote d'un paramètre supplémentaire, appelé indice de serrage, symbolisé par la lettre K . Avec cet indice, on cherche à quantifier dans quelle mesure on s'approche de l'empilement virtuel. L'indice K apparaît alors comme une caractéristique du mode de mise en place du mélange. On le définit comme la somme d'indices partiels K_i de chaque classe granulaire i . Les K_i dépendent du rapport entre le volume effectif de la classe i dans le mélange, appelé Φ_i , et la valeur maximale Φ_i^* que pourrait prendre cette grandeur si le mélange était bloqué par un excès de grains i , toutes les autres classes demeurant à volume constant. On a ainsi

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{1 - \frac{\Phi_i}{\Phi_i^*}}$$

Lorsque la concentration solide $\Phi = \sum_{i=1}^n \Phi_i$

croît de zéro jusqu'à la compacité virtuelle, on voit que l'indice de serrage croît d'une valeur nulle vers l'infini. Le fait de fixer la valeur de K , pour une population de grains donnée, fournit alors une équation implicite à une seule solution: la compacité réelle prévue par le modèle.

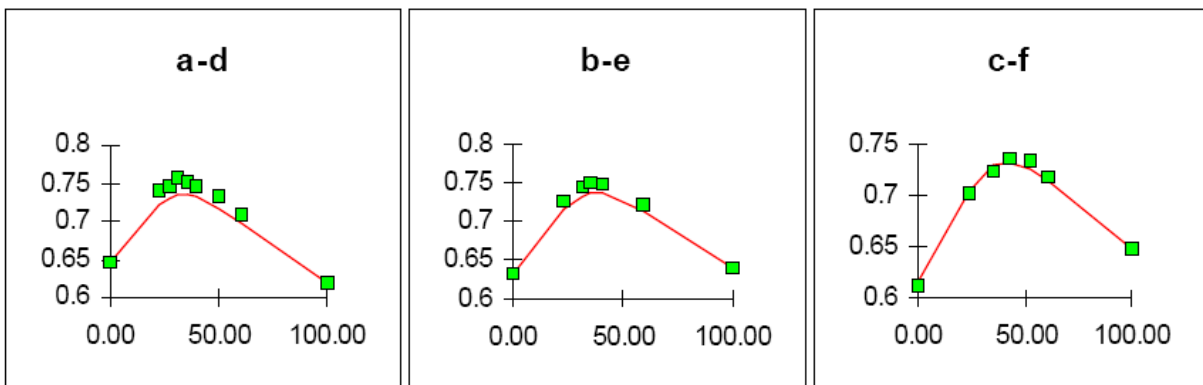
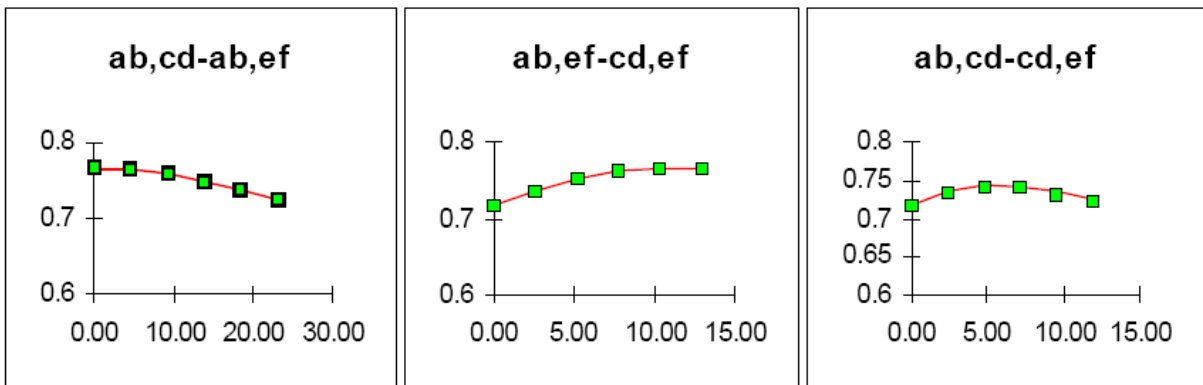
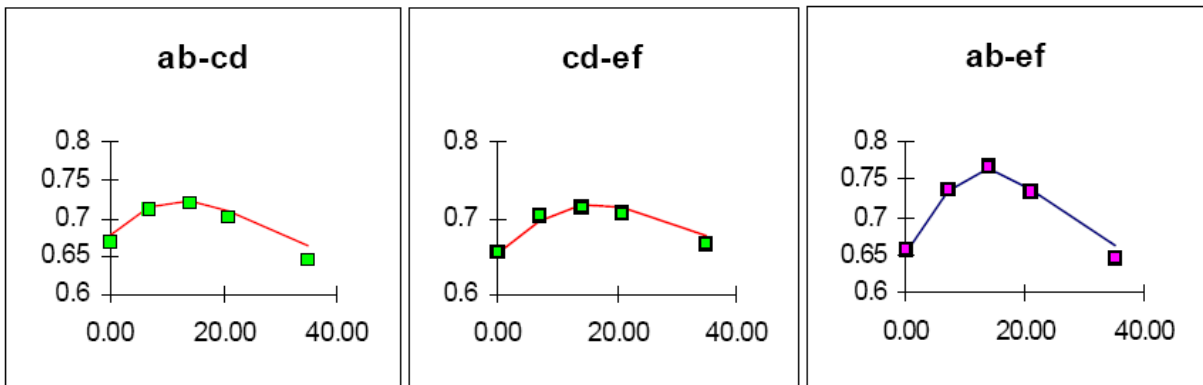
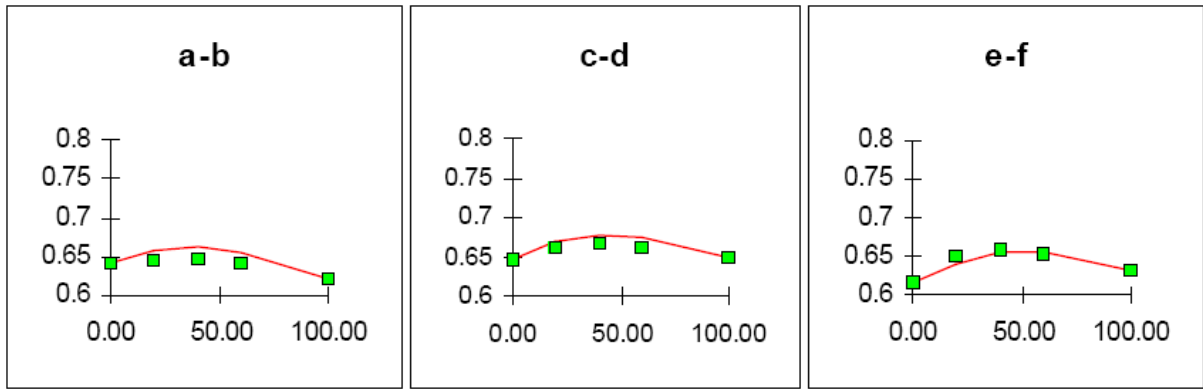
Précision du modèle

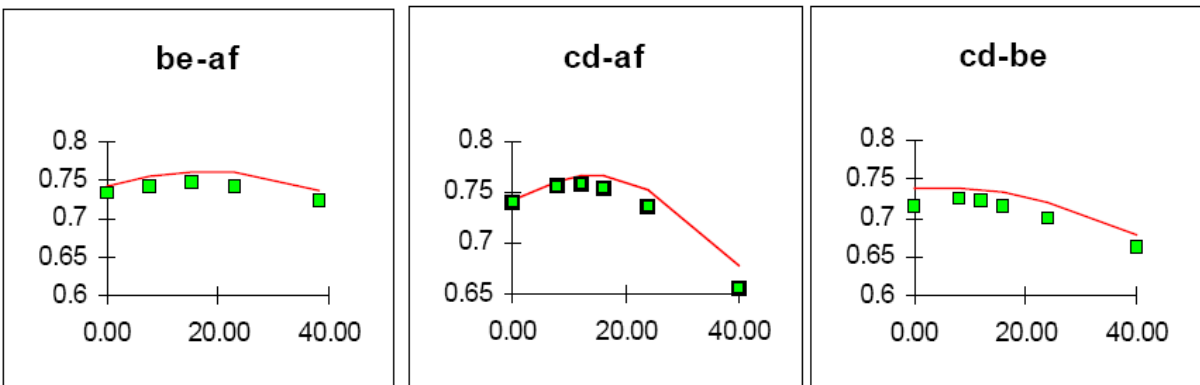
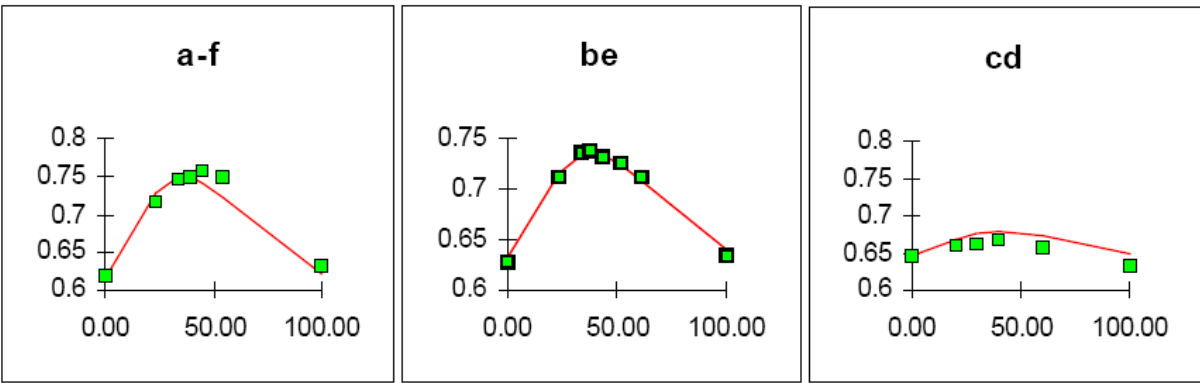
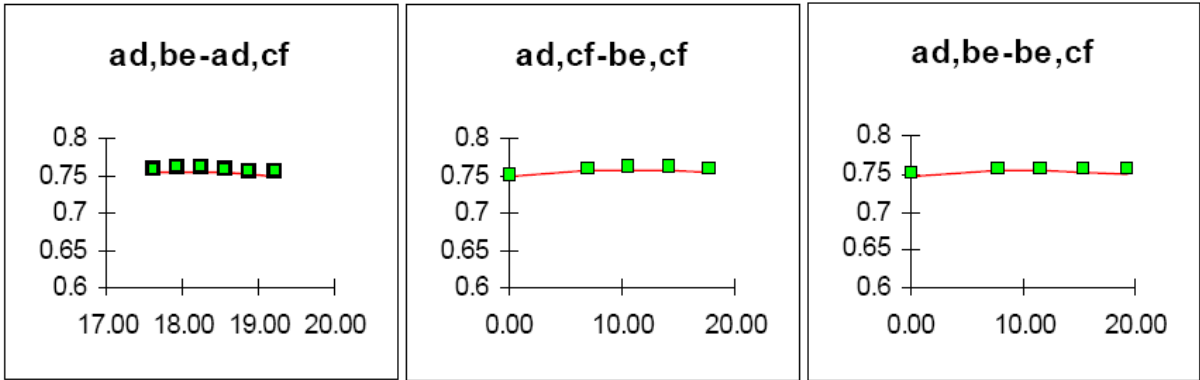
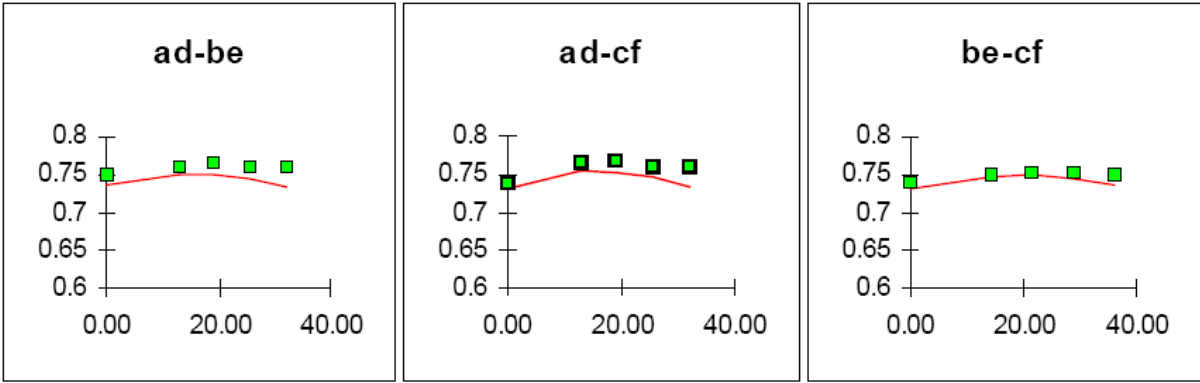
Pour être utilisable, le modèle nécessite d'abord une calibration générale, visant à quantifier d'une part les interactions granulaires (effets de paroi et de desserrement) et d'autre part les indices de serrage (paramètre K) correspondant à divers types de mise en oeuvre. Une fois cette calibration effectuée - ce qui a été fait à partir d'un ensemble de mesures sur mélanges binaires - le modèle doit être alimenté par les compacités des tranches monodimensionnelles. Il peut alors prédire la compacité à partir de la connaissance des proportions granulaires d'une combinaison de grains et de l'indice de serrage correspondant à sa mise en oeuvre. Sur la figure 2, on peut apprécier la capacité à prévoir les variations de compacité obtenues par mélanges successifs de six classes élémentaires de grains. D'une façon générale, le modèle conduit à des précisions meilleures que le pourcent de compacité (en valeur absolue).

Du fait de ses bonnes capacités prédictives, le modèle permet la recherche numérique de mélanges de compacité maximale. Il conduit au passage à remettre en cause la notion de courbe granulaire de référence: la répartition granulaire idéale obtenue sur une certaine étendue dépend de la forme des grains considérés. C'est, d'après nous, ce qui explique la diversité des courbes proposées dans la littérature technique. Le modèle d'empilement compressible, quant à lui, prévoit des distributions différentes suivant les compacités des différents étages de la granularité; d'une façon générale, à taille fixée, plus une classe est compacte, plus elle est représentée dans le mélange idéal.

Application à la ségrégabilité: le diagramme de remplissage

L'appréciation de la stabilité d'un mélange granulaire - i.e. sa résistance à la ségrégation - s'effectue par un nouvel outil appelé diagramme de remplissage. On commence par discrétiser l'étendue granulaire du béton en classes élémentaires agrégées, dont le rapport des tailles extrêmes est égal à 2,5. Puis on calcule pour chaque classe agrégée le rapport Φ_i/Φ_i^* , appelé rapport de remplissage relatif à la classe i, ce qui permet de construire le diagramme visible dans la figure 3. Une granulométrie idéale sous l'angle de la stabilité aurait une allure uniforme. En général, la recherche d'une compacité maximale conduit à hausser légèrement les deux pics extrêmes, car, comme l'avait pressenti Caquot [17], ces classes doivent suppléer à l'absence de grains au-delà des limites de l'étendue granulaire. Un "trou" dans le diagramme de remplissage témoigne d'une discontinuité dans la répartition granulaire, généralement considérée comme un facteur de ségrégabilité. Le diagramme permet donc un diagnostic d'un mélange granulaire donné, indiquant des mesures correctives à entreprendre en cas de ségrégation excessive.





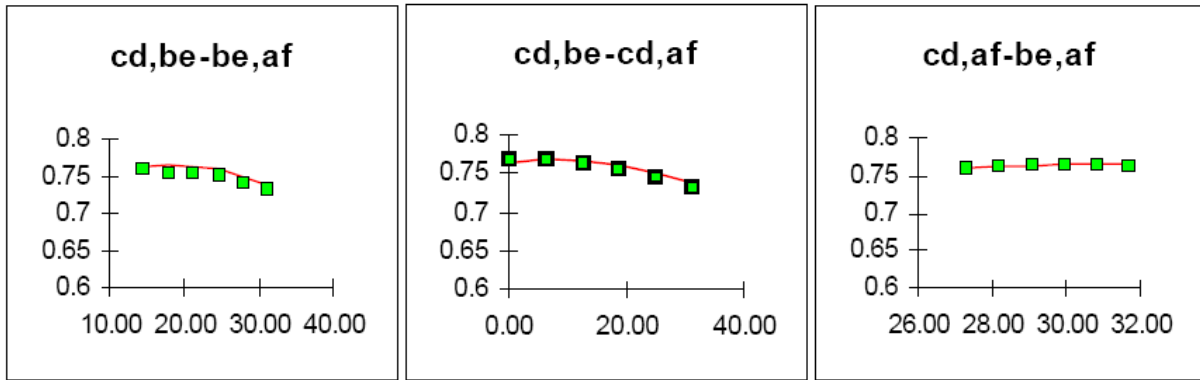


Figure 2: Comparaison entre prévisions du modèle d'empilement compressible et valeurs expérimentales de compacité [15]. Données expérimentales de Joisel (mélanges successifs de combinaisons optimales de six classes de grains appelées a-b-c-d-e-f).

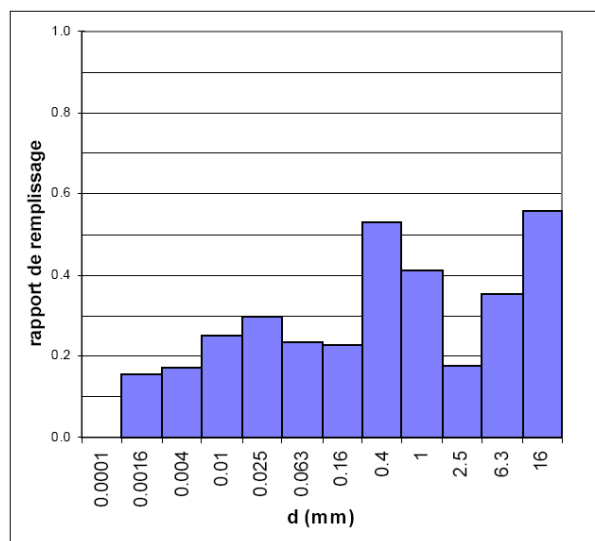


Figure 3: Diagramme de remplissage représentant la structure granulaire d'une formulation. Chaque pic correspond au rapport entre le volume effectif d'une classe présente dans le mélange, et le volume maximum qu'on pourrait y introduire, tous les autres volumes granulaires étant fixés.

PROPRIETES DU BETON FRAIS

Comment décrire scientifiquement l'écoulement et la mise en place du béton frais ?

Entre la sortie du malaxeur et la mise en place définitive dans le coffrage, le béton frais subit deux types de déformations élémentaires: il peut être *cisaillé* ou *compacté* (voire les deux à la fois). Pour des bétons plutôt secs, très foisonnants, c'est le compactage qui constitue la phase critique. Au contraire, pour des bétons très fluides tels que les matériaux autocompactants, le cisaillement constitue le phénomène important.

L'aptitude au compactage, ou compactabilité, est directement décrite par l'indice de serrage, que nous appellerons K' dans le cas du béton frais, pour le distinguer de celui relatif à l'empilement des mêmes grains à sec. C'est donc un paramètre majeur de formulation, qui présente cependant l'inconvénient de n'être directement mesuré par aucun essai. Quant au cisaillement, l'expérience montre que la plupart des bétons dans la gamme de consistance

plastique à fluide peuvent être considérés comme des corps de Bingham, ce qui signifie que leur comportement rhéologique se réduit à une droite (voir figure 4). La contrainte de cisaillement exercée sur le matériau engendre un gradient de vitesse selon une loi affine, dont l'ordonnée à l'origine est le seuil de cisaillement τ_0 , alors que la pente est constituée par la viscosité plastique μ . Le premier paramètre est directement relié à l'affaissement au cône d'Abrams. Quant au deuxième, c'est le paramètre "caché" permettant de discriminer les BHP (bétons à hautes performances) faciles à mettre en oeuvre de ceux qui témoignent d'un comportement collant, entraînant des difficultés de pompage et des parements bullés.

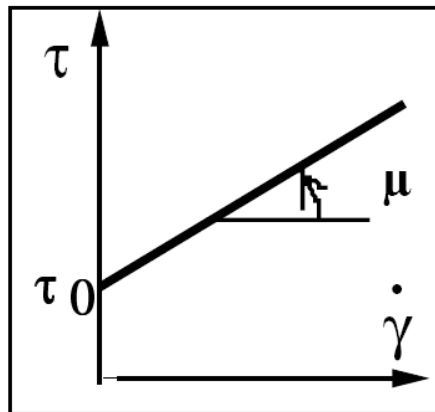


Figure 4: Modèle de Bingham représentant le comportement au cisaillement du béton frais.

Prévision de la viscosité plastique, du seuil de cisaillement et de l'affaissement au cône.

Par analogie avec le comportement purement frottant d'un milieu granulaire sec d'une part, et celui purement visqueux du liquide suspendant (qui n'est autre que l'eau) d'autre part, on peut raisonnablement supposer que, dans le comportement du béton frais au cisaillement, le seuil de cisaillement est une manifestation du frottement solide entre grains, alors que la viscosité plastique est le résultat macroscopique de dissipations visqueuses engendrées par le mouvement de l'eau dans la porosité du système granulaire. La viscosité plastique obéit donc aux mêmes lois que la viscosité des suspensions newtoniennes: elle apparaît comme essentiellement contrôlée par la concentration relative du mélange, définie comme le rapport entre la teneur en solide et la compacité du système granulaire, pour une valeur de référence de l'indice de serrage égale à 9 (soit la valeur correspondant à un empilement aléatoire fortement compacté, cf. figure 5). Ainsi donc, les classes individuelles ne jouent un rôle vis-à-vis de la viscosité plastique qu'à travers leur contribution à la compacité d'ensemble.

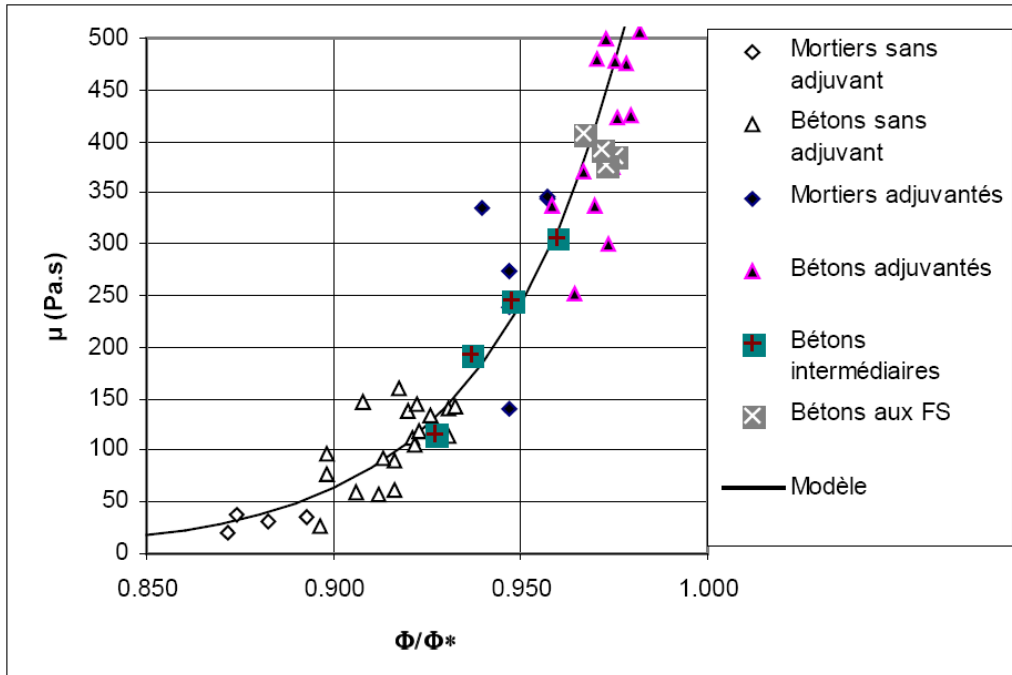


Figure 5: Relation entre viscosité plastique et concentration solide relative [21].

Dans le seuil de cisaillement, au contraire, les contributions des classes granulaires doivent être individualisées. En effet, plus une classe de grains est fine, plus elle présente de contacts par unité de volume, et plus le frottement interne généré pour un même indice de serrage est important. On doit donc sommer les contributions des classes, qui dépendent de l'indice de serrage partiel, pondérées par un coefficient décroissant avec la taille des grains. En présence de superplastifiant, le coefficient relatif au ciment peut décroître dans un rapport de 5 à 1, illustrant l'effet *lubrifiant* de ce produit. Cet adjuvant exerce également un effet *déflocculant*, qui se traduit par une augmentation de la compacité virtuelle du ciment, soit, à teneur en eau constante, par une diminution de l'indice de serrage. La modélisation du seuil de cisaillement peut se traduire en termes d'affaissement au cône d'Abrams, essai le plus communément rencontré sur les chantiers comme dans les laboratoires. La précision obtenue dans la prévision des affaissements expérimentaux est de l'ordre de 4 à 5 cm en valeur moyenne. L'influence des différents paramètres de formulation sur l'affaissement est bien prédite, comme illustré dans la figure 6.

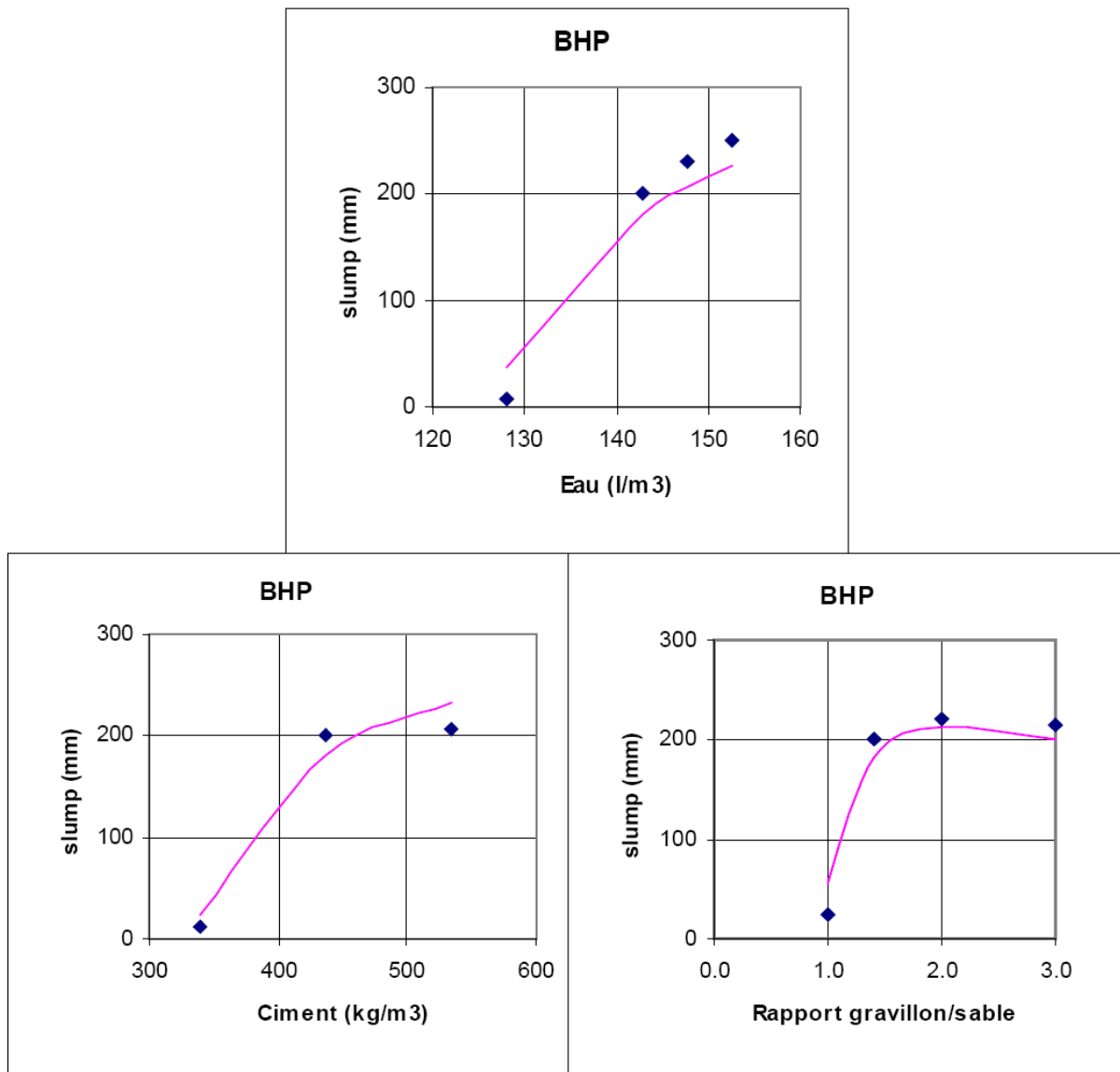


Figure 6: Validation expérimentale du modèle d'affaissement au cône d'Abrams du béton frais, pour une série de bétons avec superplastifiant.

Enfin, à partir de l'affaissement au cône, et de quelques paramètres de formulation, un modèle de teneur en air occlus du béton frais a été construit.

Stabilité du béton frais

En plus du contrôle de son écoulement et de sa mise en place, on recherche une certaine stabilité pour le béton frais, c'est-à-dire une propension limitée au ressuage et à la ségrégation. Cette dernière propriété peut être analysée à la lumière du diagramme de remplissage, qui doit être le plus uniforme possible. Particulièrement, on évitera la ségrégation gravillon/mortier en limitant le pic des gros gravillons dans ce diagramme et ayant soin d'éviter la présence de trou entre gravillon et sable. Quant au ressuage, il semble corrélé à la hauteur moyenne des pics dans le domaine des fines (inférieur à $80 \mu\text{m}$): plus les pics sont haut, et plus le ressuage est faible. En présence de superplastifiant, on doit hausser encore ces pics (c'est-à-dire utiliser davantage de fines).

PROPRIETES DU BETON DURCI

Exothermie du béton en cours de durcissement

Alors que le matériau se structure par hydratation du ciment, cette réaction a pour effet de dégager de la chaleur, ainsi que les réactions pouzzolaniques éventuelles, dans le cas de l'utilisation de certaines additions minérales. Pour un certain nombre d'applications, telles que les ouvrages massifs, il importe d'évaluer cette production de chaleur, de façon à la limiter, pour éviter des fissurations par retrait empêché, ou encore pour ne pas exposer le matériau à des températures supérieures à 60 °C, qui peuvent engendrer ultérieurement des gonflements sulfatiques. On a donc procédé à une modélisation de cette élévation de température, en quantifiant la capacité calorifique du béton, le degré de transformation du ciment et des pouzzolanes entre le début de prise et le long terme, et la chaleur dégagée par une unité de masse de liant ayant réagi. On en tire un modèle prédictif de la température maximale atteinte par le béton placé en conditions adiabatiques (cf. figure 7).

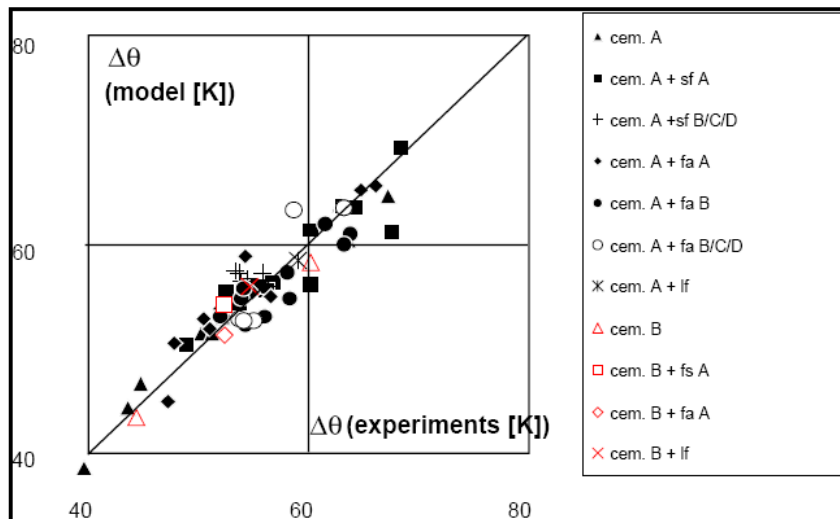


Figure 7: Validation expérimentale du modèle d'élévation de température en conditions adiabatiques [15].

Résistance en compression et en traction

Le paramètre le plus communément utilisé pour prévoir la résistance en compression du béton est le rapport eau/ciment en masse. En fait, le rapport e/c décrit la concentration volumique en ciment de la pâte, et on le prend en compte au travers d'une loi de puissance, comme dans la formule de Féret. Cette pâte, une fois "injectée" dans les interstices du granulat, prend le nom de matrice, et ses propriétés apparentes sont affectées par l'arrangement géométrique du squelette. Plus précisément, c'est la distance moyenne entre deux gros granulats adjacents, appelée *épaisseur maximale de pâte*, qui résume l'influence de la topologie du squelette (voir figure 8): plus cette distance est faible, et plus la résistance du béton est élevée. Enfin, la qualité de la liaison entre matrice et granulat, ainsi que la résistance propre du granulat, jouent également un rôle dans la résistance de l'édifice final qu'est le matériau composite. Ces deux effets d'adhérence et de plafonnement sont pris en compte par l'intermédiaire de deux paramètres intrinsèques à la roche d'origine. Grâce à ces considérations, on arrive à bâtir un modèle complet, qui prévoit la résistance en compression du béton sur cylindre pour des âges variant entre 1 jour et 1 an, et pour des mélanges comprenant des granulats, du ciment

Portland et des additions minérales (filler calcaire et pouzzolanes telles que les cendres volantes et les fumées de silice). Sa précision est de l'ordre de 2 à 3 MPa en valeur moyenne (cf. figure 9).

La résistance en traction est estimée à partir de la résistance en compression, comme dans les règlements. Le modèle est assorti d'un paramètre multiplicatif qui dépend de la roche constitutive du granulat.

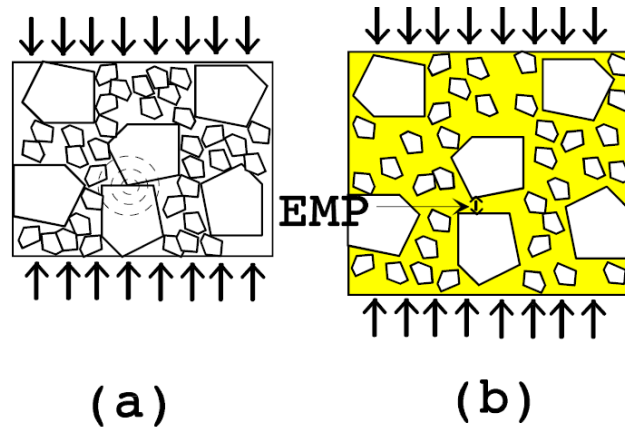


Figure 8: Notion d'épaisseur maximale de pâte, conditionnant la résistance en compression du béton à nature de pâte fixée. (a): squelette granulaire du béton (sable+gravillon) empilé à sec; (b): béton durci. L'épaisseur maximale de pâte (EMP) à droite correspond à un contact entre deux gros grains adjacents à gauche.

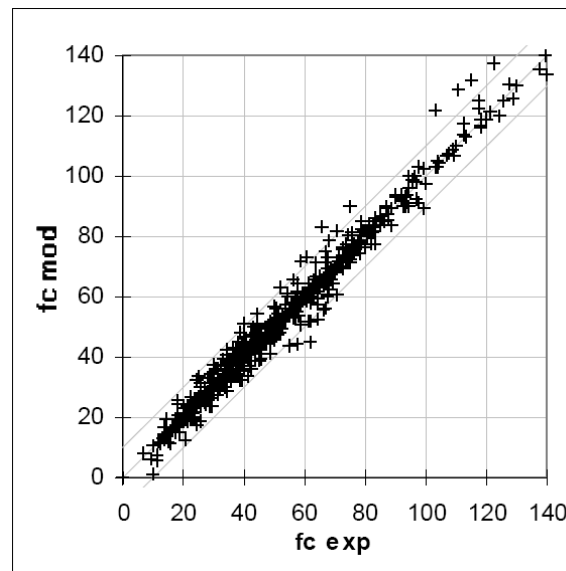


Figure 9: Validation du modèle de résistance en compression, pour des âges compris entre un jour et un an. f_{cmod} : résistance théorique; f_{cexp} : résistance expérimentale.

Déformabilité du béton durci

La déformabilité du béton durci est calculée à partir d'un modèle géométrique formé par trois sphères imbriquées (voir figure 10). La couche intermédiaire représente le granulat, et en a la rigidité. La matrice se trouve distribuée pour partie au centre du système, et pour partie en périphérie. La partie centrale correspond à la quantité de pâte qui resterait dans le béton frais si on l'essorait de toute sa pâte surabondante, c'est à dire si on compactait au maximum le squelette granulaire. L'excès de pâte, placé dans la crôte extérieure, confère au matériau frais sa maniabilité. En appliquant une pression hydrostatique sur ce complexe, on peut calculer les déformations instantanées et différées (si l'on connaît celles de la matrice). On peut donc évaluer le module élastique et le fluage du composite. De la même façon, s'il apparaît une déformation libre spontanée dans la pâte, elle se traduit par une déformation moindre du composite, en raison de l'empêchement provoqué par le granulat. On calcule donc ainsi les retraits endogène et de séchage du béton. La précision des modèles est illustrée sur les figures 11 et 12.

Ceci complète donc la panoplie de modèles permettant une prévision des propriétés d'usage du béton à partir de sa composition. Ils nécessitent tous la connaissance d'un certain nombre de paramètres relatifs aux constituants, qui peuvent être soit directement *mesurés* à partir d'essais sur les constituants en question, soit *calibrés* à partir de résultats d'essais sur bétons.

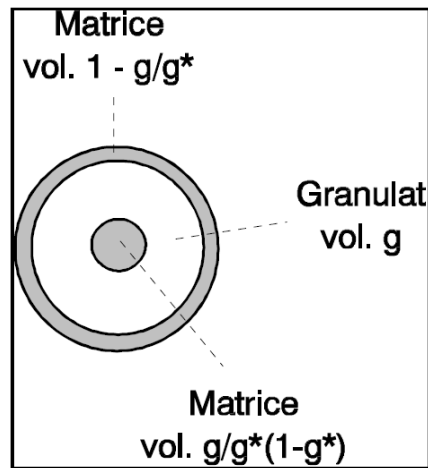


Figure 10: Modèle trisphère pour le calcul des caractéristiques de déformabilité du béton durci [10].

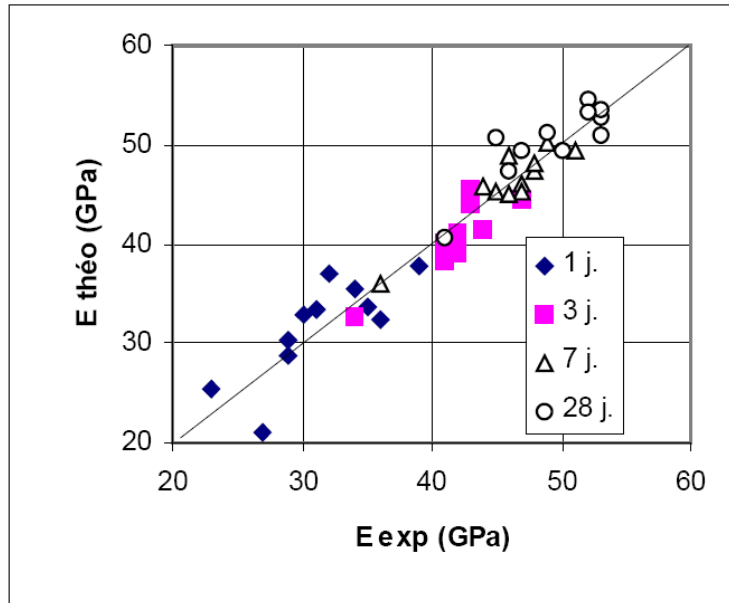


Figure 11: Validation du modèle de prévision du module élastique instantané.

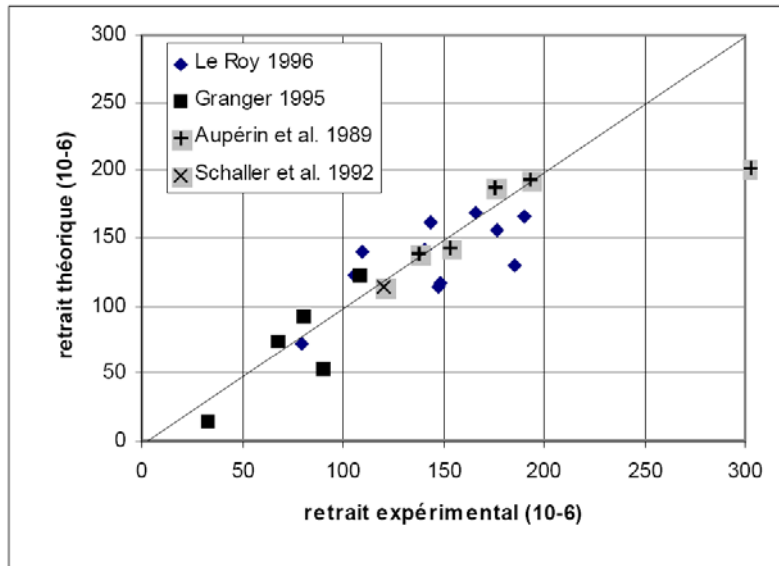


Figure 12: Validation du modèle de retrait endogène.

STRUCTURE DU LOGICIEL

Le logiciel permet de mettre en oeuvre les modèles précédents, à partir d'une définition des constituants utilisés, et de la description de la combinaison envisagée par l'utilisateur: c'est la fonction simulation. A l'inverse, le logiciel peut rechercher automatiquement la formulation satisfaisant à un certain nombre de contraintes (cahier des charges), en optimisant un critère; ce peut être le coût unitaire, qu'on cherche à minimiser, ou tout autre grandeur calculée par le logiciel.

BASE DE DONNEES CONSTITUANTS

Les constituants sont distingués par leur nature: granulats, ciment, pouzzolane (autre que la fumée de silice), filler calcaire, filler siliceux. Pour les liants, on considère en fait des couples liant/adjuvant. Les figures 13 présentent quelques écrans type du logiciel. Comme le calcul de

certaines propriétés du béton ne nécessite pas forcément la totalité des propriétés des constituants, l'utilisateur a la possibilité de ne renseigner que les cases indispensables. Le cas échéant, le logiciel signalera les paramètres faisant défaut. En tout état de cause, les masses volumiques, granulométries et paramètres de compacité des constituants sont indispensables au fonctionnement du logiciel.

Pour la détermination des paramètres de compacité, on doit procéder à une mesure à sec pour les granulats (une mesure par gravillon, et trois mesures pour les sables, correspondant aux fractions fines, moyennes et grossières). Plusieurs modes opératoires sont proposés, dont un qui consiste à placer les granulats dans un cylindre surmonté d'un piston, le tout fixé sur une table vibrante. La détermination d'un mode opératoire normalisable est en cours au LCPC. En ce qui concerne les fines, leur aptitude à réaliser un empilement compact est appréciée au travers d'un essai de demande en eau, en présence ou non de superplastifiant suivant les cas. Un mode opératoire simple est également proposé.

The image shows a software window titled "Propriétés du ciment" with a close button (X) in the top right corner. The window has a tabbed interface with four tabs: "Général", "Composition", "Propriétés", and "Squelette", with "Propriétés" currently selected. Below the tabs, there are several input fields for different properties:

- Classe vraie à 1 jour (MPa):
- Classe vraie à 2 jours (MPa):
- Classe vraie à 3 jours (MPa):
- Classe vraie à 7 jours (MPa):
- Classe vraie à 28 jours (MPa):
- Classe vraie à 90 jours (MPa):
- Classe vraie à 360 jours (MPa):
- Masse volumique (kg/m³):
- Capacité thermique (kJ/K/Kg):
- Dosage de saturation (%):
- Retrait endogène:
- Kc (Mpa):

On the right side of the window, there are three buttons: "Enregistrer", "Annuler", and "Outils".

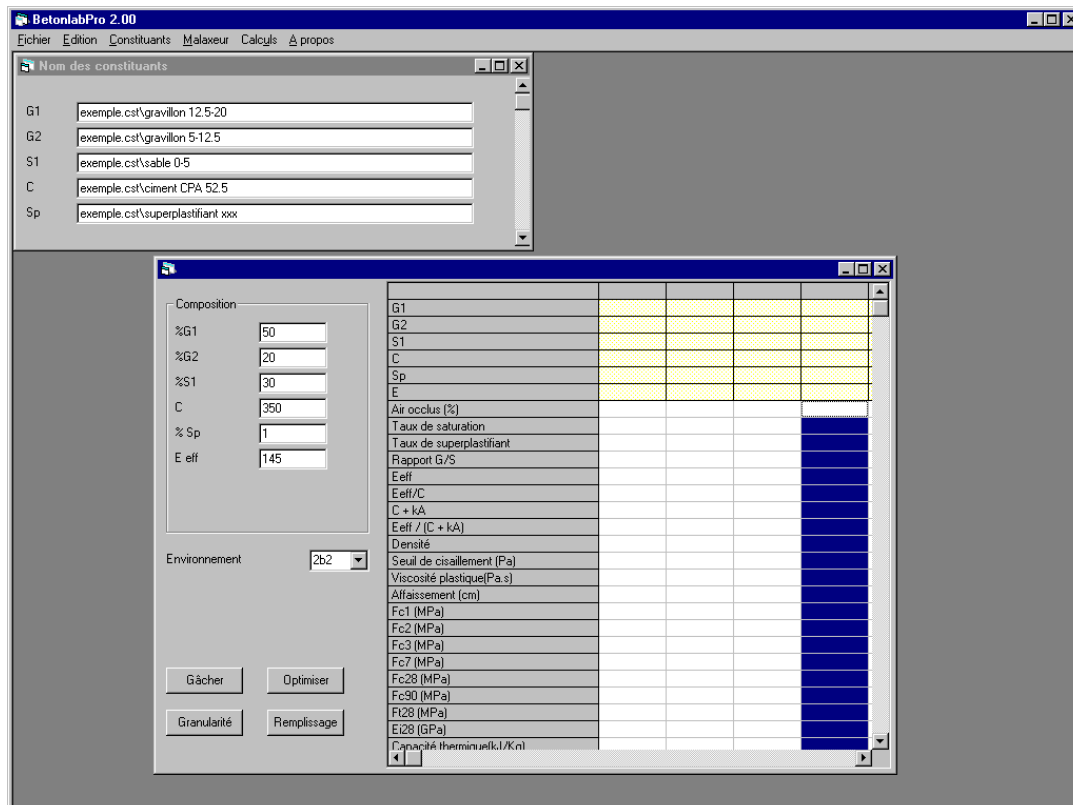


Figure 13: Deux écrans du logiciel BétonlabPro.

SIMULATION DE GACHEES

Les compositions des mélanges sont définies par l'utilisateur de la façon suivante: celui-ci fixe les dosages de liants et d'eau efficace¹ en kilogrammes par mètre-cube de béton en place, le pourcentage d'extrait sec d'adjuvant par rapport au ciment, ainsi que les pourcentages des différentes fractions granulaires par rapport au volume total de granulat. Le logiciel calcule alors la composition théorique du béton en place, et ses propriétés, telles que prévues par les modèles. Comme dans BETONLAB, on peut simuler une grande quantité de formules en faisant varier indépendamment les paramètres de composition, de façon à converger "manuellement" vers un ensemble de propriétés recherchées. Cependant, si l'on désire optimiser plus de deux ou trois paramètres, ce processus devient très long quant à sa mise en oeuvre, et hasardeux quant à son résultat. Il est alors préférable d'utiliser le module d'optimisation.

OPTIMISATION AUTOMATIQUE

Cette fonction est basée sur l'utilisation d'un "solveur", module d'optimisation non-linéaire du même type que ceux rencontrés dans certains tableurs du commerce. On y définit un paramètre à optimiser, les degrés de liberté (c'est à dire les paramètres de composition que l'on s'autorise à changer, par rapport à la composition de départ) et les contraintes du problème. Ces dernières peuvent avoir trait aux propriétés (spécifications performantielles) ou à certaines grandeurs de la formulation, telles que le dosage minimum en liant ou encore le

¹ C'est-à-dire l'eau totale du béton moins la partie absorbée par le squelette granulaire.

rapport eau/liant maximum. A ce sujet, le logiciel intègre les exigences de la norme P 18-305, de sorte qu'il suffit à l'utilisateur d'indiquer le type d'environnement auquel le béton doit résister pour que le logiciel intègre les contraintes qui lui sont liées. Pour permettre une convergence rapide, il est souhaitable, encore que non obligatoire, de partir d'une composition satisfaisant aux contraintes. Le logiciel se trouvant alors dans la bonne région de l'espace des paramètres de formulation, il n'a qu'à rechercher le point, en général unique, qui réalise la valeur optimale du paramètre à optimiser. Lorsque le problème a une solution, la convergence est généralement obtenue en quelques secondes.

L'obtention d'une solution au problème d'optimisation peut se faire selon deux méthodes. Dans la première, on optimise tout d'abord le squelette, en recherchant la compactabilité maximale (paramètre K'), à teneur et nature de pâte donnée. Puis, une fois les proportions mutuelles du squelette fixées, on termine le processus en cherchant les paramètres de la pâte qui permettent de satisfaire au cahier des charges du béton. C'est finalement, sous une forme informatisée, l'approche classique (en France) de la méthode Baron-Lesage [18]. Elle a l'avantage de mener à des bétons qui présentent des risques de ségrégation minimaux.

Dans la deuxième méthode, on autorise le logiciel à changer simultanément les paramètres relatifs au granulats comme ceux relatifs à la pâte, et on effectue directement l'optimisation globale du béton. Dans les cas où les fractions granulaires auront des propriétés différentes - paramètres mécaniques de résistance, coût unitaire etc. - la composition finale en tiendra compte. Par comparaison avec le rapport gravillon/sable issu de la première méthode, la deuxième aura tendance à indiquer une quantité plus importante de gravillon si ce produit est moins coûteux que le sable, par exemple. Le danger peut être alors d'obtenir des bétons trop "caillouteux", donnant des parements moins satisfaisants. Dans tous les cas, l'examen du diagramme de remplissage permet à l'utilisateur d'anticiper sur ce type de problèmes, si ce n'est de les prévoir de façon absolue.

EXEMPLE D'UTILISATION: FORMULATION D'UN B 45 POUR OUVRAGE D'ART

Dans cette partie, un exemple réel d'utilisation du logiciel est exposé en détail. Après la présentation du cahier des charges, les caractéristiques des constituants sont données. Ensuite, l'optimisation numérique permet d'aboutir à deux formules, ajustées sur la base d'essais à l'état frais. A 28 jours, les essais de compression permettent au formulateur de déterminer la formule qui remplit exactement les spécifications. On montre au passage l'efficacité de l'approche, en termes de nombre d'essais et de temps nécessaire pour obtenir une composition optimale.

CAHIER DES CHARGES

Un béton de structure doit être formulé, avec les spécifications suivantes: affaissement au cône compris entre 10 et 15 cm (béton très plastique), facilité de mise en place ($K' \leq 7$) et résistance caractéristique en compression supérieure ou égale à 45 MPa. Les spécifications en termes de durabilité, tels que prescrits par la norme P 18 305, sont donnés dans le tableau 1.

Après simulation des diverses causes de chute de résistance, il a été montré qu'il fallait viser en étude une résistance moyenne de 54 MPa. Etant donné le délai s'écoulant entre les gâchées d'essai et la mesure de la résistance en compression, on décide de formuler *deux* bétons dont la résistance visée sera de $\pm 5 \%$ par rapport à l'objectif. Ainsi, peu après les essais à 28 jours,

le formulateur peut déduire le mélange optimum, par interpolation entre les mélanges d'essai. On cherche donc à formuler deux bétons B1 et B2 de résistance respective égale à 51,3 et 56,7 MPa.

Notons que, dans cet exemple, on veut mettre au point une composition devant rester constante pendant toute la durée de la construction. C'est pourquoi la marge en termes de résistance est si importante. On pourrait imaginer d'utiliser le logiciel pour ajuster continuellement la formule en cours de production, sur la base d'essais fréquents de caractérisation des constituants, ou encore à partir d'essais sur béton au jeune âge [19]. On pourrait alors choisir une marge moindre, à condition d'accepter qu'une faible proportion des résultats d'essai soit inférieure à la valeur de calcul. Cette approche n'est pas cependant cohérente avec la réglementation actuelle du Ministère de l'Équipement.

Classe d'environnement	2b ₂
Dosage en ciment minimum	300 kg/m ³
Rapport eau/ciment maximum	0,55
Résistance minimale à la compression	30 MPa

Tableau 1: Exigences de durabilité pour un béton précontraint en environnement humide avec gel modéré, selon la norme NFP 18 305.

CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS

Le ciment est un CPA CEM I 52.5, dont les caractéristiques apparaissent dans le tableau 2 et la figure 14. On utilise également un superplastifiant de type résine mélamine, qui a montré avec le ciment en question une compatibilité satisfaisante.

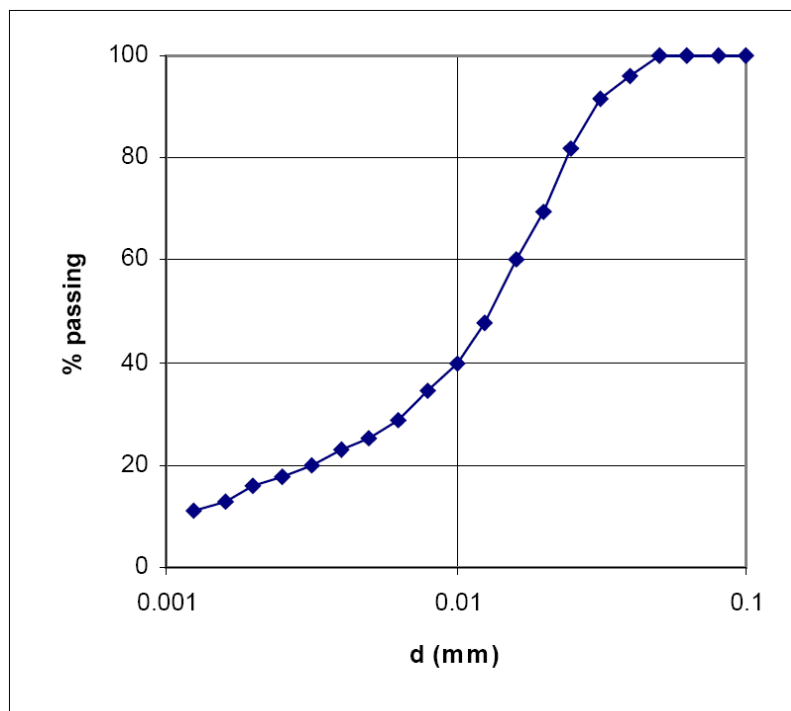


Figure 14: Granularité du ciment mesurée au granulomètre LASER.

Densité absolue du ciment	3,168
Classe vraie du ciment à 28 jours (sur la base d'essais antérieurs)	66 MPa
Résistance minimale du ciment garantie par le producteur	60 MPa
Densité de l'adjuvant	1,2
Extrait sec de l'adjuvant (en masse)	30 %
Dose de saturation de l'adjuvant par rapport au ciment	0,8 % (extrait sec)
Demande en eau du ciment (sans adjuvant)	w/c = 0,228
Compacité virtuelle élémentaire du ciment sans adjuvant	0,4869
Demande en eau du ciment saturé en adjuvant	w/c = 0,199
Compacité virtuelle élémentaire du ciment avec adjuvant	0,5188

Tableau 2: Caractéristiques du coupe ciment-superplastifiant

Le granulat est un roulé, disponible en trois coupures différentes, et complété par un sable correcteur 0/1. Les caractéristiques apparaissent dans le tableau 3 et la figure 15. Les paramètres de résistance en compression et en traction (p , q et k_t) sont supposés égaux à ceux d'un granulat alluvionnaire de même type. Dans une étude antérieure, ces paramètres avaient fourni des prédictions satisfaisantes des propriétés de bétons formulés avec les granulats utilisés dans la présente étude.

Coupures granulaires	8/16	3/8	0/3	0/1
Densité absolue	2,540	2,546	2,561	2,536
Absorption d'eau	1,1 %	1,1 %	0,8 %	0,1 %
Compacité mesurée	0,6304	0,6547	0,08/0,315: 0,6700 0,315/1,25: 0,6582 1,25/4: 0,6490	0,08/0,315: 0,6216 0,315/1,25: 0,6685
Compacité virtuelle élémentaire	0,6737	0,6696	0,08/0,315: 0,6668 0,315/1,25: 0,6622 1,25/4: 0,6728	0,08/0,315: 0,6108 0,315/1,25: 0,6803
Coefficient d'adhérence p	1,08			
Coefficient d'effet plafond q	0,0058 MPa ⁻¹			
Coefficient de résistance en traction k_t	0,44			

Tableau 3: Caractéristiques des granulats.

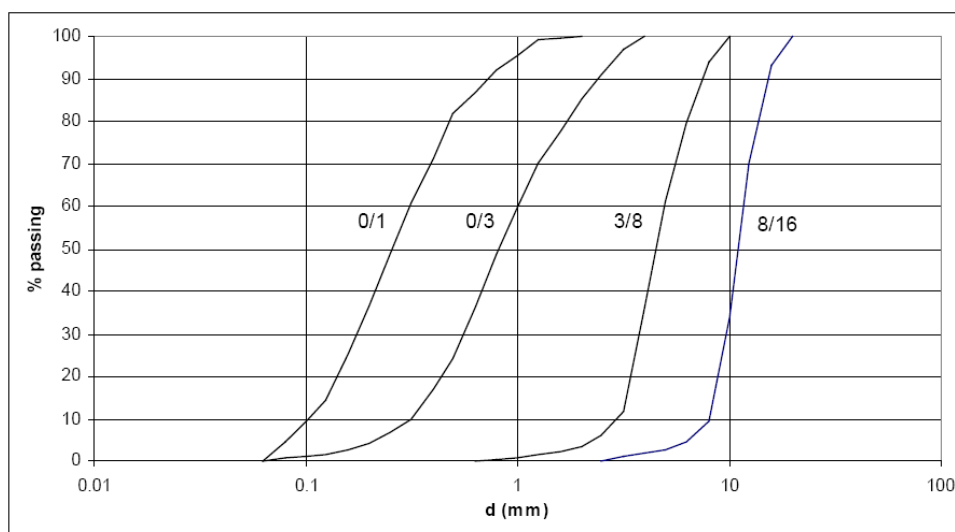


Figure 15: Granularités des coupures granulaires.

OPTIMISATION NUMERIQUE

Après avoir alimenté l'ordinateur avec les données relatives aux constituants, une première optimisation est lancée afin d'obtenir la composition satisfaisant les différentes contraintes (dont la résistance moyenne de 54 MPa) au moindre coût. On recherche à ce stade l'affaissement minimum, soit 10 cm, pour cette classe de consistance, car les gâchées réalisées à l'échelle industrielle donnent généralement des affaissements supérieurs, par rapport à des compositions identiques fabriquées en laboratoire. La composition-cible apparaît dans le tableau 4 suivant. On note que l'ordinateur propose d'utiliser un faible dosage de superplastifiant. En effet, l'effet marginal d'une telle dose est tellement important qu'il est presque toujours intéressant de l'utiliser, sauf quand une clause de dosage minimum en liant est active en l'absence d'adjuvant (entraînant l'obtention d'une résistance surabondante). D'autre part, le dosage de saturation est rarement le dosage optimum *d'un point de vue économique*, car l'efficacité marginale du superplastifiant décroît avec son dosage. Cependant, la prévention de pertes rapides de maniabilité est un aspect souvent plus important que l'aspect strictement économique, surtout quand ce dernier joue sur quelques francs (ou fractions d'euro !) au mètre-cube. A cette étape, le faible dosage suggéré par l'ordinateur est conservé, en gardant en tête la nécessité de vérifier le maintien de maniabilité du béton.

De façon à vérifier la robustesse de cette composition théorique, on simule ensuite l'effet de toutes les variations susceptibles d'apparaître en cours de production (dont un exemple est fourni dans les références [14-15]), et de diminuer la résistance en compression. La gâchée dite "dégradée" correspond au pire cas, où tous les effets néfastes sont cumulés. On admet également, pour cette gâchée, que la résistance du ciment est descendue à sa valeur plancher. On obtient alors une résistance de 45,1 MPa, ce qui justifie a posteriori la marge de sécurité de 9 MPa prise sur la résistance visée.

Compositions	Cible	Dégradée	B1	B2
8/16 (kg/m ³)	584	578	589	577
3/8 (kg/m ³)	372	369	375	368
0/3 (kg/m ³)	623	617	628	616
0/1 (kg/m ³)	173	172	175	172
Ciment (kg/m ³)	403	391	384	424
Superplastifiant (kg/m ³)	1,90	1,76	1,84	1,97
Eau (l/m ³)	179,2	189,5	178,9	180,0
e/c	0,409	0,448	0,427	0,391
G/S	1,20	1,20	1,20	1,20
Densité	2,335	2,317	2,331	2,337
Affaissement (cm)	10,0	16,5	10,0	10,0
fc28 (MPa)	54,0	45,1	51,3	56,7
ft28 (MPa)	4,3	3,9	4,2	4,4
coût (FF/m ³)	417,42	410,38	407,63	428,44
K'	7,00	6,46	7,00	7,00

Tableau 4: Mélanges théoriques obtenus par optimisation numérique. La formule dégradée est sous-dosée en ciment, sur-dosée en eau et la résistance de son ciment est supposée égale à 60 MPa.

Ensuite, comme expliqué plus haut, on optimise numériquement deux bétons B1 et B2 atteignant la résistance par excès et par défaut. A noter que les deux compositions vérifient l'ensemble des autres contraintes, dont celles relatives au dosage minimum et au rapport eau/ciment maximum.

ESSAIS SUR BETON

Dix litres du béton B1 sont fabriqués dans un petit malaxeur. L'affaissement obtenu est de 15 cm, pour 10 cm prévus. La différence obtenue entre prévision et mesure est du même ordre de grandeur que la précision du modèle de slump. De ce fait, on effectue un ajustement direct de la formule. Comme on cherche à réduire l'affaissement tout en conservant à ce stade la résistance, on choisit de réduire le dosage en superplastifiant. En divisant la dose par deux, on obtient un affaissement de 9,5 cm, ce qui est satisfaisant. A partir de cette expérience préliminaire, le béton B2 est fabriqué, avec une dose de superplastifiant également réduite de moitié, et donne un affaissement de 9 cm. Ainsi, à ce stade, trois petites gâchées ont été suffisantes pour ajuster les propriétés rhéologiques de deux bétons.

On prépare ensuite des gâchées plus importantes (70 litres), afin de procéder à l'ensemble des essais, donnés dans le tableau 5 suivant. Du fait du volume de ces gâchées, les affaissements obtenus sont plus forts que précédemment, tout en restant dans la plage du cahier des charges. La stabilité rhéologique des bétons est vérifiée à l'aide du rhéomètre BTRHEOM [19], dans lequel un même échantillon est conservé durant 40 minutes (cf. figure 16). En l'absence du rhéomètre, on aurait vérifié cette stabilité par des essais d'affaissement sur des prélèvements successifs dans une même gâchée. On constate sur les enregistrements du rhéomètre qu'aucun effet d'incompatibilité ciment-superplastifiant n'intervient. Finalement, la densité de chaque béton est mesurée. Les valeurs mesurées étant différentes des prévisions du logiciel, on recalcule les compositions réelles en faisant une règle de trois. Des détails sur la démarche d'ajustement d'une formule pourront être trouvés dans la référence [20]. Les compositions corrigées sont données dans le tableau 5.

L'aspect du béton est satisfaisant, sans aucune ségrégation visible ni ressuage excessif.

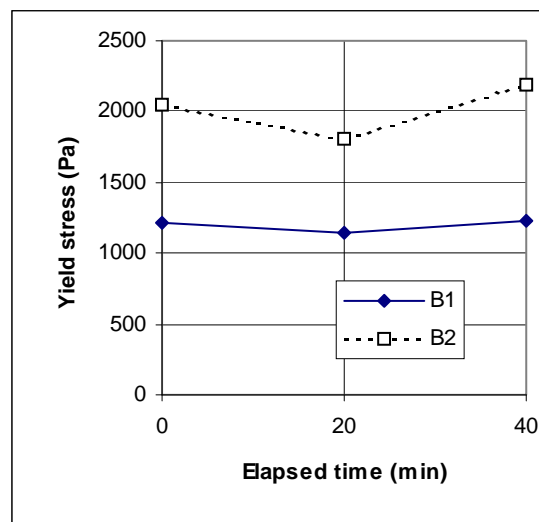


Figure 16: Evolution du seuil de cisaillement des bétons B1 et B2. On ne constate pas d'évolution significative pendant la période d'essai.

Compositions	B1	B2	Béton final
8/16 (kg/m ³)	610	596	595
3/8 (kg/m ³)	389	380	379
0/3 (kg/m ³)	651	636	635
0/1 (kg/m ³)	181	177	177
Ciment (kg/m ³)	398	438	443
Superplastifiant (kg/m ³)	0,95	1,01	1,02
Eau (l/m ³)	185,3	186,0	186
e/c	0,426	0,390	0,386
G/S	1,20	1,20	1,20
Air (%)	1,5	1,6	1,6
Densité	2,415	2,414	2,414
Affaissement (cm)	140	100	100-150
Résistance en compression à 28 jours prédite (MPa)	51,3	56,7	
Résistance en compression à 28 jours mesurée (MPa)	48,9	52,4	
Résistance en compression à 28 jours prédite après recalibration (MPa)	48	53,4	54
Résistance en traction prédite (MPa)	4,2	4,4	
Résistance en traction mesurée (MPa)	4,0	4,2	
Résistance en traction prédite après recalibration (MPa)	4,0	4,2	4,1

Tableau 5: Résultat des essais pratiqués sur les gâchées de 70 litres. Les compositions ont été corrigées, pour tenir compte des densités expérimentales. Les chiffres en italiques sont des prévisions du logiciel.

ESSAIS A 28 JOURS ET DETERMINATION DE LA COMPOSITION FINALE

La résistance obtenue à 28 jours apparaît dans le tableau 5. Les résultats sont un peu plus faibles qu'attendu, probablement à cause d'un changement de classe du ciment, car la valeur prise en compte était relative à une livraison précédente. Pour le calcul de la composition finale, le logiciel est recalibré (en changeant la classe du ciment), de façon à prédire des résistances en compression les plus proches possibles de celles mesurées sur les bétons B1 et B2. Ensuite, le dosage en ciment définitif est recherché sur la base d'une résistance à 28 jours égale à 54 MPa. La composition finale est en fait très proche de la composition B2.

Finalement, une composition de béton adaptée aura été obtenue avec un minimum d'essais de laboratoire, dans un délai de 4 semaines. Suivant les justifications demandées par le client (maître d'oeuvre, entreprise, préfabricant etc.), soit la composition finale fait l'objet d'une fabrication en laboratoire pour essais à 28 jours (du type de l'épreuve d'études prévue par le fascicule 65 A), soit le formulateur passe directement au stade de la convenance, et de l'adaptation éventuelle de la composition aux conditions réelles de fabrication.

GAMME DE MATERIAUX COUVERTE PAR LE LOGICIEL

Le programme peut simuler et optimiser toute combinaisons des constituants de sa base de données. On peut ainsi traiter les familles de béton suivantes:

- bétons classiques de type B25/B30 utilisés notamment dans le bâtiment;
- bétons d'ouvrage d'art de type B35/B45;
- bétons à hautes performances, avec ou sans fumée de silice;
- bétons projetés par voie humide;
- bétons compactés au rouleau;
- bétons secs de préfabrication (à l'exclusion des bétons caverneux à forte teneur en vides);
- bétons à fort volume de cendres volantes;
- bétons de sable;
- bétons autocompactants (ou autonivelants) sans agents de viscosité.

Dans certains cas, l'optimisation technico-économique suggèrera des matériaux intermédiaires entre des familles usuelles, tels, par exemple, les "bétons de sable chargés en gravillon", dont le rapport gravillon/sable est inférieur à l'unité. D'une façon générale, les modèles permettent de retrouver, à partir des exigences performantielles, les formulations dont l'ordre de grandeur est connu des praticiens, et qui découlaient jusqu'à présent de l'expérience empirique. Ils constituent ainsi un outil unificateur du paysage des bétons modernes.

CONCLUSION - EVOLUTIONS FUTURES

Une nouvelle approche de la formulation des bétons, matérialisée par un ouvrage de synthèse assorti d'un logiciel, est donc proposée à la communauté technique. Elle tâche de mettre à la portée du praticien l'équivalent d'une quinzaine d'années de recherches entreprises dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées. L'espoir des auteurs, c'est qu'il en résulte une amélioration générale des bétons, une facilitation de leur usage, et une meilleure adéquation ressources en matériaux/besoins techniques des constructeurs. L'outil peut également servir à démystifier le matériau béton, souvent regardé comme un système complexe, imprévisible et parfois hostile. Cependant, il faut se garder d'un risque inhérent à tous les outils informatiques: le fait de générer des grandeurs avec un ordinateur ne leur confère pas forcément un caractère de vérité absolue et de fiabilité totale. *Il reste indispensable de vérifier les propriétés des bétons formulés par des essais de laboratoire ad hoc.* Ce n'est qu'après cette étape que l'on peut passer au stade industriel, qu'il s'agisse de préfabrication ou de béton coulé en place.

Le logiciel actuellement proposé est appelé à évoluer, de façon à bénéficier des apports de la recherche en marche. Il serait important de pouvoir le compléter:

- en améliorant la précision des modèles par une confrontation avec des bases de données expérimentales encore plus étendues;
- en abordant certains constituants tels que les laitiers, les fibres métalliques, les entraîneurs d'air ou les agents de viscosité;
- en prenant en compte d'autres propriétés que celles actuellement prédites. On pense notamment à toutes celles qui conditionnent la durabilité du matériau, telles que la perméabilité au gaz, la diffusivité des ions chlorures, la profondeur de carbonatation, la résistance au gel/dégel etc..

Etant donné la croissance constante du champ des matériaux à base de ciment, ce travail de modélisation est un défi constant pour toute la communauté scientifique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DE LARRARD F., FAU D., "BETONLAB - Logiciel d'aide à la formulation des bétons (pour micro-ordinateurs PC et compatibles)", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Version 1.1, Juin, 1992. Version 2.1, Avril, 1993. Version 3.0, 1995.
- [2] DE LARRARD F., SEDRAN T., LE ROY R., "Gâcher du béton sur son bureau", Colloque sur l'enseignement des matériaux, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Mars, 1997.
- [3] BRANDT A.M., ed., *Optimization Methods for Material Design of Cement- Based Composites*, Modern Concrete Technology Series No. 7, S. Mindess and A. Bentur, editors, E & FN SPON, London, 314 p., 1998.
- [4] ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, 38 pp. (Detroit, Michigan), 1994.
- [5] DREUX G., "Guide pratique du béton", Collection de l'ITBTP, 1970.
- [6] DAY K.W., "Concrete Mix-Design, Quality Control and Specification", E & FN SPON, 350 p., 1995.
- [7] DEWAR J.D., "The Structure of Fresh Concrete", First Sir Frederick Lea Memorial Lecture, Institute of Concrete Technology, Reprinted by British Ready Mixed Concrete Association, p. 23, 1986.
- [8] DE LARRARD F., "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées N° 149, Mars, 1988.
- [9] HU C., "Rhéologie des bétons fluides", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA 16, 203 p., 1995.
- [10] LE ROY R., "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 350 p., Septembre, 1996.
- [11] LAPLANTE P., "Comportement mécanique du béton durcissant. Analyse comparée du béton ordinaire et à très hautes performances", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Etudes et Recherches des Laboratoire des Ponts et Chaussées, OA 13, 1993.
- [12] WALLER V., "Relations entre exothermie, résistance en compression et formulation des bétons", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Janvier, 1999.
- [13] SEDRAN T., "Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application à la formulation des bétons autonivelants", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars, 1999.
- [14] DE LARRARD F., Concrete Mixture- Proportioning - A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series No. 9, S. Mindess and A. Bentur, editors, E & FN SPON, London, 421 p., March, 1999.
- [15] DE LARRARD F., Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par A. LECOMTE, Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, à paraître.
- [16] SEDRAN T., DE LARRARD F., "Bétonlab-pro - Logiciel de formulation de bétons - Version 2.0 exécutable sous Windows", logiciel et notice, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, à paraître.
- [17] CAQUOT A., "Rôle des matériaux inertes dans le béton", Mémoire de la Société des Ingénieurs Civils de France, Juillet-Août, 1937.

- [18] BARON J., LESAGE R., "La composition du béton hydraulique, du laboratoire au chantier", Rapport de recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées No. 64, Décembre, 1976.
- [19] DE LARRARD F., HU C., SITZKAR J.C., JOLY M., CLAUD F., SEDRAN T., "Le nouveau rhéomètre LCPC pour bétons très plastiques à fluides", Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, N° 527, Octobre, pp. 17-47, 1994.
- [20] LECOMTE A., "Ajustement des méthodes de formulation de béton au mètre cube, en tenant compte du volume réel", Annales du bâtiment et des travaux publics, Octobre-Novembre, pp. 13-26, 1998.
- [21] DE LARRARD F., FERRARIS C.F., "Rhéologie du béton frais remanié. II: Relations entre composition et paramètres rhéologiques", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 214, Mars- Avril, 1998.