

Formulation des bétons

par Gérard BERNIER

Maître de Conférences à l'École nationale supérieure de Cachan

| | | |
|-----|---|--------------|
| 1. | Critères de base pour la formulation des bétons | C 2 210 - 3 |
| 1.1 | Environnement des ouvrages..... | — 3 |
| 1.2 | Caractères issus de la géométrie de l'ouvrage : Dmax..... | — 3 |
| 1.3 | Caractères spécifiques du matériau frais, durcissant et durci | — 4 |
| 1.4 | Caractères liés aux moyens de mise en œuvre du béton | — 9 |
| 2. | Les composants..... | — 9 |
| 2.1 | Quel ciment utiliser dans la formulation ? | — 9 |
| 2.2 | Quels granulats utiliser dans la formulation ? | — 12 |
| 2.3 | Qu'appelle-t-on eau efficace ? | — 12 |
| 2.4 | Quel adjuvant utiliser dans une formulation ?..... | — 13 |
| 3. | Formulation | — 14 |
| 3.1 | Les trois principes de formulation des bétons..... | — 14 |
| 3.2 | Les méthodes de formulation..... | — 14 |
| 4. | Contrôles des formulations de béton | — 25 |
| 4.1 | Essais d'études | — 25 |
| 4.2 | Essais de convenance | — 26 |
| 4.3 | Essais de contrôle..... | — 26 |
| | Pour en savoir plus..... | Doc. C 2 210 |

Le béton, depuis son origine, a été réalisé à partir des composants de base que sont : le **ciment**, l'**eau** et les **granulats**. Les romains le confectionnaient à partir de chaux, de céramique écrasée et de sable volcanique (Vitruvius « de Architectura » 1^{er} siècle av. J.C.). Le Panthéon de Rome, an 124 après J.C., est couvert par une gigantesque coupole en béton [1].

Si le matériau est plastique donc moulable lors de sa fabrication, il acquiert ses propriétés au cours du temps. Une fois mature, le béton doit être considéré comme un composite constitué de granulats et d'une pâte de ciment durcie, dont les propriétés dépendent, pour une grande part, de sa formulation.

L'évolution des connaissances du matériau, les exigences nouvelles en matière de propriétés ont incité les chercheurs et les utilisateurs à introduire dans les formulations de nouveaux « produits » afin d'obtenir des propriétés singulières. Ainsi, actuellement, assiste-t-on à une **explosion de la gamme des bétons** pour répondre aux demandes des industriels. En retour, les maîtres d'œuvre, s'appropriant les connaissances de ces nouveaux matériaux, proposent des ouvrages innovants. Il s'agit réellement d'une révolution dans la mesure où le matériau est conçu en fonction d'un nombre de critères de plus en plus important et par conséquent des formulations différentes seront définies pour chaque ouvrage.

Toutefois, il ne faut pas se faire d'illusion, la formulation élaborée résulte le plus souvent d'un compromis répondant au mieux aux propriétés recherchées. Après avoir établi la composition théorique, et bien souvent avec l'aide de l'expérience, il sera nécessaire de réaliser et de faire évoluer la formule en laboratoire, avant de la tester dans un processus industriel jusqu'à la mise en œuvre.

Pour éviter des formulations de béton inadaptées, le législateur encadre de plus en plus celles-ci en définissant des **limites de formulation**. Les dernières normes européennes à statut de normes françaises (ou, à défaut, les normes françaises en vigueur) seront prises pour référence dans ce document. L'évolution rapide de ce domaine incitera donc le lecteur à prendre en compte les dernières normes en vigueur sur ce sujet.

| Notations et symboles | | |
|-----------------------|--------------------------------|---|
| Symbole | Unité (1) | Définition |
| \mathcal{A} | cm | Affaissement au cône d'Abrams |
| A, A' | kg/m ³ | Quantité d'addition |
| Ab_g, Ab_s | | Teneur en eau absorbée respectivement par les granulats, les sables |
| a | kg/m ³ | Quantité de chaque adjuvant |
| C | kg/m ³ | Quantité de ciment |
| C_i | | Compacité de la classe granulaire i |
| \hat{C} | | Compacité moyenne |
| C_m | | Compacité d'un mélange |
| d | mm | Ouverture tamis |
| D_{\max} | mm | Taille maximale des gros granulats |
| E_a | kg/m ³ | Quantité d'eau d'apport |
| E_{ab} | kg/m ³ | Quantité d'eau absorbée |
| E_{eff} | kg/m ³ | Quantité d'eau efficace |
| F_s | kg/m ³ | Quantité de fumée de silice |
| f_{ck} | MPa | Résistance caractéristique |
| f_{c28} | MPa | Résistance cible en compression à 28 jours |
| f_{cm28} | MPa | Classe vraie du liant mesurée sur mortier normal à 28 jours |
| G | kg/m ³ | Quantité de chaque gravillon |
| g, g^* | m ³ /m ³ | Compacité granulaire |
| K | | Indice de serrage |
| K_g | | Coefficient granulaire |
| k | | Coefficient d'équivalence |
| L | kg/m ³ | Quantité de liant équivalent |
| S | kg/m ³ | Quantité de chaque sable |
| S_m, S_i | MPa | Sécurité sur la moyenne, sur la borne inférieure de f_{cm} |
| V_a | m ³ /m ³ | Volume d'air par m ³ de béton |

(1) /m³ signifie : par mètre cube de béton.

| Notations et symboles | | |
|-----------------------|--------------------------------|--|
| Symbole | Unité (1) | Définition |
| V_e, V_{Eff} | m ³ /m ³ | Volume d'eau, d'eau efficace par m ³ de béton |
| V_c | m ³ /m ³ | Volume de liant par m ³ de béton |
| V_g | m ³ /m ³ | Volume de granulats par m ³ de béton |
| V_g^* | m ³ /m ³ | Volume de granulats par m ³ de granulats secs |
| w_g, w_s | | Teneur en eau totale des granulats, des sables |
| y_i | | Proportion volumique de la classe i |
| α_c | m ³ /m ³ | Compacité du ciment |
| $\dot{\gamma}$ | s ⁻¹ | Gradient de déplacement |
| ω_c | | Concentration en ciment dans la pâte |
| ϕ_i | | Volume partiel de la classe i |
| ρ | kg/m ³ | Masse volumique |
| τ | Pa | Contrainte de cisaillement |

(1) /m³ signifie : par mètre cube de béton.

| Abréviations | |
|--------------|---|
| BAN | Béton autonivelant |
| BAP | Béton autoplaçant |
| BCR | Béton compacté au rouleau |
| BFUHP | Béton fibré à ultra-hautes performances |
| BHP | Béton hautes performances |
| BRF | Béton renforcé de fibres |
| BTHP | Béton très hautes performances |
| CPA | Ciment Portland artificiel |
| LA | Essai Los Angeles |
| MDE | Essai micro-Deval |

1. Critères de base pour la formulation des bétons

La formulation des bétons fait intervenir de nombreux critères aussi bien techniques qu'économiques. Ces critères, hypothèses de travail, peuvent être regroupés en **cinq classes** :

- l'environnement de l'ouvrage au cours de son fonctionnement ;
- les caractéristiques géométriques de l'ouvrage ;
- les caractères spécifiques du matériau frais, durcissant et durci ;
- les conditions de fabrication et de mise en œuvre du béton frais ;
- les matériaux à disposition localement.

À partir de ces cinq classes de critères, il est nécessaire d'établir les spécifications du matériau dont certaines ne sont pas toujours parfaitement compatibles. Tous les cas ne seront pas présentés ici, car trop nombreux, mais les éléments essentiels à l'établissement des formulations seront fournis.

1.1 Environnement des ouvrages

Contrairement aux idées reçues, les bétons sont plus ou moins altérés par l'environnement dans lequel ils sont immergés. La compréhension des mécanismes de dégradation aussi bien du béton que des armatures de renforcement, ainsi que les multiples possibilités de formulation, ont incité le législateur à définir des classes d'exposition des bétons, afin de garantir au mieux la pérennité des ouvrages.

Cinq classes d'exposition (tableau 1) permettent d'établir les critères de formulation des bétons. Les formulations doivent satisfaire, au minimum, aux critères des classes définies (Annexe F, EN 206-1 : 2002). Plusieurs classes d'exposition peuvent être affectées à l'ouvrage ; dans ce cas, il sera nécessaire d'établir une formulation qui satisfera aux plus exigeants des critères définis pour chaque classe.

■ Non agressif

Environnement sans agression particulière pour le béton non armé ou environnement sec pour le béton armé.

Exemple : voile intérieur de bâtiment avec humidité de l'air ambiant faible.

■ Carbonatant

Environnement où la carbonatation des bétons peut amener des désordres, à court ou moyen terme, comme la corrosion des armatures par exemple. Selon l'intensité de la carbonatation, liée aux conditions hygrométriques, plusieurs sous-classes ont été définies.

Exemples : structure béton armé peu exposée à la pluie en zone sèche ; voile extérieur de bâtiment avec alternance d'humidité et de séchage.

■ Avec des chlorures

Environnement présentant des chlorures, source de corrosion des armatures. Les chlorures provenant de l'eau de mer, de sels transportés par voie aérienne ou d'autres sources industrielles.

Exemples : mur de quai d'un port maritime, chaussée, piscine.

■ Avec risque de gel

Environnement avec gel et dégel. Selon la fréquence des cycles de gel/dégel et l'intensité du gel, plusieurs sous-classes ont été définies.

Exemples : ouvrages verticaux exposés au gel et aux projections d'eau ; routes exposées au gel et aux sels de déverglaçage.

Tableau 1 – Classes d'exposition (1)

| Désignation de la classe | Type d'attaque | |
|--|--|----------------------|
| X0 | Aucun risque de corrosion ni d'attaque | |
| XC1 à XC4 | Corrosion induite par la carbonatation | |
| XS1 à XS3 | Corrosion induite par les chlorures | Chlorures non marins |
| XD1 à XD3 | | Chlorures marins |
| XF1 à XF4 | Attaque gel/dégel | |
| XA1 à XA3 | Attaques chimiques | |
| (1) Extrait de la norme NF EN 206-1 de février 2002. | | |

■ Avec agression chimique

Environnement présentant une agression chimique. Dans ce cas, la nature de l'agression chimique doit être spécifiquement étudiée afin d'éviter toute altération dommageable pour l'ouvrage ; que celle-ci soit ciblée sur le ciment ou sur l'un de ses composants ou sur tout autre constituant du béton.

Pour les critères minimaux à respecter, se reporter à la norme en vigueur.

1.2 Caractères issus de la géométrie de l'ouvrage : D_{\max}

■ Volume

Formuler un béton c'est constituer un assemblage de composants devant occuper un volume défini. Pour de multiples raisons, aussi bien techniques qu'économiques, le concepteur a tout intérêt à **maximiser la taille des plus gros granulats** D_{\max} .

Exemple : Dans un barrage, la dimension maximale sera de 80 à 100 mm, ici les aspects de fabrication, plus que la dimension de l'ouvrage, sont des critères limitatifs.

Pour un voile de bâtiment ou pour des fondations routières, les dimensions maximales seront respectivement de 25 à 40 mm.

■ Épaisseur

L'organisation interne du béton, différente en pleine masse et au voisinage d'une paroi, nécessite de **limiter la taille maximale des plus gros granulats** afin que l'arrangement de l'ensemble des composants soit optimal. Il est généralement admis que la dimension D_{\max} soit cinq fois plus petite que la plus petite dimension de l'élément à réaliser (§ 3.2.3.2).

■ Enrobage

L'espace entre la paroi coffrante et la surface de l'armature la plus proche, paramètre fondamental vis-à-vis de toutes les agressions chimiques venant de l'extérieur et provoquant la corrosion, doit être d'une **qualité de remplissage maximale**. L'enrobage et la présence des parois (coffrage et armatures) **limitent respectivement la dimension D_{\max} et la proportion de grains ayant cette dimension**.

Remarque : la formulation choisie impose un minimum d'enrobage pas toujours respecté. En effet, compte tenu des tolérances de façonnage des armatures, il n'est pas rare de trouver celles-ci quasiment en contact avec le coffrage. En conséquence, la corrosion, quel que soit l'environnement, apparaît seulement au bout de quelques mois. Par ailleurs, le squelette perturbé fait souvent apparaître les fantômes des armatures. Souvent esthétiquement inacceptables, ces fantômes sont de plus en plus fréquents avec les bétons d'aujourd'hui fortement adjuvés.

■ Armatures

L'espacement des armatures conditionne D_{\max} . La distance entre les armatures, qu'elles soient parallèles, superposées ou dans un même plan horizontal, ou perpendiculaires, doit permettre au béton de s'écouler sans trop de difficultés.

Par ailleurs, comme précédemment, les armatures ainsi que les gaines, comme toute surface coffrante, organisent les granulats au voisinage de leur paroi. La proportion de gros granulats se trouvera diminuée quand les surfaces à enrober seront importantes (§ 3.2.3.4.1).

Les caractères géométriques qui viennent d'être énumérés et leur incidence sur D_{\max} sont récapitulés dans le tableau 2.

1.3 Caractères spécifiques du matériau frais, durcissant et durci

Dans bien des cas, **le fait de fixer une résistance minimale garantit le bon comportement du béton** dans l'ouvrage. C'est pourquoi ce critère est **fondamental**. En effet, la résistance étant directement corrélée à la porosité du matériau, celle-ci étant elle-même déterminante vis-à-vis des altérations physico-chimiques, ce critère de résistance apparaîtra toujours. Toutefois il est insuffisant pour traiter la totalité des cas rencontrés.

Ainsi la connaissance des agressions potentielles des ouvrages permet de définir un certain nombre de caractères des composants du béton, comme la nature du ciment, la nature et les proportions des produits d'addition au ciment, les proportions relatives de ciment et d'eau, les adjuvants...

1.3.1 Densité du béton

Les cas ne sont pas très nombreux, mais il arrive que la densité soit un paramètre de formulation du matériau. Trois cas sont possibles :

- La densité du béton n'est pas un paramètre de formulation, alors l'emploi des matériaux locaux s'impose, les granulats utilisés possèdent généralement des densités variant de 2,5 à 2,7 ; les bétons durcis et secs auront alors des densités de 2 à 2,6.
- Si le béton doit avoir une densité supérieure à 2,6 on parlera alors (par abus de langage) de béton lourd. Dans ce cas, des granulats denses devront être recherchés, comme ceux provenant des minerais de fer ou de baryum, voire issus du poinçonnement de poutrelles d'acier (riblons).
- À l'opposé, les bétons de densité comprise entre 0,8 et 2 (bétons dits légers) nécessiteront l'emploi de granulats de type argile ou schiste expansés, ou de vermiculite, voire l'introduction d'air entraîné en quantité importante, si la résistance n'est pas un caractère dimensionnant (béton mousse).
- Des exemples de densités de granulats sont donnés dans le tableau 3.

Tableau 2 – Influence des paramètres géométriques sur la dimension maximale des granulats

| Caractère géométrique | Paramètre | Effets sur D_{\max} |
|-----------------------|---|--|
| Volume | Volume | Maximise D_{\max} |
| Épaisseur | Épaisseur minimale E_m | $D_{\max} < E_m/5$ |
| Enrobage et armatures | Distance minimale entre l'armature et le parement e_c | $e_c \geq \text{Sup}(e_{\text{env}} ; 1,5 D_{\max})$ $e_{\text{env}} (1)$ |
| | Distance verticale entre deux armatures e_v | $D_{\max} < 1,5 e_v$ |
| | Taille de la maille $a \times b$ | $D_{\max} < ab/(a + b)$ |
| | Surface d'armatures et de gaines à enrober | Minimise la proportion de D_{\max} |

(1) e_{env} : distance conditionnée par les conditions environnementales, le règlement de calcul du projet et éventuellement le CCTP (cahier des clauses techniques particulières).

Tableau 3 – Quelques exemples de nature de granulats et leurs propriétés

| Appellation | Densité réelle | Dureté LA | Dureté MDE | Applications |
|-----------------------------|----------------|---------------------------------|------------|--------------------------------------|
| Calcaires durs | 2,5 à 2,7 | 15 à 20 | 0,4 | Bâtiments ouvrages d'arts |
| Silico-calcaires | 2,5 à 2,6 | 15 à 60 | 0,3 à 0,4 | Bétons routiers |
| Argile et schistes expansés | 0,8 à 1,35 | – | 10 à 32 | Bétons légers de structure [C 2 318] |
| Polystyrène expansé | 0,012 à 0,014 | – | – | Bétons isolants thermiques |
| Barytine | 4 à 5 | – | – | Bétons lourds |
| Hématite | 4,95 à 5,2 | – | – | |
| Riblons | 7,8 | – | – | |
| Chamotte, alumine | 2,8 | Environ 7 sur l'échelle de Mohs | | Bétons réfractaires |
| Carbure de silicium | 3,1 | 9 sur l'échelle de Mohs | | Bétons et mortiers d'usure |
| Corindon | 3,9 à 4,1 | 9 sur l'échelle de Mohs | | |

1.3.2 Tenue au choc et à l'usure

Sous l'effet de chocs en surface (faiblement énergétiques) ou de frottements répétés, les granulats peuvent être cassés ou usés. Des essais spécifiques ont été mis au point pour mesurer ces caractères : essais Los Angeles (LA)⁽¹⁾ et micro-Deval (MDE)⁽²⁾ (tableau 3). Parfois l'exigence anti-usure des surfaces est telle qu'il devient nécessaire d'incorporer des granulats spécifiques (corindons) dans la chape dite d'usure.

(1) NF P 18 573 (décembre 1990) : Essai Los Angeles.

(2) NF P 18 572 (décembre 1990) : Essai d'usure micro-Deval.

Exemple : la réalisation des chaussées en béton nécessite l'utilisation de granulats devant résister aux chocs et à l'attrition pour qu'elles conservent leurs propriétés d'adhérence dans le temps.

Les chocs plus énergétiques sollicitent le béton dans sa masse plus que les granulats eux-mêmes. Pour se prémunir de cela, il est nécessaire d'augmenter la résistance à la fissuration très faible du béton (environ 120 J/m²) par l'incorporation de fibres ductiles en acier par exemple. Des dosages faibles (20 à 40 kg/m³) suffisent à éviter la propagation de la fissuration. Pour les plus performants (BFUHP, § 3.2.6.3), cette résistance peut atteindre 30 000 J/m² [23].

Exemple : déversoirs sollicités par des chutes de blocs, dallages recevant des chocs de dépose d'objets lourds ou des chutes d'objets.

Pour des chocs encore plus énergétiques ou de longue durée, la réponse dynamique de la structure est à prendre en compte et la dissipation locale de l'énergie dans le matériau modifie le temps de chargement.

1.3.3 Tenue au feu

La tenue au feu des bétons est conditionnée par la nature des composants ainsi que par les propriétés du béton durci. Ainsi, on évitera les granulats siliceux qui augmentent de volume vers 850 °C en changeant de forme cristalline, de même que les bétons ayant une très faible perméabilité provoquant des écaillements sous la pression de vaporisation de l'eau interne.

Pour les bétons devant résister à des températures élevées dans des conditions normales d'exploitation, comme les revêtements de four par exemple, la température de fonctionnement définira non seulement le type de granulat mais aussi celle du liant (chamotte, granulats à base d'alumine, ciment aluminieux).

1.3.4 Résistance mécanique

La résistance mécanique **en compression** est un paramètre fondamental, car cette propriété du béton est corrélée (à de rares exceptions près) à toutes les autres propriétés. Imposer une résistance revient généralement à imposer d'autres caractères que l'on aura de fait.

■ Résistance caractéristique à 28 jours

La résistance caractéristique à 28 jours f_{ck-cyl} (MPa)⁽¹⁾ est définie pour le dimensionnement des ouvrages. Plusieurs classes de résistances (8 MPa à 100 MPa) sont définies par la norme EN 206-1 (2002). Les contrôles s'effectuent sur cylindre d'éclatement 2 ou sur cube $f_{ck-cube}$ selon les pays européens.

(1) Cas du contrôle de conformité des bétons à caractères spécifiés. Les résistances obtenues, valeur moyenne f_{cm} de n essais et la valeur minimale f_{cl} de tout essai doivent satisfaire à : $f_{cm} \geq f_{ck} + k_1$; et $f_{cl} \geq f_{ck} - k_2$. Pour les valeurs de k_1 et k_2 se reporter aux normes en vigueur (NF EN 206-1 février 2002, XP P 18-305 août 1996)

Exemple : la classe C 35/45 correspond à une résistance caractéristique minimale de 35 MPa sur cylindre.

■ Résistance à court et long terme

Si la résistance du béton est définie à 28 jours, dans de nombreux cas il sera nécessaire d'obtenir une résistance à plus court

terme (2, 3, 7 ou 14 jours) pour les ouvrages sollicités jeunes. Plusieurs approches sont toujours possibles :

- formuler le béton pour obtenir cette résistance à court terme et dépasser largement la résistance souhaitée à 28 jours ;
- conditionner le matériau (par thermomaturation par exemple) pour garantir cette résistance à court terme sans majorer les performances du béton à 28 jours. Ici l'application et le coût orienteront le choix. La résistance du béton jeune peut être suivie à tout instant par maturaométrie [2].

Inversement, il est parfois nécessaire de valider les résistances à plus long terme (90 jours) dans le cas de liants à faible cinétique (ciment aux cendres volantes).

1.3.5 Variations dimensionnelles et fissurabilité

La formulation du matériau doit prendre en compte l'effet des variations dimensionnelles du béton car les conséquences sont souvent compromettantes pour l'ouvrage et au minimum pour sa durabilité et son esthétique. Ce point est complexe car il met en jeu plusieurs phénomènes qui affectent non seulement la formulation mais aussi les conditions de conservation du matériau.

- Le **retrait de séchage**, avant prise (encore appelé « retrait plastique ») est à combattre absolument. La perméabilité du béton frais est si grande que ce retrait conduit à des fissurations traversantes des pièces minces malgré la présence d'armatures. L'utilisation de produits de cure est alors indispensable.

- Le **retrait endogène**, conséquence directe de l'hydratation du ciment, mais limité par la présence des granulats, produisant généralement des fissurations dans le coffrage si les retraits sont importants ou empêchés [3].

- Le **retrait thermique**, conséquence de la réaction chimique mais aussi de sa cinétique de la massivité de l'objet et des échanges thermiques avec le milieu extérieur. Ces variations volumiques conduisent à la fissuration des ouvrages massifs tels les radiers, piles et barrages [4].

- Le **retrait de séchage**, généralement différentiel, du béton durci ou durcissant conduit à des déformations structurelles, comme le tuilage des dallages, et à la création de joints [5].

Le choix des composants afin de minimiser ces trois effets peut se faire selon le tableau 4.

1.3.6 Durabilité

Se reporter également à [6].

En terme très général, la durabilité est définie comme l'aptitude du matériau à conserver ses propriétés au cours du temps dans l'environnement pour lequel il a été conçu. En conséquence, toutes les sollicitations physico-chimiques susceptibles d'altérer le béton doivent être prises en compte. Très souvent, lorsque les sollicitations ne sont ni sévères ni spécifiques, la durabilité est obtenue, de fait, rien qu'en fixant une résistance mécanique.

Mais, dans bien des cas spécifiques, ce caractère peut s'avérer insuffisant comme le montrent les classes d'environnement citées précédemment (§ 1.1).

■ Altérations endogènes

Ces réactions mobilisent les composants du béton durci sans échange avec le milieu extérieur. Plusieurs types de réactions sont possibles mais la plus fréquente est la réaction alcali-silice : réaction entre les alcalins du milieu et certaines silices réactives en présence d'eau [C 2 252].

Les effets catastrophiques de ces réactions, gonflements et fissurations, nécessitent de prendre des précautions de formulation. Les essais, permettant de prouver la non réactivité des composants et la stabilité de la formulation, sont longs et onéreux. Des recommandations ont été établies [7].

Tableau 4 – Choix des composants et des conditions environnementales sur les phénomènes de retrait

| Objectif | Composants du béton et environnement | | | |
|--|---|--------------------------------|---------------------------------|---|
| | Ciment | Eau | Granulat | Environnement |
| Diminuer le retrait endogène | Ciment à faible retrait à court terme Voir fiche produit du fabricant Minimiser la quantité de ciment | Sans objet (1) | Compacité maximale du squelette | Évacuer la chaleur La température augmente la cinétique de retrait |
| Diminuer le retrait thermique et limiter les gradients | Minimiser la quantité de ciment Ciment à faible chaleur d'hydratation avec une cinétique lente | Sans objet | Sans effet | Favoriser l'évacuation de la chaleur Limiter la massivité |
| Diminuer le retrait de séchage | Sans objet | Minimiser l'eau de gâchage (1) | Compacité maximale du squelette | Conservé un milieu humide Retarder la dessiccation |

(1) Certains adjuvants récents et en cours de développement agissent sur le retrait endogène et de séchage en réduisant les tensions superficielles de l'eau.

Tableau 5 – Niveaux de prévention en fonction de l'ouvrage dans son environnement

| Classifications des ouvrages | Incidence des désordres | Classe d'environnement (1 à 5) ou d'exposition (X0 à XA) (1) | | | | |
|------------------------------|-------------------------|--|---------------------|---------------------|---------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | X0-XC1 | XC2-XC3-XF1-XF2-XF3 | XF4-XD1-XD2-XD3-XS1 | XS2-XS3 | XA1-XA2-XA3 |
| Catégorie I | Faibles ou acceptables | A | A | A | A | A |
| Catégorie II | Peu tolérables | A | B | B | B | C |
| Catégorie III | Inacceptables | C | C | C | C | C |

(1) Ce tableau a été défini pour les classes d'environnement XP P 18 305 de 1 à 5. Pour les nouvelles classes d'exposition définies par NF EN 206-1 : 2002, la correspondance n'existe pas. Cette proposition est une interprétation de l'auteur.

Trois paramètres sont pris en compte :

- l'ouvrage dans son environnement ;
- la réactivité des granulats ;
- la teneur en alcalins des composants du béton.

● Niveaux de prévention

Trois niveaux de prévention A, B, C sont définis en fonction de l'incidence de désordre sur l'ouvrage et de l'environnement (tableau 5).

● Classement des granulats vis-à-vis des réactions alcali-silice

Après enquête sur le gisement et les essais déjà effectués, les granulats sont qualifiés vis-à-vis de leur réactivité en trois catégories :

- NR : non réactifs ;
- PR : potentiellement réactifs ;
- PRP : potentiellement réactifs avec effet « pessimum ».

● Bilan des alcalins

Le bilan des alcalins (Na_2O et K_2O) est obligatoire pour les niveaux de prévention B et C. Ce bilan des alcalins est exprimé en équivalent Na_2O . Tous les apports sont à prendre en compte :

- apport du ciment (fiche technique du ciment) ;
- apport des additions et ajouts ;
- apport des adjuvants ;
- apport de l'eau ;
- apport des granulats.

La connaissance de l'ouvrage et de son milieu environnant, de la source d'approvisionnement en granulats et des composants du matériau permet d'identifier une procédure et éventuellement les essais à effectuer.

■ Gel/dégel des bétons

La transformation de l'eau, contenue dans le béton, en glace provoque des écaillages de surface et des fissurations dans la masse si le gel est sévère (température basse avec vitesse de refroidissement rapide) et si le nombre de cycles est important. Si la tenue au gel des bétons est assez peu sensible à la gélivité des granulats, en revanche la résistance à l'écaillage est fortement influencée par celle-ci (EN 12620 : 2003).

Pour obtenir la résistance au gel, on incorpore des microbulles d'air (diamètre < 50 μm) permettant l'expansion de la glace. L'utilisation d'un adjuvant entraîneur d'air est alors nécessaire lors de la fabrication. La teneur en air entraîné doit être supérieure à 4 % (EN 206-1 : 2002).

Le contrôle de la teneur en air entraîné doit être fait juste avant la mise en place car bien des paramètres influencent celle-ci, comme : la présence d'un fluidifiant, la température du béton, le transport, etc.

■ Résistance aux agressions chimiques

L'altération chimique des bétons suppose que les agents réactifs accèdent aux composants du béton avec lesquels ils sont susceptibles de réagir. En conséquence, deux paramètres gouvernent l'altération chimique des bétons : la **nature des agents agressifs** et la **perméabilité du béton**. En fonction du type d'agression, il est possible d'identifier les réactions pouvant se produire et par voie de conséquence d'agir sur les paramètres de formulation (tableau 6).

Tableau 6 – Effets des agressions chimiques sur la formulation des bétons

| Agent agressif | Composant altéré, risques | Effet sur la formulation | |
|---|--|---|---|
| Gaz carbonique et milieu humide | Dissolution de la portlandite Perméabilité croissante Dépôts de calcite, corrosion | Ciments composés avec ajouts pouzzolaniques | Augmenter la compacité, diminuer la perméabilité du béton |
| Sels marins | Aluminates de calcium Gonflements, corrosion | Ciments à basse teneur en aluminates « PM » (1) | |
| Sols gypseux, eau séléniteuse, sulfates | Aluminates de calcium Etringite monosulfate Gonflements | Ciments à basse teneur en aluminates « ES » (2) | |
| Sels de déverglaçage | Hydrates du ciment, aciers Écaillage, corrosion | Constituants conformes Entraîneur d'air | |

(1) PM désigne les ciments dits prise mer.
(2) ES désigne les ciments adaptés aux eaux séléniteuses.

Tableau 7 – Paramètres de formulation permettant de réduire la perméabilité d'un béton

| Composants du béton | Paramètres d'action | Commentaire |
|---------------------------------|---|---|
| Granulats | Choisir des granulats peu perméables | Limite la continuité capillaire à travers les granulats |
| | Choisir un granulats ayant un module de déformabilité voisin de celui de la pâte durcie | Limite les déformabilités différentielles et les fissures aux interfaces pâte-granulats sous chargement |
| Liant, additions, adjuvant | Employer des additions minérales réactives comme les laitiers, les cendres volantes, les fumées de silice | Complète la formation d'hydrates, à court et long terme, diminuant la porosité et la taille des capillaires |
| | Limiter la quantité de ciment et sa réactivité | Limite le retrait endogène, donc la microfissuration interne |
| | Utiliser des agents hydrofuges de masse | Les hydrofuges de masse diminuent la connectivité du réseau capillaire |
| Eau, conditions de conservation | Minimiser les quantités d'eau en utilisant un fluidifiant | L'eau ne participant pas à l'hydratation du liant forme la porosité du milieu durci |
| | Effectuer une cure humide longue (ex : 72 h au lieu de 12 h) | Empêche la formation de capillaire de dessiccation à court terme |

■ Perméabilité et diffusivité

Pour certains ouvrages, il est nécessaire d'avoir des exigences de perméabilité, à l'eau, à l'air ou à certains gaz, et de résistance à la diffusion d'ions. Même si les mécanismes et les lois qui les régissent sont différents, les moyens d'action limitant ces effets sont les mêmes : limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire.

Pour formuler ces bétons, une étude spécifique est à prévoir. Toutefois, il faut distinguer la perméabilité d'une paroi (conditionnée par celle du matériau) et la perméabilité des fissures et des joints de reprise de bétonnage.

Pour les reprises de bétonnage, un traitement particulier est souvent nécessaire (joint hydro-gonflant ou dispositif de rupture capillaire).

Pour limiter la perméabilité du matériau lui-même, on peut agir sur plusieurs paramètres de formulation (tableau 7).

1.3.7 Esthétisme

(Se reporter également à [8] [C 2 232]).

Alors que la grande majorité des bétons anciens sont cachés ou recouverts, actuellement les bétons bruts de décoffrage sont de plus en plus recherchés par les architectes. L'objectif est soit de

faire apparaître l'empreinte du coffrage sur la surface moulée, soit de travailler la formulation du matériau afin qu'il révèle une couleur, une texture voire les deux à la fois. La qualification des parements, couleur et bullage, est définie par le document de référence NF P 18-503.

Le tableau 8 donne quelques pistes de formulation.

1.3.8 Caractères liés à l'échauffement de l'ouvrage pendant la prise et le durcissement

Les réactions d'hydratation des liants hydrauliques s'effectuent avec dégagement de chaleur qui active ces réactions. Aussi, lorsque l'ouvrage mis en œuvre est massif, l'élévation de température à cœur et en surface, ou entre deux zones voisines, n'est pas la même. L'écart de température dépend de la cinétique d'hydratation, des volumes et des échanges thermiques avec l'extérieur au cours du temps.

La formulation devra donc prendre en compte cette donnée afin de minimiser ces risques. À défaut, d'autres techniques pourront compléter cette approche en agissant sur les paramètres ne dépendant pas de la formulation, comme les échanges avec le milieu extérieur par exemple.

Tableau 8 – Paramètres de formulation permettant d'obtenir une qualité de parement

| Type de parement | Aspect recherché | Incidence sur la formulation |
|----------------------------------|--|--|
| Lisse uniforme | Uniforme et sans bullage | Béton à faible viscosité (tester les produits démoulants), injection par le bas |
| Béton texturé | Moulage d'une empreinte, d'un motif décoratif | Majorer la proportion de fines, compléter par des ultra-fines pour une texture très fine, faible <i>E/C</i> avec fluidifiant |
| Béton teinté | Couleur uniforme | Utiliser un ciment blanc avec des sables très fins teintés naturellement ou des pigments artificiels |
| Béton désactivé | Faire apparaître un granulats particulier en surface | Utiliser une granulométrie discontinue. Supprimer les tailles immédiatement en dessous de la taille du grain que l'on veut révéler |
| Béton poli | Recherche d'un contraste de couleur avec effet poli | Béton très compact, de haute performance, faible <i>E/C</i> avec des granulats prenant le poli |
| Béton anti-tag | Conservation de l'état initial | Utiliser des bétons très peu poreux. Traitement de surface « anti-graffitis » |
| Béton bouchardé, sablé, acidé... | Faire apparaître une texture plus ou moins rugueuse | Traitement de parement <i>a posteriori</i> révélant les granulats en modifiant leur aspect |

Tableau 9 – Effets de l'échauffement lié à l'hydratation sur la formulation des bétons

| Paramètre | Contraintes | Effet sur la formulation et la conservation |
|--------------------------|--|---|
| Ouvrage massif | Mise en œuvre en continu | Minimiser la quantité de ciment. Choisir un ciment à faible cinétique d'hydratation. Évacuer la chaleur (cas extrême) |
| Conditions extérieures | Temps froid | Choisir un ciment à forte chaleur d'hydratation et cinétique rapide |
| | Temps chaud (très chaud) | Choisir un ciment à faible cinétique d'hydratation. Bétonner « à la glace ». Évacuer la chaleur (cas extrême) |
| Conditions de production | Cycle rapide sans étuvage | Choisir un ciment à forte chaleur d'hydratation et cinétique élevée. Autoétuvage |
| | Étuvage extérieur Chauffage interne | Risque de production d'ettringite instable. Limiter la température à cœur à 65 °C maximum |

Tableau 10 – Effet du transport et de la mise en œuvre sur la formulation

| Mode de transport | Appellation | Effet sur la formulation |
|--------------------------------|---|---|
| Suspension dans l'air | Béton projeté par voie sèche | Corriger des pertes de mise en œuvre, conserver des gros granulats pour la compactage |
| | Béton projeté par voie humide | |
| Pompage | Béton pompé | Seuil de viscosité et viscosité apparente faibles. Fuseau granulaire continu |
| Tapis roulant | (Sans) | Béton peu ségrégable, réhomogénéisation obligatoire après transport |
| Camion plateau | | |
| Mode de serrage | Appellation | Effet sur la formulation |
| Compactage | Béton compacté au rouleau, béton damé, pressé | Béton très ferme de granularité et de teneur en fines adaptées à la technique |
| Accélération | Centrifugé | |
| Vibration | Béton vibré ou pervibré | Béton ferme à plastique de compacité de squelette maximale |
| | Béton extrudé, à démoulage immédiat | Béton ferme, cohésion forte |
| Gravité (sans ségrégation) | Autoplaçant, autonivelant | Béton fluidifié, riche en éléments fins avec ou sans agent viscosant |
| Gravité | Coulé sous l'eau | Béton fluide avec antidélavant (agent de cohésion) |
| Gravité (sédimentation rapide) | Béton de remplissage | Forte perméabilité du squelette |

Par ailleurs, le différentiel de maturation, lié aux différences de température, entraîne une variabilité spatiale des propriétés du matériau.

Inversement, il peut être intéressant de profiter de la chaleur d'hydratation pour activer les réactions chimiques et ainsi obtenir les propriétés souhaitées à plus court terme. C'est le cas des bétons par temps froid où l'on recherche, par la formulation, à élever la température du milieu (tableau 9).

1.4 Caractères liés aux moyens de mise en œuvre du béton

(Se reporter également à [C 2 230]).

La formulation d'un béton ne peut se concevoir sans connaître les conditions de mise en œuvre. Les modes de transport et l'énergie de serrage ou de compactage sont extrêmement variables. Suivant les cas, les bétons seront compactés, vibrés, pompés, coulés, projetés ou simplement mis en œuvre par gravité.

L'incidence des conditions de mise en œuvre et des modes de transport sur la formulation du béton est donnée dans le tableau 10.

La norme [EN 206-1] définit des classes de consistance pour les bétons plastiques et fluides adaptées aux moyens de mesure : classe d'affaissement (S), classes Vébé (V), classes de serrage (C) et classes d'étalement (F).

D'autres classes pourront être définies à l'avenir pour des bétons très spécifiques : bétons très fermes ou bétons autoplaçants.

2. Les composants

Aux trois composants de base que sont : le ciment, l'eau et les granulats, viennent s'ajouter très souvent des produits d'origine minérale ou organique permettant de modifier les propriétés du béton frais, en cours de durcissement ou durci. Ces produits définis dans la norme [EN 206-1] sont désignés par les termes suivants.

- **Additions** : matériau finement divisé améliorant certaines propriétés ou conférant des propriétés particulières au béton.
- **Adjuvants** : produit ajouté au béton durant le processus de mélange, en petites quantités par rapport à la masse de ciment, pour modifier les propriétés du béton frais et durci.
- **Air** : **occlus** (vides d'air dans le béton non intentionnellement créés) ou **entraîné** (bulles d'air microscopiques : 10 µm à 300 µm, intentionnellement incorporées au béton lors du malaxage).
- **Ajouts** : tous les produits qui ne sont ni ciment, ni eau de gâchage, ni granulats, ni additions, ni adjuvants (exemples : fibres métalliques ou non, agents de viscosité ou de tixotropie autres qu'un adjuvant).

2.1 Quel ciment utiliser dans la formulation ?

Il existe un grand nombre de ciments. Le CEN/TC 51 a jugé opportun de séparer les « ciments courants » des « ciments spéciaux » :

Les ciments dits **courants**, désignés **CEM** (NF EN 197-1 : 2001) : ciment à base de clinker Portland, ciment de laitier et ciment de haut-fourneau, sont élaborés par les cimentiers et peuvent renfermer plusieurs constituants.

Les **liants équivalents**, réalisés en centrale à béton, sont constitués d'un assemblage de ciment de clinker pur et de poudres aux propriétés diverses (NF EN 206-1 : 2002).

Les ciments dits **spéciaux** sont dotés de propriétés singulières : ciments alumineux, ciment prompt...

2.1.1 Ciments courants

La norme [EN 197-1 : 2001] définit 27 principaux types de ciment. Ces ciments ne sont pas tous disponibles en un lieu donné. Aussi, à quelques rares exceptions près, le choix du ciment devra-t-il faire appel aux ressources locales.

Plusieurs solutions sont souvent possibles ; dans ce cas, le choix ne sera pas uniquement dû aux propriétés intrinsèques du ciment mais aussi à d'autres critères (prix, quantité de fines dans la formulation).

Les caractères S (laitier granulé de haut fourneau), P (pouzzolane naturelle), Q (pouzzolane calcinée), V (cendre volante siliceuse), W (cendre volante calcique), T (schiste calciné), L et LL (calcaire broyé) et M (mélange de constituants) agissent sur les propriétés singulières du béton (tableau 11).

Les caractères propres des ciments les plus employés sont répertoriés dans le tableau 12.

2.1.2 Liant équivalent

Ce liant⁽¹⁾, recomposé directement en centrale par les producteurs de béton, est l'assemblage d'un ciment de clinker pur CEM I⁽²⁾ et d'une addition, poudre plus ou moins active⁽³⁾.

(1) Annexe nationale française NA (F) à la norme NF EN 206-1.

(2) Ciment CEM I, classe 32,5 ou supérieure.

(3) Deux types d'addition : quasiment inerte (type I) ; pouzzolanique ou hydraulique (type II).

Il est défini en terme d'équivalence vis-à-vis des résistances mécaniques.

Si A est la quantité d'addition exprimée en kg/m³ et k le coefficient d'équivalence alors, le produit kA sera équivalent à une quantité C' de ciment CEM I.

Le liant équivalent L s'exprime alors par :

$$L = C + kA \text{ ou } L = C + C' \quad (1)$$

Pour la valeur de k se reporter à la norme EN 206-1 et aux annexes nationales. Cette valeur est non seulement fonction de l'addition mais peut être aussi fonction des conditions d'exposition des ouvrages et de la nature du ciment utilisé. Par ailleurs, elle ne porte que sur une quantité limitée d'addition.

Exemple 1 : soit un béton comportant 280 kg de ciment CEM I et 50 kg d'addition calcaire (d'indice d'activité $\geq 0,71$) par mètre cube de béton. Le coefficient d'équivalence est égal à 0,25.

Le liant équivalent $L = 280 + 0,25 \times 50 = 292,5 \text{ kg/m}^3$ de ciment CEM I.

Exemple 2 : soit un béton de classe d'exposition XA, dosé à 310 kg de ciment CEM I et 25 kg de fumée de silice par mètre cube de béton. Le rapport $E_{\text{eff}}/C = 0,45$. Dans ce cas le coefficient d'équivalence est égal à 2.

Le liant équivalent $L = 310 + 2 \times 25 = 360 \text{ kg/m}^3$ de ciment CEM I.

Tableau 11 – Effets principaux des constituants ajoutés au clinker

| Constituant ajouté | | Effets principaux du constituant ajouté au clinker |
|--------------------|----------------------------------|--|
| S | Laitier granulé de haut fourneau | Diminue la réactivité à court terme. Diminue les retraits Montée en résistance moins rapide Adapté aux ouvrages en contact avec le sol |
| P | Pouzzolane naturelle | Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite |
| Q | Pouzzolane calcinée | Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite |
| V | Cendre volante siliceuse | Apporte une résistance complémentaire à long terme Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton |
| W | Cendre volante calcique | Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton |
| T | Schiste calciné | Diminue la réactivité à court terme et ses effets Complète l'hydratation en consommant la portlandite |
| L et LL | Calcaire broyé | Accélère la cinétique d'hydratation à très court terme (2 à 7 jours). Complète le squelette granulaire |
| M | Mélange de constituants | Associe les effets des différents constituants Diminue le prix du ciment. Couleur et propriétés variables |

Tableau 12 – Applications préférentielles des principaux ciments et précautions particulières à certains emplois

| Principaux types | Classe (1) | Observations | Applications préférentielles | Emploi nécessitant des précautions particulières |
|------------------|----------------|---|--|--|
| CEM I | 52,5 et 52,5 R | Forte chaleur d'hydratation Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m Généralement mouture fine | Béton armé, coulé en place ou préfabriqué, décoffrage très rapide Recommandé pour la précontrainte par prétension si CP (norme P 15 318) Décoffrage rapide ou par temps froid (classe R) Ouvrages nécessitant des résistances finales élevées Béton étuvé ou autoétuvé Béton de hautes performances | Béton en grande masse Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Bétonnage par temps chaud Travaux nécessitant généralement une cure soignée surtout en cas de vent de soleil ou d'utilisation en faible épaisseur |
| | 42,5 et 42,5 R | Chaleur d'hydratation élevée Temps de prise réduit mais > 1 h. Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m | Béton armé, coulé en place ou préfabriqué Béton précontraint si CP (norme P 15 318) Décoffrage rapide (classe R) Béton étuvé ou autoétuvé | Béton en grande masse Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Travaux nécessitant généralement une cure soignée surtout en cas de vent de soleil ou d'utilisation en faible épaisseur |
| CEM II/A- X (2) | 52,5 et 52,5 R | Chaleur d'hydratation élevée Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m | Béton armé, coulé en place ou préfabriqué, décoffrage très rapide Béton précontraint si CP (norme P 15 318) Ouvrages nécessitant des résistances finales élevées Béton de hautes performances | Béton en grande masse Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Bétonnage par temps chaud Travaux nécessitant généralement une cure soignée surtout en cas de vent de soleil ou d'utilisation en faible épaisseur |

(1) Dans la mesure où cette classe est produite. Il est rappelé qu'il s'agit ici de la classe au sens de la norme. La classe vraie du liant ne peut être connue que si on la mesure.

(2) X désigne les caractères S, P, Q, V, W, T, L, LL, et M (voir tableau 11).

Tableau 12 – Applications préférentielles des principaux ciments et précautions particulières à certains emplois (suite)

| Principaux types | Classe (1) | Observations | Applications préférentielles | Emploi nécessitant des précautions particulières |
|--|---------------------|--|--|---|
| CEM II/A-D | 52,5 et 52,5 R | Formulations très spécifiques 5 à 10 % de fumées de silice (finesse Blaine : 5 000 à 6 000 cm ² /g). Utilisation avec fluidifiant E/C < 0,4. Bétons visqueux | Bétons à hautes performances, ouvrages exceptionnels vis-à-vis des sollicitations mécaniques et de la durabilité Béton précontraint si CP (norme P 15 318) Bétons fluides et pompables | Bétonnage par temps chaud Travaux en grande masse Bétons visqueux imposant une mise en œuvre adaptée Tous travaux, la cure est impérative et immédiate |
| CEM II/A-X (2) ou CEM II/B-X (2) | 42,5 et 42,5 R | Moins réactif qu'un CPA CEM I Temps de prise réduit mais > 1 h Attention aux retraits toujours importants < 1 000 µm/m | Béton armé, coulé en place Très employés en préfabrication Béton précontraint si CP (norme P 15 318) Décoffrage rapide (classe R) Béton étuvé ou autoétuvé | Travaux en grandes masses Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Bétonnage si T < 5 °C |
| | 32,5 et 32,5 R | Le plus couramment utilisé Temps de prise réduit mais > 1 h 30 min Retrait réduit < 800 µm/m | Béton armé ou non, ouvrages courants Fondations et travaux souterrains en milieu non agressif Dallages et sols industriels Maçonneries Stabilisation des sols | Milieux agressifs, gypseux, sulfatiques, eaux industrielles (sauf si le ciment est de classe ES, conforme à la norme P 15 319) Travaux à la mer (sauf si le ciment est PM, conforme à la norme P 15 317) Bétonnage si T < 5 °C |
| CEM III/A | 32,5 ; 42,5 et 52,5 | Faible chaleur d'hydratation Temps de prise > à 1 h 30 min pour la classe 32,5, 1 h pour les classes 42,5 et 52,5 Des sels solubles peuvent être incorporés | Travaux souterrains en milieux agressifs (milieux A2, A3, A4, P 18 011) Terrains gypseux, eaux : pures, acides, industrielles. Ouvrages en milieu sulfaté Ouvrages à la mer si conforme à la norme P 15 317 Béton de masse, bétons armés ou non Stabilisation des sols | En milieu très agressif A4 nécessite des protections supplémentaires Ouvrages de faible épaisseur exposés aux eaux pures Travaux en élévation nécessitant une cure |
| CEM III/B | 32,5 ; 42,5 et 52,5 | Très faible chaleur d'hydratation Temps de prise > à 1 h 30 min pour la classe 32,5, 1 h pour les classes 42,5 et 52,5 Des sels solubles peuvent être incorporés On peut par temps froid utiliser un accélérateur de prise agréé | Travaux souterrains en milieux agressifs (milieux A2, A3, A4, P 18 011) Terrains gypseux, eaux : pures, acides, industrielles. Ouvrages en milieu sulfaté Ouvrages à la mer si conforme à la norme P 15 317 Béton de masse, bétons armés ou non Stabilisation des sols | En milieu très agressif A4 nécessite des protections supplémentaires Ouvrages de faible épaisseur exposés aux eaux pures Travaux en élévation nécessitant une cure |
| CEM III/C | 32,5 | Très faible chaleur d'hydratation Temps de prise > à 1 h 30 min Des sels solubles peuvent être incorporés On peut par temps froid utiliser un accélérateur de prise agréé | Travaux souterrains en milieux agressifs (milieux A2, A3, A4, P 18 011) Terrains gypseux, eaux : pures, acides, industrielles, eaux d'égouts Ouvrages en milieu sulfaté et ouvrages à la mer Béton de masse, bétons armés ou non, ouvrages hydrauliques Stabilisation des sols | Ouvrages de faible épaisseur exposés aux eaux pures Travaux en élévation nécessitant une cure impérative Bétonnage par temps chaud et sec Protection de surface pour les réservoirs alimentaires |
| CEM IV/A CEM IV/B | | Ne se trouve pas en France | Applications voisines de celles du CEM IIB | |
| CEM V/A | 32,5 | Très faible chaleur d'hydratation On peut par temps froid utiliser un accélérateur de prise agréé La présence de cendres améliore l'ouvrabilité, la durabilité ainsi que la résistance à long terme | Travaux souterrains en milieux agressifs (milieux A2, A3, A4, P 18 011) Terrains gypseux, eaux : pures, acides, industrielles, eaux d'égouts Ouvrages en milieu sulfaté et ouvrages à la mer Béton de masse, bétons armés ou non, ouvrages hydrauliques Stabilisation des sols | En milieu très agressif A4 nécessite des protections supplémentaires Ouvrages de faible épaisseur exposés aux eaux pures Travaux en élévation nécessitant une cure impérative Bétonnage par temps chaud et sec |
| CEM V/B | | Très faible réactivité Montée en résistance très lente Très faible chaleur d'hydratation | Travaux en très grandes masses Travaux ne nécessitant que des résistances mécaniques faibles | Travaux en élévation nécessitant une cure impérative Bétonnage par temps chaud et sec |

(1) Dans la mesure où cette classe est produite. Il est rappelé qu'il s'agit ici de la classe au sens de la norme. La classe vraie du liant ne peut être connue que si on la mesure.

(2) X désigne les caractères S, P, Q, V, W, T, L, LL, et M (voir tableau 11).

2.1.3 Les autres ciments

Les ciments autres que ceux définis aux tableaux 11 et 12 sont des ciments pour lesquels il n'existe pas encore de norme ou d'agrément européen mais qui peuvent posséder la marque NF. Il s'agit des ciments à maçonner et des ciments à propriétés singulières, tels que le ciment alumineux et le ciment prompt naturel.

Pour l'emploi de ces ciments, se reporter aux recommandations d'emploi afin d'exploiter au mieux les propriétés tout en évitant des désordres fâcheux (tableau 13).

2.2 Quels granulats utiliser dans la formulation ?

Tout comme pour les ciments, il n'existe pas une grande variété de granulats disponibles en un lieu donné. Aussi, à quelques rares exceptions près, la formulation du béton devra tenir compte des ressources locales et des prix. C'est pourquoi les propriétés intrinsèques des granulats ne sont pas toujours valorisées dans les bétons.

Les applications qui nécessitent des propriétés singulières des granulats ne sont pas très nombreuses. Pour les bétons, dits courants, la norme exige des caractéristiques minimales qu'il est bon de contrôler (tableau 14).

2.3 Qu'appelle-t-on eau efficace ?

L'eau est sans doute le sujet le plus discuté de la formulation des bétons. En effet, si elle est nécessaire à l'ouvrabilité et à l'hydratation du liant, elle est aussi le pire ennemi du béton car c'est elle qui confère la porosité à long terme du matériau donc pour une très grande part sa durabilité.

Exemple : afin d'imager ce propos, dans un mètre cube de béton contenant 350 kg de ciment et 400 litres d'eau, seulement 20 % de cette eau formera avec le ciment des hydrates. Les 80 % restants formeront la porosité du béton durci. Celui-ci aura donc une porosité minimale de 16 %.

Tableau 13 – Propriétés et précautions d'emploi des autres ciments

| Désignation du type | Propriétés | Précautions particulières |
|-----------------------|--|---|
| Ciment à maçonner | Propriétés variables | À réserver pour des travaux à faibles caractéristiques |
| Ciment alumineux | Tenue à la chaleur (four) Fortement exothermique à très court terme (< 12 h) Montée en résistance rapide | Conversion chimique avec risque de chute des résistances mécaniques. Respecter le dosage recommandé et C/E. |
| Ciment prompt naturel | Prise rapide : quelques minutes. Expansif. Imperméable. Résistant aux eaux acides et sulfatées. | Gâchage en petite quantité. Régler la prise (adjuvantation ou ajout de CPA) |

Tableau 14 – Caractère des granulats en fonction de l'application

| Application | Caractères principaux recherchés (1) (2) | | |
|---|---|--|-------------------------------------|
| | Gravillon | Sable | Fillers |
| Béton pour chaussée : couche de fondation de base et de liaison, couche de roulement (liant hydrocarboné) | Dureté (LA), résistance à l'attrition (MDE) Granularité, angularité, sensibilité au gel, sulfates solubles | Propreté PS ou VB | Propreté VBF, IVR ΔTBA Blaine |
| Béton pour chaussée : couche de roulement | Dureté (LA), résistance à l'attrition (MDE), résistance au polissage Absorption d'eau Absorption d'eau (Ab), teneur en sulfates, teneur en chlorures, sensibilité au gel, granularité | Module de finesse (MF), propreté PS ou VB | Propreté VBF |
| Bétons hydrauliques pour ouvrages courants, autre que pour chaussées (3) | Dureté (LA), sensibilité au gel, propreté, aplatissement Granularité, absorption d'eau (Ab), réaction alcali-silice, sulfates et sulfates solubles dans l'eau, chlorures | Module de finesse (MF), propreté PS ou VB | Granularité, propreté VBF |
| Bétons hydrauliques de hautes performances | Idem granulats pour bétons hydrauliques Catégorie A pour toutes caractéristiques suivant les propriétés recherchées (3) | | |
| Bétons lourds, légers | Densités adaptées | | |
| Bétons teintés lisses | Sans incidence | Couleur de fond donnée par les fines ou par des pigments | |
| Bétons désactivés | Couleur, granularité | | |

(1) Se référer aux normes en vigueur.
 (2) ΔTBA température de ramollissement des produits bitumineux (méthode bille et anneau), IVR indice des vides de Rigden ; LA essai Los Angeles ; VB valeur de bleu ; MDE essai micro-Deval sous eau ; VBF valeur de bleu du filler.
 (3) Quatre catégories (A, B, C ou D) désignant les caractéristiques dans l'ordre décroissant.

Pour éviter les confusions entre eau totale, eau de gâchage etc., la notion d'eau efficace a été retenue.

La désignation « **eau efficace** » (E_{eff}) s'applique à la partie de l'eau totale, dans un m^3 de béton, disponible pour l'hydratation du ciment. C'est aussi l'**eau totale diminuée de celle absorbée par les granulats**. En effet, l'eau qui est absorbée par les granulats ne participe ni à l'ouvrabilité ni à l'hydratation.

$$E_{\text{eff}} = E_a + G(w_g - Ab_g) + S(w_s - Ab_s) + A'(w_A - Ab_A) + aw_a \quad (2)$$

avec E_a (kg/m^3) quantité de l'eau d'apport (gâchage),
 G (kg/m^3) quantité de chaque gravillon ($G_1, G_2 \dots$ s'il y en a plusieurs),
 S (kg/m^3) quantité de chaque sable ($S_1, S_2 \dots$ s'il y en a plusieurs),
 a (kg/m^3) quantité de chaque adjuvant ($a_1, a_2 \dots$ s'il y en a plusieurs),
 A' (kg/m^3) quantité de chaque addition ($A'_1, A'_2 \dots$ s'il y en a plusieurs),
 w_g, w_s , etc. teneur en eau **totale** de chaque constituant (granulats, sables, etc.),
 Ab_g, Ab_s teneur en eau **absorbée** par les constituants (granulats, etc.) selon la norme NF EN 1097-6.

Remarque : G, S et A' sont des masses sèches par définition, les teneurs étant toujours exprimées en % des masses sèches.

Plus simplement, on peut écrire que l'eau efficace est égale à toute l'eau contenue dans 1 m^3 de béton moins l'eau absorbée par les composants (granulats, fillers, etc.).

$$E_{\text{totale}} = E_{\text{ab}} + E_{\text{eff}} \quad (3)$$

Remarque : les propriétés de l'eau sont définies par la norme XP P 18-303 (août 1999) ; les eaux de lavage sont acceptées sous réserve qu'elles respectent les prescriptions de la norme.

2.4 Quel adjuvant utiliser dans une formulation ?

Les adjuvants sont des produits incorporés au béton pour modifier les propriétés du matériau frais ou durci. Le dosage est généralement exprimé en pourcentage pondéral du poids de ciment.

Chaque adjuvant possède une propriété principale et souvent des effets secondaires qui peuvent être souhaités ou non. Le choix du type d'adjuvant s'effectue en fonction de l'effet principal recherché (tableau 15).

La tendance actuelle consiste à ajouter, quasi systématiquement, un ou plusieurs adjuvants à la formulation du béton. Toutefois, il est judicieux de s'assurer de leur compatibilité au sein du matériau et de vérifier que leurs effets ne se contrecarrent pas.

Exemple : l'ajout d'un fluidifiant dans un béton contenant un entraîneur d'air peut faire diminuer de plusieurs points le pourcentage d'air entraîné dans le transport. Le béton peut se retrouver en dehors des caractéristiques recherchées.

Si les adjuvants s'avèrent souvent nécessaires, ils ne doivent pas être utilisés pour corriger des formulations. L'ajout d'un adjuvant peut dans certaines circonstances déstabiliser une formulation.

Exemple : un béton ferme bien formulé pour être mis en œuvre à l'aiguille vibrante peut devenir ségrégable en présence d'un fluidifiant. Dans ce cas, il faut revoir la teneur en fines et éventuellement le fuseau granulaire dans son entier.

Tableau 15 – Choix de l'adjuvant en fonction de l'effet recherché

| Adjuvant (1) | Effet recherché | Effet secondaire possible |
|---------------------------------------|---|---|
| Plastifiant/réducteur d'eau | À consistance égale : augmentation de la résistance et réduction d'eau modérées | Entraîneur d'air, retardateur |
| Superplastifiant/haut réducteur d'eau | À consistance égale : augmentation forte de la résistance et réduction d'eau importante | Entraîneur d'air, retardateur |
| | À rapport (E_{eff}/C) égal : augmentation forte de l'affaissement et de l'étalement | Entraîneur d'air Diminution faible de la résistance |
| Retardateur de prise | À consistance égale : augmente le temps de prise | Augmentation de la résistance à 28 jours |
| Accélérateur de prise | À consistance égale : diminue le temps de prise | Diminution faible de la résistance à 28 jours |
| Accélérateur de durcissement | À consistance égale : augmente la résistance du béton jeune | Entraîneur d'air Diminution faible de la résistance à 28 jours |
| Hydrofuge de masse | Absorption capillaire diminuée | Diminution faible de la résistance à 28 jours |
| Entraîneur d'air | À consistance égale : teneur en air de 4 à 6 % en volume, facteur d'espacement $\leq 200 \mu\text{m}$ | Diminution sensible de la résistance |
| Rétenteur d'eau | À consistance égale : diminution du ressuage | Diminution de la résistance |
| Multifonction | Association de plusieurs fonctions | |

(1) NF EN 934-2 : 2002.

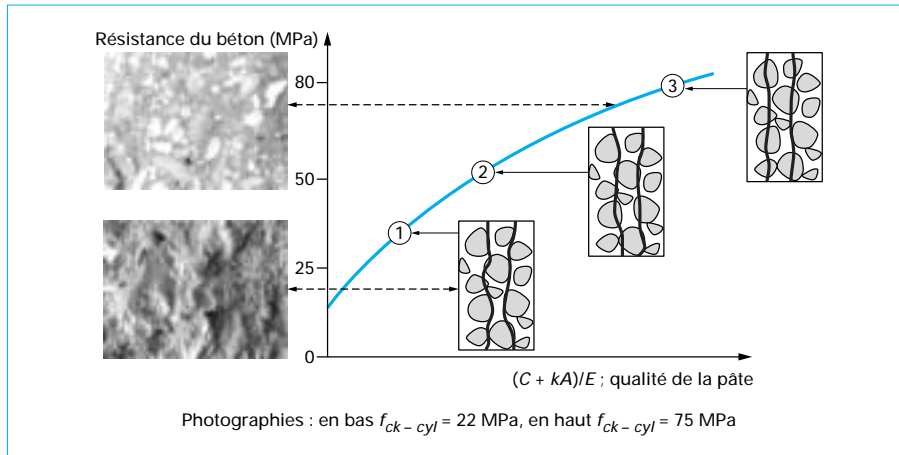


Figure 1 – Faciès de rupture en fonction de la qualité de la pâte

3. Formulation

La diversité des bétons actuels, aux propriétés extrêmement variables, ne permet pas d'imaginer un principe de formulation commun. Généralement, la formulation sera orientée vers les propriétés principales demandées au matériau et adaptée en fonction des propriétés secondaires recherchées. Il faut donc raisonner par catégorie de béton même si certains principes communs peuvent être retenus.

- Le **ciment** : liant indispensable qui induit de nombreux effets secondaires, recherchés ou non, lors de l'hydratation. C'est le composant le plus onéreux du béton. En conséquence on cherchera souvent à en limiter la quantité.
- L'**eau** : elle entre dans la réaction chimique avec le liant pour former les hydrates, mais est toujours largement excédentaire par rapport aux besoins du ciment. Ces excédents introduisent une porosité résiduelle dans le matériau qui dégrade l'ensemble des propriétés (durabilité, résistance...).
- Le **squelette** : cette phase, généralement amorphe, occupe la majorité du volume. Elle participe aux propriétés générales du matériau frais et durci. Son coût réduit permet d'obtenir des bétons à des prix faibles.

3.1 Les trois principes de formulation des bétons

La formulation de la majorité des bétons est généralement établie pour atteindre **trois objectifs principaux** :

- **Obtenir une résistance mécanique** : propriété répondant aux fonctions principales du matériau dans l'ouvrage. La qualité de la pâte (rapport C/E) conditionne la résistance (voir note (1) § 3.2.1, ainsi que les § 3.2.2 et 3.2.3). En effet, c'est elle qui apporte la cohésion à l'ensemble. On distingue trois domaines correspondant à des mécanismes de rupture différents en fonction des performances de la pâte (figure 1) :
 - **domaine 1** : rupture de la pâte et décohesion aux interfaces pâte granulates dans l'auréole de transition (les granulates sont peu mobilisés) ;
 - **domaine 2** : ruptures mixtes dans la pâte, décohesion et rupture de granulates ;
 - **domaine 3** : ruptures dans la pâte et transgranulaire, aucun contournement, tous les granulates sont mobilisés.

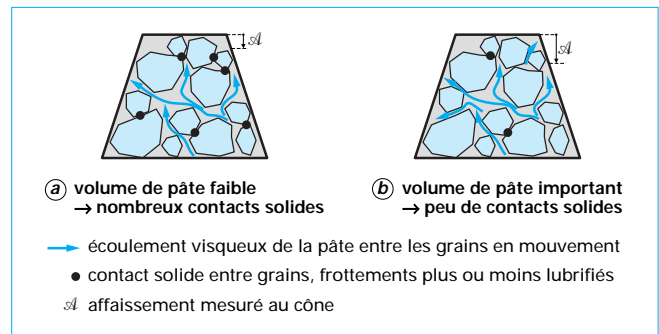


Figure 2 – Ouvrabilité mesurée au cône en fonction de la quantité de pâte

- **Obtenir une rhéologie** permettant une mise en œuvre adaptée aux moyens envisagés. La **quantité de pâte, à qualité donnée, conditionne l'ouvrabilité** (figure 2). La mobilité des granulates (donc l'ouvrabilité du béton) est conditionnée par les frottements entre grains et par les propriétés rhéologiques de la pâte. Ainsi, plus les granulates sont distants plus l'ouvrabilité croît, à qualité de pâte donnée.

- **Limiter les effets secondaires** indésirables à moindre coût. Toutes choses égales par ailleurs, **toutes les propriétés sont améliorées lorsque le squelette granulaire est de compacité maximale** (figure 3). En effet, la porosité du squelette ne peut être remplie que par de la pâte, ou de l'air. La pâte, fraction onéreuse du béton, est source de désordres (retraits endogène, thermique, etc.) ; l'air introduit une porosité qui fait chuter les résistances.

Remarque : ces trois principes sont valables pour la majorité des bétons. Toutefois, la résistance n'est pas uniquement conditionnée par la qualité de la pâte. La déformabilité de la pâte étant généralement plus grande que celle des granulates, le rapport volumique pâte/granulates interviendra au second ordre [9].

3.2 Les méthodes de formulation

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes. La méthode la plus récente abordée ci-après nécessite l'emploi du calcul informatique pour effectuer les optimisations [10].

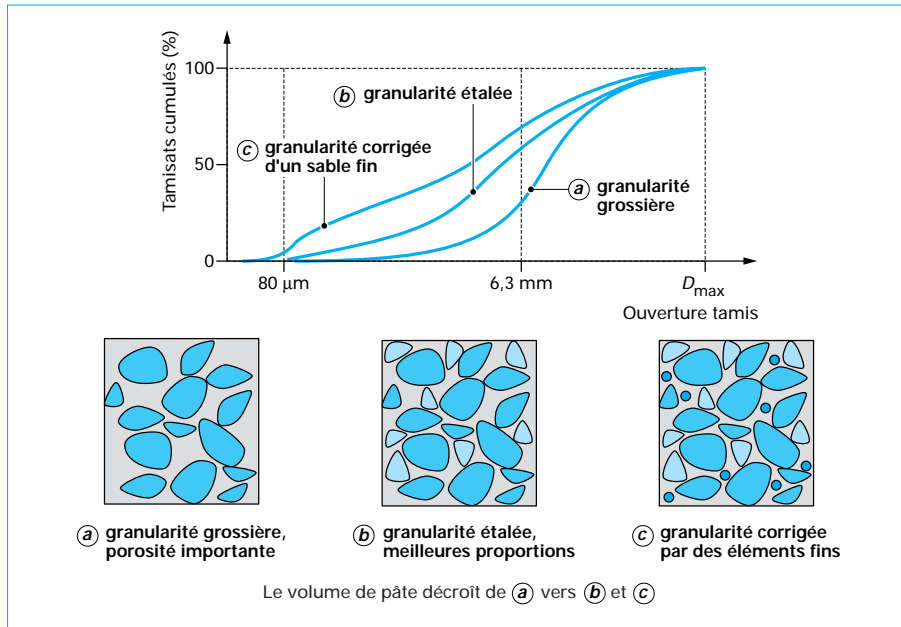


Figure 3 – Compacité d'un squelette granulaire en fonction de la granularité et des corrections effectuées

3.2.1 C'est la qualité de la pâte qui conditionne la résistance

On appelle **pâte** l'ensemble {liant, eau efficace, air occlus ou entraîné}.

■ La pâte de ciment durci est une matière poreuse. Celle-ci dépend directement de la nature du liant (ses performances), de la quantité d'eau mise en œuvre et éventuellement de l'air contenu dans le matériau. La résistance en compression dépend directement de la porosité des hydrates (ou, ce qui est équivalent, de leur compacité). Soit :

- f_{c28} résistance cible en compression à 28 jours,
- f_{cm28} classe vraie du liant mesurée sur mortier normal à 28 jours⁽¹⁾,
- K_g coefficient granulaire qui prend en compte des caractères liés au squelette (nature de granulats, arrangement, forme, propreté...) (valeur moyenne $5 \pm 0,5$),
- V_c volume du liant (de masse C) par mètre cube de béton,
- ρ_c masse volumique du liant (3,1 pour le CEM I),
- V_e volume d'eau efficace (de masse E_{eff}) par mètre cube de béton,
- ρ_e masse volumique de l'eau,
- A masse d'addition éventuelle par mètre cube de béton,
- k coefficient d'équivalence de l'addition vis-à-vis de la résistance⁽²⁾,
- V_a volume d'air (air occlus : 1 % en moyenne, 1 à 2 % avec fluidifiant⁽³⁾, ou air entraîné 4 à 6 % avec emploi d'un adjuvant entraîneur d'air),
- L liant équivalent par mètre cube de béton ($L = C + kA$) (2).

(1) Compte tenu de la définition statistique de la classe normalisée d'un ciment : résistance inférieure à « la classe » dans 5 % des cas et résistance supérieure à « la classe + 20 MPa » dans 10 % des cas, la résistance moyenne statistique est égale à « la classe + 7,5 MPa » EN 197-1 : 2000.

(2) Attention, le liant équivalent est défini par rapport au ciment CEM I de classe 32,5 ou supérieur. Le liant équivalent est donc constitué obligatoirement d'un ciment CEM I et d'une addition minérale.

(3) On peut estimer la quantité d'air occlus (V_a en litres/m³ de béton frais) à partir des expressions suivantes :

$$V_a = (1 + 0,9pl + 0,07sp - 0,002A) (0,004S - 0,001G)$$

avec A affaissement en cm et pl ou sp en kg d'extrait sec de plastifiant ou de superplastifiant par m³, G et S masses de gravillon et de sable en kg pour 1 m³ de béton [9].

■ La résistance en compression exprimée par Féret [11] s'écrit :

$$f_{c28} = f_{cm28} K_g \left(\frac{V_c}{V_c + V_e + V_a} \right)^2 \quad (\text{exprimée en volume}) \quad (4)$$

$$f_{c28} = f_{cm28} K_g \frac{1}{\left[1 + \frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E_{eff} + \rho_e V_a}{L \text{ ou } (C + kA)} \right) \right]^2} \quad (\text{exprimée en masse}) \quad (5)$$

■ Pour les bétons de hautes performances aux fumées de silice, l'expression identifiée prend la forme suivante, avec $K_g = 4,91$:

$$f_{c28} = f_{cm28} \cdot 4,91 \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \frac{(E_{eff} + \rho_e V_a)}{C \left(\frac{\rho_c}{\rho_{fs}} + \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_{fs}} \right) \exp \left(- 11 \frac{Fs}{C} \right) \right)} \right) \right]^2} \quad (6)$$

avec ρ_{fs} masse volumique de la fumée de silice,

Fs masse de fumée de silice pour 1 m³ de béton.

Dans le cas particulier où $Fs = 0$ ou bien, si $Fs \neq 0$, avec $E_{eff}/C < 0,4$ et $Fs/C > 0,2$, l'expression peut prendre la forme simplifiée (7) où l'on retrouve le coefficient d'équivalence 2 pour la fumée de silice sous certaines conditions :

$$f_{c28} = f_{cm28} \cdot 4,91 \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\rho_c}{\rho_e} \frac{(E_{eff} + \rho_e V_a)}{C + 2Fs} \right) \right]^2} \quad (7)$$

(BHP avec fumées de silice)

■ Les travaux récents [9] montrent que la résistance n'est pas totalement indépendante des quantités de pâte dans le béton. Ainsi, si l'on appelle :

- V_g le volume de granulats dans un mètre cube de béton,
- V_g^* le volume de granulats dans un mètre cube de granulats secs,
- EMP l'épaisseur maximale de pâte dans le matériau,
- g la compacité granulaire au sein du béton,
- g^* la compacité granulaire des granulats utilisés pour fabriquer le béton définie pour un indice de serrage de 9 (§ 3.2.3),
- D_{max} la dimension des plus gros granulats ($D_{max} = d$ passant à 90 %),

l'auteur exprime l'épaisseur maximale de pâte (EMP) selon l'expression :

$$EMP = D_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \text{ ou encore } EMP = D_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{V_g^*}{V_g}} - 1 \right) \quad (8)$$

L'ordre de grandeur d' EMP , celle-ci croissant avec l'ouvrabilité, est :

- 0,23 à 0,65 mm pour les mortiers ;
- 1,3 à 2,6 mm pour les bétons.

La résistance devient, en prenant en compte l'épaisseur maximale de pâte :

$$f_{c28} = f_{cm28} K'_g \frac{1}{\left[1 + \frac{\rho_e}{\rho_c} \left(\frac{E_{eff} + \rho_e V_a}{L \text{ ou } (C + kA)} \right) \right]^2} \left(D_{max} \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \right)^{-0,13} \quad (9)$$

Généralement cette expression est suffisante pour évaluer la résistance. Toutefois, les caractéristiques des granulats (nature, propriété de surface, résistance intrinsèque) peuvent avoir un effet sur les résistances. Le paramètre K'_g n'est donc pas constant. Pour les résistances élevées (supérieures à 60 MPa), la résistance intrinsèque du granulat a un effet limitant [9].

Dans l'expression (9) la valeur moyenne de $K'_g = 5,25$.

Exemple : à partir d'un granulat de roche microgrenue (porphyre du Morvan), il n'a jamais été possible de dépasser 60 MPa. Après enquête, l'extraction de la roche avant concassage avait été réalisée à l'explosif, les granulats se sont donc trouvés microfissurés. Intrinsèquement la roche massive est performante mais les granulats ne le sont pas.

Pour tenir compte des dispersions introduites dans le système de production, la valeur cible à 28 jours f_{c28} doit être déduite de la valeur caractéristique f_{ck} définie par le cahier des charges (figure 4).

Dans le cas de **bétons à caractères spécifiés** (EN 206-1), la résistance visée f_{c28} doit respecter l'inégalité suivante :

$$f_{ck} - k_2 \leq f_{ci} \leq f_{ck} \leq f_{ck} + k_1 \leq f_{cm} \leq f_{c28} \quad (10)$$

La valeur minimale pour f_{cm} étant $f_{ck} + k_1$, la connaissance de la dispersion de production permet d'écrire les égalités (11) et (12), avec S_m la sécurité sur la moyenne et S_i la sécurité sur la borne inférieure :

$$f_{cm} = (f_{ck} + k_1) + S_m \quad (11)$$

$$f_{ci} = (f_{ck} - k_2) + S_i \quad (12)$$

À la limite $f_{c28} = f_{cm}$ pour des formulations connues, et $f_{c28} > f_{cm}$ pour des formulations non maîtrisées.

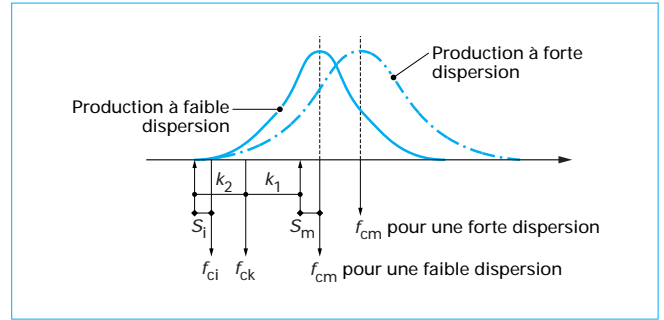


Figure 4 – Effet de la dispersion de la production sur la valeur cible moyenne

3.2.2 C'est la quantité de pâte qui conditionne l'ouvrabilité

■ Le frottement intergranulaire et la viscosité de la pâte vont conditionner la réponse rhéologique des bétons.

Pour les bétons non adjuvés, les frottements entre grains de ciment au sein de la pâte ont un effet prépondérant. Pour une qualité de pâte donnée, la seule façon d'accroître l'affaissement au cône sera de diminuer la composante granulaire en desserrant le squelette, c'est-à-dire en augmentant la quantité de pâte [12].

Pour les bétons adjuvés, l'ajout d'un plastifiant ou d'un fluidifiant va considérablement diminuer la composante de frottement entre grains de ciment donc l'affaissement. Cette grandeur ne sera donc plus très significative et il faut avoir recours à la viscosité du mélange. Les frottements entre granulats deviennent prépondérants et la seule façon de diminuer la viscosité sera de diminuer la composante granulaire en desserrant le squelette.

En **conclusion**, pour une qualité de pâte donnée (c'est-à-dire une résistance donnée) c'est la quantité de pâte par effet de desserrement qui pilote l'affaissement ainsi que la viscosité des bétons.

Cette quantité de pâte est difficile à prévoir sans avoir recours à des essais car de nombreux paramètres interviennent comme la compacité granulaire du mélange, la rugosité et l'angularité des granulats, la teneur en air occlus...

■ Bien qu'il soit le plus utilisé, le test d'affaissement au cône d'Abrams est insuffisant pour caractériser correctement les propriétés rhéologiques des **bétons frais** [13] [14] [C 2 230]. C'est pourquoi on a recours à divers autres tests : Vébé, étalement et, plus récemment, pour les bétons autoplaçants, le test de la boîte en L.

Un modèle de type Herschel-Bulkley [relation (13)] reliant la contrainte de cisaillement τ au gradient de déformation ($\dot{\gamma}$) est adapté au comportement du béton frais [15]. Toutefois, une loi de Bingham [relation (14)] est suffisante pour décrire correctement le comportement des bétons dans un écoulement (figure 5).

$$\tau = \tau_0 + m (\dot{\gamma})^n \quad \text{Herschel-Bulkley} \quad (13)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu (\dot{\gamma}) \quad \text{Bingham} \quad (14)$$

Dans ces relations, les deux paramètres τ_0 et μ caractérisent le matériau. Seul le seuil de cisaillement τ_0 est corrélé à l'affaissement au cône [relation (15) § 3.2.2.1]. En effet, pour ce test, quand l'affaissement s'arrête, les contraintes de cisaillement sont inférieures ou égales à τ_0 en tout point du béton. Dans la relation (13), m et n sont des constantes rhéologiques ($n < 1$ comportement rhéofluidifiant, $n > 1$ rhéopaississant ; m viscosité apparente à vitesse de déformation nulle).

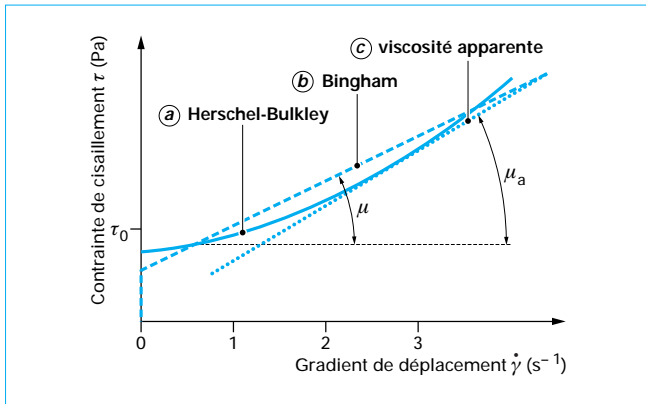


Figure 5 – Comportement et modèles de viscosité des bétons

■ Pour les **bétons fluidifiés**, le seuil de cisaillement très faible n'est plus mesurable avec le cône d'Abrams, ni même significatif. Aussi a-t-on recours au test d'étalement qui mesure le diamètre de la galette de béton après arrêt de l'écoulement.

Plusieurs approches prédictives ont été proposées :

- méthode CES (béton sans fluidifiant) où, pour une qualité de pâte donnée et à partir de l'affaissement souhaité, on détermine la quantité de pâte à l'aide d'abaque,

- méthode Baron-Lesage où, pour une qualité de pâte donnée (C/E fixé) à partir du temps d'écoulement au maniabilimètre à béton, on détermine la concentration en ciment dans le mélange granulaire ciment-sable-gravillon, ce qui revient à déterminer la quantité de pâte,

- méthode de Larrard LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées), qui calcule l'affaissement à partir des arrangements granulaires des composants⁽¹⁾ et dans l'hypothèse d'une loi newtonienne, exprime une viscosité apparente μ_a , calculée pour un gradient de vitesse donné de 3 s^{-1} , généralement suffisante pour formuler le matériau⁽²⁾.

(1) Le modèle complexe ne sera pas développé dans cette présentation. Pour les bétons non adjuvés, se référer au modèle CES.

(2) Actuellement peu d'outils permettent de mesurer simplement la viscosité en fonction de la vitesse de déformation. Le rhéomètre BTRHEOM du LCPC permet de faire ces mesures. L'essai au cône modifié [31], prenant en compte le temps d'affaissement, permet d'estimer la viscosité même pour les bétons fluides [32].

3.2.2.1 Seuil de viscosité : affaissement au cône

La relation trouvée [16] pour des affaissements supérieurs à 100 mm est la suivante :

$$\mathcal{A} = 300 - 0,35 \frac{(\tau_0 - 212)}{\rho} \quad (15)$$

avec \mathcal{A} affaissement au cône d'Abrams en mm,

τ_0 en Pa,

ρ densité.

3.2.2.2 Viscosité apparente (figure 5) : test d'étalement

Dans le cas des bétons adjuvés, cas courant aujourd'hui, le test d'étalement sert de référence. À défaut de pouvoir mesurer simplement et économiquement la viscosité apparente μ_a du béton, cet essai fournit une indication sur la viscosité.

La viscosité apparente du mélange est pilotée par les propriétés de la pâte (concentration en ciment et présence d'adjuvés) et la concentration du squelette (gravier + sable) dans le béton :

$$\mu_a = \frac{\mu_0}{(1 - \omega_c / \alpha_c)^{1,08}} \frac{1}{[1 - V_g / V_g^*]} \quad (16)$$

(V_g / V_g^* peut être remplacé par g/g^*)

avec $\mu_0 = 36,2$ pour les bétons avec superplastifiants et 19,8 pour les non fluidifiés,

V_g volume de granulats dans le béton,

V_g^* volume de granulats pour le test de référence [16] mesuré sous vibration avec une contrainte de 10 kPa ou calculé pour un indice de serrage de 9 (§ 3.2.3.3),

ω_c concentration du ciment dans la pâte :

$$\omega_c = V_c / (V_c + V_e + V_a),$$

α_c compacité du ciment (0,6311 avec adjuvant et 0,5886 sans) calculée pour un indice de serrage de 9.

On retrouve bien ici que pour un arrangement granulaire donné (g/g^*) et pour une qualité de pâte donnée (C/E et μ_0) la viscosité apparente du béton est pilotée par la concentration en ciment ω_c donc également la quantité de pâte.

Les ordres de grandeur d'affaissements et de viscosités apparentes pour des bétons de densité courante (2 à 2,6 après durcissement et séchage) sont donnés dans le tableau 16.

3.2.3 Compacité du squelette granulaire (approche théorique)

Dans une très grande majorité des cas de formulation, l'optimum, aussi bien économique que technique (rhéologique notamment), conduit à rechercher la compacité maximale du squelette granulaire du béton mis en œuvre. En effet, à quantité de pâte donnée, l'optimum de maniabilité correspond à l'optimum de compacité du squelette [17]. Toutefois cette approche n'est plus valable lorsqu'on impose des propriétés singulières au béton notamment rhéologique (béton pompable ou autoplacant...) ou de porosité comme les bétons drainants.

Plusieurs approches sont possibles pour obtenir la compacité maximale du squelette granulaire. Caquot a montré à partir d'une série d'essais que la courbe granulaire optimale était constituée de deux demi-droites sur un graphe exprimé en $5/\sqrt{d_i}$ (d_i diamètre des grains). Sur cette base, Faury puis Dreux ont exprimé cette courbe granulaire optimale en faisant intervenir d'autres paramètres (granulaires mais aussi de densité de paroi et puissance de serrage) pour optimiser les proportions des différentes tailles.

Des travaux récents [9] ont repris ce problème et proposent une approche plus complète qui nécessite bien souvent le recours au numérique.

3.2.3.1 Compacité d'un mélange binaire sans interaction

Étudions le mélange de deux classes granulaires élémentaires de diamètre d_i de compacité C_i . Dans un volume unité, on désigne par ϕ_i le volume partiel de la classe i , et par y_i la proportion volumique relative de chaque classe.

Dans ces conditions :

- la proportion volumique de chaque classe i s'écrit : $y_i = \phi_i / (\phi_1 + \phi_2)$,

- la compacité C_m du mélange des deux classes s'écrit : $C_m = C_1 + C_2$ ou $\phi_1 + \phi_2$.

Tableau 16 – Ordres de grandeur des affaissements et des viscosités apparentes

| Application | Affaissement (mm) | Seuil de cisaillement (Pa) | Viscosité plastique (Pa · s) |
|--|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Bétons secs pour démoulage immédiat. Béton compacté | 0 | $\tau_0 < 2\,500$ | |
| Béton de chaussée vibré pour coffrage glissant | 20 à 50 | $\tau_0 = 2\,130 \text{ à } 1\,930$ | $\mu_a \leq 300$ |
| Béton coulé vibré pour structures (avec superplastifiant dosage intermédiaire) | 80 à 150 | $\tau_0 = 1\,720 \text{ à } 1\,240$ | $\mu_a = 200 \text{ à } 300$ |
| Béton coulé vibré pour structures BA ou BP pompable | 150 à 200 | $\tau_0 = 1\,240 \text{ à } 900$ | $\mu_a \leq 200$ |
| Béton de haute performance coulé en place (avec superplastifiant) | 180 à 250 | $\tau_0 = 1\,035 \text{ à } 212$ | $\mu_a \leq 300$ |
| Béton de haute performance avec ultrafines (FS + superplastifiant) | 180 à 250 | $\tau_0 = 1\,035 \text{ à } 212$ | $\mu_a = 400 \text{ à } 600$ |
| Béton autoplaçant | > 250 (étalement > 600 mm) | $\tau_0 < 300$ | $\mu_a < 200$ |

■ Cas où les gros grains sont dominants

Dans ce cas, l'arrangement des gros grains (ici de classe 1) n'est pas perturbé par la présence des petits (classe 2) qui s'insèrent entre les gros.

La compacité du mélange C_{m1} s'écrit :

$$C_{m1} = \phi_1 + \phi_2 = C_1 + y_2(\phi_1 + \phi_2)$$

soit :

$$C_{m1} = C_1 + y_2 C_{m1}$$

donc :

$$C_{m1} = C_1 / (1 - y_2)$$

■ Cas où les petits grains sont dominants

L'arrangement des petits grains (classe 2) n'est pas perturbé par la présence des gros grains de classe 1.

La compacité du mélange C_{m2} en fonction de la compacité propre C_2 des petits grains et de la proportion de gros grains y_1 s'écrit :

$$C_{m2} = \phi_1 + \phi_2 = \phi_1 + C_2(1 - \phi_1)$$

ou encore :

$$C_{m2} = C_2 + (1 - C_2) \phi_1 = C_2 + (1 - C_2) y_1 C_{m2}$$

donc :

$$C_{m2} = C_2 / [1 - (1 - C_2)y_1]$$

3.2.3.2 Modèle linéaire avec interaction

Les hypothèses du paragraphe précédent ne sont en réalité pas valables. En effet, il existe des interactions entre grains qui modifient l'arrangement granulaire.

■ Cas où les gros grains sont dominants

L'empilement des gros grains est perturbé par la présence des petits par effet de desserrement. En faisant l'hypothèse que cet effet soit une fonction linéaire ($a_{1,2}$) de ϕ_2 sur la compacité des gros grains, ϕ_1 devient :

$$\phi_1 = (C_1 - a_{1,2} \phi_2 C_1 / C_2)$$

La compacité du mélange C_{m1} en fonction des compacités propres C_1 et C_2 des grains et de la proportion de petits grains y_2 s'écrit :

$$C_{m1} = \phi_1 + \phi_2 = C_1 + (1 - a_{1,2} C_1 / C_2) \phi_2$$

or :

$$\phi_2 = y_2 (\phi_1 + \phi_2) = y_2 C_{m1}$$

donc :

$$C_{m1} = C_1 + (1 - a_{1,2} C_1 / C_2) y_2 C_{m1}$$

d'où :

$$C_{m1} = C_1 / [1 - (1 - a_{1,2} C_1 / C_2) y_2]$$

avec $a_{1,2}$ effet de desserrement des gros grains par les petits.

■ Cas où les petits grains sont dominants

L'arrangement des petits grains est perturbé par la présence des gros à leur voisinage. C'est l'effet de paroi. En supposant que cet effet soit une fonction linéaire ($b_{2,1}$) de ϕ_1 sur la compacité des petits grains, ϕ_2 devient :

$$\phi_2 = C_2(1 - \phi_1) - b_{2,1} \phi_1 C_2 / C_1$$

La compacité du mélange C_{m2} en fonction des compacités C_1 et C_2 des grains et de la proportion de gros grains y_1 s'écrit :

$$C_{m2} = \phi_1 + \phi_2 = \phi_1 + C_2(1 - \phi_1) - b_{2,1} \phi_1 C_2 / C_1$$

or :

$$\phi_1 = y_1 (\phi_1 + \phi_2) = y_1 C_{m2}$$

En remplaçant, on trouve :

$$C_{m2} = C_2 / [1 - y_1(1 - C_2 - b_{2,1} C_2 / C_1)]$$

avec $b_{2,1}$ effet de paroi sur les petits grains engendré par les gros.

3.2.3.3 Généralisation du modèle à n classes en interaction

On peut généraliser à n classes les effets de paroi et de desserrement et vérifier [18] qu'il existe toujours une classe dominante qui subit de façon additive les interactions exercées par les autres classes. La compacité maximale obtenue pour n classes de grains s'écrit alors :

$$C_m = \inf(C_{mi}) \text{ pour } 1 \leq i \leq n, \text{ et } y_i \neq 0$$

avec :

$$C_{mi} = \frac{C_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} [1 - C_i + b_{ij} C_i (1 - 1/C_j)] y_j - \sum_{j=i+1}^n [1 - a_{ij} C_i / C_j] y_j} \quad (17)$$

Dans cette expression, seuls les coefficients d'interaction (b_{ij} effet de paroi et a_{ij} effet de desserrement) limités aux interactions binaires ont été pris en compte. Ces coefficients d'interaction, mesurés sur divers grains, ont pour expression :

$$a_{ij} = \sqrt{1 - (1 - d_j / d_i)^{1,02}} \text{ et } b_{ji} = 1 - (1 - d_i / d_j)^{1,5} \quad (18)$$

Remarque : il est souvent prudent de mesurer ces coefficients expérimentalement car la seule prise en compte des diamètres est insuffisante pour refléter toutes les caractéristiques des granulats intervenant dans ces deux effets.

3.2.3.4 Modèle d'empilement compressible (MEC)

Les modèles précédents font abstraction de l'énergie de serrage du milieu. En fait, si on réalise par simple déversement une population de sphères de même diamètre dans un volume, l'arrangement naturel, de compacité voisine de 0,58, est loin de la compacité maximale (l'arrangement maximal cubique à face centrée (CFC) possède une compacité de 0,74).

La vibration améliore l'arrangement par déversement jusqu'à une **compacité virtuelle** notée C_i de 0,64 sans atteindre l'arrangement idéal ($\Gamma_i = 0,74$).

On peut alors définir un **indice de serrage** K , grandeur scalaire continuellement croissante représentative de l'énergie de serrage.

Si ϕ_i^* représente la teneur volumique maximale de la classe i en présence des autres classes, l'indice de serrage K est défini par :

$$K = \sum_i K_i = \sum_i \frac{\phi_i}{\phi_i^* - \phi_i} \quad (19)$$

- Dans le cas d'une seule population de grain : ($i = 1$) on a :

$$\phi_1^* = \Gamma_1 \text{ et } K = \frac{1}{(\Gamma_1/\phi_1) - 1}$$

Si ϕ_1 tend vers Γ_1 , alors K tend vers l'infini.

Pour des sphères où $\Gamma_1 = 0,74$ (CFC), on obtient, pour différents modes de mise en œuvre :

- par versement : $\phi_1 = 0,58$ d'où $K = 3,6$;
- par vibration : $\phi_1 = 0,64$ d'où $K = 6,4$.

• Dans le cas général où $i = n$, en remarquant que la teneur volumique maximale d'une classe est atteinte lorsqu'elle est dominante, on peut exprimer ϕ_i^* en fonction des compacités virtuelles C_i , des teneurs volumiques ϕ_j ($j \neq i$) et des coefficients d'interaction a_{ij} et b_{ij} .

Pour la classe dominante, $\phi_i = \phi_i^*$, on a donc :

$$\phi_i = \phi_i^* = C_i \left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left(1 + \frac{b_{ij}}{C_j} \right) \phi_j - \sum_{j=i+1}^n \frac{a_{ij}}{C_j} \phi_j \right] \quad (20)$$

Comme :

$$\phi_i = y_i C_m \text{ et } y_i = \left[1 - \sum_{j=1}^{i-1} y_j - \sum_{j=i+1}^n y_j \right] \quad (21)$$

K_i et K s'expriment sous la forme suivante :

$$K_i = \frac{y_i/C_i}{\frac{1}{C_m} - \frac{1}{C_{mi}}} \text{ et } K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i/C_i}{\frac{1}{C_m} - \frac{1}{C_{mi}}} \quad (22)$$

Exemple : étudions le mélange de deux granulats roulés (R8 et R1) de Loire, tamisés afin d'obtenir deux classes unimodales de caractéristiques suivantes (données reprises de [9]) :

- granulats R1 de diamètre 1 mm et de compacité $C_1 = 0,609$;
- granulats R8 de diamètre 8 mm et de compacité $C_2 = 0,628$.

La figure 6 permet de comparer la compacité expérimentale et celles obtenues à partir :

- du modèle linéaire pour le mélange R8-R1 (courbe 1) ;
- du modèle avec interaction pour le mélange R8-R1 (courbe 2). Ici les coefficients d'interaction ont été ajustés ; $a_{1,2} = 0,3$ et $b_{2,1} = 0,05$;
- du modèle d'empilement compressible (courbe 3). Pour les granules R1 et R8 mis en place avec vibration, on mesure expérimentalement les compacités C_1 et C_2 qui valent respectivement 0,609 et 0,628. Soit, en développant l'expression (22) à l'ordre 2 et pour un coefficient K égal à 6,4 pour un empilement vibré :

$$K = \sum_i K_i = \frac{y_1/C_1}{\frac{1}{C_m} - \frac{1}{C_{m1}}} + \frac{y_2/C_2}{\frac{1}{C_m} - \frac{1}{C_{m2}}} = 6,4$$

La compacité idéale (maximale, inaccessible pour K infini) est donc :
 $6,4 = 1/(\Gamma_2/\phi_2 - 1)$ avec $\phi_2 = 0,609$, d'où $\Gamma_2 = 0,704$ pour le granulats R1 et
 $6,4 = 1/(\Gamma_1/\phi_1 - 1)$ avec $\phi_1 = 0,628$, d'où $\Gamma_1 = 0,726$ pour le granulats R8.

Plus l'indice de serrage du matériau est faible plus le matériau est apte à se mettre en œuvre facilement. Pour que le matériau se mette correctement en place, il faut que l'indice de serrage K' du mélange soit inférieur à K^* . Les valeurs de K^* sont données dans le tableau 17.

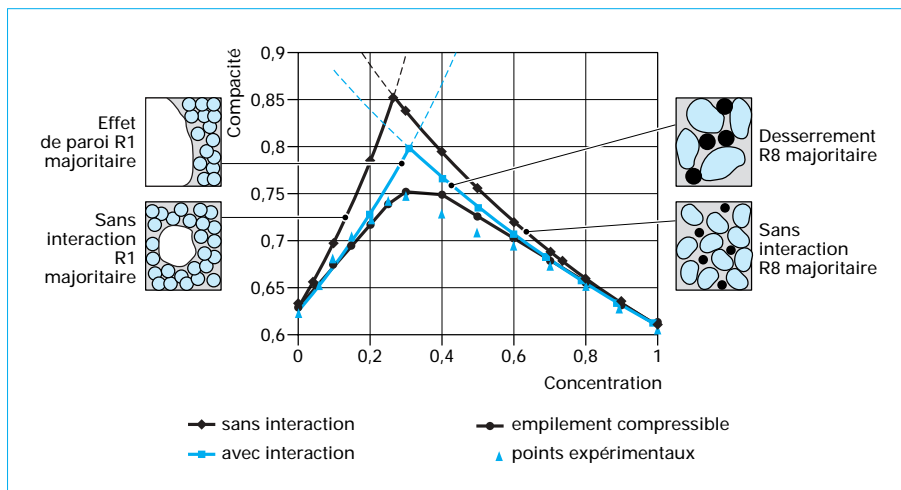


Figure 6 – Compacité en fonction des concentrations en éléments fins (R1) suivant les différents modèles et compacité expérimentale. Valeurs pratiques de l'indice de serrage

Tableau 17 – Valeurs de l'indice de serrage K^* en fonction du procédé de mise en œuvre et du type de béton

| Procédé de mise en œuvre | Type de béton | K^* |
|--------------------------|-----------------------------------|-------|
| Projection | Voie humide sans superplastifiant | 5,5 |
| | Voie sèche avec superplastifiant | 7,5 |
| Coulage et vibration | Sans superplastifiant | 6 |
| | Avec superplastifiant | 8 |
| Coulage sous gravité | Béton autoplaçant | 7 |
| Pressage sous vibration | Béton compacté au rouleau | 9 |

Pour une valeur $K^* = 9$, la compacité du squelette $C_m = g^*$

■ Effet de paroi coffrante

Quand le rapport S_c/V_b (surface mouillée par le béton/volume de béton) est important (fort dosage d'armatures, pièces minces, présence de fibres rigides, rayon de courbure des parois coffrantes faible par rapport à D_{max}), l'arrangement de la fraction granulaire la plus grossière est perturbé par la présence de ces parois.

Dans ce cas, un volume perturbé V_p correspondant est à prendre en compte. Si S_c est la surface mouillée par le béton, alors, en première approche, $V_p = S_c D_{max}/2$.

En admettant que les granulats soient suffisamment mobiles lors de la mise en œuvre, la compacité moyenne prend alors la valeur suivante :

$$\hat{C}_i = (1 - V_p) C_i + k_w C_i$$

Avec $k_w = 0,88$ et $0,73$ respectivement pour les granulats roulés et concassés.

Les équations (20) et (22) sont toujours valables, les compacités C_i sont alors remplacées par la compacité moyenne.

Remarque : des valeurs usuelles de $g^* \cdot g_{max}^*$ sont situées entre 0,80 et 0,89 sans effet de paroi significatif (0,8 pour un mélange optimisé de deux classes granulaires mal graduées ; 0,89 pour un mélange optimisé de 4 classes granulaires bien graduées).

3.2.4 Autres approches (Caquot, Faury, Dreux)

■ Caquot

Suite à un grand nombre d'essais, Caquot montre que la courbe granulaire de référence est bilinéaire en $\sqrt[5]{d_i}$ pour un mélange indéfini. Comme les dimensions granulaires inférieures et supérieures sont limitées, Caquot formule deux hypothèses : la porosité du mélange est celle du ciment (prise égale à 0,5) et la proportion des granulats supérieurs à la taille maximale (ne pouvant donc exister) est remplacée par une proportion de granulats de dimension maximale ayant même surface (effet de paroi).

Pour une population de granulats, dont les dimensions d_k sont régies par une suite géométrique de raison k et de taille maximale D_{max} , Caquot [20] aboutit aux lois suivantes :

• La proportion P de deux granulats de taille successive est régie par :

$$P_k - P_{k-1} = A \cdot \sqrt[5]{d_k} \quad (23)$$

où :

$$A = \frac{V_{g1}}{n} \frac{1}{(d_1)^{1/5}}$$

$$\sum_{j=1}^n V_{gj}$$

avec V_{g1} et V_{gj} volume de granulats respectivement d'ordre 1 et j et d_1 dimension du granulat d'ordre 1.

• La proportion du plus gros granulat par rapport à celui de taille immédiatement inférieure est :

$$P_{(D_{max})} - P_{(D_{max}-1)} = \frac{A \cdot \sqrt[5]{D_{max}}}{1 - k^{-4/5}} \quad (24)$$

• Le volume des vides du mélange est égal à la moitié du volume du ciment dans ce mélange : $V_v = V_c/2$.

■ Faury

En s'appuyant sur les travaux antérieurs, Faury [21] définit une courbe granulaire de référence bilinéaire dans un repère en $\sqrt[5]{d_i}$, dont l'ordonnée du point de brisure d'abscisse $D_{max}/2$ a pour valeur :

$$P_{(D_{max}/2)} = A + 17 \cdot \sqrt[5]{D_{max}} + \frac{B}{\frac{R}{D_{max}} + 0,75} \quad (25)$$

avec $A = 22$ à 38 (moyenne à 30) traduisant la maniabilité (A augmente quand la maniabilité augmente et quand le granulat est anguleux),

B coefficient de serrage ; serrage énergétique $B = 1$, serrage courant $B = 1,5$,

$R = V_b/S_c$: rayon moyen du moule, avec V_b volume de béton et S_c surfaces totales mouillées par le béton (effet de paroi).

■ CES - Dreux [12]

La courbe granulaire de référence bilinéaire est exprimée en échelle semi-log (échelle des analyses granulométriques), le point de brisure est défini par :

— son abscisse $D_{max}/2$ si $D_{max} \leq 25$ mm et $(D_{max} - 5$ mm)/2 si $D_{max} > 25$ mm,

— son ordonnée $Y = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_s + K_p$

avec K_i termes correctifs par rapport à une formulation de référence :

K terme correcteur d'arrangement granulaire prenant en compte le dosage fines (ciment et fillers), l'angularité des granulats et la puissance de serrage,

K_s fonction du module de finesse du sable,

K_p terme de consistance pour la pompabilité.

3.2.5 Conclusions sur la compacité et la granularité du squelette

Quelle que soit l'approche, la compacité du squelette granulaire doit être recherchée tout en respectant toutes les propriétés souhaitées. C'est ce qui rend la formulation complexe et nécessite toujours une validation expérimentale suivie de corrections pour répondre aux spécifications.

La formulation des bétons peut donc être approchée par l'une des méthodes traditionnelles [12] [20] [21]. Pour affiner les formulations, l'expertise est indispensable et quelques règles sont à connaître.

■ Compacité et indice de serrage

Plus l'indice de serrage (K^*) croît, plus l'énergie de serrage doit être importante.

La granularité optimale du squelette s'enrichit en classes granulaires de taille maximale. La compacité s'accroît. La classe de dimension maximale est volumiquement majoritaire (figure 7a).

■ Compacité et ségrégabilité

La compacité maximale ne conduit pas à la ségrégabilité minimale. La ségrégabilité est minimisée en augmentant les classes intermédiaires au détriment de la plus grossière. Chaque classe granulaire doit occuper l'espace intergranulaire lui conférant sa compacité maximale. La granularité est plus « régulière » (figure 7b).

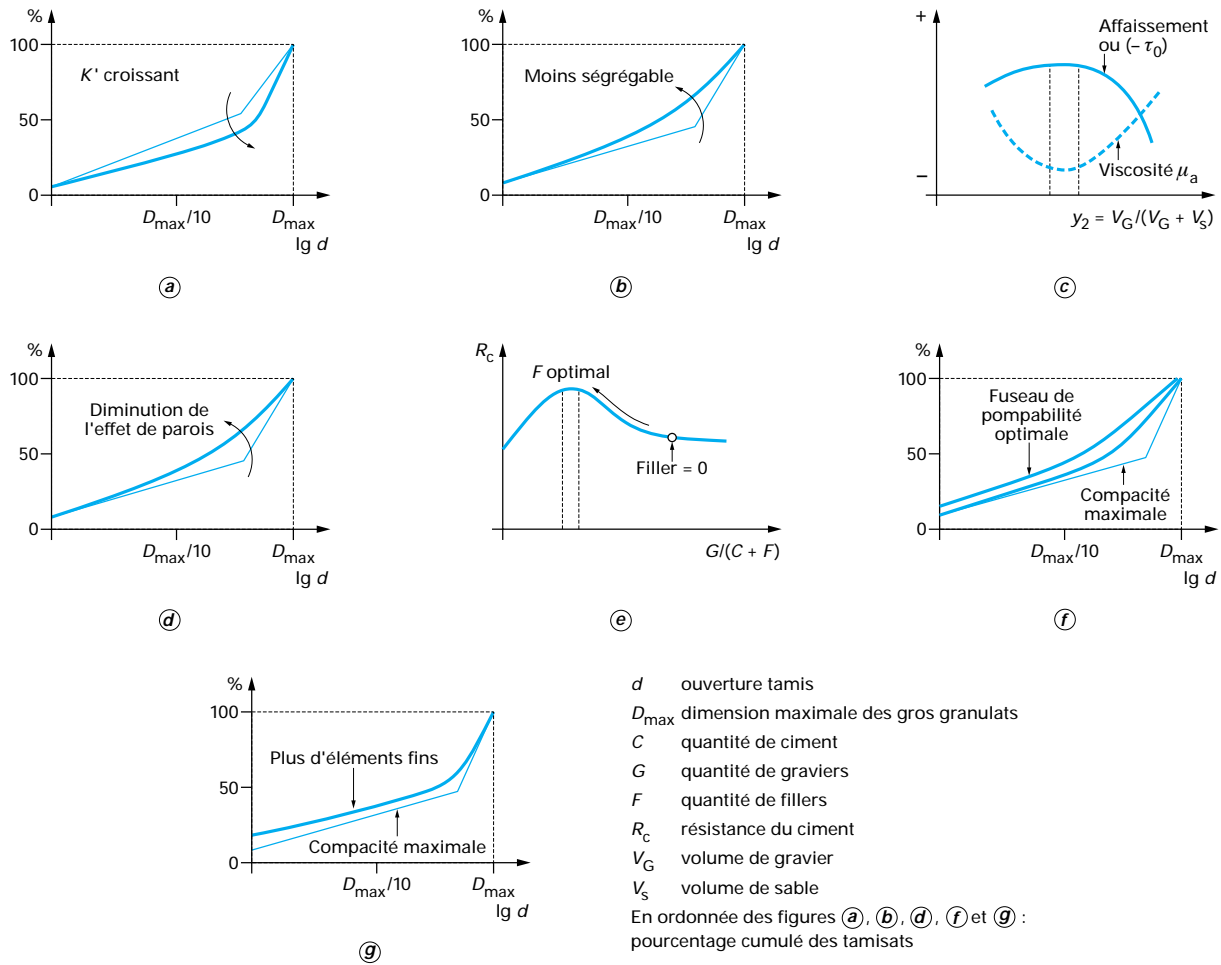


Figure 7 – Règles à respecter concernant la compacité et la granularité du squelette

■ Compacité et ouvrabilité

L'ouvrabilité est pilotée par la viscosité de la pâte ainsi que par la compacité (g^*) du mélange granulaire. Toutes choses égales par ailleurs, le béton le plus ouvrable est celui ayant la compacité maximale.

L'optimum d'ouvrabilité peut être trouvé expérimentalement en faisant varier la proportion de gravier (y_2) dans le mélange (figure 7c).

■ Compacité et effet de paroi

La compacité du mélange est plus faible au voisinage des parois qu'en pleine masse. Seule la fraction granulaire de taille maximale est affectée par l'effet de paroi. Il faudra donc réduire les proportions de cette fraction granulaire (figure 7d).

■ Compacité et adjuvantation (superplastifiant)

Le superplastifiant augmente la compacité de la pâte, donc la quantité de ciment à compacité du squelette donné.

À maniabilité constante, si on ne veut pas augmenter la quantité de ciment pour des raisons économiques ou techniques (retrait endogène, chaleur d'hydratation...), on améliore la résistance en ajoutant des fillers inertes dans le mélange (figure 7e).

■ Compacité et pompabilité

Outre l'effet de paroi, imposé par la présence de la surface des tubes de pompage, le matériau doit présenter un minimum de ségrégabilité (voir ci-dessus). La classe granulaire majoritaire n'est pas la plus grossière. Le matériau ne sera pas dilatant et la formulation établie pour le pompage ne donnera pas une compacité maximale en place (figure 7f).

■ Granularité et ressue

Le ressue est gouverné par le tassement du squelette et la perméabilité du milieu. Pour cela, il faut limiter la migration de l'eau en diminuant la taille des capillaires (fillers ultrafins) et minimiser la perméabilité du squelette vis-à-vis des constituants de tailles inférieures (granularité continue) (figure 7g).

3.2.6 Exemples de formulation

3.2.6.1 Bétons traditionnels : exemple du béton d'ouvrage d'art B40

Ouvrage routier exposé au gel et à l'air, véhiculant des agents de déverglaçage (classe d'exposition XF2) et susceptible de corrosion induite par les chlorures avec alternance de périodes sèches (classe d'exposition XD3 voir tableau 18).

● **Données** : mise en œuvre à la pompe sur courte distance ; affaissement au cône supérieur à 15 cm, à faible risque de ségrégation ; viscosité = 200 Pa · s.

Ciments disponibles CEM I de classe 42,5 et 52,5 R ou non et CEM II de classe 42,5 et 52,5 R ou non fillérisé calcaire.

Granulats calcaires durs concassés (4/25 mm) ; sable 0/5 de module de finesse 2,7 et sable correcteur 0/2 avec 15 % de passant à 125 µm.

● **Résistance visée** : compte tenu du système productif :

$$f_{c28} = 1,2 \times 40 \text{ MPa} = 48 \text{ MPa}$$

● **Choix du ciment** : les ciments CEM II ne conviennent pas car ils contiennent plus de 5 % de fillers calcaires. Choisissons le CEM I 52,5 R pour permettre une première mise en tension à 3 jours ; l'ouvrage n'est pas massif et l'échauffement restera limité. Toutefois, le retrait endogène peut être gênant car ce ciment possède une finesse de Blaine élevée et un retrait de 1 100 µm/m. La classe moyenne vraie fournie par le fabricant est de 64 MPa (à défaut de la connaître on peut prendre en première approche 52,5 + 7,5 = 60 MPa).

● **Qualité de la pâte** (avec l'hypothèse air entraîné = 4 %)

Les granulats de qualité (durs et propres), ainsi que la possibilité d'optimiser le mélange granulaire (3 classes à disposition locale) permettent d'estimer le coefficient granulaire : $K_g = 5,2$.

$$f_{c28} = f_{cm28} K_g \frac{1}{\left[1 + \frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E_{eff} + \rho_e V_a}{L \text{ ou } (C + kA)} \right) \right]^2}$$

$$\Rightarrow 48 = 64 \times 5,2 \frac{1}{\left[1 + \frac{\rho_c}{\rho_e} \left(\frac{E_{eff} + \rho_e V_a}{C} \right) \right]^2}$$

D'où le rapport pondéral :

$$C/(E_{eff} + \rho_e V_a) = 1,898$$

Soit, en volume :

$$V_c / (V_{E_{eff}} + V_a) = 0,612$$

● **Détermination de la quantité de pâte** : à partir de la viscosité, on peut déterminer la concentration volumique de granulats dans le béton par rapport à la concentration du granulat seul g^* .

La viscosité du béton pompable est : $\mu_a = 200 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

La concentration en ciment dans la pâte a été calculée précédemment : $\omega_c = 0,3798$.

Avec $\alpha_c = 0,6311$ pour les pâtes fluidifiées et $\mu_0 = 19,8 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, et sachant que :

$$\mu_a = \frac{\mu_0}{(1 - \omega_c / \alpha_c)^{1,08}} \frac{1}{(1 - g/g^*)}$$

on trouve $g/g^* = 0,732$.

La valeur de g^* peut être obtenue expérimentalement à partir d'un essai de compactage (ou à partir d'une formulation habituelle : Dreux, Faury), ou déduite du modèle d'empilement compressible avec un indice de serrage de $K = 9$ pour lequel la compacité du mélange $C_m = g^*$.

Prenons la valeur expérimentale optimisée $g^* = 0,85$, on en déduit $g = g^* \cdot 0,732 = 0,625 \text{ m}^3$ par m^3 de béton.

La somme des volumes des constituants étant égale à 1 m^3 , on a :

$$V_c + V_{E_{eff}} + V_a + g = 1$$

avec $g = 0,625$; $V_a = 0,040$ (4 %) et $V_c / (V_{E_{eff}} + V_a) = 0,612$.

On trouve : $V_{E_{eff}} = 0,194 \text{ m}^3$ soit 148,0 kg
 $V_c = 0,143 \text{ m}^3$ soit 444,0 kg
 $V_g = 0,623 \text{ m}^3$ soit 1 594,9 kg ($\rho_g = 2,56$)⁽¹⁾
 $V_a = 0,040 \text{ m}^3$ soit 0,0 kg
 Fluidifiant 1 %soit 4,4 kg d'extrait sec⁽²⁾
 Entraîneur d'air négligeable⁽³⁾
Total = 1,000 m³Total 2 191,3 kg

(1) Les proportions de chaque classe sont à déterminer par l'une des approches connues (CES, Faury, Caquot, MEC LCPC) et par l'expertise (béton pompable).

(2) La masse de fluidifiant est à déterminer à partir d'un test sur coulis permettant de définir le seuil de saturation (généralement inférieur à 1 % du poids de ciment).

(3) La présence d'un entraîneur d'air ayant pour effet de diminuer la viscosité, un ajustement de la viscosité apparente sera obtenu en modifiant le taux de fluidifiant.

Tableau 18 – Valeurs des critères retenus pour l'exemple traité

| Critères | | Classe d'exposition | | Valeurs mini - maxi retenues |
|---------------------------|---|---------------------|--------|------------------------------|
| | | XD3 | XF2 | |
| | Rapport Eau efficace/Liant équivalent maximal | 0,50 | 0,55 | 0,50 |
| | Classe de résistance minimale | C35/45 | C25/30 | C35/45 |
| | Teneur minimale en liant équivalent | 350 | 300 | 350 |
| | Teneur minimale en air | | 4 | 4 |
| Rapport maximal (A/A + C) | Cendre volantes | 0,15 | 0,30 | 0,15 |
| | Fumée de silice | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| | Laitier moulu | 0,15 | 0,30 | 0,15 |
| | Addition calcaire | 0,05 | 0,25 | 0,05 |
| | Addition siliceuse | 0,15 | 0,20 | 0,15 |
| | Nature du ciment | | | |

Remarque : la valeur de l'affaissement au cône pour les bétons fluidifiés, bien que contractuelle, reste une conséquence de la viscosité recherchée ici. Elle peut être estimée par logiciel, mais surtout validée par des essais en laboratoire puis sur le site industriel où les outils de production du béton sont sensiblement différents.

Les ajustements suivants seront à effectuer :

- ajustement de la teneur en air entraîné (en modifiant la dose d'adjuvant pour un même type de production) ;
- ajustement de la formulation pour retrouver la densité expérimentale ;
- en règle générale : ajustement des proportions de sable et de gravier afin d'augmenter la compacité du squelette donc d'augmenter l'ouvrabilité (limitée dans le cas présent à cause du critère de pompabilité) ;
- recherche de la teneur minimale en fluidifiant pour satisfaire aux critères rhéologiques (affaissement et étalement) ;
- vérification de toutes les données précédentes (bouclage) ;
- vérification des résistances requises à 28 jours ;
- vérification du comportement au gel/dégel ;
- divers autres contrôles pourront par ailleurs être effectués, en fonction de la destination du matériau, comme : la résistance à 2 ou 3 jours, l'élévation de température en fonction de l'environnement du matériau, le fluage à long terme, etc. Des modèles permettent d'estimer ces valeurs, mais il sera très prudent d'en contrôler les plus pertinentes pour l'ouvrage.

3.2.6.2 Béton de hautes performances et très hautes performances [29]

Les principes de formulations sont strictement les mêmes. Pour ceux-ci, le caractère limitant des granulats doit être étudié. En effet, la résistance intrinsèque des granulats (graviers) devient prépondérante quand la pâte est très performante (les granulats obtenus à partir de l'exploitation par explosif de roches massives peuvent être microfissurés et ne pas convenir pour l'élaboration de BHP).

Pour les très hautes performances (100 MPa et plus), il est nécessaire d'employer des fumées de silice (6 à 8 %) qui ont des actions multiples au sein du béton frais comme durci à savoir :

- augmentation de la compacité du squelette dans le matériau frais ;
- amélioration de l'ouvrabilité par effet « roulement à bille » ;
- multiplication des sites de nucléation des hydrates, meilleure homogénéité ;
- production d'hydrates en consommant la portlandite.

L'emploi de superplastifiant doit être optimisé, tant d'un point de vue technique pour limiter les effets secondaires (entraînement d'air et retard de prise) que d'un point de vue économique. La méthode des coulis (figure 8) permet de déterminer le seuil de saturation pour un ciment donné [25].

Le dosage de saturation est déterminé par le sup des x_i définis par les points de la courbe d'écoulement au cône de Marsh de pente $\sim 2/5$ dans l'échelle semi logarithmique du diagramme de la figure 8.

Un exemple de formulation d'un BTHP est donné dans le tableau 19.

3.2.6.3 Bétons fibrés

Le lecteur pourra se reporter à l'article [C 2 214].

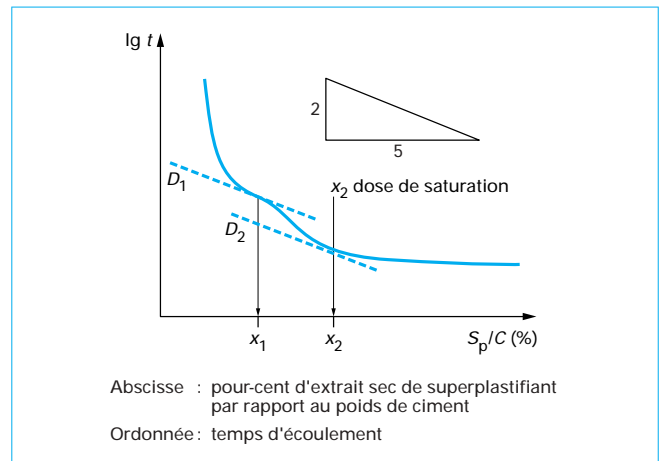


Figure 8 – Méthode de détermination du dosage de saturation

De nombreuses catégories de bétons fibrés existent. Ils se différencient de par la nature des fibres (acier, organique, verre, carbone) et de par la technique de mise en œuvre (malaxé coulé ou projeté, projeté simultanément, injecté...).

- Les bétons renforcés de fibres (BRF) (dallage, revêtement de tunnel...) et où le dosage en fibres est limité (inférieur à 0,5 % en volume) n'ont pas une réelle fonction structurelle. Dans ce cas, le support joue un rôle dans le comportement mécanique de l'ensemble (fibres métalliques ou organiques).

- Pour les bétons armés de fibres qui ont réellement une fonction structurelle, le dosage en fibres dépasse 1 % de fibres d'acier [28].

- Pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances, BFUHP (figure 9), le dosage en fibres d'acier est de l'ordre de 2 à 3 %, voire plus pour les mats de fibres injectés (SIMCON : *Slurry Infiltreated Mat Concrete*, SIFCON...) [26].

Tous ces bétons ont des principes communs de formulation :

- pour les BRF et les BFUHP, la présence des fibres (dosage et longueur) perturbe l'organisation du squelette granulaire ce qui conduit à diminuer D_{max} et la proportion volumique du plus gros granulat ;
- pour obtenir des BFUHP, l'ancrage des fibres doit être soigné, on aura donc recours à une haute résistance de la matrice grâce à l'emploi de fumées de silice, d'un superplastifiant haut réducteur d'eau, voire à un traitement thermique [27] [C 2 216].

Un exemple de formulation d'un BFUHP est donné dans le tableau 20.

3.2.6.4 Bétons autonivelants (BAN) et autoplacants (BAP)

Ces types de béton, de plus en plus employés, ont la particularité de se niveler seuls (béton autonivelant pour les dalles) ou de se mettre en place seuls (autoplacant pour tous ouvrages).

Ils possèdent donc un seuil de cisaillement ainsi qu'une viscosité apparente faibles ($\tau_0 < 40$ Pa et $\mu_a < 200$ Pa · s). Pour cela, l'emploi de fluidifiant au dosage de saturation est indispensable.

Tableau 19 – Exemple de formulation d'un BTHP (en kg/m³) de résistance supérieure à 100 MPa

| Granulats calcaires durs concassés | | | Sable roulé siliceux | Ciment CEM I 52,5 | Fumée de silice | Fluidifiant (extrait sec) | Eau efficace | $\frac{E}{C + Fs}$ |
|------------------------------------|--------|-----|-------------------------|----------------------|--------------------|------------------------------|--------------|--------------------|
| 12,5/20 | 5/12,5 | 0,5 | | | | | | |
| 854 | 411 | 326 | 326 | 421 | 42,1 | 7,6 | 112,3 | 0,243 |

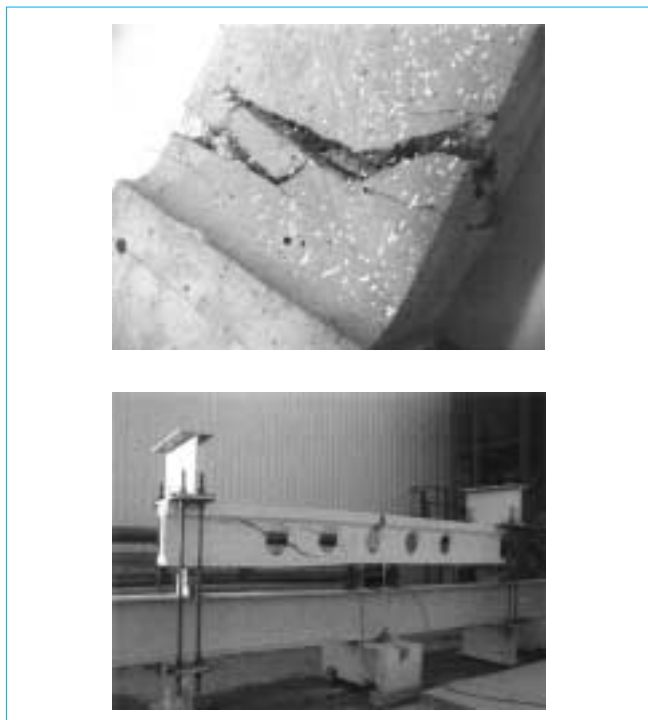


Figure 9 – En haut : faciès d'éprouvette de BFUHP sollicitée en traction (E. Astudillo).
En bas : rupture sous effort tranchant d'une structure précontrainte par torons en BFUHP (O. Bayard)

Attention, si la ségrégation possible des BAN, employés pour des épaisseurs faibles, a généralement peu de conséquences, *a contrario* pour les BAP, la ségrégabilité du matériau n'est pas acceptable et la formulation doit être plus élaborée.

Pour ces derniers (BAP), la stabilisation de la pâte évitant la séparation des phases eau et fines et le ressuage (§ 3.2.5), deux voies de formulation sont possibles pour diminuer la percolation de l'eau :

- diminuer la perméabilité de la pâte en optimisant le squelette des fines (emploi de fillers ultrafins, de cendres volantes...) ;
- augmenter la viscosité de l'eau par ajout d'agent viscosant tout en rendant la formule moins sensible aux variations de formulation.

Par ailleurs, pour faciliter l'écoulement du squelette au travers d'une armature (frottement et arc-boutement du squelette sur l'armature), on limitera D_{\max} et on optimisera le squelette pour qu'il soit moins ségrégeant (§ 3.2.5) ; le rapport volumique G/S est voisin de 1.

De nombreux essais : étalement, entonnoir, passoire, boîte en L, caisson de ségrégation, ont été développés [30]. Dans l'état actuel des connaissances, tous ces essais ont un intérêt vis-à-vis du comportement du béton, mais peu sont possibles sur chantier.

Différentes formules de BAP et BAN sont données dans le tableau 21.

3.2.6.5 Bétons fluides pour remblaiement de tranchées

Ces matériaux très fluides sont conçus pour le remblaiement de tranchées devant supporter des charges rapidement et pouvoir être réouvertes sans moyen mécanique (tableau 22). Les perméabilités à l'eau pour l'écoulement des nappes phréatiques de surface et à l'air pour le remblaiement de tranchées pour canalisation de gaz ainsi que la résistivité thermique pour l'enrobage de câbles électriques sont aussi des critères de formulation.

Les remblais liquides « non essorables » adaptés aux terrains non perméables possèdent des caractéristiques de pâte faible $[(E + V_a)/L]$ élevées et une grande fluidité (§ 3.2.1). La résistance mécanique est obtenue grâce à l'hydratation du liant.

Les remblais rapides « essorables », permettant de supporter les charges humaines au bout de quelques minutes (essai au boulet de Kelly) et le trafic routier après 5 à 7 heures (indice CBR modifié > 40 ou essai à la plaque : module EV2), sont des bétons extrêmement perméables qui ont un tassement rapide. Le départ de l'eau dans

Tableau 20 – Exemple de formulation d'un BFUHP (en kg/m³) de résistance supérieure à 200 MPa en compression (avec fibres d'acier et cure à 90 °C)

| Sable siliceux $D_{\max} = 0,2 \text{ mm}$ | Quartz broyé | CEM I 52,5 | Fumée de silice | Microfibres ($\varnothing 0,16 \text{ mm}$ long. 13 mm soit 2 %) | Fluidifiant (extrait sec) | Eau efficace | $\frac{E}{C + F_s}$ |
|---|--------------|---------------|--------------------|--|------------------------------|--------------|---------------------|
| 978 | 205 | 685 | 222 | 156 | 18 | 171 | 0,188 |

Tableau 21 – Différentes formules de BAP et BAN (sources LCPC et entreprises)

| Béton type | E (kg/m ³) | C (kg/m ³) | Sp (kg/m ³) | Av (kg/m ³) | F (kg/m ³) | La (kg/m ³) | Cv (kg/m ³) | S (kg/m ³) | G (kg/m ³) | G/S | Pâte (% vol.) | Gravillon (% vol.) |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|------------------|-----------------------|
| BAP | 175 | 331 | oui | oui | 216 | 0 | 0 | 702 | 875 | 1,29 | 36 | 33 |
| BAP | 180 | 150 | oui | oui | 0 | 150 | 200 | 775 | 947 | 1,26 | 35 | 36 |
| BAN | 200 | 290 | 3,5 | 2 | 110 | 0 | 0 | 890 | 810 | 1,05 | 33,5 | 32 |

E eau ; C ciment ; Sp superplastifiant ; Av agent viscosant ; F fillers ; La laitier ; Cv cendres volantes ; S sable ; G gravillons.

Tableau 22 – Caractéristiques mécaniques et réexcavabilité des remblais rapides

| f_{c28} | < 0,7 MPa | 0,7 à 2 MPa | > 2 MPa |
|----------------|-----------|---------------------------------|--------------|
| Réexcavabilité | Facile | Moyenne | Difficile |
| | Manuelle | Manuelle ou mécanisation légère | Mécanisation |

le sol est un gage de portance rapide. L'absence de fines facilite la perméation donc l'autocompaction (§ 3.2.5) [24] avant que le liant n'apporte une consolidation secondaire.

Des exemples sont donnés dans le tableau 23.

4. Contrôles des formulations de béton

4.1 Essais d'études

Les essais d'études ont pour objectif la qualification de la formulation. L'ensemble des spécifications doit être contrôlé, à commencer par celles du béton frais, densité, ouvrabilité, air entraîné puis celles du béton vieillissant et durci.

Agir sur un paramètre de formulation fait généralement évoluer toutes les propriétés du béton frais. Toutefois, si celles-ci ne sont pas trop éloignées de celles recherchées, on peut considérer que, lorsqu'on agit sur un paramètre de formulation pour modifier une propriété, les autres ne sont affectées qu'au second ordre. Attention, certaines études peuvent être longues et onéreuses et demandent à être entreprises très en amont de la formulation (cas des granulats siliceux susceptibles de réactivité avec les alcalins).

■ Densité

La formulation est toujours exprimée en masse de composants pour un mètre cube de béton. Or, compte tenu des nombreuses hypothèses faites lors de la formulation, rien ne dit que l'ensemble des constituants occupera le volume prévu.

La mesure de la densité expérimentale γ_{ex} et sa comparaison avec la densité théorique γ_{th} permet de valider la formulation ou au contraire de la corriger.

En effet, si $\gamma_{ex}/\gamma_{th} > 1$, la compacité est plus grande que celle prévue, le volume réalisé est inférieur à celui prévu et le béton est surdosé en pâte. Le squelette granulaire n'occupe pas un volume suffisant.

Inversement, si $\gamma_{ex}/\gamma_{th} < 1$, le volume est plus grand que prévu et le béton sous-dosé en pâte.

Les corrections doivent donc être apportées à la formulation jusqu'à ce que la densité théorique soit égale à la densité expérimentale (on suppose ici que les autres caractéristiques ne sont pas affectées).

■ Ouvrabilité

Les spécifications rhéologiques du béton frais doivent être conformes. Suivant les bétons, affaissement au cône, étalement, viscosité ou essai spécifique type boîte en L pour les BAP ou compactabilité pour les BCR, etc. seront contrôlés.

Sauf spécification particulière imposée, il faut se souvenir qu'à quantité de pâte égale, le béton le plus compact est le plus ouvrable. Il est possible d'agir sur les grandeurs : compacité du squelette (§ 3.2.3.4), quantité et viscosité de la pâte (§ 3.2.2.2).

■ Teneur en air

La quantité d'air contenue dans le béton est soit volontairement incorporée (air entraîné) grâce à l'emploi d'un adjuvant spécifique, soit involontairement incorporée lors du malaxage ou à cause de l'utilisation d'un adjuvant à effet secondaire (air occlus). On ne contrôle généralement que la teneur (% volumique d'air dans le béton frais) mais en tout état de cause lorsque les bétons doivent résister au gel la demi distance moyenne e_b entre les bulles doit être également contrôlée ($e_b < 250 \mu m$).

À faible dosage, l'air et l'eau jouent le même rôle aussi bien vis-à-vis de la résistance que vis-à-vis de l'ouvrabilité. En conséquence, augmenter la teneur en air d'un béton frais pour le rendre moins gélif améliorera l'ouvrabilité et diminuera sa résistance. Ici les variations ne sont plus du second ordre (§ 3.2.2.1).

■ Propriétés mécaniques

Toutes les propriétés ne peuvent être étudiées ici, mais outre les résistances (éventuellement en fonction du temps), les retraits, le fluage, la chaleur d'hydratation sont souvent dimensionnantes pour la formulation.

Toutes ces propriétés sont certes pilotées par la formulation mais aussi par la nature des constituants choisis (§ 2.2).

Tableau 23 – Formulation de bétons (en kg/m³) pour remblaiement de tranchées réexcavables
(sources Béton de France et Italcementi Group)

| Béton type | CEM I 52,5 R | C_v | S 0/5 | G 5/20 | Adjuvant | E | ρ | Portance Kelly < 2,5 cm | Trafic |
|-------------------------------|--------------|-------|-------|--------|------------------------|-----|-----------|-------------------------|------------------------------------|
| Remblai liquide non essorable | 50 | 50 | 1 600 | – | XL Remblai. 0,33 | 200 | 1,7 à 2 | 3 à 5 heures | T3 à 20-24 h |
| | 125 | – | 1 450 | – | AER spécial air = 20 % | 180 | 1,5 à 1,8 | | |
| Remblai rapide essorable | 20 | 20 | 780 | 1 120 | Sans | 200 | 2,14 | 15 à 20 min | CBR* à 5 h : 40 EV2 > 50 MPa à 7 h |
| | 25 | – | 900 | 1 050 | Sans | 230 | 2,20 | | |

4.2 Essais de convenance

Les essais de convenance doivent permettre de valider la formulation dans le système production prévu pour la confection de l'ouvrage et avec les moyens de fabrication, de transport et de mise en œuvre industriels. En effet, lors d'un processus industriel, il n'est pas toujours possible d'obtenir le même résultat qu'en laboratoire. Des ajustements sont donc nécessaires.

Selon les cas, on sera amené à contrôler le rendement (en utilisant un coffrage calibré, ce qui est l'équivalent du contrôle de densité), ainsi que toutes les propriétés susceptibles d'être affectées par le processus comme la rhéologie (affaissement, étalement...), la teneur en air. Attention, ces essais ne garantissent pas la réussite systématique car d'autres paramètres difficiles à maîtriser peuvent agir sur les propriétés du béton frais, comme la température ambiante par exemple. Pratiquement, un essai de convenance validant une formulation l'hiver peut ne plus la valider l'été.

Généralement, si l'essai de convenance valide la formulation du béton frais, les spécifications du matériau durci seront elles aussi conformes.

Par ailleurs, compte tenu des fluctuations inévitables du système de production, il est souvent demandé d'effectuer une étude de sensibilité en faisant varier les dosages des constituants dans une fourchette prédéfinie (exemple $\pm 5\%$ pour le ciment, l'eau, les granulats etc.).

4.3 Essais de contrôle

On distingue deux types d'essai : les essais d'information utile à l'avancement de l'ouvrage (mise en précontrainte par exemple) et les essais de contrôle proprement dits, c'est-à-dire ceux imposés par le plan assurance qualité (PAQ) prouvant la qualité du matériau mis en œuvre.

Actuellement, le suivi en matriométrie [2] du matériau dans l'ouvrage permet de s'affranchir des essais d'information qui, en réalité, ne donnent qu'un aperçu des propriétés du matériau en place.