

Chapitre 3 : Formulation des BAP

Les types de bétons autoplaçants et leur formulation peuvent varier considérablement d'un pays à un autre et d'une région à une autre. Et ceci, est dû principalement aux caractéristiques des matériaux constituants disponibles.

La formulation des bétons autoplaçants passe généralement par trois étapes : le choix des proportions et du volume des agrégats, le volume de la pâte et la composition de la pâte.

Le volume élevé de la pâte a pour rôle d'assurer les propriétés recherchées dans un BAP à l'état frais c'est-à-dire la capacité de remplissage et la capacité de passage. Il a aussi pour rôle de réduire, voir éliminer, les frictions entre les granulats qui limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons.

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. D'un autre côté, les BAP se distinguent des BO par l'emploi de certains stabilisateurs chimiques. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

1. METHODES DE FORMULATIONS

1.1. Formulation par l'expérience :

Cette méthode de formulation repose sur l'empirisme et le tâtonnement en fixant à priori certains paramètres comme le rapport G/S, le dosage en ciment, ...

Une première étape correspond à la synthèse des principes de formulation issus des différents travaux de recherche publiés et l'adaptation de ces principes aux conditions de réalisation (prise en compte des caractéristiques des matériaux utilisés).

- Fixer le dosage en ciment,
- Fixer le rapport Additions / Liants
- Fixer le rapport E/L
- Fixer le rapport G/S
- Fixer le dosage en superplastifiant.

	BO	BAP
G/S	1,4 – 2,3	~1
$V_{\text{pâte}} \text{ (l/m}^3\text{)}$	< 300	> 330
E/C	0,5 – 0,65	~ 0,5
C (kg/m ³)	280 – 350	~ 350
A (kg/m ³)	0 – 50	50 – 200
Sp	Plastifiant	Superplastifiant

La seconde étape consiste en la vérification et la validation passant par la réalisation d'essais d'étude. Elle est indispensable pour fiabiliser le mélange conçu.

La troisième étape consiste à apporter les corrections nécessaires à la formulation.

L'inconvénient de cette démarche réside dans le fait qu'elle ne prend pas en considération les caractéristiques des constituants utilisés.

1.2. Approche Japonaise :

La formulation des BAP par l'approche japonaise a été développée à l'Université de Kochi au Japon. Cette méthode consiste à privilégier le volume de la pâte au détriment des granulats. Elle consiste d'abord à fixer le dosage de gravier dans le béton et celui du sable dans le mortier, ensuite de procéder à l'optimisation de la pâte de ciment afin de donner au béton résultant les meilleures performances.

Les bétons obtenus par cette approche ont un volume de pâte très important et sous dosés en granulats. Cette méthode évite le blocage des gravillons mais elle est loin d'être économique et peut conduire à des problèmes de retrait.

1.2.1. Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. La compacité étant le résultat du rapport volume des grains et le volume total. Le volume du gravier est donc fixé à la hauteur de 50% du volume des solides contenus dans le béton.

1.2.2. Dosage du sable :

Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume du sable est fixé à 40% du volume total de mortier. Pour cette approche, il est à noter que les particules du sable en dessous d'une taille de 90 µm sont considérées comme une poudre.

1.2.3. Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins les rapports massiques E / C et E/C+A peuvent être choisis sur des critères de résistance.

1.2.4. Dosage de l'eau et du superplastifiant :

L'optimisation des dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers. Pour cela, deux essais sont réalisés avec des dispositifs d'essais dont les dimensions sont proportionnelles (d'un coefficient $\cong 2$) à ceux utilisés avec le béton (le cône d'Abrams, et l'entonnoir), comme représentés sur la figure suivante :

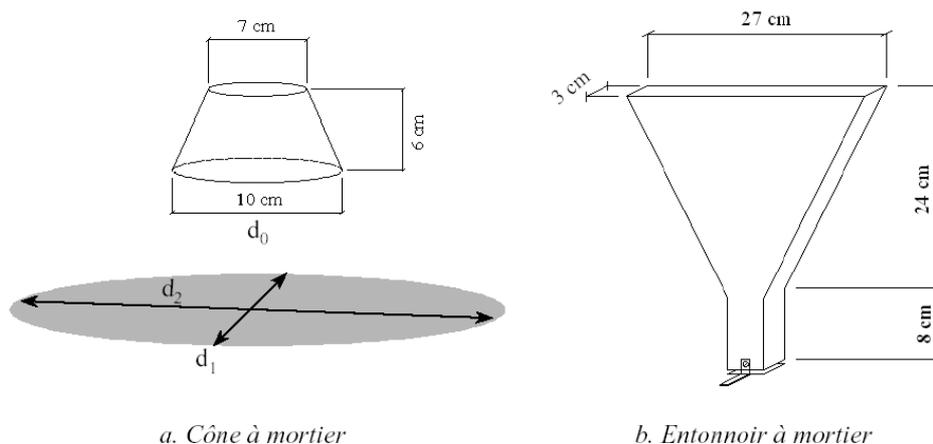


Figure 2.2: Dimensions du cône et de l'entonnoir à mortier

Les grandeurs mesurées sont l'étalement de la galette de mortier et le temps d'écoulement à travers l'entonnoir. Ces grandeurs sont exprimées par les relations suivantes :

L'étalement relatif qui représente la fluidité :
$$\Gamma_m = \frac{(d_1 \cdot d_2 - d_0^2)}{d_0^2}$$

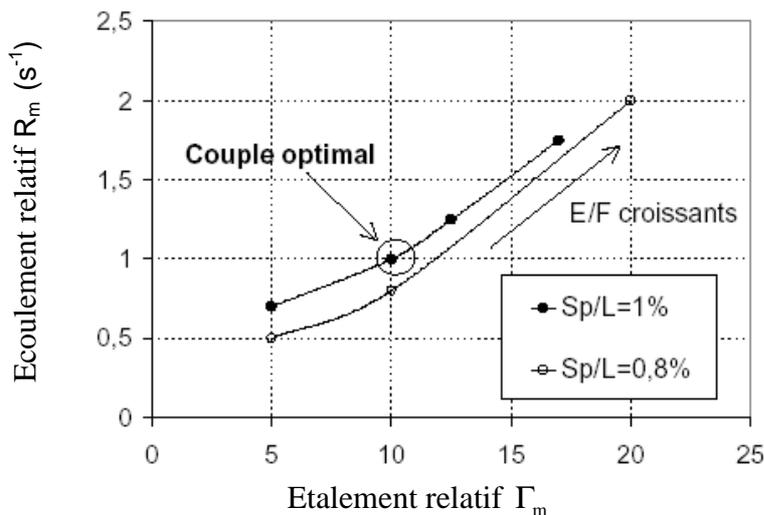
Où d_1 et d_2 sont les diamètres d'étalements dans deux directions perpendiculaires.
 d_0 est le diamètre inférieure du cône (10 cm).

La vitesse relative d'écoulement qui représente la viscosité : $R_m = \frac{10}{t}$ [s⁻¹]

Où t est le temps d'écoulement à l'entonnoir en secondes.

Certains chercheurs optimise le dosage du superplastifiant et le rapport E/C pour obtenir simultanément $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1 \pm 0,1$ [s⁻¹].

D'autres chercheurs ont utilisé un optimum de $\Gamma_m = 10$.



Exemple de recherche du dosage en eau et en superplastifiant :
 écoulement relatif (R_m) en fonction de l'étalement relatif (Γ_m).

Les chercheurs suggèrent un étalement au cône à mortier de 240 à 260 mm et un temps d'écoulement à l'entonnoir de 7 à 11 secondes.

1.3. La théorie de la pâte en excès :

1.3.1. Mesure de la compacité :

Le moule est constitué d'un cylindre en acier creux d'une profondeur de 600 ± 10 mm et d'un diamètre intérieur de 160 ± 2 mm. Son épaisseur sera d'au mois 4 mm.

Le piston est constitué d'un cylindre en acier plein, d'une masse de 20 Kg (applique une pression de 10 kPa sur le matériau).

La masse d'essai doit être de $7 \text{ kg} \pm 3 \text{ g}$.

Exécution de l'essai

- Diviser la masse en 3 parties.
- Verser la première fraction dans le moule et appliquer 20 secousses.
- Répéter pour la deuxième et la troisième fraction.
- Mettre le piston dans le moule (sur les granulats) et appliquer 40 nouvelles secousses.



Volume apparent du matériau

Le volume apparent occupé en fin d'essai par le matériau est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$V = S \times h \quad (\text{en cm}^3)$$

Avec : $S = \pi D^2/4$ (D : Diamètre du cylindre en cm)

Et $h = H_v - H_c$ (en cm)

Avec :

H_v : la distance entre le sommet du moule et le sommet du piston (le piston est placé dans le moule vide).

H_c : la distance entre le sommet du moule et le sommet du piston (le piston est placé sur l'échantillon dans le moule).

Refaire le même travail sur une deuxième éprouvette et prendre la moyenne des deux essais.

Calcul de la compacité

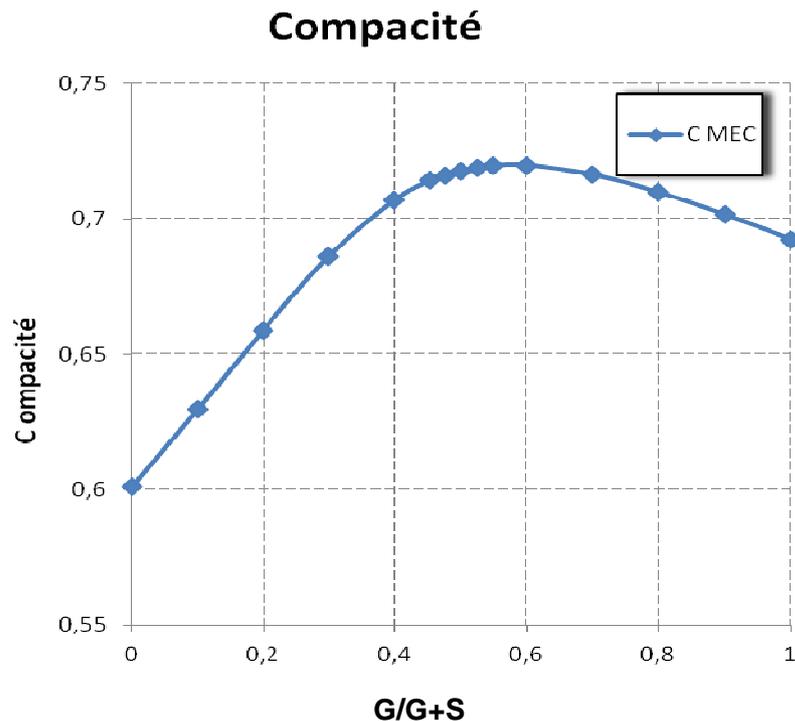
Pour chaque éprouvette, la compacité est calculée selon la formule :

$$\gamma = \rho_a / \rho_{rd} \quad \text{Avec :} \quad \rho_{rd} : \text{masse volumique réelle (g/cm}^3\text{) (NF EN 1097 – 6) (g/cm}^3\text{)}$$

$$\rho_a = M/V \quad \text{avec} \quad M : \text{masse de l'échantillon (g)}$$

$$V : \text{Volume mesuré (cm}^3\text{)}$$

Le résultat de l'essai est la valeur moyenne des compacités obtenues sur deux éprouvettes. Il sera exprimé avec 3 décimales.



1.3.2. La théorie de la pâte en excès :

Cette théorie considère que pour obtenir un béton d'une bonne ouvrabilité, il est nécessaire d'avoir suffisamment de pâte de ciment pour couvrir la surface des granulats afin de minimiser les frictions entre les particules, mais aussi une quantité supplémentaire de pâte pour donner une meilleure ouvrabilité.

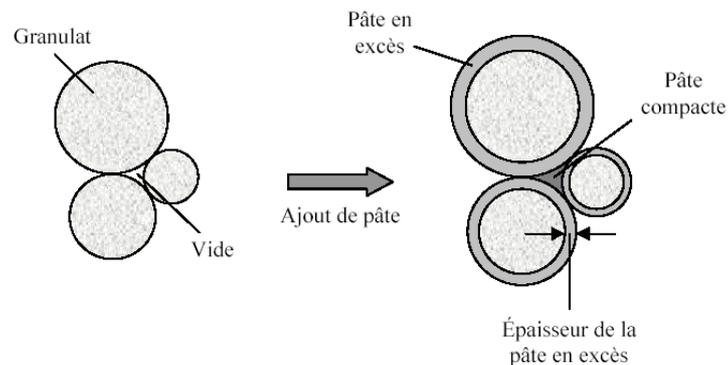


Figure : Illustration de la théorie de la pâte en excès

En associant de la pâte de ciment à des granulats compactés, ces derniers vont être dispersés et séparés par une couche de pâte de ciment. La pâte qui remplit les vides est appelée la pâte compacte (V_{pc}). Plus l'épaisseur de la couche est importante, moins les frictions sont présentes et par conséquent, l'ouvrabilité du mélange est meilleure.

La théorie de la pâte en excès suppose que les granulats dans le béton sont sphériques, et que la distribution granulométrique dans le béton est uniforme et continue.

La figure ci-dessous montre la composition d'un BAP. Les granulats sont bien espacés par la pâte de ciment. En imaginant, que les granulats de l'échantillon sont compactés au maximum, deux volumes de pâtes sont considérés : un volume (V_{PC} : Volume de pâte compacte) qui sert à remplir

les vides du squelette granulaire, et un autre volume (V_{PE} : Volume de pâte en excès) qui aura pour rôle de couvrir les granulats.

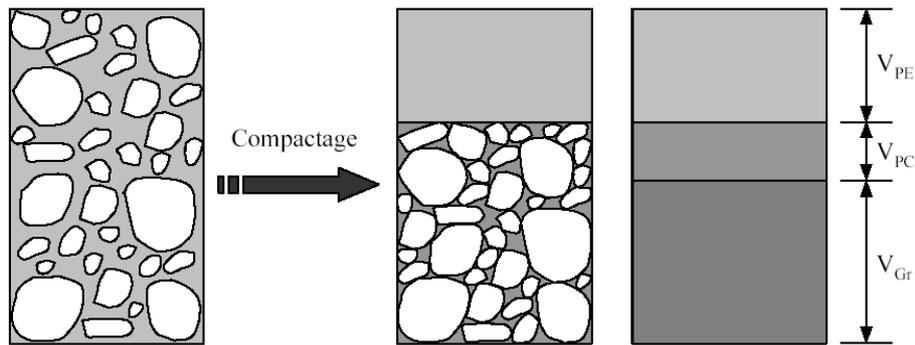
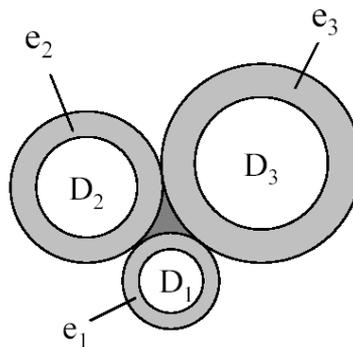


Figure : théorie de la pâte en excès : composition du béton

Le béton sera donc constitué de deux volumes : le volume des granulats (V_{Gr}) et le volume de pâte dont nous distinguons deux volumes (V_{PE}) et (V_{PC}).

Le volume total de pâte dans un béton est calculé en prenant en compte la fraction inférieure à 0,08 mm des granulats, considérée comme faisant partie de la suspension entourant les granulats supérieurs à 0,08 mm.

La méthode se base sur l'hypothèse qui considère que l'épaisseur de la pâte en excès autour d'un granulat est proportionnelle à sa taille (ou son diamètre). Ainsi un paramètre k qui relie l'épaisseur de pâte en excès au diamètre du granulat a fait de plusieurs recherches.



$$\frac{D_1 + 2 \cdot e_1}{D_1} = \frac{D_2 + 2 \cdot e_2}{D_2} = \frac{D_3 + 2 \cdot e_3}{D_3} = k$$

Donc pour une classe i de granulats de taille D_i , l'épaisseur de la pâte en excès est e_i :

$$\frac{D_i + 2 \cdot e_i}{D_i} = k$$

Par conséquent le paramètre k est le même pour toutes les classes granulaires (n). Le volume de la pâte en excès V_{PE} total peut alors s'écrire pour n classes :

$$V_{PE} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi \cdot (D_i + 2 \cdot e_i)^3}{6} - \frac{\pi \cdot D_i^3}{6} \right) \cdot N_i$$

Où N_i est le nombre de granulats de taille D_i de la classe i .

$$V_{pe} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{\pi}{6} \cdot [(D_i + 2 \cdot e_i)^3 - D_i^3]$$

En remplaçant $D_i + 2 \cdot e_i$ par $k \cdot D_i$ de l'équation , on aura :

$$V_{pe} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_i^3 \cdot (k^3 - 1)$$

Or

$$V_g = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_i^3$$

Donc :

$$V_{pe} = V_g \cdot (k^3 - 1)$$

Et le facteur k en fonction du volume de la pâte en excès s'écrira comme suit :

$$k = \sqrt[3]{1 + \frac{V_{pe}}{V_g}}$$

V_g est le volume des granulats.

La valeur de k est comprise entre 1,121 et 1,139 pour les bétons aux granulats roulés et entre 1,135 et 1,154 pour les bétons aux granulats concassés.

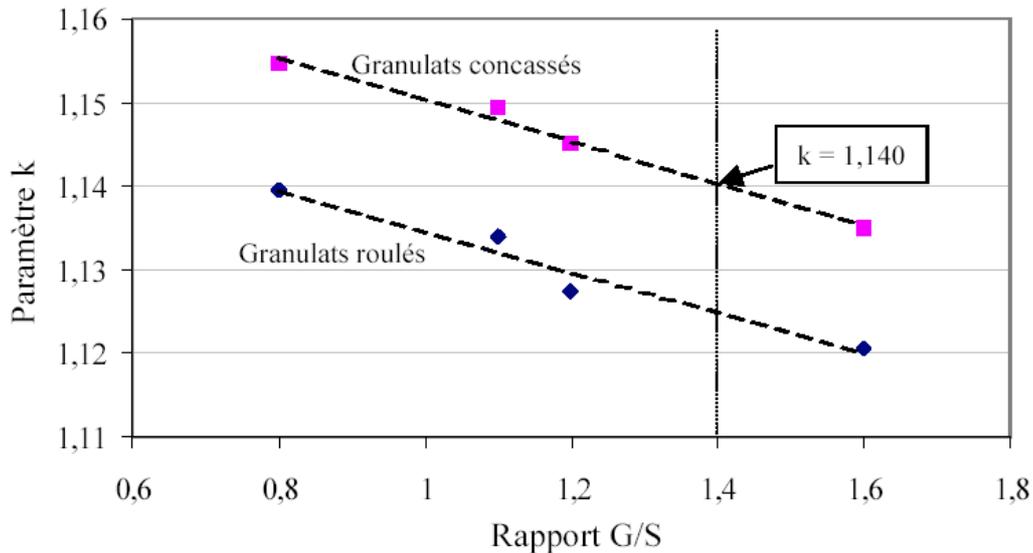


Figure: Evolution du paramètre k en fonction du rapport G/S

A partir de la valeur de k obtenue, il est possible de déterminer pour chaque granulat de taille D_i l'épaisseur de pâte en excès correspondant e_i

$$e_i = \frac{(k-1)}{2} \cdot D_i$$

$$1 = V_g + V_p + V_a$$

Avec :

$$V_p = V_{pe} + V_{pc} \Rightarrow 1 = V_g + V_{pe} + V_{pc} + V_a$$

$$1 - V_{pe} - V_a = V_g + V_{pc}$$

Compacité :
$$C = \frac{V_{solide}}{V_{total}} = \frac{V_g}{V_{tg}} = \frac{V_g}{1 - V_{pe} - V_a} \quad (1)$$

$V_{tg} = V_g + V_{pc}$ (Volume apparent)

Porosité:
$$P = \frac{V_{vides}}{V_{total}} = \frac{V_{pc}}{V_{tg}}$$

$(1) \Rightarrow V_g = C \cdot (1 - V_{pe} - V_a)$

Or $V_{pe} = V_g \cdot (k^3 - 1)$

$V_g = C - C \cdot V_g \cdot (k^3 - 1) - C \cdot V_a$

$V_g + C \cdot V_g \cdot (k^3 - 1) = C - C \cdot V_a$

$V_g (1 + C \cdot (k^3 - 1)) = C \cdot (1 - V_a)$

$$V_g = (1 - V_a) \cdot \frac{C}{1 + C \cdot (k^3 - 1)}$$

Avec V_g : Volume des granulats (Sable + Gravier)

$$V_p = V_{pe} + V_{pc} = (1 - V_a) - V_g$$

2. Résistance :

La formulation des BAP doit également intégrer un objectif en termes de résistance cible f_c pour le mélange durci. Les constituants des BAP étant de même nature que ceux d'un béton ordinaire, il est logique d'exploiter les relations habituelles reliant la résistance cible aux concentrations en constituants

Relation de Bolomey :

$$f_c = G \cdot \sigma_{c28} \left(\frac{C'}{E + V_a} - 0,5 \right)$$

G : Le coefficient caractéristique des granulats

σ_{c28} : La classe vraie du liant

C' : le dosage pondéral du liant équivalent

E : le dosage pondéral en eau

V_a : La masse d'eau correspondant au remplissage du volume d'air occlus.