

CHAPITRE 1

BETON AUTOPLAÇANT : CONCEPT ET FORMULATION

1.1. Introduction

Les Bétons autoplaçants (BAP) sont des matériaux fluides qui se mettent en place sans vibration. Ils se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais [AFG, 00] [SED, 99]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quelque soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).

Pour parvenir à formuler un BAP, la pâte définie comme le mélange de ciment, d'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (figure 1.1).

En général, les BAP possèdent les mêmes constituants que les BO, à savoir, le ciment, l'eau, le sable et le gravier. A ces quatre constituants viennent s'ajouter les fines et les adjuvants selon la propriété demandée. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

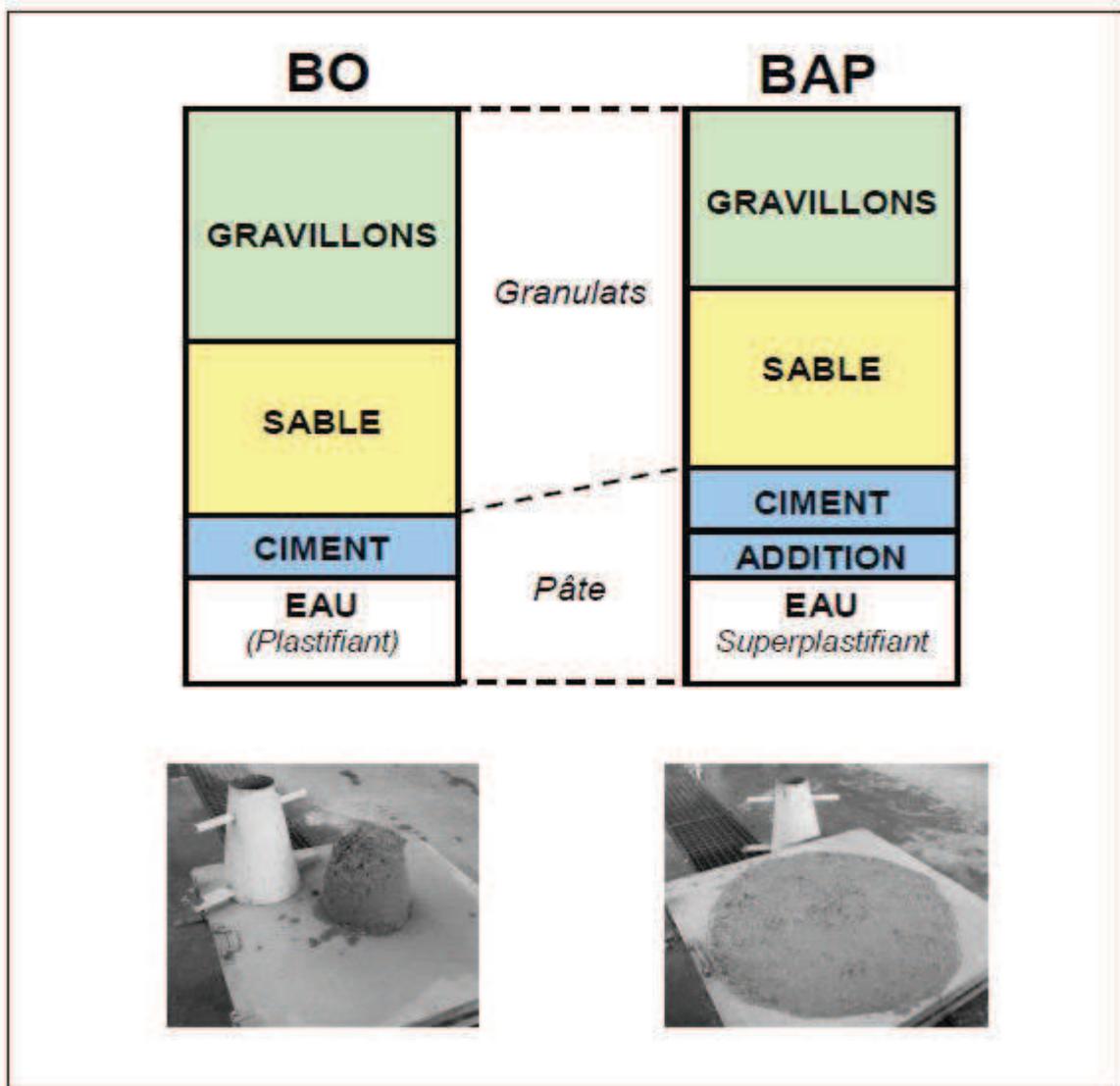


Figure 1.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [TUR, 04].

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter leurs contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement.

Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais ; il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un défloculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Le début du développement des BAP coïncide d'ailleurs avec l'arrivée des superplastifiants de type polycarboxylate, à fort pouvoir défloculant. Ces adjuvants ont un double effet, électrique et stérique, qui leur permet de disperser au mieux les particules.

La quantité de fines n'est pas non plus toujours suffisante pour empêcher la ségrégation. On a recours alors aux agents de viscosité. Ces adjuvants sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage. Ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats, courants en centrale à béton [LOU, 03] [ROL, 98]. Cela étant, en pratique leur utilisation est peu répandue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions minérales.

Evidemment, un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais.

1.2. Ouvrabilité des bétons autoplaçants

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés précitées, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité et résistance à la ségrégation). Pour résumer, nous présentons dans le tableau 1.1, les propriétés des BAP, les moyens pour les caractériser et les actions entreprises pour leur mise en œuvre.

Tableau 1.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre [BAR, 05].

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation de superplastifiants Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Utilisation de matériaux de grande surface granulaire
	Réduction de la séparation de phases	Utilisation d'agents de viscosité Réduction du rapport E/C
		Réduction de la taille maximale des granulats

Capacité de passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction de la taille maximale des granulats ainsi que le volume granulaire
---------------------	------------------------------------	--

1.3. Caractérisation des BAP

1.3.1. A l'état frais

Parmi les essais préconisés pour valider une formule de BAP, on regroupera ceux qui sont disponibles dans notre laboratoire (EOLE) dans le tableau 1.2 avec leurs valeurs cibles recommandées par l'AFGC :

Tableau 1.2 : Essais & valeurs cibles caractérisant le BAP à l'état frais.

Essais	Classe	Valeurs cibles préconisées
Etalement au cône d'Abrams	SF ₁	550 - 650 mm
	SF ₂	660 - 750 mm
	SF ₃	760 - 850mm
Ecoulement au V-funnel	VF ₁	t ≤ 8 s
	VF ₂	9 ≤ t ≤ 25 s
Boite en L	H ₂ /H ₁	≥ 80 %
	T ₂₀	< 1,5 s
	T ₄₀	< 3,5 s
J-Ring	SF - SFJ _{ring}	< 5 cm
stabilité au tamis GTM		0% ≤ P ≤ 15%
		15% ≤ P ≤ 30%
		P ≥ 30%

1.3.2. A l'état durci

Dans cette partie, on fera une comparaison des propriétés à l'état durci entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires, en recueillant les résultats d'études effectuées à l'échelle nationale et internationale.

1.3.2.1. Propriétés mécaniques

1.3.2.1.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est l'une des plus importantes propriétés du béton durci. Comparativement aux bétons ordinaires, les bétons autoplaçants suivent les mêmes évolutions de résistances à la compression [KLA, 02]; d'ailleurs, jusqu'à l'âge de 28 jours, il n'y a pas de différence significative entre les résistances atteintes par les deux bétons confectionnés à l'aide de mêmes compositions, sauf pour le cas où le béton autoplaçant est préparé avec le même rapport E/C que le béton vibré, dans ce cas, la résistance du BAP est meilleure [KLA, 02].

La figure 1.2 montre, qu'un béton autoplaçant confectionné avec les fillers calcaires développerait de meilleures résistances à la compression par rapport aux autres additions minérales.

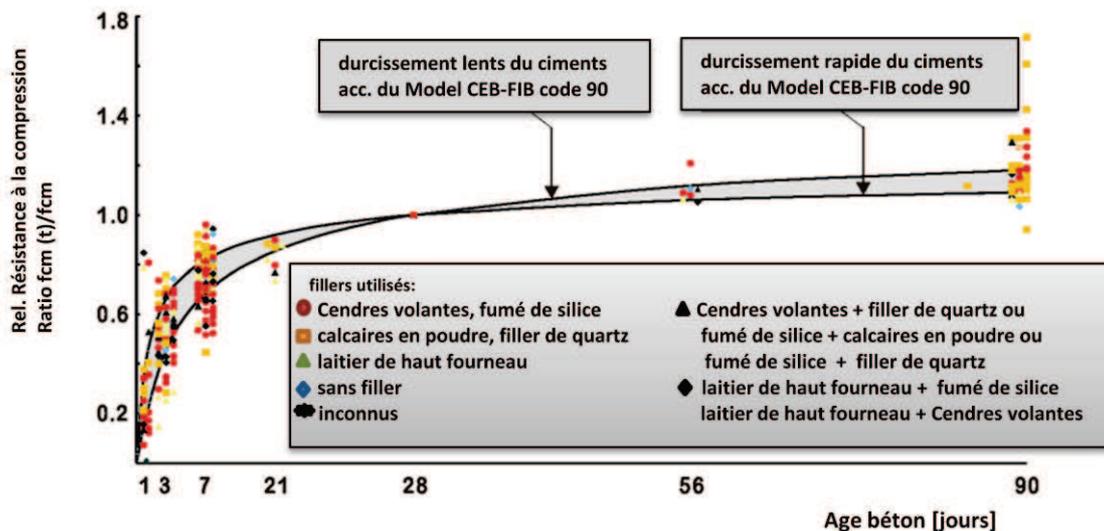


Figure 1.2 : Développement des résistances à la compression en fonction du temps [KLA, 02].

En n'utilisant que des fillers calcaires, la figure 1.3 montre que jusqu'à l'âge de 28 jours, les résistances à la compression des bétons autoplaçants seraient inversement proportionnelles aux taux de substitutions du ciment par ces additions [HAD, 04].

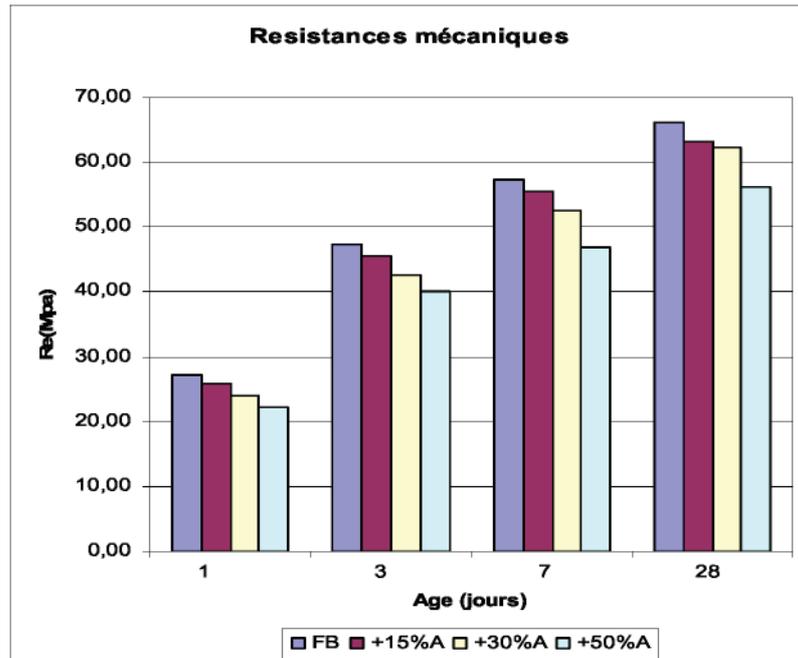


Figure 1.3 : Résistances en compression [HAD, 04].

Dans une autre étude réalisée, à partir de nos propres matériaux, Taleb a montré qu’une réduction du rapport E/C de 0,50 à 0,47 pour un BAP, avec un taux de 20% de fillers et qui a d’ailleurs répondu aux critères de l’AFGC, permet d’améliorer la résistance de 18% [TAL, 09].

La même étude a aussi montré que la décroissance de résistance en fonction des fillers est toujours linéaire, cependant la tangente de la droite à tendance à diminuer en réduisant le rapport E/L (figure 1.4).

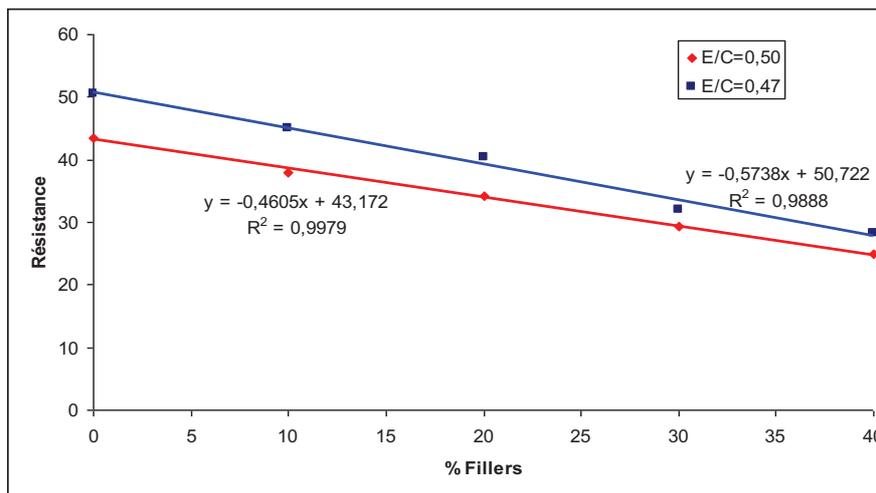


Figure 1.4 : Résistance à la compression à 28 jours en fonction du pourcentage de fillers [TAL, 09].

1.3.2.1.2. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton dépend des modules de Young des différents composants et de leurs pourcentages en volume. [KLA, 02] a démontré que le module d'élasticité des BAP peut être jusqu'à 20% inférieur par rapport au béton conventionnel ayant la même résistance en compression et fabriqué par les mêmes granulats (figure 1.5).

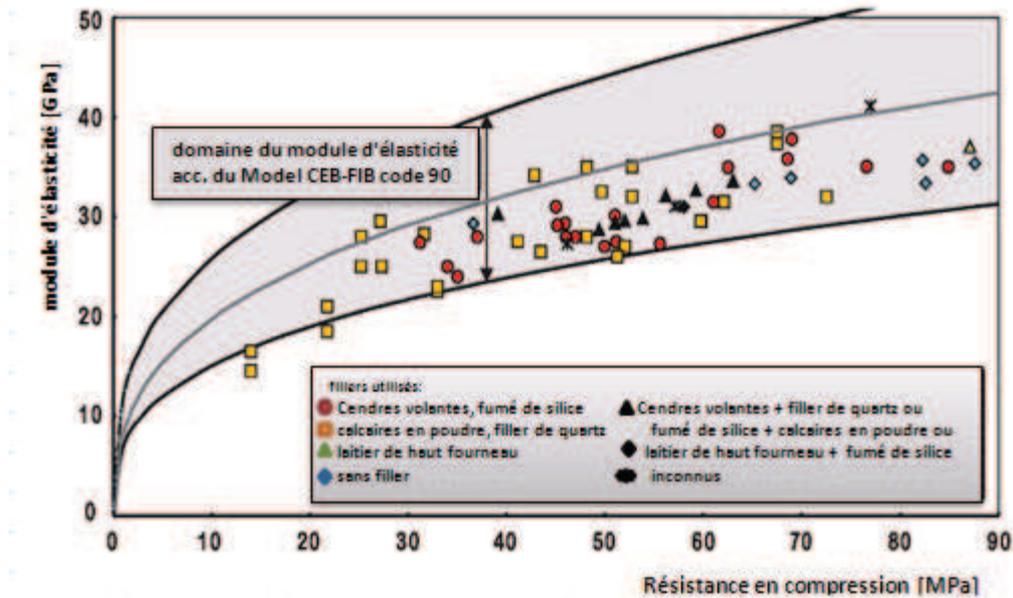


Figure 1.5 : Comparaison des modules d'élasticité de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [KLA, 02].

Pineaud [PIN, 07] observe des valeurs de déformations à la rupture très proches pour les BAP et les BO. Parallèlement au volume de pâte, il est observé une diminution du module avec l'augmentation du rapport E/L (Résultat en accord avec la diminution de la résistance en compression et la diminution de la compacité de la matrice) [PIN, 07].

1.3.2.1.3. Résistance à la traction

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer cette résistance [KON, 01]. En effet l'augmentation de la quantité de sable et / ou du volume de fines, entraîne une élévation de la résistance en traction.

On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus. Pour certains auteurs [KLU, 03 ; KON, 01], la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BO. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BO (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris par Pineaud [PIN, 07]. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

1.3.2.1.4. Déformations et fluage

Les bétons autoplaçants subissent des déformations différées sous charge plus importantes que celles des bétons ordinaires vibrés dans la même gamme de résistance [ASS, O5].

Les travaux de [BEN, 09], ont montré que l'augmentation du volume de pâte, entraînée par l'ajout de fillers, conduit à des déformations différées plus importantes pour les BAP en les comparant avec le BO. Cela peut être expliqué selon l'auteur par la présence d'additions minérales dans les BAP qui lui offre des pores plus fins que ceux des bétons vibrés. En effet, la pression capillaire étant inversement proportionnelle aux rayons des pores, celle-ci est d'autant plus forte dans les BAP, ce qui engendrerait un fluage plus important dans ces bétons, par comparaison aux bétons vibrés correspondants (Figure 1.6).

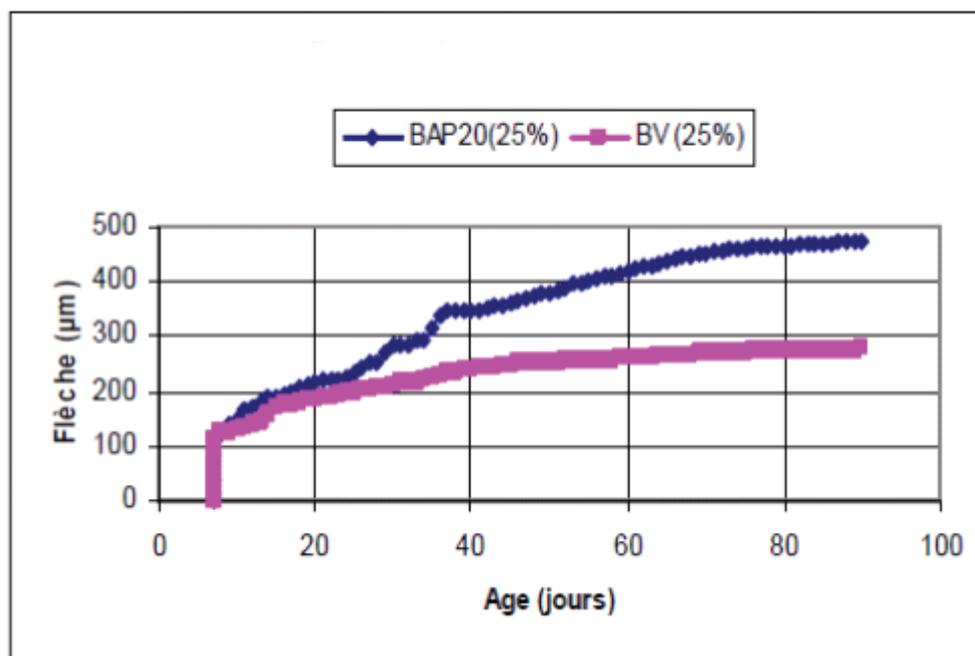


Figure 1.6 : Influence du type de béton sur le fluage [BEN, 09].

1.3.2.1.5. Retrait

Pour une même classe de résistance, le coefficient de dilatation thermique au jeune âge (0-24 heures) est équivalent pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires [ASS, O5]. Le retrait au jeune âge en dessiccation des bétons autoplaçants est supérieur à celui des bétons ordinaires (en particulier pour les faibles gammes de résistance).

[BEN, 09], a montré que le retrait total du BAP est plus élevé que celui du béton traditionnel d'égale résistance. L'ordre de grandeur de cette déformation est aux alentours de 450 µm/m (Figure 1.7).

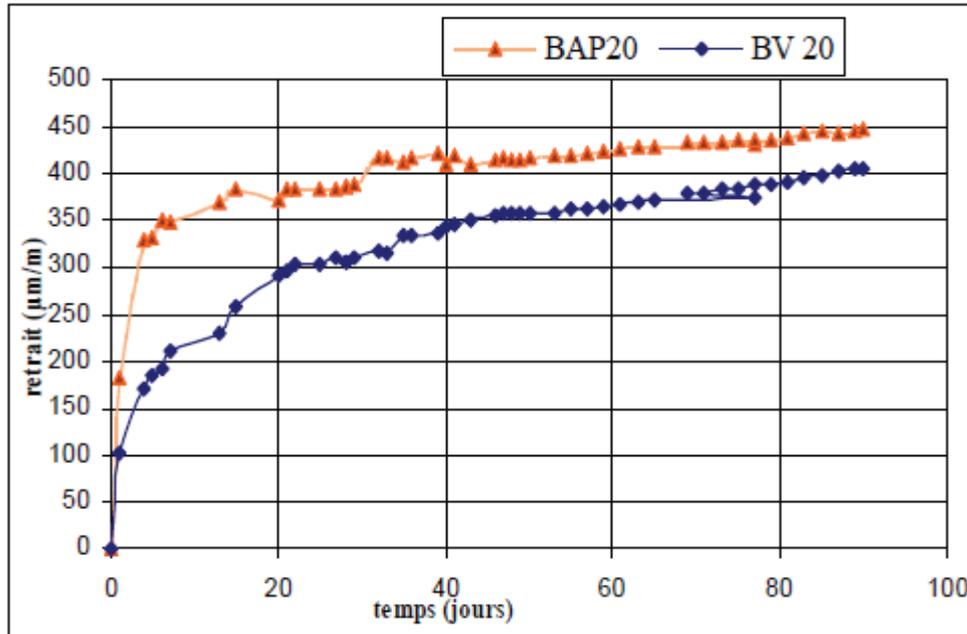


Figure 1.7 : Influence du type de béton sur le retrait [BEN, 09].

1.3.2.2. Propriétés physico-chimiques des BAP

Dans le domaine physico-chimique, les résultats des essais expérimentaux (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlorures, absorption d'eau, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) ont été comparés en fonction de la résistance mécanique pour les deux types de béton (BAP et BO), [ASS, 05].

La perméabilité à l'oxygène des bétons autoplaçants est inférieure à celle des bétons ordinaires vibrés pour une gamme de résistance donnée.

Il n'y a pas de différence significative entre les BAP et les BO en termes de diffusion des ions chlorures et d'absorption d'eau par capillarité. A résistance équivalente, le taux de carbonatation et la cinétique de lessivage au nitrate d'ammonium des deux types de béton restent comparables. Ces propriétés évoluent avec la résistance en compression de manière identique pour les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

Dans un travail réalisé au sein de notre laboratoire par Touil [TOU, 09], une comparaison a été faite entre un BO et un BAP sur l'évaluation du coefficient de diffusion, il a trouvé que le flux des ions chlorure d'un BAP est plus grand de l'ordre de 9 % par rapport à celui d'un BO.

1.4. Constituants et leur influence dans la formulation des BAP

Toute formulation passe par la compréhension de l'influence de chaque constituant sur les propriétés d'écoulement du béton. Le rôle d'un constituant dépend essentiellement de son état (fluide & solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique. Ainsi, nous allons décrire les caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton autoplaçant (granulats, ciment, additions minérales, adjuvants et eau), et les paramètres influents.

Un bilan sur les rôles des constituants influents dans la formulation des bétons autoplaçants est représenté dans le tableau 1.3 sous forme de synoptique général. La dernière colonne exprime l'influence de l'augmentation du dosage du constituant ou de la valeur du paramètre correspondant.

Tableau 1.3 : Rôles des principaux paramètres dans l'écoulement et la formulation des BAP [BAR, 05].

Constituants et paramètres principaux	Rôles principaux dans la formulation	Influence sur le seuil de cisaillement et la viscosité
Eau (E)	Fluidité et hydratation (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Diminution
Ciment (C)	Liant (lié à la concentration volumique en solides et au rapport E/C)	Augmentation
Concentration volumique en solides	Encombrement, plus de frictions entre les particules	Augmentation
Granulats	Réduction du coût du béton, performances mécaniques variables selon le type	Selon le type
Additions minérales	Optimisation du squelette granulaire du béton, avantages environnementaux et économiques	Selon le type (demande en eau)
Filler calcaire (F)	Amélioration de l'écoulement au dessous du dosage critique	Dépend du dosage
Superplastifiants (SP)	Déflocculation, dispersion des particules de Ciment	Diminution
Agents de viscosité (AV)	Résistance à la ségrégation, cohésion	Augmentation

1.5. Interactions entre constituants

L'interaction étant principalement entre les constituants composant la pâte de ciment qui enveloppe le squelette granulaire, El Barrak [BAR, 05], a étudié cette interaction en exploitant les résultats d'un plan de mélange élaboré pour obtenir une pâte de ciment au critère autoplaçante, composée de cinq constituants (ciment (C), eau (E), filler (F), superplastifiant (SP) et agent de viscosité (AV)).

Partant d'une analyse des diagrammes ternaires avec deux constituants hors plan, le sens et le niveau de la réponse sont étudiés.

El Barrak a défini 3 types d'interactivité :

- Interactivité faible lorsqu'il n'y a ni changement de niveau ni de sens des courbes iso-réponses.
- Interactivité synergique lorsque les courbes iso-réponses conservent le même sens de variation mais lorsque le niveau de la réponse est différent.
- Interactivité antagoniste lorsque le sens des courbes iso-réponses s'inverse et que le niveau des réponses est différent.

Le tableau 1.4 regroupe les interactivités entre les différents constituants pour les réponses étudiées :

Tableau 1.4 : Interactivités entre les constituants pour toutes les réponses [BAR, 05].

Type de réponse	Type d'interactivité		
	Faible	Synergique	Antagoniste
Seuil de cisaillement statique	C-F C-SP C-AV F-SP F-AV SP-AV à dosages faibles	SP-E	SP-AV à dosages élevés AV-E à dosages élevés
Etallement	C-F C-SP C-AV F-SP F-AV AV-E à dosages faibles	SP-E SP-AV à dosages faibles	SP-AV à dosages élevés AV-E à dosages élevés
Viscosités	C-F C-AV F-SP F-AV SP-AV à dosages faibles	SP-E à dosages faibles	C-SP AV-E à dosages élevés SP-AV à dosages élevés SP-E à dosages élevés

D'après le tableau 1.4, on remarque que le filler interagit peu avec les autres constituants, ce qui confirme sa nature inerte. Par ailleurs, le superplastifiant et l'agent de viscosité ont une interactivité antagoniste à dosages élevés pour toutes les réponses.

Pour interpréter ces résultats, une compréhension de l'action physico-chimique des différents constituants sur l'écoulement des mélanges cimentaires est nécessaire.

Dès lors que le ciment et le filler calcaire sont mis dans l'eau, ils se dissolvent à des intensités diverses, dépendant de la taille et de l'organisation superficielle des grains (le filler calcaire se dissout nettement plus faiblement que le ciment). Il en résulte une augmentation d'ions dans la solution interstitielle : alcalins (Na^+ , K^+), sulfates (SO_4^{2-}) en raison de la présence de gypse dans le ciment, mais surtout calcium (Ca^{2+}) et hydroxydes (OH^-). Cette concentration ionique rapide accroît la force ionique de l'espace inter-solide et élève rapidement le pH de la suspension en raison de la libération des OH^- .

Les actions de SP et AV sur les propriétés rhéologiques des mélanges sont gouvernées par la force ionique et le pH qui dépendent eux-mêmes de la concentration en solides. Une compétition entre eux, notamment dans les interactions avec les ions calcium mais vraisemblablement aussi avec les alcalins, et la plus grande quantité de l'un ou de l'autre de ces produits vont régir le comportement final de la suspension.

El Barrak [BAR, 05] a relevé dans cette étude, sur le seuil et la viscosité, une interaction faible qui permet à SP et AV d'agir indépendamment l'un de l'autre lorsqu'ils sont en faible dosage et une interaction antagoniste lorsqu'ils sont à dosages élevés dans le mélange. A l'exception de la réponse étalement, où il y a une interaction synergique même à faible dosage.

Une interaction antagoniste régit de la compétition entre SP et AV dans l'utilisation des ions calcium qui sont parallèlement impliqués dans les mécanismes de nucléation/croissance.

C'est donc un équilibre entre SP et AV qu'il s'agit de trouver pour obtenir un mélange fluide mais stable, représentatif du comportement autoplaçant.

1.6. Méthodes de formulation des BAP

Différentes techniques de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une approche expérimentale plus ou moins lourde.

Parmi les techniques de formulation les plus répandues, nous citons :

- La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires,
- La méthode basée sur l'optimisation des mortiers,
- La méthode chinoise.
- La méthode basée sur l'optimisation de la pâte.

La méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires, réside dans la nécessité d'acquérir le logiciel (Bétonlab Pro), ce qui présente un inconvénient majeur dans certains laboratoires.

Les bétons autoplaçants obtenus par la méthode basée sur l'optimisation du mortier sont loin d'être économique car ils comportent un volume de pâte très important et peuvent conduire à des problèmes de retrait.

En parallèle, la méthode chinoise utilise une relation empirique pour estimer le dosage en ciment fondée sur des données empiriques provenant du Taïwan. Elle ne peut pas donc être appliquée dans d'autres régions.

Dans notre étude, nous nous baserons sur la méthode de l'optimisation de la pâte. Cette approche a tendance à trouver le volume de pâte minimum nécessaire pour répondre aux critères des BAP. Elle permet ainsi à optimiser le coût des BAP.

1.6.1. Méthode basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire [SED, LAR 99]. Elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Ce modèle fait intervenir deux notions physiques :

- La compacité virtuelle du mélange, noté γ : la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent des additions fines aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, noté C est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- Indice de serrage K : grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i on définit un indice de serrage K_i . Plus ce dernier est élevé plus les contacts entre les grains d'une même classe sont importants et plus le seuil de cisaillement τ_0 est significatif.

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, la demande en eau du ciment avec superplastifiant, la demande en eau des fillers avec superplastifiant et le dosage à saturation du superplastifiant pour le ciment.

1.6.2. Méthode basée sur l'optimisation du mortier

Cette méthode, proposée initialement par des chercheurs Japonais [OKA 95, OUC 99, HAY 95 et NAG 95], est, également, nommée Méthode Japonaise. Elle permet l'obtention de formulations fortement dosées en ciment et conduit à des volumes de pâtes importants. Les bétons qui en découlent sont sous dosés en granulats, surdosés en liant et économiquement peu viables.

La méthode repose sur les concepts suivants :

- Quantité de gravillons limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume des grains et le volume total du système (grains+vides)) afin de minimiser les risques de blocage.
- Volume du sable arbitraire de l'ordre de 40% du volume total de mortier.
- Rapport $\frac{E}{Poudre}$ et dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel. Ces essais permettent de calculer deux paramètres : $\Gamma_m = \frac{(D)^2 - (D_0)^2}{(D_0)^2}$ et $R_m = \frac{10}{t}$ où D est l'étalement, D_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs [SED, 99] et [JIN, 02] et [BET, 05] montrent que pour un BAP, $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$.

Tableau 1.5 : Exemples de différentes compositions utilisées au Japon (kg/m^3) [TUR, 04].

	Ciment	Laitier	Cendres	Filler	Sable	Gravillon	Eau	SP	Agent de viscosité
NAK. 95	200	200	100	0	704	898	165	6	0
HAY. 95	180	220	100	0	753	926	170	7,7	1,5
YUR. 92	300	0	0	200	700	910	170	8	0,2

1.6.3. Méthode de formulation chinoise

Dans les Pays Bas et beaucoup d'autres pays européens, la méthode japonaise a été adoptée et employée comme un point de départ pour le développement des BAP. Plus récemment, Su N. et col. [SU, 01] ont proposé une nouvelle méthode pour formuler le BAP basé, au début, sur la compacité des granulats (sable et gravier) et, puis, sur le remplissage des vides des granulats avec la pâte.

Cette méthode référée en tant que méthode chinoise comparée à la méthode japonaise est plus simple, plus facile pour l'exécution et sauve le coût.

- Etape 1 : Calcul du dosage des granulats

Le facteur de compacité PF « Packing Factor » est le rapport entre la masse des agrégats compactés et la masse des agrégats desserrés.

Le paramètre PF influe sur la teneur des granulats dans le BAP. Une valeur forte de PF implique une grande quantité de gros et de fins granulats utilisés. Par conséquent, la capacité de passage du béton autoplaçant et sa résistance à la compression seront réduits [HIL, 09].

Donc il est très important de connaître la valeur optimale de PF pour répondre aux exigences des propriétés des BAP.

La proportion de gros et de fins granulats peut être calculée par les deux équations suivantes :

$$M_g = PF \times \rho_{gL} \left(1 - \frac{S}{G}\right) \quad [1.1]$$

$$M_s = PF \times \rho_{sL} \frac{S}{G} \quad [1.2]$$

M_g : proportion de gros granulats (Kg/m^3),

M_s : proportion du sable (Kg/m^3),

ρ_{gL} : masse volumique apparente des gros granulats (Kg/m^3),

ρ_{sL} : masse volumique apparente du sable (Kg/m^3),

- Etape 2 : Calcul du dosage de ciment

[JSCE, 98] utilise un dosage en ciment entre 270 et 290 Kg/m^3 . En général, les recommandations en Tawain imposent pour le BHP ou le BAP une résistance à la compression égale à 20 psi (0,14 MPa) /Kg de ciment. Donc, le dosage de ciment est défini comme :

$$C = \frac{\sigma'_c}{20} \quad [1.3]$$

C : dosage en ciment (Kg/m^3)

σ'_c : résistance à la compression (psi)

- Etape 3 : Calcul du dosage en eau

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport $\frac{E}{C}$ déterminé expérimentalement.

1.6.4. Méthode basée sur l'optimisation de la pâte

1.6.4.1. Introduction

En 1918, D. A. Abrams a proposé une théorie concernant une méthode de mélange de béton dans son document «Conception de mélanges de béton». Il s'agit du rapport de l'eau sur ciment et la proportion de gros granulats. Et en 1940, Kennedy a proposé la "Théorie de la pâte en excès» [KEN, 40], qui est essentielle à la compréhension du mécanisme de l'ouvrabilité du béton frais. Sa théorie explique le fait que pour atteindre la maniabilité, il est nécessaire d'avoir non seulement assez de pâte de ciment pour couvrir la surface des agrégats, de manière à minimiser la friction entre eux, mais aussi un excès en plus pour lui donner une meilleure fluidité.

La figure 1.8.a montre le vide qui résulte entre les agrégats en contact. En ajoutant de la pâte de ciment, ces agrégats serrés sont ensuite séparés par une couche de pâte de ciment autour d'eux (figure 1.8.b). Aussi il a pu constater que le vide est rempli d'une partie de cette pâte de ciment.

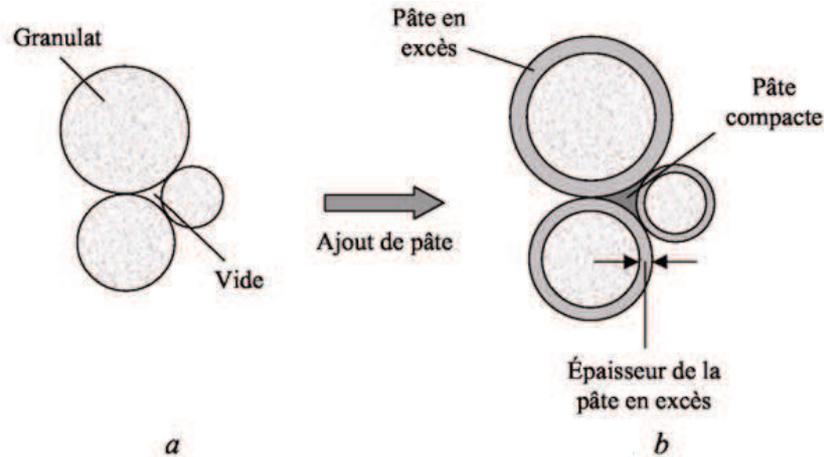


Figure 1.8: Illustration de la théorie de la pâte en excès.

L'ajout de la pâte de ciment va changer l'interaction entre les agrégats. C'est en quelque sorte comme un effet de dispersion, c'est à dire, les agrégats sont repoussés les uns des autres. Sans une couche de pâte de ciment autour d'eux, le mouvement entre les agrégats générerait beaucoup de frottement et de ce fait, la maniabilité sera impossible.

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

Afin d'appliquer cette théorie, il est nécessaire de définir ses principaux paramètres. La figure 1.9 montre un échantillon de béton où les granulats sont bien espacés par la pâte de ciment. En imaginant que les granulats de l'échantillon sont compactés au maximum, nous allons extraire la pâte en excès V_{PE} qui couvre les granulats. Le volume restant est constitué des granulats compactés et de la quantité de pâte nécessaire pour remplir les vides du squelette. Ce volume restant correspond donc au volume apparent des granulats compactés ; il est ainsi composé de deux volumes, le volume solide des granulats V_{GR} et le volume de la pâte compacte V_{PC} .

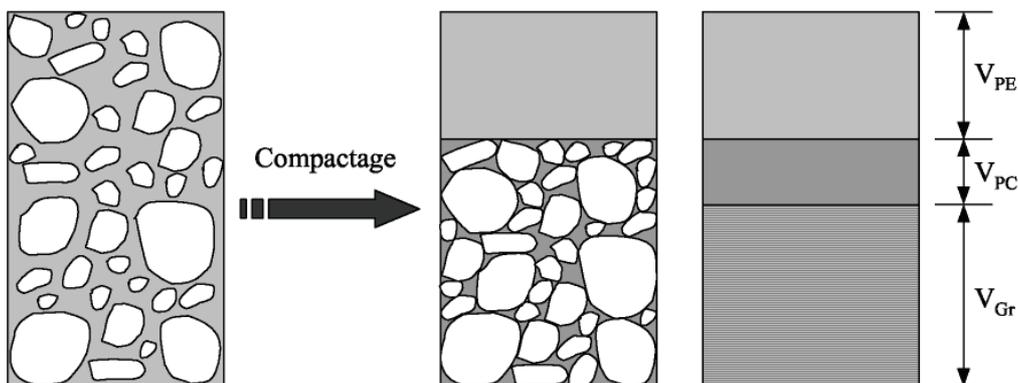


Figure 1.9: Théorie de la pâte en excès – composition d'un béton [OH, 99].

1.6.4.2. Travaux d'OH et col. [OH, 99]

OH et col. [OH, 99] ont obtenu par l'expérimentation, des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

$$e_{PE} = \frac{V_{PE}}{S_{Granulats}} \quad [1.4]$$

Où :

e_{PE} : épaisseur de la pâte en excès répartie sur toute la superficie des granulats,

V_{PE} : volume de la pâte en excès.

Avec :

$$V_{PE} = V_P - V_{PC} \quad [1.5]$$

V_P : Volume de la pâte.

V_{PC} : Volume de la pâte compacte.

V_P étant connu, la détermination du volume de la pâte compacte (V_{PC}) correspond à calculer le volume des vides dans un échantillon de granulats compactés.

1.6.4.3. Travaux de Tangtermsirikul, Pettersson et Bui [TAN, 95] [PET, 99] [BUI, 99]

C'est une approche similaire du dosage de la pâte, mais cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. Dans ce cas, le volume de la pâte est supposé jouer deux rôles dans un BAP. D'abord, il fluidifie le matériau en limitant les contacts entre les granulats et ensuite, il écarte suffisamment les gravillons pour éviter la formation d'amas contre les armatures, responsables de blocages lors de l'écoulement. Les auteurs font l'hypothèse qu'il existe un volume de pâte minimal permettant de remplir chacune de ces deux fonctions. Ils proposent les deux critères suivants :

- Critère de fluidité

Le volume de pâte minimal V_{fmini} qu'il faut pour fluidifier 1 m³ de béton s'écrit :

$$V_{fmini} = 1 - \frac{1 - V_{vides}}{C_e} \quad [1.6]$$

Où V_{vides} est la porosité du mélange de sable et de gravillon, mesurée selon la norme américaine ASTM C29/C29M. C_e est un coefficient "d'écartement"; lorsqu'il vaut 1, V_{fmini} est égal à V_{vides} : le volume de pâte remplit la porosité des granulats et lorsque C_e est supérieur à 1, la pâte comble la porosité et écarte les granulats. Ce coefficient est calculé comme suit :

$$C_e = \left(\frac{e_{\text{mini}}}{D_{\text{moyen}}} + 1 \right)^3 \quad [1.7]$$

$$D_{\text{moyen}} = \frac{\sum(m_i \times d_i)}{\sum m_i} \quad [1.8]$$

Où D_{moyen} est le diamètre moyen des granulats (mm); d_i est le diamètre du tamis i (mm); m_i est la masse de granulats retenus sur le tamis i (Kg); e_{mini} est la distance moyenne entre les granulats, minimale pour fluidifier le béton (mm).

La détermination de e_{mini} se fait de manière expérimentale. Des bétons avec des volumes de pâte décroissants sont confectionnés; on considère que le volume limite de fluidité est atteint lorsque l'étalement du béton est inférieur à 65 cm ou lorsqu'il y a ségrégation. Au final, on obtient des courbes donnant la distance e_{mini} en fonction de D_{moyen} pour différents rapports massiques eau sur fines $E / (C + F)$ et diamètres maximaux du gravillon. On notera que les auteurs n'ont choisi que trois paramètres pour décrire e_{mini} ($E / (C + F)$, D_{moyen} , D_{max}) au détriment, par exemple, du dosage en superplastifiant. Ils expliquent ce choix par un souci de simplicité du modèle.

➤ Critère de non-blocage

Il s'agit de calculer le volume V_{bi} qui représente le volume limite de granulats de taille d_i , au-delà duquel le béton ne s'écoule plus dans un milieu confiné, comme la boîte en L. Les auteurs proposent de modéliser V_{bi} linéairement en fonction du rapport de l'espacement e des armatures de la boîte en L et du diamètre d_i . Les auteurs ont remarqués que le volume critique d'un sable quelconque ($e / d_i > 15$) est de 840 l/m^3 : le sable n'est pas prépondérant dans le critère du blocage, si le béton est fluide. Il y a donc un grand nombre d'essais à réaliser pour obtenir une courbe du volume critique.

Le risque de blocage est écrit en fonction du rapport du volume V_i de granulat d_i et de son volume limite V_{bi} .

$$R = \sum_I \frac{V_i}{V_{bi}} \quad [1.9]$$

En posant $R = 1$, il vient l'expression 1.10, qui donne le volume de pâte, pour 1 m^3 de béton, en deçà duquel il y a risque de blocage lors de l'écoulement du béton en milieu confiné.

$$V_{b\text{mini}} = 1 - \frac{\rho_g + (\rho_s - \rho_g) \times N_g}{\sum \frac{\rho_{gi} \times N_g \times \rho_s}{V_{bi}} + \sum \frac{\rho_{si} \times (1 - N_g) \times \rho_g}{V_{bi}}} \quad [1.10]$$

ρ_g et ρ_s sont les masses volumiques respectives du gravillon et du sable (kg/m^3) ; N_g est le rapport entre la masse de gravillon et la masse totale des granulats ; ρ_{gi} (respectivement ρ_{si}) est la proportion dans le gravillon (respectivement dans le sable) du diamètre d_i (%).

➤ Application de l'approche

On trouve l'application de cette approche, dans les travaux de P. Turcry [TUR, 04], pour le calcul des volumes de pâtes minimaux suivant les deux critères, il a utilisé les données publiées [BUI, 99] concernant le coefficient e_{mini} et la fonction $V_{\text{bi}} = f(e/d_i)$. Il a constaté que le critère de non-blocage est largement prépondérant par rapport à celui de la fluidité pour différentes répartitions entre gravillons 6/10 et 10/14, et quelque soit le rapport $E/(C+F)$ (compris entre 0,3 et 0,4).

Le critère de non-blocage a donné un volume de pâte fonction croissante du rapport masse gravillon sur sable (G/S).

Les essais de caractérisation réalisés mettaient en évidence le manque de fiabilité du volume de pâte calculé par la méthode : l'essai d'écoulement dans la boîte en L n'a été validé pour aucune des compositions. Cependant, la loi $V_{\text{bi}} = f(e/d_i)$, donnant le volume de gravillon limite, est issue de données de la littérature, donc calée pour des gravillons différents de ceux utilisés dans son étude.

Enfin, pour appliquer correctement la méthode, il faudrait déterminer expérimentalement les différents coefficients, nécessaires aux deux critères, sur des bétons fabriqués avec les constituants utilisés.

1.6.4.4. Travaux de Bui [BUI, 99,02]

Afin de déterminer la proportion minimale de la pâte nécessaire pour fluidifier le béton, d'autres auteurs [BUI, 99,02], ont défini le paramètre qui correspond à la différence de diamètres entre celui du granulat couvert par de la pâte ($D_i + 2.e_i$) et celui du granulat (D_i), divisée par deux (figure 1.10). Les grains sont assimilés à des sphères.

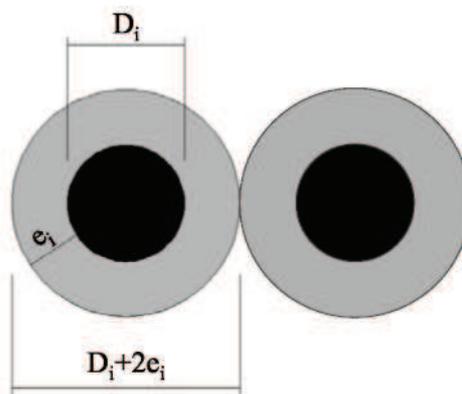


Figure 1.10: Épaisseur de pâte en excès autour d'un granulat dans une classe donnée.

Ayant la distribution granulaire en masse et donc en volume des squelettes granulaires des bétons et le diamètre moyen D_{mi} , de chaque classe granulaire i , on peut facilement remonter au diamètre moyen de tous les granulats D_M :

$$D_M = \frac{\sum(m_i \cdot D_{mi})}{\sum m_i} \quad [1.11]$$

Où m_i est le pourcentage en masse des granulats dans la classe i .

Ainsi pour un squelette granulaire de diamètre moyen D_M , le volume total de la pâte en excès V_{PE} est calculé comme suit :

$$V_{PE} = \frac{\pi}{6} (D_M + 2e_M)^3 - \frac{\pi}{6} (D_M)^3 \quad [1.12]$$

Où e_M est l'épaisseur moyenne de pâte en excès dans le béton. Ce paramètre peut être déduit en développant l'équation précédente (1.12) [BUI, 02] :

$$e_M = \frac{D_M}{2} \left(\sqrt[3]{1 + \frac{V_{PE}}{V_G}} - 1 \right) \quad [1.13]$$

Où V_G est le volume des granulats couverts par de la pâte en excès dans le béton.

1.6.4.5. Travaux d'El Barrak [BAR, 05]

Le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions de Toulouse en France (LMDC) lors de la thèse de doctorat de M. El Barrak, s'est basé sur la théorie de la <<pâte en excès>> pour quantifier le volume de pâte nécessaire à l'écoulement autoplaçant. Il avait défini un facteur d'homothétie entre les diamètres des granulats bruts et enrobés tout en supposant que l'épaisseur de la pâte en excès, est proportionnelle à la taille du granulat (figure 1.11), en prenant en compte des paramètres, tels que le diamètre représentatif d'une classe et la compacité maximale de granulats polydispersés.

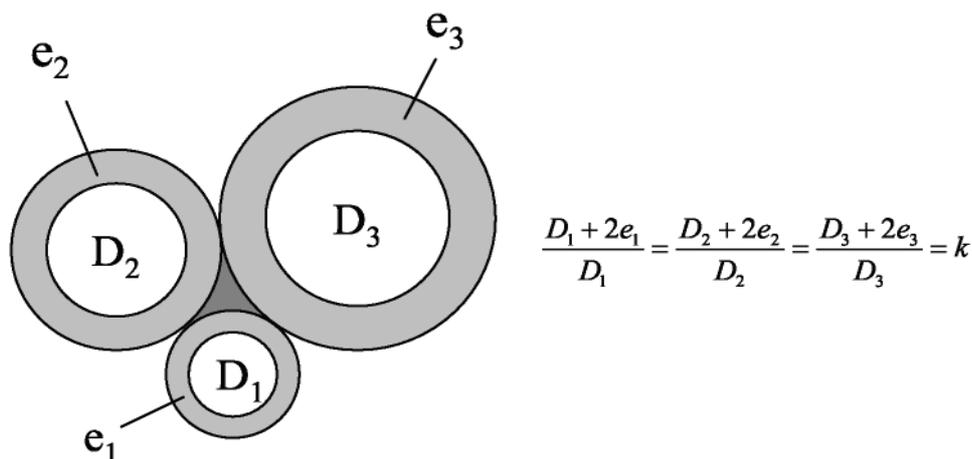


Figure 1.11 : Epaisseur de la pâte en excès proportionnelle à la taille du diamètre [BAR, 05].

La méthodologie proposée est intéressante pour composer un BAP, mais reste bien sûr à confirmer avec un autre domaine expérimental étudié et à différents types de matériaux utilisés.

1.6.4.6. Travaux de Hans et col. [HAN, 06]

Les travaux de Hans sur " l'influence de la teneur et la composition des agrégats sur le comportement rhéologique des bétons autoplaçants" ont montrés que cette influence peut être décrite par "la méthode de la pâte en excès".

La figure 1.12 montre l'influence de la distribution granulométrique notée k sur l'étalement et l'épaisseur de la pâte en excès pour un volume de pâte égale à 352 l/m^3 . Le béton noté "AB16" a donné la valeur maximale de l'épaisseur calculée de la pâte en excès ainsi que la valeur maximale de la valeur d'étalement.

Ce résultat est expliqué par l'auteur, par le fait que le béton "AB16" est composé d'un squelette granulaire qui offre une "distribution granulométrique" ayant la surface spécifique et la porosité la plus faible par rapport aux autres types de béton confectionnés dans l'étude, d'où l'importance du paramètre k .

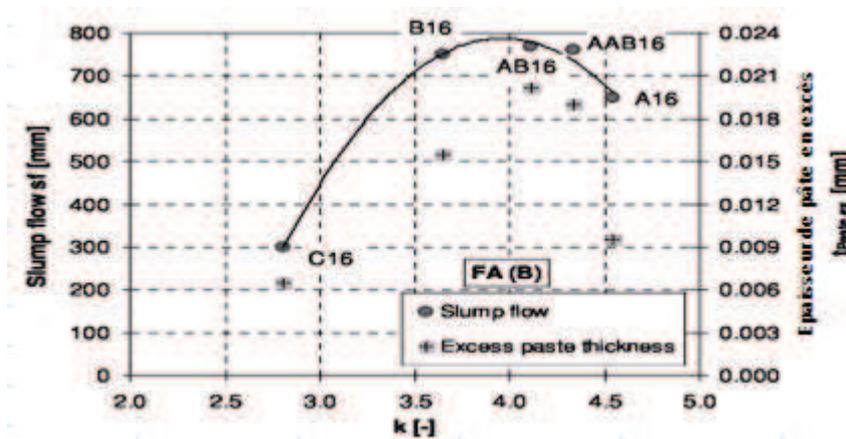


Figure 1.12 : Epaisseur de la pâte en excès et l'étalement en fonction de la distribution granulométrique [HAN, 06].

Aussi, en traçant les différentes propriétés du BAP (seuil de cisaillement, viscosité, étalement et temps d'écoulement t_e au V-funnel) en fonction de l'épaisseur de la pâte en excès (figure 1.13), Hans et al (2006) ont trouvé que l'épaisseur de la pâte en excès est un paramètre adapté pour décrire la consistance et le comportement des BAP.

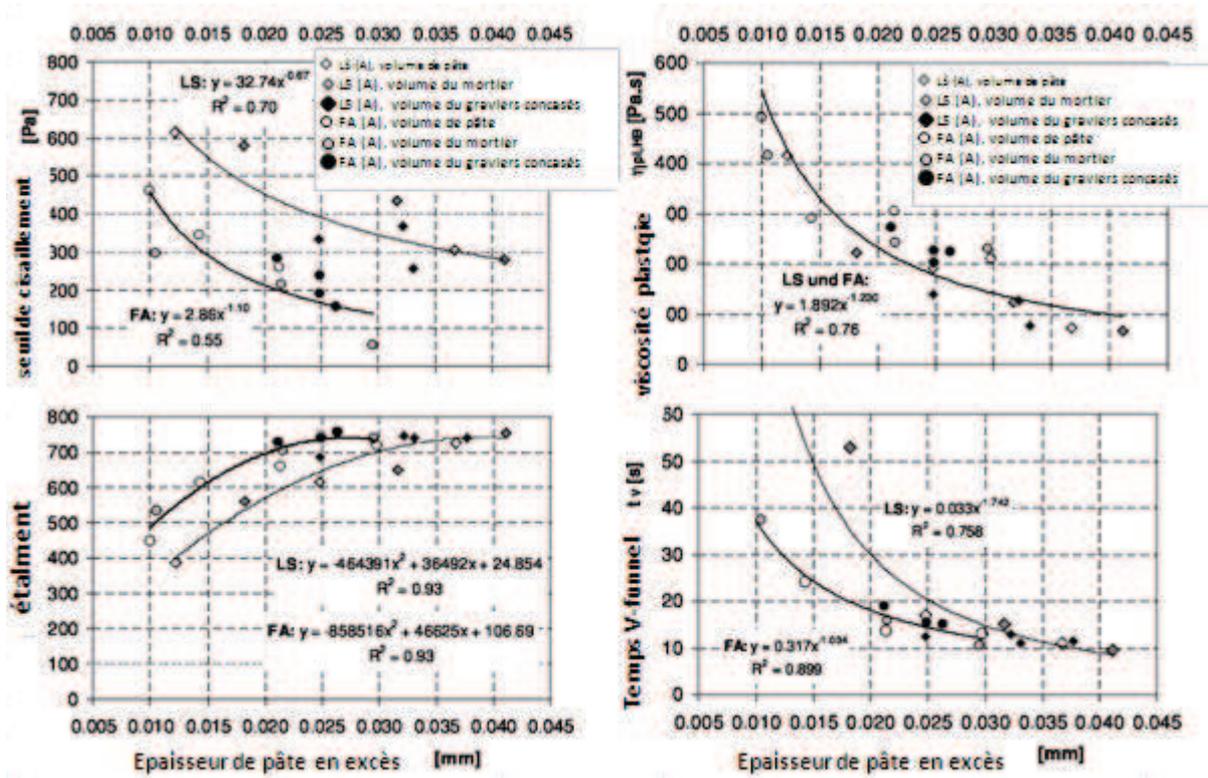


Figure 1.13 : Relation entre les propriétés du BAP et l'épaisseur de la pâte en excès [HAN, 06].

1.6.4.7. Travaux de Mebrouki [MEB, 10]

Dans le cadre d'un travail de thèse de doctorat, Mebrouki [MEB, 10] a validé la méthode proposée par le laboratoire Matériaux et Durabilité des constructions de Toulouse (LMDC), en utilisant des matériaux locaux.

A la différence d'El Barrak, Mebrouki a privilégié la confection des BAP sans avoir eu recours à l'utilisation des agents de viscosité, argumentant cela par la nécessité de valoriser les matériaux locaux, et de surcroît gagner en matière de coût.

De ce fait, la pâte de ciment élaborée à partir d'un plan de mélange basé sur un modèle polynomial traité par le logiciel "NemrodW", est composée de 4 constituants (ciment, eau, filler calcaire et superplastifiant).

Il a trouvé qu'en fixant le paramètre "eau" à 0.305 par exemple (figure 1.14), et en faisant varier les proportions volumiques des autres composants, le paramètre "Sp" est prépondérant: les réponses "étalement & écoulement" sont plus sensibles aux variations de ce paramètre qu'à celles du "ciment" ou du "filler".

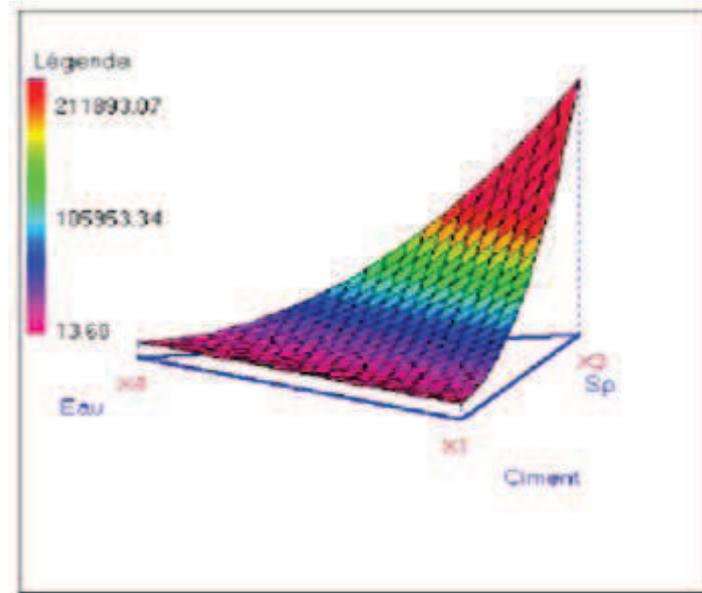


Figure 1.14 : Variation de la réponse – Etalement dans le plan : Ciment, Filler, Sp; composants fixes : Eau = 0.30500 [MEB, 08].

1.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons défini le béton autoplaçant, ses multiples propriétés, leur caractérisation, et les méthodes principales de sa formulation.

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton fluide, homogène, et qui se met en place sans vibration. Il présente des avantages techniques et socio-économiques pour les chantiers de construction par rapport au béton ordinaire traditionnel. Les principales propriétés d'ouvrabilité d'un BAP sont le remplissage (taux de remplissage et vitesse de déformation), la résistance à la ségrégation et la capacité de passage dans les milieux confinés et fortement ferrailés. Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

Les résultats des essais expérimentaux sur des formulations de bétons autoplaçants et de bétons ordinaires, dans les domaines mécanique et physico-chimique ont montré qu'il y avait très peu de différences entre les deux types de béton. Le fluage des BAP semble légèrement supérieur à celui des BO, tandis que toutes les autres propriétés mécaniques (module d'élasticité, retrait) et de transfert (perméabilité à l'oxygène, diffusion des ions chlorés, absorption capillaire, carbonatation accélérée et lessivage au nitrate d'ammonium) peuvent être considérées comme équivalentes entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires.

La formulation des BAP est relativement complexe et nécessite de trouver un bon compromis entre stabilité et fluidité qui sont des propriétés apparemment contradictoires, nous avons détaillé les principales méthodes de formulation de ces bétons qui ont nécessité de longues années de recherches pour leurs mises en œuvre. A ce titre, leurs exploitations pour une utilisation avec des matériaux locaux sont devenues incontournables.

Par conséquent, nous allons passer par une caractérisation des différents constituants qui rentrent dans notre formulation en passant par le squelette granulaire ainsi que la pâte de ciment qui lui est associée.

Enfin, il nous reste à déterminer un paramètre d'interaction entre les granulats et la suspension de pâte de ciment dans le béton afin d'expliquer le rôle joué par la pâte de ciment dans le béton autoplaçant. La théorie de la pâte en excès permet donc de déterminer l'épaisseur de pâte couvrant la surface des granulats, pour remonter ensuite à la détermination des proportions de la pâte et du squelette granulaire.