

Matériaux Innovants

Mr TALEB Omar

Le Béton Autoplaçant

Depuis 1983, le problème de la durabilité des structures en béton était un grand sujet d'intérêt au Japon. A l'origine d'une durabilité insuffisante on retrouvait souvent une densification du béton non conforme aux règles de l'art dû à la décroissance du nombre d'ouvriers qualifiés dans les techniques de vibration d'un béton très ferraillé (zone très sismique). Ce constat fut le point de départ pour le développement du béton autoplaçant. La nécessité de ce type de béton fut proposé en 1986 par le professeur Okamura de l'Université de Kochi (Okamura H. et col. 2000). Il développa le premier prototype d'un tel béton en 1988.

Le BAP est connu comme un béton très fluide, homogène, et qui se met en place sous le seul effet de la gravité.

La qualité du matériau autoplaçant confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire :

Avantages techniques :

- Facilité et rapidité dans la mise en œuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés et de grande hauteur.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.
- Meilleur positionnement final des armatures.
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- Réduction des épaisseurs des pièces ou des structures.
- Mise en place de béton à l'aveugle envisageable : structures enterrées.

Avantages socio-économiques :

- Réduction du coût de la main d'œuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs)
- Réduction des nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction de la pénibilité au travail.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.
- Usure moins rapide des coffrages.
- Utilisation de déchets industriels dans la composition (cendres volantes).

Inconvénients :

- Plus de préparation en amont.
- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux (notamment ciment / adjuvant).
- Etanchéité des coffrages.

- Comportement encore mal connu lors de son vieillissement.
- Retrait.
- Poussées hydrostatiques.

Lexique :

L'origine de l'appellation des bétons autoplaçants (BAP) vient de sa traduction en anglais « Self Compacting Concrete (SCC) – Self Consolidating Concrete (SCC) ».

Les BAP sont divisés en deux familles d'applications. La première emploie le terme "béton autoplaçant", ou BAP, pour désigner les bétons destinés aux applications verticales et éléments massifs (voiles, poutres, piles, etc...). La seconde, sous l'appellation "béton auto-nivellant", ou BAN, désigne les bétons destinés aux applications horizontales (dalles).

1. Le remplissage :

Le béton autoplaçant doit tout d'abord être capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné sous le seul effet de son poids propre, sans aucun apport d'énergie de compactage (vibrations), et avec un débit suffisant.

Le remplissage ou la déformabilité du béton, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Deux aspects sont mis en évidence :

- la capacité de remplissage (déformation) est traduite par le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace.
- La vitesse de remplissage : est traduite par la vitesse d'écoulement du béton.

Pour un bon écoulement du béton, il est impératif de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides qui génèrent des contraintes empêchant l'écoulement.

Il est nécessaire d'augmenter le volume de pâte (ou diminuer le volume de granulats) pour favoriser l'écoulement du béton.

D'autres auteurs ont montré que l'étalement n'est pas uniquement lié à la quantité de pâte ; mais aussi à la fluidité de la pâte.

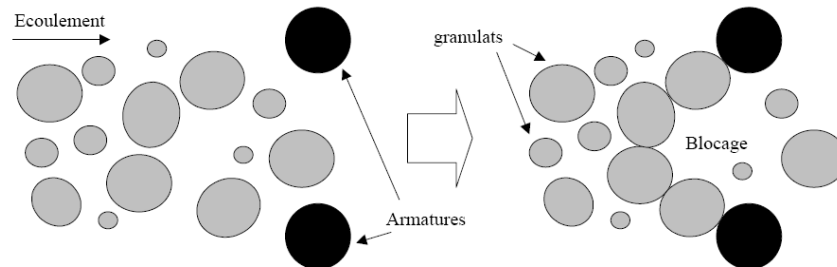
L'utilisation de granulats roulés, de forme plus ou moins sphérique, peut aussi être avantageuse lorsqu'on désire réduire les frictions entre les granulats. Il est à noter que la réduction des frictions et frottements entre les particules fines (liant, additions, fines du sable) n'est possible qu'en augmentant le volume d'eau dans le béton. Or une utilisation excessive d'eau diminue considérablement la résistance à la ségrégation, et conduit à des faibles performances mécaniques du béton à l'état durci.

2. La capacité de passage :

La recherche d'une grande fluidité n'est pas suffisante lors de la formulation d'un BAP. Il est clair que, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures. Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les

armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à travers les granulats au niveau du passage entre les armatures.

Ces granulats qui cisailent le mortier ont tendance à entrer en contact les uns aux autres à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ainsi des arcs peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage (figure 2.2.).



Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures

La réduction de la taille maximale des plus gros granulats, ainsi qu'une amélioration de la granularité peut s'avérer judicieuse pour la capacité de passage. D'un autre côté, pour minimiser les frictions et les frottements entre les agrégats, il est nécessaire de réduire la quantité des granulats dans le béton et accroître le volume de la pâte

3. La résistance à la ségrégation :

Le formulateur de matériaux granulaires doit souvent faire face à des phénomènes de séparation, surtout lorsqu'il manipule des particules grossières (de taille supérieure à quelques millimètres). D'un autre côté, lors du malaxage et de la mise en place, les mélanges granulaires sont soumis à des accélérations (dues à la gravité, aux chocs externes) qui peuvent aussi provoquer certaines séparations au sein du mélange.

Dans un béton, le mortier doit avoir une consistance telle qu'il puisse maintenir les gros granulats en suspension et que, dans un mortier, la pâte de ciment doit avoir une consistance telle qu'elle puisse maintenir les grains de sable en suspension et qu'il faut en outre que les grains de ciment forment une suspension stable dans l'eau. Quand une de ces trois conditions, ou les trois ensembles, ne sont pas remplies, le béton resseue, et/ où l'on voit apparaître un phénomène de ségrégation.

La ségrégation se traduit par la séparation de phases solide et liquide ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions qui peut conduire à un blocage de l'écoulement en zones confinées. En effet, l'eau libre dans le béton est généralement mobile et peut trouver son chemin vers la surface du béton par effet de gravité et de densité indépendamment des solides dans le mélange. Ceci à l'extrême se traduit par une couche de laitance en surface libre du béton.

Pour éviter ce problème, il faut non seulement réduire la quantité d'eau libre dans le béton en réduisant le rapport E/C du béton, mais aussi élever la viscosité de l'eau dans la suspension en utilisant certains agents de viscosité. Ces deux solutions améliorent aussi la cohésion entre les phases.

DEFORMABILITE
Remplissage
(Fluidité, ouvrabilité)

STABILITE
(Résistance à la
ségrégation
statique)

PAS DE BLOCAGE
(Résistance à la
ségrégation
dynamique)

1. Augmenter la déformabilité du mélange

- Utilisation de superplastifiant (agent fortement réducteur d'eau)
- Equilibre eau/fines
- Augmentation de la teneur en eau

2. Réduire les frictions entre les granulats :

- réduction du volume des gros granulats – augmentation du volume de pâte).
- Utiliser une granulométrie de fines continue
- Améliorer la forme et l'angularité des granulats.

1. Limiter la ségrégation

- Limitation du volume des gros granulats.
- Réduction de la taille maximale des granulats.
- Utilisation d'un agent de viscosité.

2. Minimiser le ressuage (eau libre).

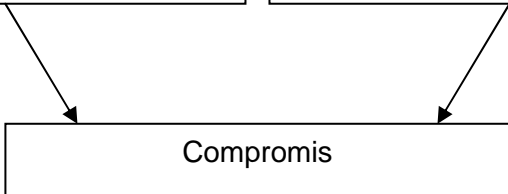
- Minimiser la quantité d'eau.
- Faible rapport eau / fines.
- Utiliser des fines possédant une surface spécifique appropriée (plus grande).
- Augmenter la teneur en agent de viscosité.

1. Améliorer la cohésion pour réduire la ségrégation durant l'écoulement.

- faible rapport eau/fines
- Utiliser un agent de cohésion

2. Espacement des armatures compatible avec le volume et la taille maximale des granulats

- Faible volume de gros granulats.
- Faible taille maximale des granulats
- Utiliser des granulats de forme ronde.
- Augmentation du volume de la pâte.



Actions à entreprendre pour assurer l'écoulement et la stabilité des BAP à l'état frais.

3. Rhéologie des BAP :

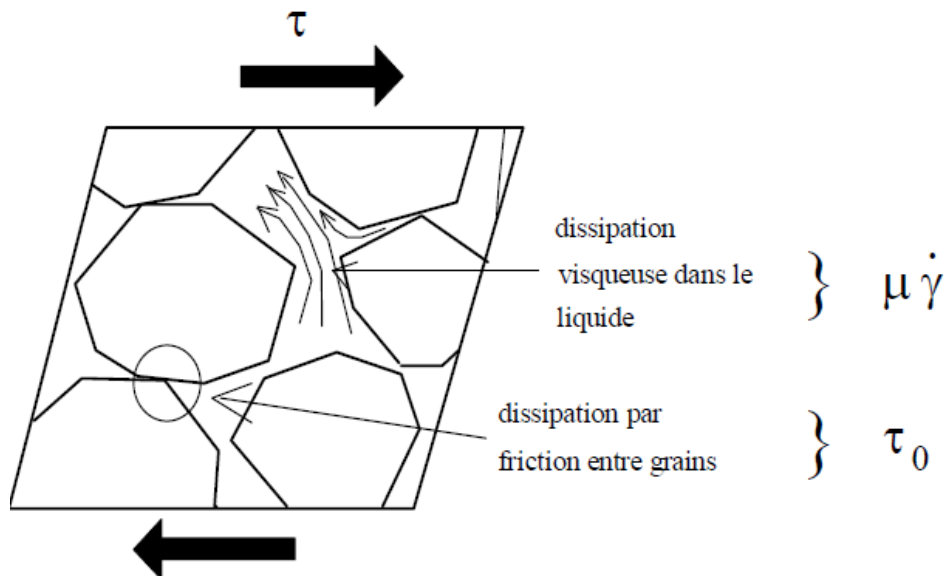
Par définition, le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Le seuil de cisaillement τ_0 est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

La viscosité est définie comme la résistance à l'écoulement de la matière.

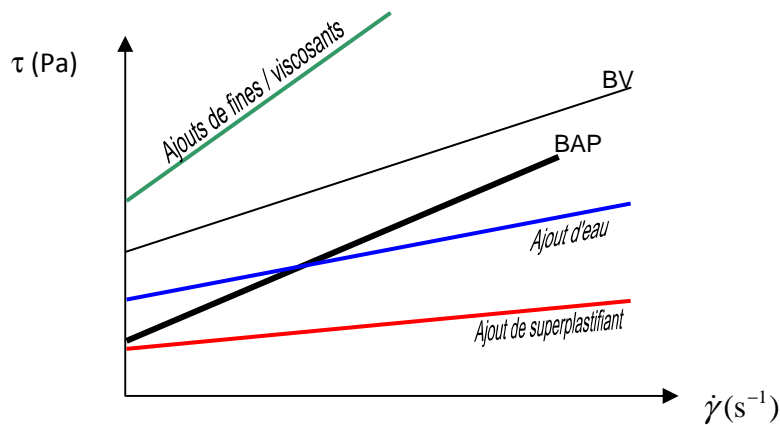
Le béton à l'état frais est considéré comme un fluide Binghamien, qui a pour équation :

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad \text{si } \tau > \tau_0 \quad (2.1.)$$

- Avec :
- τ : la contrainte de cisaillement (Pa),
 - τ_0 : le seuil de cisaillement (le seuil d'écoulement) (Pa),
 - μ : la viscosité plastique (Pa.s⁻¹).
 - $\dot{\gamma}$: la vitesse de déformation (s⁻¹).



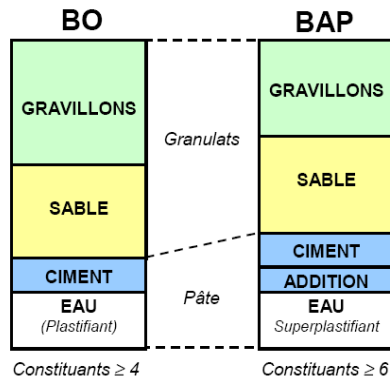
Contribution de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton.



Influence des différents matériaux sur la rhéologie du béton

4. Constituants des BAP

Dans les bétons ordinaires (B.O.) on utilise quatre composantes (ciment, eau, sable, gravier) tandis que dans le béton auto plaçant on utilise au moins six composantes. En plus des composantes déjà citées dans le bétons ordinaires, on ajoute soit des additions minérales comme les fines soit des matériaux organiques comme les adjuvants selon la propriété demandée. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.



Constituants des BO et des BAP

4.1. La Pâte de ciment :

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment, additions, eau efficace, air, adjuvants. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité.

4.1.1. Ciment :

Le ciment est un composant primordial dans la conception des bétons car ses hydrates apportent la cohésion du squelette granulaire, et donc une tenue mécanique du matériau et de la structure en béton.

L'influence du ciment sur l'écoulement est mise aussi en évidence par le rapport E/C qui a une incidence directe sur les différentes propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Cependant, les exigences particulières de fluidité du BAP imposent un dosage en pâte de ciment très élevé, raison pour laquelle ce béton comprend en général aussi des additions minérales.

4.1.2. Additions minérales :

L'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment, contribue non seulement à améliorer certaines de ses propriétés, réduire son coût, mais aussi à protéger notre environnement en réduisant les émissions du gaz carbonique. Ils permettent aussi d'éviter les problèmes d'élévation excessive de la température lors de l'hydratation.

En effet, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet de remplir les micro – vides intergranulaires, contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau. Par conséquent la rhéologie du béton frais, ses performances mécaniques et sa durabilité s'améliorent dans la plupart des applications.

En ce qui concerne les propriétés du béton frais, l'utilisation d'additions se traduit généralement par l'amélioration de l'ouvrabilité, et de la mise en place du béton. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique.

Les additions les plus employées sont : les fillers calcaires, la fumée de silice, les cendres volantes et le laitier de haut fourneau, les cendres volantes. Il est à noter qu'il est possible d'utiliser conjointement plusieurs types d'additions dans la confection d'un béton autoplaçant.

Les additions minérales substituant une partie du ciment agissent généralement en baissant le seuil de cisaillement des bétons.

4.1.3. Eau :

Pour convenir à la confection de bétons, les eaux ne doivent contenir ni composés risquant d'attaquer chimiquement le ciment, les additions, les granulats ou les armatures, ni particules en suspension dont la quantité pourrait modifier ses qualités originelles ou affecter l'uniformité du mélange. Pour cela, l'eau potable sert de référence pour la formulation du béton à cause de sa disponibilité.

Il est à rappeler qu'une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption), une deuxième partie est consommée par l'hydratation du liant, et une troisième partie libre dans la matrice du béton est d'ailleurs responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats. De ce fait, l'eau joue un rôle prépondérant au niveau de l'ouvrabilité du béton.

L'augmentation du dosage en eau entraînera une augmentation de la fluidité du béton en diminuant la concentration en solides, ceci est traduit par une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité. D'un autre côté, l'introduction excessive d'eau provoquera une diminution de la résistance mécanique, ainsi que l'apparition de phénomènes de ressuage et de ségrégation.

4.1.4. Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités afin d'améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la matrice du béton. Il existe plusieurs types d'adjuvant, mais ceux qui sont capables de modifier l'écoulement des bétons autoplaçants, et qui entrent dans leur formulation de base sont les superplastifiants et les agents de viscosité.

4.1.4.1. Les superplastifiants :

La fonction de base d'un superplastifiant dans un mélange cimentaire est la fluidification. Il permet d'augmenter l'ouvrabilité, sans diminuer les résistances à long terme du béton. La fonction « réducteur d'eau » se manifeste par la réduction du rapport E/C pour une même ouvrabilité.

Pour un plastifiant réducteur d'eau, le niveau de réduction d'eau est de l'ordre de 5 à 10%, par contre le superplastifiant peut engendrer une réduction de 10 à 30%.

La réduction du rapport E/C va nous permettre d'augmenter les performances mécaniques du mélange, réduire le retrait. Cette réduction d'eau de gâchage va aussi directement contribuer à la

diminution de la consommation d'eau dans la production des bétons. Ceci est important surtout lorsque l'approvisionnement en eau est souvent un problème.

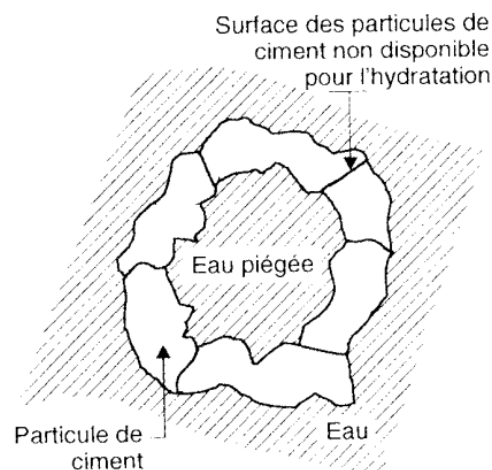
Parmi les effets des superplastifiants sur le béton, on peut aussi citer:

- Un maintien de la maniabilité pour le béton à l'état frais.
- Une amélioration de la compacité,
- Une amélioration de la liaison béton - acier
- Un pompage plus facile du béton (vitesse plus rapide sur des distances plus grandes et à des hauteurs plus élevées, la pression de pompage est aussi diminuée de 20 à 30%)

D'un autre côté les superplastifiants ne sont pas corrosifs et donc n'attaquent pas l'acier.

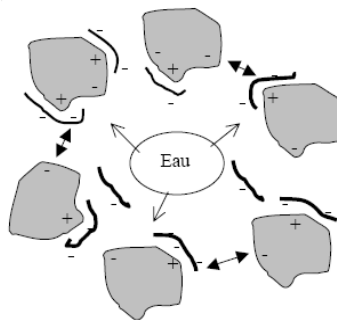
Pour un béton autoplaçant, les superplastifiants recommandés sont de la famille les polycarboxylates.

La fluidification des bétons frais par les superplastifiants peut être expliquée par la dispersion des grains de ciments. Les superplastifiants sont considérés actuellement comme de puissants dispersants. Ils permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.



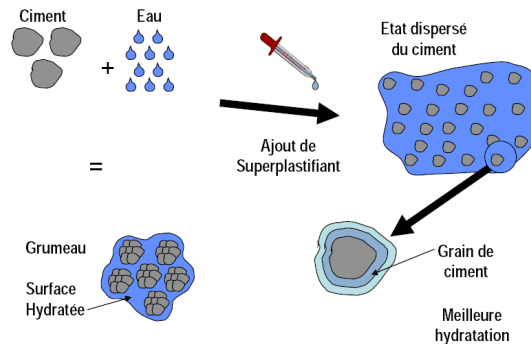
Floc de ciment en l'absence de réducteur d'eau

La défloculation et la dispersion des grains de ciment sont directement liées à l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules.

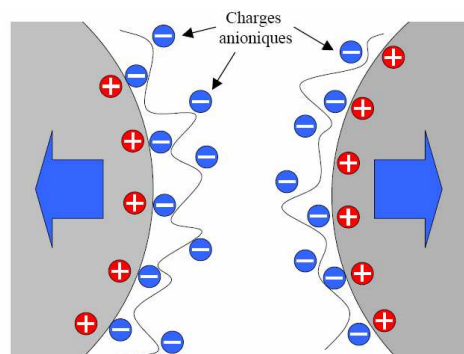


Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment

En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules d'une matrice cimentaire (ciment et additions) peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes aux autres. Les particules vont flocculer et augmenter la résistance à l'écoulement du mélange. Grâce à leurs mécanismes d'action, les superplastifiants provoquent la défloculation de la matrice, et contribuent à faire baisser le seuil d'écoulement.

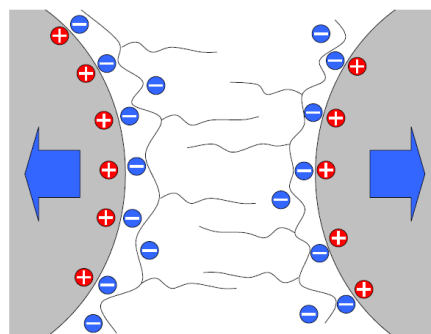


En effet, lorsqu'un superplastifiant s'adsorbe sur un grain de ciment, ses fonctions acides dissociées modifient les charges de surface de la particule et lui confèrent une charge négative. De ce fait, ils minimisent les interactions entre les particules voisines par une force de répulsion électrostatique et donc à une défloculation et une dispersion des solides dans la suspension.



Répulsion électrostatique entre deux particules de ciment

Les superplastifiants, dont la masse molaire est importante ($> 50 \text{ kg/mol}$), présents à l'interface eau/ciment vont également induire une force répulsive à courte distance due à l'encombrement stérique entre deux couches de polymères adsorbés sur des particules voisines. Cet effet stérique contribue aussi à repousser les particules de ciments les unes des autres en contribuant à la dispersion du solide dans la suspension.



Particules de ciment recouvertes de polymères à fort encombrement stérique

Pour un ciment donné, le choix d'un superplastifiant optimal peut se faire par des mesures d'ouvrabilité ou de rhéologie sur béton. Cela s'avère toutefois lourd et fastidieux à mettre en place. C'est pourquoi des méthodes plus simples ont été développées. En effet, les deux essais les plus utilisés pour vérifier la compatibilité entre les superplastifiants et le ciment sont l'essai du minicône et l'essai d'écoulement au cône de Marsh. Ces deux essais permettent d'évaluer l'évolution de la fluidité d'un coulis pendant 1h à 1h30, le laps de temps qui correspond en règle générale à la durée de livraison du béton sur les chantiers.

a. Méthode du cône de Marsh :

Le cône de Marsh est un test d'évaluation de l'ouvrabilité des pâtes de ciments et des coulis. Cette méthode consiste à préparer un certain volume de coulis et à mesurer son temps d'écoulement. L'essai nécessite une quantité de 1,8 Kg de ciment environ. En parallèle, cet essai est réalisé avec un rapport eau/liant assez semblable à celui des bétons confectionnés.



Cône de Marsh

b. Méthode du minicône :

Le minicône nous permet aussi d'évaluer la compatibilité du ciment avec le superplastifiant. L'intérêt de cette méthode consiste à évaluer le dosage de saturation de superplastifiants à travers un essai d'affaissement sur une très petite quantité de pâte de ciment en utilisant le cône présenté à la figure. Cette quantité de ciment est de 200 g c'est-à-dire d'environ dix fois moins élevée que celle qui est nécessaire pour réaliser un essai au cône de Marsh.



Mini - cône

Le diamètre d'étalement de la pâte est mesuré dans deux axes perpendiculaires, et la moyenne des deux est considérée comme la valeur du minicône.

Les essais consistent à déterminer le temps d'écoulement ou l'étalement en fonction du dosage des superplastifiants à différents temps. Les courbes obtenues présentent une cassure très nette

lorsqu'on atteint un certain dosage en superplastifiant. Cette cassure est appelée le point de saturation.

Au-delà du point de saturation, il est inutile de rajouter du superplastifiant dans le coulis car on n'améliore en rien la fluidité du coulis. Un dosage en excès risque de retarder indûment le durcissement du béton ou de créer un phénomène de ségrégation ou encore entraîner des problèmes de ressuage.

4.1.4.2. Agent de viscosité :

Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales ou des suspensions de particules silicieuses qui ont pour rôle de garantir une bonne résistance à la ségrégation du béton, sans pour autant nuire à la fluidité qui est assurée par l'utilisation des superplastifiants qui ont, par contre, tendance à augmenter les risques de ségrégation.

L'utilisation des agents de viscosité semble plus se justifier dans le cas d'un béton ayant un rapport eau/liants élevée, car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. D'un autre côté, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant un rapport E/L faible (rapport eau/fines < 0,3).

Les agents de viscosité se présentent, en général, sous forme de poudre et sont mélangés soit aux matériaux secs, soit avec une partie de l'eau de gâchage.

L'action des agents de viscosité est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants.

Les agents de viscosité sont de différentes natures et peuvent être classés selon 3 catégories en fonction de leurs mécanismes d'action :

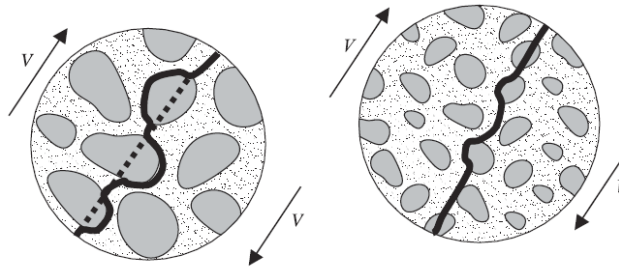
- **Adsorption** : La longue chaîne hydrophile de polymère adhère à la périphérie des molécules d'eau. Cela a pour effet d'adsorber et de fixer une partie de l'eau d'ajout. Il y a augmentation de la viscosité de l'eau d'ajout et donc de la pâte de ciment.
- **Association** : Les molécules au contact de la chaîne de polymère développent des forces d'attraction. Le mouvement de l'eau est ainsi bloqué par la création d'un gel. L'écoulement devient donc plus difficile (augmentation du seuil de cisaillement et de viscosité).
- **Entrelacement** : Pour un faible taux de cisaillement et particulièrement pour une forte concentration de polymères, la chaîne des polymères peut s'entrelacer et s'enchevêtrer ce qui augmente la viscosité apparente du mélange. L'enchevêtrement peut être disloqué lorsque la vitesse de cisaillement augmente. La chaîne de polymère s'oriente alors dans le sens de l'écoulement ce qui diminue la viscosité apparente.

4.2. La phase granulaire :

Cette phase est constituée de sable et de gravier. Ils constituent d'ailleurs le squelette du béton. La résistance mécanique du béton dépend fortement de leurs natures. Le seuil de cisaillement τ_0 du mélange est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, le diamètre maximal des granulats est limité en général entre 10 et 20 mm.

En contre partie, le diamètre maximal joue aussi un rôle important sur la résistance au cisaillement du béton. Lachemi et col (2005) ont trouvé que l'utilisation d'une plus grande taille et plus grande quantité de gros agrégats améliore la résistance au cisaillement.



Influence de la taille des agrégats sur la fissure de cisaillement ((a) 19 mm, (b) 12 mm)

La forme des granulats a aussi une incidence sur la maniabilité du béton. Pour un béton autoplaçant, les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. En effet, les granulats roulés avec leurs formes présentent l'avantage d'avoir un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une faible quantité de pâte de ciment pour le remplir et réduit généralement la demande en eau. Il présente aussi une bonne résistance intrinsèque mais développe une liaison médiocre avec la pâte de ciment. Par contre les granulats concassés, avec leurs plus grandes surfaces spécifiques, ont une meilleure flottabilité dans la pâte mais nécessite une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et leurs absorptions.

Le mélange pour le BAP est aussi caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins et par conséquent un volume de gravier plus réduit, et ceci afin de réduire les frictions et éviter les blocages dans les zones confinées. Les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

5. Rôles des principaux paramètres dans la formulation

| Constituants | Rôles dans la formulation |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| Ciment | Liant |
| <u>Additions minérales</u> | Optimisation du squelette granulaire du béton |
| Cendre volante | Amélioration de la fluidité |
| Fumée de silice | Réduction du coût du béton |
| Laitier de haut fourneau | Amélioration de la stabilité |
| Filler calcaire | |
| Granulats | Performances mécaniques |
| Eau | Fluidité et hydratation |
| Superplastifiants | Défloculation, dispersion des particules de ciment |
| Agents de viscosité | Cohésion, résistance à la ségrégation |

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (Gravillons/Sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie ; il est compris entre 34% et 40% de celui du béton
- La masse du ciment varie entre 350 à 450 kg/m³.
- La masse d'addition se situe entre 120 et 200 Kg/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.
- Eau / liant : 0,8 à 1,20 (en volume).
- Gravier : 750 à 1000 kg/m³ (masse) soit 270 à 360 l/m³ (volume) ; c'est-à-dire un volume de 30% à 34% de celui du béton.
- Sable : 48 à 55% du poids de l'ensemble des agrégats, ou un volume compris entre 40% et 50% de celui du mortier soit 710 à 900 kg/m³.
- Le volume de la pâte entre 330 et 400 litres par mètre cube du béton.

Chapitre 2 : Essais de Caractérisation des BAP

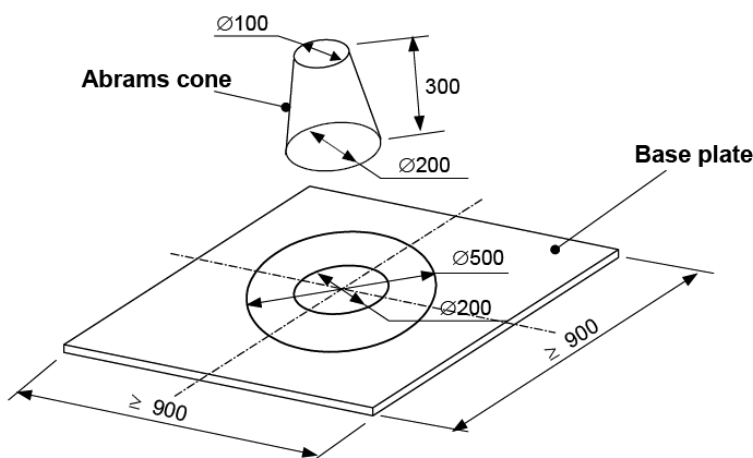
1. Capacité de remplissage et de passage :

Le béton autoplaçant doit être capable de remplir les vides et tous les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son poids propre, sans sollicitations. Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces propriétés sur bétons frais.

1.1. L'essai d'étalement au cône d'Abrams (Mobilité en milieu confiné) : (ASTM C 1611, NF EN 12350-8)

C'est l'essai le plus courant pour évaluer la fluidité du béton, car d'une part il est facile à transporter, réaliser sur chantier, à nettoyer et d'autre part permet de donner des informations sur la fluidité, la viscosité et le risque de ségrégation du béton.

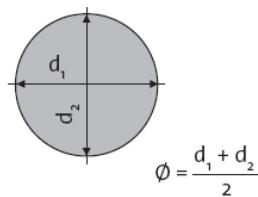
Ce test nécessite un cône d'Abrams et une plaque métallique plane graduée à un diamètre de 50 cm (AFGC).





Schématisation de l'essai d'étalement au cône d'Abrams

Le test d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur deux aspects : la fluidité et la vitesse de déformation. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800 mm en fonction de l'utilisation du béton. A ce propos, si la différence des valeurs des deux diamètres perpendiculaires est supérieure à 50 mm, l'essai devra être invalidé et reconduit.



La vitesse de déformation du béton correspond au temps (T_{500}) de passage à un certain diamètre (500 mm). Cette valeur est très difficile à mesurer surtout pour des bétons très fluides. En général, pour un béton autoplaçant, la littérature mentionne des valeurs allant jusqu'à 7 secondes.

Cet essai permet aussi de détecter visuellement les premiers signes de ségrégation du béton (présence d'une auréole de laitance en périphérie de la galette, amoncellement de gros granulats au centre d'une galette de mortier). C'est pourquoi, il serait judicieux d'illustrer le résultat de cet essai au moyen de photographies.

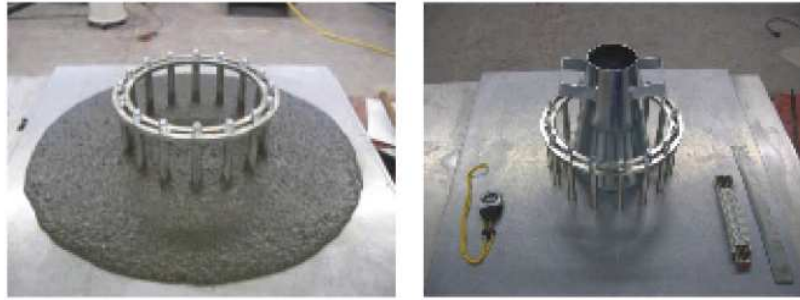


Cas de ségrégation d'un BAP

1.2. L'essai J-RING (Japanese Ring) : (ASTM C 1621, NF EN 12350-12)

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Il s'agit d'un anneau sur lequel différentes armatures peuvent être fixées. Ce matériel est utilisé conjointement avec un essai d'étalement au cône d'Abrams.

L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams sont tout d'abord centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures.



La différence entre les diamètres moyens des deux essais (avec et sans anneau japonais) met en évidence la perte de remplissage due à la présence d'armatures. Cette différence ne doit pas être supérieure à 50 mm. Il est également possible de mesurer la différence entre les hauteurs de matériau obtenues à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring. Un béton recommandé devrait présenter une différence de l'ordre de 10 – 15 mm.

1.3. Essai de l'écoulement à la boîte en L (L-Box) : (NF EN 12350 – 10)

L'AFGC (2000) recommande cet essai qui permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné (capacité de passage) et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage (ségrégation dynamique). Il permet aussi de mesurer le taux de remplissage et le temps d'écoulement du béton.

Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L d'une hauteur totale de 60 cm, de 70 cm de longueur et de 20 cm de largeur.

La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. L'AFGC (2008) recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm ou bien trois barres de 12 mm de diamètre, espacées de 41 mm pour les BAP destinés à des ouvrages fortement ferrailés, et deux barres de 12 mm espacées de 59 mm pour les BAN ou les BAP destinés à des ouvrages de densité d'armatures moins importantes.

Le mode opératoire de l'essai à l'écoulement à la boîte en L est le suivant : la partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 l). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H_2/H_1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

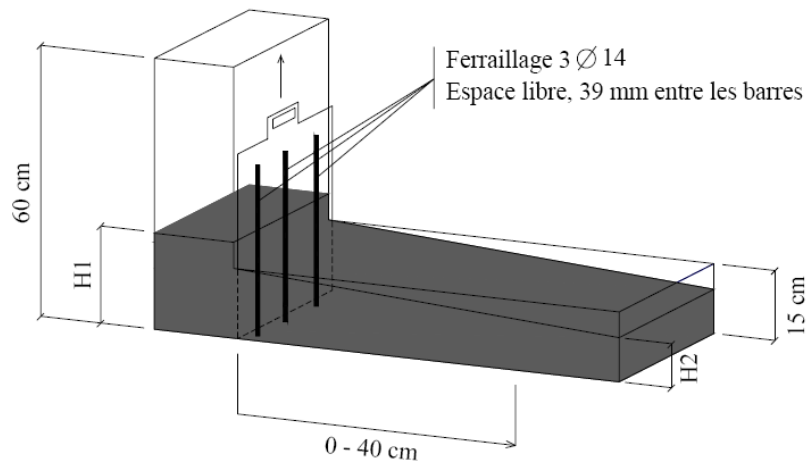


Schéma de la boîte en L

La vitesse de l'écoulement peut être évaluée en mesurant le temps de passage T20 et T40 du béton respectivement à la ligne des 20 cm et à celle des 40 cm. Certains auteurs recommandent des valeurs inférieures à 1,5 secondes pour T20 et inférieures à 3,5 secondes pour T40 afin de rester dans un domaine autoplaçant. Le temps d'écoulement total devrait être compris entre 3 et 7 secondes.

1.4. Essai de l'écoulement au tube en U (U – BOX) :

Développé aussi au Japon, cet essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Son principe reste identique à celui de la boîte en L.

Un volume de 20 litres de béton est versé dans la partie R₁. Après 1 minute, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour un béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm.

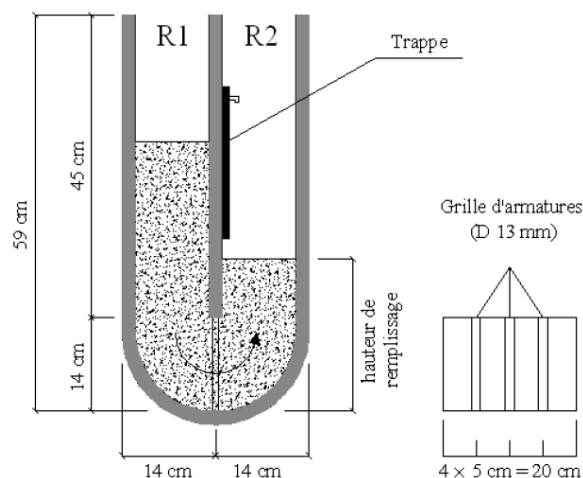


Figure 2.16 : Schéma de l'essai du tube en U

1.5. Essai de l'écoulement au caisson (Kajima test, Fill Box) :

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferraillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu. Il s'agit d'un caisson transparent contenant 35 obstacles de 16 à 20 mm de diamètre. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton.

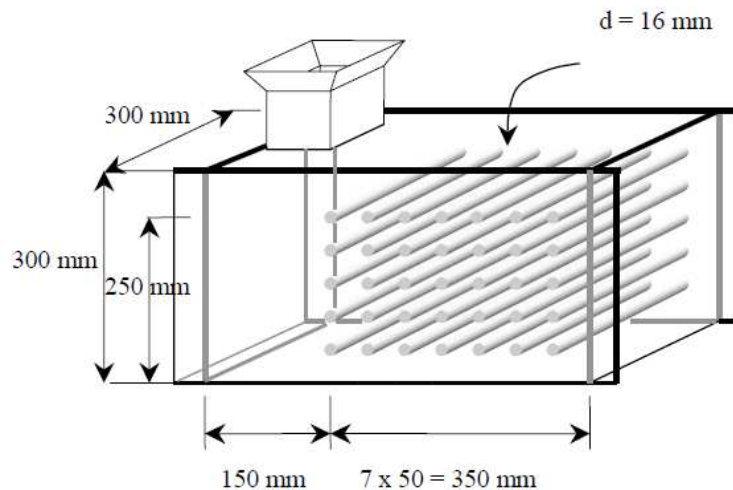


Schéma de l'essai du caisson

En effet, ce test consiste à verser le béton, soit 45 litres dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h_1 des armatures supérieures. Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement de la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage.

Le taux de remplissage est donné par la formule suivante :

$$R(\%) = \frac{h_1 + h_2}{2 \cdot h_1} \cdot 100 \quad (2.11.)$$

Où : $R(\%)$: le taux de remplissage

h_1 et h_2 sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson. Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60%.

1.6. Essai de la passoire :

Un volume de 30 litres de béton est versé dans le récipient équipé dans sa partie inférieure de la grille d'armatures espacées de 5 cm. Le récipient est soulevé verticalement laissant le béton s'écouler à travers la grille. Une pression est exercée sur la surface supérieure de l'échantillon de béton afin de tester son comportement à différentes conditions d'écoulement.

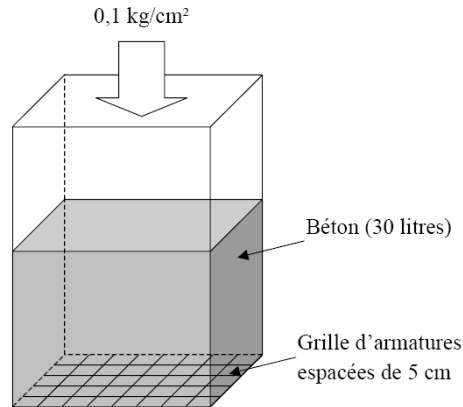


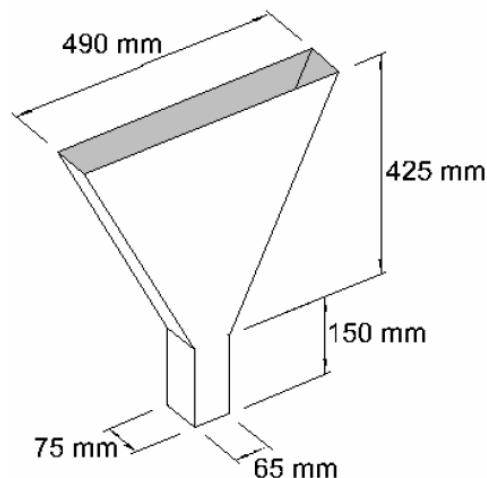
schéma de l'essai de passoire

1.7 Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel) : (PR NF EN 12350 – 9)

Cet essai de caractère qualitatif a été développé au Japon par Ozawa et col. Il consiste à observer l'écoulement du béton (Echantillon de 12 l) à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Cet essai est effectué une deuxième fois après 5 minutes pour avoir une meilleure idée sur la ségrégation.

Une section rectangulaire a été choisie pour imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. La partie inférieure de l'entonnoir, rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm, est bloquée par une trappe.

Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Un temps d'écoulement trop long et un flux discontinu lors d'un essai au « V-funnel » peuvent indiquer une séparation des granulats de la matrice et la formation de voûtes bloquant l'écoulement. Quelques recommandations visent un temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.



2. Essai de la stabilité :

2.1 Essai de la stabilité au tamis (GTM) : (PR NF EN 12350 – 11)

Cet essai qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance d'un échantillon de béton, et donc qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Cet essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm (de diamètre 300 à 350 mm et d'une hauteur de 40 à 75 mm) et un fond. Le test consiste à remplir le seau de 10 litres et à laisser le béton couvert et au repos pendant 15 minutes. Un échantillon de ce béton (4,8 kg ± 0,2 kg) est versé à travers le tamis de 5 mm posé sur le fond, et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis.

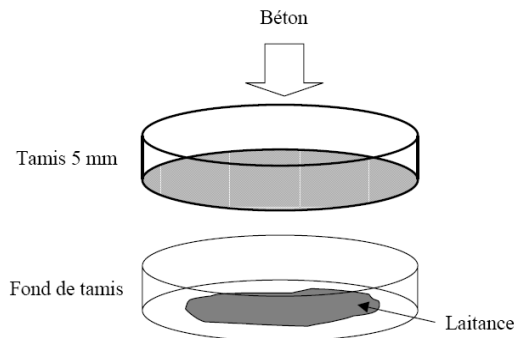


Schéma de l'essai de stabilité (GTM)

Le pourcentage P de laitance traversant le tamis par rapport à la masse de l'échantillon est donné par la relation suivante :

$$P = \frac{\text{Masse de laitance}}{\text{Masse de l'échantillon}} \cdot 100 \quad (2.14.)$$

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

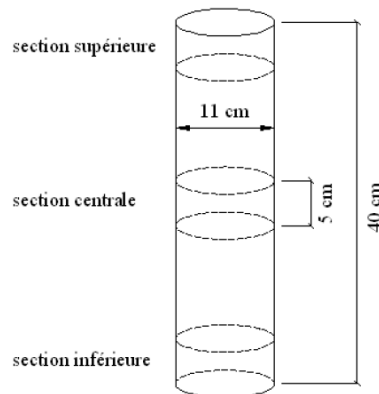
Critères de stabilité (GTM)

| Conditions | Critères de stabilité | Remarques |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------------|
| $0\% \leq P \leq 15\%$ | Stabilité satisfaisante | Béton homogène et stable |
| $15\% \leq P \leq 30\%$ | Stabilité critique | Vérifier les autres critères d'ouvrabilité |
| $P \geq 30\%$ | Stabilité très mauvaise | Ségrégation systématique, béton inutilisable |

2.2. Essai de la colonne (ASTM C1610) :

L'essai de la colonne qui fut développé par Otsuki et col. (1996), consiste à placer le béton dans une colonne cylindrique de diamètre de 11 cm ou à base carrée (10 cm de côté) et à le laisser au repos jusqu'au début de la prise. Des fractions des parties supérieure, centrale et inférieure sont lavées au travers d'un tamis de 5 mm et les granulats de taille supérieure à 5 mm sont pesés.

Otsuki et col. (1996) considèrent que la ségrégation est négligeable si la distribution est uniforme, c'est-à-dire lorsque la différence entre les teneurs en graviers des parties supérieure et inférieure ne dépasse pas 10%.

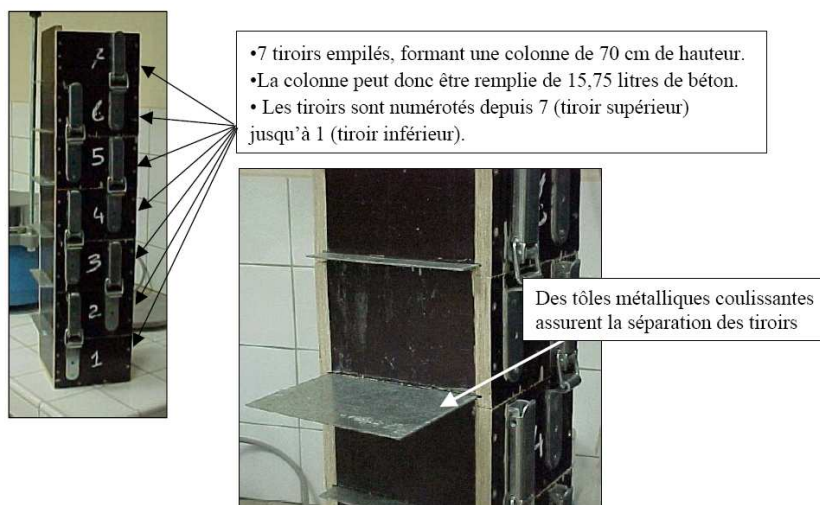


Essai de la colonne

2.3. Essai à la colonne LMDC :

Cet essai permet de comparer les analyses granulométriques des granulats en fonction de la hauteur d'une colonne de béton, et donc quantifier la ségrégation statique d'un béton autoplaçant à l'état frais. Le dispositif d'essai est constitué de 7 tiroirs en Bakélite, de section 15cm x 15 cm, empilables les uns sur les autres pour former une colonne de 70 cm de hauteur. Les tiroirs sont individualisés par l'intermédiaire de tôles coulissantes, ce qui permet de faire une analyse granulométrique du béton contenu dans chacun d'eux.

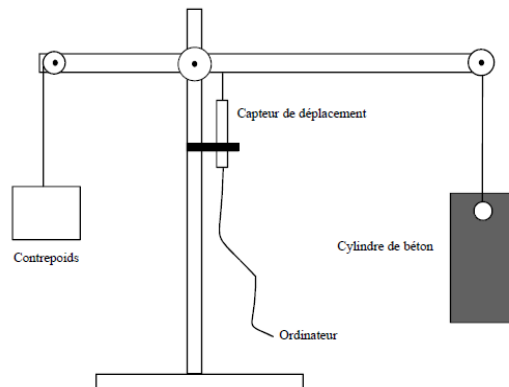
Le béton est versé dans la colonne dès la fin du malaxage. A l'échéance de 30 minutes après la mise en place dans la colonne, les tôles sont poussées pour séparer les 7 parties depuis le tiroir supérieur jusqu'au tiroir inférieur. Après lavage (sur un tamis de 2,5 mm), une analyse granulométrique (à sec) est effectuée sur le squelette granulaire récupéré dans chaque tiroir.



Dispositif de l'essai à la colonne LMDC

2.4. Tests de pénétration à la bille :

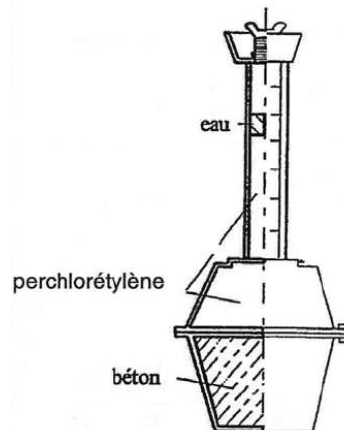
Cet essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une bille de 20 mm de diamètre, dans un cylindre de béton de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur. La bille, qui simule un granulats de la même taille, est reliée par une tige rigide à un balancier et sa masse volumique peut être ajustée par un contre poids. L'essai consiste à laisser la bille s'enfoncer dans le béton. Le déplacement de la bille dans le béton est mesuré par un capteur LVDT relié à un ordinateur. Plus ce temps est faible, plus la tendance à la ségrégation du béton est élevée. Pour un béton autoplaçant, la résistance à la ségrégation est jugée satisfaisante si la bille s'enfonce d'une hauteur inférieure à 6 cm.



Essai à la bille développé par Trudel, 1995

2.5. Essai de ressuage :

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est alors possible d'en évaluer le volume (AFGC 2000).



Essai de ressuage à l'aéromètre