I. Formulation des bétons ordinaires :

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre (ouvrabilité) souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent:

Approche graphique :

- *Méthode Faury*
- *Méthode Bolomey*
- *Méthode Dreux-Gorisse*

Approche expérimentale :

- *Méthode Valette*
- *Méthode d'Abrams*

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme NF EN 206-1, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer dans la formule ainsi que la quantité d'eau maximum tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à 28 jours sur éprouvettes sera exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante des ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats.

D'autres exigences de la NF EN 206-1 imposent l'emploi de ciment particulier en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en oeuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

II. Formulation des bétons autoplaçant:

Les différentes propriétés des bétons autoplaçant à l'état frais (une mobilité en milieu non confiné et confiné, résistance à la ségrégation et au ressuage…etc.) se différencie, notablement de celui d'un béton ordinaire. La formulation d'un tel béton est donc plus complexe que celle d'un béton ordinaire et implique une composition spécifique.

La majorité des formules de BAP sont conçues actuellement de manière expérimentale, La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

D'après les recommandations de l'AFGC**,** la formulation de béton autoplaçant se base selon les critères suivant :

-Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total).

-Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/ m3).

-Le volume de gravillon est faible (rapport G/S de l'ordre de 1).

-Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation).

-éventuellement utilisation d'un agent viscosant.

IL existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques.

On présente dans ce qui suit quelques méthodes de formulation en revue :

III.Modes de formulations des BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. Deux grandes familles prévalent actuellement :

- La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m3) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les super-plastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et

la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants.

- Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

IV. Principe et application des approches :

IV.1. Approche japonaise : en avantageant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

➢ Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m^3 de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

A défaut d'indication, nous avons choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC.

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m3. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

➢ **Dosage du sable :** Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

➢ **Dosage du liant :** La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m3). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

➢ Dosage de l'eau et du super-plastifiant : Les dosages en eau et en super-plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

IV.2. Approche Suédoise : Proposée par [Peterson et al1996]

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [Tangtermsirikul et al ,1995]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégré dans le processus de formulation. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pate pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le super-plastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tous types de granulats.

IV.3. Approche Française : Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1 % à partir des constituants, La procédure à adopté pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

1) La proportion de liant est fixée à priori (70% du ciment ,30% d'addition par exemple).
2) Le dosage, à saturation, du super-plastifiant est déterminé selon l'expérience de LCPC, se dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
3) Le besoin en eau de ce mélange (en présence du super-plastifiant) est déterminé les calculs sont effectuées avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

Exemple de calcul de la formulation par l'Approche japonaise

1. Introduction :

Pour déterminer les caractéristiques du BAP à l'état frais et son comportement mécanique à l'état durci on suit les étapes décrites ci-dessous :

- Etude de l'effet de la granularité des bétons autoplaçants à base des granulats locaux.
- Etude de l'influence du volume de la pâte (Ciment+Ajout+adjuvant+Eau).
- Détermination de la résistance mécanique à 28 jours.

Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur le béton. Les premiers concernent l'étude des propriétés à l'état frais, en particulier celles des BAP, afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L et de la stabilité au tamis). Ensuite, on réalise divers essais concernant propriétés mécaniques.

2. Formulation des Bétons autoplaçants :

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions de BAP testées dans cette étude expérimentale est la méthode JAPONAISE :

- Le volume de la pâte de ciment et les volumes granulaires, mélange sec pour 1m ^{3} de béton selon :

$$V_{\text{pâte}} + V_{granulats} = 1000 \text{litres}$$

$$\text{Tel que : } V_{\text{pâte}} = V_{\text{ciment}} + V_{Fine} + V_{Adjuvant} + V_{Euu}$$

$$V_{granulats} = V_{sable} + V_{G3/8} + V_{G8/15}$$

- Volume des gravillons est limité en prenant le rapport G/S égale à 1.
- Volume de la pâte varie entre : 330 à 400 l/m^3 (C+F).
- La masse du ciment : M_c=300 à 450 kg/m^3.
- M_F=10% de la masse du ciment.
- *Dosage en super-plastifiant est proche de son dosage à saturation.*

a. Exemple : Calcul pour un BAP à 33% de volume de la pâte :

On a choisi :

1- Calcul la composition pour volume de pate égale a 33% :

33%=330 l ;

330l=Ve+Vf+Vc ;

330l= Ve+1.1Vc ;

Ve/[(Vc+Vf)*3,15]=0,5 ;(Vf=0,1*Vc) ; $\Longrightarrow$Ve/(1,1*Vc*3,15)=0,5 ;

Donc : Ve=0,5*1,1*3,15*Vc

330=(0,5*1,1*3,15+1.1)*Vc

Vc=330/(0.5*1,1*3,15+1,1) $\Longrightarrow$Vc=116.504 l

Mc=Vc*3,15=367 kg $\Longrightarrow$ F=37 kg

E/(C+F)=0,5 donc E=0,5*(367+37) $\Longrightarrow$E= 202 l/m^3

- Volume de la pâte égale 330 l/m^3.
- Volume de granulats égale 670 l/m^3.
- G/S=1

  G+S=670 $\Longrightarrow$G=670-S

  S=670/2 $\Longrightarrow$S= 335 l/m^3= 335*2,66= 891 kg/m^3 où ρ_s=2,66

  G= 670-335 $\Longrightarrow$G= 335l/m^3= 335*2,7= 905 kg/m^3 où ρ_g=2,7

  On a choisi trois types de granularité pour chaque volume de pâte :

  25% de 3/8+75% de 8/15

  50% de 3/8+50% de 8/15

  75% de 3/8+25% de 8/15

Les différentes formulations pour 1m^3 de béton sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Volume de la pâte (%)	N° de formulation	Ciment (kg)	filler (pouzzolane) (kg)	sable (kg)	Gravier 3/8 (kg)	gravier 8/15 (kg)	eau (litre)	Super plastifiant (L)	E/C	G/S
33%	BAP 1	367	37	891	227	678	202	6,05	0,5	1
	BAP 2	367	37	891	452	452	202	6,05	0,5	1
	BAP 3	367	37	891	678	227	202	6,05	0,5	1

Tableau 1 : les compositions des bétons autoplaçant

3 : Malaxeur de béton

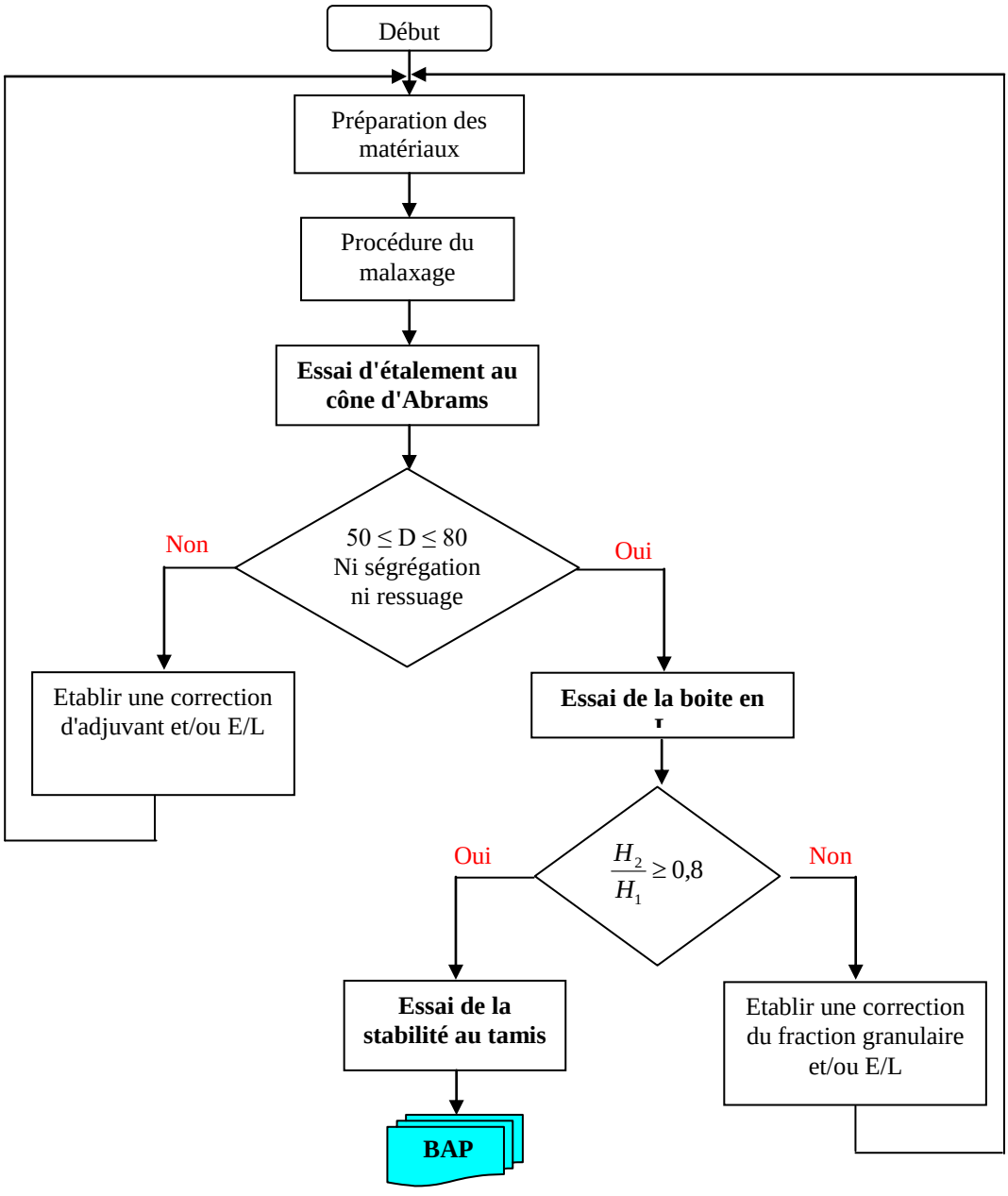

Figure.6 : La mise en œuvre des BAP