

BétonlabPro 3

Leçon N°15

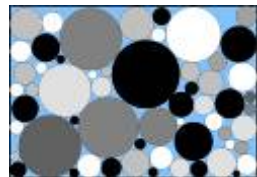
Les Bétons Auto-Plaçants (BAP)

Thierry Sedran

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

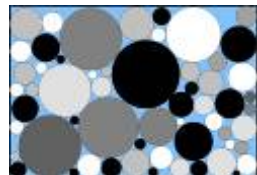
Plan de la leçon

- Définition et généralités
- Choix des constituants
- Cahier des charges typique
- Vers une formulation rationnelle
- Exemple de simulations



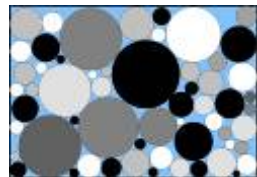
Définition et généralités

- Béton très fluide, homogène et stable pouvant être mis en œuvre sans vibration sous le seul effet de la gravité, même dans des zones confinées
- Concept proposé vers la moitié des années 80 par les chercheurs de l'université de Tokyo
- Aujourd'hui:
 - 2 à 3 % du BPE
 - 40 à 50 % du béton pour la préfabrication à démoulage différé
 - domaine d'emploi hors préfabrication: 80% dans les applications horizontales et 20% dans les applications verticales



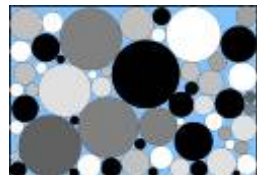
Définition et généralités

- Avantages attendus liés à la fluidité du BAP:
 - réduction de la durée et du coût de la mise en oeuvre
 - réduction du bruit et de la pénibilité lors du coulage
 - augmentation de la sécurité (simplification des chantiers)
 - augmentation de la durabilité (béton plus homogène)
 - amélioration des parements (mais attention aux règles de l'art!!)



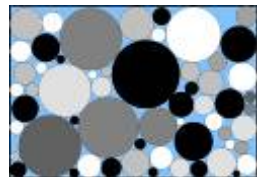
Définition et généralités

- Matériau « jeune » → un certain nombre de normes doivent être adaptées, d'autres sont manquantes
- Un document de référence en France:
 - « Recommandations pour l'emploi des Béton Auto-plaçants » de janvier 2008, édité par l'AFGC [1]
 - Classifie les BAP, précise les propriétés exigées ainsi que les essais correspondants, décrit les conditions d'emploi et les particularités de ces bétons



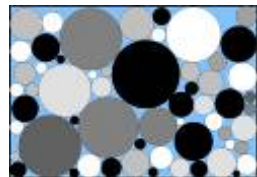
Choix des constituants

- Granulats: (cf leçons n°3 et 4)
 - Importance de la forme (β) vis-à-vis de la mobilité en milieu confiné ou non
 - D_{\max} limité (entre 10 et 20 mm) pour assurer la mobilité en milieu confiné



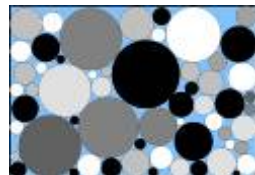
Choix des constituants (suite)

- Ciment:
 - Ciment adapté à la gamme de résistance visée et à la classe d'environnement (NF EN 206)
 - Pas de spécificité particulière liée au caractère autoplaçant sauf: une bonne compatibilité avec les superplastifiants (voir leçon 14)



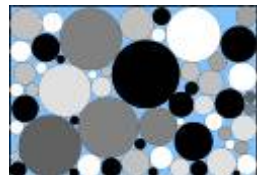
Choix des constituants (suite)

- Additions minérales:
 - Nécessité d'un volume de pâte élevé pour assurer la mobilité en milieu confiné ou non
 - Nécessité d'une quantité de fines $<125 \mu\text{m}$ élevé pour assurer la mobilité et la stabilité du béton (ressuage et ségrégation)
 - → pour limiter le coût et l'exothermie du béton, il est en général nécessaire d'utiliser des additions minérales
 - Filler calcaire, cendres volantes, laitier...
 - (voir leçons 7-8)



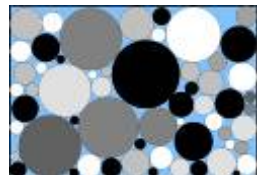
Choix des constituants (suite)

- Superplastifiant: (voir leçon 14)
 - Indispensable pour obtenir la mobilité!
 - Choix du bon couple ciment/superplastifiant (voir leçons 5 et 7)
- Agent de cohésion:
 - Eventuellement
 - Effet attendu: formules moins sensibles à des fluctuations d'eau vis-à-vis des problèmes de ressuage et de ségrégation
 - Nature:
 - Dérivés cellulosiques: HEC, HPMC...
 - Polymères naturels: gommés (welan, xanthane) et biopolymères
 - Suspensions colloïdales



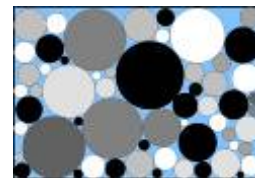
Choix des constituants (suite)

- Agent de cohésion:
 - Pas de norme. Se rapprocher de la catégorie « rétenteur d'eau » de la norme EN 934-2
 - Inconvénients: dosage parfois difficile, peut diminuer la fluidité
 - N'a a priori d'utilité que pour les BAP pauvres en fines
 - Un domaine nécessitant de la recherche (influence sur le ressuage, la ségrégation et la thixotropie)
 - Effet non pris en compte directement dans BétonlabPro → possibilité d'intégrer son effet en considérant le mélange superplastifiant+agent de cohésion (à proportions constantes) comme un superplastifiant particulier → effet probable sur la demande en eau des fines et $K'f_{\min}$ (voir diapo 28)



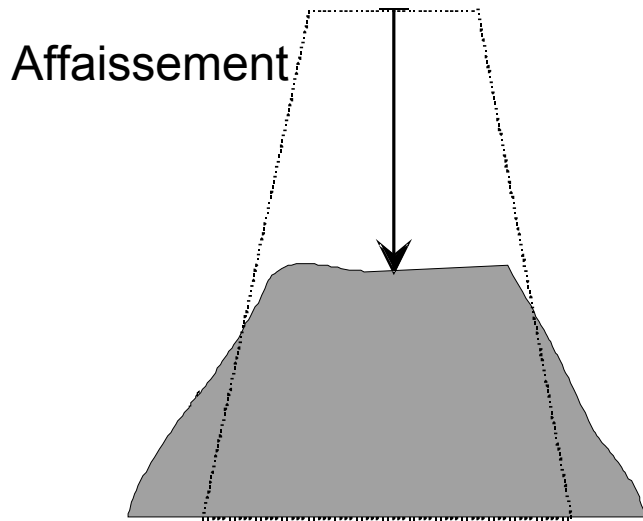
Cahier des charges typique

- Une résistance adaptée à l'ouvrage (du béton ordinaire au BHP)
- Une ouvrabilité à l'état frais:
 - Permettant un écoulement sous poids propre avec un débit suffisant en milieu non confiné (ex: bloc massif, dalle...)
 - Permettant un écoulement sous poids propre avec un débit suffisant en milieu confiné (tuyau de pompe, diaphragme, zone ferrillée...)
 - Assurant une stabilité et une homogénéité du béton lors de sa mise en œuvre (absence de ségrégation et de ressuage)

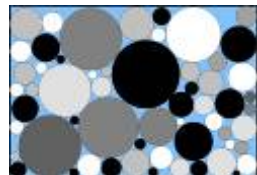
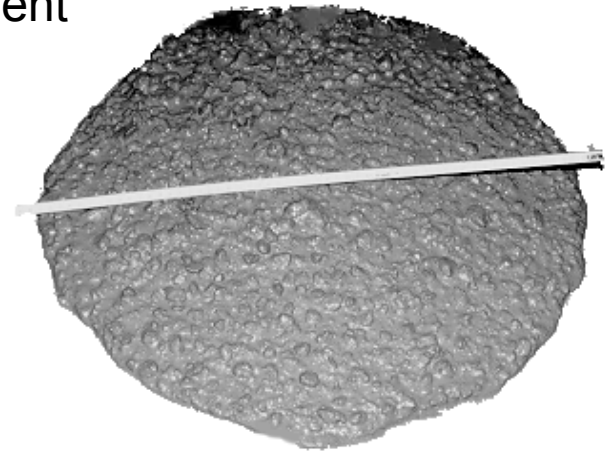


L'essai d'étalement

- Utilisé pour évaluer la mobilité en milieu non confiné
- Mesure du diamètre de la galette obtenue lors d'un essai au cône d'Abrams
- La galette ne doit pas montrer de signe de ségrégation ni de ressuage (condition nécessaire mais non suffisante)

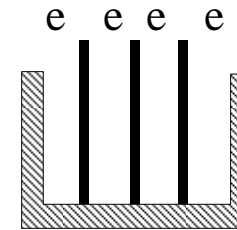
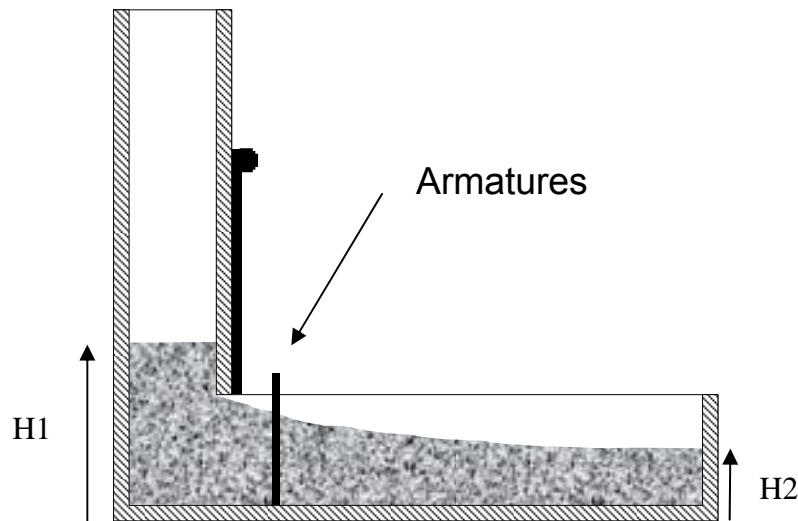


Etalement

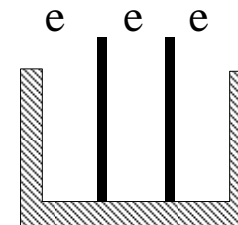


Essai de la boîte en L

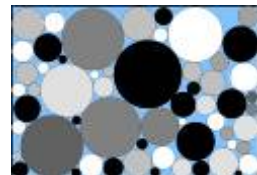
- Mesure de la mobilité en milieu confiné
- Critère: $H2/H1$
- Deux cas de confinement retenus par l'AFGC



$e = 41 \text{ mm}$

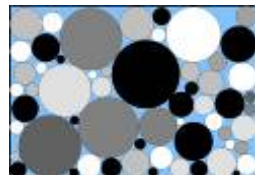


$e = 59 \text{ mm}$



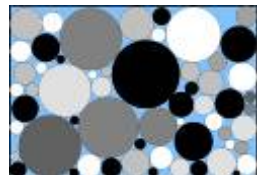
Essai de stabilité au tamis

- Utilisé pour évaluer le risque de ségrégation des gravillons dans le béton
- Principe:
 - prélever un échantillon de 10 litres de béton dans un seau
 - laisser reposer l'échantillon pendant 15 min
 - verser environ 4,8 kg de béton sur un tamis de 5 mm de maille muni d'un fond
 - attendre 2 mn et mesurer le passant
 - le pourcentage de laitance est le pourcentage de passant par rapport à la masse initiale sur le tamis
- Plus le pourcentage de laitance est faible plus le béton est stable



Classification des BAP (AFGC)

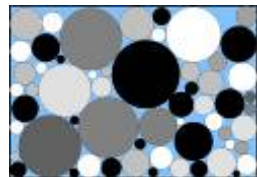
- Notion d'intervalle d'écoulement I (en mm)
 - Dimension de l'espace le plus petit au travers duquel le béton doit s'écouler sans pouvoir le contourner
 - Permet de quantifier la sévérité du confinement en prenant en compte la géométrie du coffrage, des inserts et la méthodologie de coulage
 - Exemple: voile d'épaisseur 16 cm, enrobage 2cm avec 2 nappes de treillis soudé $\varnothing 6$ mm:
 $I = 160 - 2 \cdot 20 - 2 \cdot 6 = 108$ mm



Classification des BAP (AFGC)

- 5 classes sont définies:
de 1 (la moins sévère) à 3b (la plus sévère)

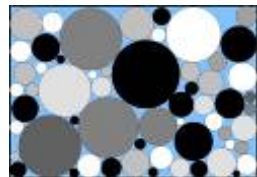
		Application horizontale				Application verticale	
		Epaisseur < 300 mm		Epaisseur > 300 mm			
	Longueur maximale de cheminement	Inférieure à 5 m	Entre 5 et 10 m	Inférieure à 5 m	Entre 5 et 10 m	Inférieure à 5 m	Entre 5 et 10 m
Intervalle d'écoulement (mm)	$I > 100$	1		2a	2b	2a	2b
	$80 < I < 100$	2a	2b	2a	2b	2a	2b
	$I < 80$	3a	3b	3a	3b	3a	3b



Spécifications à l'état frais (AFGC)

- Valeurs à respecter au stade de la qualification:
 - Pendant la durée pratique d'utilisation souhaitée (dans les conditions prévisibles du chantier)
 - Pas de ressuage visible lors des essais

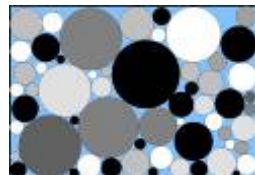
	Cat 1	Cat 2a	Cat 2b	Cat 3a	Cat 3b
Valeur maximale au tamis	20%	20%	15%	15%	10%
Valeur minimale à la boîte en L	Pas de prescription particulière	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 3 barres	0,80 avec 3 barres



Spécifications à l'état frais (suite)

- Valeurs à respecter à la réception:
 - Fourchette d'étalement à la réception (FER)
 - La FER est déterminée lors de la qualification
 - Pas de ressuage ni de ségrégation visible lors de l'essai d'étalement
 - Elle garantit que l'on respecte les critères au tamis et à la boîte en L
 - La FER peut être définie
 - par une valeur cible (généralement entre 600 et 750 mm) et une variation admissible (généralement +/- 50 mm)
 - ou par le tableau suivant:

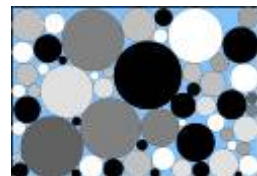
Classe	Etalement (mm)
SF1	550 à 650
SF2	650 à 750
SF3	750 à 850



Conséquences sur la formulation

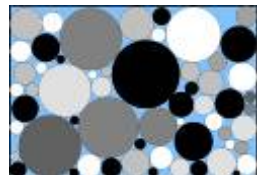
- Exemple de BAP de résistance moyenne de 40 MPa

	Eau (kg/m3)	Ciment (kg/m3)	Filler calcaire (kg/m3)	Laitier (kg/m3)	Cendre volante (kg/m3)	Sable (kg/m3)	Gravillon 20 mm (kg/m3)	Volume de pate (%)	Volume (%) de gravillon
Béton conventionnel	170	340	0	0	0	635	1270	28	48
BAP [11]	175	331	216	0	0	702	875	36	33
BAP [10]	160	150	0	150	200	775	947	35	36



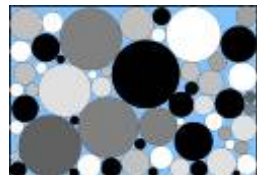
Formulation rationnelle des BAP

- De nombreux critères doivent être satisfaits en même temps. Il est donc nécessaire d'avoir une approche rationnelle de la formulation de ces bétons pour ne pas multiplier les essais;
- Le logiciel BétonlabPro permet une telle approche



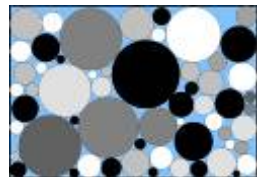
La mobilité en milieu non confiné

- BétonlabPro ne calcule pas l'étalement
- Mais permet une évaluation des propriétés rhéologiques (voir leçon 14):
 - seuil de cisaillement τ_0 : paramètre principal contrôlant la facilité de remplissage des coffrages
 - viscosité plastique μ : paramètre permettant de contrôler la facilité de pompage, la vitesse de coulage, l'aspect collant...
 - → permet la simulation de coulage par des codes de calcul [3]



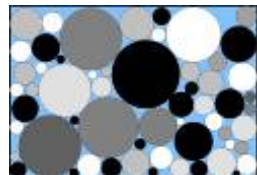
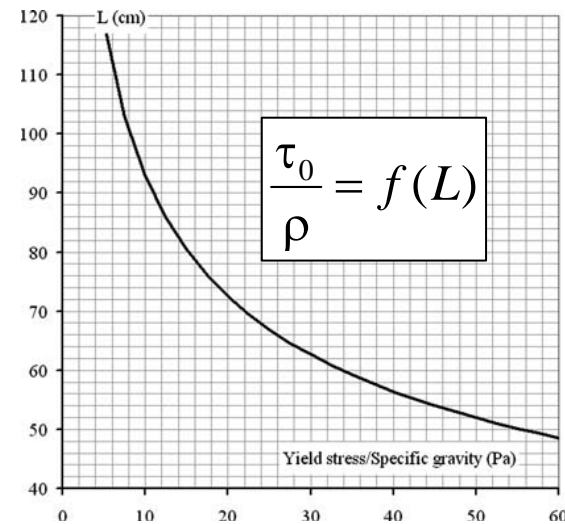
La mobilité en milieu non confiné

- Constat: l'étalement augmente quand le seuil diminue
- → d'un point de vue pratique on ajuste un seuil de cisaillement à viser dans BétonlabPro pour obtenir expérimentalement:
 - l'étalement souhaité ou,
 - le seuil souhaité, si on dispose du matériel nécessaire



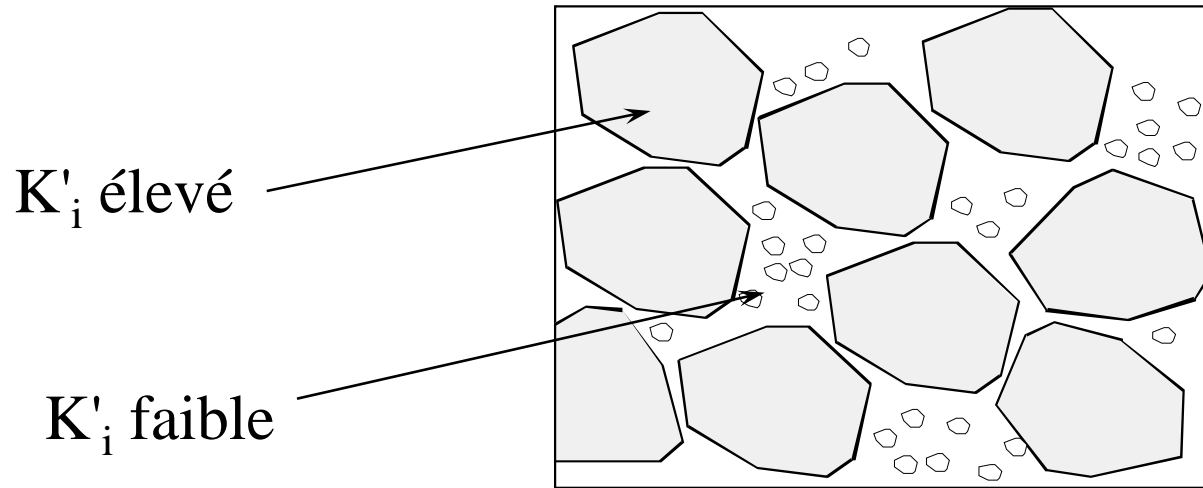
La mobilité en milieu non confiné

- Le rhéomètre à béton BTRHEOM-LCPC permet de mesurer τ_0 et de μ (voir leçon 14) mais il ne permet pas de discriminer de façon suffisamment précise les seuils en dessous de 200 Pa (zone fréquente des BAP)
- L'essai à la boîte LCPC (6 l) permet une meilleure évaluation du seuil de cisaillement [tiré de 3]



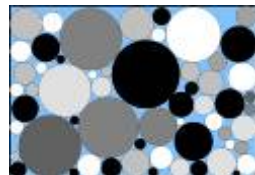
Notion d'indice de serrage partiel

- K'_i indice de serrage partiel traduit dans BétonlabPro l'état de remplissage du béton par la classe i



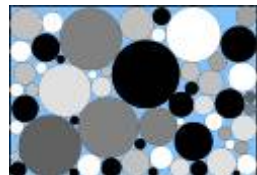
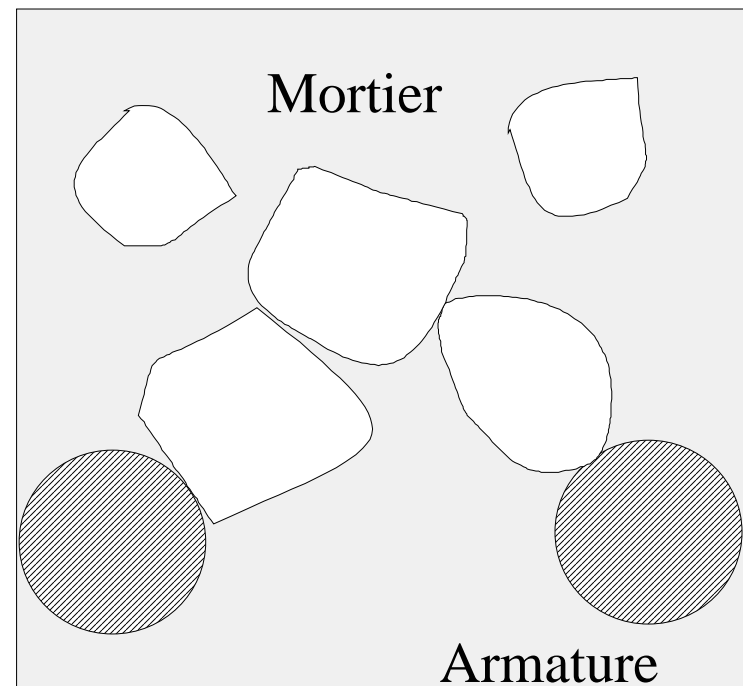
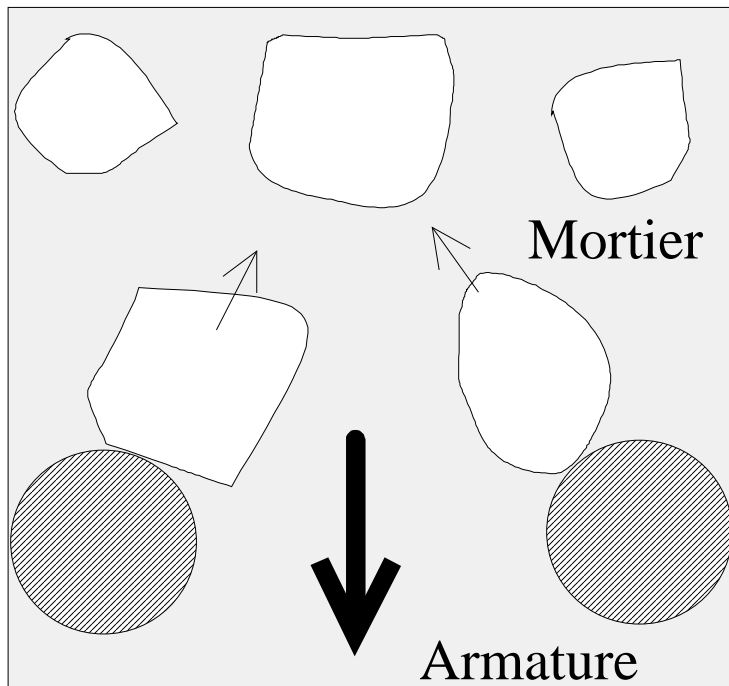
- Prise en compte du confinement possible (voir leçon n°12).
- Indice de serrage d'un béton (voir leçon n°2)

$$K' = \sum_{i=1}^n K'_i$$



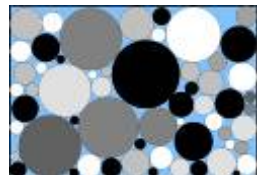
Mobilité en milieu confiné

- Contrôlée par le risque de blocage des gros gravillons:



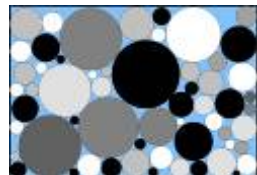
Mobilité en milieu confiné

- BétonlabPro calcule K'_{GG} somme des indices de serrage des classes les plus grossières ($D_{max}/2,5$ à D_{max})
- K'_{GG} augmente quand:
 - le volume de gravillon augmente,
 - le confinement augmente,
 - la forme des gravillons est moins bonne (donc β diminue)
- Les risques de blocages augmentent avec K'_{GG} → on cherche à avoir $K'_{GG} \leq 1,4$



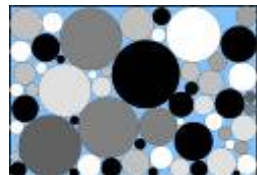
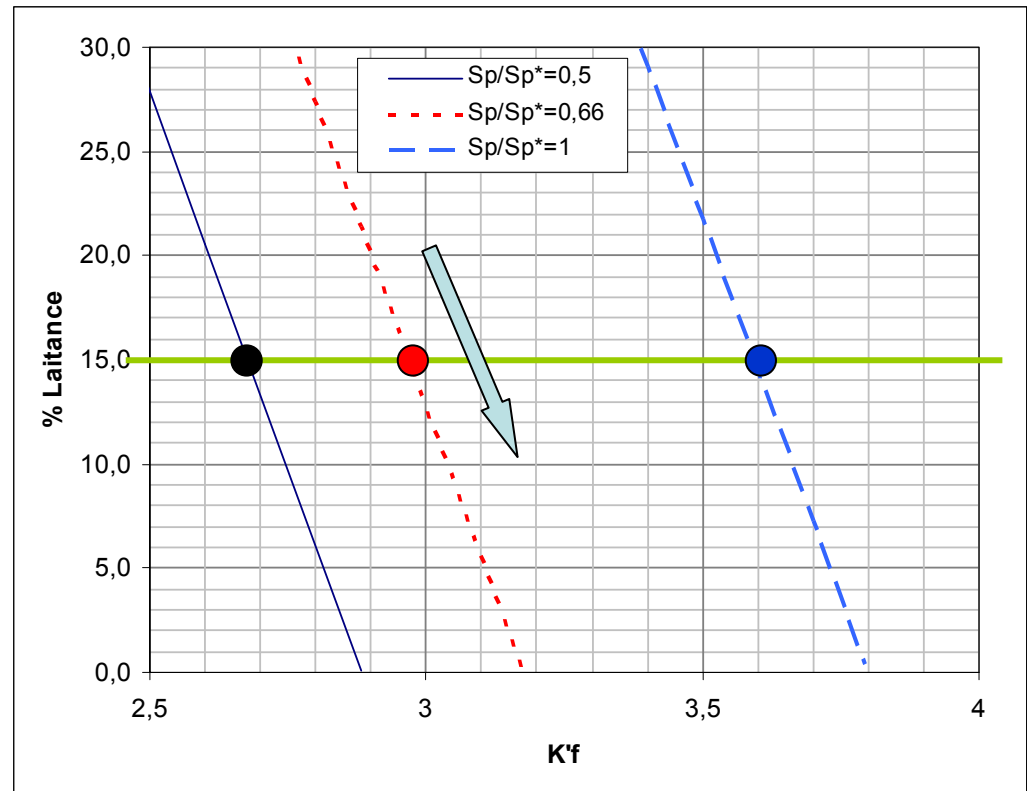
Prédiction des risques de ségrégation

- Hypothèse: ce sont les fines qui retiennent les gravillons en suspension.
- K'_f : indice de serrage des fines $< 80 \mu\text{m}$ est a priori un bon indicateur de la concentration en fines du béton



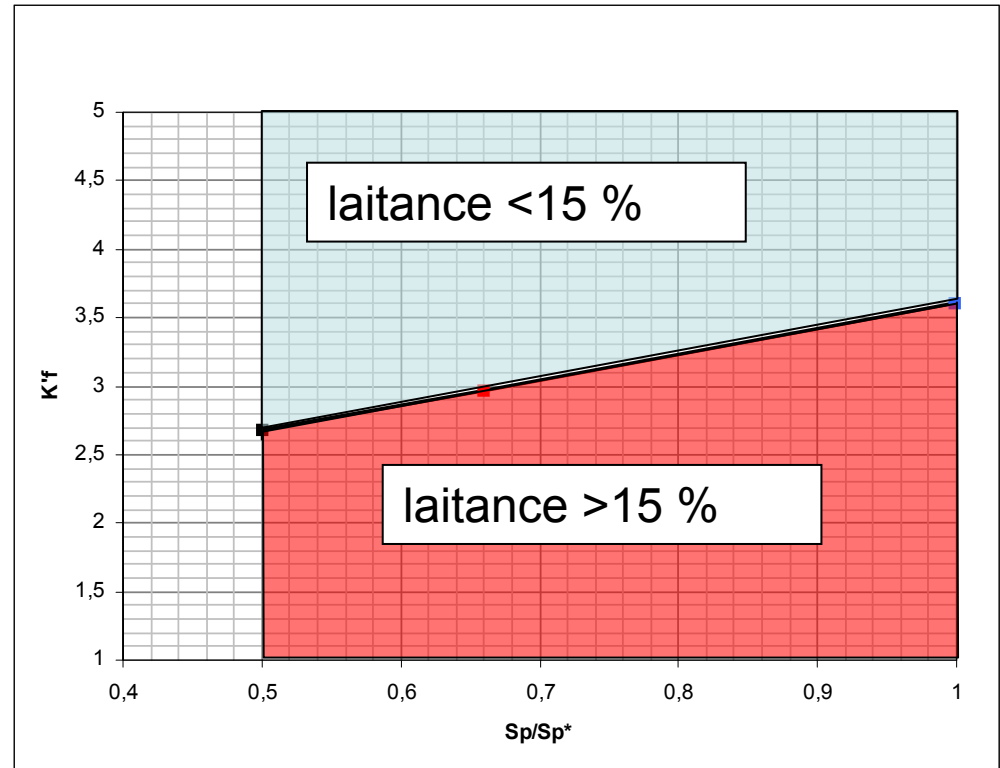
Prédiction des risques de ségrégation

- On constate qu'à dosage en superplastifiant donné, le % de laitance est contrôlé par K'_f
- Pour un % de laitance imposé, le K'_f_{\min} à respecter dépend du dosage en superplastifiant



Prédiction des risques de ségrégation

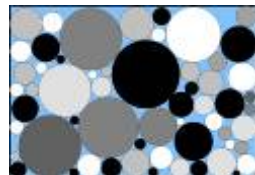
- La relation $K'f_{\min}(Sp/Sp^*)$ dépend probablement du type de superplastifiant → nécessité de plus de recul



Définition d'un cahier des charges pour les BAP avec BétonlabPro

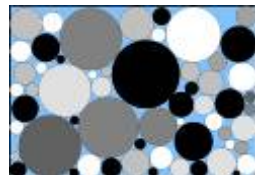
Commentaire	Propriétés
Etalement suffisant	$40 \leq \tau_0 \leq 400 \text{ Pa}$
Pompabilité	$\mu' \leq 200 \text{ Pa.s}$
Absence de ségrégation	$K'_f \geq K'_{f \min} (Sp/Sp^*)$
Absence de blocage des gravillons	$K'_{GG} \leq 1,4$ pour le confinement imposé
Résistance	A fixer
Prix	Minimum

Rem: Optimisation en une seule fois → pas d'optimisation préliminaire des granulats (voir leçon 11) car la condition sur K'_{GG} permet d'éviter un excès de gravillons



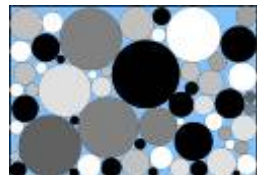
Autres propriétés à surveiller avec BétonlabPro

- Risque de ressuage: peut être évalué à l'aide de la vitesse initiale de ressuage (voir leçon 13)
- Risque de ségrégation: peut être évalué à l'aide du diagramme de remplissage (voir leçon 13), mais souvent redondant avec l'exigence sur K'_{GG} et K'_f
- Les temps de malaxage des BAP sont en général plus longs que ceux des bétons ordinaires. Comparaison possible à l'aide du temps de stabilisation du wattmètre.
- La durabilité:
 - les mêmes règles que pour les bétons conventionnels sont applicables (NF EN 206): voir $C_{\text{équivalent}}$ et $E_{\text{eff}}/C_{\text{équivalent}}$
 - l'entraînement de l'air est possible mais l'adjonction de l'agent entraîneur d'air doit être réalisé avant la fluidification complète du béton (avant ajout du superplastifiant par exemple).



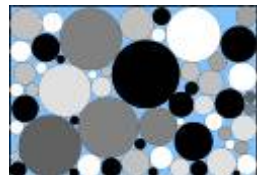
Autres propriétés du béton frais

- Thixotropie
 - Évolution réversible liée à la flocculation (avant le début de prise hydraulique)
 - Cause l'augmentation du seuil au repos
 - Une forte thixotropie
 - permet de diminuer la pression sur les coffrages lors du coulage
 - mais augmente les risques de mauvais mariages entre couches successives de béton lors du coulage
 - voir [3] pour la prise en compte quantitative de l'effet de la thixotropie sur ces phénomènes
 - Phénomène non pris en compte dans BétonlabPro



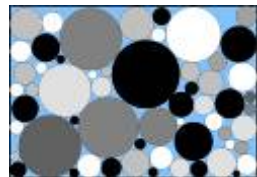
Exemple de formulation avec BétonlabPro

- Cahier des charges:
 - Coulage d'un voile fortement armé → Un béton autoplaçant de catégorie 3b
 - C35/45, on vise $R_{c28}=40$ MPa en moyenne
 - On vise un étalement de 60 cm



Exemple de formulation avec BétonlabPro

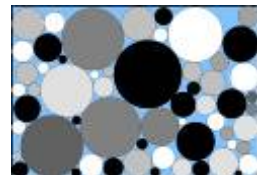
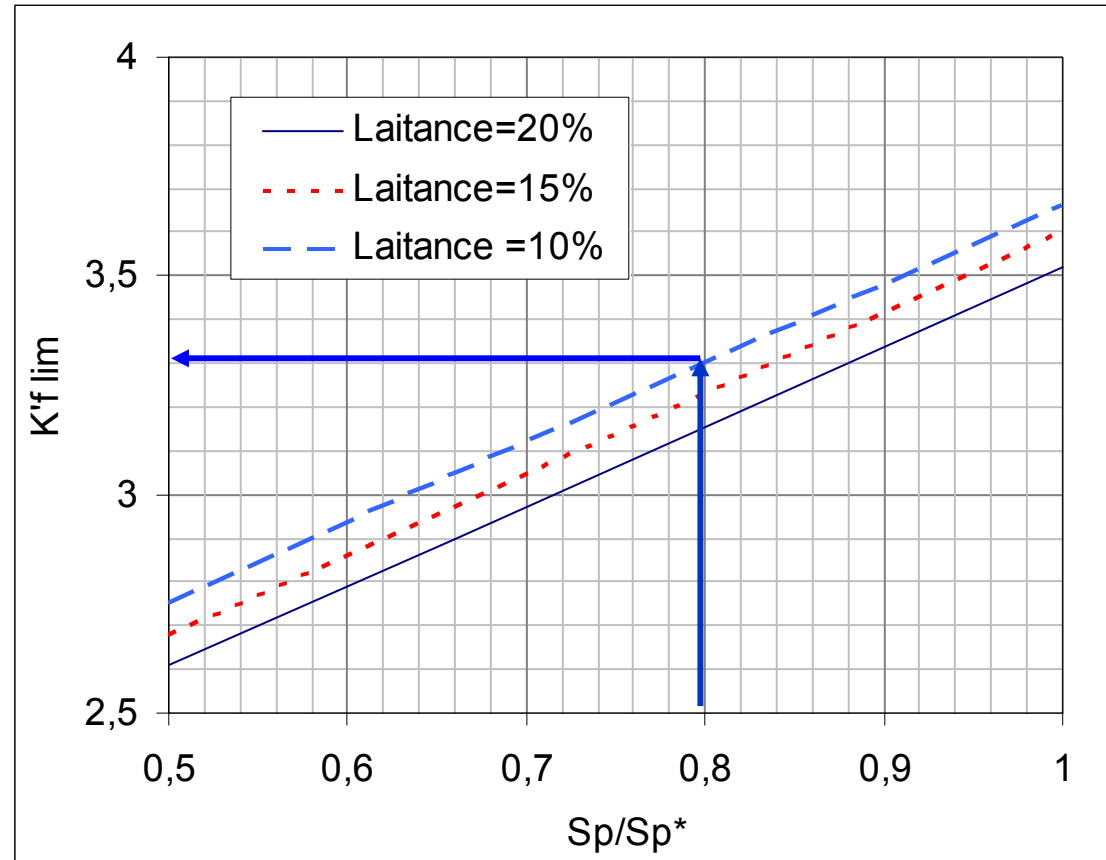
- Choix préliminaires
 - Ciment CEM I+ Filler calcaire
 - $D_{\max} = 12,5$ mm
 - $Sp/Sp^* \approx 0,8$:
 - compromis entre fluidité et viscosité
 - à ajuster en fonction de l'expérience du formulateur



Exemple de formulation avec BétonlabPro

Choix préliminaires:

- Valeur de $K'f$ à viser
 - Valeurs initiales suggérées dans le graphe ci contre (dédit de la diapo 28)
 - Valeurs probablement à ajuster en fonction de l'adjuvant



Sélection des constituants

- Menu
sélection

-Matériaux
génériques.cst

-Matériaux
sélectionnés

Sélection

Dossiers disponibles

- bmi.cst
- essais pompage dk.cst
- Exemples 2008.cst
- Granulats.cst
- Matériaux génériques 2007.cst
- Matériaux génériques 2008.cst
- Matériaux génériques.cst**
- réouverture temporaire.cst

Constituants disponibles

- Cendre volante
- Ciment CEM I 52,5
- Ciment CEM II/A-LL 32,5 N
- Concassé 0/4
- Concassé 12,5/20
- Concassé 2/6
- Concassé 20/50
- Concassé 5/12,5

Constituants sélectionnés pour les mélanges

- Matériaux génériques.cst:\Concassé 5/12,5**
- Matériaux génériques.cst:\Roulé 0/5
- Matériaux génériques.cst:\Ciment CEM I 52,5
- Matériaux génériques.cst:\Filler calcaire
- Matériaux génériques.cst:\Superplastifiant mélamine

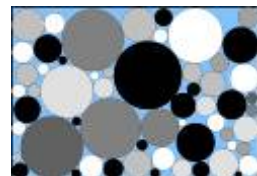
OK

Annuler

Ajouter

Enlever

Valider



Options de calculs

Options de calculs

Coût fixe (Euro/m3) 0

Alcalins dans l'eau

% moyen en alcalins actifs 0

% maximum en alcalins actifs 0

Confinement

Type Armatures

E 41

Sélectionnez les propriétés que vous souhaitez afficher

- C + kA
- E_{eff} / (C + kA)
- Densité
- Temps de stabilisation du wattmètre (s)
- Seuil de cisaillement (Pa)
- Viscosité plastique (Pa.s)
- Affaissement (cm)
- Vitesse initiale de ressuage (10⁻⁵ m.min⁻¹)

Propriétés non disponibles par manque de données

- Alcalins libérables moyens T_m (kg/m³)
- Alcalins libérables max T_{max} (kg/m³)

OK

Annuler

Tout sélectionner

Tout désélectionner

Info

Valider

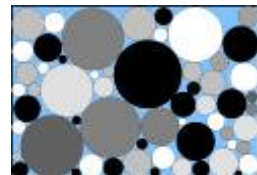
BAP de catégorie 3b:

→ doit passer dans la boîte en L avec 3 barreaux

→ espaces entre barreaux 41 mm

Cliquer pour afficher toutes les propriétés ou cocher uniquement les propriétés souhaitées

- Menu calculs



Optimisation

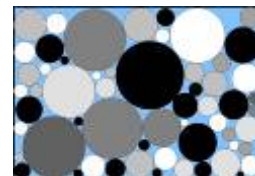
The screenshot displays the 'Simulations' window in BétonlabPro 3. It is divided into several sections: 'Composition' with input fields for G1, S1, C1, FCalc1, SP1, and Eau eff; 'Béton n°1' with buttons for 'Granularité' and 'Remplissage'; and a 'Résultats' table on the right. A blue box highlights the 'Gachée n°1' row in the results table, and another blue box points to the 'Optimiser' button. A blue arrow points from the 'Optimiser' button to the 'Gachée n°1' row.

Composition	
G1 (%)	50
S1 (%)	50
C1 (kg/m3)	300
FCalc1 (kg/m3)	200
SP1 (%)	1
Eau eff (kg/m3)	180

Béton n°1	
Gâchée n°	1
G1 (kg/m3)	846,9
S1 (kg/m3)	838
C1 (kg/m3)	300
FCalc1 (kg/m3)	200
SP1 (kg/m3)	10
Eau (kg/m3)	176,4
G1 (%)	50
S1 (%)	50
Taux de saturation (%)	0,98
Taux de superplaisifiant (%)	1
Eau eff	180
Air total (%)	1,5
AEA	Non
Rapport G/S	1,011
Eeff/C	0,6
Environnement	X0
C + kA	325
Eeff / (C + kA)	0,554
Densité	2,371
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	118
Seuil de cisaillement (Pa)	436
Viscosité plastique (Pa.s)	158
Affaissement (cm)	25,1
Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	0,11
fc1 (MPa)	10,4
fc2 (MPa)	17
fc3 (MPa)	21,7
fc7 (MPa)	31,6
fc28 (MPa)	42,4
fc90 (MPa)	43,9
fc360 (MPa)	51,3

**Gachée n°1:
formule de
départ
raisonnable
entrée
manuellement**

**Cliquer sur
optimiser**



Optimisation

The screenshot displays the BétonlabPro 3 software interface. The main window shows a table with the following data:

Gâchée n°							
G1 (kg/m ³)	847,6						
S1 (kg/m ³)	838,7						
C1 (kg/m ³)	300						
FCalc1 (kg/m ³)	200						
SP1 (kg/m ³)	9						
Eau (kg/m ³)	177,1						
G1 (%)	50						
S1 (%)	50						
Taux de saturation (%)	0,98						
Taux de superplastifiant (%)	0,9						
Eau eff							

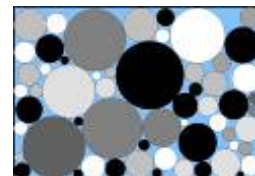
The 'Contraintes' dialog box is open, showing the 'Composition' tab. The 'Contraintes sur la composition' section has the following settings:

Paramètre	Opérateur	Valeur
G1 (%)		
S1 (%)		
C1 (kg/m ³)		
FCalc1 (kg/m ³)		
SP1 (%)	=	0,8
Eau eff (kg/m ³)		
Rapport G/S		
Eeff/C		

The 'Contraintes supplémentaires' section is empty. The 'Sans agent entraîneur d'air' checkbox is checked. The 'Tout effacer' button is visible. The 'OK' and 'Annuler' buttons are at the bottom right.

Onglet composition

- On impose $Sp/Sp^*=0,8$
- Soit d'après la gâchée 1, $Sp \approx 0,8\%$



Optimisation

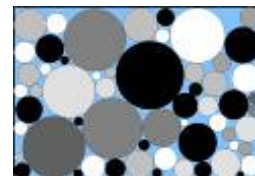
Table of constraints in the 'Contraintes' dialog:

Value	Operator	Property	Unit
		fc1	(MPa)
		fc2	(MPa)
		fc3	(MPa)
		fc7	(MPa)
40	≤	fc28	(MPa)
		fc90	(MPa)
		fc360	(MPa)
		ft28	(MPa)

Background spreadsheet data:

Gâchée n°	1
G1 (kg/m3)	847,6
S1 (kg/m3)	838,7
C1 (kg/m3)	300
fc28 (MPa)	35,3
Ei28 (GPa)	34,6
Capacité thermique(kJ/Kg)	1,038
Exothermie (°C)	48
Retrait endogène (10-6)	17
Retrait total (10-6)	719
Fluage propre (10-6/MPa)	39
Fluage total (10-6/MPa)	76

• On impose RC₂₈



Optimisation

The screenshot displays the BétonlabPro 3 software interface. At the top, a table lists the composition for 'Gâchée n°1':

Composant	Valeur
Gâchée n°	1
G1 (kg/m3)	847,6
S1 (kg/m3)	838,7
C1 (kg/m3)	300
FCalc1 (kg/m3)	200
SP1 (kg/m3)	9
Eau (kg/m3)	177,1
G1 (%)	50
S1 (%)	50
Taux de saturation (%)	0,98
Taux de superplastifiant (%)	0,9
Eau eff	180

Below the table, a 'Contraintes' dialog box is open, showing various constraints and optimization options. The 'Contraintes sur les propriétés' section includes:

- Indice de ségrégation (confiné)
- Indice de serrage du béton non confiné
- Indice de serrage du béton confiné
- Contribution des fines $K'f$ (set to 3,3)
- Contribution des gros gravillons $K'gg$ (set to 1,4)
- Compacité du squelette non confiné \emptyset^*
- Compacité des granulats g^*
- Prix

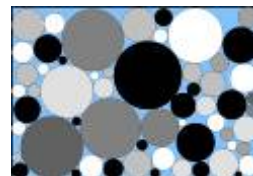
The 'Propriétés à optimiser' section shows 'Prix' selected, with the 'Minimiser' radio button checked. The 'OK' button is highlighted by a blue arrow.

On impose
 $K'f_{\min} = 3,3$ pour
 $Sp/Sp^* = 0,8$
(cf diapo 35)

On impose
 $K'_{gg} \leq 1,4$
(cf diapo 30)

On cherche à
minimiser le prix

Valider pour
lancer
l'optimisation



Optimisation

tion Constituants Sélection Modifications ?

Simulations

Composition

G1 (%) 49,63

S1 (%) 50,37

C1 (kg/m3) 300,6

FCalc1 (kg/m3) 273,9

SP1 (%) 0,86

Eau eff (kg/m3) 197,1

Gâcher

Optimiser

Granularité

Remplissage

Agent entraîneur d'air?

Non

Oui

Environnement XC1

Coût fixe 0

% moyen en alcalins actifs dans l'eau 0

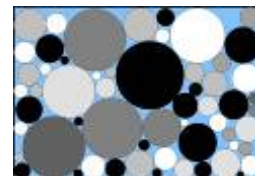
% maximum en alcalins actifs dans l'eau 0

Confinement: Armatures (mm)

Gâchée n°	1	30	31
G1 (kg/m3)	847,6	801,6	797
S1 (kg/m3)	838,7	785	800,3
C1 (kg/m3)	300	304,7	300,6
FCalc1 (kg/m3)	200	276,1	273,9
SP1 (kg/m3)	9	8,12	8,62
Eau (kg/m3)	177,1	187,3	184,3
G1 (%)	50	50,28	49,63
S1 (%)	50	49,74	50,37
Taux de saturation (%)	0,98	1,07	1,07
Taux de superplastifiant (%)	0,9	0,8	0,86
Eau eff	180	189,8	187,1
Air total (%)	1,4	1,3	1,3
AEA	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,011	1,021	0,996
Eeff/C	0,6	0,623	0,623
Environnement	XC1	XC1	XC1
C + kA	325	330	326
Eeff / (C + kA)	0,554	0,575	0,575
Densité	2,372	2,363	2,365
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	116	112	115
Seuil de cisaillement (Pa)	444	400	400
Viscosité plastique(Pa.s)	159	158	166
Affaissement (cm)	25	25,4	25,4
Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	0,11	0,1	0,1
fc1 (MPa)	10,4	9,6	9,6
fc2 (MPa)	17,1	15,9	15,8
fc3 (MPa)	21,8	20,2	20,2
fc7 (MPa)	31,7	29,6	29,6
fc28 (MPa)	42,5	40	40
fc90 (MPa)	44	41,4	41,4

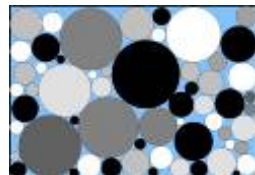
On constate a posteriori que $Sp/Sp^* \neq 0,8$ ($=0,8/1,07$)

On relance l'optimisation avec $Sp=0,86\%$ pour avoir $Sp/Sp^* \approx 0,8$ ($=0,86/1,07$)



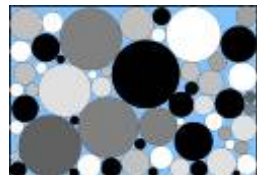
Ajustement de l'étalement

- On fabrique la gâchée simulée
- Si l'étalement expérimental n'est pas suffisant on ajuste le dosage en superplastifiant et/ou le dosage en eau.
- → on en déduit le nouveau seuil à viser



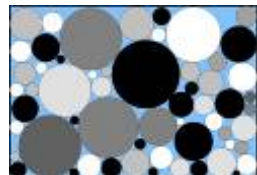
Ajustement pour l'essai au tamis

- Si le taux de laitance expérimental est trop fort, il faut optimiser une formule en imposant un K'_f plus élevé tout en conservant de l'étape précédente :
 - Sp/Sp^* constant
 - le nouveau seuil-cible
- On itère jusqu'à satisfaire expérimentalement l'exigence sur le taux de laitance
- → on définit un nouveau K'_f à viser
- pour une méthode plus complète mais plus complexe aller directement à la diapositive 49



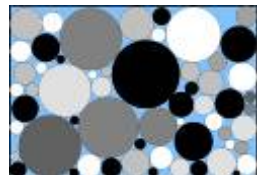
Ajustement pour la boîte en L

- Si il y a blocage à la boîte en L ($H2/H1 < 0,8$), il faut optimiser une formule en imposant un K'_{GG} plus faible, tout en conservant de l'étape précédente :
 - Sp/Sp^* constant
 - le nouveau seuil-cible
 - le nouveau K'_f -cible



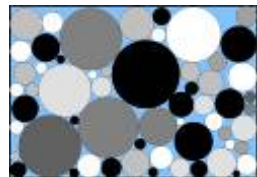
Ajustement de la résistance

- Vérification de la résistance à 28 jours → ajustement si nécessaire en relatif par rapport aux simulations

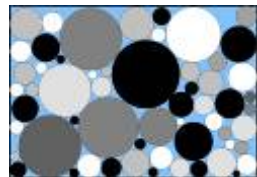


Pour en savoir plus...

- Voir la [documentation scientifique](#) sur la formulation des BAP sur site de BétonlabPro
- [1] « Recommandations pour l'emploi des Béton Auto-plaçants » de janvier 2008, édité par l'AFGC
- [2] T. Sedran, Rheologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants., Thèse de l'ENPC, 220 p, Mars 1999
- [3] Roussel N, Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes, Materials and Structures Vol. 40 Issue 9, pp 889-896, Nov 2007

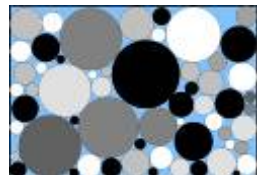


Merci de votre attention !



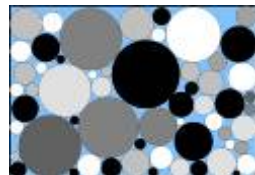
Annexe

Méthode de formulation plus complète

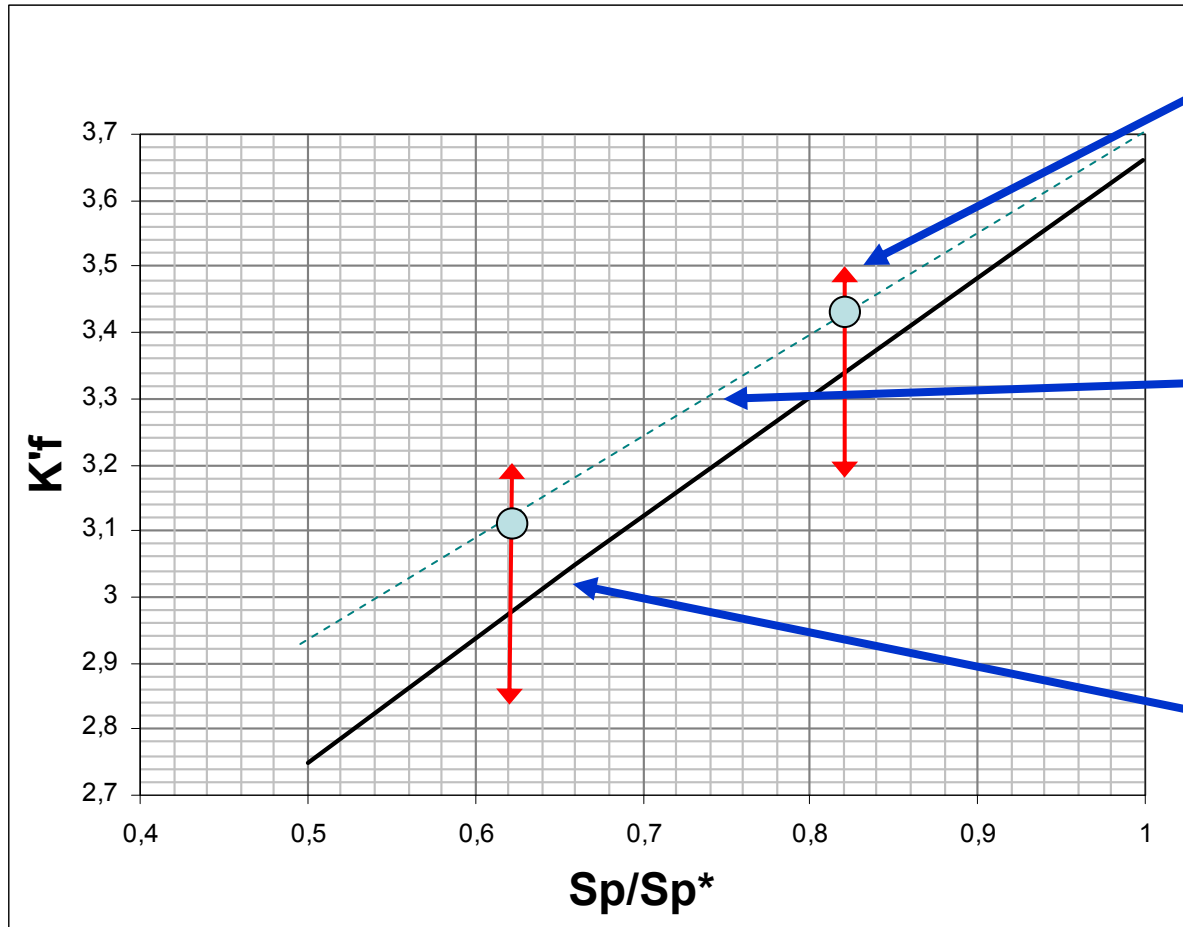


Ajustement pour l'essai au tamis

- Dans la méthode précédente, on fixe S_p/S_p^*
- Pour pouvoir également optimiser le dosage de superplastifiant, il faut déterminer la fonction $K'_{f \min}(S_p/S_p^*)$ correspondant à l'adjuvant sélectionné



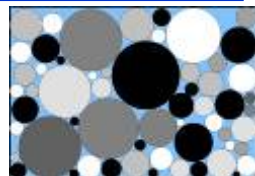
Ajustements du $K'f_{\min}$



On mesure la laitance de bétons simulés avec des $K'f$ variables à au moins deux rapports Sp/Sp^*

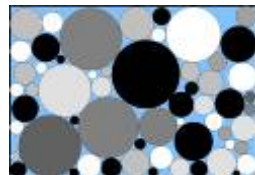
On détermine ainsi la vraie courbe limite donnant 10% pour le superplastifiant sélectionné

Limite supposée initialement pour simuler 10% de laitance (voir diapo 35)



Ajustement pour l'essai au tamis

- Simulations pour différents S_p/S_p^*
- Gâchée optimisée pour $K'_f \geq 3,7$. $S_p = 1,07\%$ (a postérieur, $S_p/S_p^* \approx 1$)
- Gâchée optimisée pour $K'_f \geq 3,4$. $S_p = 0,86\%$ (a postérieur, $S_p/S_p^* \approx 0,8$)
- Gâchée optimisée pour $K'_f \geq 3,1$. $S_p = 0,6\%$ (a postérieur, $S_p/S_p^* \approx 0,6$)



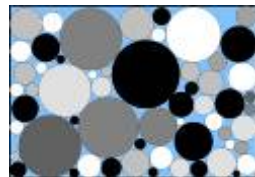
Résultats

- Volume de fines élevé pour lutter contre la ségrégation
- G/S faible

...mais attention au ressuage et au dosage en ciment

Le coût diminue lorsque le superplastifiant diminue...

G1 (kg/m ³)	807,4	801,2	848,2
S1 (kg/m ³)	757,4	784,8	714,4
G1 (kg/m ³)	299,2	301,5	323,5
F _{Calc1} (kg/m ³)	312,5	284,4	261,9
SP1 (kg/m ³)	10,67	8,64	6,47
Eau (kg/m ³)	181,4	184,8	199,7
G1 (%)	51,33	50,25	54,02
S1 (%)	48,67	49,75	45,98
Taux de saturation (%)	1,12	1,08	1,03
Taux de superplastifiant (%)	1,07	0,86	0,6
Rapport G/S	1,066	1,021	1,187
Environnement	XC1	XC1	XC1
C + kA	377	373	389
E _{eff} / (C + kA)	0,492	0,504	0,517
Temps de stabilisation du wattmètre (s)	125	116	97
Seuil de cisaillement (Pa)	381	400	400
Viscosité plastique (Pa.s)	200	171	117
Affaissement (cm)	25,7	25,5	25,4
Vitesse initiale de ressuage (10 ⁻⁵ m.min ⁻¹)	0,08	0,09	0,15
f _{c28} (MPa)	40	40	40
Indice de ségrégation (confiné)	0,925	0,925	0,932
Indice de serrage du béton confiné	6,932	6,753	6,278
Contribution des fines K' _f	3,7	3,4	3,1
Contribution des gros gravillons K' _{gg}	1,4	1,4	1,4
Prix	83,37	80,01	78,63



Résultats

- Choisir le mélange (et donc le Sp/Sp^*) le plus satisfaisant et retourner à la diapositive 46

