

BétonlabPro 3

Leçon N°14

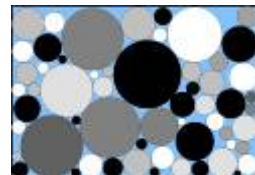
# Formulation des BHP (Bétons à Hautes Performances)

François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées  
Centre de Nantes

# Plan de la leçon

- Définition
- Choix des constituants
- Cahier des charges typique
- Propriétés particulières à surveiller
- Exemples
- Conclusion



# Définition

- Définition de la FIP (actuellement FIB):
  - $f_{c_{28}}$  (cylindre)  $\geq 60$  MPa
  - $e/l \leq 0,40$
- Définition de l'ACI:
  - Performances  $\Leftrightarrow$  cahier des charges
  - Hors d'atteinte dans un contexte « routinier »
- Contexte français: B 60/C75 à B 80/C100 et au-delà (BAEL/BPEL et Eurocode 2)



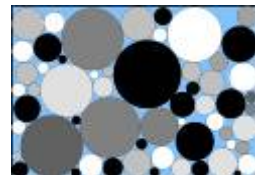
# Choix des constituants

- Granulats (cf. leçons N°3-4)
  - importance de la forme ( $\beta$ )
  - importance de l'adhérence ( $p$ )
  - **importance de la résistance propre** ( $q$ , lié au MDE)
  - idéal: fort  $\beta$ , fort  $p$ , faible  $q$
- Sables: sables un peu grossiers acceptables (car fortes teneurs en liant)



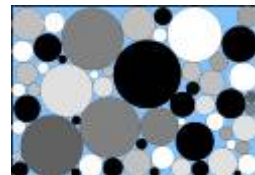
# Choix des constituants (suite)

- Ciment:
  - CEM I ou CEM II 52,5
  - Le plus important: **compatibilité avec les SP**
    - forte réduction d'eau
    - stabilité rhéologique
  - Un bon indicateur (seulement un indicateur): faible taux de  $C_3A$
  - Tests en présence d'adjuvant toujours nécessaires (cf. leçon N°5 à 7)



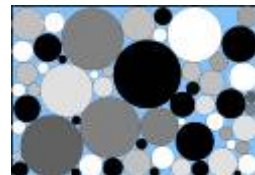
# Choix des constituants (suite)

- Additions minérales (cf. leçons N° 7-8):
  - En général nécessaires au-delà de B 60
  - Fumée de silice: addition reine, mais coûteuse!
    - effet filler ( $\langle d \rangle \approx 0,1 \mu\text{m}$ )
    - effet pouzzolanique (silice amorphe > 90 %)
  - Autres additions:
    - Autres pouzzolanes (cendres volantes, métakaolins)
    - Fillers ultrafins (calcaire, siliceux, phonolithe ...)
    - Laitiers de HF



# Choix des constituants (suite)

- Superplastifiants: indispensables!
- Ancienne génération:
  - naphthalènes sulfonates, mélamines
  - dosages importants (jusqu'à 1% du poids de ciment en extrait sec)
  - bétons visqueux, pertes de slump fréquentes, retards de prise importants



# Choix des constituants (suite)

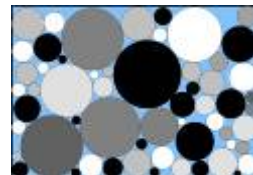
- Nouvelle génération de superplastifiants:
  - polyphosphonates, vinyles sulfonates, polycarboxylates
  - dosages plus faibles ( $< 0,4$  % en ES)
  - plus compatibles avec l'ensemble des ciments
  - rhéologie plus stable
  - mais souvent plus coûteux, même rapportés au  $m^3$  de béton !



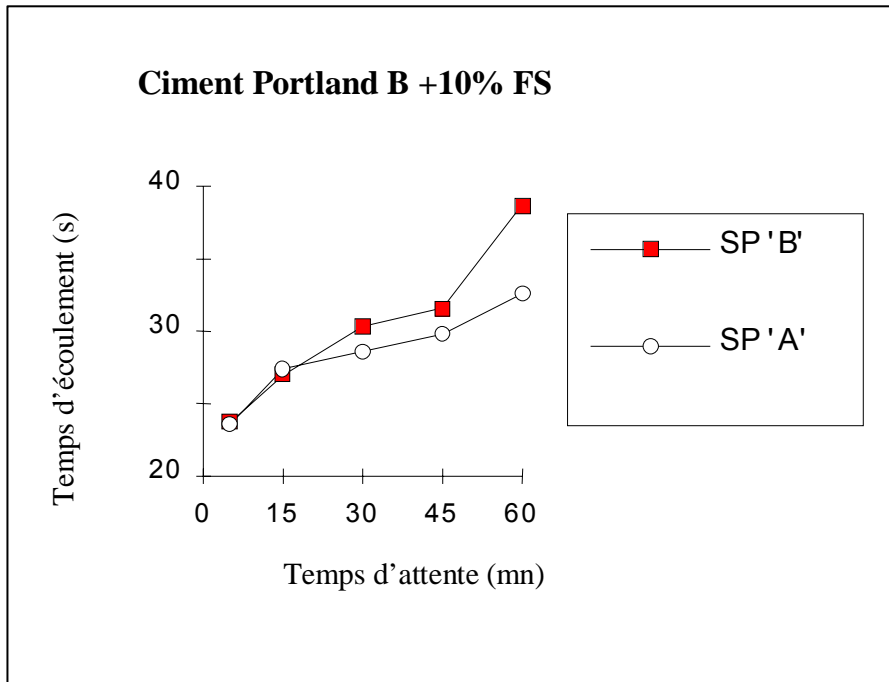


# Choix des constituants (suite)

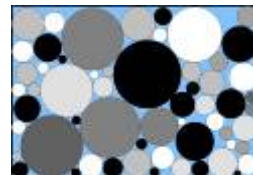
- Sélection du couple ciment/SP: méthode des coulis de l'AFREM (cf. leçon N°5 et 7)
- Courbes de saturation (T fonction du % de SP/C): comparaison de l'efficacité initiale et du « dosage efficace » de chaque SP
- Prévention des pertes d'affaissement rapide: mesurer T en fonction du temps



# Choix des constituants (suite)



- Exemple de suivi du temps d'écoulement en fonction du temps depuis le gâchage
- Le SP « A » donne une rhéologie plus stable que le SP « B »



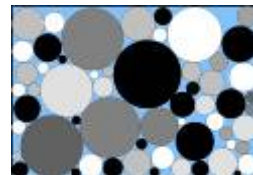
# Choix des constituants (suite)

- Autres adjuvants:
  - Retardateurs: souvent utiles en combinaison avec les SP (été/hiver). Améliorent les résistances à 28 j. Non pris en compte par BétonlabPro
  - Entraîneurs d'air:
    - avec FS et SP: délicats à utiliser
    - % d'air utile plus faible que dans les bétons ordinaires
    - pas toujours nécessaires → essais de gel dans la masse + écaillage



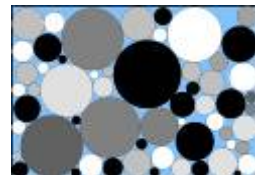
# Cahier des charges typiques

- $20 \leq \text{affaissement} \leq 24$  cm (valeur + faible: risque de perte de slump rapide, thixotropie excessive)
- Indice de serrage  $K \leq 8$
- $R_{c_1} \geq 20-30$  MPa
- $R_{c_{28}} \geq 70-100$  MPa
- Durabilité: selon EN 206, fascicule 65 A etc. (mais exigence de  $R_c \Rightarrow$  clauses de  $c_{\min}$  et  $e/c_{\max}$  en général non critiques)



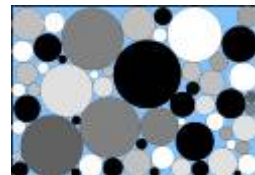
# Propriétés particulières à surveiller

- Temps de malaxage ( $T_m$ )
  - le temps nécessaire augmente avec la résistance (ex.: 4' pour un B80, 10' pour un BFUP)
  - $T_m$  impacte la productivité de la centrale et le prix de revient du béton
  - BétonlabPro évalue le temps de stabilisation du watt-mètre (malaxeur annulaire standard)
  - on peut chercher à limiter ce temps lors de l'optimisation



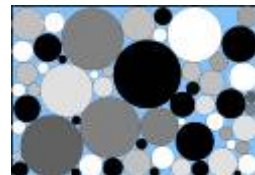
# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Stabilité de l'affaissement
  - d'autant plus critique que le rapport e/c est bas
  - à anticiper au moment de l'étude du couple ciment-superplastifiant (méthode AFREM)
  - à vérifier sur béton en laboratoire, puis lors de l'épreuve de convenance
  - effets de la température et du lot de ciment
  - non pris en charge par BétonlabPro

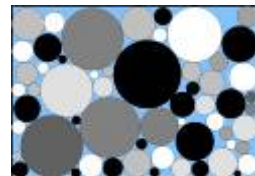
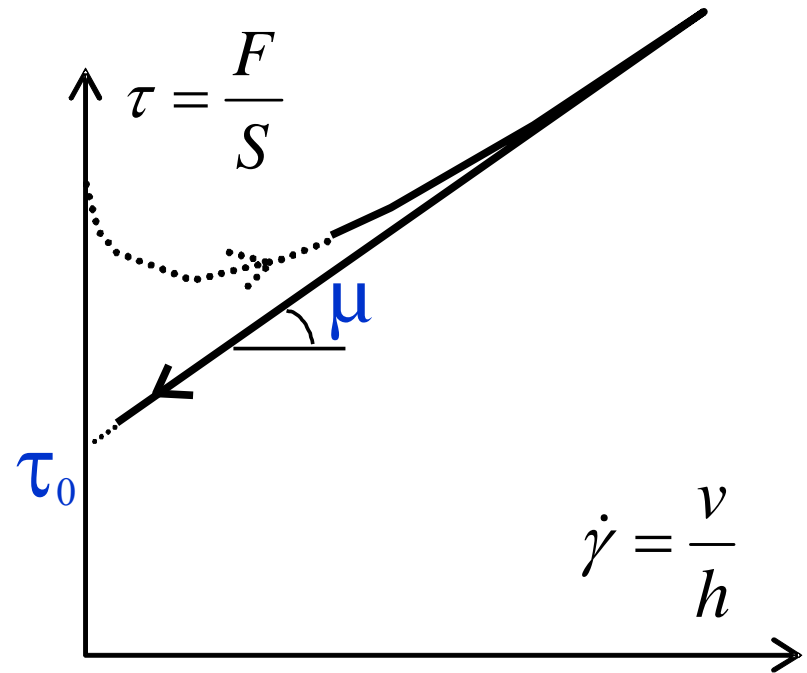
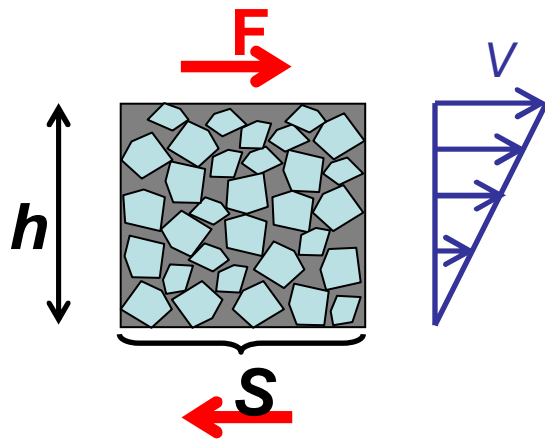


# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Viscosité plastique
  - rhéologie du béton frais plastique ou fluide: décrite par deux paramètres
    - seuil de cisaillement  $\tau_0$  (en Pa)
    - viscosité plastique  $\mu$  (en Pa.s)
  - seuil: lié à l'affaissement (slump)
  - viscosité plastique: traduit la résistance du béton au cisaillement à grande vitesse



# Propriétés particulières à surveiller (suite)





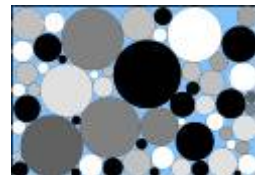
# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Viscosité plastique (suite)
  - plus élevée pour les BHP que pour les bétons classiques
  - si  $\mu$  élevée, bétons collants, qui figent vite (thixotropes), difficiles à pomper et à talocher
  - valeur limite sur chantier: 300 Pa.s
  - les fumées de silice réduisent la viscosité plastique à même slump et même résistance
  - BétonlabPro évalue  $\mu$  (mais  $\mu$  dépend du type de SP=> estimations à prendre avec prudence)



# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Mesure souhaitable avec le rhéomètre BTRHEOM du LCPC
- Echantillon 7 litres
- Mesure  $\tau_0$ ,  $\mu$  et leur évolution pendant la durée d'utilisation du béton (par ex. 2 heures) avec un seul échantillon



# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Exothermie
  - pendant le durcissement, le béton dégage de la chaleur
  - pièces très massives: pertes par conduction lentes => forte élévation de température => risques de fissuration et de RSI
  - BétonlabPro calcule l'élévation maximale (en conditions adiabatiques)  $\Delta\theta$ , qui se produirait par exemple dans un cube de 3 m d'arête ou plus



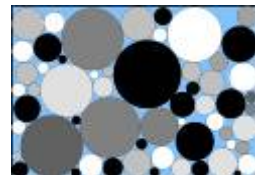
# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Exothermie (suite)
  - les BHP ont général tendance à chauffer plus que les bétons classiques
  - pour limiter  $\Delta\theta$  :
    - choisir un ciment à faibles teneurs en  $C_3S$  et  $C_3A$
    - réduire l'eau
    - utiliser des additions minérales
  - en conditions semi-adiabatiques (épaisseur de l'ordre du mètre ou moins), l'élévation de température diminue, d'autant plus que le béton contient des additions



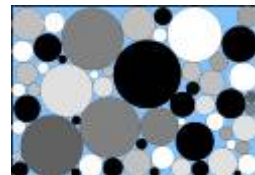
# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Retrait endogène
  - retrait d'hydratation, apparaissant dans un béton qui ne sèche pas
  - négligeable dans les bétons classiques, plus important dans les BHP
  - rapide, peut engendrer de la fissuration si les pièces sont bloquées (même sans séchage)
  - dépend du type de ciment (paramètre  $K_c$ )
  - BétonlabPro évalue le retrait endogène



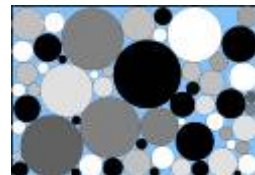
# Propriétés particulières à surveiller (suite)

- Fluage
  - les BHP peuvent « travailler » plus que les B0  
=> risque de déformations de fluage élevées
  - mais le fluage spécifique (déformation par unité de contrainte) augmente quand  $f_c$  diminue
  - les fumées de silice réduisent fortement le fluage
  - BétonlabPro évalue le fluage propre et le fluage total



# Exemples

- Ouvrages réels, construits avant l'apparition de BétonlabPro
- Comparaison formules réelles utilisées et formules théoriques basées sur les matériaux génériques (dossier standard fourni avec le logiciel), et optimisées avec BétonlabPro 3





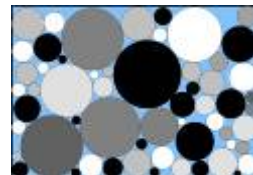
# Exemples (suite)



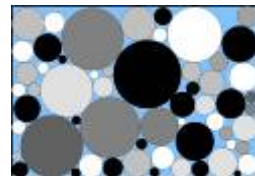


# Exemples (suite)

<b>Critère</b>	<b>B60</b>
Indice de serrage	$\leq 8$
Affaissement	$\geq 200$ mm
Viscosité plastique	$\leq 200$ Pa.s
Résistance à la compression	$\geq 72$ MPa
Rapport e/c	$\leq 0,40$
Rapport fumées de silice/ciment	0%
Dosage en superplastifiant	Saturation
Coût	Minimum



# Exemples (suite)



# Exemples (suite)

<b>Critère</b>	<b>B80</b>
Indice de serrage	$\leq 8$
Affaissement	$\geq 200$ mm
Viscosité plastique	$\leq 200$ Pa.s
Résistance à la compression	$\geq 96$ MPa
Rapport e/c	$\leq 0,40$
Rapport fumées de silice/ciment	8%
Dosage en superplastifiant	Saturation
Coût	Minimum



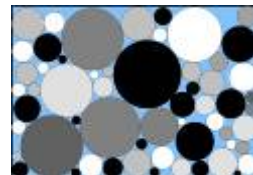
# Exemples (suite)

Constituants	B60 (simulations)	B60 Joigny	B80 (simulations)	B80 Iroise
Concassé 12,5/20 (kg/m <sup>3</sup> )	750	1030	744	634 (10/16)
Concassé 5/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	245	(5/20)	242	423 (4/10)
Roulé 0/5 (kg/m <sup>3</sup> )	625	649	620	744
Sablon 0/1 (kg/m <sup>3</sup> )	202	105	200	(bien gradué)
CEM I 52,5 (kg/m <sup>3</sup> )	449,5	450	439	450
Fumées de silice (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	35,1	36
Superplastifiant mélamine (kg/m <sup>3</sup> )	11,24	11,25	15,81	17,7
Retardateur (kg/m <sup>3</sup> )	-	4,5	-	1,57
Eau (l/m <sup>3</sup> )	153,1	165	140	132
e/c	0,35	0,35	0,34	0,32
G/S	1,2	1,36	1,2	1,45
Densité	2,44	-	2,44	2,47



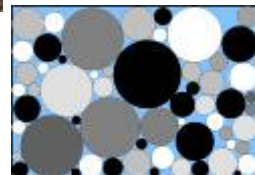
# Exemples (suite)

Seuil de cisaillement (Pa)	473	-	609	-
Viscosité (Pa.s)	200	-	200	-
Affaissement (mm)	248	190-250*	235	195-255*
Indice de serrage	6,67	excellente	6,72	excellente
Résistance à la compression à 28 j. (MPa)	72	78	96	95,7*
Résistance caractéristique obtenue	-	68	-	83,5
Module d'élasticité (GPa)	44,6	-	49,5	47
Exothermie (°C)	58,4	57	61,2	52
Retrait endogène ( $10^{-6}$ )	104	171	139	-
Retrait total ( $10^{-6}$ )	657	609	658	-
Fluage spécifique propre ( $10^{-6}$ /MPa)	26	24	15	-
Fluage spécifique total ( $10^{-6}$ /MPa)	51	39	31	-
Coût (€m <sup>3</sup> )	97,16	-	123,58	-



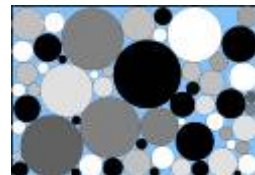
# Exemples (suite)

BHP étanche de Civaux



# Exemples (suite)

<b>Critère</b>	<i>Valeur</i>
Affaissement	$\geq 200$ mm
Compactabilité	$\leq 8$
Viscosité plastique	$\leq 200$ Pa.s
Résistance à la compression	$\geq 72$ MPa
Dosage en superplastifiant	à saturation
Fumée de silice	$\leq 40$ kg/m <sup>3</sup>
Élévation de la température en conditions adiabatiques	Minimale





# Exemples (suite)

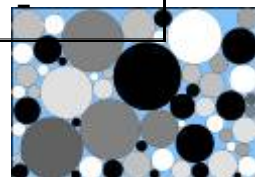
Constituants	B60 spécial pour centrale nucléaire (simulations)	BHP Civaux II
Gravillon 12,5/20 (kg/m <sup>3</sup> )	800	815
Gravillon 5/12,5 (kg/m <sup>3</sup> )	261	318
Sable de rivière 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	666	818
Sable correcteur 0/1 (kg/m <sup>3</sup> )	215	(0/5)
CEM I (kg/m <sup>3</sup> )	249	266
Filler calcaire	37	57
Fumées de silice (kg/m <sup>3</sup> )	40	40
Superplastifiant (kg/m <sup>3</sup> )	10.5	9.1
Retardateur (kg/m <sup>3</sup> )	-	0.93
Eau (l/m <sup>3</sup> )	137,9	161
e/c	0.57	0.55
G/S	1.2	1.39
Densité	2.41	-





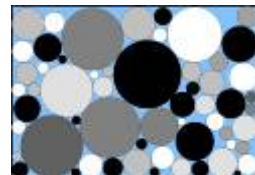
# Exemples (suite)

Constituants	B60 spécial pour centrale nucléaire (simulations)	BHP Civaux II
Seuil de cisaillement (Pa)	840	-
Viscosité après vibration (Pa.s)	200	-
Affaissement (mm)	206	180-230*
Compactabilité	6,88	Satisfaisante
Résistance à la compression à 28 j. (MPa)	72	66,1*
Résistance caractéristique obtenue	-	60,7*
Module d'élasticité (GPa)	48,3	-
Élévation de la température en conditions adiabatiques (°C)	46,6	-
Retrait endogène ( $10^{-6}$ )	34	
Retrait total ( $10^{-6}$ )	544	
Fluage spécifique propre ( $10^{-6}$ /MPa)	12	
Fluage spécifique total ( $10^{-6}$ /MPa)	24	
Coût (€m <sup>3</sup> )	96,61	



# Conclusion

- BHP = haut de gamme des bétons industriels d'aujourd'hui
- L'atteinte de la résistance à 28 jours pose rarement problème, sauf si granulats locaux médiocres
- Nécessité de bien étudier le couple ciment-adjuvant
- Nécessité de surveiller toutes les propriétés secondaires



# Conclusion (suite)

- Les cahiers des charges peuvent devenir très complexes => intérêt d'un logiciel moderne pour réduire les essais (ex.: 1° étude béton Tunnel sous la manche = 80 gâchées sans réussir à satisfaire au cahier des charges!)
- Bétons à ultra-hautes performances fibrés (BFUP): non encore couverts par BétonlabPro, mais en général, produits pré-formulés (et souvent brevetés)

