

BétonlabPro 3

Leçon N°11

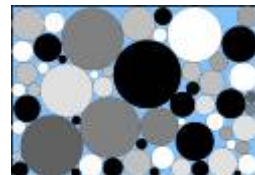
Formulation d'un béton de structure (optimisation et ajustement expérimental)

François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Plan de la leçon

- Rappel sur le cahier des charges
- Simulations préalables
- Optimisation théorique avec BétonlabPro (utilisation du solveur et exemple)
- Ajustements en laboratoire (principes et exemple)
- Conclusion



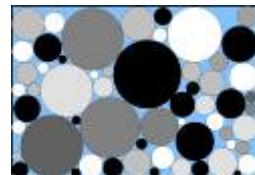
Rappel sur le cahier des charges

- Des obligations de résultats: les propriétés du béton formulé
 - la plupart sont évaluées par BétonlabPro
 - mais certaines ne le sont pas, et doivent être reconnues en laboratoire (ex.: évolution de l'affaissement pendant 2 heures)
- Des obligations de moyens: interdiction de certains constituants (ex.: ciment non PM pour un béton à la mer)



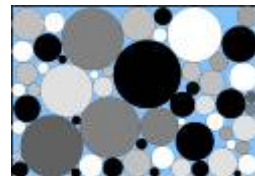
Rappel sur le cahier des charges (suite)

- Le cahier des charges du formulateur doit être traduit dans le contexte BétonlabPro
 - résistance caractéristique 30 MPa, résistance moyenne à viser 36 MPa
 - spécification de l'indice de serrage etc.
- Au final, le cahier des charges se traduit par
 - une sélection judicieuse des constituants
 - un ensemble de propriétés recherchées (valeur visée, ou intervalle = valeur maxi et valeur mini)



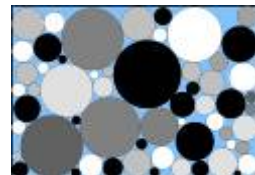
Rappel sur le cahier des charges (suite)

- Critère final à optimiser: en général le coût
 - BétonlabPro calcule le coût des constituants + coût forfaitaire de production au mètre-cube
 - mais le temps de malaxage (calculé par BétonlabPro) joue aussi sur le coût de production
- Cependant, on peut aussi limiter le coût et optimiser sur un critère qualitatif (par exemple minimiser le retrait....)



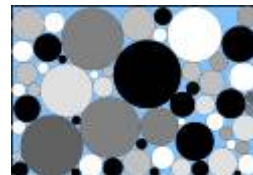
Simulations préalables

- Avant de mener une optimisation automatique, approcher la formule « à la main »
- Squelette: environ 40 % de sable
- Si on utilise un plastifiant/superplastifiant, dose forfaitaire $\approx 1/3$ à $1/2$ de la dose de saturation
- Pour contrôler la consistance, jouer sur l'eau efficace



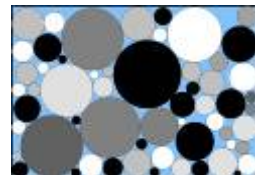
Simulations préalables (suite)

- Pour contrôler la résistance, jouer sur le rapport eau/ciment
- On doit parvenir à une formule proche du cahier des charges
- Eviter les valeurs nulles ou plafonnées pour des propriétés du cahier des charges (ex.: $0 < \text{affaissement} < 30 \text{ cm}$), sinon risque de « blocage » du solveur



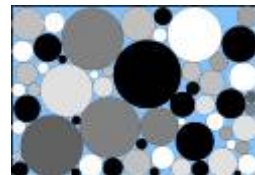
Optimisation théorique: utilisation du solveur

- Première étape: optimiser le squelette
 - garder constants les paramètres « pâte » (liants, adjuvants, eau)
 - faire varier les % des fractions granulaires
 - rechercher l'indice de serrage le plus faible
 - fixer les % des fractions granulaires



Optimisation théorique: utilisation du solveur (suite)

- Deuxième étape: optimiser la pâte
 - libérer la composition de la pâte
 - entrer les différentes contraintes du cahier des charges
 - préciser le paramètre à optimiser (coût unitaire, dosage en ciment etc.)
 - lancer le solveur
 - si cahier des charges réalisable, BétonlabPro donne alors le béton théorique optimal



Exemple

- Béton B35/C45 pour ouvrage d'art
- Consistance très plastique (S3)
- Résistance en compression à 24 h supérieure à 10 MPa (décoffrage)
- Classe d'environnement XF1 (selon EN 206):

$$R_{c28} \geq 25 \text{ MPa}$$

$$C+kA \geq 280 \text{ kg/m}^3$$

$$E_{\text{eff}}/(C+kA) \leq 0,60$$



Exemple (suite)

Cahier des charges BétonlabPro:

$$C+kA \geq 280 \text{ kg/m}^3$$

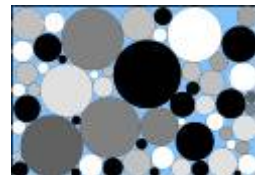
$$E_{\text{eff}}/(C+kA) \leq 0,60$$

$$10 \text{ cm} \leq \text{slump} \leq 15 \text{ cm}$$

$$R_{c_1} \geq 10 \text{ MPa}$$

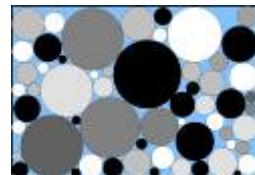
$$R_{c_{28}} \geq 42 \text{ MPa}$$

$$K \leq 7,5$$

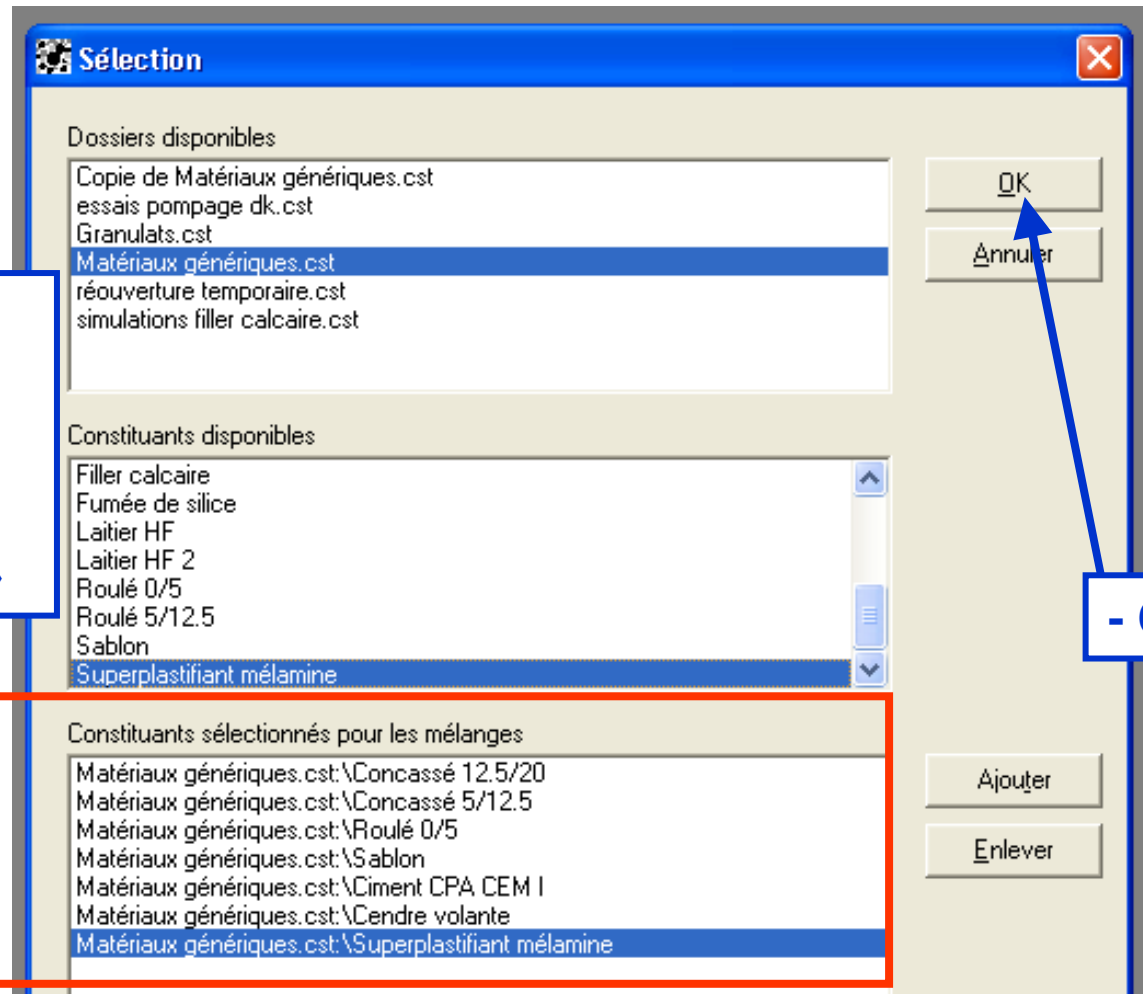


Exemple (suite)

- Constituants disponibles: dans le dossier « Matériaux génériques.cst »:
 - concassé 12,5/20
 - concassé 5/12,5
 - roulé 0/5
 - sablon
 - ciment CPA CEM I
 - cendre volante
 - superplastifiant type mélamine



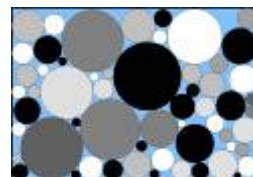
Exemple (suite)



- Menu
Sélection

- Dossier
« Matériaux
Génériques »

- Cliquer sur OK



Exemple (suite)

Options de calcul

Coût fixe (Euro/m3)

Alcalins dans l'eau

% moyen en alcalins actifs

% maximum en alcalins actifs

Confinement

Type

Sélectionnez les propriétés que vous souhaitez afficher

- C + kA
- Eeff / (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

- Alcalins libérables moyens Tm (kg/m3)
- Alcalins libérables max T max (kg/m3)

OK

Annuler

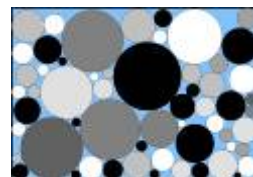
Tout sélectionner

Tout désélectionner

Info

- Choisir les propriétés à simuler

- Cliquer sur OK



Exemple (suite)

Valeurs forfaitaires de départ

Options

Gâcher

Optimiser

Béton n°3

Granularité

Remplissage

Agent entraîneur d'air?

Non

Oui

Environnement: XF1

Coût fixe: 0

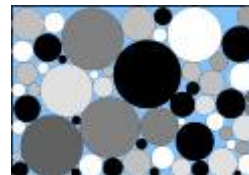
% moyen en alcalins actifs dans l'eau: 0

% maximum en alcalins actifs dans l'eau: 0

Confinement: Aucun

Gâchée n°	1	2	3
G1 (kg/m3)	474,2	483,4	481,7
G2 (kg/m3)	471,7	480,8	479,2
S1 (kg/m3)	933,6	951,6	948,4
S2 (kg/m3)	0	0	0
C1 (kg/m3)	350	300	300
CV1 (kg/m3)	0	0	0
SP1 (kg/m3)	2,92	2,5	2,5
Eau (kg/m3)	161,7	162,1	167,1
G1 (%)	25	25	25
G2 (%)	25	25	25
S1 (%)	50	50	50
S2 (%)	0	0	0
Taux de saturation (%)	0,75	0,75	0,75
Taux de superplastifiant (%)	0,25	0,25	0,25
Eau eff	160	160	165
Air total (%)	2,1	2,3	2,1
AEA	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,013	1,013	1,013
Eeff/C	0,457	0,533	0,55
Environnement	XF1	XF1	XF1
C + kA	350	300	300
Eeff / (C + kA)	0,457	0,533	0,55
Affaissement (cm)	9,8	6,2	10,6
fc1 (MPa)	22,5	13,7	12,6
fc7 (MPa)	42,3	30,7	29
fc28 (MPa)	53,3	43,2	41,6
Indice de serrage du béton non confiné	7,422	7,672	7,385

On est proche du cahier des charges



Exemple (suite)

- bouton
«Optimiser»

- volet
«Composition»

- cliquer sur
«Pâte
constante»

Contraintes

Propriétés **Composition**

Contraintes sur la composition

		G1 (%)		
		G2 (%)		
		S1 (%)		
		S2 (%)		
300	=	C1 (kg/m3)		
0	=	CV1 (kg/m3)		
0,25	=	SP1 (%)		
165	=	Eau eff (kg/m3)		

Contraintes supplémentaires

Ajouter
Supprimer

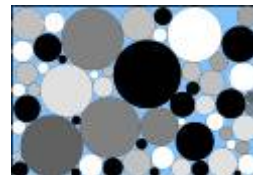
Sans agent entraîneur d'air

Tout effacer

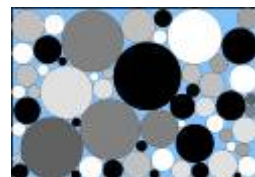
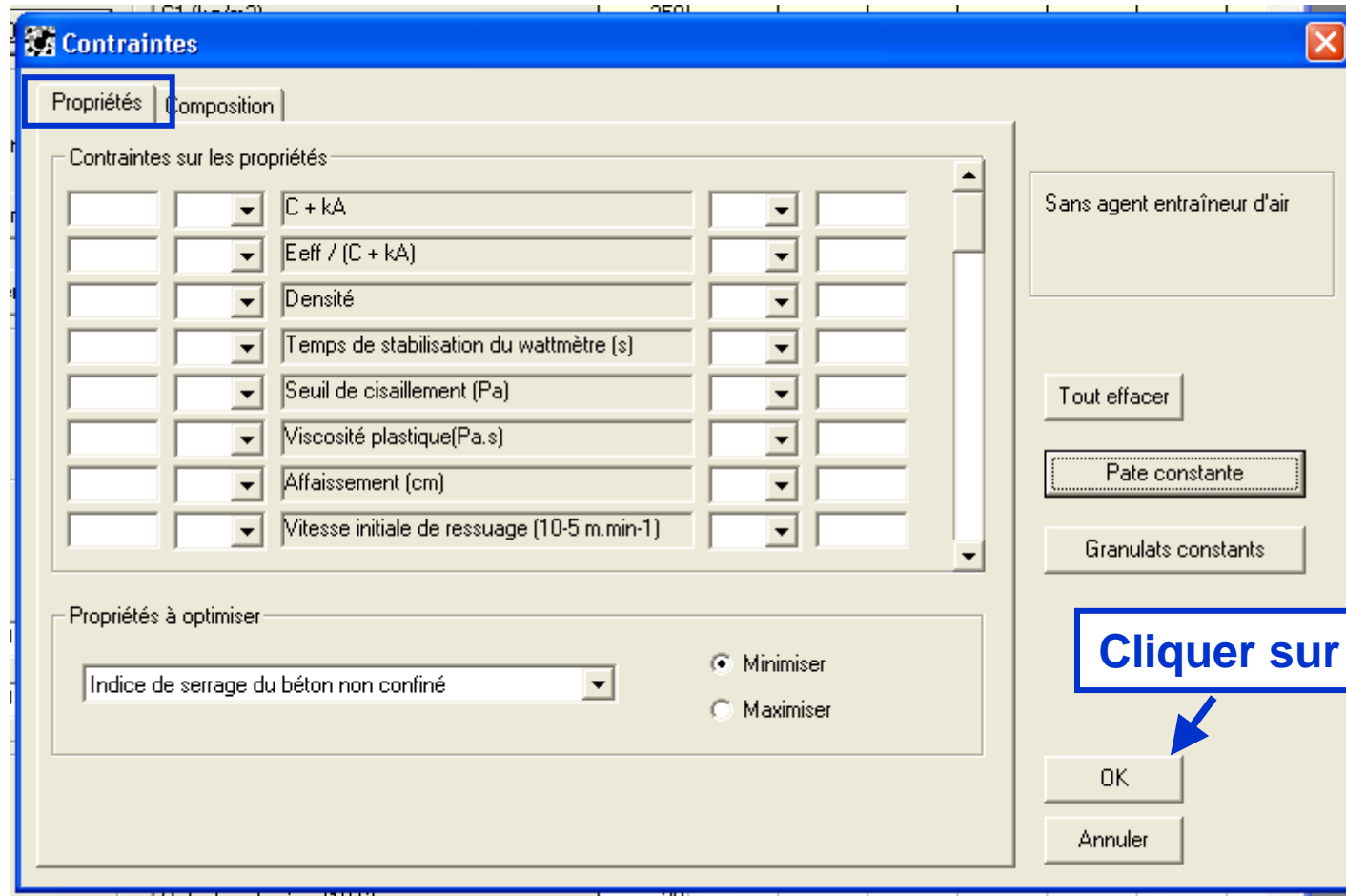
Pâte constante

Granulats constants

OK
Annuler



Exemple (suite)



Ici, l'indice de serrage

Exemple (suite)

Optimisation

Nombre d'itérations: 4

Valeur de l'objectif: 7,0564

Démarrer

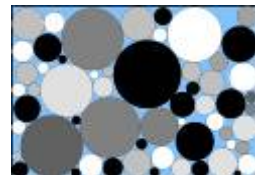
Arrêter

- le solveur « tourne »
- la composition à squelette optimisé apparaît
- le nouveau squelette granulaire est théoriquement celui qui facilite le plus la mise en place du béton

Simulations

Composition

G1 (%)	40,99
G2 (%)	14
S1 (%)	32,64
S2 (%)	12,37
C1 (kg/m3)	300
CV1 (kg/m3)	0
SP1 (%)	0,25
Eau eff (kg/m3)	165



Exemple (suite)

Suite de l'optimisation:

- cliquer sur « Optimiser »

- cliquer sur « Granulats constants »

Contraintes

Propriétés **Composition**

Contraintes sur la composition

40,99	=	G1 (%)		
14	=	G2 (%)		
32,64	=	S1 (%)		
		S2 (%)		
		C1 (kg/m3)		
		CV1 (kg/m3)		
		SP1 (%)		
		Eau eff (kg/m3)		

Contraintes supplémentaires

Ajouter
Supprimer

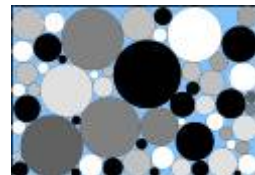
Sans agent entraîneur d'air

Tout effacer

Pate constante

Granulats constants

OK
Annuler



Exemple (suite)

- cliquer sur «Propriétés»
- entrée des contraintes du cahier des charges
- propriété à optimiser (prix)
- OK

Contraintes

Propriétés Composition

Contraintes sur les propriétés

280	≤	C + kA		
		Eeff / (C + kA)	≤	0,60
10	≤	Affaissement (cm)	≤	15
10	≤	fc1 (MPa)		
		fc7 (MPa)		
42	≤	fc28 (MPa)		
		Indice de serrage du béton non confiné	≤	7,5
		Prix		

Propriétés à optimiser

Prix

Minimiser
 Maximiser

Sans agent entraîneur d'air

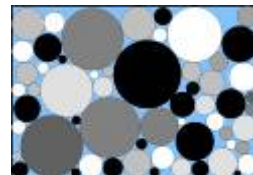
Tout effacer

Pate constante

Granulats constants

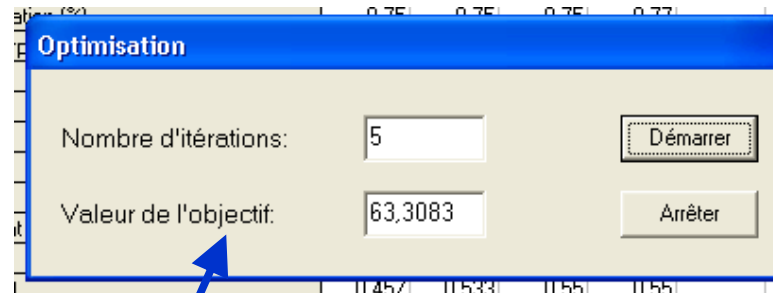
OK

Annuler



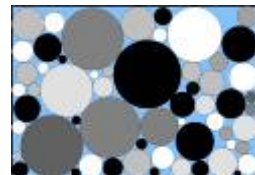
Exemple (suite)

-Le solveur tourne...



The screenshot shows a dialog box titled "Optimisation" with a blue header. It contains two rows of controls. The first row has the label "Nombre d'itérations:" followed by a text input field containing the number "5" and a "Démarrer" button. The second row has the label "Valeur de l'objectif:" followed by a text input field containing the value "63,3083" and an "Arrêter" button. A blue arrow points from a text box below to the "Valeur de l'objectif:" label.

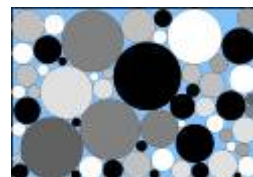
Ici, le prix
au m³ du
béton



Exemple (suite)

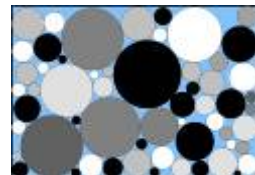
Gâchée n°	1	2	3	4	5
G1 (kg/m3)	474,2	483,4	481,7	798,2	774,5
G2 (kg/m3)	471,7	480,8	479,2	271,3	263,1
S1 (kg/m3)	933,6	951,6	948,4	625,7	607,1
S2 (kg/m3)	0	0	0	238,1	231,1
C1 (kg/m3)	350	300	300	300	239
CV1 (kg/m3)	0	0	0	0	102,5
SP1 (kg/m3)	2,92	2,5	2,5	2,5	1,44
Eau (kg/m3)	161,7	162,1	167,1	167,1	158,8
G1 (%)	25	25	25	40,99	40,99
G2 (%)	25	25	25	14	14
S1 (%)	50	50	50	32,64	32,64
S2 (%)	0	0	0	12,37	12,37
Taux de saturation (%)	0,75	0,75	0,75	0,77	0,86
Taux de superplastifiant (%)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,18
Eau eff	160	160	165	165	156,1
Air total (%)	2,1	2,3	2,1	1,3	1,7
AEA	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,013	1,013	1,013	1,238	1,238
Eeff/C	0,457	0,533	0,55	0,55	0,653
Environnement	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1
C + kA	350	300	300	300	280
Eeff / (C + kA)	0,457	0,533	0,55	0,55	0,558
Affaissement (cm)	9,8	6,2	10,6	19,5	10
fc1 (MPa)	22,5	13,7	12,6	12,5	10
fc7 (MPa)	42,3	30,7	29	28,5	26,3
fc28 (MPa)	53,3	43,2	41,6	40,6	42,3
Indice de serrage du béton non confiné	7,422	7,672	7,385	6,418	6,812
Prix	72,43	65,74	65,66	65,95	59,02

- Composition finale trouvée
- Le cahier des charges est satisfait
- Certaines contraintes sont « saturées »
- Le solveur permet d'économiser environ 10 % du coût des constituants par rapport au béton de départ



Ajustements en laboratoire

- On détermine le volume de béton à fabriquer
- On calcule les quantités pour le volume en question, en tenant compte de l'humidité des granulats
- On fabrique une gâchée
- On vérifie les propriétés du béton frais (affaissement, teneur en air ...)



Ajustements en laboratoire (suite)

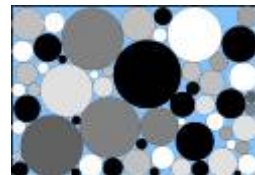
En cas d'écart sur la consistance:

- Si utilisation d'un adjuvant, on fait varier le dosage pour ajuster la consistance
- Si pas d'adjuvant, ou si écart très important par rapport à l'objectif, on modifie le volume de pâte (en gardant la composition de la pâte constante)
- Attention à ne pas sortir du cahier des charges (ex.: dosage minimum en ciment)



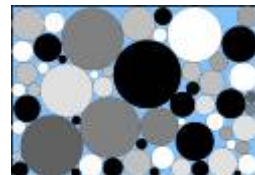
Ajustements en laboratoire (suite)

- Estimation des variations des paramètres: on peut utiliser BétonlabPro en « relatif »
- Une fois les propriétés du béton frais satisfaites, on mesure la densité du béton frais
- On vérifie la stabilité de la consistance (si cette exigence figure au cahier des charges)



Ajustements en laboratoire (suite)

- On calcule la formule réelle (*mise au mètre-cube*) en multipliant toutes les masses par le rapport densité réelle/densité théorique du béton
- On vérifie qu'on reste dans le cahier des charges (critères $C+kA$, $E/C+kA$...)
- On fabrique des éprouvettes pour la vérification du béton durcissant et durci



Ajustements en laboratoire (suite)

- Si doutes sur les paramètres de résistance des matériaux (p et q des granulats, $R_{c_{28}}$ du ciment etc.), on peut formuler trois bétons:
 - un visant la résistance du cahier des charges
 - un béton « plus » (+ 20 % de résistance)
 - un béton « moins » (- 20 % de résistance)
- A 28 jours, les trois valeurs de $R_{c_{28}}$ encadreront la valeur visée et on pourra déterminer par interpolation le « bon béton »



Exemple d'ajustement

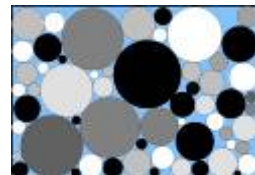
On travaille ici avec BétonlabPro et un tableur (pour des calculs simples).

- Colonne 1: obtenue par optimisation théorique BétonlabPro, 1000 ℓ, granulats secs
- Colonne 2: obtenue par calcul, réduite à 100 ℓ, granulats secs



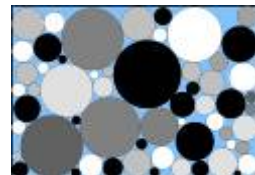
Exemple d'ajustement (suite)

- Colonne 3: par calcul, 100 ℓ, granulats humides
 - chaque masse de granulats est multipliée par $100/(100-w)$, avec w teneur en eau, en %, du granulats. Toute l'eau contenue dans les granulats est enlevée de l'eau d'ajout sur granulats secs pour obtenir l'eau d'ajout sur granulats humides
 - **Fabrication et essai d'affaissement.**
Constat: slump trop faible de 6 cm



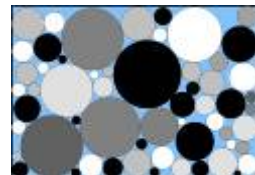
Exemple d'ajustement (suite)

- Colonne 4: par simulation BétonlabPro, 1000 ℓ, granulats secs
 - on part de la formule 1 (valeur théorique de slump 10 cm)
 - on cherche le dosage en superplast. pour augmenter de 6 cm (soit pour trouver 16 cm)
- Colonne 5: par calcul, réduite à 100 ℓ, granulats secs



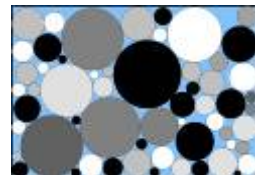
Exemple d'ajustement (suite)

- Colonne 6: par calcul, 100 ℓ, granulats humides.
 - Mêmes calculs que précédemment
 - **Fabrication, essai d'affaissement et mesure de densité.**
 - Constat: affaissement OK, densité différente de la valeur théorique



Exemple d'ajustement (suite)

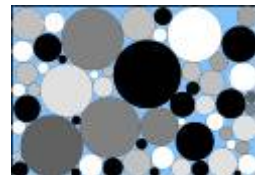
- Colonne 7: la même, en composition réelle sur 10 litres:
 - on calcule le rapport densité réelle/densité théorique (ici: $2,389/2,384 = 1,0021$)
 - on multiplie toutes les masses par ce coefficient
- Colonne 8: composition finale au m^3 . Il reste à vérifier les caractéristiques sur béton durcissant et durci.



	% d'hu- midité	1	2	3	4	5	6	7	8
Colonne n°		1	2	3	4	5	6	7	8
Volume (l)		1000	10	10	1000	10	10	10	1000
G1 (kg/m3)	2,3	774,5	77,45	79,273	777,1	77,71	79,539	79,705	797,0
G2 (kg/m3)	1,9	263,1	26,31	26,820	264	26,4	26,911	26,967	269,7
S1 (kg/m3)	5,8	607,1	60,71	64,448	609,1	60,91	64,660	64,795	647,9
S2 (kg/m3)	0,8	231,1	23,11	23,296	231,9	23,19	23,377	23,426	234,3
C1 (kg/m3)		239	23,9	23,900	239	23,9	23,900	23,950	239,5
CV1 (kg/m3)		102,5	10,25	10,250	102,5	10,25	10,250	10,271	102,7
SP1 (kg/m3)		1,44	0,144	0,144	2,15	0,215	0,215	0,215	2,154
Eau (kg/m3)		158,8	15,88	9,623	158,3	15,83	9,552	9,572	95,7
Eeff/C		0,653			0,653				
Environnement		XF1			XF1				
C + kA		280			280				
Eeff / (C + kA)		0,558			0,558				
Densité		2,378			2,384		2,389		
Affaissement (cm)		10		4	16,1		10,5		
fc1 (MPa)		10			10,3				
fc7 (MPa)		26,3			26,8				
fc28 (MPa)		42,3			42,9				
Indice de serrage		6,812			6,716				
Prix		59,02			60,16				

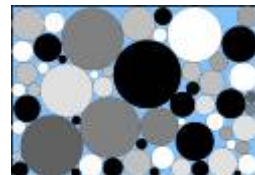
simulations

essais



Conclusion

- Pour formuler, il faut d'abord bien caractériser les constituants
- Ensuite, simulations préalables préférables
- Optimisation directe possible, mais résultats parfois bizarres, risques de blocage du solveur (et tendance à obtenir des bétons trop « caillouteux »)
- Optimisation en deux phases préférable: squelette puis pâte



Conclusion (suite)

- Exceptions à cette règle: bétons projetés ou autoplaçants (cf. leçons N°15 et 16)
- Nécessité de prendre en compte le confinement (cf. leçon suivante)
- Si données constituants suffisantes et de bonne qualité, optimisation très rapide et peu gourmande en essais sur béton (exemple: deux gâchées pour l'obtention des caractéristiques initiales du béton frais)



Conclusion (suite)

- Une infinité de cahiers des charges possibles: BétonlabPro aide à formuler le bon béton pour chaque application
- Optimisation théorique rapide et aisée avec plusieurs jeux de matériaux
- Avec des données suffisantes (et fiables) sur les constituants, on peut choisir a priori entre des constituants concurrents de performances et de coûts unitaires différents

