

BétonlabFree 3

Leçon N°9

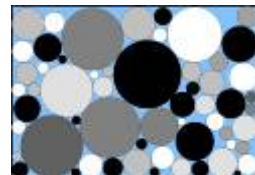
# Formulation d'un béton de structure (simulation et ajustement expérimental)

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 BétonlabFree
- Ajustements en laboratoire (principes et exemple)
- Conclusion



# Rappel sur le cahier des charges

- Des obligations de résultats: les propriétés du béton formulé
  - certaines sont évaluées par BétonlabFree
  - 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)



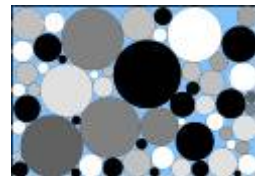
# Rappel sur le cahier des charges (suite)

- Le cahier des charges du formulateur doit être traduit dans le contexte BétonlabFree
  - ex.: 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)



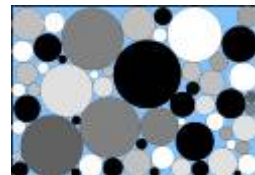
# Rappel sur le cahier des charges (suite)

- Critère final à optimiser: en général le coût
  - BétonlabFree 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....)



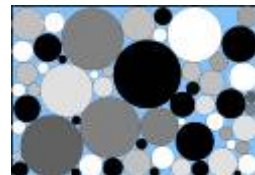
# Simulations préalables

- Avant de mener une optimisation, approcher la formule
- 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 dosage en ciment (et donc sur le rapport eau/ciment)
- On doit parvenir à une formule proche du cahier des charges



# Optimisation théorique

- 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
  - garder les % en fractions granulaires constants
  - faire varier les ratios de la pâte pour ajuster les propriétés à celles du cahier des charges



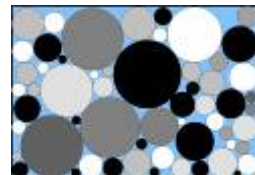
# Exemple

- Béton B35/C45 pour ouvrage d'art
- Consistance très plastique (S3)
- Classe d'environnement XF1 (selon EN 206):

$$R_{c_{28}} \geq 25 \text{ MPa}$$

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

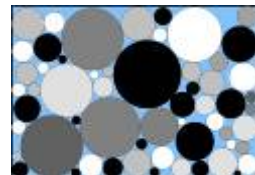
$$E_{\text{eff}}/(C+kA) \leq 0,60$$



# Exemple (suite)

## Cahier des charges BétonlabFree:

- $C+kA \geq 280 \text{ kg/m}^3$
- $E_{\text{eff}}/(C+kA) \leq 0,60$
- $10 \text{ cm} \leq \text{slump} \leq 15 \text{ cm}$
- $R_{c_{28}} \geq 42 \text{ MPa}$
- $K \leq 7,5$

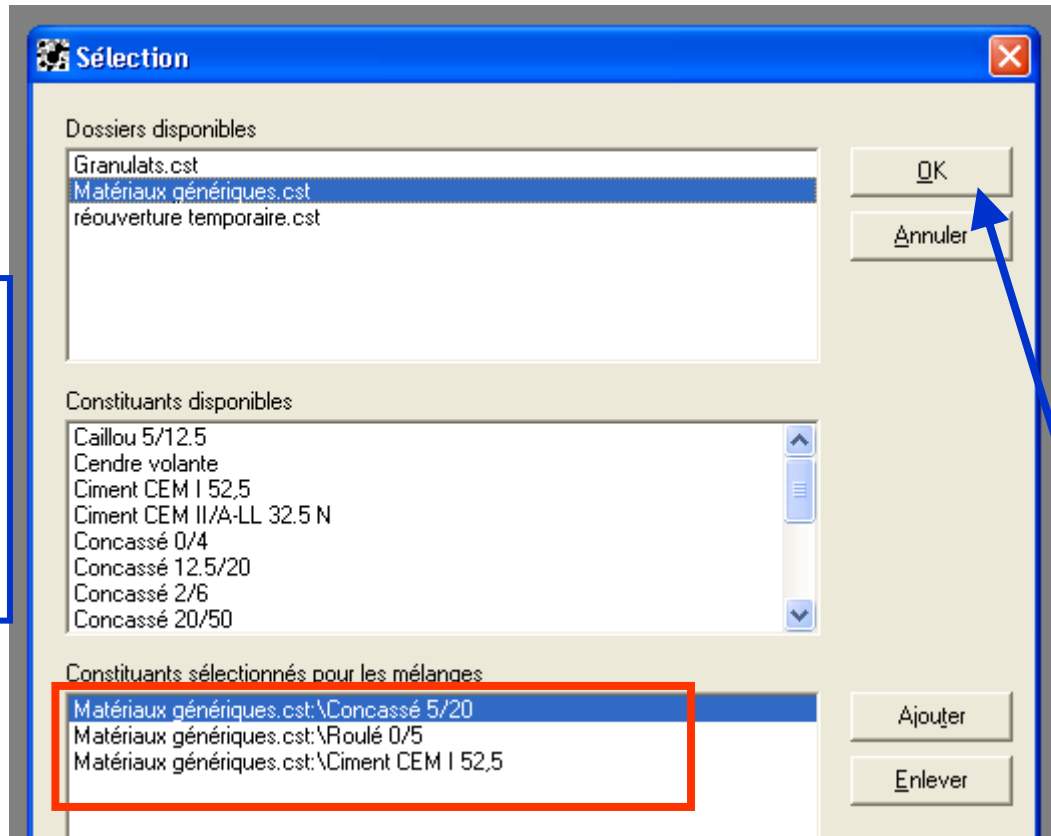


# Exemple (suite)

- Constituants disponibles: dans le dossier « Matériaux génériques.cst »:
  - concassé 5/20
  - roulé 0/5
  - ciment CPA CEM I
  - eau



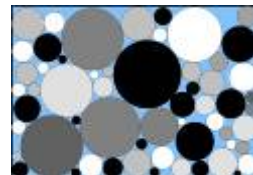
# Exemple (suite)



- Menu  
Sélection

- Dossier  
« Matériaux  
Génériques »

- Cliquer sur OK



# Exemple (suite)

- Cliquer sur  
« Calculs »

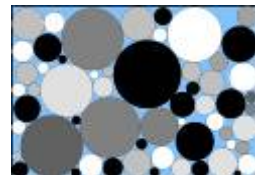
- Choisir les  
propriétés à  
simuler

The screenshot shows the 'Options de calculs' dialog box with the following fields and controls:

- Coût fixe (Euro/m3): 0
- Alcalins dans l'eau:
  - % moyen en alcalins actifs: 0
  - % maximum en alcalins actifs: 0
- Confinement:
  - Type: Aucun
- Sélectionnez les propriétés que vous souhaitez afficher:
  - Eeff / (C + kA)
  - Densité
  - Affaissement (cm)
  - fc7 (MPa)
  - fc28 (MPa)
  - Retrait total (10-6)
  - Indice de serrage du béton non confiné
  - Prix
- Propriétés non disponibles par manque de données: (empty)

Buttons on the right side: OK, Annuler, Tout sélectionner, Tout désélectionner, Info.

- Cliquer sur OK



# Exemple (suite)

The screenshot shows the 'Simulations' window with the following components:

- Composition section:** Input fields for G1 (%), S1 (%), C1 (kg/m3), and Eau eff (kg/m3) with values 60, 40, 350, and 180 respectively. A blue box highlights these values, with an arrow pointing to a callout box.
- Buttons:** 'Gâcher', 'Optimiser', 'Granularité', and 'Remplissage'.
- Environment section:** 'Environnement' dropdown set to 'XF1', 'Coût fixe' set to 0, and two percentage fields for active alkalinity in water set to 0.
- Results Table:** A table with 17 rows and 2 columns. The first column lists parameters, and the second column lists their values. A blue box highlights the last six rows of the table, with an arrow pointing to a callout box.

Paramètre	Valeur
Gâchée n°	1
G1 (kg/m3)	1122.2
S1 (kg/m3)	736.4
C1 (kg/m3)	350
Eau (kg/m3)	184.1
G1 (%)	60
S1 (%)	40
Eau eff	180
Air total (%)	1.1
AEA	Non
Rapport G/S	1.524
Eeff/C	0.514
Environnement	XF1
C + kA	350
Eeff / (C + kA)	0.514
Affaissement (cm)	13.1
fc28 (MPa)	46.3
Indice de serrage du béton non confiné	6.423
Prix	67.8

Valeurs  
forfaitaires  
de départ

On est  
proche  
du cahier  
des  
charges



# Exemple (suite)

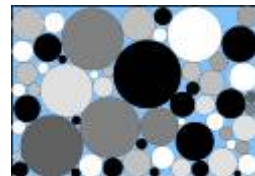
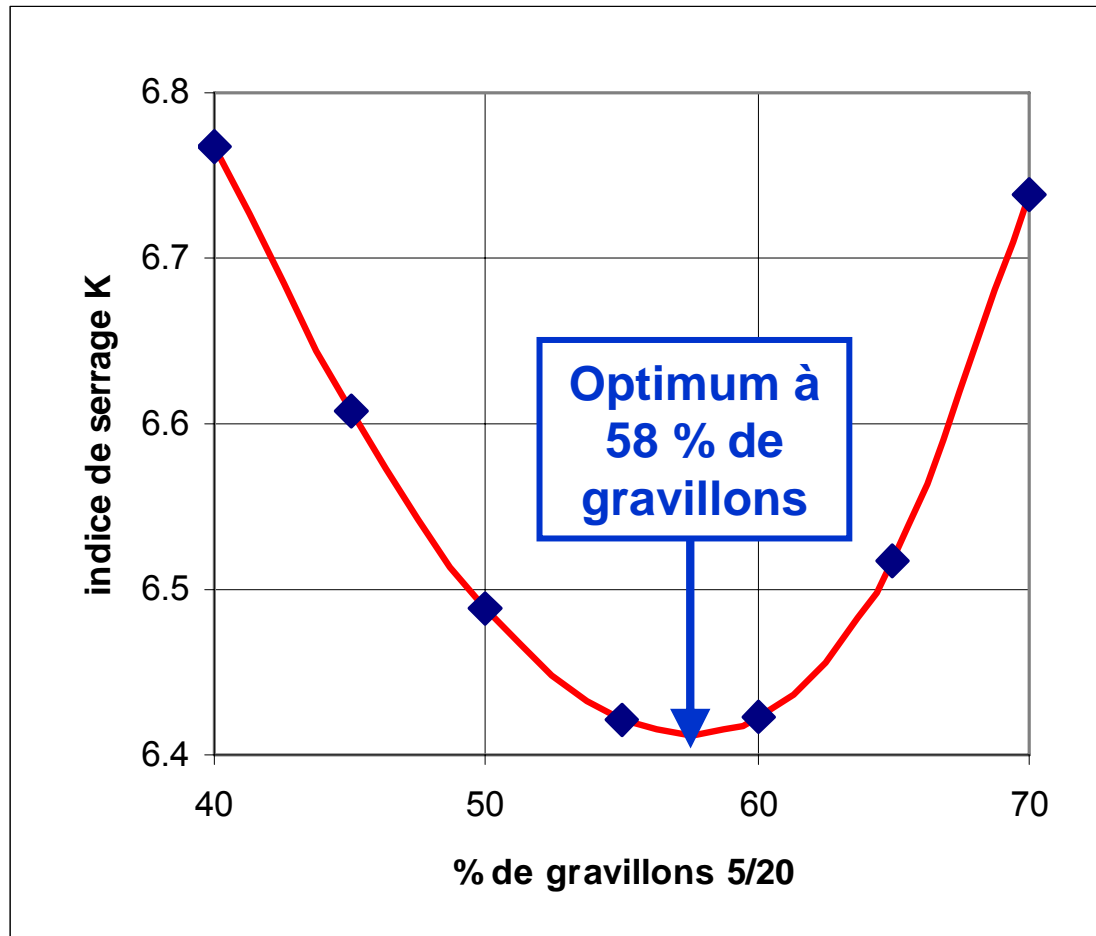
Gâchée n°	1	2	3	4	5	6	7
G1 (kg/m <sup>3</sup> )	1122.2	1320.8	1221.4	1122.2	1023.2	924	824.7
S1 (kg/m <sup>3</sup> )	736.4	557.2	647.3	736.4	824	909.5	992.2
C1 (kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	350	350	350
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	184.1	184.5	184.3	184.1	183.9	183.7	183.5
G1 (%)	60	70	65	60	55	50	45
S1 (%)	40	30	35	40	45	50	55
Eau eff	180	180	180	180	180	180	180
Air total (%)	1.1	0.5	0.8	1.1	1.5	2	2.5
AEA	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1.524	2.37	1.887	1.524	1.242	1.016	0.831
Eff/C	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514
Environnement	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1
C + kA	350	350	350	350	350	350	350
Eff / (C + kA)	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514	0.514
Affaissement (cm)	13.1	13.6	13.9	13.1	11.4	8.6	4.7
fc28 (MPa)	46.3	49	47.4	46.3	45.7	44.6	43.4
Indice de serrage du béton non confiné	6.423	6.739	6.517	6.423	6.421	6.488	6.608
Prix	67.8	68.04	67.92	67.8	67.67	67.5	67.3

On cherche l'indice de serrage minimum, à e et c constants





# Exemple (suite)



# Exemple (suite)

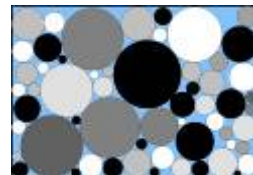
Gâchée n°	9	10	11	12	13	14	15	16	17
G1 (kg/m <sup>3</sup> )	1082.6	1084.9	1087.1	1086	1091.1	1101.3	1098.8	1099.9	1103.5
S1 (kg/m <sup>3</sup> )	771.7	773.3	774.9	774.1	777.8	785	783.2	784	786.6
C1 (kg/m <sup>3</sup> )	350	350	350	350	340	320	325	325	320
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	184	182	180	181	181.1	181.1	181.1	180.1	179.1
G1 (%)	58	58	58	58	58	58	58	58	58
S1 (%)	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Eau eff	180	178	176	177	177	177	177	176	175
Air total (%)	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4
AEA	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403	1.403
Eeff/C	0.514	0.509	0.503	0.506	0.521	0.553	0.545	0.542	0.547
Environnement	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1
C + kA	350	350	350	350	340	320	325	325	320
Eeff / (C + kA)	0.514	0.509	0.503	0.506	0.521	0.553	0.545	0.542	0.547
Affaissement (cm)	12.6	11.3	9.9	10.6	11.1	12	11.8	11.1	10.6
fc28 (MPa)	45.8	46.5	47.2	46.9	45.1	41.5	42.4	42.8	42.2
Indice de serrage du béton non confiné	6.412	6.498	6.585	6.541	6.551	6.583	6.573	6.618	6.672
Prix	67.75	67.8	67.84	67.82	66.63	64.24	64.83	64.86	64.28

Dernier ajustement de l'eau: le cahier des charges est atteint au plus juste (béton optimisé)

On fixe G1

En changeant l'eau, on ajuste le slump

En changeant le ciment, on ajuste la résistance



# 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)

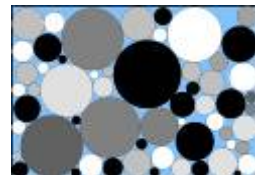
En cas d'écart sur la consistance:

- 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)



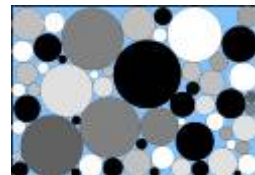
# Ajustements en laboratoire (suite)

- Estimation des variations des paramètres: on peut utiliser BétonlabFree 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)



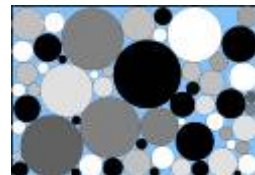
# Ajustements en laboratoire (suite)

- 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 BétonlabFree et un tableur (pour des calculs simples).

- Colonne 1: obtenue par simulation BétonlabFree, 1000 ℓ, granulats secs
- Colonne 2: obtenue par calcul, réduite à 100 ℓ, granulats secs





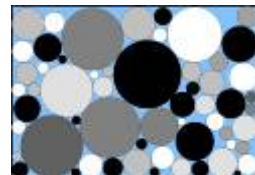
# Exemple d'ajustement (suite)

- 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 BétonlabFree, 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



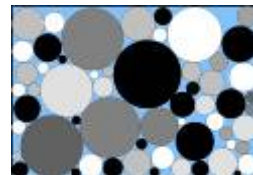
# Exemple d'ajustement (suite)

- 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

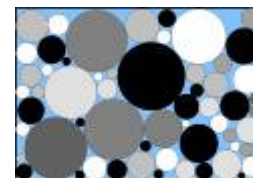
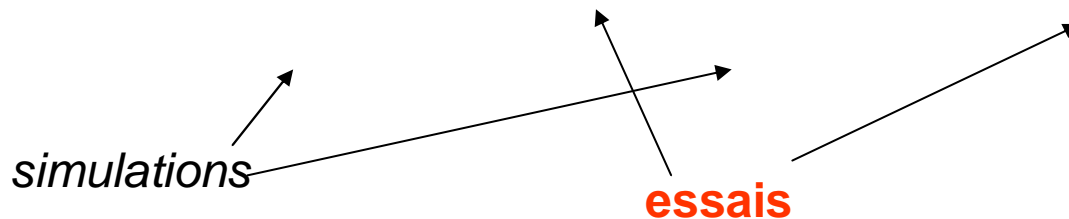


# Exemple d'ajustement (suite)

- Colonne 7: la même, en composition réelle sur 100 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.

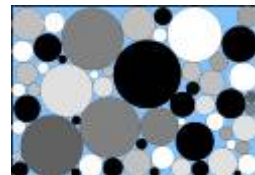


Colonne n°	% d'humidité	1	2	3	4	5	6	7	8
		1000	10	10	1000	10	10	10	1000
G1 (kg/m3)	2,3	774,5	77,45	<b>79,273</b>	777,1	77,71	<b>79,539</b>	79,705	797,0
G2 (kg/m3)	1,9	263,1	26,31	<b>26,820</b>	264	26,4	<b>26,911</b>	26,967	269,7
S1 (kg/m3)	5,8	607,1	60,71	<b>64,448</b>	609,1	60,91	<b>64,660</b>	64,795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



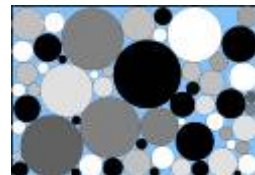
# Conclusion

- Pour formuler, il faut d'abord bien caractériser les constituants
- Ensuite, simulations préalables (dégrossissage de la formule)
- Recherche directe du béton optimal possible, mais compliquée...
- Détermination en deux phases préférable: squelette puis pâte



# Conclusion (suite)

- Exceptions à cette règle: bétons projetés ou autoplaçants (cf. leçons BétonlabPro N°15 et 16)
- Si le béton est confiné dans la structure, nécessité d'en tenir compte au niveau du squelette (cf. leçon BétonlabPro N°12)



# Conclusion (suite)

- Si données constituants suffisantes et de bonne qualité, formulation rapide et peu gourmande en essais sur béton (exemple: deux gâchées pour l'obtention des caractéristiques initiales du béton frais)
- Les + de BétonlabPro:
  - beaucoup plus de propriétés gérées
  - optimisation automatique
  - facilité à envisager plusieurs combinaisons de constituants concurrents afin de rechercher le meilleur compromis technico-économique

