

BétonlabPro 3

Leçon N°13

Formulation, homogénéité et pompabilité

François de Larrard

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Plan de la leçon

- Introduction
- Ressuage
- Ségrégation
- Pompabilité
- Formuler un béton pompable avec BétonlabPro
- Conclusion



Introduction

- Béton = matériau obtenu par mélange d'eau et de classes granulaires de tailles différentes
- But du malaxage: assurer l'homogénéité la meilleure possible
 - au sein des grains eux-mêmes (malaxage à sec)
 - entre l'eau, les adjuvants et les grains



Introduction (suite)

- Le transport, la mise en œuvre ou l'effet de la pesanteur peuvent « démélanger » le matériau
 - par ressuage: séparation eau/solide
 - par ségrégation: apparition d'une forte hétérogénéité de concentration d'au moins une catégorie de grains
- Béton pompable = béton que l'on pourra transporter par pompage, facilement et sans ségrégation

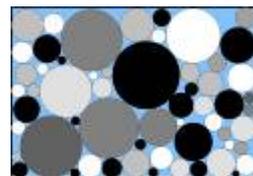
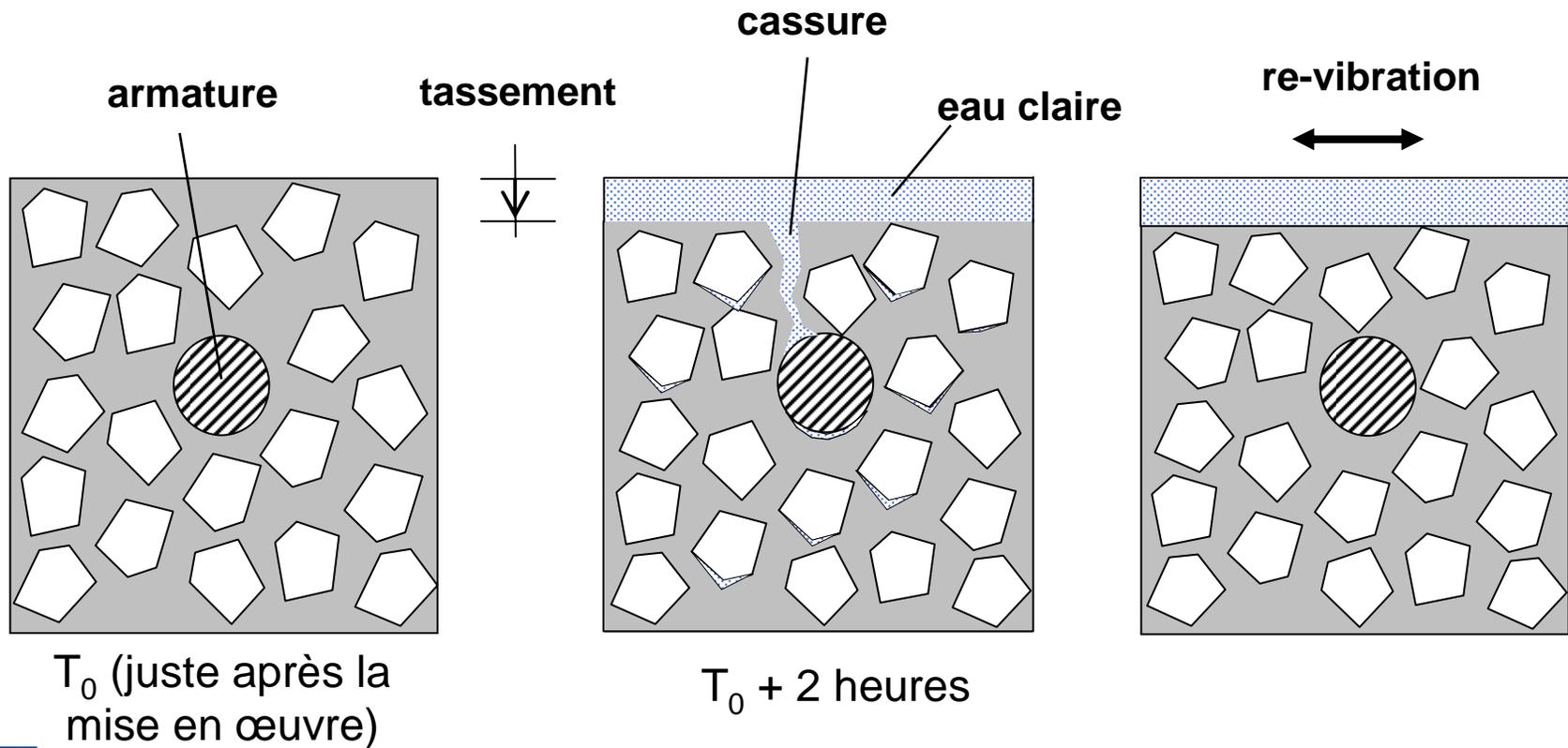


Introduction (suite)

- Les pertes d'homogénéité dépendent des sollicitations appliquées au matériau et des structures à construire (pesanteur, chocs, vibration)
- Mais on peut agir sur la formulation pour limiter le ressuage, la ségrégation, et faciliter le pompage



Ressuage

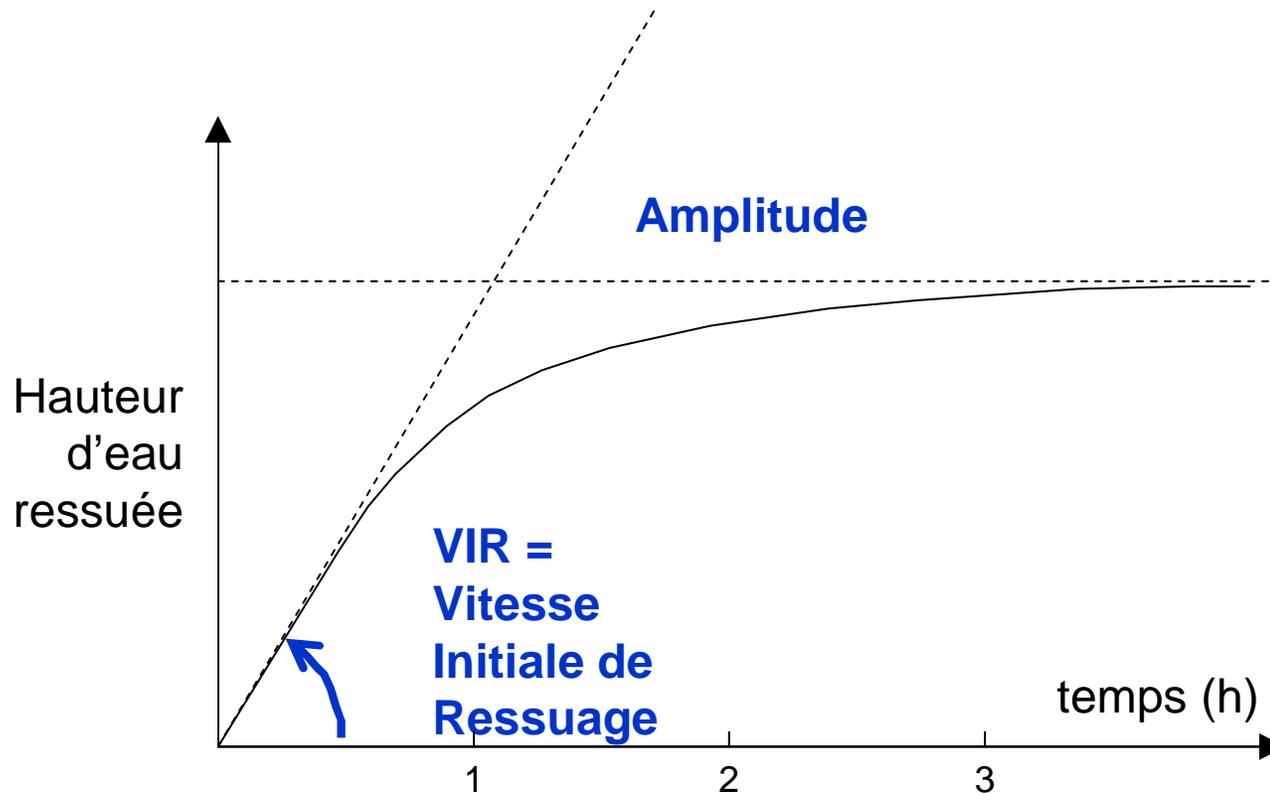


Ressuage (suite)

- Tassement du squelette solide sous l'effet de la pesanteur
- Perméation de l'eau à travers le squelette
- Effet positif: « cure automatique »
- Effets négatifs:
 - affaiblissement du béton dans la masse
 - adhérence plus faible avec les armatures
 - parements défectueux
 - parfois, cassures de béton frais



Ressuage (suite)

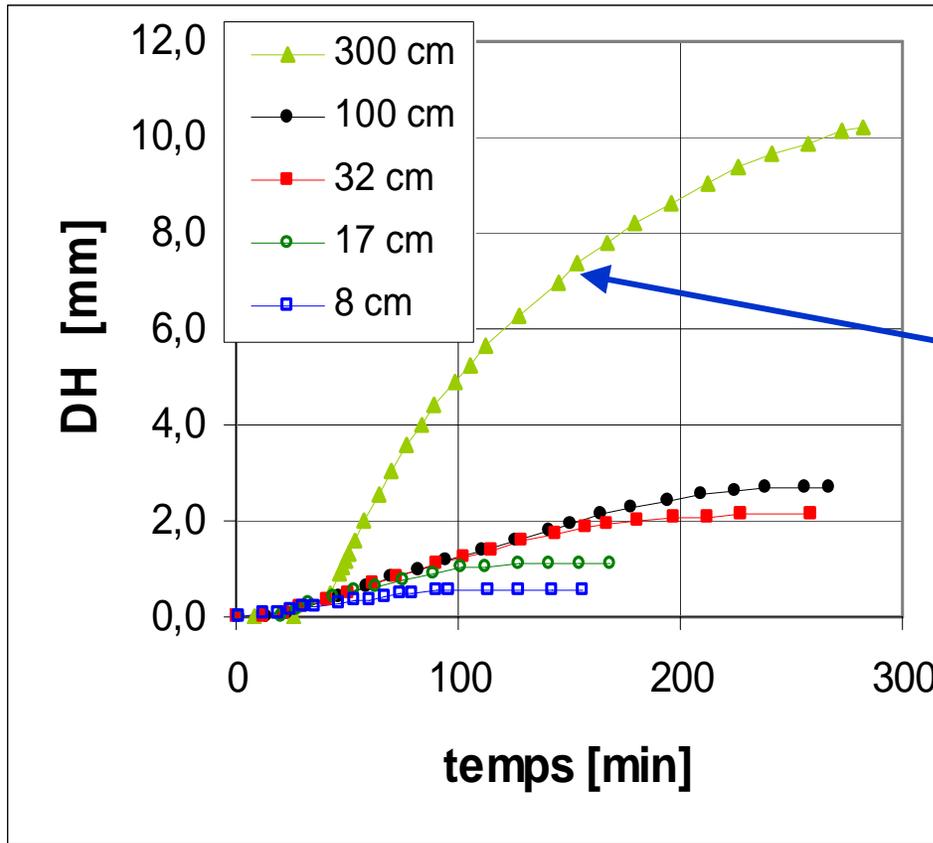


Ressuage (suite)

- Presque tous les bétons présentent un faible ressuage, réparti dans la masse du béton: ressuage diffus = phénomène normal, à limiter
- Parfois, on observe un ressuage localisé (pathologie):
 - formation de canaux
 - grande hauteur (cas des pieux): geysers !



Ressuage (suite)



Exemple d'un
ressuage localisé
apparu au bout de
30' (Josserand,
2002)



Ressuage (suite)

Pour limiter le ressuage:

- jouer sur l'amplitude
 - réduire le dosage en eau
 - privilégier les liants à prise rapide
- jouer sur la cinétique
 - augmenter la surface spécifique (sablons - additions minérales)
 - utiliser la **Vitesse Initiale de Ressuage (VIR)** évaluée par BétonlabPro



Ressuage (suite)

- Exemple
 - formulation d'un B25/C30
 - objectif: limiter la vitesse initiale de ressuage à celle d'un B35/C40 de mêmes constituants
 - constituants: concassé 12,5/20, 5/12,5, roulé 0/5, CEM I, filler, superplastifiant
 - optimisation du dosage en filler par limitation de la VIR lors de l'optimisation



Ressuage (suite)

B35 B25 B25

Gâchée n°	2	3	4
G1 (kg/m ³)	876,2	880,6	870,5
G2 (kg/m ³)	193,7	194,7	192,4
S1 (kg/m ³)	862,5	866,8	856,8
C1 (kg/m ³)	313,3	232,2	213,6
F _{Calc1} (kg/m ³)	0	27,8	99,9
SP1 (kg/m ³)	2,11	0,58	1,89
Eau (kg/m ³)	159,2	172,9	159,1
G1 (%)	45	45	45
G2 (%)	10	10	10
S1 (%)	45	45	45
Taux de saturation (%)	0,75	0,79	0,91
Taux de superplastifiant (%)	0,2	0,07	0,27
Eau eff	156,6	169,2	156,3
Air total (%)	1,7	1,7	1,7
AEA	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,241	1,241	1,241
E _{eff} /C	0,5	0,729	0,732
Environnement	X0	X0	X0
C + kA	313	239	231
E _{eff} / (C + kA)	0,5	0,708	0,676
Affaissement (cm)	10	10	10
Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min ⁻¹)	0,15	0,56	0,15
f _{c28} (MPa)	48	30	30
Indice de serrage du béton non confiné	7,485	7,148	7,5
Prix	67,08	55,21	56,73

VIR divisée par 4
grâce à:

ciment: - 10 %

filler: X 3

SP: X 3

eau: - 13 litres

coût: + 1,5 €/m³



Ségrégation

- Perte d'homogénéité au sein du mélange granulaire (séparation gravillons-mortier, granulats-pâte, etc.)
- Peut se produire durant:
 - le malaxage
 - le transport (par camion, ou pendant le pompage)
 - la mise en œuvre (chute)
 - le début de période dormante (ségrégation statique des bétons autoplaçants – cf. leçon N° 15)



Ségrégation (suite)

- Pour réduire la ségréabilité d'un béton:
 - augmenter la continuité du squelette
 - réduire le D_{max}
 - réduire la vitesse de ressuage
 - utiliser le diagramme de remplissage

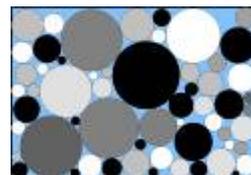
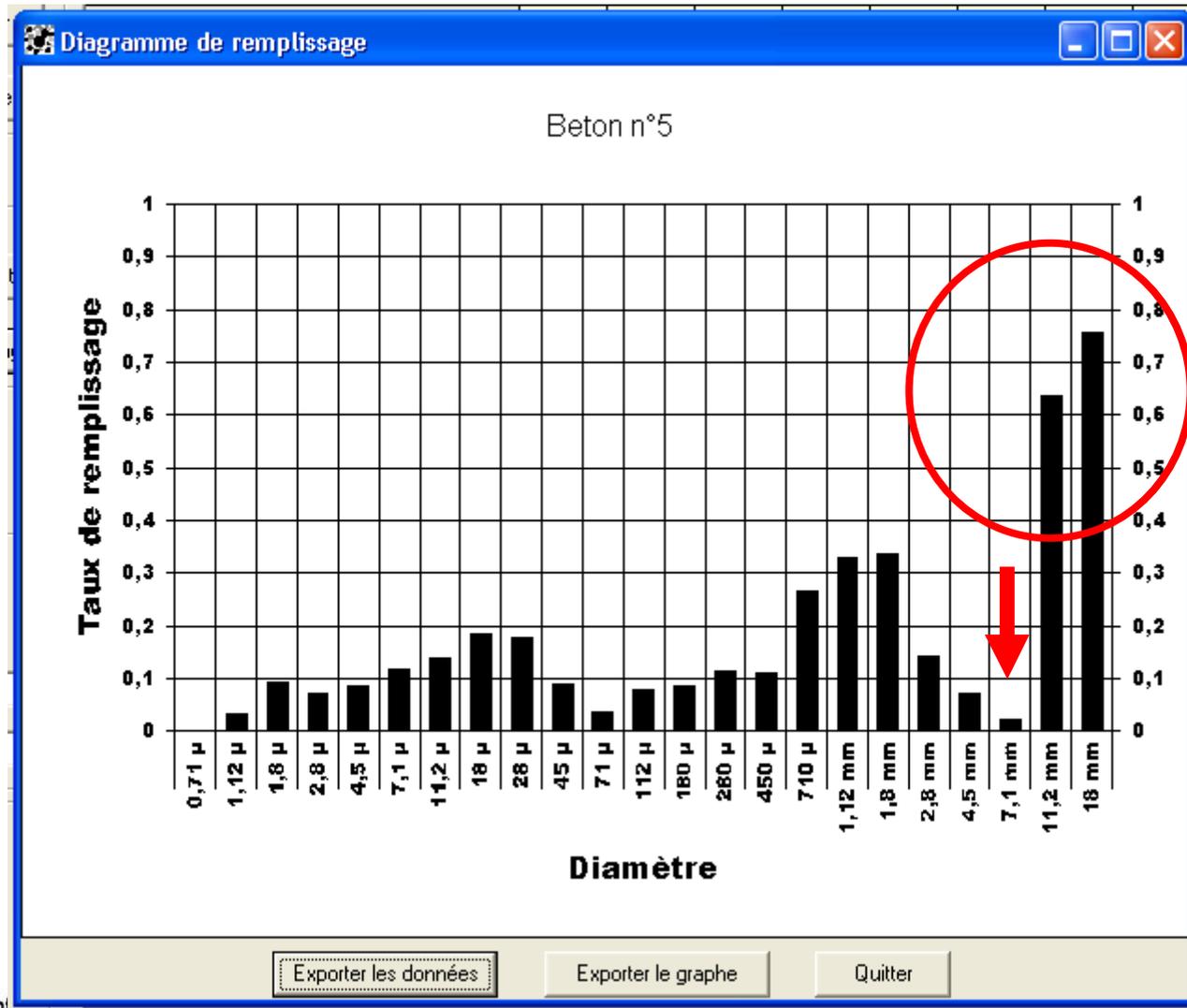


Ségrégation (suite)

- Le diagramme de remplissage : un outil d'analyse BétonlabPro (cf. leçon N°10)
- Permet de détecter des discontinuités dans le squelette => remède: ajouter un constituant dont l'étendue granulaire correspond aux tailles manquantes
- Permet de détecter un excès de gros grains. Remède: diminuer G/S



Ségrégation (suite)



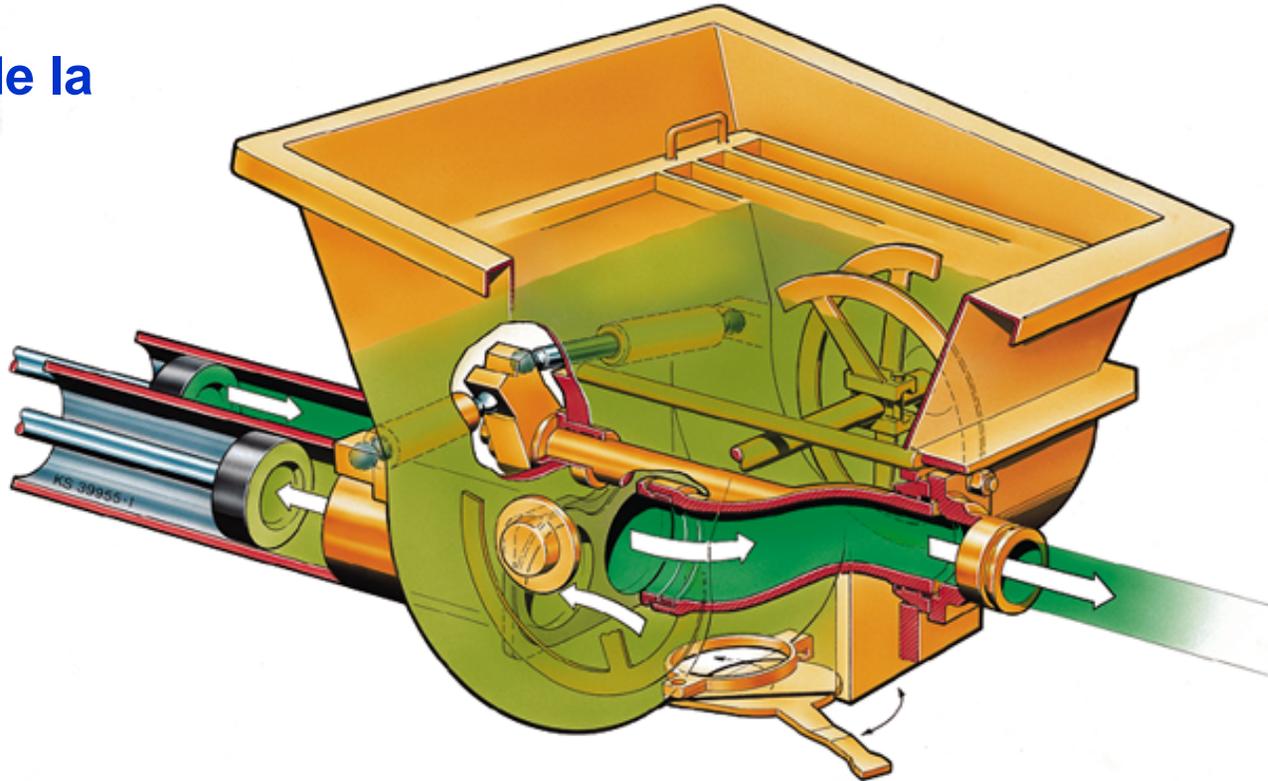
Pompabilité

- Pompage = mode de transport rapide du béton par un circuit de tuyaux
- Technique de + en + utilisée
- Intérêt: rendement et absence de grue
- Deux principes de pompes:
 - pompe à rotor (ou à tuyau écrasé)
 - pompe à pistons



Pompabilité (suite)

Principe de la
pompe à
pistons



Pompabilité (suite)

- Un béton n'est pas pompable dans l'absolu. La réussite du pompage dépend
 - de la composition du béton, mais aussi
 - du circuit de pompage
 - de la pompe
 - de l'expertise de l'opérateur.



Pompabilité (suite)

- Pour faciliter l'opération de pompage, il faut
 - réduire le risque de formation de bouchons
 - chercher à limiter la pression nécessaire pour obtenir un certain débit dans le circuit
- Pompes à piston: les bouchons peuvent apparaître à l'amorçage (les plus courants), en cours ou en fin de pompage



Pompabilité (suite)

- Amorçage d'un circuit de pompage:
 - on pompe d'abord une barbotine (ex.: coulis de ciment, ou produit de substitution)
 - puis on pompe le béton
 - à chaque coup de pompe, arrêt brutal => ségrégation du béton en tête et migration de gravillons dans la barbotine
 - si trop de gravillons à l'avant de la barbotine, formation d'un bouchon



Pompabilité (suite)

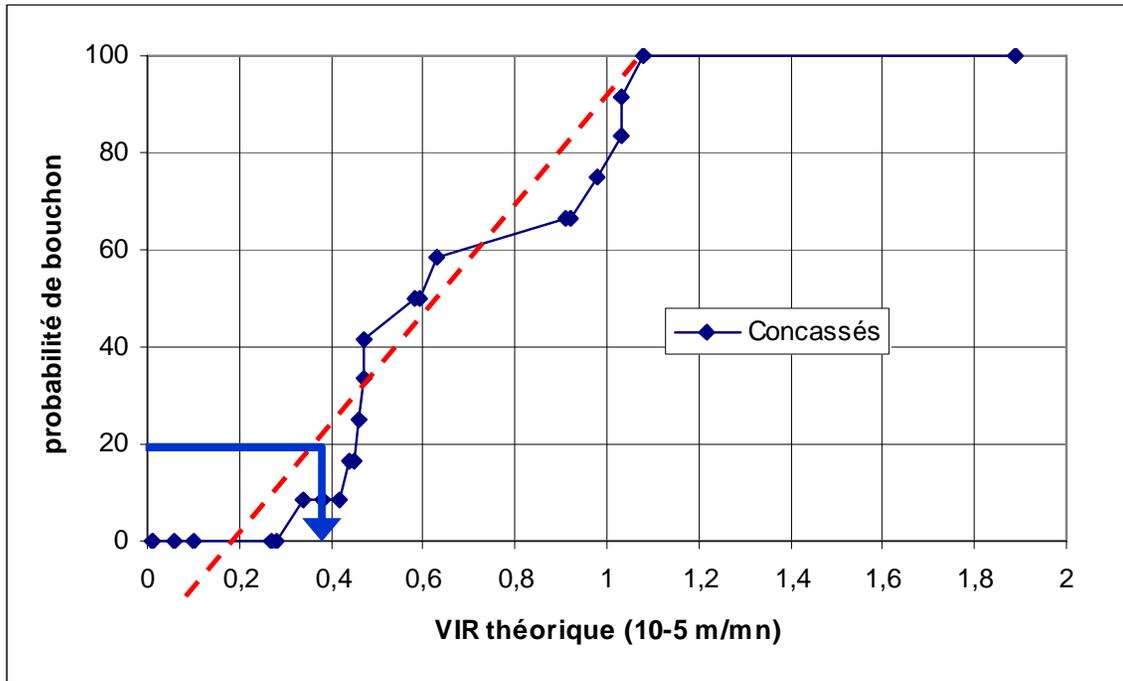


d'après Kaplan (1997)

- Pour réduire le risque de bouchons à l'amorçage, il faut avoir un béton peu ségrégeant
- **Expérience: risque de bouchon corrélé avec la VIR ($VIR \downarrow \Rightarrow$ moins de bouchons)**



Pompabilité (suite)



Dans ces essais (circuit de 150 m avec nombreux coudes), **seuil maxi de VIR de 0,4** pour réduire à 10-20 % le risque de formation de bouchons

Simulation des essais de Kaplan et al. (2000)



Pompabilité (suite)

- Une fois les bouchons évités, il faut faciliter le glissement du béton dans le tuyau de pompage
- Au niveau du squelette, nécessité de diminuer le G/S
- Lors de la formulation, on optimise le squelette à l'aide de l'**indice de serrage en milieu confiné** (cf. leçon N°12), le confinement étant exercé par le tuyau de la pompe



Pompabilité (suite)

- Lors du pompage, une couche de coulis se forme spontanément à l'interface béton/tuyau
- L'expérience montre que moins le béton est *visqueux*, plus le coulis est fluide et moins la pression dans le béton est élevée, pour un certain débit



Formuler un béton pompable avec BétonlabPro

- Réduire le risque de bouchons:
 - Vérifier la continuité du squelette (diagramme de remplissage)
 - Limiter la Vitesse Initiale de Ressuage (valeur repère: $0,4 \cdot 10^{-5} \text{m/mn}$)
- Réduire la pression pour un débit donné:
 - Optimiser le squelette dans le tuyau de la pompe
 - Limiter la viscosité plastique



Formuler un béton pompable avec BétonlabPro (suite)

- Exemple: B20/C25 (béton pour pieux)
- Pompage sur 300 m par tuyau $\varnothing 120$ mm
- Constituants:
 - gravillons 12,5/20-5/12,5, roulé 0/5, CEM I 52,5, filler calcaire, superplastifiant
- Cahier des charge (hors pompage):
 - 15 cm \leq slump \leq 20 cm
 - $R_{c_{28}} \geq 23$ MPa
 - $K \leq 6$ (sans SP) ou 7,5 (avec SP)



Formuler un béton pompable avec BétonlabPro (suite)

- Hypothèse: le gravillon 5/12,5 est plus cher
- Premier béton formulé sans prise en compte du pompage (en éliminant le 5/12,5 pour raison économique) et sans SP
- Deuxième béton en prenant en compte le pompage, et avec SP



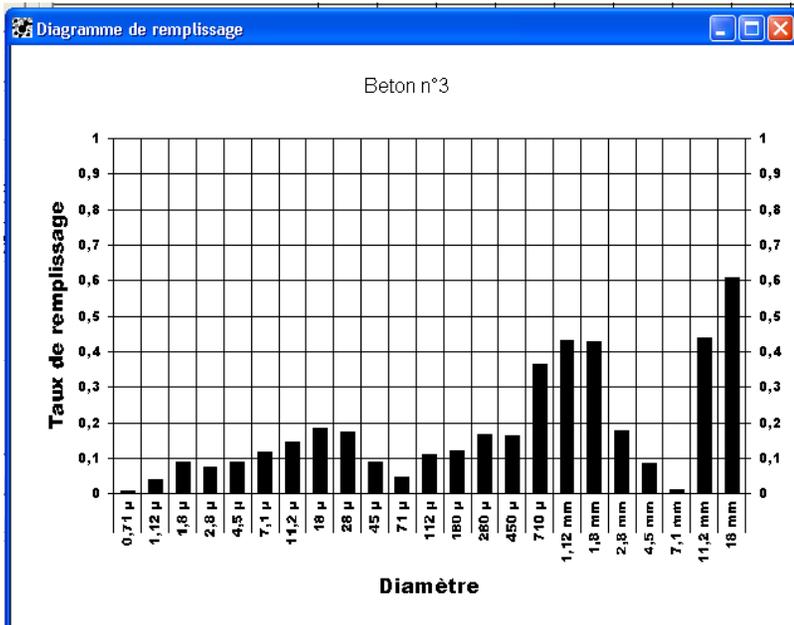
Formuler un béton pompable avec BétonlabPro (suite)

Gâchée n°	1	2	3	4	5
G1 (kg/m3)	1184,9	1046	1007,7	755,3	769,8
G2 (kg/m3)	0	0	0	202,4	206,3
S1 (kg/m3)	777,5	903,4	870,5	913,8	931,5
C1 (kg/m3)	200	200	231,5	231,5	198,5
FCalc1 (kg/m3)	0	0	33,4	33,4	86,1
SP1 (kg/m3)	0	0	0	0	1,66
Eau (kg/m3)	194,3	194	200	199,9	172,9
G1 (%)	60	53,26	53,26	40,02	40,02
G2 (%)	0	0	0	10,78	10,78
S1 (%)	40	46,74	46,74	49,19	49,2
Taux de saturation (%)	0,75	0,75	0,8	0,8	0,9
Taux de superplastifiant (%)	0	0	0	0	0,25
Eau eff	190	190	196,1	196,1	170,2
Air total (%)	1	1,4	1,2	1,4	1,7
AEA	Non	Non	Non	Non	Non
Rapport G/S	1,524	1,158	1,158	1,048	1,048
Eeff/C	0,95	0,95	0,847	0,847	0,857
Environnement	X0	X0	X0	X0	X0
Affaissement (cm)	18,8	17,6	19,9	18,7	15
Vitesse initiale de ressuage (10-5 m.min-1)	2,95	2,91	1,45	1,44	0,4
fc28 (MPa)	17	16,4	23	23,1	23
Indice de serrage du béton non confiné	6,716	6,548	6	6,024	6,966
Indice de serrage du béton confiné	8,019	7,36	6,62	6,483	7,512
Prix	49,55	49,39	53,67	53,59	53,86

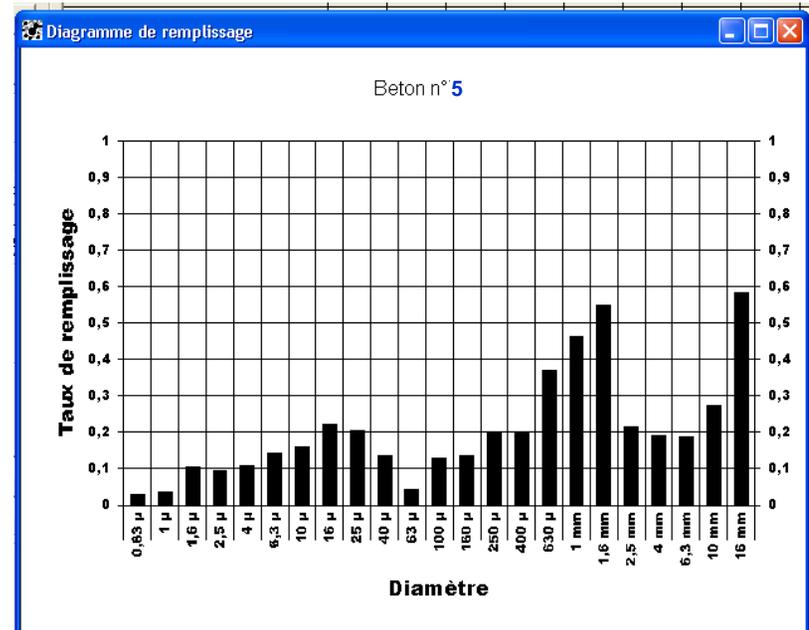
- 1: premier essai
- 2: squelette optimisé
- 3: cahier des charges
OK sauf pompabilité
- 4: squelette optimisé en milieu confiné
- 5: cahier des charges + pompabilité OK



Formuler un béton pompable avec BétonlabPro (suite)



**Béton 3: discontinu
et excès de gravillons**



**Béton 5: continu
teneur en gravillons OK**



Formuler un béton pompable avec BétonlabPro (suite)

- La limitation de la viscosité plastique est surtout pertinente:
 - pour les bétons riches en fines (BHP, bétons autoplaçants: cf. leçons suivantes)
 - pour les pompages sur de longues distances
- Une méthodologie est disponible pour le dimensionnement rationnel des pompes, pour un béton et un circuit donnés (Guide CALIBE « Pompage des bétons »)



Conclusion

- Stabilité du béton: qualité essentielle
- Le « plus » d'un béton bien formulé
- Difficile à anticiper au laboratoire
- BétonlabPro propose deux outils spécifiques:
 - la prévision de la VIR (vitesse initiale de ressuage)
 - le diagramme de remplissage



Conclusion (suite)

- Deux autres propriétés utiles pour favoriser la pompabilité
 - l'indice de serrage en milieu confiné
 - l'évaluation de la viscosité plastique
- Ressuage: ne pas confondre vitesse initiale et amplitude finale
- Tout ce qui retarde la prise (retardateur, temps froid...) augmente l'amplitude finale du ressuage, à même VIR

