

# Rhéologie des bétons de fondations profondes

Paris, 4 février 2016

# HISTORIQUE

	ANTERIEUREMENT	MAINTENANT
Rc (MPa)	< 45 MPa	→ 80 MPa
Quantité d'eau	≈ 200 L	→ 130 L
E/C	0,5 à 0,6	→ 0,32
Rhéologie	3 heures (max 6h)	→ 10 heures
Exigences		Durabilité / Mise en oeuvre
Composition	3 composants	+ 5 composants
<b>EVOLUTION</b>	<b>Adjuvants Ciments Granulats</b>	<b>+ techniques + variables + rares / - bonne qualité</b>



## RECHERCHES TECHNIQUES

---

- ▶ **Comité Sol & Comité Matériaux FNTF**

- ▶ Encadrement de BOTTE Fondation

- ▶ Comité de supervision :

- ▶ Olivier Madec (BOTTE Fondation)
- ▶ Jean-Paul Volcke (FRANKI Fondation)
- ▶ Philippe Gotteland (FNTF)
- ▶ Sabine Darson (Soletanche-Bachy)

- ▶ **2 thèses :**

- ▶ *Influence des propriétés rhéologiques des bétons sur la pénétrabilité des cages de pieux*
- ▶ *Influence de la formulation des bétons sur les pathologies de paroi moulée*



## A TERME...

- ▶ **DEFINITION DE :**
  - ▶ Nouveaux essais chantier
  - ▶ Nouveaux seuils -> approche prescriptive
- ▶ **COMPREHENSION :**
  - ▶ Phénomènes de ressuage et de structuration
  - ▶ Influence de la composition des bétons
- ▶ **FINALITE :**
  - ▶ Normes Produit et Mise en Oeuvre

# Influence des propriétés rhéologiques du béton sur la capacité d'enfoncement d'une cage d'armatures

Mariam Mohaman Dairou

Directrice : Mme Chafika DJELAL  
Co-directeur : M. Yannick VANHOVE  
Encadrante : Mme Hassina KADA



**Journée Technique CMFS/FNTP**  
04 Février 2016  
FNTP, Paris



- Introduction
  - Mise en œuvre des pieux forés à la tarière creuse
  - Problèmes sur chantier
  - Recommandations sur les bétons
- Rhéologie du béton
  - Cycle de vie du béton sur chantier
  - Vieillissement
  - Thixotropie
- Méthodologie
  - Propriétés rhéologiques du béton
  - Capacité d'enfoncement de la cage d'armatures
- Résultats
  - Enfoncement de la cage d'armature et rhéologie du béton
- Conclusion et suite de l'étude

Chantier	Longueur pieu	Observation sur la mise en œuvre
Béthune, Franki Fondation	8,0 m	pas de problème d'enfoncement des cages d'armatures
Lille Fives, Franki Fondation	9,5 m	refus à 3 m
Liévin, Botte Fondations	13,0 m	refus à 0,80 m

nécessité d'appliquer des coups répétés sur la cage d'armatures pour la descendre jusqu'à la côte désirée

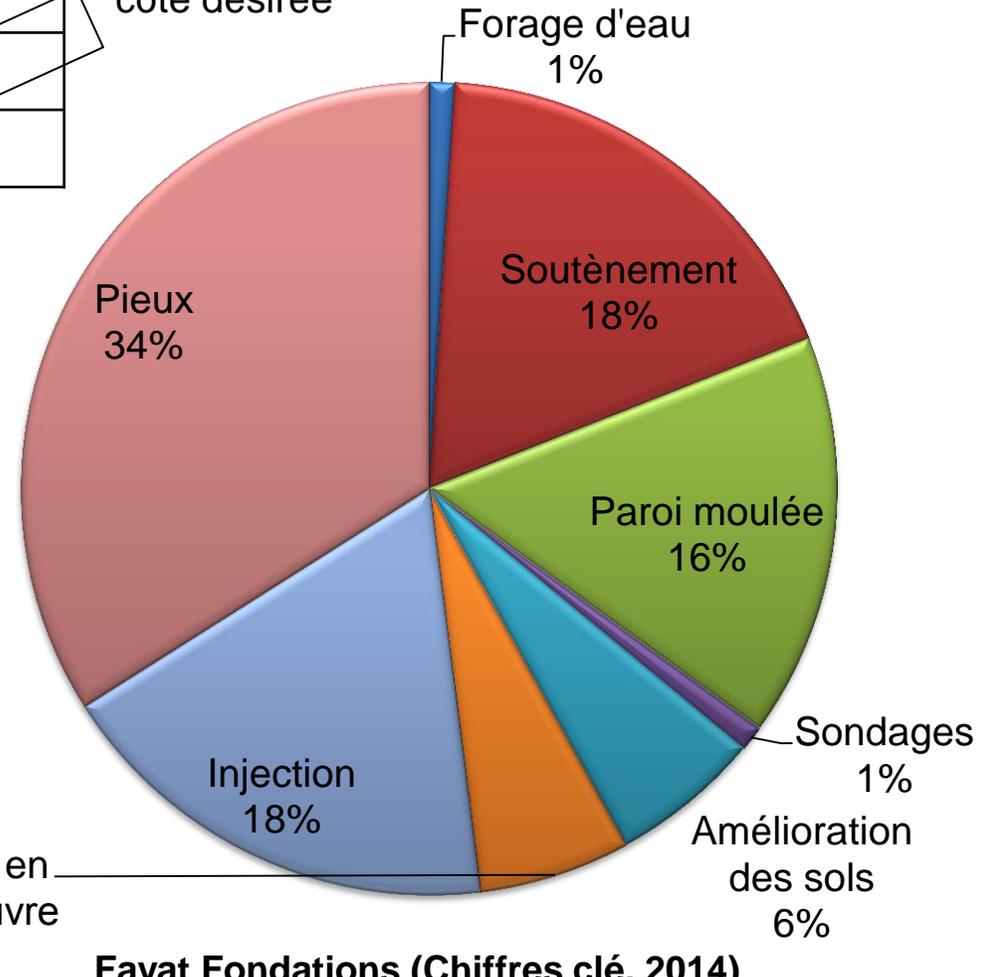
## Forage

## Bétonnage

## Mise en place de la cage d'armatures



Procédé de mise en œuvre des pieux forés tarière creuse



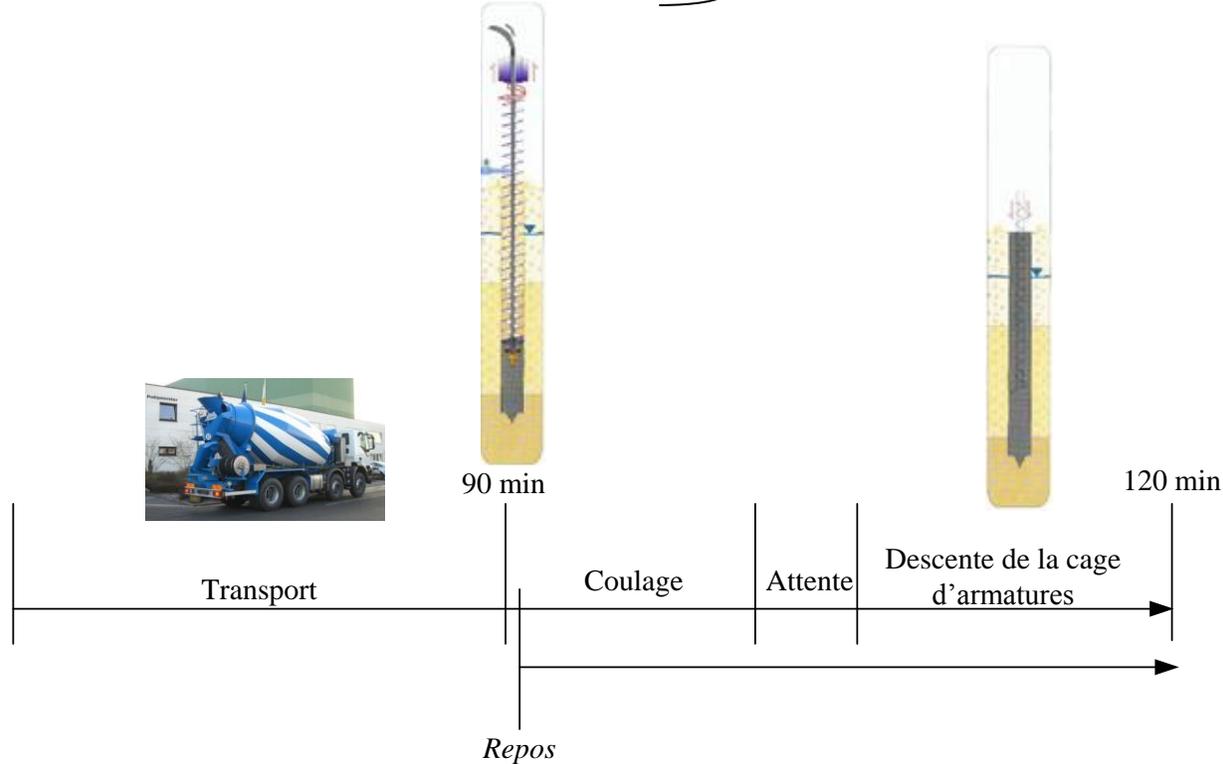
- Les bétons destinés à la réalisation d'un pieu sont des Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS)

Conformité à la norme NF EN 206-1	NF EN 1536+A1
Ciment	
Type de ciment CEM II ou CEM III ou remplacer partiellement le ciment CEM I par ajout d'additions de type II	NF EN 1536+A1
Teneur en ciment $\geq 325 \text{ kg/m}^3$	NF EN 206/CN
Classe de résistance comprise généralement entre C20/25 et C45/55	NF EN 1536+A1
$D_{\max} < \min (32 \text{ mm}; 1/4 \text{ Espacement entre barres longitudinales})$	NF EN 206/CN
Classe de consistance	
Pour un béton pompé, Affaissement $> 18 \text{ cm}$ Etalement $> 560 \text{ mm}$	NF EN 206/CN
Pour un béton déversé, Affaissement $> 15 \text{ cm}$ Etalement $> 500 \text{ mm}$	
Teneur en fines $\geq 400 \text{ kg/m}^3$	NF EN 206/CN

## Facteurs en jeu:

- Béton: propriétés d'ouvrabilité, de stabilité
- Mise en œuvre: mode (dynamique, statique), temps

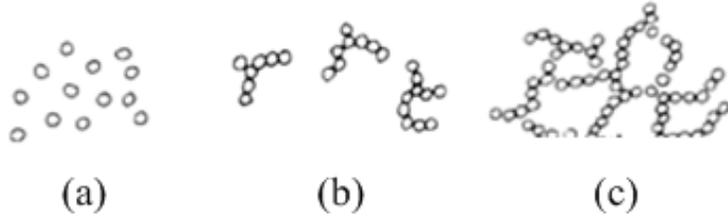
Un paramètre clé: le **Temps**



## En laboratoire, caractérisation à 30 minutes après fabrication (du début du coulage à la descente complète de la cage d'armatures)

- Rhéologie du béton: deux grandeurs importantes perte d'ouvrabilité et thixotropie du béton
- Enfouissement des armatures dans le béton

- Appellation courante: vieillissement (aging), perte d'ouvrabilité, maintien rhéologique



Arrangement des éléments du béton (K. H. Khayat, 2012)

- Contact Eau/Ciment



- Formation de liaisons entre les constituants du béton
  - Liaisons réversibles: rupture en apportant une énergie suffisante au système
  - Liaisons irréversibles

**Perte d'ouvrabilité du béton sur une période donnée = Proportion de liaisons irréversibles qui se sont créées sur cette période**

En pratique:

- Diminution de slump [1,2] et de l'étalement [3]
- Augmentation du seuil de cisaillement [4, 5] et de la viscosité [4, 5, 6]

[1] F.G. Collins et J.G. Sanjayan, Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete, Cement and Concrete Research 29 (1999) 455–458

[2] Papayianni \*, G. Tsohos, N. Oikonomou, P. Mavria, Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures, Cement & Concrete Composites 27 (2005) 217–222

[3] J. Alexandre Bogas †, Augusto Gomes, M.F.C. Pereira, Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, Construction and Building Materials 35 (2012) 1013–1022

[4] D. Feys, R. Verhoeven, G. De Schutter, Pumping of Self Compacting Concrete: An insight into a daily application, Tailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds) © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47535-8

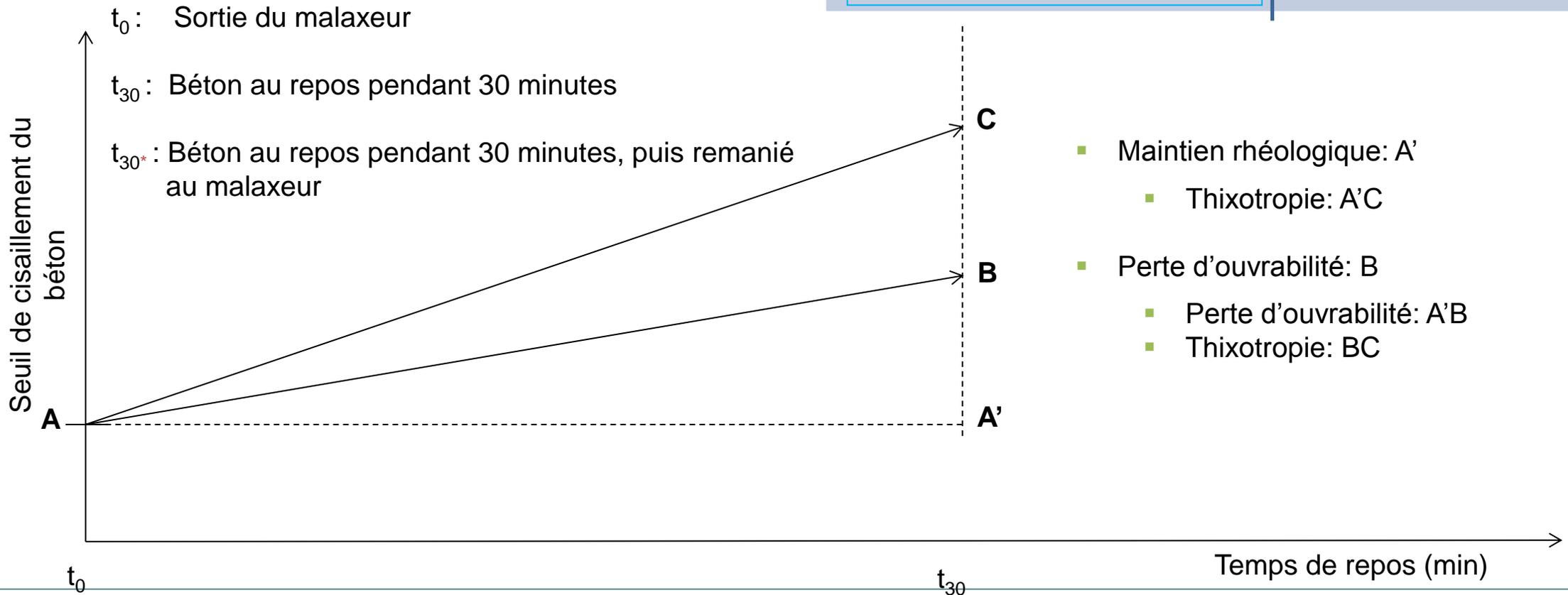
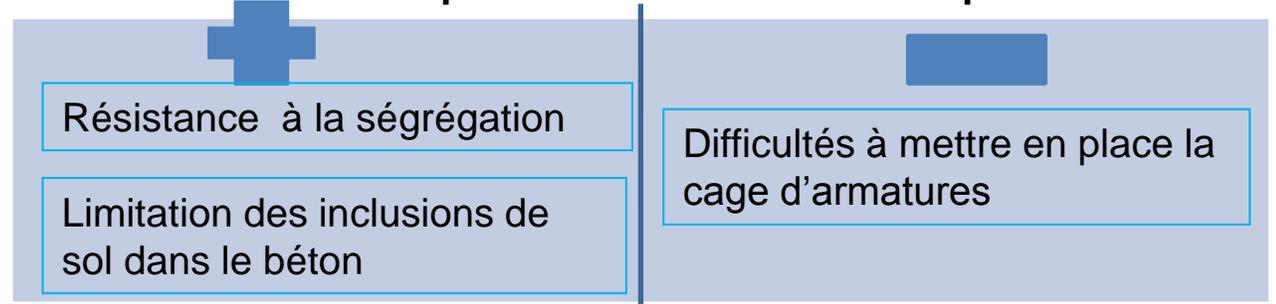
[5] Nader Ghafoori and Hamidou Diawara, Evaluation of Fresh Properties of Self-Consolidating Concrete under Long Transportation Time and Extreme Temperature , K.H. Khayat and D. Feys (eds.), Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete, RILEM Bookseries 1, 139 DOI 10.1007/978-90-481-9664-7\_12, © RILEM 2010

[6] Zahia Toutou1 , Michel Cador2 , Nicolas Roussel, Laetitia D'Aloia Schwartztruber1 , Eric Vilbé 2 , Robert Le Roy1, RHEOLOGIE DES BETONS AUTO-PLAÇANTS: EVALUATION DE LA THIXOTROPIE,

Thixotropie du béton sur une période donnée = Proportion de liaisons réversibles qui se sont créées sur cette période

En pratique:

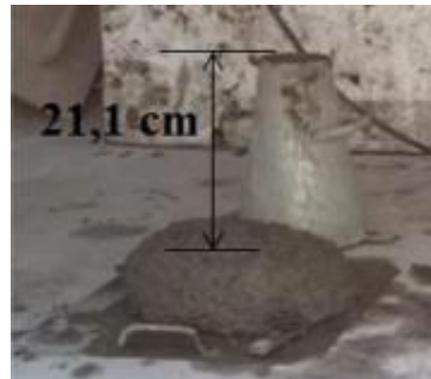
- Capacité de restructuration réversible du béton au repos
- Capacité de déstructuration du béton sous cisaillement



# Caractérisation rhéologique du béton en laboratoire

- Mesure de l'affaissement suivant la norme NF EN 12350-2 à:
  - $t_0$ : béton à la sortie du malaxeur
  - $t_{30}$ : béton au repos pendant 30 min (durée moyenne de mise en œuvre du pieu)
  - $t_{30^*}$ : béton au repos pendant 30 min, puis remanié au malaxeur
- Pour la mesure à  $t_{30}$ , le soulèvement du cône d'Abrams s'accompagne très souvent d'un glissement du béton

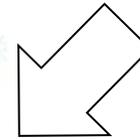
- L'essai d'affaissement n'est pas applicable



Etat après 30 min de repos (a)



Etat après 30 min de repos (b)



- Cet essai permet donc de mesurer uniquement la perte d'ouvrabilité du béton
  - baisse de l'affaissement de  $t_0$  à  $t_{30^*}$

- Rhéomètre à béton ICAR



- Mesure de  $\tau_0$ ,  $\mu_p$  et  $\tau_s$

$t_0$  : béton à la sortie du malaxeur

$t_{30}$  : béton au repos pendant 30 min (durée moyenne de mise en œuvre du pieu)

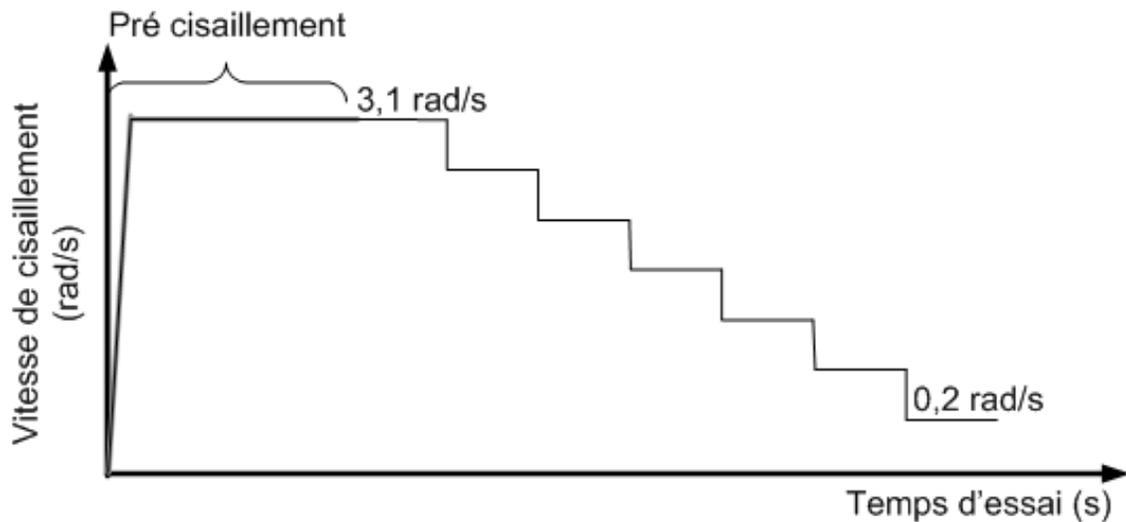
$t_{30^*}$  : béton au repos pendant 30 min, puis remanié au malaxeur

- L'écoulement du béton frais suit une loi de type Bingham

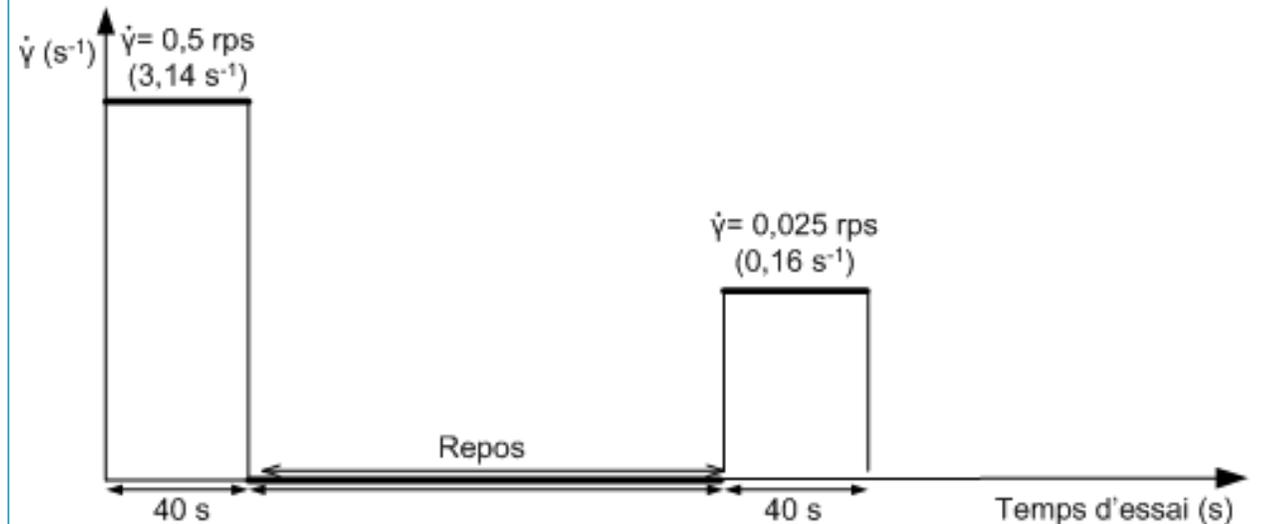
$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$$

$\tau_0$ : Seuil de cisaillement dynamique (Pa)

$\mu_p$ : Viscosité plastique (Pa.s)



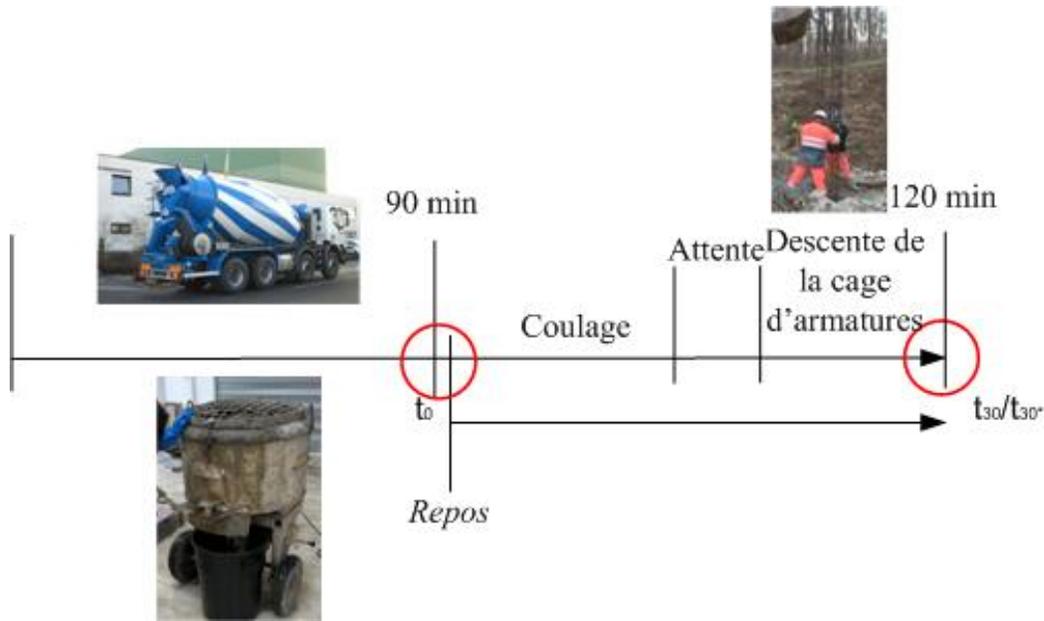
- Lorsque le béton est au repos, il existe un seuil de mise en écoulement  $\tau_s$



- Cet essai permet donc de mesurer:

- la perte d'ouvrabilité du béton: augmentation du seuil de cisaillement du béton de  $t_0$  à  $t_{30^*}$
- La thixotropie du béton: augmentation du seuil de cisaillement du béton de  $t_{30^*}$  à  $t_{30}$

# Caractérisation de l'enfoncement des armatures dans le béton frais



## Propriétés du béton connues

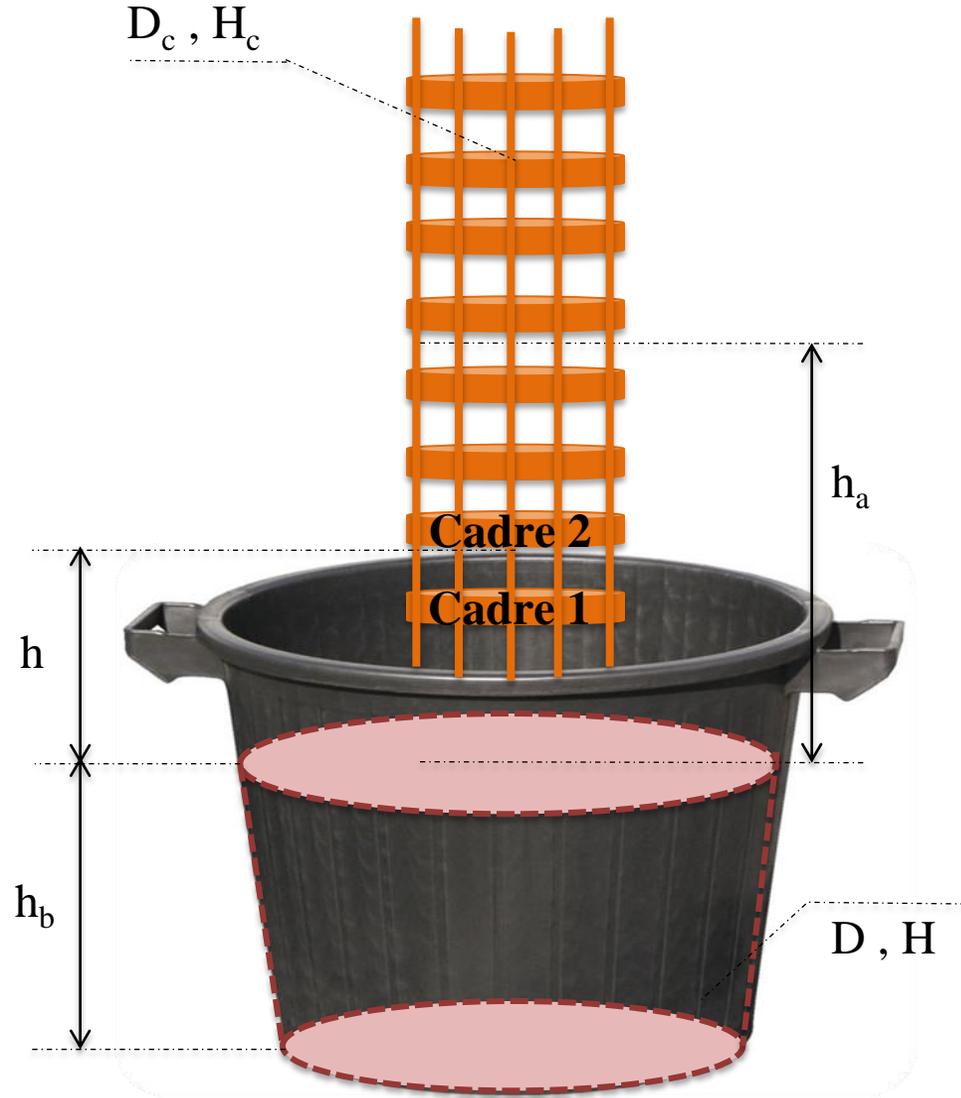
- Initial
- Effet du temps

- Mise au point d'un dispositif d'étude de l'enfoncement des cages d'armatures en laboratoire qui permet de mesurer:
  - la capacité d'enfoncement de la cage d'armatures dans le béton frais
  - les effets distincts et combinés de la perte d'ouvrabilité et de la thixotropie du béton sur cette capacité d'enfoncement
- Rédaction des recommandations sur les bétons (valeurs cible de propriétés) destinés à la réalisation des pieux



Dispositif d'essai

## Caractérisation de l'enfoncement des armatures dans le béton frais



- Poids propre de la cage d'armatures:  $N$
- Hauteur de béton dans la cuve cylindrique:  $h_b = H - h$
- Hauteur d'enfoncement de la cage dans le béton:  $h = H_c - h_a$
- Mesure de la hauteur de béton ( $h_b$ ) et de la hauteur d'enfoncement de la cage  $h$  dans le béton frais à:
  - $t_0$ : béton à la sortie du malaxeur
  - $t_{30}$ : béton au repos pendant 30 min (durée moyenne de mise en œuvre du pieu)
  - $t_{30}^*$ : béton au repos pendant 30 min, puis remanié au malaxeur

- Paramètres d'étude: perte d'ouvrabilité et thixotropie du béton
  - Formule de référence  $B_{0S}$
  - Variation des adjuvants (P/RE et SP/HRE)
  - Conformité aux exigences sur les bétons de pieu

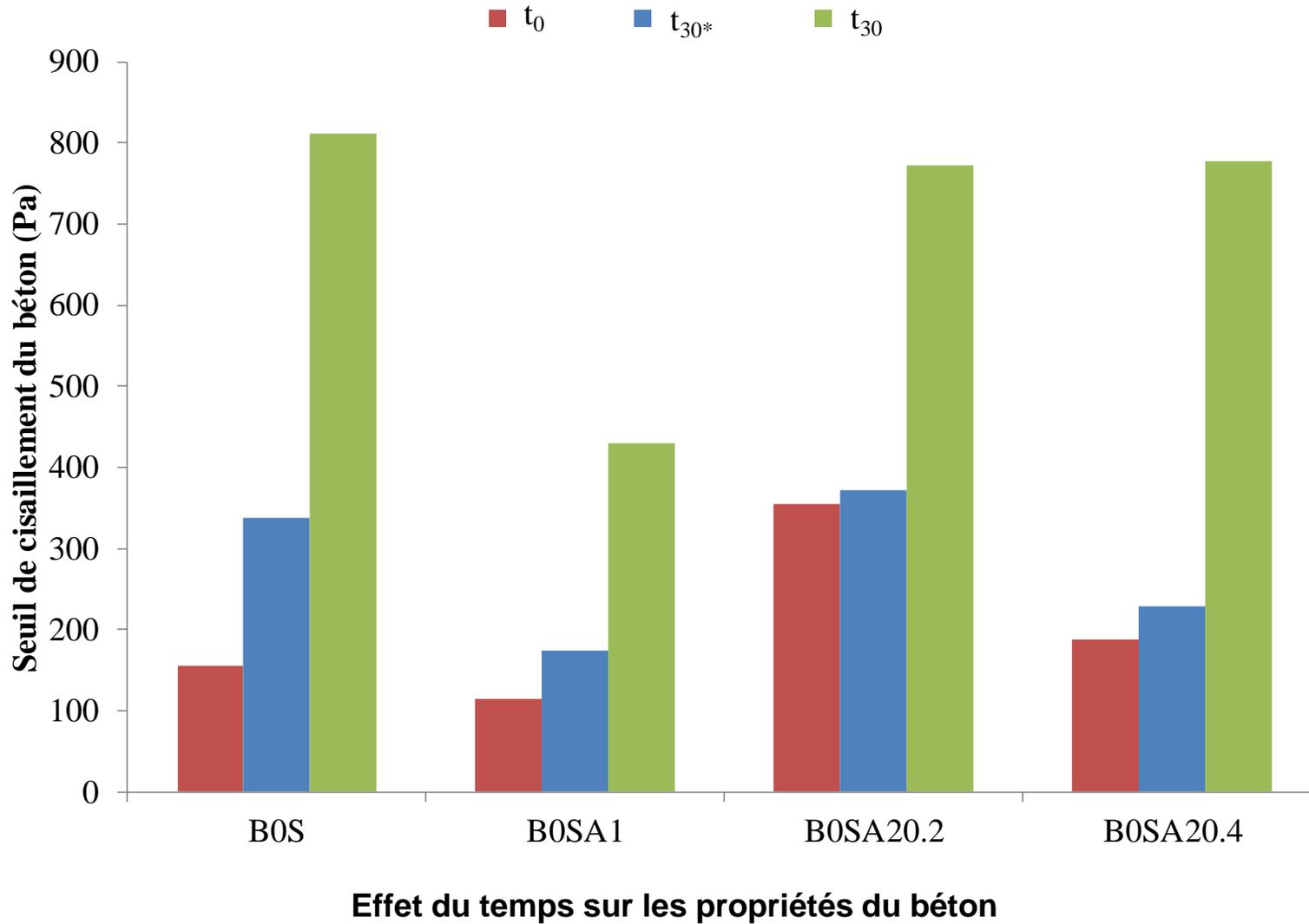
Dosage (kg/m <sup>3</sup> )	$B_{0S}$	$B_{0SA1}$	$B_{0SA20.2}$	$B_{0SA20.4}$	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption (%)
Désignation						
CEM III/A 42,5	350	350	350	350	2 950	-
0/4 Gand	415	415	415	415	2 650	0,2
0/4 TPPL	410	410	410	410	2 570	0,5
6/12 Gaurain	300	300	300	300	2 750	0,5
6/20 Gaurain	590	590	590	590	2 780	0,5
Adjuvant	0,8%	0,8%	0,2%	0,4%	-	-
E/C	0,54	0,54	0,54	0,54	-	-

$B_{0S}$  : Formule de référence, utilisation du P/RE Pozzolith 399 N, extrait sec=40,7%

$B_{0SA1}$  : Utilisation du P/RE Master Pozzolith 399 N. Extrait sec=40%

$B_{0SA20.2}$  : Utilisation du SP/HRE Sika Viscocrete Termpo 12. Extrait sec=29,5%. Dosage du P/RE=0,2%

$B_{0SA20.4}$  : Utilisation du SP/HRE Sika Viscocrete Termpo 12. Extrait sec=29,5%. Dosage du P/RE=0,4%



## Seuil de cisaillement du béton

- Réduction du seuil de cisaillement du béton pour  $B_{0SA1}$  de 25%
- Maintien et augmentation du seuil de cisaillement pour  $B_{0SA20.2}$  et  $B_{0SA20.4}$

$B_{0SA1}, B_{0S}, B_{0SA20.4}, B_{0SA20.2}$



## Perte d'ouvrabilité du béton

- Réduction de la perte d'ouvrabilité du béton d'au moins 60% pour tous les bétons

$B_{0SA20.2}, B_{0SA20.4}, B_{0SA1}, B_{0S}$

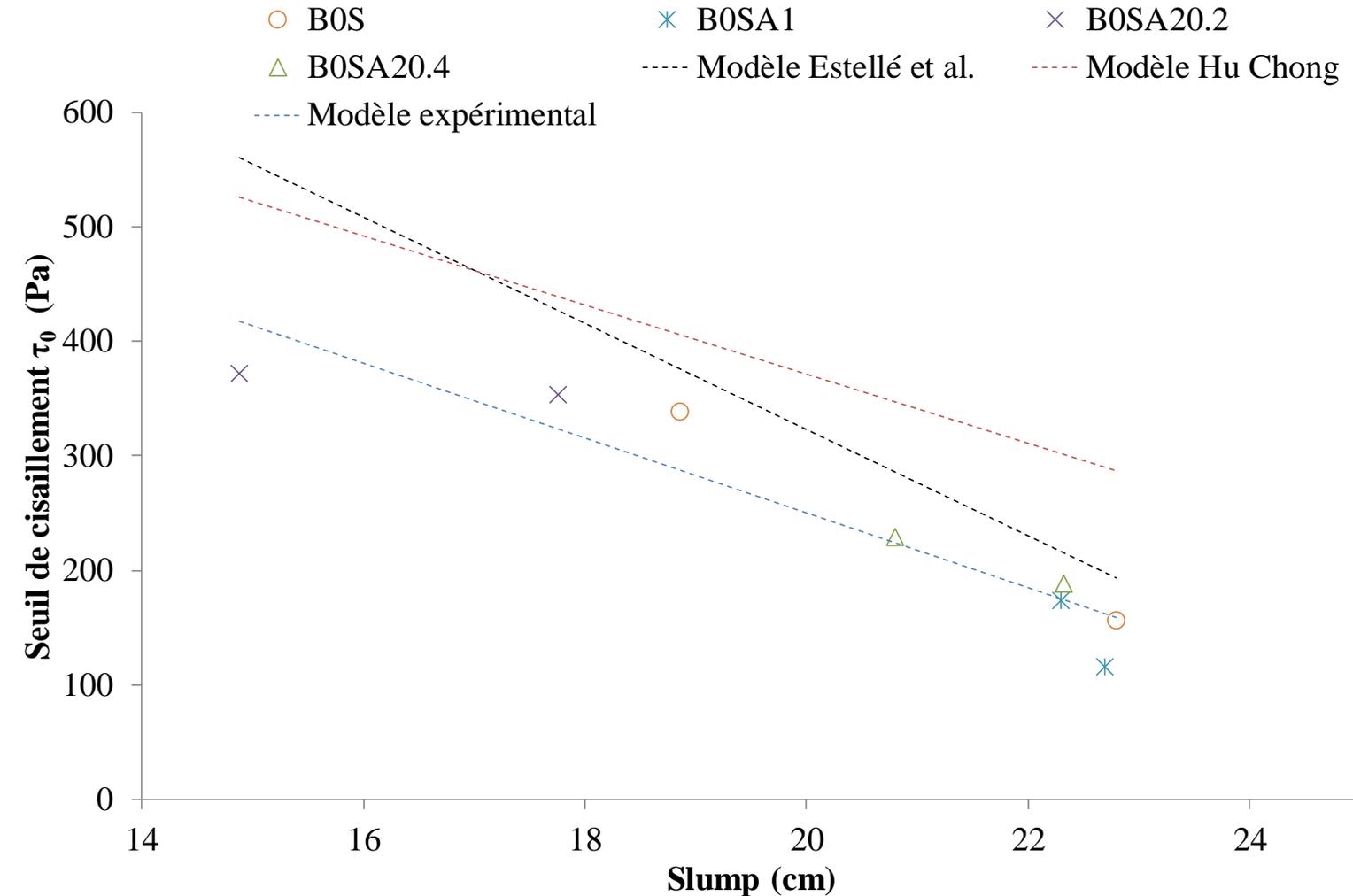


## Thixotropie

$B_{0SA1}, B_{0S}$



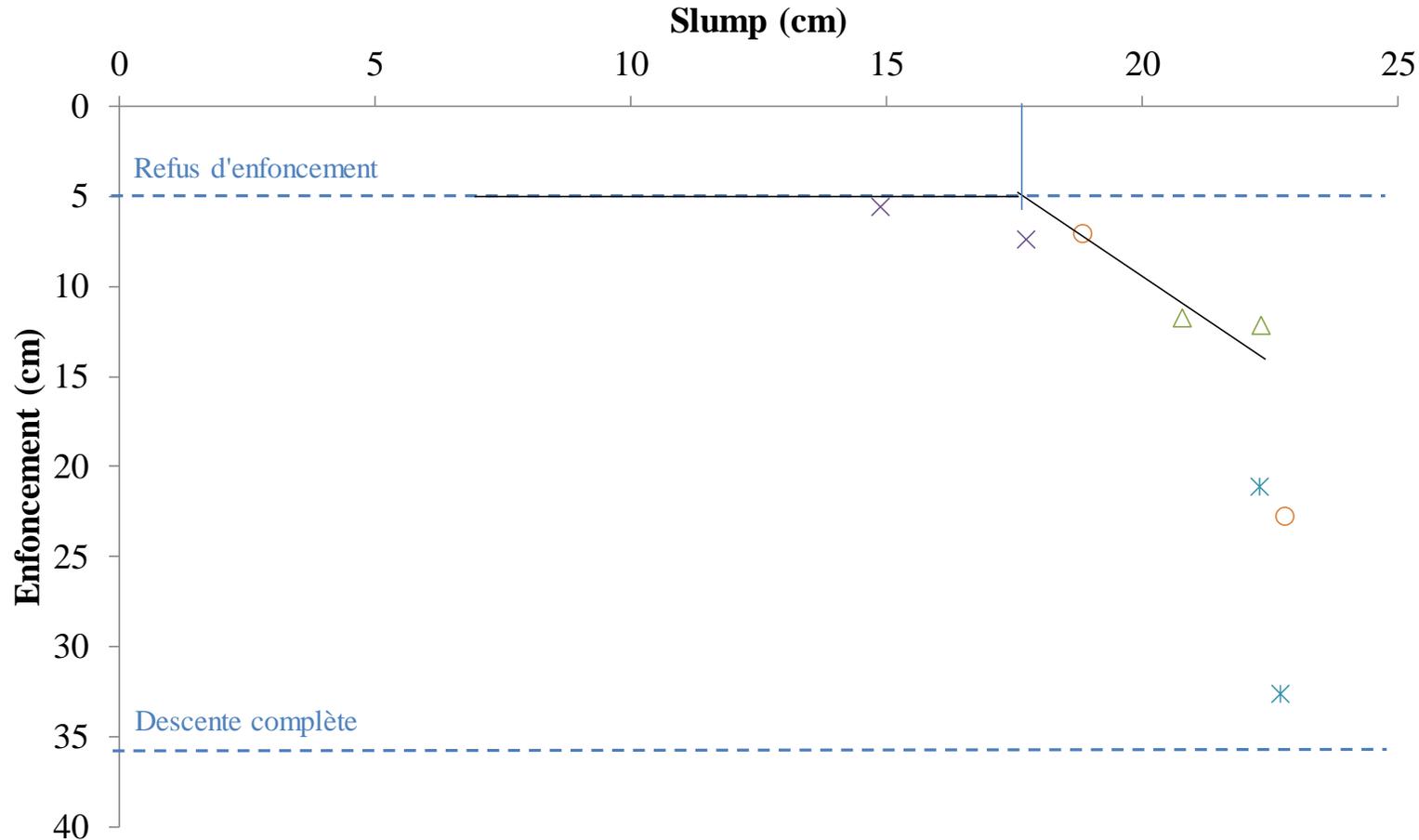
$B_{0SA20.2}, B_{0SA20.4}$



Evolution du seuil de cisaillement  $\tau_0$  avec le slump  
 $t_0$  et  $t_{30^*}$

- Il existe plusieurs modèles d'évaluation de  $\tau_0$  à partir de la valeur de slump pour les bétons ordinaires, BAP et BHP
- 2 modèles se rapprochent de nos mesures
  - Modèled'Estellé, Roussele t Cousso
  - Modèle de Hu Chong
- Domaine d'application de ces modèles
  - Bétons de slump compris entre 5 et 25 cm
- Equation de passage des mesures de seuil faites au BTRHEOM (utilisé par ces 2 modèles) à ICAR
  - $\tau_{0\_ICAR} = 0,36 \cdot \tau_{0\_BTRHEOM} + 67,4$  (Koehler, 2005)

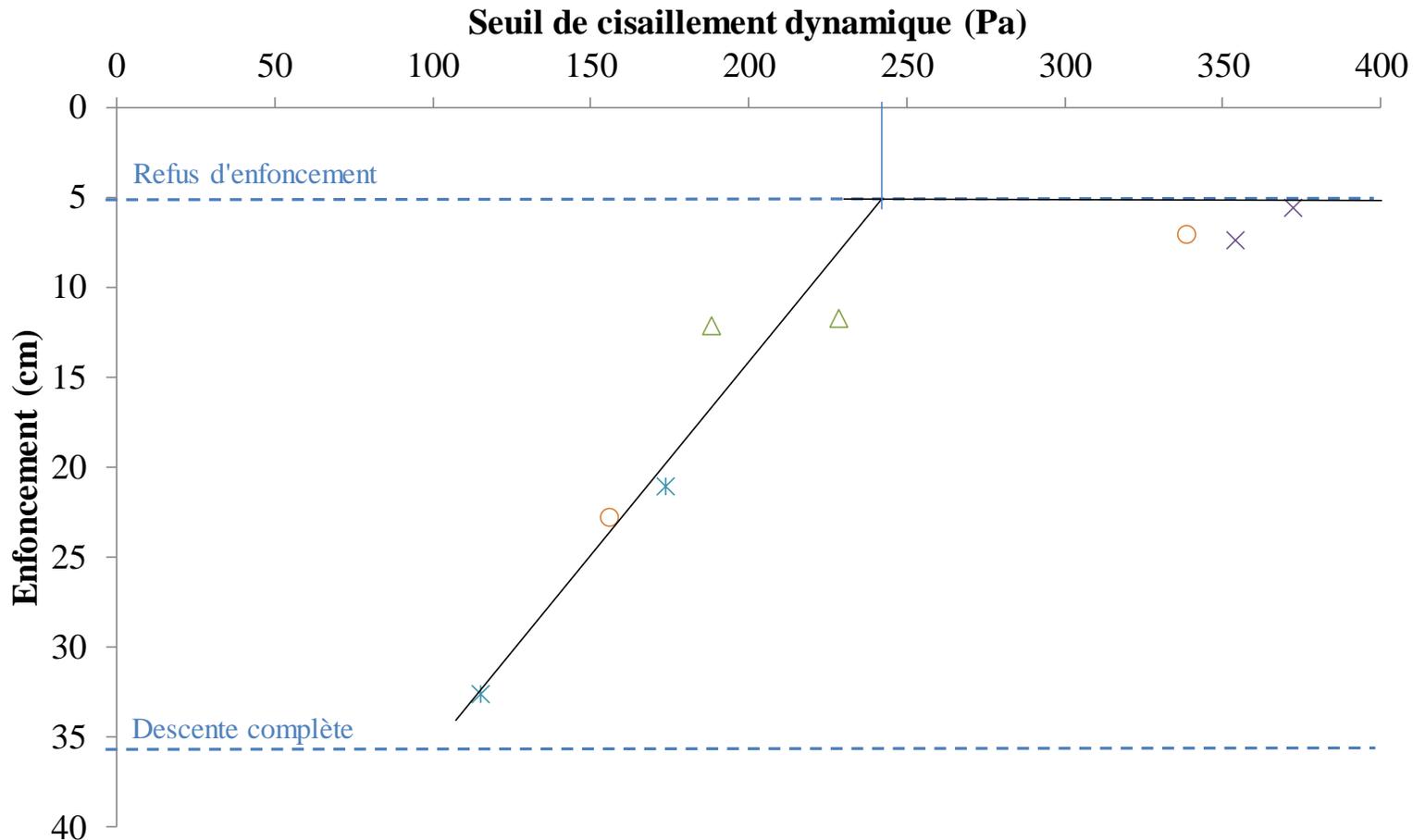
○ BOS   \* BOSA1   × BOSA20.2   △ BOSA20.4



- Le refus d'enfoncement apparaît à 5 cm
  - Valeurs seuil du slump = 18 cm pour le passage du 1<sup>er</sup> cadre

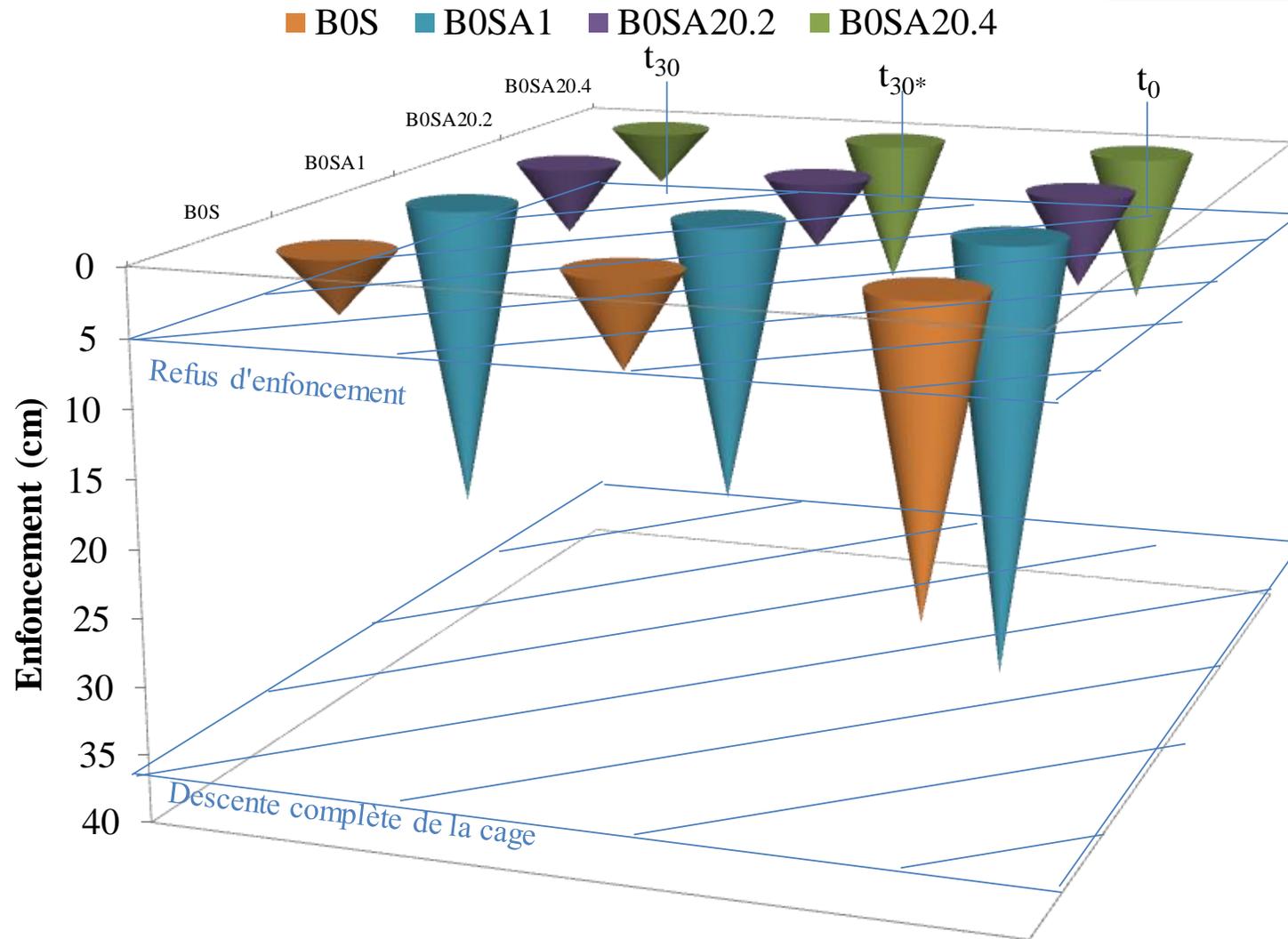
**Evolution de l'enfoncement de la cage avec la valeur de slump du béton**

○ B0S   \* B0SA1   × B0SA20.2   △ B0SA20.4



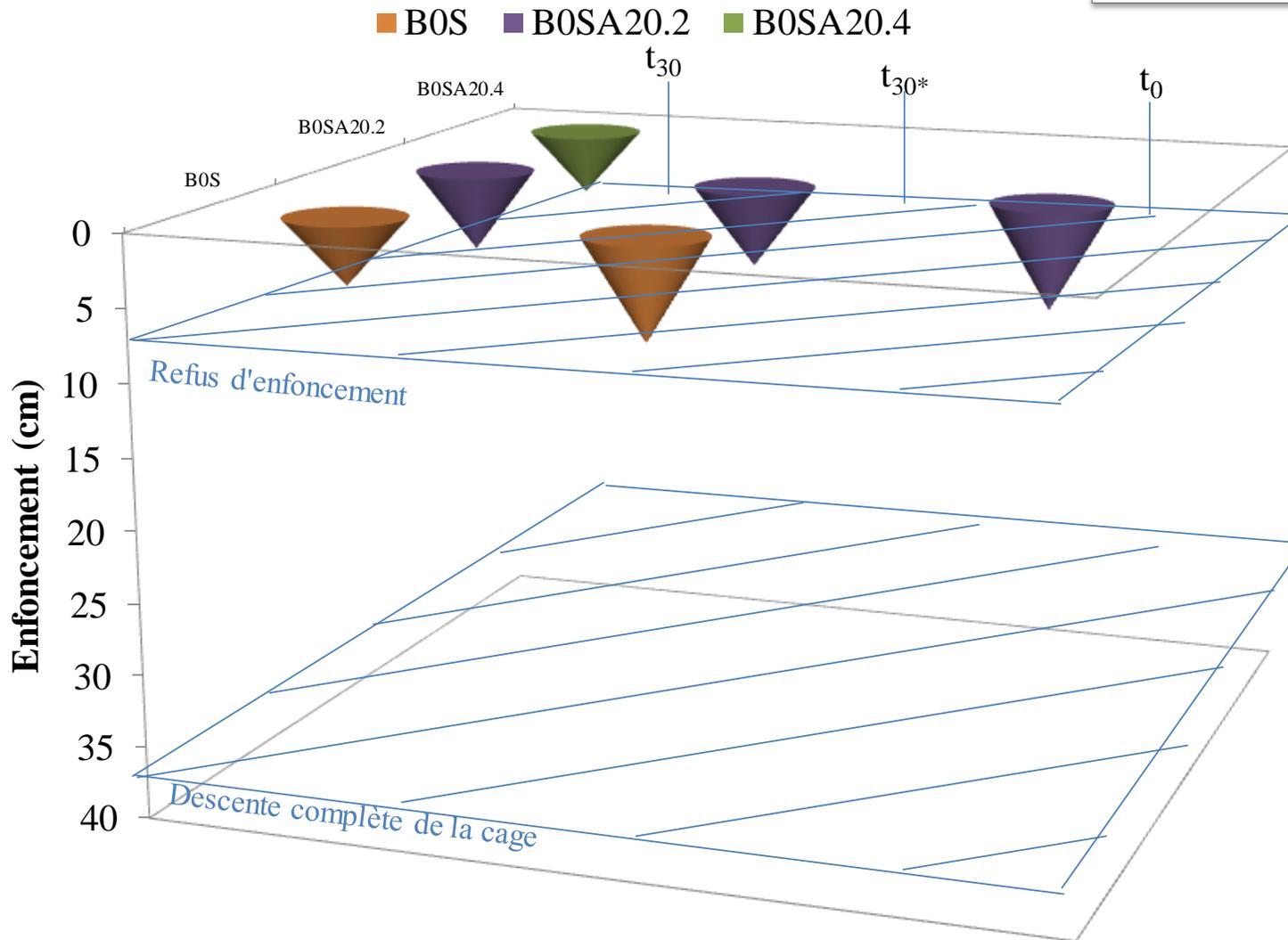
**Evolution de l'enfoncement de la cage avec le seuil de cisaillement dynamique du béton**

- Le refus d'enfoncement apparaît à 5 cm
  - Valeurs seuil du slump = 18 cm
  - $\tau_{0C} = 250$  Pa
  - $\tau_{SC} = 780$  Pa



Evolution de l'enfoncement de la cage avec le temps en fonction de la formulation de béton

- Pas de problème d'enfoncement pour  $B_{0SA1}$
- Refus d'enfoncement à certains temps pour les autres. Pourquoi?



Evolution de l'enfoncement de la cage avec le temps en fonction de la formulation de béton

- $B_{0SA20.2}$  a la plus faible thixotropie et le meilleur maintien rhéologique, pourtant on observe un refus d'enfoncement de la cage d'armatures à  $t_0$  (seuil initial le plus élevé)
- $B_{0S}$ : plus grande perte d'ouvrabilité et refus d'enfoncement même dans le béton remanié.
- $B_{0SA20.4}$ : plus grande thixotropie, bon maintien de l'ouvrabilité du béton, seuil initial proche de celui de  $B_{0S}$  et refus d'enfoncement dans le béton au repos

- Refus d'enfoncement à l'échelle du dispositif observé au-delà des valeurs seuil
  - slump = 18 cm;  $\tau_{0C} = 250$  Pa;  $\tau_{SC} = 780$  Pa
- Améliorer la capacité d'enfoncement des armatures dans les bétons d'étude passe par
  - Réduire le seuil de cisaillement initial du béton
  - Avoir un bon maintien de l'ouvrabilité du béton
  - Diminuer le niveau de thixotropie du béton

# MERCI DE VOTRE ATTENTION

[mariam.dairou@gmail.com](mailto:mariam.dairou@gmail.com)

# Influence des paramètres de formulation du béton sur les pathologies des parois moulées

Réunion Technique CFMS/FNTP : Recherche et Entreprises TP

**AZZI Mohammed Amin**

*(ingénieur BOTTE FONDATIONS-doctorant Laboratoire LGCgE)*

Directrice <sup>(1)</sup> : Mme Chafika DJELAL  
Co-directeur <sup>(1)</sup> : M. Yannick VANHOVE  
Encadrante <sup>(1)</sup> : Mme Hassina KADA  
Encadrant <sup>(2)</sup> : M. Olivier MADEC

PARIS (FNTP): 04 – FÉVRIER - 2016

(1) : Laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement

(2) : BOTTE FONDATIONS

# LES EXIGENCES POUR LA MISE EN ŒUVRE DES PAROIS MOULÉES

Paramètres	Recommandations	Documents de références
Type de ciment	CEM II ou CEM III ou remplacer le ciment CEM I par ajout de ciment de type II	NF EN 1538 et NF EN 206/CN
Surface Blaine du ciment	$\geq 3800 \text{ cm}^2/\text{g}$	NF EN 1538
Quantité en ciment ou liant équivalent*	$D_{\text{max}}=20 \text{ mm} \geq 385 \text{ kg/m}^3$	EN NF 206/CN
	$D_{\text{max}} = 22,4 \text{ mm} \geq 380 \text{ kg/m}^3$	
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$	EN NF 206/CN
Ressuage forcé au filtre presse BAUER	Quantité d'eau ressuée à 5min sous une pression de 5 bars $\leq 24,38\text{ml}^{**}$	Recommended Practice, Tremie Concrete for Deep Foundations
Etalement	$600 \pm 40\text{mm}$	NF EN 1538

\* Un liant équivalent est un liant hydraulique obtenu en mélangeant un ciment de type CEM I ou CEM II et des additions.

❖ Par l'appareil Bauer utilisé pour les essais :

- \*\*
- Dimensions du cylindre filtre presse BAUER :  $\phi = 8,44 \text{ cm}$ ,  $H = 29 \text{ cm}$
  - Parois moulées supérieures à 15m, forés à la boue => Filtration loss ( $\text{l/m}^3$ )  $\leq 15$
  - Eau ressuée [ $\text{ml}$ ] = [filtration loss ( $\text{kg} / \text{m}^3$ ) X volume du cylindre ( $\text{cm}^3$ )] / 1000
  - Eau ressuée;  $E_r$  [ $\text{ml}$ ]  $\leq 24,38$

# CHEMINEÉS DE REMONTEÉ D'EAU

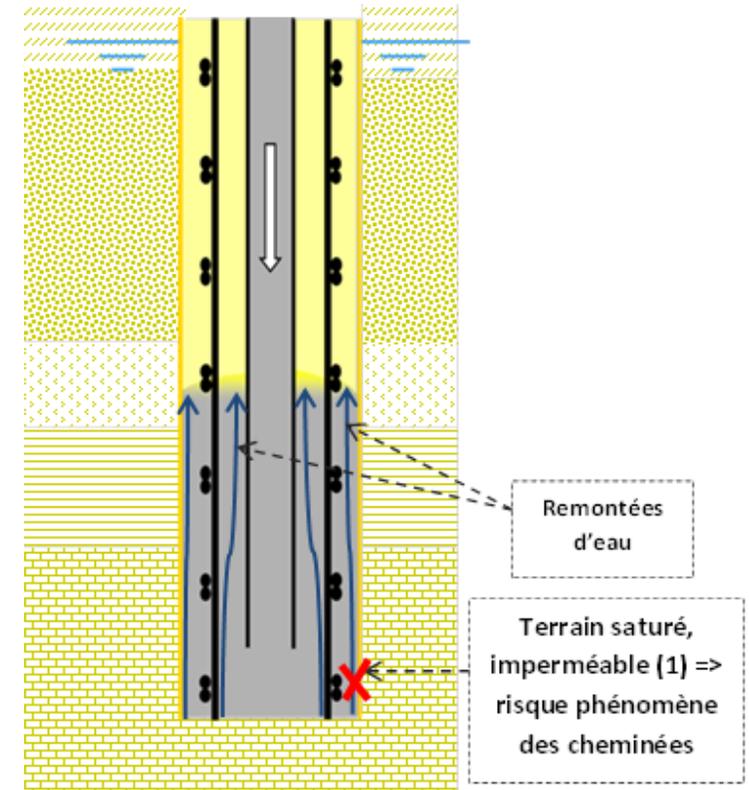
Des canaux d'écoulement se forment et drainent l'eau vers la surface entraînant les particules les plus fines.



Apparition de veines sableuses au niveau du parement



Ce phénomène est lié au ressuage du béton.



(1) terrain imperméable: l'eau trouve un chemin préférentiel à l'interface béton/paroi et remonte le long de la paroi => délavage du béton

## Les causes :

- Les cheminées de remontées d'eau sont **amplifiées** dans le cas des terrains imperméables (argileux ou argileux/sableux )
- L'**étanchéité du cake** dépend du transfert de l'eau du béton dans le sol.
- Anomalies liées à la **formulation** du béton.

## Conséquences des deux phénomènes :

- Une hétérogénéité des **propriétés mécaniques** de la paroi, qui s'accompagne aussi d'une baisse de la **qualité de parement**. (figure 1)
- Une **chute de l'adhérence** des armatures en partie supérieure (figure 2)
- Des cheminées de remontée d'eau avec un **lavage** de la laitance en surface
- Une modification de la hauteur finale de la paroi en béton. Cette diminution de dimension est causée par le **tassement** d'ensemble qui peut aller jusqu'à 5 % de la hauteur initiale .....

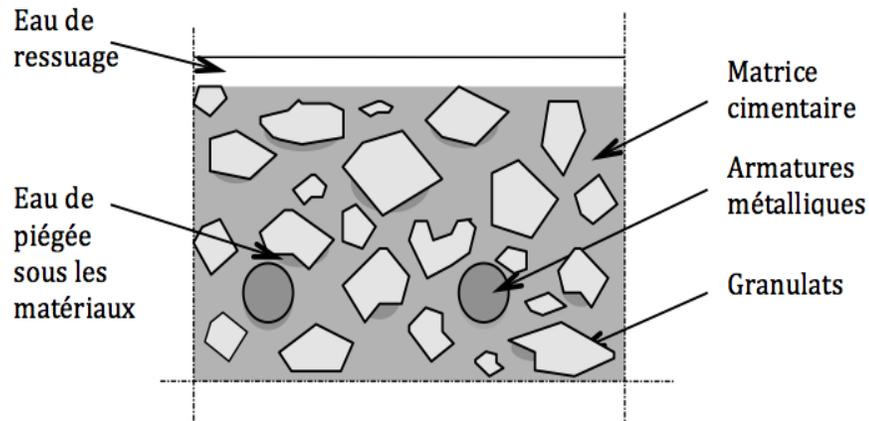


Figure 1: Une mauvaise adhérence locale des aciers ou des granulats vis-à-vis de la matrice cimentaire

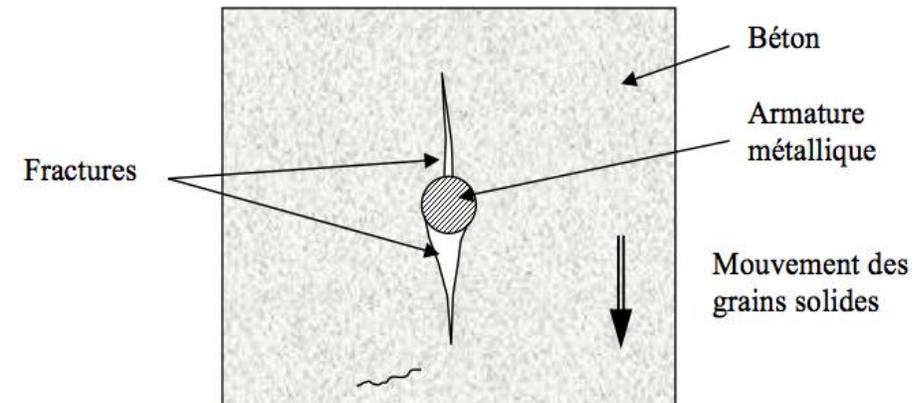


Figure 2: Lors d'un ressuage excessif, la partie supérieure du béton peut présenter une porosité élevée, ce qui diminue la résistance mécanique

## LES CAUSES, DES ANOMALIES LIÉES À LA FORMULATION

Paramètres	Niveau	degré ressuage	Référence
E/C			[K.Khayat, A.Casal 2005]
Pourcentage des particules fines < 0.125 mm			[F.De Larrad 1999]
Granulométrie du mélange continue	Oui		[Tokunaga, et al. 2003]
Compacité			[F.De Larrad 1999]
Surface spécifiques des granulats			[L.Josserand 2002]
Surface Blaine ciment élevée			[L,Josserand 2002]
Volume de pâte	$\geq 35\%$		[K.Khayat, A.Casal 2005]
	$\leq 30\%$		
Substitution d'une partie du ciment par des laitiers			[F.T. Olorunsogo 1998]
Retardateur de prise	Présent		[F.De Larrad 2006]

# Les différents chantiers selon le degré de pathologie



**BF 1**



**BF 2**



**BF 3**



**BF 4**

Nom du chantier	Degré pathologie	Constats sur la paroi	Aspect de la surface de la paroi après terrassement et raboutage
BF1	Néant	Aucune cheminée de remontée d'eau	Bon
BF2	(+)	Quelques cheminées de remontées	Mauvais
BF3	(+++)	Des cheminées de remontées	Très Mauvais
BF4	(++++)	Nombreuses cheminées de remontées	Très très mauvais

Ce tableau distingue les différents chantiers selon le degré de pathologie et les paramètres influençant les cheminées de remontées d'eau

# PRÉSENTATION DES CHANTIERS

## COMPOSITION DES BÉTONS

Composition	BF1	BF2	BF3	BF4
<b>Ciment</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>385</b>	<b>385</b>	<b>400</b>	<b>255</b>
<b>Classe ciment</b> -	<b>CEM III/A-L 52,5 PMES CP1</b>	<b>CEM II/42,5N PM CP2</b>	<b>CEM III/42,5N CE PMES</b>	<b>CEM II/A L 42,5R CP2</b>
<b>Classe d'exposition</b> -	<b>XA2</b>	<b>XA1</b>	<b>XA3</b>	<b>XC4/ XF1</b>
<b>Rc 28</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>C35/45</b>	<b>C35/45</b>	<b>C40/50</b>	<b>C30/37</b>
<b>Laitier</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	<b>105</b>
<b>Filler calcaire</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	<b>30</b>	-	<b>25</b>
<b>Cendres volantes</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>25</b>	-	-	-
<b>Sable 0/1</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	<b>220</b>
<b>Sable 0/4</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>820</b>	<b>770</b>	<b>760</b>	<b>660</b>
<b>Gravillon 2/10</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	<b>350</b>	-	-
<b>Gravillon 6/10</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	<b>470</b>
<b>Gravillon 4/20</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>840</b>	-	-	-
<b>Gravillon 6/20</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	-	<b>980</b>	-
<b>Gravillon 11/22</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	<b>580</b>	-	<b>475</b>
<b>Adjuvant 1</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>1,3</b>	<b>3,32</b>	<b>2</b>	-
<b>Adjuvant 2</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	<b>0,68</b>	-	<b>4</b>	<b>2,89</b>
<b>Retardateur</b> ( kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	<b>0,96</b>
<b>Eau efficace</b> (m <sup>3</sup> )	<b>174</b>	<b>190</b>	<b>178</b>	<b>176</b>
<b>Eff/Liant équivalent</b>	<b>0,45</b>	<b>0,49</b>	<b>0,45</b>	<b>0,49</b>

\* Eff/Liant équivalent = Eau efficace / (Ciment + K x addition).

**K** :coefficient d'équivalence qui dépend de l'addition. Il permet de prendre en compte le caractère pouzzolanique ou hydraulique de certaines additions.



# Caractéristiques et propriétés des bétons sur chantier



**Etalement à la table à choc**



**L'aéromètre**

Essais	BF1	BF2	BF3	BF4
Etalement à la table à choc	580 ± 40mm	640± 20mm	650± 30mm	610± 40mm
Température extérieure/ Température béton	15,4°C/ 14,8°C	28,8°C/ 26,7°C	29,1°C/ 27,5 °C	28,3°C/ 27,8°C
Air occlus	1,6± 0,6%	1,8± 0,3%	1,9± 0,4%	2,1± 0,3%

Les quatre formulations ont des caractéristiques attendues pour un béton d'une paroi moulée préconisées par les normes NF 1538/ EN et NF 206/CN.

## Des paramètres influençant les cheminées de remontées d'eau

Paramètres	BF1	BF2	BF3	BF4	Recommandations
Courbe granulométrique	continuité	continuité	discontinuité	continuité	-
Compacité	0,765	0,696	0,741	0,726	-
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m <sup>3</sup> )	446	427	404	400	$\geq 400 \text{ kg/m}^3$
Type de ciment	CEM III	CEM II	CEM III	CEM II	CEM II ou CEM III ou remplacer le ciment CEM I par ajout de ciment de type II
Quantité Liant (kg/m <sup>3</sup> )	385	385	400	356	$D_{\text{max}}=20 \text{ mm} \geq 385 \text{ kg/m}^3$ ou $D_{\text{max}} = 22,4 \text{ mm} \geq 380 \text{ kg/m}^3$
Surface de Blaine ciment (cm <sup>2</sup> /g)	4150	3650	4300	3850	$\geq 3800 \text{ cm}^2/\text{g}$
Surface spécifique des granulats (m <sup>2</sup> )	4014,2	3748,5	4457,1	3620,1	-
Volume de pâte (m <sup>3</sup> )	0,33	0,33	0,33	0,31	-

- Les types des ciments utilisés sont conformes aux recommandations de la norme EN NF 1538.
- Les quantités de fines sont toutes supérieures à 400 kg/m<sup>3</sup> (norme EN NF 206/CN).
- La quantité de liant est conforme aux exigences de la norme EN NF 206/CN à l'exception du béton BF4.
- La surface de Blaine ciment de trois bétons répond aux préconisations de la norme NF EN 1538 ce qui n'est pas le cas du béton BF2 qui a une surface de Blaine légèrement inférieure (3650 au de lieu de 3800 cm<sup>2</sup>/g).

- Tous les bétons présentent une continuité sauf le béton BF3.
- Les quatre bétons ont une compacité proche sauf pour le béton BF2.



# Caractéristiques et propriétés des bétons en laboratoire

Essais	BF1	BF2	BF3	BF4
Étalement à la table à choc	570 ± 10mm	560 ± 10mm	640 ± 10mm	610 ± 10mm
Température extérieure/ Température béton	22,4°C / 19,8°C	20,6°C / 17,2°C	23,6°C / 19,5°C	21,2°C / 18,8°C
Air occlus	1,3 ± 0,3%	1,1 ± 0,4%	1,4 ± 0,4%	1,8 ± 0,2%

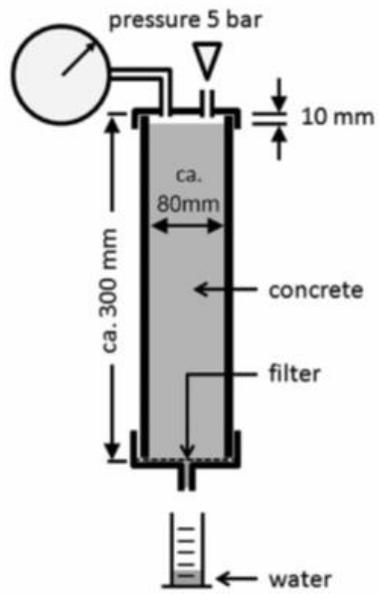
Les valeurs obtenues en laboratoire sont très proches de celles du chantier.

Sauf pour le béton BF2 qui présente une valeur d'étalement plus importante sur chantier.  
Ceci peut être dû à des aléas sur chantier (comme l'ajout d'adjuvant ou d'eau ...).

# ÉTUDE DU RESSUAGE FORCÉ

- ❑ Le ressuage forcé est l'un des problèmes de la stabilité du béton frais. Pour un mélange de béton instable, la pression exercée sur le béton au fond du panneau peut entraîner la migration de l'eau de gâchage.
- ❑ *Un béton instable*, est un béton sensible au ressuage et/ou à la ségrégation.
- ❑ Le filtre presse BAUER (recommandation), *practice Tremie concrete for deep foundation (2012)* va nous permettre d'étudier le ressuage forcé qui intervient également sur la stabilité du béton.

## Filtre presse « Bauer »



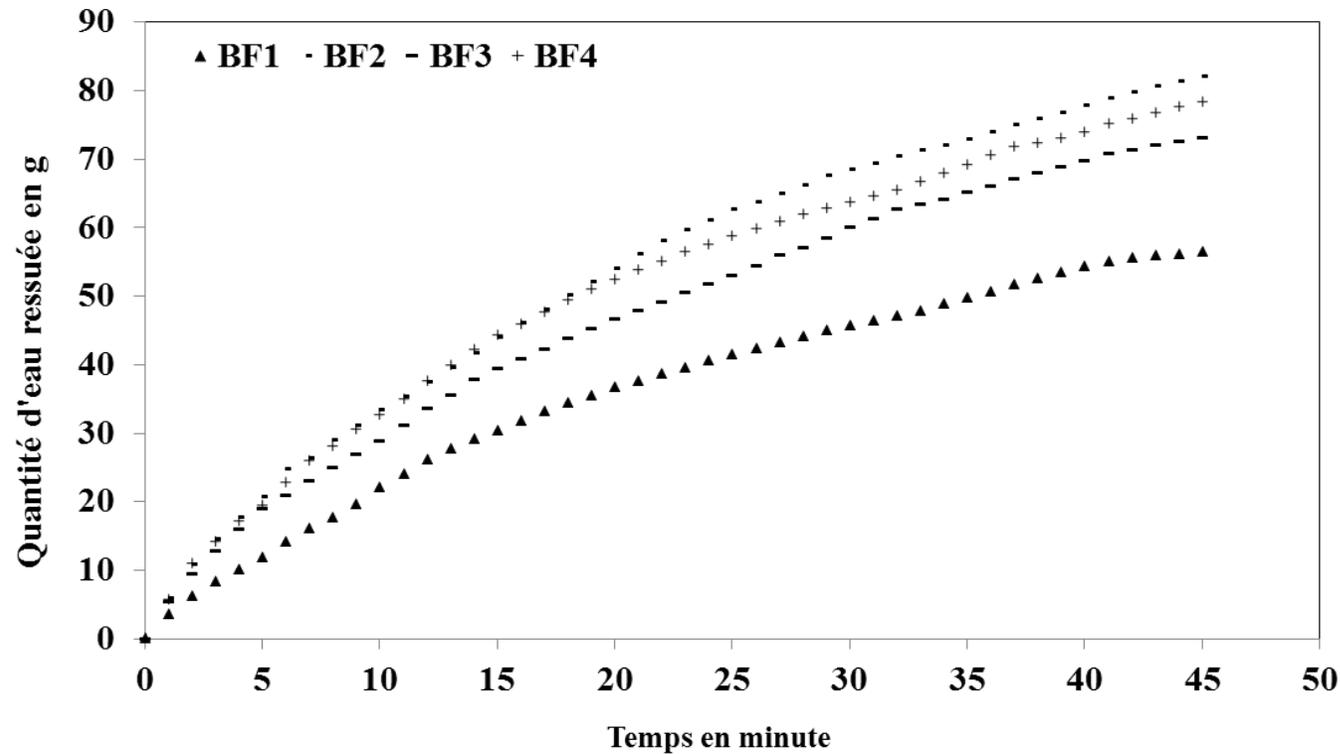
## Procédure d'essai

- Le béton est introduit dans le cylindre en deux couches successives. Chaque couche est piquée pour désaérer le béton.
- Une pression de 5 bars est appliquée sur le béton. L'eau migre vers le fond du cylindre et traverse le filtre.
- Elle est ensuite évacuée à travers l'orifice de sortie vers un récipient où elle est pesée en continu.
- La quantité d'eau ressuée est mesurée toutes les minutes pendant 45 minutes.

- **Dimensions du cylindre filtre presse BAUER :  $\phi = 8,44$  cm,  $H = 29$  cm**
- **Parois moulées supérieures à 15m, forés à la boue => Filtration loss ( $l/m^3$ )  $\leq 15$**
- **Eau ressuée [ml] = [filtration loss ( $kg / m^3$ ) X volume du cylindre ( $cm^3$ )] / 1000**
- **Eau ressuée;  $E_r$  [ml]  $\leq 24,38$**

# RESULTATS DES ESSAIS

## RESSUAGE FORCÉ BAUER 5 BARS DE PRESSION



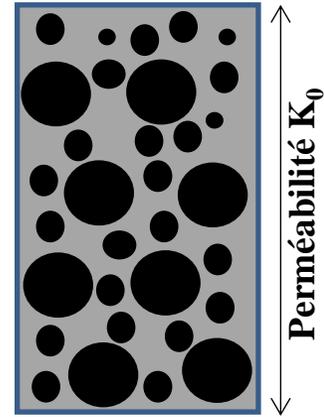
À 5 minutes :

- ❖ BF1 qui n'a aucune cheminée de remontée d'eau à une valeur de ressuage de 11,8 ml.
- ❖ BF2 qui présentait le moins de désordres (+), à une quantité d'eau ressuée de 20,8 ml.
- ❖ BF3 qui présentait des désordres (+++), à une quantité d'eau ressuée de 18,9 ml.
- ❖ BF4, le béton qui a présenté le plus de désordre sur le chantier (+++), à une quantité d'eau ressuée de 19,4 ml.

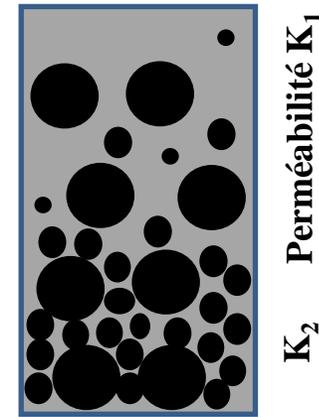
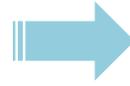
Des cheminées d'eau ont été constatées bien que les paramètres de formulation ont tous été respectés vis à vis des normes

## RESSUAGE FORCÉ BAUER 5 BARS DE PRESSION

La perméabilité du béton peut changer lors de l'essai de ressuage forcé



L'échantillon à  $t=0$

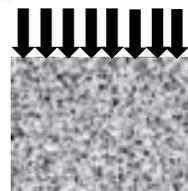


L'échantillon à  $t=t_1$

$$K_2 < K_0 < K_1$$

À partir de profondeurs différentes nous avons calculé la pression exercée sur le béton par son poids propre.

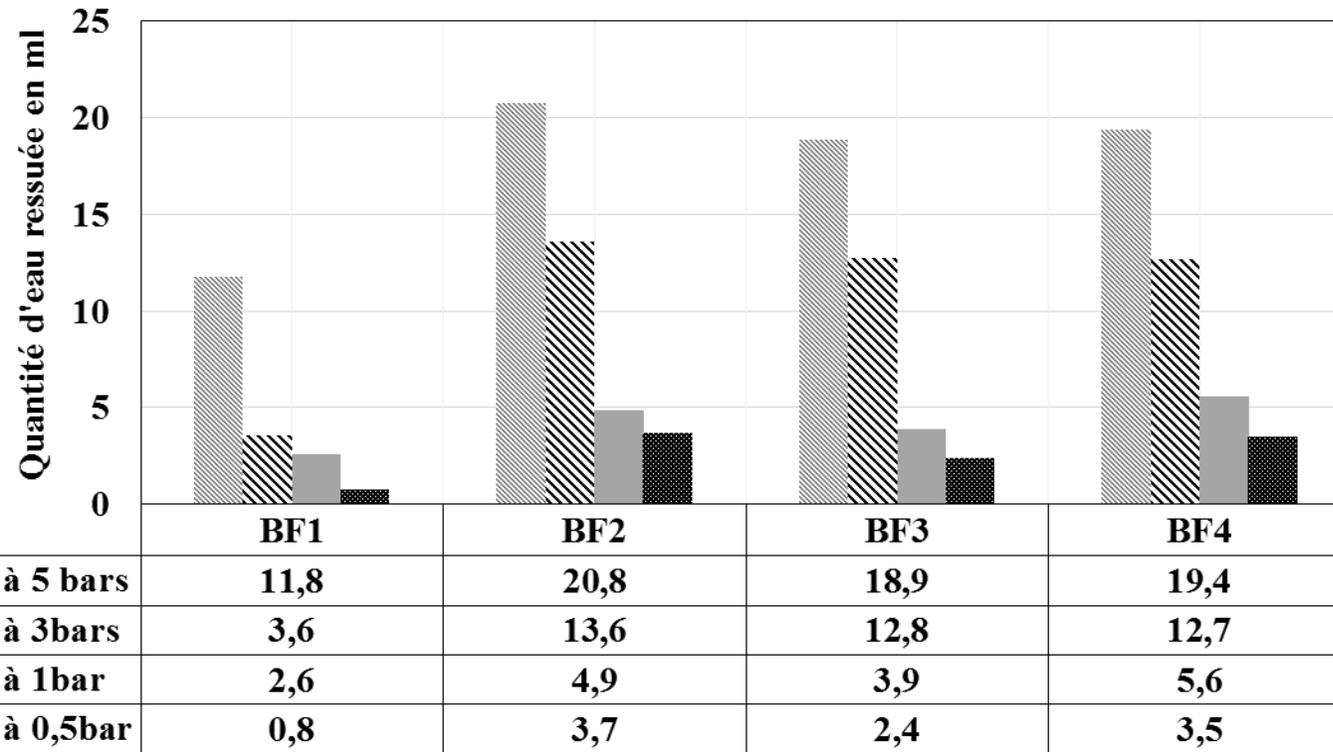
$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$$



Formule du béton	Pression du béton à mi-hauteur de la paroi (bars)
BF1	1,99
BF2	2,87
BF3	4,43
BF4	2,13

# RESULTATS DES ESSAIS

## RESSUAGE FORCÉ BAUER À DES PRESSIONS DIFFÉRENTES



La quantité d'eau ressuée des quatre bétons (BF1, BF2, BF3 et BF4) est fonction de la pression exercée sur le béton. La quantité d'eau ressuée des trois bétons à pathologie en fonction de la pression exercée reste très proches.

Les trois formulations (BF2, BF3 et BF4) ont toujours une quantité d'eau ressuée proche et inférieure à celle de BF1 quelque soit les pressions étudiées.

**La pression à 5 bars est retenue pour la suite des essais**

# LIMITATION DU RESSUAGE

Ressuage 5bars à 5min (en ml)			
BF1	BF2	BF3	BF4
11,8	20,8	18,9	19,4

Les trois bétons qui ont montré des pathologies sur chantier sont conformes à la recommandation Bauer Filtration => **24,38 ml**

Réajuster le seuil de Bauer Filtration

Limiter les cheminées de remontée d'eau

Etude de la perméabilité du béton BF4 (++++)  
(compacité, fines..),

Ressuage 5bars à 5min (en ml)				
BF1	BF4	BF4 (sub sable)	BF4 (sub Gravillons)	BF4 (sub sable et gravillons)
11,8	19,4	14,5	16,9	12,9

# CONCLUSION

Les travaux réalisés ont permis de comprendre les origines influençant les pathologies des parois moulées rencontrées (sol, mise en œuvre des bétons, formulations,...).

Bien que les trois bétons (BF2, BF3 et BF4) répondent aux exigences des normes et recommandations, des pathologies de remontée d'eau liées au ressuage ont été rencontrées.

L'étude à des pressions (0,5bar, 1, 3 et 5bars) qui a été effectuée simulant différentes hauteurs de paroi a permis de valider la pression de 5 bars.

La valeur seuil de 24,38ml est trop élevée puisque les bétons ont tous un seuil inférieur à cette valeur.



Une solution est d'abaisser ce seuil



**Un seuil < 15ml => valeur proposée pour les recommandations**

# APPLICATION DE L'ÉTUDE

Les conclusions de cette étude ont été appliquées sur deux chantiers en région parisienne et Metz

Des formulations de béton ont été établies en prenant en compte les résultats de l'étude

Seuil de ressuage 12,8ml et 13,4ml



---

# *MERCI POUR VOTRE ATTENTION*

*Mohammed-amin.azzi@vinci-construction.fr*

---