

ETUDE DU RESSUAGE DES BÉTONS DE PAROIS MOULÉES - APPLICATION AUX CHANTIERS DU GRAND PARIS

Amin AZZI, Chafika DJELAL, Olivier MADEC, Yannick VANHOVE
(Université d'Artois)

Etude du ressuage des bétons de parois moulées

Application à un chantier du grand Paris

Association Française du Génie Civil

AZZI Mohammed Amin

(Ingénieur BOTTE FONDATIONS - Doctorant Laboratoire LGCgE)

Mme Chafika DJELAL ⁽¹⁾

M. Yannick VANHOVE ⁽¹⁾

M. Olivier MADEC ⁽²⁾

M. Philippe Gotteland ⁽³⁾

(1) : Laboratoire Génie Civil et géoEnvironnement Lille Nord de France

(2) : BOTTE FONDATIONS

(3) : Fédération Nationale des Travaux Publics

RECHERCHES TECHNIQUES

- ▶ **Comité Sol & Comité Matériaux FNTF**
- ▶ Financement : BOTTE Fondations
- ▶ Comité de supervision :
 - ▶ Olivier Madec (BOTTE Fondation) : Directeur technique
 - ▶ Jean-Paul Volcke (FRANKI Fondation) : Directeur Général Adjoint, FAYAT FONDATION
 - ▶ Philippe Gotteland (FNTF) : Direction Technique Recherche, FNTF
 - ▶ Sabine Darson (Soletanche-Bachy) : Responsable Laboratoire Matériaux, SOLETANCHE-BACHY



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

EXIGENCES PRECONISEES 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*	$D_{\max}=20 \text{ mm} \geq 385 \text{ kg/m}^3$	EN NF 206/CN
	$D_{\max} = 22,4 \text{ mm} \geq 380 \text{ kg/m}^3$	
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (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 $\leq 24,40 \text{ ml}$	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.

CAUSES DES ANOMALIES LIÉES À LA FORMULATION DU BETON

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]

Eude du ressuage sur 4 chantiers de parois moulées durant 18 mois



BF 1



BF 2



BF 3



BF 4

chantier	Degré de pathologie	Constats sur la paroi	Aspect de la surface de la paroi après terrassement et rabotage
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

BF1: chantier de référence

PRÉSENTATION DES CHANTIERS

COMPOSITION DES BÉTONS

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

* 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.

Etude des paramètres influençant les cheminées de remontées d'eau

Paramètres	BF1	BF2	BF3	BF4	Recommandations
Courbe granulométrique	continuité	continuité	discontinuité	continuité	Aucune recommandation ou norme
Compacité	0,765	0,696	0,741	0,726	
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m ³)	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 ³)	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 ² /g)	4150	3650	4300	3850	$\geq 3800 \text{ cm}^2/\text{g}$
Surface spécifique des granulats (m ²)	4014,2	3748,5	4457,1	3620,1	-
Volume de pâte (m ³)	0,33	0,33	0,33	0,31	-
Retardateur de prise	-	-	-	présent	Aucune recommandation

- 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/m³ (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 cm²/g).

- Toutes les courbes granulométriques des bétons présentent une continuité sauf le béton BF3.
- Les quatre bétons ont une compacité proche sauf le béton BF2.

Caractéristiques et propriétés des bétons en laboratoire

Essais	BF1	BF2	BF3	BF4
Etalement 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%

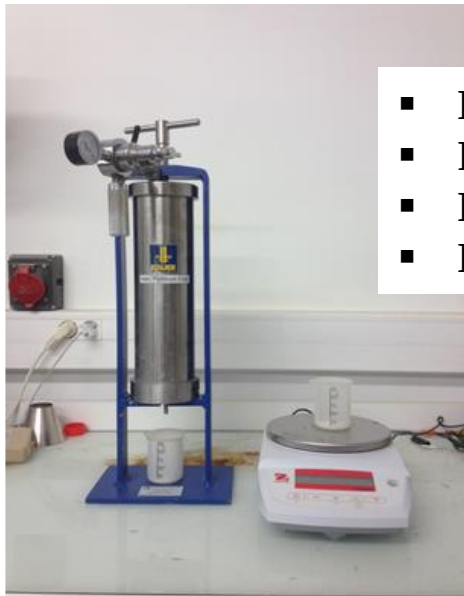
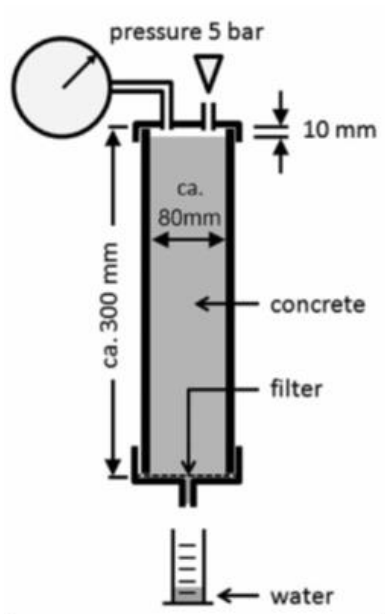
Les valeurs obtenues en laboratoire sont très proches de celles des chantiers.

Sauf pour le béton BF2 qui présente une valeur d'étalement plus importante sur chantier.
Ceci peut être lié 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 permettre d'étudier le ressuage forcé

Filtre presse « Bauer »



- 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 (l/m^3) ≤ 15
- Eau ressuée $[\text{ml}] = [\text{filtration loss (kg / m}^3) \times \text{volume du cylindre (cm}^3)] / 1000$
- Eau ressuée; $E_r [\text{ml}] \leq 24,40$

RESULTATS DES ESSAIS DE 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 => 24,4 ml**

Réajuster le seuil Bauer Filtration ?

Limiter les cheminées de remontée d'eau

Etude de l'influence des paramètres de formulation sur le ressuage du béton BF4 (++++)
(compacité, fines..),

Limiter le seuil Bauer à 16,5 ml

Validation de ce seuil sur une série de 6 chantiers de Novembre 2014 à Octobre 2015

- ❑ 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.
- ❑ La valeur seuil de 24,40 ml est trop élevée puisque les bétons ont tous un seuil inférieur à cette valeur.



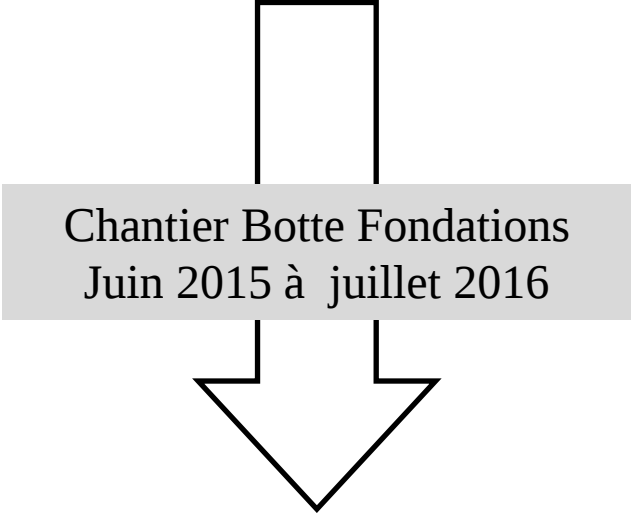
la solution : abaisser ce seuil à 16,5 ml



Avoir une courbe granulométrique continue

Les conclusions de cette étude ont été appliquées sur un chantier en région parisienne
« Prolongement ligne 14 : station de métro Clichy Saint Ouen sous le RER C »





Chantier Botte Fondations
Juin 2015 à juillet 2016

- Le prolongement de 14 km de la ligne 14 du métro Saint Lazare-Olympiades doit relier le centre de Paris, le pôle d'affaires de Saint Denis Pleyel au nord et l'aéroport d'Orly au sud.
- La présence d'une nappe phréatique au sein des marnes, un radier profond, des bâtiments d'une grandes hauteurs (R+7) adjacents = PAROI MOULEE.
- La station est composée de 3 étage et est entièrement souterraine.
- Surface de la paroi moulée : $13\,100\text{ m}^2$
- Volume du béton la paroi moulée : $98\,300\text{ m}^3$
- Hauteur : 42 et 44 m - Epaisseur : 1 m

La formulation initiale du béton a été modifiée en prenant en compte les résultats de l'étude

Paramètres	Formule initiale	Formule modifiée
Granulométrie du mélange granulaire	Continue	Continue
G/S	1,08	1,08
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m^3)	452	485

Essais	Ligne 14
Slump (mm)	220
J-ring BJ (mm)	43,5
Table à chocs (mm)	640
Essai au tamis (%)	1,85
Air occlus (%)	1,7
Quantité d'eau ressuée (ml)	12,3

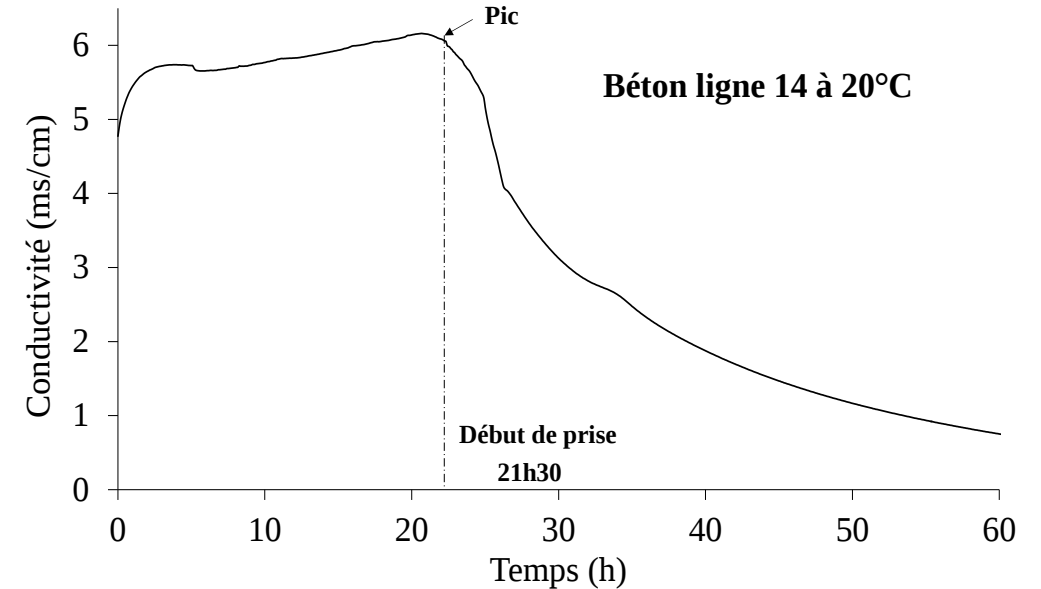
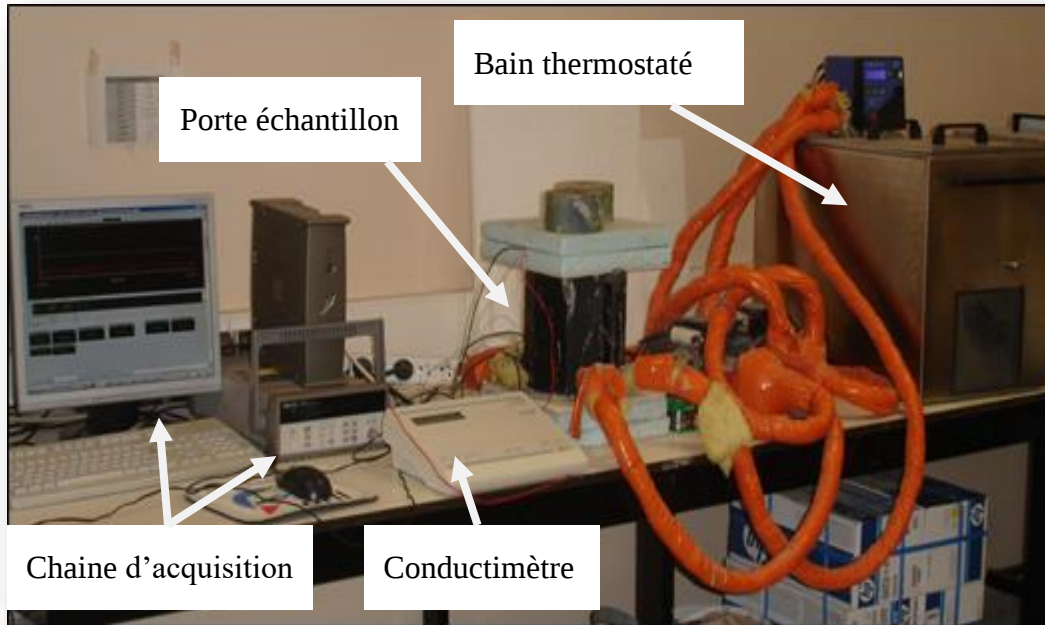
La formulation du béton répond aux exigences des normes et recommandations

Bien que la valeur préconisée soit inférieure au seuil de 16,5 ml des cheminées d'eau sont présentes sur les parements des parois moulées.



Station de métro « Clichy Saint Ouen »

Essais de conductivité: détermination du temps de début de prise



Un temps de prise très long: « 21h30 min »



Réalisation d'un essai complémentaire: ressuage statique

La formulation initiale du béton a été modifiée en prenant en compte les résultats de l'étude



Paramètres	Formule initiale	Formule modifiée
Granulométrie du mélange granulaire	Discontinue	Continue
G/S	1,12	1,06
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m ³)	442	468
Quantité d'eau ressuée Bauer (ml)	-	12
Quantité d'eau ressuée ASTM C232 (%)	-	2,9%



CONCLUSION DE L'ETUDE ET RECOMMANDATIONS

- ☐ Bien que les bétons répondent aux exigences de la recommandation « $<16,5$ ml », des pathologies de remontée d'eau ont été rencontrées.
- ☐ La présence d'un retardateur de prise dans un béton ne permet pas d'évaluer, à l'aide de l'essai filtre presse Bauer, les risques d'apparition de cheminées de remontée d'eau.



L'Essai filtration Bauer n'est pas suffisant



Prévoir un essai complémentaire « ASTM C232, ressuage statique »

- ☐ Pour des bétons sans retardateur de prise, la valeur seuil de 24,4 ml d'eau ressuée pour une profondeur de paroi supérieure à 15 mètres doit être abaissée à (16,5 ml)
- ☐ Cette recommandation est actuellement suivie par l'ensemble des entreprises œuvrant dans ce secteur d'activités et par le groupe de travail «Group FNTP/EFFC (Munich)».

*Merci pour votre
attention*

chafika.dantec@univ-artois.fr

Mohammed-amin.azzi@vinci-construction.fr