

EVALUATION DES PARAMÈTRES INTERVENANT SUR LE RESSUAGE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS DE PAROIS MOULÉES – APPLICATION À UN CHANTIER DU GRAND PARIS

DEVELOPMENT OF AN ANALOGUE MODEL TO STUDY THE MECHANISMS OCCURRING AT THE CONCRETE / FORMWORK INTERFACE

**Amin AZZI⁽¹⁾⁽²⁾, Yannick VANHOVE⁽¹⁾, Chafika DJELAL⁽¹⁾,
Olivier MADEC⁽²⁾, Philippe GOTTELAND⁽³⁾**

⁽¹⁾Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE),
Béthune, F-62400, France

⁽²⁾Botte Fondations, Zac du Petit Le Roy, 5 rue Ernest Flammarion,
Chevilly-Larue, 94659 Rungis Cedex

⁽³⁾Fédération Nationale des Travaux Publics, DRT, Paris, France
Chafika.dantec@univ-artois.fr

1. INTRODUCTION

Les parois moulées sont des éléments de structures souterraines en béton armé utilisées principalement comme fondations profondes pour la réalisation de nombreux ouvrages situés dans des sites et des conditions géotechniques très variés. Cette technique permet de réaliser des ouvrages de forme et de dimensions diverses jusqu'à des profondeurs très importantes : parking souterrain, mur de quai, parois circulaires

pour la réalisation de bassin, enceinte cylindrique, etc... Certaines parois moulées sont de véritables ouvrages d'art.

Ancrées dans une couche résistante étanche, elles sont destinées à reprendre les efforts de poussée dus aux actions du terrain se situant en arrière et de la nappe phréatique.

Les parois moulées sont réalisées sous forme d'éléments unitaires jointifs appelés panneaux. Elles ont une épaisseur qui varie de 0,5 m à 1,5 m et une hauteur maximale pouvant atteindre 80 m. La technique des parois moulées est le seul pro-

cédé de fondation qui permet d'atteindre de telles dimensions en profondeur.

Ces parois sont souvent fortement ferraillées pour pouvoir résister au poids de l'ouvrage construit en surface, à la pression de l'eau de la nappe et à la poussée des sols.

Pour des volumes de bétonnage importants, des retardateurs de prise peuvent être incorporés au béton afin que la prise du béton mis en place n'intervienne pas avant la fin du bétonnage de l'ensemble du panneau.

La réalisation des parois moulées dans le sol implique un certain nombre de contraintes :

- Le béton, de très grande fluidité, doit correspondre en ouvrabilité à la classe S4 (la norme EN NF 206/CN [1] préconise un étalement à la table à choc de 600 ± 30 mm à 20°C) pour pouvoir être coulé dans des zones très ferraillées ou des zones de formes complexes difficilement accessibles,
- La mise en œuvre du béton ne doit pas nécessiter de vibration pour éviter tout mélange avec les terres et la nappe et pour ne pas rompre le fragile équilibre des parois de l'excavation tenues par la boue. Il doit pouvoir se compacter sous son propre poids,
- Etant donné le mode de pose spécifique et la durée du coulage du béton nécessaire à la réalisation des fondations spéciales (plusieurs heures), la consistance du béton doit être conservée durant toute la durée du bétonnage. Un maintien consistance supérieur à la durée du bétonnage (plus aléa) est recommandé (entre 6 et 8 heures pour les gros volumes de bétonnage).

Les parois moulées doivent satisfaire aux exigences de la norme française NF EN 1538 [2] et à la norme européenne NF EN 206/CN. Pour assurer la durabilité du béton, celui-ci doit disposer d'une teneur minimale en ciment qui est fonction du diamètre D_{max} . La surface de Blaine du ciment doit être supérieure à $3800 \text{ cm}^2/\text{g}$.

L'utilisation de ciments de type CEM II, CEM III ou un CEM I remplacé partiellement par ajout de ciment de type II car leurs effets bénéfiques sur le béton (amélioration de l'ouvrabilité, réduction de chaleur d'hydratation durant la prise et réduction du taux de ressuage...) sont privilégiés. Un remplacement partiel du ciment CEM I ou CEM II par des additions conformes au NA.5.1.6 (norme EN NF 206/CN) est possible. Le squelette granulaire doit être continu afin de réduire le plus possible la ségrégation. La masse totale des particules fines ($D \leq 0,125 \text{ mm}$) dans le mélange du béton (intégrant le ciment et les autres fines) doit être comprise entre 400 et 550 kg/m^3 . Le ressuage du béton doit être limité. En cas de ressuage excessif, des canaux de ressuage (appelés également cheminées de remontée d'eau) peuvent apparaître. Les normes NBN EN 480-4 et la norme américaine ASTM C232 ne donnent aucune valeur de volume d'eau perdu par ressuage statique limite ni d'une vitesse limite de ressuage, mais certaines entreprises adoptent 1% pour le volume d'eau perdu par ressuage statique et une vitesse limite de 0,1 m/minute. Venant compléter ces normes, il existe également des recommandations australiennes pour fondations profondes (Recommended Practice Tremie Concrete for Deep Foundations) [3]. Il y est recommandé que la quantité d'eau ressuée mesurée à l'aide de l'essai Bauer à 5 minutes sous une pression de 5 bars doit être

$\leq 30 \text{ litres/m}^3$ pour des parois moulées $\leq 15 \text{ m}$ et 15 litres/m^3 pour des parois $> 15 \text{ m}$.

Enfin, il est important d'essayer de garder le béton en mouvement durant toute la phase de bétonnage. Si l'approvisionnement en béton est retardé, il faut faire durer le plus longtemps possible la vidange de chacune des toupies. Le bétonnage doit être effectué en continuité pour la totalité du panneau.

Bien que toutes ces conditions soient respectées, de nombreuses entreprises rencontrent actuellement de nombreux problèmes liés essentiellement au ressuage. En effet, les observations effectuées après le terrassement et le rabotage des parois montrent que le béton à l'extérieur de la cage d'armatures est de plus mauvaise qualité que celui situé à l'intérieur de la cage. L'importance de cette problématique sur le plan européen a conduit à la création d'un groupe de travail en 2015 (Mirror Group FNTPE/EFEC) afin de compléter et d'améliorer les critères existants de recevabilité des bétons de fondations sur chantier.

Ces défauts peuvent être attribués à la mise en œuvre liée à une fluidité insuffisante et non maintenue durant la mise en œuvre, une faible cohésion entre les couches due à une prise trop rapide, un enrobage insuffisant des armatures, à la pollution du béton d'enrobage par de la boue ou au manque de laitance du béton résultant d'une perte de sa maniabilité due à un ressuage survenant lors de sa mise en place. La pression hydrostatique du béton frais dans une paroi moulée peut également contribuer à des défauts de parement en raison de la création de canaux longitudinaux le long de la paroi lorsque le terrain est imperméable. Ces canaux ont tendance à cheminer à l'interface paroi/sol dans le béton frais, ce qui favorise des cheminées d'eau au parement de la paroi (ou veines sableuses, Figure 1). Lors de sa migration, l'eau peut entraîner les fines du béton (délavage du béton) entraînant ainsi une ségrégation du squelette granulaire. Dans certains cas, des veines de sable peuvent être présentes. Ces facteurs peuvent affecter la qualité des parois tant au point de vue esthétique que mécanique.



Figure 1. Cheminées de remontées d'eau

Dans la mesure où ces parois remplissent souvent une fonction définitive avec une durée de vie prévue de 50 ans ou plus, il est essentiel qu'elles ne présentent pas d'imperfections importantes. En effet, il ne s'agit pas uniquement de garantir la durée de vie mais également d'éviter des infiltrations de terre et d'eau de la nappe phréatique pendant et/ou avant l'excavation de la fouille. Les cheminées de remontées d'eau représentent 90% des désordres observés sur les chantiers. Les normes 1538-2010 NF et NF 206/CN ou le fascicule 65 donnent peu d'informations sur ce problème. Afin de comprendre les phénomènes survenant lors de la mise en œuvre du béton et les origines de cette pathologie, une étude détaillée a été effectuée sur quatre chantiers de réalisation de parois moulées de Botte Fondations durant une période de 18 mois. Parmi ces chantiers, trois d'entre eux (BF2, BF3, BF4) présentent après terrassement et rabotage, de nombreuses traces dues à des cheminées de remontées d'eau. Aucun défaut n'a été constaté pour le chantier BF1, celui-ci sera considéré comme chantier de référence. Les informations relatives à ces chantiers ont été étudiées (rapport sol, CCTP, conditions de bétonnage, formulations des bétons...). Des essais de caracté-

risations (étalement, air occlus) ont été menés en parallèle du coulage du béton dans les excavations. L'analyse des résultats de ces essais a permis de mettre en place la campagne expérimentale en laboratoire.

2. ÉTUDE COMPARATIVE SUR 4 CHANTIERS DE PAROIS MOULÉES

2.1. Présentation des chantiers

Les Tableaux 1 et 2 présentent les différents chantiers et leur degré de pathologie. Les pathologies relevées sont uniquement des cheminées de remontées d'eau (Figure 2). Aucune pathologie n'a été observée pour le chantier BF1. Les trois autres chantiers, présentent après terrassement et rabotage, de nombreuses traces dues à des cheminées de remontées d'eau. BF4 est le chantier qui a présenté le plus de problèmes.

Chantier	Type d'ouvrage	Hauteur de la paroi	Epaisseur de la paroi
BF1	Station d'épuration	17 à 19 m	0.8 m
BF2	Bâtiment (bureaux, restaurants...)	24 à 26 m	0.8 m
BF3	Station de pompage / stockage eaux usées	37 à 38 m	1 m
BF4	Ligne de chemin de fer	18 m	0.8 m

Tableau 1. Caractéristiques des différents chantiers

Chantier	Observations sur la paroi	Profondeur des canaux	Degré de pathologie
BF1	Aucune cheminée de remontée d'eau	Aucune	néant
BF2	Quelques cheminées de remontées d'eau	Moins d'un centimètre	+
BF3	Des cheminées de remontées d'eau	Deux centimètres	+++
BF4	Nombreuses cheminées de remontée d'eau	Trois centimètres	++++

Tableau 2. Degrés de pathologies des parois moulées des chantiers

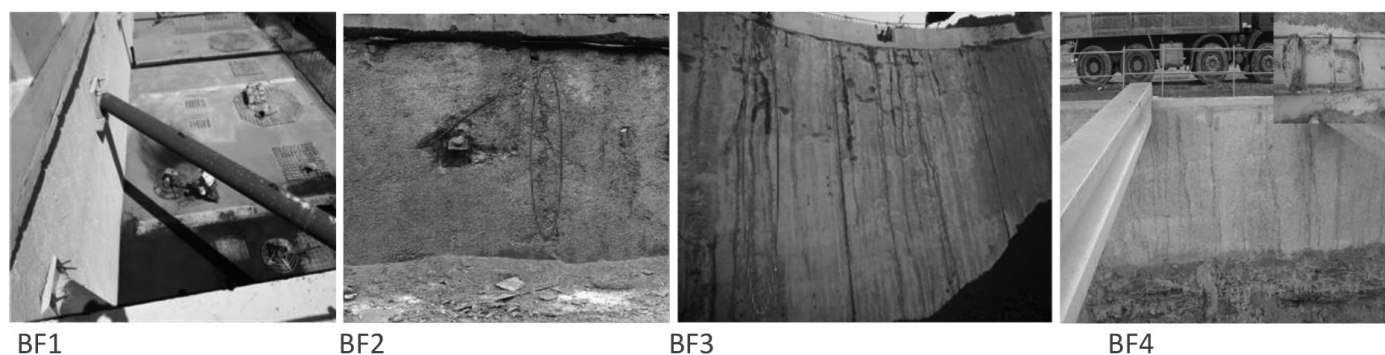


Figure 2. Etat des parois moulées des quatre chantiers après terrassement et rabotage

2.2. Formulations et propriétés des bétons

Le Tableau 3 présente les différentes compositions pour 1 m³ de béton. Le liant exprimé dans ce tableau correspond à l'addition du ciment et des additions (filler, cendres volantes, laitier).

2.3. Analyse des paramètres de formulation du béton

L'influence des paramètres de formulation sur les pathologies des parois moulées ainsi que l'interaction entre les différents paramètres ont été analysées. Le tableau 4 regroupe les résultats de cette analyse.

Une comparative de tous les paramètres pouvant influencer la stabilité des bétons a été menée. A partir des normes et d'une étude bibliographique sur les bétons, une analyse des paramètres a pu être effectuée :

- La composition des bétons des parois moulées est inspirée de celle des bétons pompables. Le fuseau ACI 304.2R définit un fuseau optimal pour ces bétons. Pour ces chantiers, tous les bétons sont à l'intérieur du fuseau et leurs courbes granulométriques présentent une continuité sauf pour le béton BF3.
- Jossierand [4] a étudié l'influence de la compacité optimale sur la stabilité des bétons. Il a montré que pour une compacité proche de 1, la quantité d'eau ressuée était minimale. Dans

Composition	BF1	BF2	BF3	BF4
Rc 28 (MPa)	52	51	60	46
Ciment (kg/m ³)	385	385	400	255
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
Plastifiant (L)	1.3	-	2	4
Superplastifiant (L)	0,68	3,32	-	2,89
PLASTIRETARD (L)	-	-	-	0,96
Eau efficace (L)	174	190	178	173
Eff/Liant équivalent	0,45	0,49	0,45	0,49
G/S	1,02	1,21	1,29	1,07
Etalement* (mm)	580 ± 40	640 ± 20	650 ± 30	610 ± 40
Température extérieure (°C)	15,4	28,8	29,1	28,3
Température du béton (°C)	14,8	26,7	27,5	27,8
Air occlus (%)	1,6 ± 0,6	1,8 ± 0,3	1,9 ± 0,4	2,1 ± 0,3

*Etalement à la table à choc

Tableau 3. Composition et caractéristiques des bétons

Composition	BF1	BF2	BF3	BF4
Pathologie	Néant	+	+++	++++
Courbe granulométrique	continuité	continuité	discontinuité	continuité
Compacité	0,76	0,70	0,74	0,73
Quantité de fines ≤ 0.125 mm (kg/m ³)	446	427	404	400
Type de ciment	CEM III	CEM II	CEM III	CEM II
Quantité Liant (kg/m ³)	385	385	400	356
Surface de Blaine ciment (cm ² /g)	4150	3650	4300	3850
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

Tableau 4. Récapitulatif des paramètres influençant les cheminées de remontées d'eau

notre cas, les quatre bétons ont une compacité qui varie de 0,70 à 0,76. BF1 ayant une compacité de 0,76 et pas de pathologie, nous pouvons en déduire que ce paramètre influence la stabilité des bétons étudiés.

- Tous les 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 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 lieu de 3800 cm²/g).

Bien que ces bétons soient conformes aux exigences des normes NF 1538/ EN et NF 206/CN, trois d'entre eux présentent des cheminées de remontée d'eau plus ou moins importantes. On peut supposer que ces désordres sont liés à un ressuage du béton. L'étude du ressuage a été réalisée en laboratoire afin de s'affranchir des aléas des chantiers.

3. ÉTUDE DU RESSUAGE DES BÉTONS DE FONDATION

En laboratoire, les mêmes compositions (Tableau 3) ont été confectionnées pour les quatre bétons. Tous les constituants des bétons utilisés en laboratoire sont identiques à ceux du chantier.

3.1. Caractérisation des bétons en laboratoire

Les résultats des essais de caractérisation des bétons à l'état frais sont donnés dans le Tableau 5.

Le béton BF2 présente une valeur d'étalement plus faible en laboratoire (560 mm) que sur le chantier (640 mm), mais dans l'ensemble, les quatre bétons reproduits en laboratoire, sont conformes aux bétons livrés sur les chantiers. Cet écart pour le béton BF2 peut être dû aux aléas des chantiers (ajout d'adjuvant ou d'eau...).

Essais	BF1	BF2	BF3	BF4
Etalement (mm)	570 ± 10	560 ± 10	640 ± 10	610 ± 10
Température extérieure (°C)	22,4	20,6	23,6	21,2
Température du béton (°C)	19,8	17,2	19,5	18,8
Air occlus (%)	1,3 ± 0,3	1,1 ± 0,4	1,4 ± 0,4	1,8 ± 0,2

Tableau 5. Récapitulatif des résultats de caractérisation des bétons frais en laboratoire

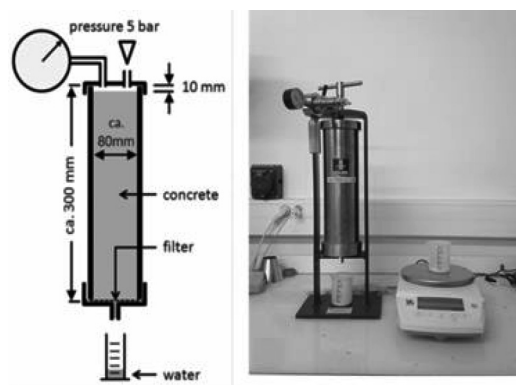


Figure 3. Principe ressuege forcé à l'aide d'un filtre presse BAUER

Bétons	Quantité d'eau ressuee (ml)	Degré de pathologies
BF1	11,8	néant
BF2	20,8	+
BF3	18,9	+++
BF4	19,4	++++

Tableau 6. Quantité d'eau ressuee à pour une pression de 5 bars à 5 minutes

3.2. Analyse du ressuege en laboratoire

Pour un béton instable, la pression exercée sur le béton au fond du panneau peut entraîner la migration de l'eau de gâchage vers la surface. Le béton subit un ressuege forcé. Ce ressuege est l'un des problèmes majeurs pour la stabilité des bétons frais. L'étude est réalisée à l'aide d'un filtre presse Bauer comme le stipule les recommandations australiennes [3]. L'appareil est constitué d'un cylindre normalisé (Figure 3) dans lequel a été introduit un filtre sur la base inférieure. Le béton est introduit dans le cylindre en deux couches successives. Chaque couche est piquée 12 fois pour désaérer le béton. Une pression de 5 bars (72.5 psi) 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 continue. La quantité d'eau ressuee est mesurée toutes les minutes pendant 45 minutes [3].

Les quantités d'eau ressuee à pour une pression de 5 bars à 5 minutes sont données dans le tableau 6 pour les 4 bétons.

Le béton BF1 qui est le béton de référence présente un ressuege moins important (11,8 ml à 5 minutes). Les trois autres bétons ont une quantité d'eau ressuee à 5 minutes proches du seuil recommandé (Recommended Practice, Tremie Concrete for Deep Foundations) qui est de 24,4 ml. Il n'est pas possible de conclure que les degrés de pathologies sont uniquement dus à la quantité d'eau ressuee. En effet, c'est les parois moullées du béton BF2 qui présente moins de désordres (+), or la quantité d'eau ressuee est de 20,8 ml. Or pour le BF4, le béton qui a présenté le plus de désordre sur le chantier (++++), la quantité d'eau ressuee est de 19,4 ml. Une étude complémentaire est nécessaire pour établir une corrélation entre le degré de pathologie des parois moullées et les paramètres de formulation du béton. Néanmoins, on peut observer dans le Tableau 6 que pour les bétons BF3 et BF4, plus on s'éloigne de la valeur seuil, moins on a des cheminées de remontée d'eau. C'est pourquoi, une solution est d'abaisser la valeur du seuil admissible de la quantité d'eau ressuee à 15 ml par m³ de béton pour une paroi moullée d'une hauteur supérieure à 15 mètres (soit 24,4 ml à l'essai filtre presse Bauer).

4. INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FORMULATION SUR LE PHÉNOMÈNE DE RESSUEGE

De nombreux facteurs peuvent influencer le ressuege des bétons tant au niveau de la formulation que des conditions de mise en œuvre et environnementales. Azzi et al. [5] a étudié l'effet des paramètres prépondérant de formulation tels que la quantité de particules fines, la granulométrie du mélange granulaire, la compacité, le type de ciment et l'utilisation d'un retardateur de prise. Cette étude a été menée à partir de la formulation du béton BF4 qui correspond au chantier qui a présenté les pathologies les plus sévères. Le sable de ce béton a été substitué à celui de la formule du béton BF1. L'abréviation suivante a été adoptée pour le béton substitué BF4SS.

4.1. Caractérisation du béton BF4SS

880 kg de sable et de sablon de nature roulé et siliceuse ont été substitués par 880 kg de sable de la formulation BF1 de nature concassé et calcaire. Les formulations des bétons étudiés répondent aux exigences des normes NF EN 1538 et NF EN 206/CN. Le Tableau 7 présente les différentes compositions pour 1 m³ de béton. Seuls les paramètres de formulation modifiés sont donnés.

Composition	BF1	BF4	BF4SS
Sable 0/1 (kg/m ³)	-	220	-
Sable 0/4 (kg/m ³)	820	660	880
G/S	1,02	1,07	1,07

Tableau 7. Paramètres de formulation modifiés pour BF4SS

Bétons	Quantité de fines (kg/m ³)	Surfaces spécifiques (m ² /kg)	Compacité des mélanges
BF1	446	4014,2	0,76
BF4	400	3620,1	0,73
BF4SS	422	4313,9	0,75

Tableau 8. Quantité de fines des bétons, surfaces spécifiques et compacité des mélanges

Essais	BF1	BF4	BF4SS
Slump (mm)	210	220	220
Table à Chocs (mm)	580	610	600
J-ring BJ (mm)	65	51	60
Essai au Tamis (%)	0,71	4,65	2,65
Air occlus (%)	1,2	1,8	1,7

Tableau 9. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais des différents bétons

Le mélange granulaire des 3 bétons est représenté Figure 4. Les courbes sont continues. Un enrichissement de grains de dimension inférieure à 600 μm pour la formule BF4SS est observé.

L'augmentation de la teneur en fines du mélange impacte directement la surface spécifique des grains ainsi que la compacité du squelette granulaire. Cette correction en fines du

sable permet de réduire la perméabilité du mélange. En tenant compte de la quantité d'éléments fins apportés par le ciment et les additions, le Tableau 8 résume la quantité totale de fines inférieures à 125 μm selon les mélanges et les surfaces spécifiques calculées. La formulation BF4SS a une surface spécifique supérieure à celle de la formulation BF1 et nettement plus élevée que la formule de base BF4.

Cette augmentation très significative va avoir pour conséquence une mobilisation plus importante de l'eau par les granulats. Cet effet va contribuer à la stabilité du mélange. La compacité granulaire pour le béton BF4SS a une augmentation significative. Les propriétés des bétons sont donnés Tableau 9.

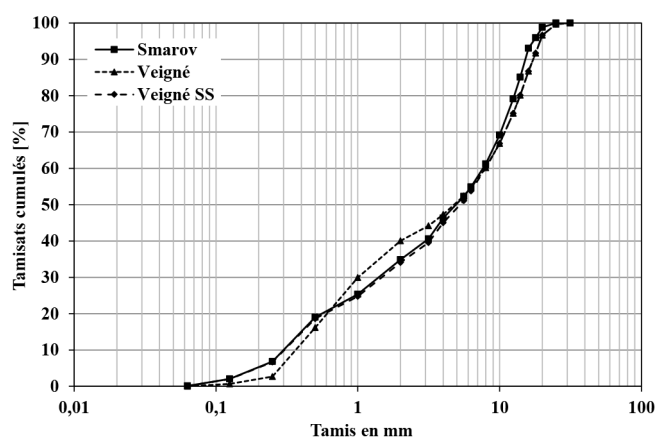


Figure 4. Mélanges granulaires des bétons

Bétons	Quantité d'eau ressuée (ml)
BF1	11,8
BF4	19,4
BF4SS	13,0

Tableau 10. Quantité d'eau ressuée à 5 minutes à 5 bars pour les 3 formulations

4.2. Analyse du ressuage en laboratoire

Les essais de ressuage statique ont été réalisés selon la norme ASTM C232. L'évolution de la quantité d'eau ressuée sur une période de 45 minutes est identique pour les 3 formules. La compacité granulaire et l'augmentation du pourcentage de fines contribuent à une meilleure stabilité du béton sous pression. Les valeurs obtenues à 5 minutes sont données Tableau 10. Ces résultats montrent l'importance du choix du sable pour la formulation d'un béton de paroi moulée. Au-delà de la nature du sable, plusieurs critères sont apparus comme étant source d'une réduction significative du ressuage :

- Une compacité granulaire supérieure à 0,75,
- Une surface spécifique des granulats supérieure à 4000 m²/kg
- Une quantité totale de fines (diamètres des grains inférieurs à 125 μm) supérieure à 420 kg/m³.

Ces valeurs seuils peuvent constituer une première proposition au niveau des recommandations en vue de limiter les risques d'apparition de cheminées de remontées d'eau.



Figure 5. Paroi moulée de la station de métro

5. APPLICATION DE L'ÉTUDE AU PROLONGEMENT DE LA LIGNE 14 (GRAND PARIS)

Les prolongements de la ligne 14 du métro (Saint-Lazare-Olympiades) doivent relier le centre de Paris, le pôle d'affaires de Saint-DenisPleyel, au nord et l'aéroport d'Orly, au sud. Ces prolongements seront réalisés en conservant les caractéristiques actuelles de la ligne rapide et performante avec une vitesse de 45 km/h en moyenne contre 25km/h pour un métro classique. Ce prolongement de 14 km est intégralement en

souterrain (Figure 5). Le chantier concerné par cette étude est une station de métro (Clichy Saint Ouen), sous le RER C. Du fait de la présence d'une nappe perchée au sein des marnes, un radier profond et des bâtiments d'une grande hauteur (R+7) adjacents, le type de soutènement retenu est une paroi moulée. Cette solution permet, d'une part de réaliser un ouvrage étanche grâce à son ancrage dans les marnes et caillasses et d'autre part, de servir de mur périphérique à la structure finale de l'ouvrage. La station est composée de 3 étages. La surface de la paroi moulée réalisée est de 13100 m². Les travaux de paroi moulée ont été réalisés de juin 2015 à janvier 2016 par Botte Fondations. Les parois moulées ont une hauteur de 42 et

Composition	Ligne 14	Ligne 14
	Avant modification	Après modification
Ciment (kg/m ³)	340	340
Classe ciment	CEMIII/A 52,5N LH PMES CP1	CEMIII/A 52,5N LH PMES CP1
Type de ciment	CEM III	CEM III
Classe d'exposition	XA1	XA1
Rc 28	C35/45	C35/45
Cendres volantes (kg/m ³)	20	50
Sable 0/4 (kg/m ³)	850	850
Gravillon 4/12 (kg/m ³)	300	300
Gravillon 4/20 (kg/m ³)	640	640
Techno 90 (L)	3,71	3,71
CIMAXTARD (L)	0,98	0,98
Eau efficace (L)	170	170
E/C	0,50	0,50
Maintien de l'ouvrabilité (min)	480	480

Tableau 11. Composition du béton

Paramètres	Ligne 14	
	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
Quantité d'eau ressuée (mL)	-	12,3

Tableau 12. La formulation avant et après modification

44 m et une épaisseur de 1m. La largeur des panneaux varie de 3,07 m à 7,78 m ce qui donne des volumes de 132 à 334 m³. La distance entre la centrale à béton et le chantier est d'environ 11 km. Le temps de transport est estimé à 25 minutes environ. Afin de s'adapter aux contraintes du chantier ainsi qu'à la taille des panneaux, les panneaux de 3,07 m ont une cage d'armatures et les panneaux de hauteur supérieure à 7,78 m ont deux cages d'armatures.

La formulation de base proposée par le bétonnier a été modifiée en prenant en compte les résultats de l'étude précédente :

- Une compacité granulaire supérieure à 0,75 avec une distribution granulaire continue.
- Une quantité totale de fines (diamètre des grains inférieurs à 125 μm) supérieure à 420 kg/m³.
- Pour l'essai filtre Bauer : 16,5 ml à 5 minutes comme valeur admissible.
- Pour l'essai ASTM 232 : 4% comme amplitude finale.

La quantité des fines des mélanges a été modifiée pour que cette dernière soit plus élevée. La formulation avant et après modification est donnée dans le Tableau 11. Le béton a été formulé afin de répondre aux exigences du chantier (classe d'exposition, volume des panneaux de la paroi moulée avec pour effet un maintien de la consistance pendant la durée du bétonnage...). Les matériaux utilisés pour la confection de ce béton sont conformes aux normes NF 1538 et NF 206/CN. La formulation initialement proposée par le bétonnier a été modifiée en augmentant le dosage des cendres volantes afin d'assurer la quantité limite 400 kg/m³. Pour mieux cerner les

effets des différents paramètres étudiés nous avons pris des valeurs proches de celles de la formule de référence (BF1) (Tableau 11).

Le Tableau 12 donne les paramètres de formulation modifiés ainsi que la quantité d'eau ressuée pour une pression de 5 bars à 5 minutes. La quantité d'eau ressuée est proche mais surtout inférieure à la valeur seuil proposée de 16.5 ml. Bien que le béton coulé ait été formulé en prenant en compte les recommandations proposées, la paroi moulée de ce chantier présente des cheminées de remontées d'eau.

Afin de comprendre la présence de ces défauts, une étude complémentaire a été effectuée. La présence du retardateur de prise CIMASTARD 101 qui a été également utilisé dans la formule du béton BF4 pourrait être la cause de ces défauts. En effet, les paramètres influençant les cheminées de remontée d'eau sont conformes aux recommandations émises. La surface spécifique des granulats est supérieure ou très proche de la formule de référence BF1 (Tableau 13).

La quantité de fines du béton est conforme aux exigences des normes NF 1538 et NF 206/CN (comprise entre 400 kg/m³ et 550 kg/m³). Elle est de l'ordre de grandeur de la formule BF1. La quantité et le type du ciment utilisé pour chaque formule est conforme aux normes NF 1538 et NF 206/CN. La valeur des surfaces Blaine des ciments est différente mais répond aux préconisations de la norme NF 1538 (supérieure à 3800 cm²/g). De plus, la quantité de liant est conforme aux exigences de la norme NF 206/CN pour la classe d'exposition donnée. Le volume de pâte des bétons varie de 313 à 350 l/m³

Paramètres	Ligne 14	Béton de référence BF1
Compacité	0,76	0,76
G/S	1,08	1,02
Surface spécifique des granulats (m ² /kg)	6168	4014
Quantité de fines $\leq 125 \mu\text{m}$ (kg/m ³)	485	446
Quantité Liant (kg/m ³)	340	385
Surface de Blaine ciment (cm ² /g)	4050	4150
Volume de pâte (L/m ³)	340	330

Tableau 13. Récapitulatif des paramètres de formulation

Essais	Ligne 14	Béton de référence BF1
Slump (mm)	220	210
J-ring BJ (mm)	43,5	65
Table à chocs (mm)	640	580
Essai au tamis (%)	1,85	0,1
Air occlus (%)	1,7	1,2

Tableau 14. Caractérisation à l'état frais du béton de la ligne 14

ce qui est compris dans l'intervalle de 300 L/m³ et 350 L/m³ fixé comme limites pour un béton de paroi moulée. Les essais de caractérisation réalisés sur chantier sont les mêmes que ceux retenus pour la campagne expérimentale exécutée en laboratoire. Le Tableau 14 présente les résultats de ces essais.

L'affaissement au cône d'Abrams donne une classe de consistance S4 (béton très plastique). La valeur de BJ obtenue est de l'ordre de grandeur des bétons de paroi moulée. Le critère d'étalement à la table à choc (compris entre 550 mm et 650 mm) est respecté. Aucune auréole de laitance n'a été observée à la périphérie des galettes de bétons ce qui est un signe de stabilité des mélanges. L'essai au tamis conforte cette observation avec un pourcentage inférieur à la valeur limite préconisée de 15%. Concernant le pourcentage d'air occlus, ce dernier est inférieur à la valeur spécifiée de 4 %.

Les essais de ressuage statique selon la norme ASTM C232 ont été réalisés dans des locaux sur chantier éloignés de toutes vibrations ou autres aléas. Comme pour BF1, une période de 30 minutes sans ressuage a été constatée. Une vitesse de ressuage de 0.54 à 0.64 g/min est observée à 70 minutes après le début du ressuage. Puis, la vitesse de ressuage diminue (0.02 g/min) au bout de 340 minutes. Ce béton comparé aux bétons de l'étude, montre une forte sensibilité au ressuage. Ce phénomène qui avait été observé pour le béton BF4 [5] est lié à la présence du retardateur de prise qui prolonge la période dormante du béton. Des essais de calorimètre isotherme couplé à un conductimètre/résistimètre type CDM210 ont été effectués afin d'établir le temps de début de prise de ce béton. La Figure 6 présente la variation de la conductivité électrique du béton en fonction du temps pour une température de 20 °C.

La courbe a une allure ainsi qu'une valeur de la conductivité (4,8 mS/cm) proches des bétons de l'étude. La conductivité augmente dans un premier temps pour décroître brutalement. Le sommet de la courbe correspond au début de prise « pic ». Le temps de début de prise est de 21h30. L'amplitude de ressuage de 4% peut être dépassée en poursuivant l'essai sur une période plus longue.

Les essais de ressuage à l'aide du filtre Bauer indique une quantité d'eau ressuée de 12,3 ml à 5 bars. La présence du retardateur de prise ne différencie pas le béton de la ligne 14 des bétons de l'étude. De plus, cette valeur est inférieure au

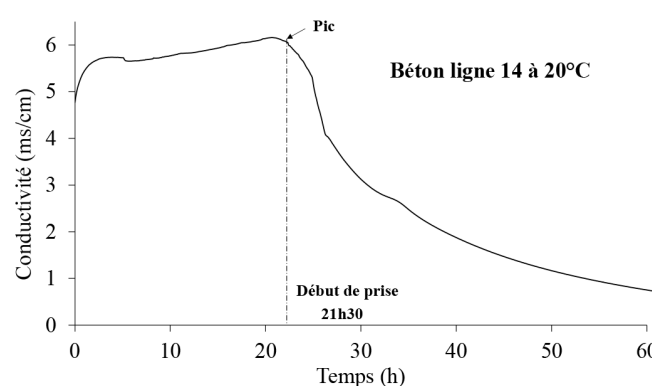


Figure 6. Variation de la conductivité en fonction du temps

seuil préconisé de 16,5 ml. Ce résultat montre la nécessité de modifier l'essai de ressuage au filtre presse Bauer.

6. CONCLUSION

Les quatre bétons caractérisés en laboratoire et sur chantier répondent aux exigences de la norme française NF EN 1538, de la norme européenne NF EN 206/CN ainsi que des recommandations australiennes pour fondations profondes (Recommended Practice Tremie Concrete for Deep Foundations). Malgré ces dispositions, cette étude montre que des cheminées de remontée d'eau occasionnant de sérieuses dégradations du parement peuvent exister. 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. Ce phénomène peut apparaître pour une faible quantité d'eau ressuée pour des temps de prise très long. Toutefois, pour des bétons sans retardateur de prise, la valeur seuil de 15 L d'eau ressuée par m³ de béton pour une profondeur de paroi supérieure à 15 mètres (soit 24,4 ml à l'essai filtre presse Bauer) doit être abaissée à 10 L par m³ de béton (16,5 ml). Cette recommandation est actuellement suivie par l'ensemble des entreprises oeuvrant dans ce secteur d'activités.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 206-CN des bétons, décembre 2014
- [2] NF-1538 VERSION 2010- Exécution des travaux géotechniques spéciaux – Parois moulées
- [3] Recommended Practice, 'Tremie Concrete for deep foundations', Recommendation, Concrete Institute of Australia, 2012, pp. 30-33.
- [4] Jossierand L., 'Ressuage des bétons hydrauliques', Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [5] Azzi A., Djelal C., Vanhove Y., Kada H., Madec O., 'Relationship between mix designs and bleeding for SF-SCC applied to diaphragm walls' International Concrete Sustainability Conference, SCC-2016, 15-18 may 2016, Washington, United States, pp. 1129-1139.