

DURABILITÉ DES BÉTONS DES APPUIS DU VIADUC DE MILLAU

Michel GUÉRINET

Eiffage Construction

1. OBJET

Le contrat de la concession du viaduc de MILLAU précise que l'ouvrage doit être réalisé avec un objectif de durabilité de 120 ans. Le tablier étant entièrement métallique, seuls les appuis sont concernés par cette exigence pour la partie béton de structure.

La durabilité d'un ouvrage peut-être, ici, traduite par son aptitude à résister dans le temps aux différentes agressions ou sollicitations (physiques, chimiques ou mécaniques). Il est nécessaire, dans une telle approche qui ne peut être que globale, de prendre en compte à la fois les aspects matériaux et structures, et ceci de façon multi-échelle et pluridisciplinaire.

A travers cette exigence de durabilité, s'exprime la demande de garantie d'un coût d'entretien limité bien qu'indispensable et permettant d'éviter ou de réduire notablement les interventions pour réparations délicates.

Cette présentation se situe dans le cadre initial du démarrage du chantier de MILLAU, époque où la version française de la norme NF EN 206-1 n'était pas disponible au démarrage du projet et où le document AFGC « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction » n'était pas encore publié.

2. QUELQUES REMARQUES PRÉALABLES

La nouvelle norme européenne EN 206 est établie sur la base d'une durée de vie de 50 ans (note 3 du paragraphe 5.3.2). Elle ne peut donc ici fournir qu'une base de prescription minimum et qui doit être complétée par des retours d'expériences récentes acquises sur des ouvrages soumis à des contraintes d'objectif de durabilité similaires (cas du pont Vasco de Gama à Lisbonne par exemple). Ces expériences étant à interpréter en fonction des critères d'environnement propres à l'ouvrage et des nouvelles connaissances acquises depuis leur réalisation en matière de béton.

La formulation des bétons de MILLAU a fait l'objet de nombreuses et importantes études au LCPC pendant une dizaine d'années. Mais le projet réalisé étant constitué d'un tablier métallique, certains critères retenus dans ces études sont aujourd'hui surabondants. C'est le cas de la résistance, pour laquelle un B60 est actuellement suffisant pour la justification des piles. Le BHP de MILLAU est donc plus un béton à hautes performances en matière de durabilité qu'un béton à haute résistance mécanique, même si ce paramètre est d'un niveau élevé.

3. LE CHOIX DES MATÉRIAUX

Les matériaux seront identiques pour toutes les formules de béton afin d'en assurer la meilleure maîtrise de production (simplification), de stockage et d'éviter les risques de mélanges accidentels. Ces matériaux seront ceux pris en compte dans les études approfondies réalisées en amont par le LCPC, afin de bénéficier au mieux des acquis disponibles.

Le choix de matériaux bénéficiant de la marque NF sera privilégié, car cette marque apporte, pour de telles réalisations, un niveau de garantie de qualité certaine. De plus des spécifications complémentaires sont disponibles, pour les liants hydrauliques en particulier, qui sont très utiles pour répondre à certains des objectifs fixés.

3.1. Le ciment

Le ciment retenu est le CEM I 52.5 N CE PM ES CP2 NF du Teil. Ce ciment faisait parti des ciments étudiés par le LCPC dans ses études initiales. Il présente un faible taux d'alcalin ce qui est un atout important, même vis-à-vis de granulats réputés exempts de tout risque de réactivité.

Le choix d'un ciment à base uniquement de clinker répond aux recommandations établies pour les piles de grande hauteur dans le cadre de BHP 2000 « Valorisation des bétons à hautes performances dans les piles et pylônes de grande hauteur des ouvrages d'art » qui indique que « les ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau offrent des parements clairs, mais ce liant produit peu de portlandite (chaux) par rapport à un ciment Portland, ce qui conduit à une moins bonne passivation des aciers (progression plus rapide de la carbonatation), donc à une diminution de la durabilité ».

Le choix d'un ciment PM et ES, présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) permet de conférer au béton une résistance accrue à l'agression des ions sulfates en présence d'ions chlorures, au cours de la prise et ultérieurement. Ce choix apporte une garantie supplémentaire et un avantage vis-à-vis de la protection contre les réactions sulfatiques (nous y reviendrons par la suite).

Enfin, le caractère CP2 permet de disposer de faibles chaleurs d'hydratation initiales (197 J/g à 12 heures) résultant des anciennes spécifications CP2 pour lesquelles le fournisseur maintient le niveau d'exigence et garantit une teneur en soufre limitée permettant l'utilisation de précontrainte si nécessaire (ce qui s'est avéré être le cas au niveau des changements de section pour compenser la réduction de poids du tablier passé en métal).

Par ailleurs, la résistance visée a pu être obtenue en réduisant le dosage en ciment de 450 kg/m^3 (prévus à l'étude initiale du LCPC) à 420 kg/m^3 ce qui est favorable vis-à-vis de l'exothermie et du taux en alcalins. Le ciment utilisé fait l'objet d'un stockage et d'un suivi spécifique à l'usine du Teil. Enfin la température du ciment a été limitée à 70°C maximum au chargement des camions en cimenterie.

3.2. Les granulats

Les granulats retenus sont principalement les calcaires de la carrière de Rascalat qui avaient déjà été sélectionnés par le LCPC dans les études citées précédemment pour leur proximité et leur qualité, en particulier vis-à-vis de la protection contre les risques de réactions du type alcali-silice. Ces granulats sont, en effet, classifiés NR.

Un complément de sable provenant du gisement de Meric est utilisé à titre de correcteur de forme. Ces sables sont également classifiés NR.

L'ensemble des granulats utilisés appartient à la catégorie A suivant le classement de la norme en vigueur (XP P 18-540, chapitre 10). Le traitement particulièrement élaboré des sables à la carrière du Rascalat (séparation en plusieurs sous-classes et recombinaison à la demande) donne une très bonne assurance de la maîtrise du module de finesse des sables.

La gestion de l'approvisionnement en granulats s'inscrit dans le cadre d'un Plan d'Assurance Qualité qui apporte toute garantie de respect des spécifications imposées.

Enfin, le D_{max} des granulats a été limité à 14 millimètres pour éviter des coefficients de forme pénalisants pour la qualité des bétons.

3.3. Les adjuvants

Tous les adjuvants sont normalisés et agréés NF. Le dosage en adjuvants (Optima 175 de la société Chryso) pour le béton haute performance des piles est de 1,4% du poids du ciment. Ce dosage correspond

à 0,4% d'extrait sec en moyenne par rapport au poids du ciment. Il a pu être réduit par rapport à celui retenu dans le cadre de l'étude réalisée par le LCPC en 1995 (de 0,6% à 1,1%) grâce aux progrès réalisés depuis cette époque dans le domaine des adjuvants.

3.4. L'eau d'ajout

L'eau provient du réseau d'eau potable et ne présente aucun risque pour le béton. Le rapport eau efficace sur ciment a été limité à des valeurs très faibles (mais reproductible en production industrielle et permettant de couvrir la plage importante des dérivées imposée par le fascicule 65A sur les variations d'eau) sur la formule nominale des B60 ($E_{\text{eff}} / \text{Ciment} = 0,335$). Cela permet de tendre vers une porosité la plus fermée possible, vecteur principal de la durabilité vis-à-vis des agents agressifs extérieurs.

3.5. Additions

L'étude du LCPC avait été établie en utilisant des fumées de silice pour améliorer la résistance des BHP des piles. Cependant, ce critère étant beaucoup moins exigeant, l'entreprise a décidé de ne pas les utiliser dans les bétons de façon à améliorer l'aspect de ceux-ci tout en répondant aux spécifications de durabilité exigées.

3.6. Les formules de béton utilisées

Les formules de béton figurent sous forme d'un tableau en annexe.

4. LES DIFFÉRENTES APPROCHES DE LA DURABILITÉ

En dehors des domaines classiques de durabilité (gel, sels de déverglaçage et réactions chimiques différées), la protection des armatures a été un souci particulier sur ce viaduc. Pour ce type de protection, il a été adopté une approche voisine de celle retenue pour le pont sur le Tage, bien que le degré d'agressivité de l'environnement soit largement plus favorable (absence d'exposition marine et de zones de marnage). Par ailleurs, nous avons pris en considération à la fois les spécifications du fascicule 65A imposées par le marché et celles de la future norme EN 206-1 déjà d'application actuelle en France.

4.1. Gel et sels de déverglaçage

Bien que le site soit classé en région de classe d'environnement 2b1 au sens de la norme XP P 18-305 prise en référence dans le fascicule 65A du CCTG, l'ouvrage a volontairement été surclassé en environnement 2b2 par le concessionnaire pour les parties hors sol. Un tel niveau de protection est exceptionnel comparé à d'autres ouvrages voisins de l'A75. Le niveau de gel pris en compte est ainsi porté à plus de 10 jours par an, atteignant une température inférieure à -10°C pour des surfaces pratiquement verticales à humidité modérée au sens des classes d'exposition XF de la norme EN-206.

4.1.1. Piles

Les contraintes correspondantes prises en compte pour les parties hors sol sont celles du guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » auxquelles renvoie le fascicule 65A. Elles correspondent au chapitre BHP et la justification des bétons est de type performantiel. Comme le préconise ce document, les normes de référence pour la justification de la tenue au gel sont les normes NF P 18-424 ou 425 et les critères à respecter sont ceux des recommandations spécifiques. Ainsi la tenue au gel est assurée sans recourir à un entraîneur d'air qui aurait conduit à des difficultés rhéologiques difficiles sinon impossibles à résoudre et à une importante fluctuation de la résistance du béton peu souhaitable pour un tel ouvrage pour lequel il valait mieux cibler une résistance élevée mais relativement constante.

Au sens de la norme européenne EN 206-1, la classe d'exposition à prendre en compte est la classe d'exposition XF1, « saturation modérée en eau sans agents de déverglaçage, surfaces verticales exposées à la pluie et au gel ». Les critères pris en compte pour formuler le béton vont bien au-delà des futures spécifications correspondantes du document d'application nationale en cours de finalisation en ce qui concerne cette classe.

4.1.2. Culées

Les culées sont les seules structures porteuses à être exposées aux projections de sels de déverglaçage. Pour les parties concernées, il a été prévu un béton de type « G+S » apte à répondre à ce type d'agression en utilisant les règles dites « GRA » avec entraîneur d'air. Ce type de formulation a prouvé ses capacités à résister à un environnement aussi agressif. Ces bétons doivent faire l'objet d'un entretien particulièrement suivi lors de salages en hiver pour assurer leur durabilité (à noter que le choix des produits de déverglaçage sera conduit en intégrant les exigences de durabilité du métal et des bétons). Cependant, les travaux d'entretien de ces parties d'ouvrage ne présentent pas de difficultés majeures (contrairement aux piles très élevées).

4.2. Protection contre l'alcali-réaction

La protection vis-à-vis de ce type d'agression a été recherchée au niveau de la non-réactivité des composants granulaires à ce type de réaction (granulats NR) d'une part, et d'autre part dans un bilan particulièrement faible des alcalins en provenance des différents composants du béton (bilan des alcalins inférieur à $1,4 \text{ kg/m}^3$). Ces précautions amont donnent toutes garanties de protection vis-à-vis de ce type d'agression en milieu d'humidité basse à moyenne sur la base des connaissances actuelles en la matière. Elles répondent entièrement aux conditions de prévention de ce type de désordre au sens des règles édictées par le LCPC pour les niveaux de prévention les plus élevés et en ouvrage de classe exceptionnelle (Niveau C).

4.3. Protection contre les réactions sulfatiques internes différées

Les références les plus récentes en la matière sont tirées de la thèse de Loïc Divet soutenue au LCPC en décembre 2001. D'après les résultats de ce travail, il apparaît qu'il faut la conjonction de plusieurs facteurs (parmi les cinq ou six mis en évidence) pour conduire à un risque de formation d'ettringite différée. Ces facteurs sont les suivants:

1. La température ;
2. Les alcalins ;
3. La teneur en SO_3 ;
4. La teneur en C_3A ;
5. La nature des granulats ;
6. Des conditions d'humidité élevées.

Le point 2 a été traité dans le cadre de l'alcali-réaction, la teneur en alcalins est très faible. Les points 3 et 4 sont réglés grâce au recours à des ciments PM et ES (voir paragraphe 3.1. ci-dessus). Les granulats sont principalement des granulats calcaires ce qui constitue la meilleure protection vis-à-vis de la réaction sulfatique différée (point 5). Enfin, la nature même des ouvrages concernés les met à l'abri d'une humidité élevée pour les parties hors sol (point 6).

Reste le point 1 qui, isolé, ne constitue pas un élément de risque à lui seul pour ce type d'agression. Cependant, l'exothermie a été limitée grâce au choix d'un liant à faible dégagement de température initiale et à la réduction du dosage de ce liant (voir précédemment). L'objectif recherché consistait à ne pas dépasser les spécifications du fascicule 65A en la matière, spécifications limitées au cas du traitement thermique du béton mais qui a été étendue au cas de cet ouvrage. La limite imposée est alors de 80°C (article 43.3 de l'additif au fascicule 65A) avec une plage de variation de $+5^\circ\text{C}$.

Les études thermiques (mesures en place et simulation Cesar à l'aide du module TEXO) montrent que l'exothermie maximale des piles conduit à une élévation de température inférieure à 55°C à cœur qui, cumulée dans le pire des cas avec un béton à 25°C (valeur maximale pouvant être atteinte) conduit au respect de la valeur de base de 80°C . Pour les B35, l'utilisation de fumée de silice permet de réduire le dosage en ciment à 300 kg/m^3 et de limiter la variation de température à 35°C , ce qui conduit avec un béton à 25°C à une température maximale de 60°C qui est le niveau requis pour éviter le risque de réaction sulfatique dans un milieu où il peut y avoir circulation d'eau.

Ainsi la conjonction d'éléments pouvant favoriser le phénomène de réaction sulfatique différée est évitée et le risque est donc maîtrisé dans l'état actuel de nos connaissances.

4.4. Risque de corrosion des armatures

Les garanties de durabilité demandées à MILLAU concernent les structures en béton armé et précontraint. Un facteur important de durabilité est alors l'aptitude à se protéger de la corrosion.

Une première source de corrosion est liée à la migration des ions chlorures qui peuvent conduire à des attaques localisées des armatures. Une autre source de corrosion peut être due à la dépassement des aciers par la carbonatation du béton d'enrobage. Pour ces types d'agression, nous avons repris la démarche suivie au pont Vasco de Gama sur le Tage à Lisbonne et mise au point en collaboration avec Hugues Hornain du LERM.

- Définition de la catégorie d'ouvrage :
Pont exceptionnel (ouvrage de prestige).
- Définition de l'environnement de l'ouvrage et des niveaux d'agressivité :
Environnement a priori non agressif vis-à-vis des ions chlorures. Classement XD1 suivant la norme EN 206-1.
Prise en compte du niveau XD3 à titre de sécurité (alternance d'humidité et de séchage pour éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures).
- Risque :
Corrosion des aciers.
Durée de vie fixée comme objectif de réflexion de 120 ans:
Classe de chlorure Cl 0,40 (BA) ou Cl 0,20 (BP) suivant la norme EN 206-1.
- Choix d'indicateurs de durabilité :
Perméabilité à l'oxygène mesurée suivant le mode opératoire AFPC-AFREM ;
Diffusivité des ions chlore mesurée en régime transitoire par l'essai TANG-LUPING ;
Mesure de la porosité totale accessible à l'eau;
Profondeur de carbonatation.
- Définition de seuils pour les indicateurs de durabilité. Ces seuils sont calés pour 90 jours ou plus.

Pour les fûts des piles :

10^{-17} m^2 pour la perméabilité à l'oxygène à 90 jours. Valeur mesurée 2×10^{-18} à 7 jours ;
De l'ordre de $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le coefficient de diffusion des ions chlore à 90 jours. Valeur mesurée de 5×10^{-12} à 28 jours ;
Porosité totale accessible à l'eau inférieure à des valeurs de 11 à 13%. Valeur mesurée 10,8% à 28 jours.

- Contrôle de la formulation des bétons en fonction des critères retenus :

Pour les fûts des piles :

Dosage en ciment : 420 kg/m^3 supérieur à 350 kg/m^3 de la classe XD3 de la norme NF EN 206-1 (tableau N.A.F. 1) ;
Classe de résistance : Supérieure à B60 pour un niveau imposé égal à C35/45 en classe XD3 de la norme NF EN 206-1 (tableau N.A.F. 1) ;
Rapport $E_{\text{eff}}/\text{Liant}_{\text{equ}}$: 0.335 nominal pour 0,45 maximum correspondant à la classe XD3 de la norme NF EN 206-1 (tableau N.A.F. 1).

Rappelons que l'enrobage des armatures a été majoré par rapport aux règlements en vigueur pour être porté à 4 centimètres pour les piles et culées. Cet enrobage est de 5 centimètres pour les semelles. Il n'y a plus alors de risques de dépassement des aciers liés à la carbonatation du béton d'enrobage. En effet, les résultats de PARROTT (1987) montrent que pour des ouvrages âgés de 30 ans, l'épaisseur carbonatée peut être évaluée à l'aide de la formule suivante :

$$e \text{ (en mm)} = 125 * \exp(-0.05 * f_{c28}) \text{ soit ici (avec } f_{c28} = 60 \text{ MPa) } e = 6,3 \text{ millimètres.}$$

L'augmentation de l'épaisseur carbonatée suivant une loi en racine du temps, la carbonatation des bétons des fûts des piles ne dépassera pas 15 mm en 120 ans ce qui est très inférieur aux 40 mm d'enrobage prévus. En ce qui concerne les semelles en B35, bien que moins exposées au CO₂ de l'air, le même calcul conduit à une épaisseur carbonatée de 44 millimètres en 120 ans, épaisseur inférieure aux 50 mm d'enrobage prévus.

5. DISPOSITIONS RETENUES POUR LA FABRICATION DES BÉTONS

Les dispositions principales adoptées au niveau production pour garantir la qualité et la constance des qualités du béton sont les suivantes :

- Mise en place d'un plan d'assurance qualité couvrant à la fois la fourniture des matériaux, leur conservation et la production du béton. Procédure de certification de conformité des centrales à béton au règlement de la marque NF BPE ;
- Choix d'un fournisseur de béton (SATM) disposant de références probantes sur des ouvrages en béton de classe similaire (viaduc de Tulle par exemple). Montage de deux centrales à proximité immédiate du viaduc (de niveau 3 au sens de l'ancien fascicule 65A) consacrées exclusivement aux besoins du chantier et assurant le rôle de secours l'une vis-à-vis de l'autre. Mise en place d'un laboratoire sur le site (disposant de la certification ISO 9002 et de l'accréditation COFRAC pour le laboratoire central) assurant le suivi de la production et des matériaux sous l'autorité de l'entreprise réalisant les travaux ;
- Temps de malaxage majoré par rapport aux exigences minimales de la norme (150 secondes minimum pour les bétons des fûts de pile) pour être certain de l'homogénéité du mélange en ce qui concerne les B60 en particulier ;
- Transport interne au chantier permettant une sélection des camions toupies garantissant un état de marche adapté ;
- Faible temps de transport assurant une rhéologie stable à la mise en place compte tenu des DPU (durées pratiques d'utilisation) prévues et contrôlées à l'étude ;
- Possibilité de réchauffer l'eau en période froide pour viser à une température du béton la plus constante possible à la mise en œuvre sur le chantier ;
- Disposition d'humidification par « brumisation » des stocks de granulats pour refroidissement en période chaude de façon à conserver une fourchette de température limitée à la mise en œuvre.

6. DISPOSITIONS RETENUES POUR LA MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS

Outre un choix particulièrement réfléchi au niveau de l'outil coffrant ainsi que des produits de démoulage associés, une réflexion approfondie a été menée par le chantier en ce qui concerne les méthodes de mise en place du béton et de sa vibration correcte. Les solutions retenues ont été testées en vraie grandeur sur un élément témoin représentatif du coulage de la partie la plus massive des piles et les résultats ont montré que les choix retenus étaient les bons.

La maturométrie a été retenue comme outil de décision pour le décoffrage du béton garantissant un âge équivalent sensiblement constant au moment du démoulage. Si ce paramètre est fondamental au niveau de l'aspect du béton particulièrement délicat à MILLAU, il est aussi très important au niveau de la cure. Pour les piles de cet ouvrage, il est prévu de reprendre la méthode mise au point à Tulle et qui consiste à équiper les deux niveaux de coffrage en retombée d'une « jupe » en géotextile protégeant le béton, en cours de durcissement, du dessèchement sous l'effet du vent et de l'ensoleillement direct. Par ailleurs, cet espace fermé est maintenu humide par brumisation permanente évitant l'évaporation de l'eau du béton en peau.

La hauteur de deux levées équipées sur chaque pile offre alors une protection de 10 jours environ après coulage, période au cours de laquelle la température du béton évolue vers un état ne présentant pas de

risque vis-à-vis des gradients thermiques en peau. Cette durée est supérieure à celle préconisée à minima par le fascicule 65A. Elle évite :

- Le produit de cure qui peut tâcher les parements et dont l'efficacité n'est pas uniformément garantie sur des surfaces verticales ;
- Le contact direct de l'eau qui peut amorcer un choc thermique et abîmer la peau du béton par écoulement ;
- Le maintien des coffrages en place pendant des durées incompatibles avec le planning d'avancement et les exigences de teinte des parements.

7. SUIVI DE LA RÉALISATION

Le suivi de la production des bétons a été réalisé conformément au CCTP et sur la base des spécifications du fascicule 65A. Cependant, un contrôle complémentaire d'accompagnement a été également réalisé de façon spécifique à cette réalisation pour assurer un suivi des critères de durabilité. L'exécution, à intervalles réguliers, d'un contrôle de la porosité accessible à l'eau a été réalisée et les résultats de ce suivi permettant de lancer, si nécessaire, les compléments d'étude qui pouvaient s'avérer utiles.

L'ensemble de la production des bétons de ce chantier a fait l'objet d'un suivi particulier par les services du siège dans le cadre de l'accompagnement du contrôle externe au chantier.

En service, il est prévu des mesures sur l'ouvrage et des contrôles sur des blocs exposés dans des conditions d'environnement similaires à celles de l'ouvrage (carbonatation et pénétration des chlorures). Cependant, une telle procédure ignore l'influence des sollicitations dynamiques (phénomènes de pompage et autres effets). C'est pourquoi il a été proposé d'envisager des prélèvements sur l'ouvrage lui-même d'un béton réellement représentatif mais ne participant pas à la résistance et pour cela d'engraisser certaines zones sans influences notoires sur le fonctionnement d'ensemble (partie de plate-forme intermédiaire par exemple).

8. CONCLUSION

La présentation de la démarche suivie en matière de durabilité pour la réalisation des bétons du grand viaduc de MILLAU est articulée sur les éléments suivants :

- Un choix très sélectif de matériaux contrôlés ;
- Une simplification des formules de béton utilisées en limitant le nombre de constituants ;
- Une approche spécifique de chaque critère de durabilité et la recherche de la meilleure réponse adaptée à satisfaire au mieux l'ensemble d'impératifs parfois contradictoires ;
- Une approche qualité de la production et du contrôle de celle-ci ;
- Une réponse basée sur l'expérience acquise sur des chantiers récents en matière de mise en œuvre de BHP et la mise en place de procédures de fabrication adaptées en conséquence suite à réalisation de coulages tests ;
- Un suivi parallèle de la durabilité en complément des contrôles habituels de résistance .

L'ensemble de ces dispositions constitue la partie principale de la démarche particulière à cette réalisation permettant de viser à une durée de service de 120 ans fixée comme objectif.

ANNEXE : FORMULES DES BÉTONS

	B60 G pour fûts des piles	B35 pour semelles	B35 G+S pour culées
0/3 C RASCALAT	468 kg	864 kg	775 kg
0/2 R MERIC	312 kg	—	—
3/6 C RASCALAT	362 kg	315 kg	275 kg
6/14 C RASCALAT	711 kg	650 kg	715 kg
CEM I 52,5 N PM ES CP2 NF LE TEIL	420 kg	300 kg	385 kg
FUMÉES DE SILICE	—	30 kg	—
Eau totale	158 l	192 l	180 l
OPTIMA 175	1,4% de C	0,45% de C+FS	—
CHRYTARD	—	0,25% de C+FS	—
GLENIUM 27	—	—	0,3% du poids du ciment
MICRO AIR 104 Dilué 1/4	—	—	0,15% du poids du ciment
Consistance	FT = 55 cm +/- 5 cm	ST = 13 cm +/- 3 cm	ST = 11 cm +/- 3 cm
$E_{eff}/(C + FS)$	0,335	0,52	< 0,45