

RECOMMANDATIONS : BIEN PRESCRIRE LES BÉTONS

SPÉCIFICITÉS DES BÉTONS DESTINÉS AUX TRAVAUX GEOTECHNIQUES

La formulation des bétons destinés aux travaux géotechniques doit être conforme à l'annexe D de la norme NF EN 206/CN et comporter en particulier des teneurs minimales conformes au paragraphe D.3.2 :

- En liant total : la teneur minimale en ciment définie dans le paragraphe D.3.2, complété par le paragraphe NA.D.3.2 de l'annexe D de la norme NF EN 206/CN, est remplacée par la teneur minimale en liant total (ciment + additions)
- En fines : les fines sont les particules inférieures à 0,125 mm.

Le diamètre D_{\max} des granulats doit être défini par l'Entreprise, et communiqué au Maître d'Œuvre avant la réalisation des travaux, en fonction de la méthode d'exécution et des dispositions des armatures, comme indiqué dans le paragraphe D.2.2 de l'annexe D.

L'Entreprise définit également, et communique au Maître d'Œuvre avant la réalisation des travaux, le mode de réalisation (indication de la méthode d'exécution et des conditions sèches ou immergées de forage), la consistance cible à la réception sur chantier, la durée du maintien d'ouvrabilité dans le temps associé aux opérations de bétonnage ainsi que la valeur limite de consistance à maintenir.

Commentaires

Les bétons destinés aux travaux géotechniques sont spécifiés par le rédacteur du CCTP conformément à la NF EN 206/CN (classe de résistance à la compression, classes d'expositions, classe de chlorures).

Ces recommandations ne concernent que les bétons destinés aux travaux géotechniques au sens de l'annexe D de la norme NF EN 206/CN.

Ces bétons sont des Bétons à Propriétés Spécifiées (BPS) au sens de la norme Béton NF EN 206/CN. A ce titre, leur prescription doit reprendre les éléments du § 6.2.2 de la norme NF EN 206/CN, et les exigences complémentaires de l'annexe D de cette norme.

Les particularités principales des bétons géotechniques sont :

- D'être mis en œuvre dans le sol sans coffrage. La nature et les caractéristiques chimiques du terrain auront une influence importante sur le choix des méthodes d'exécution, les conditions de forage, le choix du fluide de forage et la durabilité des fondations. Par ailleurs, l'aspect de parement ne peut pas être défini selon les mêmes critères que pour les bétons coffrés conventionnellement.
- De devoir se mettre en place uniquement sous l'effet des dispositifs de bétonnage (éventuellement avec pompage) et sans apport d'énergie supplémentaire (pas de serrage par vibration ou de projection).
- De devoir assurer une stabilité au ressuage et à la ségrégation, vis-à-vis de la pression exercée par les charges successives de béton mises en place, dans des conditions d'ouvrabilité prolongées.

Les spécifications de ces bétons à l'état frais sont déterminantes pour la qualité finale de l'ouvrage. Ainsi l'Entreprise doit définir le mode de réalisation des fondations (indication de la méthode d'exécution et des conditions sèches ou immergées de forage) qui déterminera la consistance cible du béton à la réception sur chantier, ainsi que le maintien d'ouvrabilité, à savoir la valeur limite de consistance à maintenir dans le temps associé aux opérations de bétonnage.

PRÉCISIONS SUR LES SPÉCIFICITÉS DES BÉTONS DESTINÉS AUX TRAVAUX GEOTECHNIQUES

SPÉCIFICITÉS INCOMBANT AU MAITRE D'ŒUVRE ET AU RÉDACTEUR DU CCTP

Méthode d'exécution :

La méthode d'exécution doit être précisée dans le CCTP afin de définir les critères en découlant, conformément aux normes dédiées :

- Pieux forés (ou barrettes) réalisés conformément à la norme NF EN 1536+A1,
- Parois moulées réalisées conformément à la norme NF EN 1538+A1,
- Pieux avec refoulement de sol exécutés en place réalisés conformément à la norme NF EN 12699,
- Micropieux réalisés conformément à la norme NF EN 14199

Valeur maximale du rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$:

En plus des critères sur le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$ (eau efficace sur liant équivalent au sens de la norme NF EN 206/CN) découlant des exigences de la classe d'exposition, le critère suivant doit être respecté : $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}} \leq 0,60$.

Ce critère doit être spécifié explicitement dans le CCTP si besoin, lorsqu'il ne découle pas automatiquement d'une autre exigence (par exemple d'une classe d'exposition).

Teneurs minimales en liant total et en fines :

Les teneurs minimales en fines (particules de taille $\leq 125 \mu\text{m}$, additions et ciment inclus) sont nécessaires pour assurer la stabilité du béton, et doivent être conformes à l'article D.3.2 de la norme NF EN 206/CN.

La teneur minimale en ciment est ici remplacée par la teneur minimale en liant total « ciment + additions ». Cette interprétation du paragraphe NA.D.3.2 de l'annexe D de la norme NF EN 206/CN a été approuvée par la commission de normalisation AFNOR/P18B du 7 octobre 2015.

Méthode d'exécution	D_{max} (en mm)	Teneur minimale en liant total (ciment + addition) (en kg/m ³)	Teneur minimale en fines (en kg/m ³)	Teneur pondérale minimale en sable ($D \leq 4 \text{ mm}$) des granulats
Pieux forés (NF EN 1536)	-	≥ 325 ⁽¹⁾ ≥ 375 ⁽²⁾	≥ 400 ⁽⁴⁾ ≥ 450 ⁽⁵⁾	-
Parois moulées (NF EN 1538)	32	≥ 350	≥ 400 et ≤ 550	$\geq 40 \%$
	22.4	≥ 380	-	-
	16	≥ 400		
Pieux avec refoulement de sol	-	≥ 325 ⁽¹⁾ ≥ 375 ⁽²⁾	≥ 400 ⁽⁴⁾ ≥ 450 ⁽⁵⁾	-

exécutés en place (NF EN 12699)		≥ 350 ⁽³⁾		
Micropieux (NF EN 14199) ⁽⁶⁾	-	≥ 375	-	-

(1) Mise en place dans des conditions sèches

(2) Mise en place dans des conditions immergées (sous eau ou fluides stabilisateurs)

(3) Béton « semi-sec » pilonné, classe de résistance $\geq C25/30$

(4) $D_{\max} > 8$ mm

(5) $4 \text{ mm} \leq D_{\max} \leq 8$ mm

(6) $D_{\max} \leq 16$ mm

Tableau - Teneurs minimales en liant total « ciment + additions », en fines et en sable ($D \leq 4$ mm) des granulats, selon la méthode d'exécution et le D_{\max} des granulats

SPÉCIFICITÉS INCOMBANT À L'ENTREPRISE

Mode de réalisation

Les conditions de mise en place (sèches ou immergées), et le type de fluide de forage éventuel (eau ou fluide stabilisateur) doivent être pris en compte par l'entreprise pour établir le cahier des charges du béton destiné aux travaux géotechniques.

Valeur cible de consistance et maintien d'ouvrabilité :

Une valeur cible de consistance doit être définie conformément à l'article D.3.4 de la NF EN 206/CN.

Le maintien d'ouvrabilité évoqué dans les articles NA.D.2.1 et NA.D.3.2 est le temps pendant lequel le béton doit conserver ses propriétés à l'état frais (et dont les valeurs limites de consistance sont définies par l'entreprise) pour assurer sa bonne mise en œuvre, le déplacement du fluide de forage éventuel, et une remontée homogène.

Les dimensions et le volume maximum des structures coulées doivent être pris en compte pour définir la consistance et le maintien d'ouvrabilité du béton. La consistance et le maintien de cette consistance en tenant compte du temps de transport du béton entre la centrale et le lieu de bétonnage, ainsi que du cadencement du chantier qui varie selon le volume et les configurations des zones à couler.

Squelette granulaire et D_{\max} :

En application de l'article NA.6.1 de la norme NF EN 206/CN, D_{sup} et D_{inf} sont remplacés par D_{\max} .

Sauf à faire la démonstration de la non ségrégation de la formule (pouvant être basée sur retours d'expériences antérieurs), il convient que la granulométrie des granulats soit continue afin de limiter les risques de ségrégation, selon le paragraphe D.2.2 de la norme NF EN 206/CN.

Le diamètre maximal D_{max} des granulats doit être spécifié de manière à ne pas dépasser « 1/n fois l'espacement nu à nu des barres longitudinales » afin de permettre le bon écoulement du béton dans la zone d'enrobage.

La valeur de « n » dépend de la méthode d'exécution, selon le paragraphe D.2.2 de la norme NF EN 206/CN. Des bétons géotechniques ayant des $D_{max} > 22,4$ mm peuvent être utilisés sous condition d'essais complémentaires d'écoulement (à l'exception des micropieux dont le D_{max} est limité à 16 mm).

Tableau – Valeur du diamètre maximal D_{max} des granulats du béton en fonction de la méthode d'exécution. La valeur de D_{max} la plus faible sera prise en compte.

Méthode d'exécution	D_{max} (en mm)
Pieux forés et parois moulées	32 mm et 1/4 de l'espacement nu à nu des barres longitudinales
Pieux avec refoulement de sol	32 mm et 1/3 de l'espacement nu à nu des barres longitudinales
Micropieux	16 mm et 1/4 de l'espacement nu à nu des barres longitudinales
Mise en place en conditions immergées	1/6 du diamètre intérieur du tube plongeur ou du tube d'alimentation du béton

Des valeurs de D_{max} comprises entre 10 et 16 mm peuvent être envisagées dans le cas de densité de ferrailage élevée, d'espaces réduits, de hautes fluidités ou de micropieux.

Résistance à la ségrégation, stabilité et viscosité apparente :

Les notions de ségrégation, de stabilité et de viscosité apparente des bétons nécessitent une approche technique plus pointue. En cas d'identification d'un besoin précis sur ces notions, il est souhaitable de les insérer dans les spécifications d'achat du béton définies par l'Entreprise.

De même, la nature du terrain vis-à-vis notamment des risques d'absorption, devront être portées à connaissance afin d'adapter si nécessaire la formulation de béton en améliorant sa cohésion.

Un G/S limité peut contribuer à la stabilité du béton.

Des essais de stabilité sont préconisés dans les recommandations de l'EFFC – European Federation of Foundation Contractors¹, et cités dans le paragraphe NA.D.3.2 de la norme NF EN 206/CN. **Dans le cas de gros volumes de bétonnage en continu, il est recommandé de vérifier la rhéologie, la consistance et la stabilité du béton. Pour cela, il est possible de se référer à la norme XP P 18-469 pour la détermination de la viscosité, à la norme NF EN 12350-1 pour le suivi du maintien de la consistance et aux normes XP P 18-468 et XP P 18-475 pour le contrôle de la stabilité.**

¹ *Guide du béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plongeur ed2 2018, traduction française Décembre 2021*

Afin de limiter le tassement du béton ou son fluage, il peut être recommandé de spécifier une résistance minimum à 24 heures. Alternativement un temps de prise maximum peut être spécifié en référence au protocole d'essai normalisé ASTM C403.

Une viscosité apparente maximum du béton peut être fixée afin d'éviter que des temps d'écoulement trop longs ne puissent pénaliser la mise en œuvre et être à l'origine de pathologies. Cette viscosité apparente peut être mesurée par un essai d'écoulement au cône d'Abrams inversé suivant la norme XP P18-469.

Epreuve d'étude et de convenance :

L'épreuve d'étude réalisée sur la formulation du béton de parois moulées doit permettre de qualifier la robustesse de leur composition par une étude de sensibilité (principalement avec une variation de l'eau efficace, et son impact sur la résistance du béton à la ségrégation).

La structuration du béton (thixotropie) peut être évaluée, selon un protocole convenu entre toutes les parties, afin de prévenir le risque de pathologie liée à une rigidification trop rapide du béton.

Des épreuves de convenance sont à spécifier dans chaque centrale à béton afin de valider la formulation et l'adéquation des centrales avant le début de la production.

PRÉCISIONS SUR LES ESSAIS ET LA PRODUCTION DES BÉTONS DESTINÉS AUX TRAVAUX GÉOTECHNIQUES

De par la fluidité des bétons géotechniques et leur adjuvantation, la gestion des dosages et des corrections d'eau sont critiques. Ainsi il est recommandé de :

- Réaliser les essais sur béton frais dans les vraies conditions de production (centrale à béton) car les essais en laboratoire peuvent donner des écarts de mesures par rapport aux essais en centrale (humidité des granulats, corrections d'eau, températures, puissance et type de malaxage, etc.). En revanche, les essais de sensibilité qui sont des essais d'intercomparaison axés sur la précision des résultats devraient être réalisés en conditions de laboratoire.
- Définir un protocole d'essai général avec la référence aux normes ou procédures de chaque essai et la planification des échéances.
- Prévoir des essais de validation supplémentaires quand les conditions climatiques de production diffèrent des conditions initiales d'essai (saisons, pluviométrie).

Compte tenu des aléas de mise en œuvre des bétons destinés aux travaux géotechniques (durée du traitement de la boue, installation des cages d'armatures, ...), les plages horaires et les cadences de livraison des bétons doivent être définies afin de garantir un bétonnage continu et une bonne qualité de l'ouvrage. Ainsi l'influence des restrictions horaires dues aux autorités administratives locales (mairie, région) ou à la centrale à béton sont à prendre en compte.

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

NF EN 12350-1 Essais pour béton frais - Partie 1 : prélèvement et appareillage commun

XP P 18-468 Béton - Essai pour béton frais – Ressuage

XP P18-469 Béton - Essai pour béton frais - Temps d'écoulement au cône

XP P 18-475 Béton - Essai pour béton frais – Ressuage forcé

EFFC (European Federation of Foundation Contractors), 2018:

Guide du béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plongeur ed2 2018, traduction française Décembre 2021

CIA Z17, 2012: Recommended Practice, Tremie Concrete for Deep Foundations

ASTM C403 Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance