

Guide pour la réalisation d'un cahier des charges soumis à une Évaluation de Procédé Géotechnique (EPG)

FASCICULE 2 : Annexe 1 Prescriptions spécifiques relatives à la famille 1-1 Fondations profondes en béton coulé en place

Version septembre 2025

Version	Date	Nature de la mise à jour
1.1	Décembre 2024	Création du document
1.2	17 décembre 2024	Reprise en CT- EPG
1.3	25/03/2025	Prise en compte des commentaires de la CG-EPG
1.4	23/09/2025	Validation en CG-EPG

SOMMAIRE

1. Données générales	3
1.1 Présentation du procédé	3
1.2 Rappel du cadre normatif.....	3
1.3 Domaine d'application.....	3
1.4 Procédure d'exécution	3
1.5 Règles de justification	3
1.5.1 Résistance Structurale STR	3
1.5.2 Résistance géotechnique (GEO)	5
1.6 Les dispositions constructives spécifiques	7
1.7 Le suivi et le contrôle d'exécution	7
1.8 La démarche générale de maîtrise des risques	7
1.9 Le contenu des éléments attendus dans le DOE.....	7

1. Données générales

1.1 Présentation du procédé

Voir fascicule 2 - § 1.1

1.2 Rappel du cadre normatif

Voir fascicule 2 - § 1.2

Le référentiel est constitué notamment par les Eurocodes 2, 7 et 8, les normes NF P94-262, NF EN 206/CN, le DTU 13.2, les normes d'exécution, le CT38.

1.3 Domaine d'application

Voir fascicule 2 - § 1.3

1.4 Procédure d'exécution

Voir fascicule 2 - § 1.4

Cas des technologies de procédés avec dispositifs de bétonnage télescopables :

Le cahier des charges doit préciser de manière explicite :

- le ou les types de procédé couverts par le cahier des charges (piloté ou déclenché) et les moyens associés,
- le dispositif de contrôles réalisés durant l'exécution des pieux,
- les éventuels enregistrements de sortie du télescope.

On se reportera à la fiche de jurisprudence n°08 concernant les définitions des groupes de pieux béton en fonction de la technologie utilisée.

1.5 Règles de justification

Voir fascicule 2 - § 1.5

Ce paragraphe fournit les prescriptions qui sont demandées pour des pieux bétons coulés en place. Des prescriptions différentes, autres ou complémentaires, peuvent être demandées en fonction des particularités du procédé évalué.

1.5.1 Résistance Structurale STR

Pour la résistance structurale (STR), les modifications peuvent porter, pour le béton, sur les valeurs des coefficients k_1 et k_2 et sur la valeur du paramètre C_{max} . Celles-ci sont déduites de mesures de compression simple effectuées sur des carottes prélevées sur des pieux et analysées au regard de la résistance du béton, coulis ou mortier effectivement mis en œuvre, qui doit donc également être mesurée.

Eléments à fournir dans le dossier confidentiel :

Lorsque la résistance structurale du procédé est susceptible de différer de ce qui est proposé par le référentiel normatif, le cahier des charges doit présenter une méthode d'évaluation sur la base :

- **De campagnes d'essais** (sur une plage de diamètres couvrant sensiblement les diamètres ciblés par le cahier des charges) ;

- **Du système de qualité interne encadrant le procédé :** procédures d'exécution et qualité interne, contrôles sur site, enregistrements de bétonnage, expertise interne,...
- **D'un taux d'amélioration progressif :** La *fiche de jurisprudence n°01* fixe les taux d'amélioration limite, de la résistance STR des pieux en béton entre chaque renouvellement. Ce taux progressif a pour objectif de suivre la montée en expérience du titulaire.

Concernant la campagne d'essais, il est précisé que les essais doivent être menés au moins sur 4 sites : deux au moins dans un terrain avec nappe et deux dans un terrain sans nappe. Les pieux investigués doivent traverser en tout 4 types de sols différents (au sens de la norme NF P94-262). Cette campagne comprend au minimum :

- Les observations après l'extraction et la mise à nu de pieux courts d'au moins 3 m (au minimum 1 par site) : il s'agit de mesurer directement les dimensions de la fondation et de visualiser le matériau, l'interface entre la fondation et le terrain y compris en pointe et l'effet de la mise en œuvre, du mode de forage, etc.
- Les résultats de carottages toute hauteur sur 8 pieux. Les pieux investigués doivent traverser en tout 4 types de sols différents (au sens de la norme NF P94-262). Au total, au moins, 32 essais de compression simple sur éprouvettes carottées sont à réaliser : il s'agit d'avoir suffisamment de données pour justifier le cas échéant les valeurs des coefficients k_1 , k_2 , C_{max} . Ces résultats sont comparés aux résultats d'essais de compression sur éprouvettes moulées (conservées dans les conditions requises pour ce type d'essai), provenant de la même livraison. Ce type d'essai permet de déduire statistiquement, selon les recommandations de l'Eurocode 0, le coefficient de sécurité $k_1 k_2$ applicable au procédé.
 - L'influence du carottage est prise en compte sur la base des recommandations de la norme NF EN 13791/CN. Il est conseillé en parallèle une comparaison des résultats à des carottes prélevées sur un bloc de béton coulé dans le sol superficiellement toujours du même béton.
 - Pour l'exploitation de ces essais, les caractéristiques et propriétés du béton fluide doivent être suffisamment renseignées pour évaluer une éventuelle incidence (courbe granulométrie, type de granulat, dosage en liant équivalent et total, dosage en ciment, VSI, ressuage statique et forcé, durée du maintien rhéologique, consistance...).
- Les résultats d'essais de contrôle d'intégrité sur 20 pieux, dont au moins 10 essais auscultations soniques tout hauteur : il s'agit de caractériser l'absence de défauts récurrents (conformément aux normes d'auscultation en vigueur) mais aussi le caractère homogène vertical et transversal de la fondation.

Lors d'un renouvellement de cahier des charges, il est demandé au titulaire de produire à minima :

- deux essais d'intégrité tout hauteur de type auscultations soniques ;
- des résistances à la compression ($\geq 5 U$) issues d'au moins un carottage toute hauteur comparées à des résistances sur éprouvettes moulées obtenues pour une même livraison de béton ;
- son retour d'expérience sur les résultats des essais d'intégrité, carottage, propriété du béton utilisé, incidents les plus significatifs de bétonnage rencontrés avec idéalement le diagnostic.

1.5.2 Résistance géotechnique (GEO)

Pour les pieux en béton coulés en place, les paramètres de dimensionnement modifiables sont :

- les facteurs de portance $k_{p,max}$ et $k_{c,max}$;
- l'encastrement relatif Def/B autorisant la mobilisation un facteur de portance maximal ($k_{p,max}$ et $k_{c,max}$)
- les coefficients $\alpha_{\text{pieu-sol}}$;
- les valeurs limites q_{smax} ;
- la création de sous-catégorie de terrain (en référence à l'annexe B de la NF P94-262) ;
- le coefficient de modèle $\gamma_{R,d1}$.

Ces paramètres sont déduits d'essais de chargement de pieux.

Cette méthode d'évaluation est basée sur des essais statiques en compression ou en traction en vraie grandeur réalisés selon les normes d'essais en vigueur. On rappelle que les seuls essais acceptables sont de type statique et qu'ils doivent être menés jusqu'à la rupture. Il est donc essentiel que le dispositif de chargement permette, à la fois en capacité et en déplacement, de mener l'ouvrage géotechnique jusqu'à sa rupture géotechnique. Ces essais doivent être instrumentés de manière à pouvoir acquérir suffisamment de valeurs de frottement axial q_s et de facteur de portance pressiométrique k_p (ou k_c pour la méthode pénétrométrique).

Des essais non instrumentés peuvent aussi être considérés dans l'analyse en complément, en particulier pour le choix de la valeur de $\gamma_{R,d1}$.

Eléments à fournir dans le dossier confidentiel :

1) Campagne d'essais de chargement :

Le nombre d'essais instrumentés présentés dans le Tableau 1 comprend le nombre minimal de valeurs à acquérir. Il faut bien souligner que ce nombre peut être dépassé de manière à optimiser complètement le procédé géotechnique.

A proximité de chaque pieu d'essai ou d'ouvrage géotechnique testé, à une distance de moins de 5 m, doivent avoir été réalisés, sur une profondeur égale à $D+5B$:

- au moins un sondage carotté avec des essais d'identification en laboratoire (granulométrie, mesure d'argilosité, mesure de la teneur en $CaCO_3$..., se reporter aux recommandations GTR par exemple), indispensable lors de la création d'une sous-classe ;
- au moins un profil d'essais pressiométriques (avec un essai au maximum tous les 1.0 m) ;
- un sondage pénétrométrique statique (dans la mesure des possibilités de pénétration, ou si la méthode de calcul présente des règles basées sur les propriétés pénétrométriques).

Les procédures de réalisation des sondages sont conformes aux normes en vigueur. Dans le cas d'essais pressiométriques, le matériel utilisé est à adapter à la nature et à l'état des sols testés, afin de ne pas estimer par défaut la pression limite p_{LM} .

Le Tableau 1 ci-après fournit le nombre minimal de valeurs de frottement axial q_s et de facteur de portance k_p (ou k_c) qui permet de valider une méthode de dimensionnement.

	Modification des paramètres k_{pmax} , k_{cmax} , $\alpha_{pieu-sol}$, et q_{smax} , $\gamma_{Rd;1}$				
	1 ^{ère} catégorie de terrain	2 ^{ème} catégorie de terrain	3 ^{ème} catégorie de terrain	4 ^{ème} catégorie de terrain	5 ^{ème} catégorie de terrain
Nombre de sites	3	3	2	2	2
Pointe : Valeur de k_p	4 mesures	4 mesures	2 mesures(*)	2 mesures(*)	2 mesures(*)
Frottement axial : Valeur de q_s	12 valeurs	12 valeurs	8 valeurs	8 valeurs	8 valeurs
(*) : valeur à majorer de + 2 mesures pour le cas des sols de type marne, craie ou roche Note 1 – Une entreprise peut choisir d'élaborer un cahier des charges restreint à certains types de sols (argile ou limon, sable, craie, marne, roche). Pour chaque type de terrain, il est nécessaire de réaliser des essais statiques de chargement ou d'arrachement sur différents sites de manière à acquérir des données couvrant un éventail suffisant de natures et de résistances : par exemple, dans l'argile, des argiles normalement consolidées et surconsolidées sont à tester avec pressions limites nettes variant dans un rapport de l'ordre de 3 à 4. Note 2 - Si l'entreprise envisage de créer des sous-catégories de terrain (exemple sables lâches, sables compacts, etc.), il convient d'obtenir le même nombre de mesures pour chaque sous-catégorie. (par exemple : pour 2 sous-catégories pour la première catégorie de terrain 2 x 4 mesures en pointe et 2 x 12 mesures de frottement axial)					

Tableau 1. Informations à acquérir pour une modification du modèle de calcul de la résistance géotechnique d'un procédé ne se rattachant pas à une catégorie conventionnelle définie par la norme NF P94-262

Par ailleurs, lors d'un renouvellement de cahier des charges avec ré-interprétation de la base de données (renouvellement avec modification mineure ou majeure), il est demandé au titulaire de produire à minima un essai de chargement instrumenté.

2) Interprétation des essais de chargement :

L'interprétation des essais de chargement doit être menée conformément à la procédure suivie lors de l'élaboration de la norme NF P94-262 et détaillée dans les articles suivants :

- Baguelin, F., Burlon, S., Bustamante, M., Frank, R. et Gianceselli, L., Habert, J. et Legrand, S. (2012). Justification de la portance des pieux avec la norme « fondations profondes » NF P 94-262 et le pressiomètre. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Bordeaux ;
- Burlon, S., Frank, R., Baguelin, F., Habert, J. and Legrand. S. (2014) Model factor for the bearing capacity of piles from pressuremeter test results A Eurocode 7 approach. Géotechnique, 64(7), 513-525.

Les méthodes de calcul doivent être de "type direct", c'est-à-dire qu'elles doivent directement corrélérer les valeurs de pression limite ou de résistance de cône aux valeurs des frottement axiaux limites $q_{s,max}$ ou des facteurs de portance $k_{p,max}$ ou $k_{c,max}$. Les corrélations entre les valeurs de pression limite et de résistance de cône ne sont pas admises (voir clause 2 de la section 8.5.2 de la norme NF P94-262).

1.6 Les dispositions constructives spécifiques

Voir fascicule 2 - § 1.6

1.7 Le suivi et le contrôle d'exécution

Voir fascicule 2 - § 1.7

Dispositions spécifiques :

Pour les fondations profondes, et en cas d'application du « contrôle renforcé », le cahier des charges précise le type d'essais de contrôle et le nombre : le nombre ne peut pas être inférieur à celui de la norme.

Dans le cadre de l'utilisation de béton avec affaissement important ($> S4$), un test visuel de stabilité est réalisé simultanément aux tests d'affaissement exécutés quotidiennement par l'entreprise.

1.8 La démarche générale de maîtrise des risques

Voir fascicule 2 - § 1.8.

Le titulaire précise par exemple la présence d'un expert en béton et son mode d'intervention auprès des équipes.

1.9 Le contenu des éléments attendus dans le DOE

Voir fascicule 2 - § 1.9