



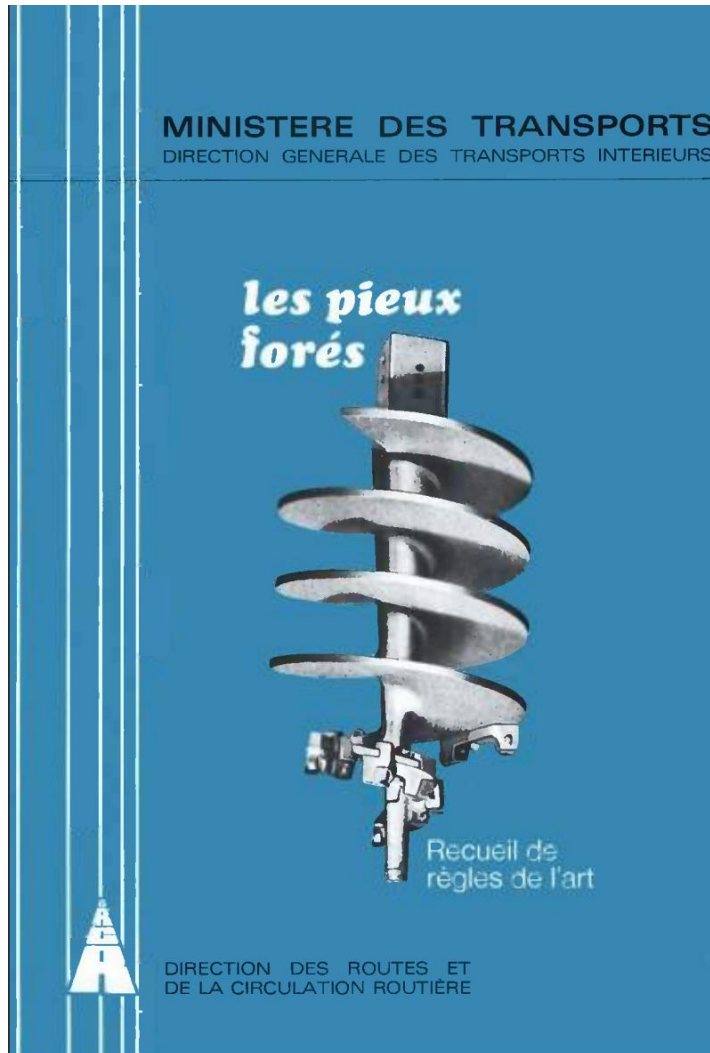
L'exécution des pieux : mise en œuvre et matériau béton

Evolution de la formulation des bétons de fondations profondes

Exposé présenté par **M. Olivier MADEC**
Président de la CN Exécution des Travaux Géotechniques

octobre 2025

L'état de l'art en 1978



Chapitre 6 - Bétonnage

- Les caractéristiques fondamentales (1 page)
- Les constituants et l'étude de la formule du béton (2 pages)
- Épreuve de convenance béton témoin (1/2 page)
- Fabrication et transport (1 page)
- Mise en œuvre (10 pages)
- Contrôle du bétonnage (1 page)

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Guide des Pieux Forés du LCPC-CETRA

6.1.1. Caractéristiques fondamentales des bétons pour pieux exécutés en place

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- fluidité, bonne faculté d'écoulement et de serrage sous son propre poids,
- résistance à la ségrégation et au délavage,
- prise lente et contrôlée,
- résistance à l'agressivité du milieu par une compacité élevée et une bonne imperméabilité,
- bonnes performances mécaniques.

Il faut noter que des performances mécaniques élevées ne constituent pas, comme dans le cas des superstructures, l'objectif à atteindre en priorité.

— *Recherche de la maniabilité optimale*, au maniabilimètre LCL (1). Elle est effectuée à teneur en eau constante ($C/E \approx 2,2$), en faisant varier le pourcentage de sable par rapport à celui des gravillons.

— *Recherche de la teneur en eau optimale* nécessaire à un écoulement correct du béton dans le tube plongeur et à une bonne mise en œuvre. Elle est effectuée au fluidimètre (fig. 124) à partir de la formule établie en phase précédente.

(1) LCL : Laboratoire Central - Lesage.

6.1.2.2. Etude de la formule du béton

L'étude de composition doit être faite en fonction des qualités nécessaires aux bétons de pieux. Elle doit tenir compte notamment de l'agressivité du milieu, ainsi que des moyens de fabrication, de transport, de mise en œuvre et de contrôle du béton. Cette composition ne devant être improvisée, son étude et les essais s'y rapportant doivent être confiés à un laboratoire spécialisé.

Il faut rechercher simultanément fluidité (aptitude du bon écoulement) et compacité.

L'utilisation du cône d'Abrams n'est pas recommandée en laboratoire car ce procédé, dans le cas de forts affaissements (18 à 22 cm) perd toute sensibilité. La mesure n'est plus représentative de la fluidité du béton.

— *Etude du temps de prise du béton* dans le cas d'utilisation de retardateur de prise ou de plastifiant-retardateur, au prisomètre à béton (fig. 125).

— *Mesure des résistances mécaniques* et éventuellement de *compacité* et *perméabilité* sur éprouvettes de béton durci.

Il faut toutefois attirer l'attention sur la nécessité pour les bétons de pieux d'allier une grande fluidité à une bonne compacité (cf. § 6.1.1).

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

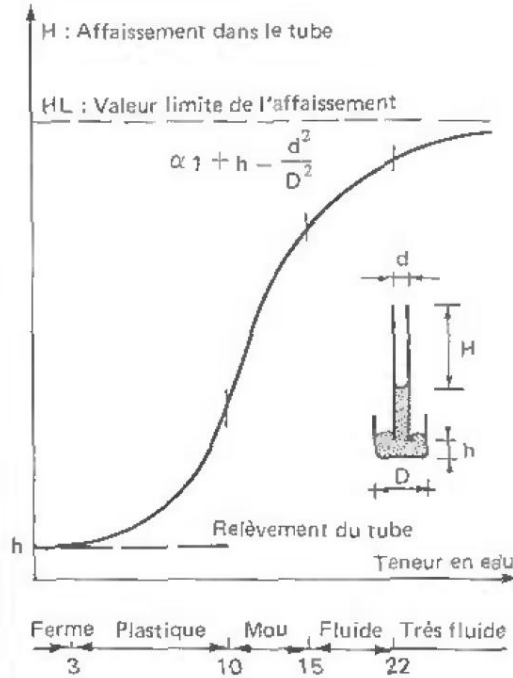
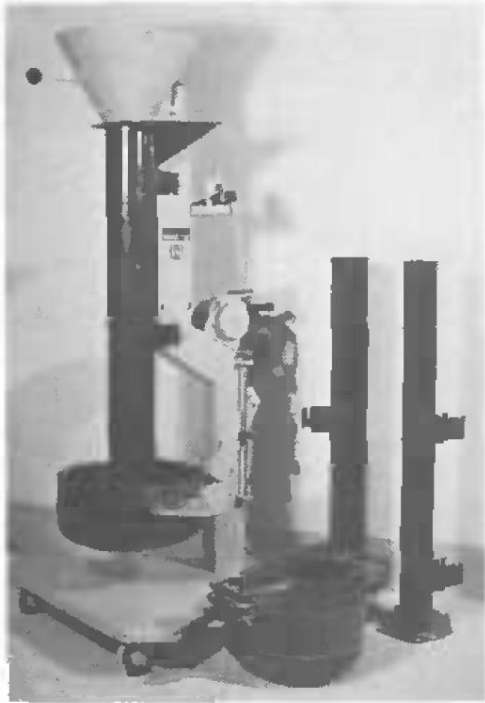
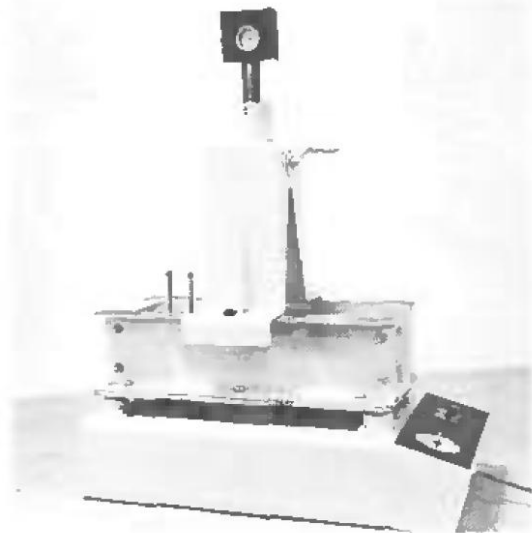
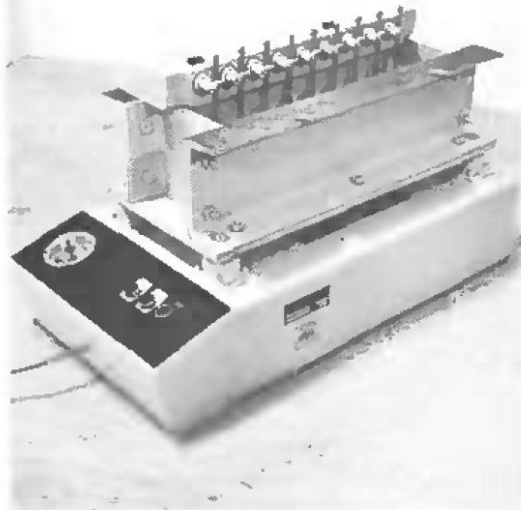


Fig. 124. — Le fluidimètre permet de déterminer la teneur en eau optimale d'un béton pour pieu.

Fig. 125. — Prismomètre à béton pour l'étude du dosage en retardateur de prise.



BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Cours Matériaux de construction de l'ENPC -1979 béton (polycopié de 107 pages)

- « le béton est un mélange de pierres, de sable et d'eau avec un liant qui résulte lui-même de la cuisson d'une pierre (gypse, calcaire) ou d'une pierre et d'une argile (CPA) »
- « La cohésion est assurée par la pâte de ciment et le remplissage par le granulat »

- $R_c = kc^2 / (1-g)^2$ avec k facteur liant, c teneur volumique en ciment et g teneur volumique en agrégats
- « Les adjuvants permettent d'améliorer certaines qualités du béton, faciliter sa fabrication ou sa mise en œuvre : accélérateur/retardateur ; faciliter le remplissage des coffrages (plastifiant/fluidifiant) ; stabiliser les microbulles pour la résistance au gel »
- « La mise en place du béton dans les coffrages se fait presque toujours par vibration »
- La consistance et la maniabilité se mesure essentiellement par l'affaissement au cône d'Abrams
- « Ressuage : tassement du squelette solide provoquant l'apparition d'un film d'eau claire sans grains en suspension.
 - La compacité du béton augmente
 - Peut provoquer des cassures dans le béton frais qui subsistent dans le béton durci »

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

école nationale des ponts et chaussées

COURS
DE MATÉRIAUX
DE CONSTRUCTION

béton

BARON

tome 3

Cours Matériaux de construction de l'ENPC -1979 **béton** (polycopié de 107 pages)

- « le béton est un mélange de pierres, de sable et d'eau avec un liant qui résulte lui-même de la cuisson d'une pierre

Le polycopié du cours de Procédés Généraux de Construction explique également que :

- • Le béton est un mélange complexe d'agrégats de différentes dimensions, liés entre eux par un mortier composé de sable, de ciment et d'eau
- • La résistance dépend de la qualité du squelette, de la qualité de la pâte (C+E) et de la cohésion (liaison pâte/agrégats)
- • La résistance croît en fonction du rapport C/E
- • La maniabilité dépend de la granulométrie, du dosage en ciment et du dosage en eau
- • Contrôle des bétons par le slump test (affaissement au cône d'Abrams)

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Cours Matériaux de construction de l'ENPC -1979 béton (polycopié de 107 pages)

- « le béton est un mélange de pierres, de sable et d'eau avec un liant qui résulte lui-même de la cuisson d'une pierre »

A aucun moment le cas des fondations profondes n'est envisagé alors même qu'il y a par ailleurs des cours très détaillés sur la réalisation des fondations profondes, des soutènements, etc.

Un béton mis en place sur de très grandes hauteurs et sans vibrations n'est pas évoqué.

La problématique du ressuage est minimisée.

- Rc = k g tene
- « Les a facilite faciliter microbu
- « La mi vibratio
- La cons cône d'
- « Ressu claire s
- La c
- Peut provoquer des cassures dans le béton frais qui subsistent dans le béton durci »

PA) »
le
ent et
éton,
teur ;
es
ar
nent au
film d'eau

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme XP P18-305:août 1996 Béton prêt à l'emploi

- Norme faite pour codifier la pratique française sous forme d'une norme expérimentale et pour remplacer la norme de 1981 dans le contexte de la norme européenne ENV 206 d'août 1991
- Prise en compte des avancées en matière d'additions et d'adjuvants
- Entérine l'interdiction d'ajout d'eau à la livraison
- La manutention du béton par pompage est du domaine de cahiers des charges particuliers
- BCN (Béton à Caractères Normalisés) défini par environnement, destination (Non Armé, Béton Armé, Béton Précontraint), des caractères garantis dont Rc et des caractères complémentaires. Le fabricant a libre choix de la formule et des adjuvants
- BCS (Béton à Caractères Spécifiés) défini par sa composition dont les adjuvants, par la classe d'environnement, la destination (NA, BA, BP) et quelques caractères mais pas Rc
- Consistance mesurée par affaissement au cône d'Abrams par classes Ferme, Plastique, Très Plastique, Fluide

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme NF EN 206-1:avril 2004 Béton : spécifications, performances, production et conformité

- La norme concerne les bétons sur chantier, les BPE, les bétons d'usines préfa
- Disparition des types d'ouvrages : NA, BA, BP
- Les classes d'environnement deviennent les classes d'exposition
- Les classes d'affaissement F, P, TP, FI deviennent S1 à S5
- Consistance : Introduction des classes d'étalement F1 à F6 à la table à chocs
- BPS (Béton à Propriétés Spécifiées) avec classe de Rc, classe d'exposition, Dmax, classe de teneur en Chlorure, classe de consistance, autres exigences complémentaires (aucune ne concerne la consistance ou la maniabilité)
- BPC (Béton à Composition Prescrite) avec dosage en ciment, type de ciment et sa classe de résistance, E/C, teneur max en Cl, Dmax et autres limitations sur les fuseaux granulaires, types et quantités d'adjuvants et additions, autres exigences (sans précisions)
- Toute addition ultérieure d'eau ou d'adjuvants est interdite

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme NF EN 206-1:avril 2004 Béton spécifications, performances, production et conformité

- Dans le cas du BCP, le prescripteur de la composition prend la responsabilité que la composition permet d'atteindre les performances attendues en matière de Rc, de durabilité, ...
- Mais la norme explicite clairement par ailleurs les rôles de chacun pour tous les bétons : « Le prescripteur est responsable de la spécification du béton, article 6, et le producteur est responsable de la conformité et du contrôle de production, articles 8 et 9. L'utilisateur est responsable de la mise en place du béton dans la structure.
- En pratique, il peut se faire que plusieurs entités spécifient des exigences à différents stades de la conception et de la construction, par exemple le client, le concepteur, l'entrepreneur, le sous-traitant responsable du bétonnage. Chacun est responsable de transmettre les exigences spécifiées en même temps que les exigences complémentaires, au maillon suivant de la chaîne jusqu'au producteur.
- Au sens de cette norme européenne, la compilation finale est désignée par le terme «spécification».

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme NF EN 206:novembre 2014 Béton spécifications, performances, production et conformité

- **Nouvelles règles pour le laitier granulé de haut-fourneau moulu**
- **Règles pour le béton auto-plaçant**
- **Ajouts d'exigences pour le béton destiné aux travaux géotechniques spéciaux (Annexe D)**
- **Possibilité de mettre des fibres métalliques ou non dans le béton**
- **Pour les BAP :**
 - **Classes de viscosité apparente**
 - **Classes d'aptitude à l'écoulement (boite en L)**
 - **Classes d'étalement au cône d'Abrams (étalement à l'anneau)**
 - **Classes de résistance à la ségrégation (stabilité au tamis)**
- **Pour la BPS est rajouté « spécifications complémentaires pour le béton destiné aux travaux géotechniques spéciaux (cf annexe D)**

La norme NF EN 206:novembre 2014 Béton spécifications, performances, production et conformité

Quelques définitions importantes rajoutées :

- **béton auto-plaçant (BAP)** : béton qui s'écoule et se compacte par seul effet gravitaire, capable de remplir le coffrage avec son ferrailage, ses gaines, réservations, etc., tout en conservant son homogénéité
- **aptitude à l'écoulement** : aptitude du béton frais à s'écouler à travers des zones confinées, y compris des espaces entre les barres d'armature et autres inserts, sans aucune ségrégation ou aucun blocage
- **résistance à la ségrégation** : capacité du béton frais à conserver une composition homogène
- **viscosité apparente** : résistance à l'écoulement du béton frais une fois que ledit écoulement a commencé

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme NF EN 206:novembre 2014 Béton spécifications, performances, production et conformité

ANNEXE D (normative) : exigences complémentaires pour le béton des pieux forés (EN1536), des parois moulées (EN1538), des pieux avec refoulement du sol (EN 12699), des micropieux (EN 14199)

- **Ciment selon classe d'exposition et selon l'aptitude à l'emploi dans les applications géotechniques couvertes par l'EN206 annexe D**
- **Granulats avec une granulométrie continue, les granulats ronds étant privilégiés**
- **Dsup limité suivant techniques : cf article D2.2(2)**
- **La formulation du béton selon spécification qui doit tenir compte de :**
 - **La nécessité d'une grande résistance à la ségrégation**
 - **La nécessité d'une plasticité adéquate et une bonne consistance**
 - **La nécessité de s'écouler facilement**
 - **La nécessité d'être apte à être serré de manière adéquate par gravité**
 - **La nécessité d'être maniable pendant tout le bétonnage et retrait tube**
- **La formulation proposée doit être acceptée avant la production**
- **Teneur en ciment et fines selon tableaux D1 et D2**
- **Valeurs cibles de consistance du béton frais suivant tableau D3**

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

La norme NF EN 206:novembre 2014 Béton spécifications, performances, production et conformité

ANNEXE D (normative) : exigences complémentaires pour le béton des

Le Complément National français à cette norme précise également dans une note de l'annexe D que :

La teneur minimale en fines spécifiée dans les tableaux D1 et D2 est destinée à assurer la stabilité du béton pendant sa mise en œuvre (ressuage, ségrégation). Elle est à adapter en fonction des constituants à disposition et de leur dosage et des conditions spécifiques au projet.

Dans le cas de gros volumes de bétonnage en continu, il est conseillé de vérifier la rhéologie et la stabilité du béton. Il est possible de se référer pour le suivi du maintien de la consistance à la norme NF EN 12350-1:2019 et pour la viscosité à l'essai d'écoulement XP P 18-469. Pour le contrôle de la stabilité, il est possible de suivre les normes XP P 18-468 et XP P 18-475.

Valeurs cibles de consistance du béton frais suivant tableau D3

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Projet de révision de l'EN 206 L'annexe D devient l'EN 206-3

- **Rajouts de normes d'essai sur les propriétés du béton frais en annexe B informative avec tableaux B1 & B2 donnant des valeurs cibles**
- **Référence à des matériaux non spécifiés (composés cimentaires, minéraux argileux ou adjuvants spéciaux) et au béton plastique**
- **Référence aux ouvrages temporaires**
- **Références aux éléments non structurels**
- **Les bétons géotechniques sont des Bétons à Propriétés Spécifiées**
 - **Aptitude à remplir l'excavation,**
 - **Consistance adéquate et à l'autonivellement**
 - **Aptitude adéquate à l'écoulement à travers les cages d'armatures**
 - **Exigences complémentaires fonction des techniques mises en œuvre (béton pompé dans l'axe de la TC, béton en chute libre, béton mis en œuvre par gravité au tube plongeur**

Projet de révision de l'EN 206 L'annexe D devient l'EN 206-3

Nouvelles définitions :

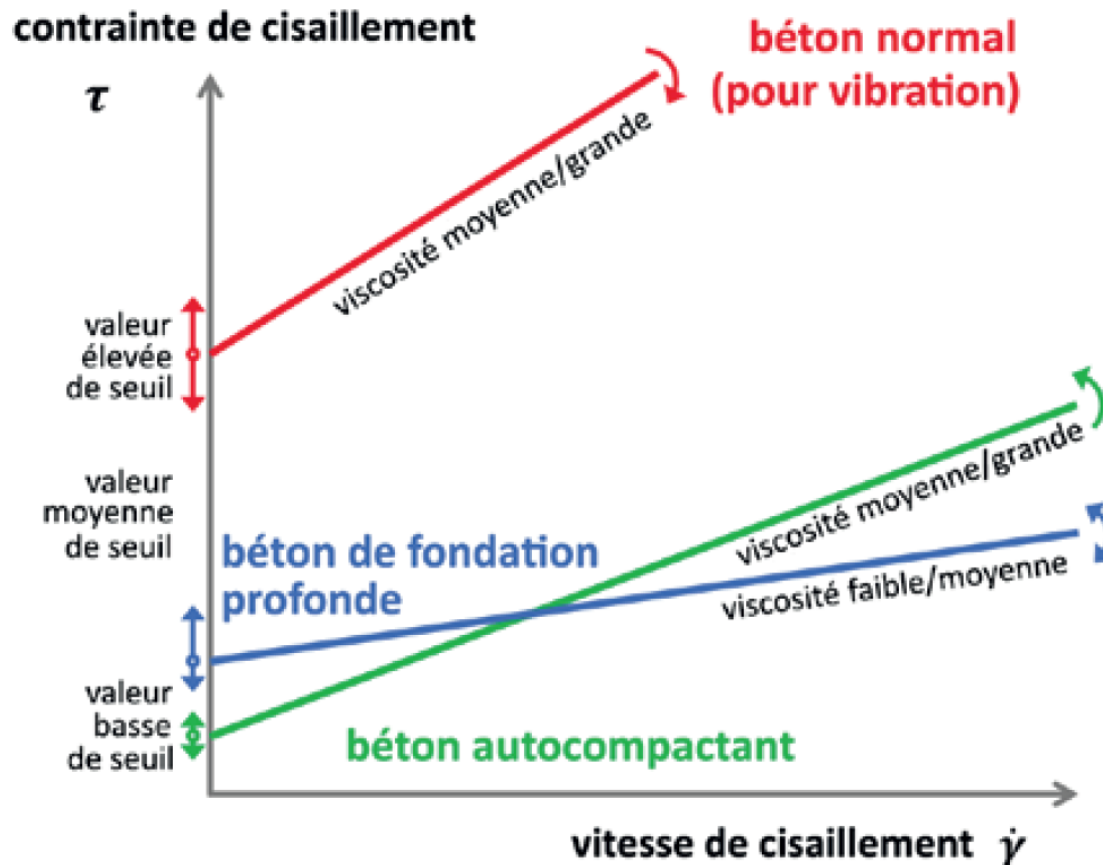
- **Ouvrabilité** : propriété d'un béton fraîchement mélangé définie par sa rhéologie, qui détermine un ensemble de caractéristiques du béton à l'état frais telles que la consistance, l'aptitude à l'écoulement et l'aptitude au remplissage
- **Stabilité** : résistance d'un béton à la ségrégation, au ressuage et à la filtration
- **Maintien de l'ouvrabilité** : conservation des propriétés spécifiées du béton frais, telles que la consistance, pendant une durée spécifiée
- **Ressuage** : forme de ségrégation dans laquelle une partie de l'eau de gâchage du béton à l'état frais tend à monter à la surface du béton fraîchement mis en place, en raison du tassement des constituants solides
- **Filtration** : processus séparant l'eau du béton qui n'a pas encore fait prise, ou le sol perméable environnant agit comme un filtre sous la pression hydrostatique

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Quelques éléments issus du Guide EFFC sur le Béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plongeur

FIGURE
06

COMPARAISON QUALITATIVE DE LA RHÉOLOGIE DE DIFFÉRENTS TYPES DE BÉTON



BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Quelques éléments issus du Guide EFC sur le Béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plongeur

FIGURE
07

TEMPS DE RAIDISSEMENT ET DE PRISE

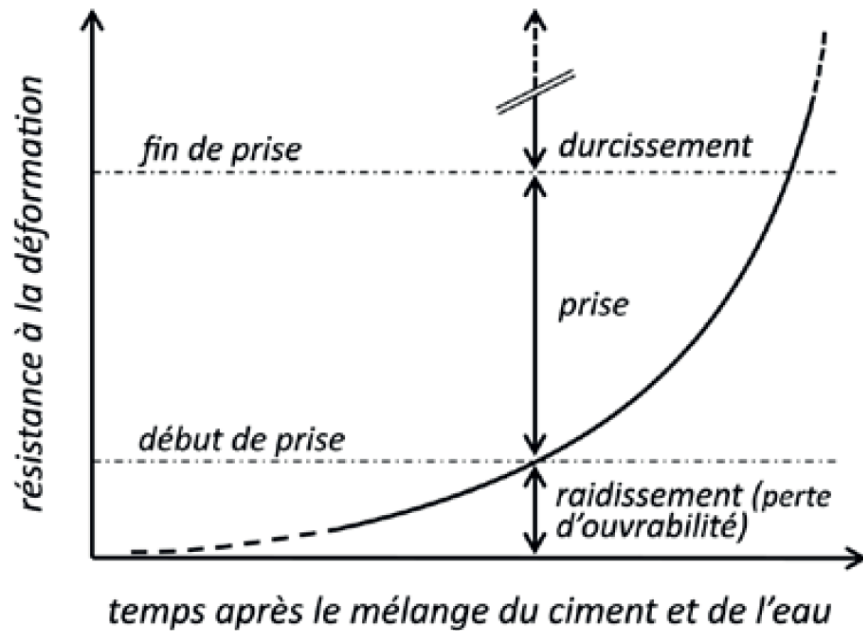
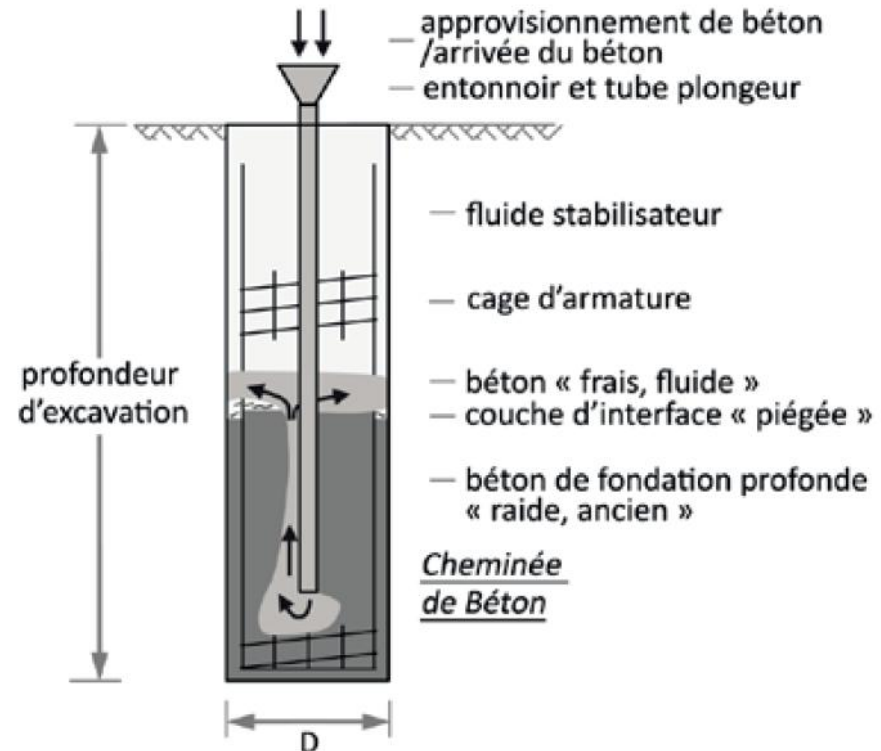


FIGURE
D.3

SCHÉMA D'UNE CHEMINÉE DE REMONTÉE DE BÉTON DUE À UNE PERTE D'OUVRABILITÉ DE LA FORMULATION DE BÉTON PENDANT UNE MISE EN PLACE AU TUBE PLONGEUR (CONFORMÉMENT A LA FIGURE 9.13, FHWA GEC10), OÙ UNE COUCHE D'INTERFACE PEUT ÊTRE PARTIELLEMENT ENFERMÉE PAR LE BÉTON ET FORMER UNE INCLUSION.



BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Quelques éléments issus du Guide EFC sur le Béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plongeur

FIGURE
D.4

EXEMPLES DE CHEMINÉES DE REMONTÉE D'EAU PARCOURANT LA SURFACE D'UN PIEU ET D'UNE PAROI MOULÉE



BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Quelques éléments issus du Guide EFFC sur le Béton de Fondations Profondes Mis en Œuvre au Tube Plon

FIGURE D.5 MATELASSAGE DANS UN PIEU (A GAUCHE) ET DANS UN PANNEAU (A DROITE)

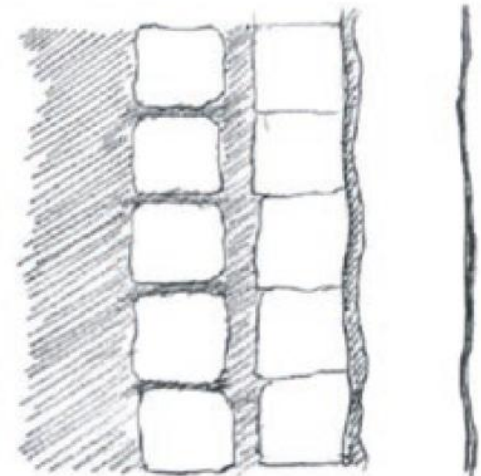


FIGURE D.6

SCHÉMAS MONTRANT LES DEGRÉS DE VARIATION DU MATELASSAGE



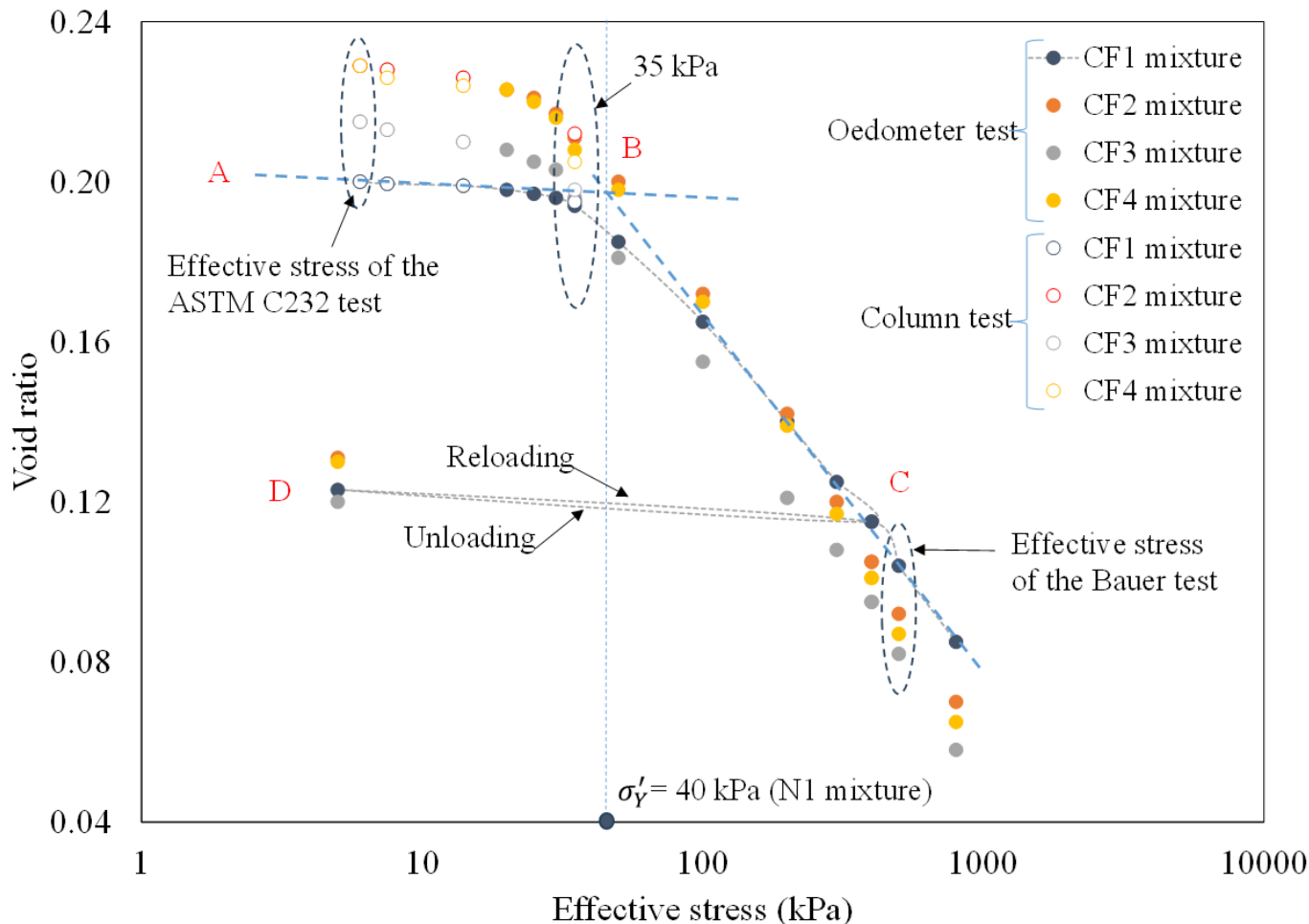
SECTION.



ELEVATION

BETONS DE FONDATIONS PROFONDES

Travaux de la thèse : Etude des mécanismes des cheminées de remontée d'eau des parois moulées – juillet 2023 *Abdul Rahman El Zein*



Approche mécanique des sols du béton (théorie de Terzaghi)

Avec un œdomètre béton, mesure du C_v du béton fluide

**MERCI DE
VOTRE ATTENTION**