

# Projet C2D2 2010-2013

Additif pieux en bois à la Norme Française P 94-262  
Justification des ouvrages géotechniques - Normes  
d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations  
profondes

Version provisoire

Version du 29/09/2014

## Rédacteurs

M	BURLON	IFSTTAR
M	CHRISTIN	IFSTTAR
M	CHRETIEN	GTS
M	LE KOUBY	IFSTTAR
M	REIFFSTECK	IFSTTAR
M	YANEZ	BATIPLUS

## Participants en tant qu'experts :

La liste des personnes ayant participé aux différents groupes de travail pour établir la version V1 de ce projet de norme est indiquée dans l'avant propos.

Version provisoire

# Sommaire

Page

1	Domaine d'application .....	7
2	Références normatives .....	8
3	Termes, définitions et symboles.....	9
3.1	Termes et définitions .....	9
3.2	Symboles et indices .....	9
4	Comportement des fondations profondes.....	11
4.1	Généralités .....	11
4.2	Comportement sous charge axiale.....	11
4.3	Comportement sous sollicitations transversales .....	11
4.4	Mécanismes de ruine ou de désordres inacceptables .....	11
5	Actions et données géométriques.....	14
5.1	Actions .....	14
5.2	Données géométriques.....	14
6	Propriétés des terrains et des matériaux.....	17
6.4	Matériaux constitutifs des fondations profondes.....	17
7	Situations de calcul, sollicitations et combinaisons d'actions .....	19
8	Règles générales de justification des fondations profondes .....	20
8.5	Fondation profonde isolée soumis à un effort axial.....	20
8.6	Fondation profonde isolée sous un effort transversal.....	20
8.7	Comportement d'un groupe de fondations profondes.....	20
8.8	Prise en compte des déplacements d'ensemble du terrain.....	21
8.9	Essais de pieux à réaliser.....	21
9	État limite de portance .....	22
10	État limite de traction .....	23
11	Résistance aux charges transversales .....	24
12	Résistance structurale d'un pieu.....	25
13	Stabilité générale.....	27
14	Justifications à l'état limite de service.....	28
14.3	Déplacement et déformation d'une fondation profonde .....	28
15	Documents justificatifs des calculs .....	29
Annexe A (informative) Les différents types de pieux et les dispositions particulières de conception .....		30
A.1	Les différents types de pieux .....	30
A.2	Surfaces et périmètres des éléments de fondation .....	35
Annexe B (informative) Détermination des catégories conventionnelles de terrain .....		37
Annexe C (normative) Facteurs partiels pour les états limites ultimes.....		38
C.1	Préambule .....	38
C.2	Facteurs partiels pour la vérification des états limites pour les structures (STR) et géotechnique (GEO).....	38
C.3	Facteurs partiels pour la vérification de l'état limite ultime de soulèvement global (UPL) .....	41
Annexe D (informative) Détermination de la hauteur d'encastrement équivalente $D_e$ .....		43
Annexe E (informative) Calcul de la valeur de la portance et /ou de la résistance de traction d'une fondation profonde – Synoptique et exemples .....		44

<b>Annexe F (normative) Portance limite et résistance limite de traction à partir de la méthode pressiométrique.....</b>	<b>46</b>
<b>F.1 Préambule .....</b>	<b>46</b>
<b>F.2 Coefficients de modèle .....</b>	<b>46</b>
<b>F.3 Résistance limite d'un pieu .....</b>	<b>47</b>
<b>F.4 Résistance de pointe.....</b>	<b>48</b>
<b>F.5 Résistance de frottement axial.....</b>	<b>50</b>
<b>Annexe G (normative) Portance limite et résistance limite de traction à partir de la méthode pénétrométrique .....</b>	<b>53</b>
<b>G.1 Préambule .....</b>	<b>53</b>
<b>G.2 Coefficient de modèle .....</b>	<b>53</b>
<b>G.3 Résistance limite d'un pieu .....</b>	<b>54</b>
<b>G.4 Résistance de pointe.....</b>	<b>55</b>
<b>G.5 Résistance limite mobilisable par frottement axial.....</b>	<b>57</b>
<b>Annexe H (informative) Évaluation du frottement négatif sur un pieu .....</b>	<b>61</b>
<b>Annexe I (informative) Modélisation du comportement transversal d'une fondation profonde à partir des essais au pressiomètre et au pénétromètre.....</b>	<b>62</b>
<b>Annexe J (informative) Effets de groupe vis-à-vis d'un chargement axial.....</b>	<b>63</b>
<b>Annexe K (informative) Déplacement horizontal d'une couche de terrain.....</b>	<b>64</b>
<b>Annexe L (informative) Rigidité axiale d'une fondation profonde .....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe M (informative) Reconnaissances géotechniques et valeurs caractéristiques des propriétés des terrains.....</b>	<b>66</b>
<b>Annexe N (informative) Déformations des structures et mouvements des fondations.....</b>	<b>67</b>
<b>Annexe O (informative) Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages .....</b>	<b>68</b>
<b>Annexe P (informative) Catégories géotechniques et durée d'utilisation du projet .....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe Q (informative) Dispositions générales de conception pour les ponts.....</b>	<b>70</b>
<b>Annexe R (informative) Prise en compte des imperfections géométriques liées aux tolérances d'exécution.....</b>	<b>71</b>
<b>Annexe S (informative) Éléments relatifs aux essais de chargement statique en compression .....</b>	<b>73</b>

## Avant-propos

Le présent document a été élaboré dans le cadre du projet C2D2 PieuxBois avec le soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat. Le document n'engage en aucun cas le ministère qui ne peut être tenu pour responsable de l'usage qui pourrait en être fait.

Ce document a pour objet le calcul géotechnique des fondations profondes de type pieux bois. Il a été élaboré pour compléter l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1) et la norme nationale d'application nationale NF P 94-262 pour ces types d'ouvrages et fait régulièrement référence aux données et principes de calcul contenus dans cette norme.

Dans cette édition, le document constitue un additif qui n'a pas de statut réglementaire et qui est fourni à titre informatif.

Il est important de retenir ce qui suit :

a) La connaissance des conditions de terrain dépend de l'importance et de la qualité des reconnaissances géotechniques. Cette connaissance et le contrôle de la qualité de la réalisation des travaux sont plus importants pour satisfaire les exigences fondamentales que la précision des modèles de calcul et des facteurs partiels.

b) Les mécanismes de ruine à considérer doivent être plausibles et être identifiés en se basant sur des données de comportement d'ouvrages réels ou à défaut, sur les résultats d'une modélisation appropriée.

c) La vérification d'un état-limite ultime suppose l'étude du mécanisme de ruine le plus défavorable vis-à-vis de celui-ci avec un modèle de calcul fiable et correctement utilisé.

d) Lorsqu'il n'existe pas de modèle de calcul fiable pour un état limite particulier, il peut être préférable de procéder à l'analyse d'un autre état limite, en utilisant des facteurs qui rendent improbable le dépassement de l'état limite considéré. A défaut et selon le cas, il est possible de justifier le dimensionnement :

- soit par des mesures prescriptives, lorsqu'une expérience comparable rend les calculs de dimensionnement inutiles ;

- soit sur la base de résultats d'essais de chargement ou d'essais sur des modèles ;

- soit par la méthode observationnelle, qui permet de revoir la conception en cours de construction.

**Liste des personnes associées à l'élaboration du document**

**Rédacteurs**

M DARRAS

SNCF

M VETILLARD

GPMR

M GARDET

CETE du Sud-Ouest

M BOCQUET

ENSTIB-LERMAB

Version provisoire

## 1 Domaine d'application

(1) Le présent document traite de la conception et du calcul des fondations profondes de type pieux bois.

(2) Le présent document s'applique au calcul des fondations profondes, de type pieux en bois, sollicitées axialement en compression ou en traction. Ces structures géotechniques sont installées par battage ou par vibrage.

(3) La vérification de la résistance structurale des fondations profondes de type pieux bois relève des normes de calcul relatives au matériau bois qui les constitue (par exemple la norme NF EN 338 relative aux bois de structure et aux classes de résistance).

(4) Concernant les domaines d'application des fondations profondes de type pieux bois, les dispositions du présent document s'appliquent toujours intégralement, d'une part, pour ce qui concerne la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés et des résistances du matériau constituant la fondation profonde et le sol en place, et d'autre part, pour les valeurs caractéristiques des propriétés et des résistances de frottement et de la pointe.

(5) Le présent document ne s'applique pleinement qu'aux projets relevant de la catégorie géotechnique 2 (Notes 1 à 3, Annexe P, Norme NF EN 1997-1), c'est à dire aux ouvrages courants qui ne présentent pas de risque exceptionnel et ne sont pas exposés à des conditions de terrain ou de chargement exceptionnellement difficiles.

Les pieux en bois peuvent être utilisés pour un usage à long terme quand les conditions sont telles que la détérioration sous agents extérieurs ne se produira pas ou dans des conditions maîtrisées.

Ils sont également utilisés pour les structures marines où la flexibilité et la résistance aux chocs est privilégiée à la pérennité et des structures temporaires. Dans tous les cas, la possibilité de détérioration par les insectes, les xylophages marins ou les champignons doit être prise en compte

(6) Le présent document ne s'applique pleinement qu'aux fondations profondes soumises à des sollicitations statiques ou pouvant être considérées comme telles dans les calculs justificatifs. En particulier, le calcul des fondations profondes soumises à des sollicitations sismiques relève des normes NF EN 1998-1 et NF EN 1998-5. En l'absence de valeurs de coefficients partiels relatifs à la portance et à la résistance de traction des fondations profondes pour les combinaisons à l'ELU sismiques dans les normes NF EN 1998-1 et NF EN 1998-5, il convient de considérer un facteur partiel  $\gamma_i$  égal à 1,1 pour les ELU relatifs à la portance et égal à 1,15 pour les ELU relatifs à la résistance de traction. Des indications sur le comportement transversal des fondations profondes sous charge sismique sont fournies en annexe I (Article I.3).

## 2 Références normatives

Les documents référencés dans la norme NF P 94-262 sont indispensables pour l'application du présent document. Les documents référencés ci-dessous et relatifs au matériau bois le sont également.

La liste de documents ci-dessous n'est pas exhaustive et il convient de se référer le cas échéant à l'ensemble des normes diffusées par l'AFNOR.

*NF EN 252 (1989) Essai de champ pour déterminer l'efficacité protectrice relative d'un produit de préservation du bois en contact avec le sol*

*NF EN 335-2, (2007), Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Partie 2 – Application au bois massif.*

*NF EN 338, (2009), Bois de structure – Classes de résistance.*

*NF EN 350- 1 : Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif- partie 1: guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois.*

*NF EN 350-2, (1994), Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Durabilité naturelle du bois massif – Partie 2 : Guide de la durabilité naturelle du bois et de l'imprégnabilité d'essences de bois choisies pour leur importance en Europe.*

*NF EN 460 : Durabilité des bois et des matériaux dérivés du bois Guide d'exigences de durabilité du bois pour son utilisation selon les classes d'emploi.*

*NF EN 599-1 : Durabilité des bois et des matériaux dérivés du bois –Performances des produits préventifs de préservation établies par des essais biologiques.*

*NF EN 1912 (2012) Bois de structure - Classes de résistance - Affectation des classes visuelles et des essences*

*NF EN 12699 (2001) Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Pieux avec refoulement de sol*

*NF B50-105-3: Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Bois massif traité avec produit de préservation Performances de prévention des bois et attestation de traitement - Adaptation à la France métropolitaine.*

*NF B51-004, (1985), AFNOR, Bois – Détermination de l'humidité.*

*NF EN FD P20 651 : Durabilité des éléments et ouvrages en bois*

*NF P94-262, (2012), Justifications des fondations profondes.*

*NF P94-311, (2012), Justifications des fondations profondes.*

### 3 Termes, définitions et symboles

#### 3.1 Termes et définitions

Les définitions des termes « action géotechnique », « expérience comparable », « fondation », « pieu », « pieu à refoulement de sol », « essai d'intégrité », « essai de chargement » et « frottement négatif » établies dans la norme NF P 94-262 s'appliquent dans le présent document.

#### 3.2 Symboles et indices

##### 3.2.1 Sols et ouvrages

Les principaux symboles complétant ceux définis dans la norme NF P 94-262 et utilisés dans le présent document relatifs aux terrains et aux fondations profondes sont indiqués en 3.2.1.1 et 3.2.1.2. Les autres symboles sont définis aux endroits appropriés dans le corps du texte.

##### 3.2.1.1 Lettres latines

$B_{inf}$  : diamètre inférieur du pieu

$B_{sup}$  : diamètre supérieur du pieu

$d_{e,ab}$  : diamètre extérieur du connecteur d'aboutage

$d_{i,ab}$  : diamètre intérieur du connecteur d'aboutage

$E_b$  : module d'élasticité du bois

EM : niveau minimal des eaux susceptible d'être dépassé pendant 1% du temps de référence

EMB : niveau minimal des eaux susceptible d'être atteint pendant la durée de vie de l'ouvrage pour les situations accidentelles

EME : niveau minimal des eaux ayant une période de retour de 50 ans.

$f_{ck}$  : résistance caractéristique à la compression du bois

Hm : différence entre le niveau de la nappe maximal extrême EE et le niveau minimal extrême EME.

$l_{ab}$  : longueur du connecteur d'aboutage

$l_{ma}$  : longueur du manchon d'aboutage

##### 3.2.1.2 Lettres grecques

Mettre uniquement les symboles contenus dans ce document. Pour les autres symboles, faire référence à la norme NF P 94-262.

##### 3.2.2 Actions et résistances

Les principaux symboles utilisés dans le présent document relatifs aux actions et aux résistances sont indiqués dans les articles 3.2.2.1 et 3.2.2.2. Les autres symboles sont définis aux endroits appropriés dans le corps du texte.

NOTE 1 – Pour les résistances géotechniques d'une fondation profonde, les indices « c » et « cr » se rapportent respectivement à la résistance limite et à la charge de fluage d'un pieu isolé, les indices « cal » et « m » se rapportent respectivement à une valeur calculée à partir de résultats d'essais sur le terrain et à une valeur mesurée

lors d'un essai de chargement, enfin les indices « ug » et « crg » se rapportent respectivement à la résistance limite et à la charge de fluage du groupe de pieux.

NOTE 2 – L'indice « str » est propre aux actions provenant d'une éventuelle superstructure ou à la résistance de cette structure.

NOTE 3 – Les indices « dst » et « stb » sont propres respectivement au caractère déstabilisateur et stabilisateur de l'effet d'une action. Les indices « inf » et « sup » se rapportent respectivement au caractère favorable et défavorable de l'effet d'une action permanente pour les vérifications des états limites ultimes STR et GEO ainsi que UPL.

NOTE 4 – Les indices « k » et « d » se rapportent respectivement à la valeur caractéristique et à la valeur de calcul soit d'une action ou de son effet, soit d'une résistance, soit d'une propriété d'un matériau.

### **3.2.2.1 Lettres latines**

Mettre uniquement les symboles contenus dans ce document. Pour les autres symboles, faire référence à la norme NF P 94-262.

### **3.2.2.2 Lettres grecques**

Ω : Conicité du pieu (° ou m/m)

### **3.2.3 Abréviations**

Mettre uniquement les abréviations contenues dans ce document. Pour les autres abréviations, faire référence à la norme NF P 94-262.

Version provisoire

## **4 Comportement des fondations profondes**

### **4.1 Généralités**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 4.1 Généralités » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **4.2 Comportement sous charge axiale**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 4.2 Comportement sous charge axiale » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **4.3 Comportement sous sollicitations transversales**

Le comportement du pieu en bois sous sollicitations transversales n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie et ne peut donc être validé. La littérature contient néanmoins des articles traitant de ce sujet.

Dans le cas d'un pieu constitué de plusieurs éléments aboutés, la variation de résistance aux efforts transversaux au droit des dispositifs d'aboutage doit être prise en compte.

### **4.4 Mécanismes de ruine ou de désordres inacceptables**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 4.4 Mécanismes de ruine ou de désordres inacceptables » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Les pieux en bois peuvent être l'objet d'attaques par certains organismes qui, dans des conditions appropriées, causent des dommages rapides et parfois importants. Cela peut être efficacement combattu dans une large mesure, soit par l'utilisation d'essences de bois naturellement durables ou par traitement. En plus de satisfaire aux exigences de résistance, une des étapes les plus importantes dans la conception des fondations de bois est de s'assurer soit que le bois possède une durabilité naturelle suffisante dans l'environnement dans lequel il doit être utilisé pour répondre à la durée de vie de la structure ou de spécifier un niveau adéquat de traitement, et de vérifier que le bois est suffisamment perméable pour l'accepter.

#### **4.4.1 Organismes lignivores**

Certains bois utilisés pour les fondations peuvent faire l'objet d'attaques par un ou l'autre des organismes xylophages communs, à savoir, les champignons lignivores, les termites ou les tarets, en fonction du pays et de la situation particulière dans laquelle ils sont utilisés.

#### **4.4.2 Champignons**

Le bois utilisé en contact avec le sol ou tout autre environnement où il peut être en contact avec de l'oxygène de manière permanente ou intermittente est susceptible d'être attaqué par des champignons lignivores. La résistance à une telle attaque dépendra de la durabilité naturelle des essences concernées et si elles ont ou non été traitées avec un produit de préservation. Les essences de bois présentant une grande durabilité naturelle ou celles convenablement préservées peuvent avoir une durée de vie utile de plusieurs décennies. En outre, la température de l'environnement affectera la vitesse d'endommagement dans un élément de bois infecté.

Les essences de bois non traitées de faible durabilité naturelle qui peuvent durer plusieurs années dans des conditions tempérées, peuvent durer moins d'un an dans des conditions tropicales.

Tout le bois restera exempt de pourriture indéfiniment s'il est conservé en dessous d'un taux d'humidité de 22%, car les champignons lignivores sont des organismes aérobies, leur présence ne peut pas se développer sans une petite quantité d'oxygène libre. La décomposition ne se fera pas dans du bois enfouis dans le sol en-dessous du plus bas niveau de la nappe phréatique permanente. Dans ces situations, par conséquent, les pieux ne nécessitent pas de protection contre la dégradation.

#### 4.4.3 Termites

Dans les pays chauds, la fondation en bois fera l'objet d'une attaque par l'une ou l'autre des nombreuses espèces de termites souterraines. Les termites sont actives dans les régions tropicales et subtropicales, dans les régions humides et arides ou désertiques : certaines espèces se rencontrent dans les régions les plus chaudes des pays tempérés comme, par exemple, dans le sud de la France, mais elles ne sont pas présentes dans les régions les plus froides de ces régions, à l'exception d'un ou deux cas exceptionnels. Dans des conditions favorables, elles sont très destructrices. Dans les régions tropicales, les bois non durables en contact avec le sol seront détruits en quelques semaines. Il y a, cependant, un certain nombre d'essences de bois qui sont résistantes aux termites et qui dureront de nombreuses années dans ces conditions.

#### 4.4.4 Les mollusques térébrants

Dans la plupart des régions du monde, le bois placé en condition marines ou dans l'eau saumâtre est l'objet d'attaques par un certain nombre de mollusques térébrants. Sous les tropiques, ils peuvent faire de graves dommages en quelques mois, à moins que le bois utilisé n'appartienne à une des rares essences résistantes telles que le GreenHeart. Dans les pays tempérés, l'attaque est généralement beaucoup plus lente et souvent sporadique, mais, néanmoins, à l'exception des essences résistantes, le bois est susceptible d'être détruit en quelques années. La présence de tarets a été stimulée en Europe par le rejet d'eau de refroidissement, d'eaux usées et parfois d'effluents industriels provoquant une élévation de la température de l'eau. Il existe deux principaux types de mollusques térébrants, dont chacun s'attaque au bois d'une façon particulière :

- a) genre Terenidae communément appelés Tarets : *Teredo* et *Bankia* partout dans le monde,
- b) genre Pholadidae : *Barnea*, *Zirfea* mais *Martesia* ne se trouvent que dans les eaux tropicales.

La norme NF EN 275 (Produits de préservation du bois — Détermination de l'efficacité protectrice vis-à-vis des organismes térébrants marins) classe la durabilité naturelle des essences aux xylophages marins selon la cotation suivante : D, durable ; M, moyennement durable ; S, sensible.

Les cotations sont calculées une fois par an par des experts dans des laboratoires spécialisés sur des éprouvettes qui passent aux rayons X : le pourcentage de surface des galeries est estimé pour qualifier chaque éprouvette.

#### 4.4.5 Protection du bois

##### 4.4.5.1 Général

La protection contre tous ces organismes lignivores peut être obtenue soit par la sélection d'essences de bois qui sont naturellement résistantes à l'attaque ou par application d'un traitement conservateur.

Le choix dans la pratique s'effectue entre certains feuillus possédant une haute durabilité naturelle mais qui sont étanches aux liquides de conservation et une gamme de bois moins durables qui peuvent être traités avec des conservateurs afin de compenser leur durabilité naturelle inférieure.

##### 4.4.5.2 Bois naturel durable.

L'information sur la résistance aux différents organismes lignivores s'applique au duramen du bois ; l'aubier, même pour les espèces les plus durables, est rapidement attaqué par les organismes lignivores. Quand on utilise des bois durables, il est donc essentiel de préciser le duramen et de s'assurer qu'aucun aubier n'est inclus. Avec quelques essences, comme par exemple le GreenHeart, cela peut être plus difficile car le duramen et l'aubier ne sont pas aisés à distinguer, mais il est très important que cette distinction soit faite, sinon des défaillances prématurées peuvent se produire. Si l'exclusion de l'aubier n'est pratiquement pas possible, et qu'il est estimé que la quantité d'aubier présente conduirait à la perte prématurée de l'intégrité ou de la résistance de l'élément, la zone affectée doit être substituée par une espèce plus durable (voir §6.6.3) ou un matériau tel que l'acier ou le bois comme présenté dans 4.5.1. La durée de vie qui peut être obtenue à partir de n'importe quel bois dépend également d'autres facteurs tels que la taille de l'élément et surtout sur l'environnement particulier dans lequel il sera utilisé et sur l'activité

des organismes lignivores dans la localité. Il est toujours recommandé, par conséquent, d'essayer d'obtenir d'autres informations localement sur la performance des espèces durables, soit auprès des établissements ou laboratoires de recherche sur le bois dans la région ou le pays concerné.

#### **4.4.5.3 Protection de surface**

Le traitement autoclave vide-pression des pieux s'avère être un moyen efficace de protection contre les attaques biologiques. Il dépend de l'imprégnabilité définie par la norme NF EN 350-2. Il existe deux grands types d'agents de préservation du bois utilisés de nos jours lors du processus de traitement sous pression des pieux; les produits en solution huileuse (principalement la créosote issus de la distillation de la houille) et les produits en solution aqueuse (Chromate Cuivre Arsenic (CCA) et Ammoniaque Cuivre Zinc Arsenic (ACZA)).

Ces produits posent des problèmes non résolus de toxicité, rémanence (polluants organiques persistants) et devenir en fin de vie des matériaux traités. La créosote est classée cancérigène de catégorie 2 et depuis le 30 juin 2003, en application de la directive 2001/90/CE, l'utilisation de créosote ou de bois traité à la créosote est très fortement limitée.

Il est donc conseillé de privilégier le bois naturel durable aux traitements sous pression.

Il est également possible de recourir à l'enrobage des éléments en bois dans un film de polyvinyle ou par du polyester armé de fibres de verre.

#### **4.4.5.4 Protection en masse**

Le traitement thermique ou réification est un procédé de traitement en masse du bois par chauffage à une température entraînant un phénomène de transition vitreuse du bois. Faisant l'objet d'une protection industrielle ce procédé ne sera pas détaillé dans ce document.

Ce traitement rend le bois fragile et inapte à être battu dans le sol, et il nécessiterait l'équipement en fours de taille importante (on passerait de 6 m à 10 m minimum, ce qui semble peu envisageable). Si l'aboutement était privilégié et donc des tronçons de 2 m à 3 m produits industriellement, l'éclatement au niveau des aboutages demanderait la pose de manchon et l'usinage préalable.

Version provisoire

## 5 Actions et données géométriques

### 5.1 Actions

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 5.1 Actions » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### 5.2 Données géométriques

#### 5.2.1 Principes généraux

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 5.2.1 Principes généraux » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### 5.2.2 Niveaux du terrain et des interfaces de couches

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 5.2.2 Niveaux du terrain et des interfaces de couches » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### 5.2.3 Niveaux d'eau

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 5.2.3 Niveaux d'eau » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

(6) Le niveau EM peut être défini comme celui correspondant au niveau minimal, EMB celui susceptible d'être dépassé pendant 1 % du temps de référence. Il convient de fixer le niveau EME minimal susceptible d'être atteint pendant la durée de vie de l'ouvrage pour les situations accidentelles.

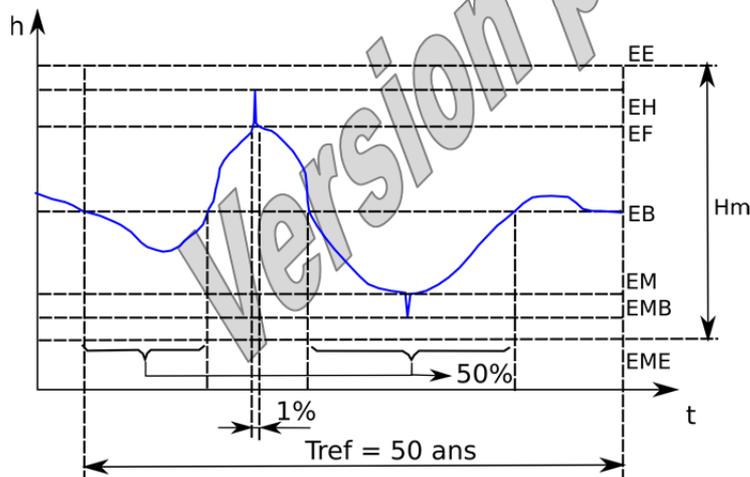
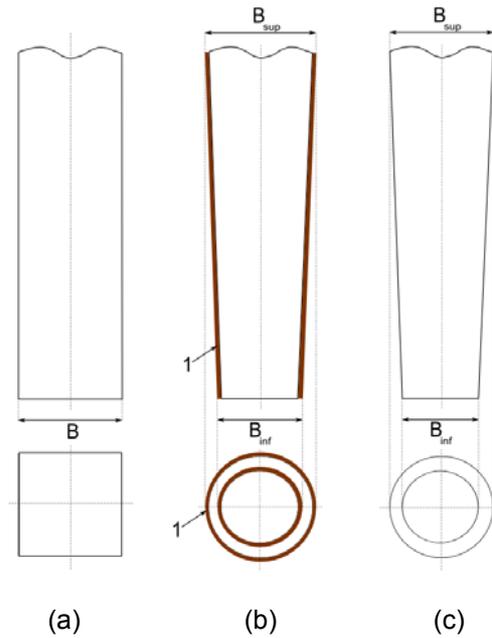


Figure 5.1 – Représentation des niveaux d'eau EB, EH, EF, EB et EM

(7) En fonction de la nature des eaux souterraines (libre, captive) la définition du niveau piézométrique sera utilisée pour définir la hauteur de marnage à considérer définie comme la différence entre le niveau minimal extrême EME et le niveau maximal extrême EE.

$$H_m = EE - EME$$

#### 5.2.4 Caractéristiques géométriques des pieux en bois



Légende :  $B$  : Diamètre du fût ;  $B_{sup}$  : Diamètre en tête ;  $B_{inf}$  : Diamètre en pointe ; 1 : Écorce

Figure 5.1 – Exemples de pieux en bois. (a) Pieu équarri ; (b) Pieu brut ; (c) Pieu écorcé

#### 5.2.4.1 Section du pieu circulaire ou équarrie

- (1) Les pieux peuvent être équarris ou non. S'ils ne le sont pas, ils peuvent être bruts ou écorcés.
- (2) L'axe entre les centres de la pointe et de la tête des pieux doit se situer à l'intérieur des pieux.
- (3) La flèche ne doit pas excéder 1/100 de sa longueur.

Note 3 – L'annexe R traite du cas des imperfections géométriques.

#### 5.2.4.2 Longueur et diamètre

- (1) la longueur et le diamètre des pieux en bois dépendent de la ressource naturelle disponible et de l'emploi.
- (3) La longueur d'un pieu en bois dépend de la hauteur de l'arbre, mais les techniques d'aboutage permettent de l'augmenter (voir annexe A).

NOTE 1 : Les pieux doivent être commandés suffisamment long pour qu'après mise en place, une fois effectué le recépage au niveau approprié, la tête soit propre, saine et exempte de fissuration.

(2) Le diamètre maximal du pieu en bois  $B_{sup}$  est égal à celui de l'arbre débarrassé de ses nœuds et de son écorce. Il est calculé en fonction de la section transversale de l'élément (voir Annexe A).

NOTE 1 : Le diamètre en tête du pieu peut être réduit suite à une phase d'usinage visant à adapter un casque de protection en tête.

(5) Le diamètre de la pointe du pieu est mesuré à la limite entre la partie époincée et la partie non époincée.

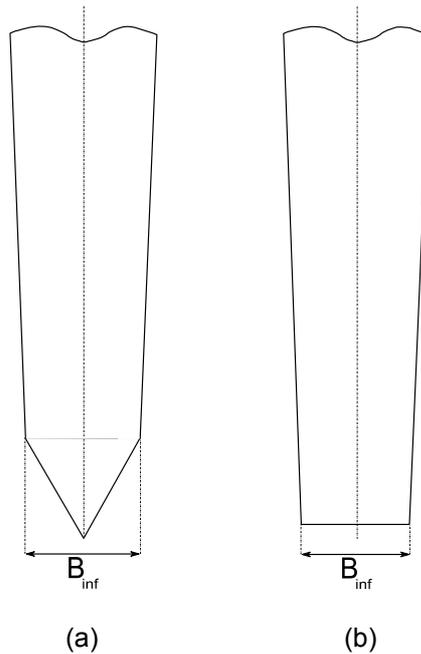


Figure 5.2 – Définition du diamètre en pointe du pieu. (a) Pieu épointé (b) Pieu non épointé

#### 5.2.4.3 Conicité

(1) La conicité  $\omega$  du pieu (exprimée en degré ou en mm/m) est définie à partir de l'expression générale suivante

$$\tan \omega = \frac{B_{sup} - B_{inf}}{2.L}$$

(2) La conicité du pieu dépend de la ressource naturelle disponible. Les croissances longitudinale et radiale de l'arbre dépendent de nombreux facteurs environnementaux, comme la composition du sol à proximité, l'exposition à la lumière solaire ou encore les conditions climatiques. L'ensemble de ces facteurs agit donc sur la conicité de l'arbre.

(3) Le rapport entre le diamètre de la tête et celui de la pointe doit être inférieur à 1,5, ce qui représente, pour un pieu de 10 m de longueur avec un diamètre en tête de 30 cm, une conicité maximale de 5 mm/m.

Le tableau 5.1 donne quelques indications sur la conicité des pieux en bois battus dans le sol en fonction de leur diamètre en pointe, en tête et de leur longueur.

Tableau 5-1. Longueur, diamètre en pointe et en tête et conicité des pieux (modifié d'après Davidian, 1969)

Longueur des pieux (m)	Diamètre mesuré à 1 m sous la tête (cm)	Diamètre en pointe (cm)	Conicité des pieux (mm/m)
5	20 à 22 jusqu'à 25	9 à 13 jusqu'à 15	9
7,5	22 à 24 jusqu'à 27	10 à 16	7,8
10	22 à 25 jusqu'à 30	10 à 19	5,8
12,5	25 à 26 jusqu'à 35	12 à 18 jusqu'à 20	5,6
15	25 à 29 jusqu'à 40	13 à 20	5,3

## 6 Propriétés des terrains et des matériaux

L'intégralité des informations contenue dans les parties « 6.1 Principes généraux » « 6.2 Terrains en place » « 6.3 Matériaux rapportés » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### 6.4 Matériaux constitutifs des fondations profondes

#### 6.4.1 Béton, coulis ou mortier

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 6.4.1 Béton, coulis ou mortier » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### 6.4.2 Acier

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 6.4.2 Acier » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### 6.4.3 Bois

Les contraintes de travail en compression ne doivent pas dépasser, les contraintes de résistance, convenablement pondérées donnés dans la norme NF EN 338 pour la compression parallèle au fil de l'essence de bois utilisée. Dans le calcul des contraintes, il faut tenir compte des contraintes lors de l'installation et de l'utilisation. Il convient de noter que les plus grandes contraintes seront développées pendant la mise en place.

La réduction éventuelle de la section par perçage ou découpe doit être prise en compte.

(1) Le matériau bois est réparti en deux classes différentes : les résineux et les feuillus. Le choix de cette essence sera réalisé dans le projet en fonction de la disponibilité dans les dimensions requises, la durée de vie et le coût.

(2) Les valeurs caractéristiques des propriétés de résistance et de rigidité utilisées dans les calculs de justification des pieux en bois seront définies conformément aux classes de résistances établies dans la norme NF EN 338 relative aux bois de structures (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 Classes de résistance et valeurs des propriétés de résistance, de rigidité et des masses volumiques (modifié d'après la norme NF EN 338 (AFNOR, 2009))

	Résineux												Feuillus							
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
<b>Propriétés de résistance (MPa) (valeurs caractéristiques)</b>																				
Flexion	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	18	24	30	35	40	50	60	70
Traction axiale	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	11	14	18	21	24	30	36	42
Compression axiale	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29	18	21	23	25	26	29	32	34
Cisaillement	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4	3,4	4	4	4	4	4	4,5	5
<b>Propriétés de rigidité (GPa) (valeurs moyennes)</b>																				
Module moyen d'élasticité axiale $E_{moy,Long}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20
Module moyen d'élasticité transversale	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,63	0,67	0,73	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
Module moyen de cisaillement $G_{moy}$	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,59	0,62	0,69	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) (valeurs moyennes)</b>																				
Masse volumique moyenne	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	570	580	640	650	660	750	840	1080

(3) L'attribution de classes acceptées dans l'EN 1912 sont résumées dans le tableau 6.2 pour quelques essences susceptibles d'être utilisées comme pieux.

Tableau 6.2 Exemples de classes de résistances maximales pour les différentes essences utilisées dans la construction

Appellation commerciale des essences	Classes de résistance maximales
Sapin – Épicéa	C30
Douglas – Peuplier	C24
Pins sylvestre et maritime	C27
Chêne	D30
Azobé	D70

NOTE 1 : L'acacia et le châtaignier peuvent être assimilés à une classe de résistance D30.

(4) La durabilité des bois peut être évaluée à l'aide des normes NF EN 335 ; EN 460 et FD P20 651.

Les pieux sont selon les classes d'emploi définies par la Norme NF EN 335 soit:

- en classe 4 car soumis à des humidifications fréquentes et permanentes, en contact avec le sol, immergés totalement ou partiellement en eau douce (H>20%) ;
- en classe 5 car en contact avec l'eau de mer : immergé totalement ou partiellement.

Une fondation en bois selon le Fascicule FD P20 651 se caractérise par une situation de confinement (conception piégeante) d'une pièce de bois massive (massivité forte) de bois (BMA) dans le sol. Le concept de conditions climatiques d'humidification n'est pas pertinent pour les fondations mais on pourra utiliser le cas humide en première approche.

Le Fascicule FD P20 651 propose des durabilités naturelles telles que récapitulées dans le tableau 6.3.

Tableau 6.3 Exemples de choix de l'essence en fonction de la classe d'emploi selon FD P20-265

	Classe 4	Classe 5
Sapin – Épicéa – Mélèze	N	N
Douglas – Peuplier	N	N
Pins sylvestre et maritime	N	N
Châtaignier <sup>(1)</sup>	L1	N
Acacia – Chêne <sup>(1)</sup> rouvre et/ou pédonculé	L1	N
Azobé	L1	L1

L3>100 ans ; L2 entre 50 et 100 ans ; L1 entre 10 et 50 ans ; N à ne pas prescrire

(1) hors sol

Si le bois envisagé n'est pas durable au sens du Fascicule FD P20 651, il convient de le traiter (voir §4.4.5) afin de lui conférer une durabilité supérieure (tableau 6.4) ou de définir une épaisseur sacrificiée à la dégradation (voir § 12.4).

Tableau 6.4 Exemple de choix de l'essence en cas de traitement en fonction de la classe d'emploi selon FD P20-265

	Classe 4	Classe 5
Pins sylvestre et maritime	L1	N

## **7 Situations de calcul, sollicitations et combinaisons d'actions**

L'intégralité des informations contenue dans les parties « 7.1 Situations de calcul » « 7.2 Combinaison d'actions » «7.3 Dispositions applicables au calcul des fondations profondes » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **8 Règles générales de justification des fondations profondes**

L'intégralité des informations contenue dans les parties « 8.1 Généralités » « 8.2 États-limites ultimes » « 8.3 États limites de service » « 8.4 Modèles de calcul » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **8.5 Fondation profonde isolée soumis à un effort axial**

Dans le cas où le pieu en bois comporte des éléments aboutés ou une rallonge dans un matériau différent, la transmission des efforts verticaux doit être vérifiée au niveau de chaque connection.

### **8.6 Fondation profonde isolée sous un effort transversal**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.6 8.6 Fondation profonde isolée sous un effort transversal » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Le comportement du pieu en bois sous sollicitations transversales n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie et ne peut donc être validé. La littérature contient néanmoins des articles traitant de ce sujet.

#### **8.6.2.1 Rigidité de flexion**

L'utilisation de pieux constitués de plus d'un élément, d'une rallonge en bois d'une classe de durabilité supérieure, en acier ou en béton, dans la zone de marnage ou de battement de la nappe, nécessitera un assemblage par connecteurs, aboutages ou emboîtements aptes à reprendre les éventuels efforts transversaux.

Ces dispositifs d'aboutage peuvent créer des zones de variation de résistance dans le pieu lorsqu'ils sont soumis à un effort transversal et il y a donc lieu de vérifier le transfert de cet effort. La présence de zones d'aboutage à proximité de points de flexion maximale doit être évitée.

La rigidité de flexion de la fondation profonde doit être déterminée en fonction de la nature des connections prévues. La diminution du diamètre du pieu par dégradation et de l'épaisseur de l'acier par corrosion doit être prise en compte.

## **8.7 Comportement d'un groupe de fondations profondes**

### **8.7.1 Domaine d'application**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.7.1 Domaine d'application » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **8.7.2 Comportement axial**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.7.2 Comportement axial » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **8.7.3 Comportement transversal**

Le comportement d'un groupe de pieux en bois sous sollicitations transversales n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie et ne peut donc être validé. L'existence de nombreux ouvrages relevant de cette configuration et les retours d'expérience disponibles permettent d'envisager cette utilisation sans restrictions particulières.

L'utilisation de dispositifs d'aboutage doit être prise en compte conformément de l'Article 8.6.

Les pieux placés sur la périphérie du groupe situés perpendiculairement au sens du déplacement et dans la direction de celui-ci ne comporteront pas de systèmes d'aboutage.

#### **8.7.4 Comportement de la semelle de liaison**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.7.4 Comportement de la semelle de liaison » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **8.8 Prise en compte des déplacements d'ensemble du terrain**

#### **8.8.1 Principes**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.8.1 Principes » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### **8.8.2 Frottement négatif sur une fondation profonde isolée**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.8.2 Frottement négatif sur une fondation profonde isolée » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### **8.8.3 Frottements négatifs sur un ensemble d'éléments de fondation profonde**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.8.3 Frottements négatifs sur un ensemble d'éléments de fondation profonde » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### **8.8.4 Cumul des frottements négatifs et des charges dues aux actions variables**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 8.8.4 Cumul des frottements négatifs et des charges dues aux actions variables » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### **8.8.5 Comportement d'un élément isolé vis-à-vis de déplacements horizontaux du terrain**

Le comportement du pieu en bois aboutés sous sollicitations transversales doit faire l'objet d'une étude spécifique.

### **8.9 Essais de pieux à réaliser**

Un essai de pieu doit être réalisé dès lors qu'un ouvrage qualifié de « permanent » (opposé à un ouvrage provisoire) est construit sur des pieux en bois.

Les recommandations établies dans la norme NF P 94-150-1 doivent être suivies.

## 9 État limite de portance

L'intégralité des informations contenue dans les parties « 9.1 Principes généraux » « 9.2 Portance d'une fondation profonde isolée » « 9.3 Portance d'un groupe de fondations profondes » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## 10 État limite de traction

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 10.1 Principes généraux » « 10.2 Résistance de traction d'une fondation profonde isolée » « 10.3 Résistance de traction d'un groupe de fondations profondes » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **11 Résistance aux charges transversales**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 11.1 Principes généraux » « 11.2 Fondation profonde isolée » « 11.3 Groupe de pieux » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## 12 Résistance structurale d'un pieu

L'intégralité des informations contenue dans les parties « 12.1 Principes généraux » « 12.2 Pieux ou éléments de fondation en béton armé » « 12.3 Pieux métalliques en acier de construction » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### 12.3.3 Pieux en bois

#### 12.3.3.1 Systèmes d'aboutage

(1) Dans le cas de pieux constitués d'éléments aboutés, des essais de convenance devront être réalisés pour fournir les résistances caractéristiques des zones d'aboutage sous les cas de charge considérés.

#### 12.3.3.1 Épaisseur sacrifiée à la dégradation

(1) Lorsque les éléments de fondation ne sont pas munis d'une protection reconnue efficace contre la dégradation (voir §4.4 et §6.4), les calculs justificatifs sont conduits en neutralisant, sur l'ensemble du périmètre extérieur, une épaisseur sacrifiée à la dégradation.

(2) Il est nécessaire de définir une épaisseur sacrifiée à la dégradation au niveau de la zone de marnage fonction de la durée de vie de l'ouvrage (Norme NF EN 1990 et son annexe) et des vecteurs d'attaque envisagés (mollusques térébrant en milieu marin, attaque fongique et bactérienne en milieu terrestre). Lorsqu'elle n'est pas fixée par le marché, la valeur de cette épaisseur sacrifiée fait l'objet d'une proposition soumise au maître d'œuvre : cette valeur ne pouvant toutefois être inférieure à 5 millimètres (Notes 1 et 2).

NOTE 1 – Pour la zone immergée de manière non permanente située au dessus de EME sur une longueur Hm, on peut se référer aux valeurs regroupées dans le tableau 12.3.2.1 qui donne, à titre indicatif, des valeurs moyennes de diminution d'épaisseur par face exposée que l'on pourra adopter pour le bois non traité et non protégé en l'absence d'études spécifiques. Par défaut, les valeurs les plus défavorables seront employées.

Tableau 12.3.2.1 - Vitesse de diminution d'épaisseur suivant l'essence déterminée selon l'EN 252 (en millimètre/an)

	Argile Limon	Sols intermédiaires	Sables Grave
Pins	6,5	12	6
Douglas	-	5,5	1
Epicéa	-	8,4	5
Hêtre	-	20	9
Chêne	-	3,6	1,2
Acacia	-	-	-

NOTE 2 – Pour la zone immergée en permanence située sous EME, on peut se référer aux valeurs regroupées dans le tableau 12.3.2.2 qui donne, à titre indicatif, des valeurs moyennes de diminution d'épaisseur par face exposée que l'on pourra adopter pour le bois non traité et non protégé en l'absence d'études spécifiques. Par défaut, les valeurs les plus défavorables seront employées.

Tableau 12.3.2.2 - Vitesse de diminution d'épaisseur suivant l'essence déterminées à partir de retour d'expérience entre 50 et 2000 ans (en millimètre/an)

	Argile Limon	Sols intermédiaires	Sables Grave
Pins	0,5	-	0,8
Douglas	-	-	0,5
Epicéa	-	-	0,8
Hêtre	-	-	-
Chêne	0,20	0,15	0,10

Acacia	-	-	-
--------	---	---	---

(3) Il est nécessaire de maintenir l'accessibilité au pieu pour réaliser des visites de diagnostics mettant en œuvre des méthodes de contrôle non destructif ou des prélèvements pour analyse et des essais de poinçonnement permettant de définir la conformité de la géométrie par rapport au dossier des ouvrages exécutés et la vitesse de dégradation définie dans le projet.

(4) S'il n'est pas possible de définir une loi de dégradation de l'essence envisagée, on privilégiera dans la zone de marnage une solution avec une rallonge de longueur Hm en matériau dont la vitesse de dégradation ou corrosion est connue :

- bois de classe de dégradation supérieure (voire tropical),
- béton ou acier.

Version provisoire

### **13 Stabilité générale**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 13.1 Généralités » « 13.2 Principe de calcul » « 13.3 Modèles de calcul » « 13.4 Mécanismes de rupture » « 13.5 Facteur partiel de modèle  $\gamma_{R;d}$  » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **14 Justifications à l'état limite de service**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 14.1 Généralités » « 14.2 Mobilisation du terrain par une fondation profonde soumise à une charge axiale » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **14.3 Déplacement et déformation d'une fondation profonde**

#### **14.3.1 Charge axiale**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 14.3.1 Charge axiale » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### **14.3.2 Charge transversale**

Le comportement des pieux en bois sous sollicitations transversales n'a pas fait l'objet d'études approfondies et ne peut donc être validé à ce stade. La littérature contient néanmoins des articles traitant de ce sujet.

Version provisoire

## **15 Documents justificatifs des calculs**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « 15 Documents justificatifs des calculs » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## Annexe A (informative)

### Les différents types de pieux et les dispositions particulières de conception

#### A.1 Les différents types de pieux

(1) Les pieux sont classés selon leur technique de mise en œuvre suivant le tableau A.1 (Note 1).

**Tableau A.1 – Classes et catégories de pieux**

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
	21	Battu bois	BB	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

NOTE 1 – La classe 1 bis complète la classe 1.

(2) Cette annexe complète les normes d'exécution présentées dans le tableau A.1, en précisant, pour leur justification dans le cadre de la présente norme, certains points particuliers de l'exécution des fondations profondes en particulier pour les quatre catégories de micropieux.

(3) En l'absence d'expérience comparable, il convient de réaliser en début de chantier un pieu de faisabilité (NF EN 1536, NF EN12699, NF EN 14199) permettant de valider la technique de mise en œuvre suivant le tableau A.1.

## **A.2 Pieux forés (Classe 1)**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.2 Pieux Forés (classe 1) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

## **A.3 Pieux forés tarière creuse (Classe 2)**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.3 Pieux Forés à la Tarière Creuse (classe 2) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

## **A.4 Les pieux vissés (Classe 3)**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.4.1 Pieux Vissés (classe 3) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

## **A.5 Pieux battus fermés (Classe 4)**

L'intégralité des informations contenue dans les parties « A.5.1 Pieu battu préfabriqué en béton armé [BPF] ou précontraint [BPR] » « A.5.2 Pieux métalliques battus enrobés [BE] » « A.5.3 Pieux battus moulés [BM] » « A.5.4 Pieux caisson acier fermé [BAF] » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **A.5.1 Pieux en bois [BB, n°21]**

(1) Il s'agit d'un pieu constitué en bois à partir d'un tronc d'arbre. Ce tronc peut être équarri, écorcé ou non écorcé.

(2) Le pieu en bois peut être constitué d'un seul élément ou de plusieurs éléments identiques ou de différentes natures, assemblés par des systèmes d'aboutage antérieurement au battage ou au vibrage.

(3) La tête et la pointe du pieu doivent être protégées lors de la mise en place afin de limiter leur fissuration, d'éviter leur fracturation et de conserver l'intégrité du pieu lors des opérations de mise en place.

#### **A.5.1.1 Mise en place**

(1) Une mise en place difficile des pieux de bois est susceptible de provoquer l'éclatement des têtes, écrasement des pointes et de générer des fissures.

(2) Il convient de choisir l'énergie transférée par le dispositif de mise en place de sorte que la contrainte maximale en compression générée ne dépasse pas 0,8 fois la résistance caractéristique de compression mesurée parallèlement aux fibres du bois.

NOTE 1 - En plus de la perte de résistance structurelle, de tels dommages pourraient annuler l'effet d'agents de conservation ou accélérer la pénétration d'agent de détérioration dans le pieu. Le risque de détériorer le pieu lors de la mise en place peut être réduite en limitant la hauteur de chute et le nombre de coups de marteau. Il est souhaitable que le poids du marteau soit égal au poids du pieu pour des conditions de mise en place difficiles et pas inférieur à la moitié du poids du pieu pour une mise en place facile. Pour réduire le recours au battage lourd, les charges de travail sur des pieux en bois sont souvent

limitées à environ 300 kN sur un pieu de 300 mm x 300 mm. Des contraintes suffisamment fortes pour endommager le pieu lors de la mise en place peuvent être générées si le marteau n'est pas centré sur la tête de pieu et si la surface de frappe n'est pas perpendiculaire à l'axe du pieu ou si le pieu sort du système de guidage.

(3) Durant le battage ou le vibrage, les pieux ne doivent pas s'écarter de plus de 75 mm de leurs positions prévues ; une plus grande tolérance peut être permise pour les pieux enfoncés sur l'eau.

(4) Tous les pieux doivent faire l'objet d'enregistrement de paramètres de mise en place.

### A.5.1.2 Équipement en tête : Casques

(1) Avant de battre ou vibrofoncer, des précautions pour empêcher l'éclatement du bois doivent être prises : ceci peut être réalisé en coupant la tête du pieu perpendiculairement à l'axe du pieu et en ajustant tout procédé jugé efficace.

(2) Il existe différentes méthodes de protection de la tête des pieux :

- Mise en place d'une frette consistant en un anneau de fer chaud cerclé. En se refroidissant, l'anneau de fer se resserme et vient comprimer les fibres du bois et ainsi augmenter leur résistance. La frette est située à quelques centimètres sous la surface des têtes afin d'éviter tout contact avec la masse frappante lors de la mise en œuvre du pieu dans le sol (Figure A.5.1.2.1 a).

- Fixation d'un casque métallique en tête de pieu ayant pour objectifs de fournir une surface libre lors du contact entre la masse frappante et le pieu et d'uniformiser la transmission de l'énergie fournie lors de l'impact dans toute la tête du pieu. Le casque est alors adapté à la tête du pieu afin de maintenir un alignement concentrique entre la masse frappante et le pieu. Un amortisseur situé entre la tête du pieu et le casque peut également mis en place (Figure A.5.1.2.1).

- Mise en place d'un dé en béton renforcé avec des armatures métalliques. Ce dé en béton permet d'une part de maintenir le pieu constamment immergé dès lors qu'il se situe au niveau de la zone de marnage de la nappe et d'autre part sert de connexion entre le pieu et la partie supérieure de l'ouvrage (Figure A.5.1.2.1 c).

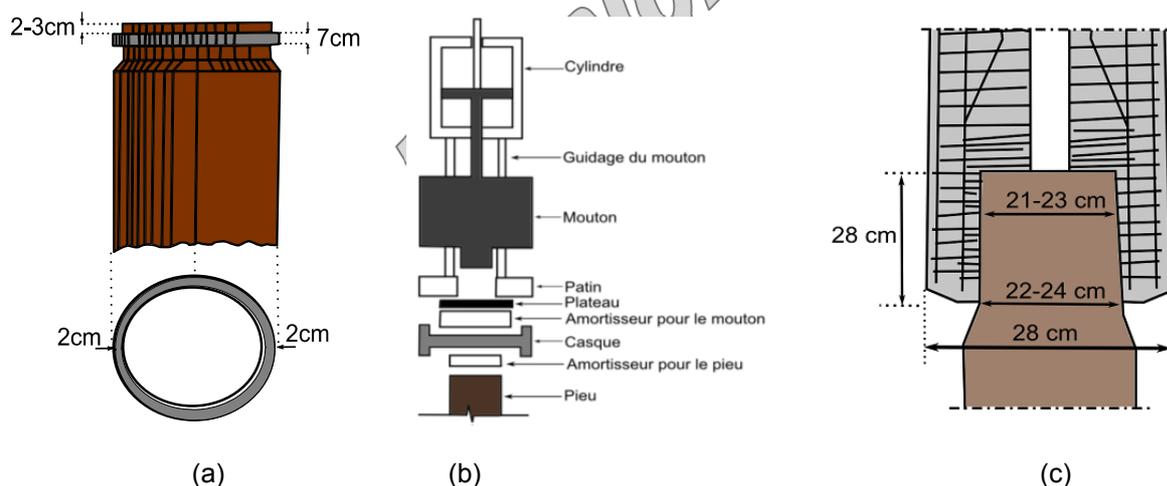


Figure A.5.1.2.1 – Exemples de protection de la tête du pieu. (a) Frette ; (b) Casque métallique ; (c) Dé en béton avec armatures métalliques

(3) La tolérance de réalisation de la tête est un hors plan égal au 1/10 de diamètre (100 mm/m).

(4) Après avoir battu, les têtes des pieux doivent être recépés jusqu'au bois intact et traitées si nécessaire avec un conservateur avant intégration dans la structure.

(5) La tolérance de planéité est identique à celle appliqué avant mise en œuvre.

(6) Lorsque des pieux de résineux non traités constituent les fondations d'une structure permanente, un grand soin devra être pris afin de s'assurer qu'ils sont placés sous le niveau le plus bas de la nappe. Ils doivent ensuite être complétés, si nécessaire, par une rallonge en matériau de durabilité adaptée.

(7) Si des rallonges en béton sont utilisées, les pieux bois doivent être intégrés sur une profondeur suffisante pour assurer la transmission de la charge. Le béton doit être d'au moins 150 mm d'épaisseur autour des pieux et doit être renforcée de manière appropriée pour empêcher la fissuration.

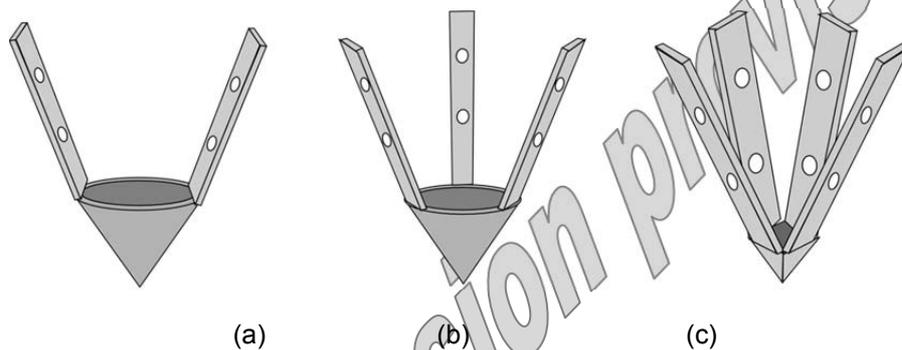
(6) Les rallonges doivent être conformes à la norme appropriée relative au matériau et aux spécifications.

#### A.5.1.3 Équipement en pied : sabot

(1) La base du pieu doit être façonnée et protégée de manière adaptée aux terrains à traverser. Aucune protection n'est exigée lorsque la mise en place se fait entièrement dans les sols mous (typiquement  $p < 1$  MPa). Dans les autres sols, sauf si une expérience comparable montre le contraire, il convient que la pointe soit protégée.

(2) Il existe différentes méthodes de protection de la pointe des pieux :

- chauffage du bois de la pointe sans atteindre la calcination afin d'augmenter sa résistance (dans les sols fins) ;
- Protection avec un cône ou un sabot métallique maintenu par deux, trois ou quatre branches (figure A.5.1.3.1).



**Figure A.5.1.3.1 – Exemples de protection de la pointe du pieu. (a) Cône à deux branches (b) cône à trois branches; (c) Sabot à quatre branches**

NOTE 1 - La base du pieu peut être façonnée plane lors de la mise en place dans des terrains mous (voir annexe B) ou de forme conique dans des terrains fermes.

(3) La tolérance de planéité est identique à celle appliqué à la tête.

(4) La forme doit être symétrique autour de l'axe du pieu.

(5) Les sabots doivent être concentriques et fermement fixés à la pointe. La zone de contact entre le sabot et le bois doit être suffisante pour éviter un dépassement de la résistance à la compression du bois au cours de la mise en place.

(6) Les sabots doivent être conformes à la norme appropriée relative au matériau et aux spécifications.

#### A.5.1.4 Équipement intermédiaire : Aboutage

(1) Quand il est nécessaire d'utiliser des pieux formés à partir de deux ou plusieurs tronçons, un système d'aboutage permettant l'assemblage entre deux éléments constitutifs du pieu en bois est utilisé.

NOTE 1 - La connection des tronçons peut être réalisée extérieurement par des manchons ou intérieurement par des inserts.

NOTE 2 - Plusieurs essences aux propriétés mécaniques diverses peuvent être utilisées (voir §6).

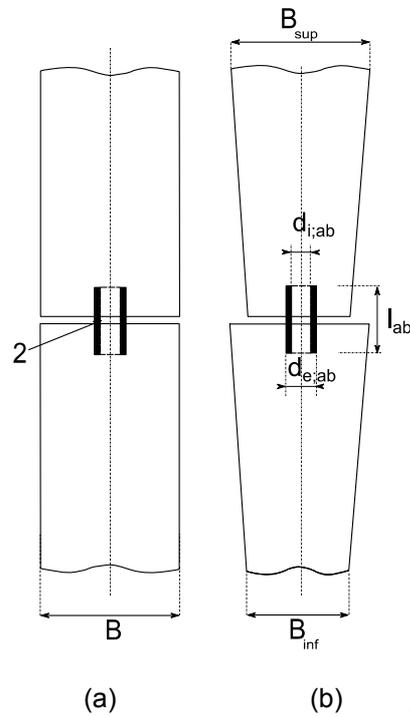
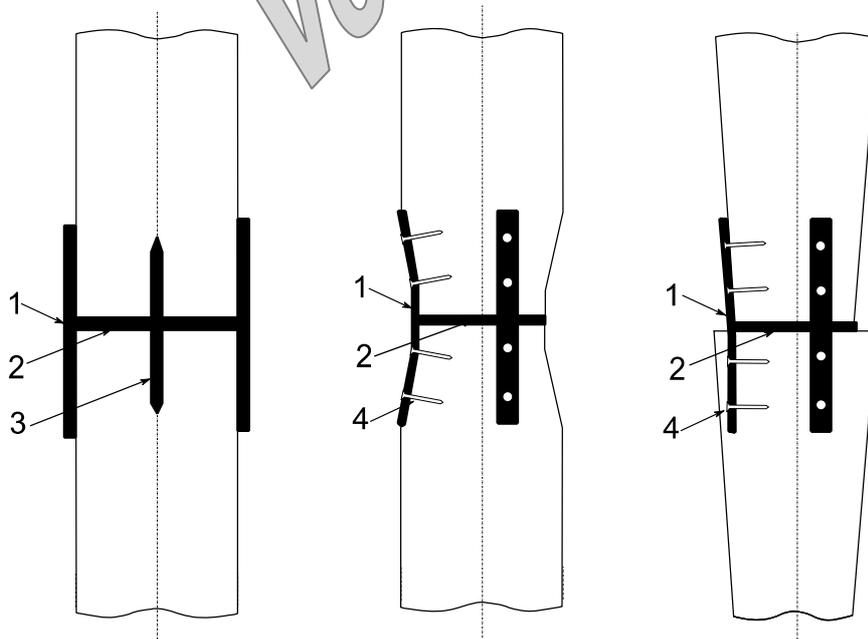


Figure A.5.1.4.1 – Exemples de pieux en bois aboutés. (a) Pieux équarris aboutés avec dispositif d’aboutage (2) ; (b) Pieux bruts aboutés

(2) Les différents systèmes d’aboutage sont :

- Aboutage avec goujon métallique central et manchon extérieur (figure A.5.1.4.2a),
- Aboutage avec goujon métallique et éclisses latérales (figure A.5.1.4.2b et c),
- Aboutage avec tubes métalliques (figure A.5.1.4.1),



(a)

(b)

(c)

**Figure A.5.1.4.2 – Exemples de techniques d'aboutage. (a) avec goujon métallique (3) ; (b) avec éclisses sur éléments équarris (1) ; (c) avec éclisses sur éléments bruts**

NOTE 1 - Il peut s'agir des plaques de bois ou d'acier ou de profilés en acier, tels que des demi-tubes ou des cornières soudées ensemble pour former une boîte conçue pour développer la résistance et la rigidité nécessaires. Les pieux ronds peuvent être fixés avec des tubes.

NOTE 2 - Ces connecteurs peuvent être fixés par cloutage ou vissage ou mis en place en force.

(3) Les surfaces d'aboutage doivent être coupées à angle droit pour assurer un contact sur toute la section transversale entière du pieu.

(4) La tolérance de planéité est identique à celle appliqué à la tête.

### **A.5.2 Pieux battus acier ouvert (Classe 5, [BAO, n°13])**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.6 Pieux battus acier ouvert (Classe 5, [BAO, n°13]) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **A.5.3 Profilés H battus (Classe 6)**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.7 Profilés H battus (Classe 6) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **A.5.4 Palplanches battues (Classe 7, [PP, n°16])**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.8 Palplanches battues (Classe 7, [PP, n°16]) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

### **A.5.5 Micropieu (Classes 1 bis et 8)**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « A.9 Micropieu (Classes 1 bis et 8) » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

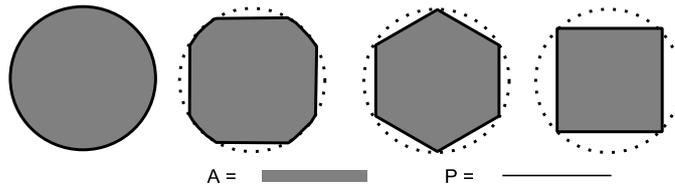
## **A.6 Surfaces et périmètres des éléments de fondation**

(1) Deux méthodes sont utilisées pour calculer la section transversale des pieux en bois (Figure A.2.1) :

- Pour les pieux en bois coniques, le calcul de la surface transversale est réalisé avec un diamètre « moyen », correspondant à la moyenne des diamètres en tête (mesuré à 1 m de l'extrémité) et en pointe de pieu.

- La section transversale des pieux en bois est calculée en discrétisant les pieux en n tronçons. Le diamètre « moyen » de chaque tronçon correspond à la moyenne des diamètres en « tête » et en « pointe » de tronçon.

(2) La section A à considérer et le périmètre P de frottement sont définis dans la Figure A.2.1.



**Figure A.2.1 — Aire A des sections transversales et périmètre P des pieux en bois**

(3) Il convient qu'un abattement soit fait pour tenir compte des réductions de sections occasionnées par des trous et entailles (voir annexe R).

(4) Lorsqu'il y a risque de dégradation, une section réduite de bois est prise en compte dans les calculs, sauf dispositions particulières pour éviter la dégradation.

Version provisoire

## **Annexe B (informative)**

### **Détermination des catégories conventionnelles de terrain**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe B Détermination des catégories conventionnelles de terrain » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## Annexe C (normative)

### Facteurs partiels pour les états limites ultimes

#### C.1 Préambule

(1) Cette annexe définit les facteurs partiels  $\gamma$  pour les états limites ultimes, dans des situations durables ou transitoires, à utiliser pour la vérification des fondations profondes selon l'approche 2 préconisée par l'annexe nationale NF P 94-251-2 de l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1) (Note 1).

NOTE 1 – Certains cas peuvent relever d'une justification selon l'approche 3 notamment en matière de stabilité générale.

#### C.2 Facteurs partiels pour la vérification des états limites pour les structures (STR) et géotechnique (GEO)

##### C.2.1 Facteurs partiels pour les actions ( $\gamma_F$ ) ou les effets des actions ( $\gamma_E$ )

(1) Pour la vérification des états limites pour les structures (STR) et géotechniques (GEO), on doit appliquer aux actions ( $\gamma_F$ ) ou aux effets des actions ( $\gamma_E$ ) les facteurs partiels suivants :

- $\gamma_G$  pour les actions permanentes favorables ou défavorables ;
- $\gamma_Q$  pour les actions variables défavorables ou favorables.

(2) La valeur à donner à ces facteurs partiels est indiquée dans le tableau C.2.1.

**Tableau C.2.1 — Facteurs partiels pour les actions ( $\gamma_F$ ) ou les effets des actions ( $\gamma_E$ )**

Action		Symbole	Ensemble <sup>b</sup>	
			A1 <sup>a</sup>	A2
Permanente	Défavorable	$\gamma_{Gsup}$	1,35	1,0
	Favorable	$\gamma_{Ginf}$	1,0	1,0
Variable	Défavorable	$\gamma_{Qsup}$	1,5	1,3
	Favorable	$\gamma_{Qinf}$	0	0

<sup>a</sup> la valeur de 1,5 pour les charges défavorables est en général réduite à 1,35 pour les ponts.

<sup>b</sup> le jeu A1 concerne les approches 2 ou 3 et le jeu A2 seulement l'approche 3.

##### C.2.2 Facteurs partiels pour les paramètres du sol ( $\gamma_M$ )

(1) Pour la vérification des états limites de la structure (STR) et géotechniques (GEO), on doit appliquer aux résistances des sols les facteurs partiels ( $\gamma_M$ ) suivants :

- $\gamma_{\varphi'}$  pour la tangente de l'angle de frottement interne,
- $\gamma_{c'}$  pour la cohésion effective,
- $\gamma_{cu}$  pour la cohésion non drainée,
- $\gamma_{qu}$  pour la résistance en compression simple.
- $\gamma_\gamma$  pour le poids volumique

(2) La valeur à donner à ces facteurs partiels est indiquée dans le tableau C.2.2.

**Tableau C.2.2 — Facteurs partiels pour les paramètres du sol ( $\gamma_M$ )**

Paramètres du sol	Symbole	Ensemble <sup>b</sup>	
		M1	M2
Angle de frottement interne <sup>a</sup>	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Compression simple	$\gamma_{qu}$	1,0	1,4
Poids volumique	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0
<sup>a</sup> ce facteur est appliqué à $\tan \varphi'$ <sup>b</sup> le jeu M1 concerne l' approches 2 et le jeu M2 l'approche 3.			

### C.2.3 Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour la portance et la résistance de traction des pieux

(1) Pour les fondations sur pieux et les vérifications des états limites de la structure (STR) et géotechniques (GEO), on doit appliquer aux résistances des sols les facteurs partiels ( $\gamma_R$ ) suivants :

- $\gamma_b$  pour la résistance de pointe ;
- $\gamma_s$  pour la résistance de frottement axial sur des pieux en compression ;
- $\gamma_t$  pour la résistance totale/combinée des pieux en compression ;
- $\gamma_{s,t}$  pour la résistance de frottement axial sur le fût des pieux en traction.

(2) Les valeurs à donner à ces facteurs partiels selon le type de pieux sont indiquées dans le tableau C.2.3.1.

**Tableau C.2.3.1 — Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les pieux – Situations durables et transitoires**

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	$\gamma_b$	1,1	1,1	1,1
Fut (compression) <sup>a</sup>	$\gamma_s$	1,1	1,1	1,1
Total/combine (compression) <sup>a</sup>	$\gamma_t$	1,1	1,1	1,1
Fût en traction <sup>a</sup>	$\gamma_{s,t}$	1,15	1,15	1,15
<sup>a</sup> conforme aux tableaux A.6 à A.8 de l'annexe A de NF EN 1997-1 – Jeu R2.				

**Tableau C.2.3.2 — Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les pieux – Situations accidentelles**

Résistance	Symbole	Pieux foncés	Pieux forés	Pieux à la tarière continue (CFA)
Pointe	$\gamma_b$	1,0	1,0	1,0
Fut (compression)	$\gamma_s$	1,0	1,0	1,0
Total/combine (compression)	$\gamma_t$	1,0	1,0	1,0
Fût en traction	$\gamma_{s,t}$	1,05	1,05	1,05

#### C.2.4 Facteurs de corrélation pour déterminer la résistance caractéristique de portance et la résistance de traction des pieux

L'intégralité des informations contenue dans la partie « C.2.4 Facteurs de corrélation pour déterminer la résistance caractéristique de portance et la résistance de traction des pieux » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

#### C.2.5 Facteurs partiels de la résistance des terres ( $\gamma_R$ ) pour la stabilité générale

(1) Pour les analyses de la stabilité générale des structures fondées sur pieux (GEO), on doit appliquer aux résistances des terres, le facteur partiel ( $\gamma_{R,e}$ ) indiqué dans le tableau C.2.5.1.

**Tableau C.2.5.1 — Facteurs partiels de la résistance des terres ( $\gamma_R$ ) pour la stabilité générale**

Résistance	Symbole	Ensemble	
		R2	R3
Résistance globale au cisaillement sur une surface de rupture	$\gamma_{R,e}$	1,1	1,0

### C.3 Facteurs partiels pour la vérification de l'état limite ultime de soulèvement global (UPL)

#### C.3.1 Facteurs partiels ( $\gamma_F$ ) pour les actions

(1) Pour la vérification de l'état limite de soulèvement global (UPL), on doit appliquer aux actions les facteurs partiels ( $\gamma_F$ ) suivants :

- $\gamma_{G,dst}$  pour les actions permanentes défavorables déstabilisatrices,
- $\gamma_{G,stab}$  pour les actions permanentes favorables stabilisatrices,
- $\gamma_{Q,dst}$  pour les actions variables défavorables déstabilisatrices.

(2) La valeur à donner à ces facteurs partiels est indiquée dans le tableau C.3.1.1.

**Tableau C.3.1.1 — Facteurs partiels pour les actions ( $\gamma_F$ )**

Action	Symbole	Valeur
Permanente		
Défavorable <sup>a</sup>	$\gamma_{G,dst}$	1,0
Favorable <sup>b</sup>	$\gamma_{G,stab}$	0,9
Variable		
Défavorable <sup>a</sup>	$\gamma_{Q,dst}$	1,5
<sup>a</sup> déstabilisatrice		
<sup>b</sup> stabilisatrice		

#### C.3.2 Facteurs partiels pour les paramètres des sols et les résistances

(1) Pour la vérification de l'état limite de soulèvement global (UPL), lorsqu'on prend en compte une résistance au soulèvement  $R_d$ , on doit appliquer aux paramètres des sols et aux résistances les facteurs partiels suivants :

- $\gamma_\phi$  pour la tangente de l'angle de frottement interne,
- $\gamma_c$  pour la cohésion effective,
- $\gamma_{cu}$  pour la cohésion non drainée,
- $\gamma_{s,t}$  pour la résistance de traction des pieux,
- $\gamma_a$  pour la résistance de l'ancrage.

(2) La valeur à donner à ces facteurs partiels est indiquée dans le tableau C.3.2.1.

**Tableau C.3.2.1 — Facteurs partiels pour les paramètres des sols et les résistances**

Paramètres du sol	Symbole	Valeur
Angle de frottement interne <sup>a</sup>	$\gamma_\phi^a$	1,25

Cohésion effective	$\gamma_c'$	1,25
Cohésion non drainée	$\gamma_{cu}$	1,40
Résistance de traction d'un pieu	$\gamma_{s,t}$	1,40
Résistance de traction d'un ancrage	$\gamma_a$	1,40
<sup>a</sup> ce facteur est appliqué à $\tan\phi'$ .		

Version provisoire

## **Annexe D (informative)**

### **Détermination de la hauteur d'encastrement équivalente $D_e$**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe D Détermination de la hauteur d'encastrement équivalente  $D_e$  » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe E (informative)**

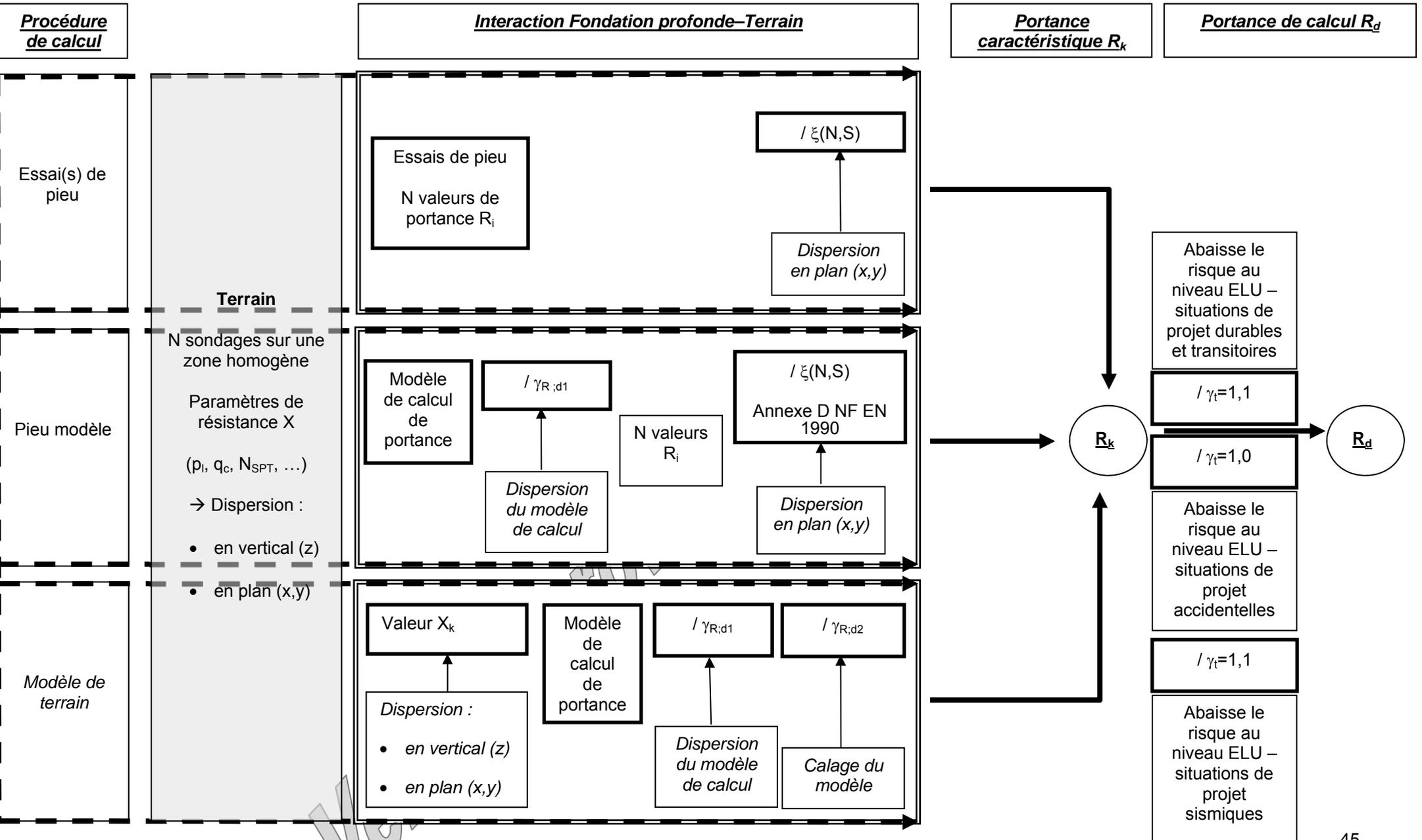
### **Calcul de la valeur de la portance et /ou de la résistance de traction d'une fondation profonde – Synoptique et exemples**

L'intégralité des informations contenue dans la partie «Annexe E Calcul de la valeur de la portance et /ou de la résistance de traction d'une fondation profonde – Synoptique et exemples » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Le synoptique « Schéma de calcul de la valeur de portance d'une fondation profonde » ci-après peut être utilisé pour mettre en œuvre correctement les différents coefficients partiels, pour l'estimation de la valeur de calcul de la portance  $R_{c;d}$  et/ou de la résistance de traction  $R_{t;d}$  d'un pieu à partir de la méthode basée sur les essais de pieux ou de la procédure du « pieu modèle »,

Version provisoire

# Schéma de calcul de la portance ou de la résistance à la traction d'une fondation



## Annexe F (normative)

### Portance limite et résistance limite de traction à partir de la méthode pressiométrique

#### F.1 Préambule

(1) Cette annexe donne les règles pour déterminer la portance limite et la résistance limite de traction d'une fondation profonde isolée sous sollicitation axiale à partir des essais en place au pressiomètre "Ménard" et en particulier de la pression limite pressiométrique  $p_i$ .

(2) Cette méthode ne s'applique pleinement que pour les sols (Note 1) et les classes de terrain indiquées dans l'annexe B.

NOTE 1 – Les aspects spécifiques au comportement des roches sortent du domaine de cette norme. Il convient d'apprécier dans quels cas une fondation dite "au rocher" peut être justifiée par les méthodes proposées et dans quels cas le recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches est nécessaire.

(3) Cette méthode complète les sections 9, 10 et 14 de la présente norme qui traitent des justifications à faire respectivement aux états-limites ultimes et aux états-limites de service pour une fondation profonde sous sollicitation axiale en compression et en traction.

#### F.2 Coefficients de modèle

(1) Les valeurs des coefficients de modèle  $\gamma_{R;d1}$  et  $\gamma_{R;d2}$  sont présentées dans le tableau F.2.1. La valeur du coefficient de modèle  $\gamma_{R;d1}$  varie suivant que le pieu est sollicité en compression ou en traction (Notes 1 à 3).

NOTE 1 – Le coefficient de modèle  $\gamma_{R;d2}$  ne concerne pas la procédure du « pieu modèle ».

NOTE 2 – Le coefficient de modèle  $\gamma_{R;d1}$  pour des pieux ancrés principalement dans la craie est égal à 1,4 du fait de la difficulté à appréhender correctement le comportement mécanique des formations géologiques crayeuses qui peuvent présenter certaines spécificités sur le plan rhéologiques (thixotropie).

NOTE 3 – Les pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20 nécessitent l'utilisation de techniques d'injection dont la maîtrise reste complexe. Les performances en termes de résistance à la compression et à la traction de ces catégories de pieux sont donc très variables. Le coefficient de modèle permettant de quantifier la dispersion du modèle de calcul liée à ces techniques a donc été augmenté et porté à une valeur égale à 2,0.

**Tableau F.2.1 — Valeur des coefficients de modèle pour la méthode pressiométrique**

	Procédure du « pieu modèle » (utilisation des coefficients $\xi$ ou de l'annexe D de la norme NF EN 1990)		Procédure du « modèle de terrain »	
	$\gamma_{R;d1}$ Compression	$\gamma_{R;d1}$ Traction	$\gamma_{R;d2}$ Compression	$\gamma_{R;d2}$ Traction
Pieux de catégorie 1 à 7 hors pieux de type HBi	1,15	1,4	1,1	
Pieux ancrés dans la craie (hors pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20)	1,4	1,7		
Pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20	2,0	2,0		
Pieux de catégorie 21	1,15	1,4		

### F.3 Résistance limite d'un pieu

(1) Cet article définit les procédures pour déterminer la portance limite  $R_c$  et la résistance limite de traction  $R_t$  d'une fondation profonde isolée réalisée au droit d'un sondage pressiométrique.

(2) La portance limite en compression  $R_c$  d'une fondation profonde isolée doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante (notes 1 et 2) :

$$R_c = R_b + R_s \quad (\text{F.3.1})$$

$R_c$  est la valeur de la portance de la fondation profonde ;

$R_b$  est la valeur de la résistance de pointe de la fondation profonde ;

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial de la fondation profonde (Note 2) ;

NOTE 1 – Les méthodologies de calcul de  $R_b$  et  $R_s$  sont précisées dans les articles F.4 à F.5.

NOTE 2 – La hauteur de mobilisation du frottement ne correspond pas nécessairement à toute la hauteur de l'élément contenue dans le sol. C'est le cas en particulier pour les fondations profondes comportant un double chemisage ou pour les fondations profondes soumises à des frottements négatifs.

(3) La résistance limite de traction  $R_t$  d'une fondation profonde isolée doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante (note 1) :

$$R_t = R_s \quad (\text{F.3.2})$$

$R_t$  est la valeur de la résistance de traction du terrain ;

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial de la fondation profonde ;

NOTE 1 – La méthodologie de calcul de  $R_s$  est précisée dans l'article F.5.

## F.4 Résistance de pointe

### F.4.1 Principe général

(1) L'effort limite mobilisable dû au terme de pointe d'une fondation profonde doit être calculé à partir de l'expression générale suivante :

$$R_b = A_b q_b \quad (\text{F.4.1})$$

$R_b$  est la valeur de la résistance de pointe d'une fondation profonde ;

$A_b$  est la surface de la base de la fondation profonde (Article A.10) ;

$q_b$  est la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base du pieu (F.4.2).

### F.4.2 Pression de rupture du terrain

(1) Sauf cas particulier (Note 1), la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base de la fondation profonde doit être calculée à partir de l'expression générale suivante :

$$q_b = k_p p_{le}^* \quad (\text{F.4.2.1})$$

$k_p$  est le facteur de portance pressiométrique en tenant en compte des clauses de l'article A.10 ;

$p_{le}^*$  est la pression limite nette équivalente.

NOTE 1 – Lorsqu'il y a lieu (Clauses 9.2 (1) Note 1 et F.3 (1) Note 1), il convient de tenir compte de la contrainte totale verticale  $q_0$  existant dans le terrain au niveau de la base du pieu au moment des travaux (Note 2) et d'appliquer dans ce cas l'expression générale suivante :

$$q_b = q_0 + k_p p_{le}^* \quad (\text{F.4.2.2})$$

NOTE 2 – La contrainte totale verticale  $q_0$  est à considérer dans la situation dans laquelle la fondation est justifiée en faisant abstraction de celle-ci.

(2) La valeur du facteur de portance pressiométrique  $k_p$  doit être déterminée à partir des valeurs du tableau F.4.2.1 en fonction de la nature de la formation dans laquelle se trouve la base de la fondation profonde, de son mode de mise en œuvre (Note 1) et de son encastrement.

NOTE 1 – Les résultats expérimentaux disponibles actuellement ne permettent pas de mettre en évidence une éventuelle influence de la forme de la section droite du pieu.

(3) Dans le cas d'une formation porteuse homogène (Notes 1 et 2), la valeur de la pression limite nette équivalente  $p_{le}^*$  doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante :

$$p_{le}^* = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} p_l^*(z) dz \quad (\text{F.4.2.3})$$

$p_l^*(z)$  est le profil des pressions limites nettes considéré comme représentatif (Note 3) ;

$p_{le}^*$  est la « pression limite nette équivalente » (Note 3) ;

$D$  est la profondeur de la fondation ;

$B$  est la largeur du pieu ;

$h$  est la hauteur du pieu contenue dans la formation porteuse ;

$$a = \max\left\{\frac{B}{2}; 0,5\right\} \quad (\text{F.4.2.4})$$

$$b = \min\{a; h\} \quad (\text{F.4.2.5})$$

NOTE 1 – A titre indicatif, une formation peut être considérée comme homogène si elle est composée d'un sol de nature unique et si la pression limite maximale mesurée dans cette formation n'excède pas deux fois la pression limite minimale.

NOTE 2 – Dans le cas contraire, il convient de faire un choix prudent de la valeur représentative de la pression limite nette équivalente, en rappelant que s'il existe un substratum résistant près de la pointe des pieux, il est toujours possible d'approfondir le niveau de la pointe jusqu'à atteindre celui-ci.

NOTE 3 – La pression limite nette pressiométrique est à déterminer selon la norme NF EN ISO 22477-5. En attendant sa parution les dispositions de la norme NF P 94-110-1 s'appliquent.

(4) Le facteur de portance dépend de la hauteur d'encastrement effective  $D_{ef}$  définie selon les règles suivantes :

$$D_{ef} = \frac{1}{p_{le}^*} \int_{D-h_D}^D p_l^*(z) dz \quad (\text{F.4.2.6})$$

$h_D$  désigne une longueur égale à  $10B$ .

(5) L'encastrement effectif est égal à  $D_{ef}/B$  où  $B$  est la plus petite dimension de la fondation (Note 1) :

- lorsque l'encastrement effectif  $D_{ef}/B$  est supérieur à 5 :  $k_p(D_{ef}/B) = k_{pmax}$  ;
- lorsque l'encastrement effectif  $D_{ef}/B$  est inférieur à 5 :  $k_p(D_{ef}/B) = 1,0 + (k_{pmax}-1,0)(D_{ef}/B)/5$ .

NOTE 1 – Au minimum l'encastrement effectif dans la couche porteuse est pris égal à 3 diamètres ou 1,50 m pour des pieux de diamètres supérieurs à 0,5 m. Si l'entreprise de fondations spéciales peut garantir la bonne exécution de l'encastrement de la pointe des pieux dans la couche porteuse soit par des prélèvements d'échantillons, soit par l'emploi de trépan, soit encore par l'utilisation de carottier alors cet ancrage peut être réduit à une valeur minimale de 0,50 m.

(6) Les sols intermédiaires (Annexe B) peuvent être considérés soit comme des argiles ou des limons soit comme des sables ou des graves. En principe, les sols intermédiaires sont désignés par les termes suivants : sable silteux, sable argileux, limon sableux, argile sableuse. C'est le premier terme de ces expressions qui définit le comportement du sol. Ainsi, les sols intermédiaires peuvent être classés de la manière suivante :

- un sable silteux et un sable argileux appartiennent à la catégorie sable ou grave ;
- un limon sableux et une argile sableuse appartiennent à la catégorie argile ou limon.

**Tableau F.4.2.1 — Valeur du facteur de portance pressiométrique  $k_{pmax}$  pour un encastrement effectif  $D_{ef}/B > 5$**

Terrain	Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire- marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
Classe de pieu (c)					
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30

(#) pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50% sur le facteur  $k_p$ .

(a) La valeur de  $k_p$  pour les roches altérées et fragmentées doit être prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Dans le cas des roches saines, il convient (F.1 (2) Note 1) d'apprécier si une justification basée sur les méthodes de la présente annexe F et à l'évidence pessimiste est suffisante, ou bien s'il convient d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

(c) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

## F.5 Résistance de frottement axial

### F.5.1 Principe général

(1) L'effort limite mobilisable par frottement axial sur la hauteur concernée du fût de la fondation profonde doit être calculé à partir de l'expression générale suivante :

$$R_s = P_s \int_0^D q_s(z) dz \quad (F.5.1)$$

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial d'une fondation profonde ;

$P_s$  est le périmètre du fût du pieu (Article A.10) ;

$D$  est la longueur de la fondation contenue dans le terrain (Note 1) ;

$q_s(z)$  est la valeur du frottement axial unitaire limite à la cote  $z$  (Article F.5.2) ;

NOTE 1 – La hauteur  $L_s$  où le frottement axial est mobilisé ne correspond pas nécessairement à toute la hauteur de l'élément contenue dans le sol. C'est le cas en particulier des pieux comportant un double chemisage ou pour les pieux soumis à des frottements négatifs. Dans ce dernier cas, il conviendra si nécessaire de définir deux valeurs de  $R_s$ , l'une pour la compression, l'autre pour la traction.

### F.5.2 Frottement axial unitaire limite $q_s$

(1) La valeur du frottement axial unitaire limite  $q_s$  à la profondeur  $z$  doit être déterminée en fonction de la nature du terrain, du mode de mise en œuvre du pieu et de la valeur de pression limite nette mesurée à cette même profondeur, à partir des tableaux F.5.2.1 et F.5.2.2 et de la figure F.5.2.1.

(2) La valeur du frottement axial unitaire limite à la profondeur  $z$  est déterminée à partir de la relation suivante :

$$q_s(z) = \alpha_{pieu-sol} f_{sol} [p_i^*(z)] \quad (F.5.2.1)$$

$p_i^*(z)$  est la pression limite à la profondeur  $z$  ;

$\alpha_{\text{pieu,sol}}$  est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et du type de sol défini dans le tableau F.5.2.2 ;

$f_{\text{sol}}$  est une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de  $p_l$ .

(3) Les fonctions  $f_{\text{sol}}$  sont définies pour les différents types de sol par les équations suivantes (Figure F.5.2.1) :

$$f_{\text{sol}}(p_l^*) = (ap_l^* + b)(1 - e^{-cp_l^*}) \quad (\text{F.5.2.2})$$

Les valeurs des paramètres sont définies dans le tableau F.5.2.2 pour des valeurs de pression limite  $p_l^*$  en MPa.

(4) Pour des pressions limites faibles (inférieures à 0,2 MPa pour les argiles et les limons et inférieures à 0,3 MPa pour les sables), il convient de s'assurer que le frottement axial unitaire considéré est pérenne. Il est donc nécessaire de mener une étude particulière justifiant cette hypothèse (par exemple, en démontrant l'absence de frottements négatifs induits par des surcharges ou des variations du niveau de la nappe).

(5) Indépendamment des courbes de la figure F.5.2.1 et de la relation générale de l'équation F.5.2.2 définies sur la base de mesures expérimentales, il convient de s'assurer que les valeurs de frottement axial unitaire déterminées ne sont pas supérieures à celles définies dans le tableau F.5.2.3.

(6) Pour les fondations profondes de grande longueur visées au tableau F.5.2.1 (signe ##), avec les sols correspondants, on appliquera un abattement de 50% sur la valeur de frottement déduite de l'application des différents tableaux et figures sur les sections de pieu situées à 25 m ou plus au-dessus de la pointe.

**Tableau F.5.2.1 — Choix des valeurs de  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  — Méthode pressiométrique**

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
12	BBO	Battu bois fermé	0,9	1,1	0,4	0,9	—

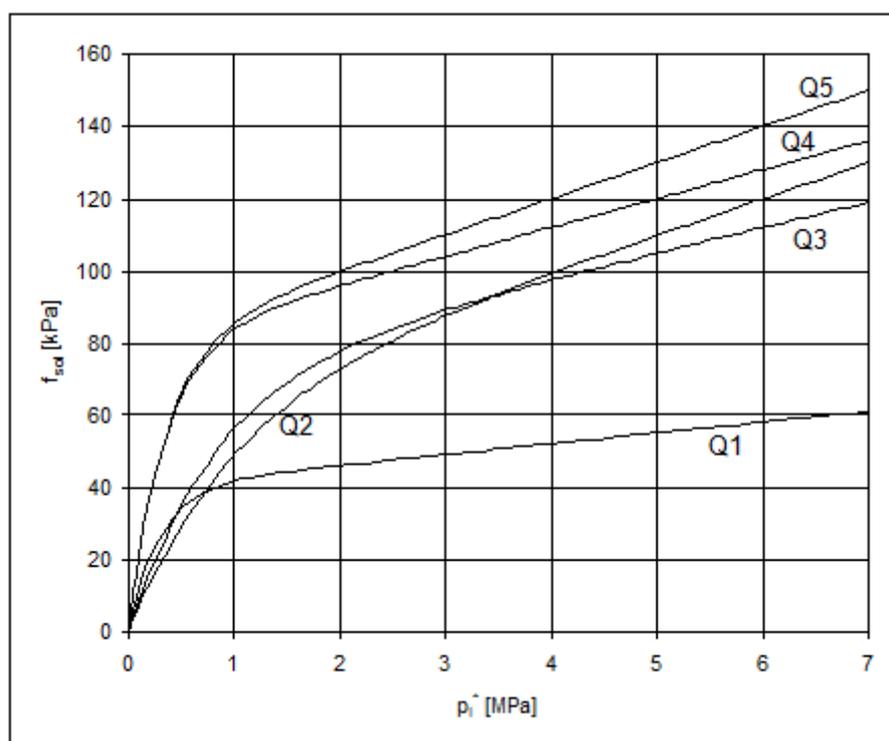
\*\* Il convient de se reporter à l'article A.10 pour le calcul du périmètre.

(e) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(f) D'autres valeurs peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

**Tableau F.5.2.2 — Valeurs numériques des paramètres a, b et c des courbes  $f_{sol}$  — Méthode pressiométrique**

Type de sol	Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a	0,003	0,01	0,007	0,008	0,01
b	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c	3,5	1,2	1,3	3	3



**Figure F.5.2.1 — Courbes  $f_{sol}$  pour la méthode pressiométrique**

**Tableau F.5.2.3 — Valeurs maximales de frottement axial unitaire limite  $q_s$**

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa				
			Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
12	BBO	Battu bois	90	90	50	90	—

## Annexe G (normative)

### Portance limite et résistance limite de traction à partir de la méthode pénétrométrique

#### G.1 Préambule

(1) Cette annexe donne les règles pour déterminer la portance limite et la résistance limite de traction d'une fondation profonde isolée sous sollicitation axiale à partir des essais en place au pénétromètre statique à pointe mécanique ou électrique (Notes 1 et 2).

NOTE 1 – La méthode proposée est basée sur la valeur de la résistance de pointe  $q_c$  que celle-ci soit mesurée au moyen d'un pénétromètre à pointe mécanique ou électrique. La définition des différents paramètres de la méthode tient compte des différences entre le pénétromètre à pointe mécanique et le pénétromètre à pointe électrique.

NOTE 2 – Cette annexe ne concerne pas les fondations profondes dimensionnées à partir de données mesurées au moyen d'un pénétromètre dynamique.

(2) La méthode exposée suppose que la résistance de pointe  $q_c$  a été mesurée au moyen d'un cône sans jupe. Dans le cas inverse, la valeur de résistance de pointe mécanique devra être corrigée en la divisant par un coefficient correcteur dont la valeur est de l'ordre de 1,3 (Note 1). La valeur de ce coefficient correcteur peut être éventuellement plus élevée et il convient donc de s'assurer de sa valeur avant de procéder à la correction (Note 1).

NOTE 1 – Le fait d'ignorer cette correction peut conduire à un sous-dimensionnement de la fondation et provoquer des dommages plus ou moins sévères sur la structure portée.

(3) Cette méthode ne s'applique pleinement que pour les sols (Note 1) et les classes de terrain indiquées dans l'annexe B (Note 1).

NOTE 1 – Les aspects spécifiques au comportement des roches sortent du domaine de cette norme. Il convient d'apprécier dans quels cas une fondation dite "au rocher" peut être justifiée par les méthodes proposées et dans quels cas le recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches est nécessaire.

(4) Cette méthode complète les sections 9, 10 et 14 de la présente norme qui traitent des justifications à faire respectivement aux états-limites ultimes et aux états-limites de service pour une fondation profonde sous sollicitation axiale en compression et en traction.

#### G.2 Coefficient de modèle

(1) Les valeurs des coefficients de modèle  $\gamma_{R,d1}$  et  $\gamma_{R,d2}$  sont présentées dans le tableau G.2.1. La valeur du coefficient de modèle  $\gamma_{R,d1}$  varie suivant que le pieu est sollicité en compression ou en traction (Notes 1 à 3).

NOTE 1 – Le coefficient de modèle  $\gamma_{R,d2}$  ne concerne pas la procédure du « pieu modèle ».

NOTE 2 – Le coefficient de modèle  $\gamma_{R,d1}$  pour des pieux ancrés principalement dans la craie est égal à 1,4 du fait de la difficulté à appréhender correctement le comportement mécanique des formations géologiques crayeuses qui peuvent présenter certaines spécificités sur le plan rhéologiques (thixotropie).

NOTE 3 – Les pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20 nécessitent l'utilisation de techniques d'injection dont la maîtrise reste complexe. Les performances en termes de résistance à la compression et à la traction de ces catégories de pieux sont donc très variables. Le coefficient de modèle permettant de quantifier la dispersion du modèle de calcul liée à ces techniques a donc été augmenté et porté à une valeur égale à 2,0.

**Tableau G.2.1 — Valeur des coefficients de modèle pour la méthode pénétrométrique**

	Procédure du « pieu modèle » (utilisation des coefficients $\xi$ ou de l'annexe D de la norme NF EN 1990)		Procédure du « modèle de terrain »	
	$\gamma_{R;d1}$ Compression	$\gamma_{R;d1}$ Traction	$\gamma_{R;d2}$ Compression	$\gamma_{R;d2}$ Traction
Pieux de classe 1 à 7 hors pieux de type HBi	1,18	1,45	1,1	
Pieux ancrés dans la craie (hors pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20)	1,45	1,75		
Pieux de catégorie 10, 17, 18, 19 et 20	2,0	2,0		

### G.3 Résistance limite d'un pieu

(1) Cet article définit les procédures pour déterminer la portance limite en compression  $R_c$  et la résistance limite de traction  $R_t$  d'une fondation profonde isolée réalisée au droit d'un sondage pénétrométrique.

(2) La portance limite en compression  $R_c$  d'une fondation profonde isolée doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante (G.3.1) (Notes 1 et 2) :

$$R_c = R_b + R_s \quad (\text{G.3.1})$$

$R_c$  est la valeur de la portance de la fondation profonde ;

$R_b$  est la valeur de la résistance de pointe de la fondation profonde ;

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial de la fondation profonde (Note 2) ;

NOTE 1 – Les méthodologies de calcul de  $R_b$  et  $R_s$  sont précisées dans les articles G.4 et G.5 ci-après.

NOTE 2 – La hauteur de mobilisation du frottement ne correspond pas nécessairement à toute la hauteur de l'élément contenue dans le sol. C'est le cas en particulier pour les pieux comportant un double chemisage ou pour les pieux soumis à des frottements négatifs.

(3) La résistance limite de traction  $R_t$  d'un pieu isolé doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante (G.3.2) (Note 1) :

$$R_t = R_s \quad (\text{G.3.2})$$

$R_t$  est la valeur de la résistance limite de traction du terrain ;

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial de la fondation profonde (Note 1) ;

NOTE 1 – La méthodologie de calcul de  $R_s$  est précisée dans l'article G.5.

## G.4 Résistance de pointe

### G.4.1 Principe général

(1) L'effort limite mobilisable dû au terme de pointe d'un pieu doit être calculé à partir de l'expression générale suivante :

$$R_b = A_b q_b \quad (\text{G.4.1})$$

$R_b$  est la valeur de la résistance à la compression du terrain sous la base du pieu ;

$A_b$  est la surface de la base de la fondation (Article A.10) ;

$q_b$  est la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base du pieu (G.4.2).

### G.4.2 Pression de rupture du terrain

(1) Sauf cas particulier (Note 1), la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base d'une fondation profonde doit être calculée à partir de l'expression générale suivante :

$$q_b = k_c q_{ce} \quad (\text{G.4.2.1})$$

$q_b$  est la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base du pieu ;

$k_c$  est le facteur de portance pénétrométrique ;

$q_{ce}$  la résistance de pointe pénétrométrique équivalente.

NOTE 1 – Lorsqu'il y a lieu (Clause 9.2 (1) Note 1), il convient de tenir compte de la contrainte totale verticale  $q_0$  existant dans le terrain au niveau de la base du pieu au moment des travaux (Note 2) et d'appliquer dans ce cas l'expression générale suivante :

$$q_b = q_0 + k_c q_{ce} \quad (\text{G.4.2.2})$$

NOTE 2 – La contrainte totale verticale  $q_0$  est à considérer dans la situation dans laquelle la fondation est justifiée en faisant abstraction de celle-ci.

(2) La valeur du facteur de portance pénétrométrique  $k_c$  doit être déterminée à partir du tableau G.4.2.1 en fonction de la nature de la formation dans laquelle se trouve la base de la fondation profonde, du mode de mise en œuvre du pieu (Note 1) et de l'encastrement.

NOTE 1 – Les résultats expérimentaux disponibles actuellement ne permettent pas de mettre en évidence une éventuelle influence de la forme de la section droite du pieu.

(3) Le profil pénétrométrique corrigé  $q_{cc}(z)$  est obtenu :

- en calculant la valeur moyenne  $q_{cm}$  de la résistance de pointe lissée sur la hauteur  $(b + 3a)$  (Clause G.1 (2)) ;
- en écrêtant s'il y a lieu le diagramme  $q_c(z)$  à la valeur  $1,3 q_{cm}$ .

(4) Dans le cas d'une formation porteuse homogène (Notes 1 et 2), la valeur de la résistance de pointe pénétrométrique équivalente  $q_{ce}$  doit être déterminée à partir de l'expression générale suivante :

$$q_{ce} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz \quad (\text{G.4.2.3})$$

$q_{ce}$  est la résistance de pointe pénétrométrique équivalente ;

b est la valeur de l'épaisseur de la tranche de terrain considérée au-dessus de la base du pieu ;

$q_{cc}(z)$  est le profil pénétrométrique corrigé ;

B est la largeur de la fondation profonde ;

h est la hauteur de la fondation profonde contenue dans la formation porteuse ;

$$a = \max\left\{\frac{B}{2}; 0,5m\right\} \quad (\text{G.4.2.4})$$

$$b = \min\{a; h\} \quad (\text{G.4.2.5})$$

NOTE 1 – A titre indicatif, une formation peut être considérée comme homogène si elle est composée d'un sol de nature unique et si la résistance de pointe pénétrométrique maximale mesurée dans cette formation n'excède pas deux fois la résistance de pointe pénétrométrique minimale.

NOTE 2 – Dans le cas contraire, il convient de faire un choix prudent de la valeur représentative de la résistance de pointe pénétrométrique équivalente, en rappelant que s'il existe un substratum résistant près de la pointe des pieux, il est toujours possible d'approfondir les pieux jusqu'à atteindre celui-ci.

(5) Le facteur de portance dépend de la hauteur d'encastrement effective  $D_{ef}$  définie selon les règles suivantes :

$$D_{ef} = \frac{1}{q_{ce}} \int_{D-h_D}^D q_c(z) dz \quad (\text{G.4.2.6})$$

$h_D$  désigne une longueur égale à  $10B$ .

(6) L'encastrement effectif est égal à  $D_{ef}/B$  où B est la plus petite dimension de la fondation

- lorsque l'encastrement  $D_{ef}/B$  est supérieur 5,0 :  $k_c(D_{ef}/B) = k_{cmax}$  ;
- lorsque l'encastrement  $D_{ef}/B$  est inférieur 5,0 :
  - $k_c(D_{ef}/B) = 0,3 + (k_{cmax}-0,3)(D_{ef}/B)/5$  pour les argiles/limons ;
  - $k_c(D_{ef}/B) = 0,2 + (k_{cmax}-0,2)(D_{ef}/B)/5$  pour les sols intermédiaires ;
  - $k_c(D_{ef}/B) = 0,1 + (k_{cmax}-0,1)(D_{ef}/B)/5$  pour les sables et graves ;
  - $k_c(D_{ef}/B) = 0,15 + (k_{cmax}-0,15)(D_{ef}/B)/5$  pour la craie, les marnes et les roches altérées ou fragmentées.

NOTE 1 – Au minimum l'encastrement effectif dans la couche porteuse est pris égal à 3 diamètres ou 1,50 m pour des pieux de diamètres supérieurs à 0,5 m. Si l'entreprise de fondations spéciales peut garantir la bonne exécution de cet encastrement de la pointe des pieux dans la couche porteuse soit par des prélèvements d'échantillons, soit par l'emploi de trépan, soit encore par l'utilisation de carottier alors cet ancrage peut être réduit à une valeur minimale de 0,5 m.

**Tableau G.4.2.1 — Valeur du facteur de portance pénétrométrique  $k_{cmax}$  pour un encastrement effectif  $D_{ef}/B > 5$**

Terrain	Argile	Sol	Sable	Craie	Marne et Calcaire-	Roche altérée ou fragmentée
---------	--------	-----	-------	-------	--------------------	-----------------------------

Classe de pieu (c)	% CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon	intermédiaire	Grave		Marneux	(a)
4	0,45	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

(#) pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, au lieu de battage, il y a lieu de faire un abattement de 50% sur le facteur  $k_c$ .

(a) La valeur de  $k_c$  pour les roches altérées et fragmentées doit être prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus. Dans le cas des roches saines, il convient (G.1.(3) Note 1) d'apprécier si une justification basée sur les méthodes de la présente annexe G et à l'évidence pessimiste est suffisante, ou bien s'il convient d'avoir recours aux méthodes spécifiques de la mécanique des roches.

(b) Pour les micropieux, la résistance de pointe n'est normalement pas pris en compte.

(c) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(d) D'autres valeurs de  $k_{cmax}$  peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

## G.5 Résistance limite mobilisable par frottement axial

### G.5.1 Principe général

(1) L'effort limite mobilisable par frottement axial sur la hauteur concernée du fût de la fondation profonde doit être calculé à partir de l'expression générale suivante :

$$R_s = P_s \int_0^D q_s(z) dz \quad (F.5.1)$$

$R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial d'une fondation profonde ;

$P_s$  est le périmètre du fût du pieu (Article A.10) ;

$D$  est la longueur de la fondation contenue dans le terrain (Note 1) ;

$q_s(z)$  est la valeur du frottement axial unitaire limite à la cote  $z$  (Article G.5.2).

NOTE 1 – La hauteur  $L_s$  où le frottement axial est mobilisé ne correspond pas nécessairement à toute la hauteur de l'élément contenue dans le sol. C'est le cas en particulier des pieux comportant un double chemisage ou pour les pieux soumis à des frottements négatifs. Dans ce dernier cas, il conviendra si nécessaire de définir deux valeurs de  $R_s$ , l'une pour la compression, l'autre pour la traction.

### G.5.2 Frottement axial unitaire limite $q_s$

(1) La valeur du frottement axial unitaire limite  $q_s$  à la profondeur  $z$  doit être déterminée en fonction de la nature du terrain, du mode de mise en œuvre du pieu et de la valeur de la résistance de pointe lissée mesurée à cette même profondeur, à partir des tableaux G.5.2.1 et G.5.2.2 et de la figure G.5.2.1.

(2) La valeur du frottement axial unitaire limite à la profondeur  $z$  est déterminée à partir de la relation suivante :

$$q_s(z) = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}} [q_c(z)] \quad (G.5.2.1)$$

$q_c(z)$  est la résistance de pointe lissée à la profondeur  $z$  ;

$\alpha_{\text{pieu,sol}}$  est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et du type de sol défini dans le tableau G.5.2.2 ;

$f_{\text{sol}}$  est une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de  $q_c$ .

(3) Les fonctions  $f_{\text{sol}}$  sont définies pour les différents types de sol par les équations suivantes (Figure G.5.2.1) :

$$f_{\text{sol}}(q_c) = (aq_c + b)(1 - e^{-cq_c}) \quad (\text{G.5.2.2})$$

Les valeurs des paramètres sont définies dans le tableau G.5.2.2 pour des valeurs de résistance de pointe  $q_c$  en MPa.

(4) Pour des résistances de pointe faibles (inférieures à 1 MPa pour les argiles et les limons et inférieures à 1,5 MPa pour les sables), il convient de s'assurer que le frottement axial unitaire considéré est pérenne. Il est donc nécessaire de mener une étude particulière justifiant cette hypothèse (par exemple, en démontrant l'absence de frottements négatifs induits par des surcharges ou des variations du niveau de la nappe ou encore en vérifiant que les descentes de charges ont été correctement calculées).

(5) Indépendamment de la figure G.5.2.1 et de la relation générale de l'équation G.5.2.2 définies sur la base de mesures expérimentales, il convient de s'assurer que les valeurs de frottement axial unitaire déterminées ne sont pas supérieures à celles définies dans le tableau G.5.2.3.

(6) Pour les pieux de grande longueur visés au tableau G.5.2.1 (signe ##), avec les sols correspondants, on appliquera un abattement de 50% sur la valeur de frottement déduite de l'application des différents tableaux et figures sur les sections de pieu situées à 25 m ou plus au-dessus de la pointe.

**Tableau G.5.2.1 — Choix des valeurs de  $\alpha_{\text{pieu,sol}}$  — Méthode pénétrométrique**

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile % CaCO3 < 30% Limon	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	Roche altérée ou fragmentée
12	BBO	Battu bois	0,40	0,50	0,85	0,20	0,85	—

\*\* Il convient de se reporter à l'article A.10 pour le calcul du périmètre.

# Pour les pieux de type BAO, HB et PP, mis en œuvre par vibrofonçage, et pas par battage, il y a lieu de faire un abattement de 30% sur les valeurs de  $q_s$ .

## Pour les pieux de grande longueur, il convient d'appliquer la clause (6) de la présente section.

(a) Pour les micropieux BE, HBi, MIGU, PIGU, PIRS et MIRS, les valeurs proposées correspondent à une exécution stricte et soignée de l'injection correspondante. Les essais de conformité (Section 8.9) permettront de définir précisément les valeurs de frottement axial unitaire à considérer. Il convient ensuite d'appliquer les valeurs  $\xi_1'$  et  $\xi_2'$  du tableau C.2.3.1. On attire l'attention que cette recommandation est d'autant plus importante dans les argiles et les marnes que les performances dans ces terrains sont très sensibles à toute insuffisance lors de la mise en œuvre.

(b) Pour les pieux de catégorie 17 et 18, il convient de considérer les valeurs de frottement axial unitaire des techniques de pieux ou de micropieux les plus proches sur le plan de la technologie.

(c) Les valeurs mentionnées pour les fondations profondes de catégorie 6 sont données pour des pieux réalisés avec un enregistrement continu des paramètres de forage et de bétonnage (tableau 6.4.1.1 Note (1)). Dans le cas contraire, on s'expose à des discontinuités et des détériorations du pieu lors de sa réalisation.

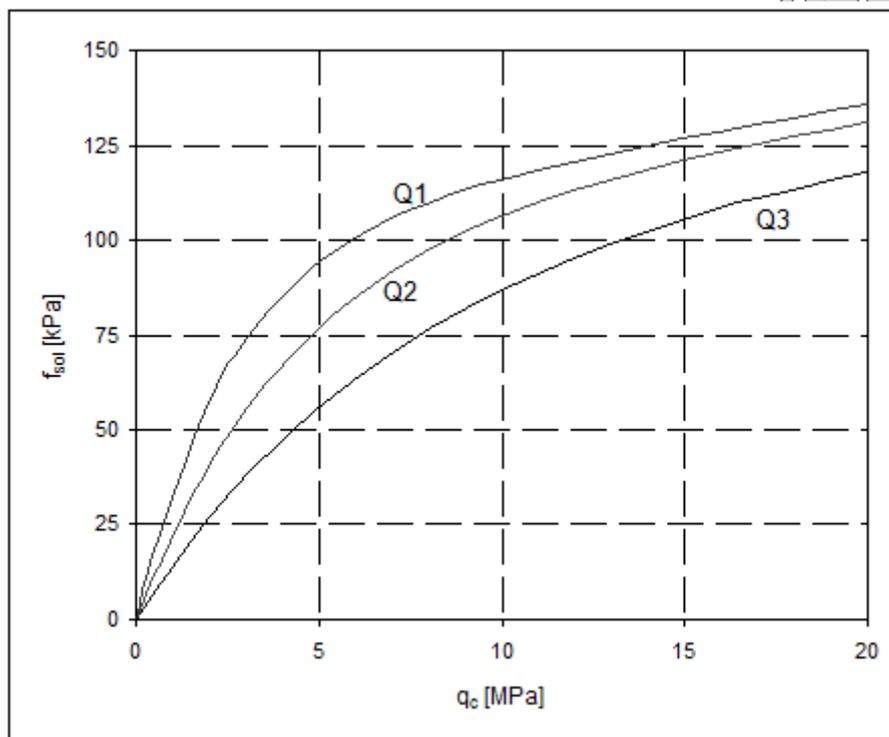
(d) Les valeurs mentionnées pour les fondations profondes de catégorie 7 mises en œuvre avec une technique de bétonnage directement à la pompe à béton sont données pour des pieux réalisés avec un enregistrement continu des paramètres de réalisation du pieu. Dans le cas contraire, on s'expose à des discontinuités et des détériorations du pieu lors de sa réalisation.

(e) Il convient de se référer à l'article A.10 pour le choix des périmètres et des aires des pieux à considérer dans les calculs.

(f) D'autres valeurs peuvent être utilisées à condition de satisfaire les conditions de la clause 9 de la section 1.

**Tableau G.5.2.2 — Valeurs numériques des paramètres a, b et c des courbes  $f_{sol}$  — Méthode pénétrométrique**

Type de sol	Argiles	Sols intermédiaires	Sables	Craie	Marne et Calcaire-Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q2	Q2	Q2
a	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
b	0,0018	0,0015	0,0012	0,0015	0,0015	0,0015
c	0,4	0,25	0,15	0,25	0,25	0,25



**Figure G.5.2.1 — Courbes  $f_{sol}$  pour la méthode pénétrométrique**

**Tableau G.5.2.3 — Valeurs maximales de frottement axial unitaire limite  $q_s$**

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa					
			Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon	Sols intermédiaires	Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
12	BBO	Battu bois	90	90	90	50	90	—

Version provisoire

## **Annexe H (informative)**

### **Évaluation du frottement négatif sur un pieu**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe H Évaluation du frottement négatif sur un pieu » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe I (informative)**

### **Modélisation du comportement transversal d'une fondation profonde à partir des essais au pressiomètre et au pénétromètre**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe I Modélisation du comportement transversal d'une fondation profonde à partir des essais au pressiomètre et au pénétromètre » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

La résistance de la connection à la structure et des aboutages vis-à-vis des efforts tranchants et des moments fléchissant transmis doit être justifiée sur la base d'essais d'éléments de structures et de calculs intégrant les caractéristiques des aboutages ou connections.

Version provisoire

## **Annexe J (informative)**

### **Effets de groupe vis-à-vis d'un chargement axial**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe J Effets de groupe vis-à-vis d'un chargement axial » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe K (informative)**

### **Déplacement horizontal d'une couche de terrain**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe K Déplacement horizontal d'une couche de terrain » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe L (informative)**

### **Rigidité axiale d'une fondation profonde**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe L Rigidité axiale d'une fondation profonde » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

La prise en compte dans le cas d'un pieu constitué de plusieurs tronçons d'un module homogénéisé entre le module du bois et des zones d'aboutage et de la rallonge est conseillée.

Version provisoire

## **Annexe M (informative)**

### **Reconnaitances géotechniques et valeurs caractéristiques des propriétés des terrains**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe M Reconnaitances géotechniques et valeurs caractéristiques des propriétés des terrains » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe N (informative)**

### **Déformations des structures et mouvements des fondations**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe N Déformations des structures et mouvements des fondations » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

## **Annexe O (informative)**

### **Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages**

L'intégralité des informations contenue dans la partie « Annexe O Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

*Version provisoire*

## **Annexe P (informative)**

### **Catégories géotechniques et durée d'utilisation du projet**

L'intégralité des informations contenue dans la partie «Annexe P Catégories géotechniques et durée d'utilisation du projet » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Version provisoire

**Annexe Q  
(informative)  
Dispositions générales de conception pour les ponts**

**Q.1 Matériaux constitutifs des pieux**

**Q.1.2 Bois**

La classe de résistance, la classe d'emploi et la durabilité sont à définir dans une étude spécifique.

**Q.2 Résistance structurale des pieux**

**Q.2.2 Pieux en bois**

(1) les pieux en éléments aboutés ne sont pas autorisés.

**Q.3 Dispositions constructives**

**Q.3.5 Pieux en bois**

(1) Les pieux en bois seront systématiquement équipés des dispositifs de protection décrits à l'article A.5.1.

Version provisoire

## Annexe R (informative)

### Prise en compte des imperfections géométriques liées aux tolérances d'exécution

L'intégralité des informations contenue dans la partie «Annexe R Prise en compte des imperfections géométriques liées aux tolérances d'exécution » de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

(1) Les pieux doivent être exempts de défauts qui peuvent affecter leur solidité et leur durabilité. La rectitude des grains est importante dans les pieux de bois, en particulier, dans les cas où un battage difficile est anticipé.

(2) La ligne droite reliant le centre de la tête au centre de la pointe doit rester entièrement dans le volume du pieu.

(3) Il convient que les dimensions de la section ne varient pas de plus de 0,015 mètre par mètre.

(4) La rectitude d'un pieu (déviations par rapport à la ligne droite) doit être inférieure à 1% de sa longueur. Les pieux doivent être exempts de déviations (décrochement, flèche) qui s'écartent de plus de 65 mm de rectitude dans tout 1,5 m de longueur (voir Figure R.1).

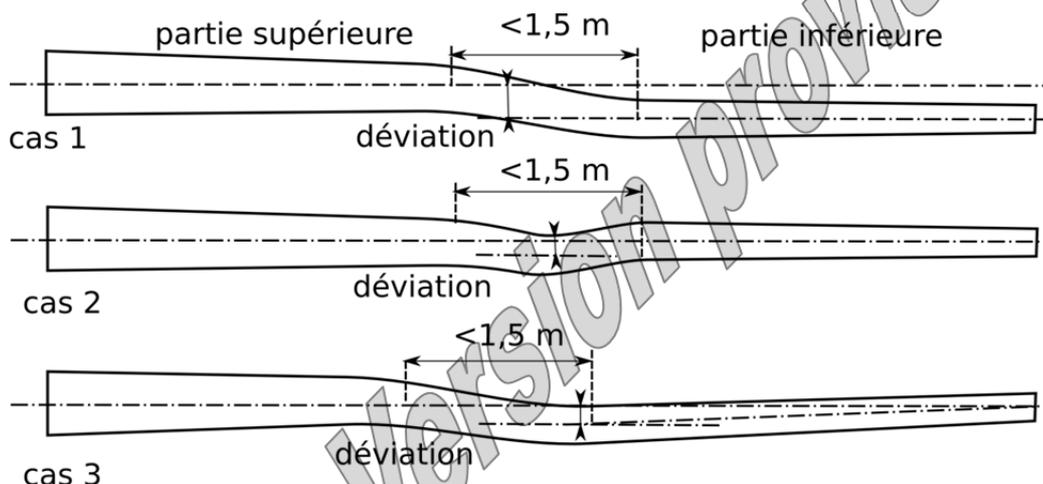


Figure R.1 Définition de la déviation : Exemple de cas où la déviation est parallèle (cas 1), en crochet (cas 2), ou oblique (cas 3)

(5) Sur une longueur de 5,0 m, le vrillage du grain ne doit pas dépasser 180 degrés de torsion.

(6) Les nœuds sains ne doivent pas être plus grands que le sixième de la circonférence du pieu au droit du nœud. Un groupe de nœuds doit être considéré comme un nœud unique, et l'ensemble du groupe ne peut pas être d'une dimension supérieure à celle autorisée pour un seul nœud. La somme des diamètres des nœuds sur une zone de 300 mm de longueur de pieu ne doit pas dépasser un tiers de la circonférence au point où ils se produisent. Les nœuds doivent être mesurés à angle droit par rapport à l'axe.

(7) Les pieux peuvent avoir des nœuds endommagés ne dépassant pas la moitié de la taille autorisée d'un nœud sain, à condition que la dégradation ne s'étende pas à plus de 50 mm de profondeur, et que les zones adjacentes du tronc ne soient pas affectées.

(8) Les trous de moins de 15 mm de diamètre moyen sont autorisés sur la surface externe du pieu, à condition que la somme des diamètres moyens de tous les trous sur une surface de 30 cm<sup>2</sup> ne dépasse

pas 50 mm, et que la profondeur de n'importe quel trou n'excède pas plus de 50 mm et à condition que les trous ne soient pas causés par la pourriture ou une attaque de mollusque térébrant.

Les cavités ou des dommages à la section causés par la pourriture, les tarets (tarets ou pholades), ou les insectes ne sont pas autorisés.

(9) Certaines des limitations de défaut utilisées pour arriver aux classes de résistance dans la norme NF EN 338 ne sont pas pertinentes dans le cas des pieux en bois et des éléments adaptés seront généralement obtenus à partir des classes XX et mieux. L'axe d'un pieu écharri ne doit pas s'écarter de la ligne droite de plus de 20 mm sur toute sa longueur, mais pour les pieux ronds un écart allant jusqu'à 20 mm sur une corde de 5 m peut être autorisé.

(10) Tous les pieux de bois doivent être inspectés avant le battage pour assurer le respect de ces recommandations.

Version provisoire

**Annexe S  
(informative)**

**Éléments relatifs aux essais de chargement statique en compression**

L'intégralité des informations contenue dans la partie «Annexe S Éléments relatifs aux essais de chargement statique en compression» de la norme NF P 94-262 s'applique au présent document. Le lecteur peut donc s'y référer.

Une instrumentation spécifique fixée le long du pieu doit permettre de suivre la verticalité de l'élément et de déterminer le frottement axial à l'interface sol-pieu connaissant la rigidité axiale du pieu.

Version provisoire