cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Webinaire « Fondations mixtes »

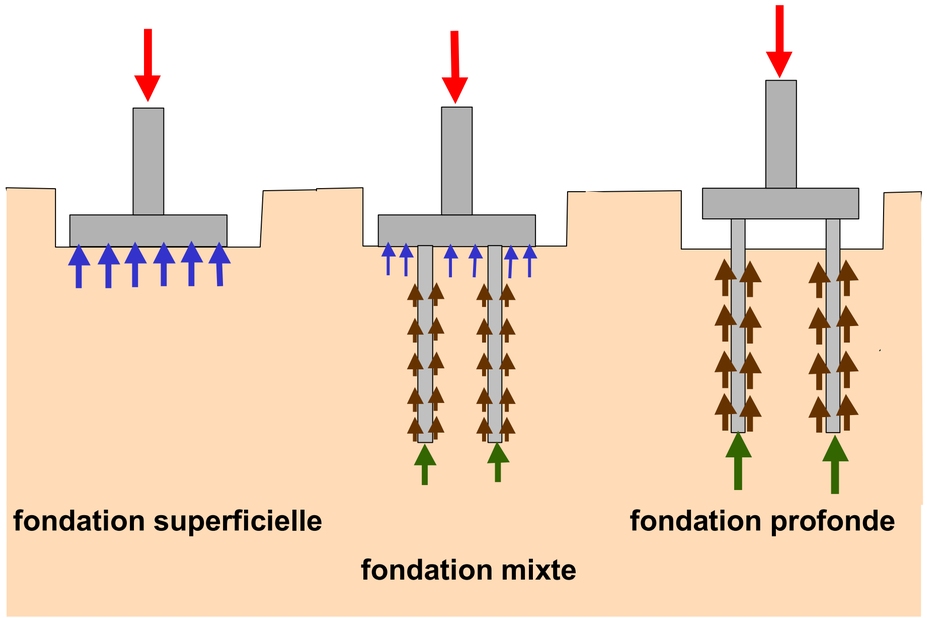
Historique & Principes Généraux

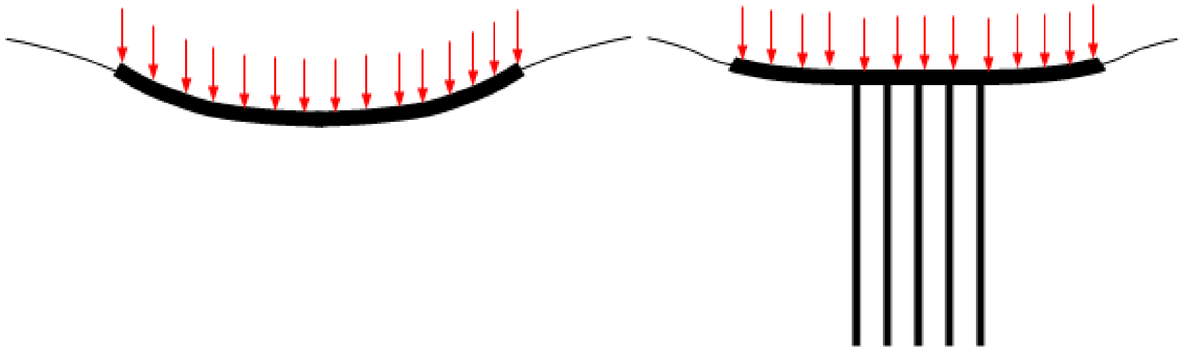
BOREL, Serge

SOLETANCHE BACHY

9 SEPTEMBRE 2025

Définitions des fondations mixtes



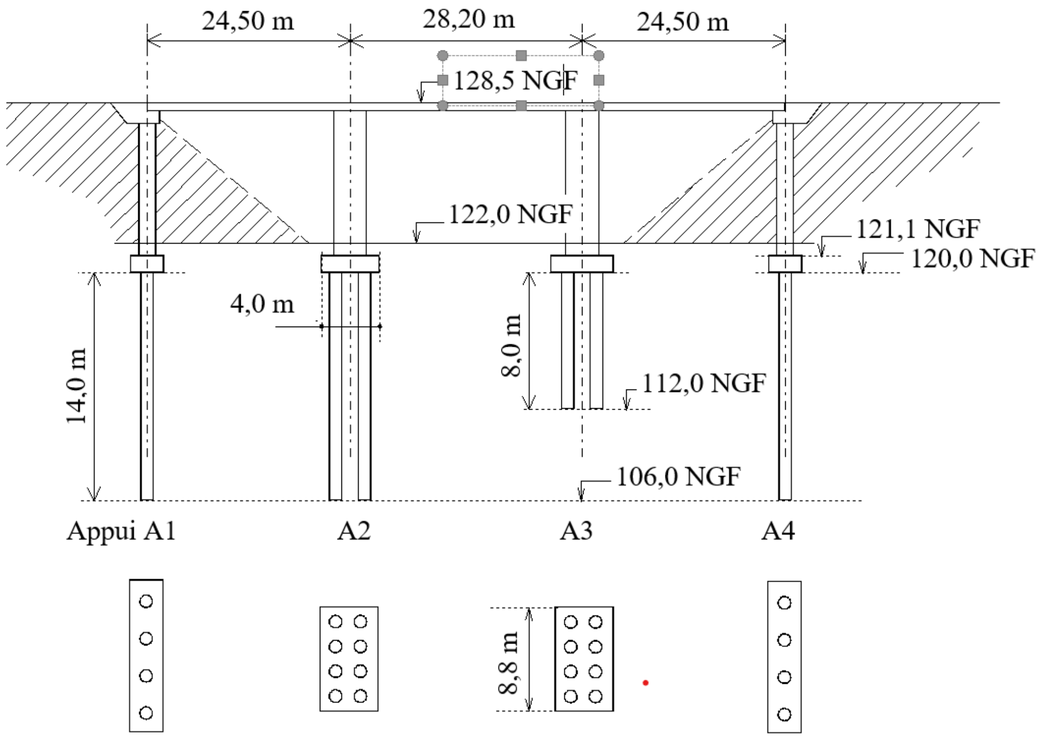


*association **rigide** d'une fondation superficielle et d'une fondation profonde, **conçue** et **réalisée** pour mobiliser simultanément les efforts de ces deux modes de fondation*

Plan de la présentation

- En France : culture ouvrage d’art
- A l’international : radiers mixtes et bâtiments de grande hauteur
- Les méthodes de calcul : du plus simple au plus complexe

En France : culture ouvrages d'art
… les années 1970 et 1980



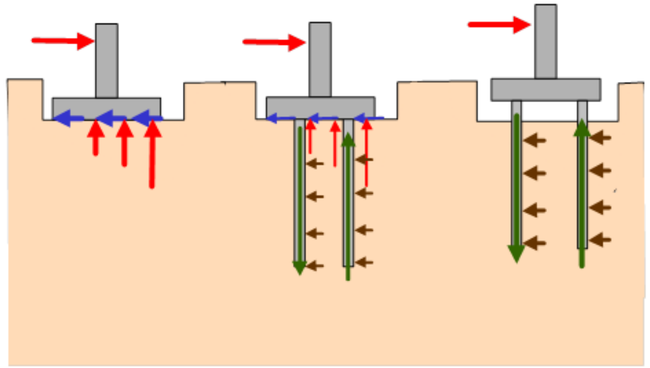
1975 - 1985
ouvrages expérimentaux

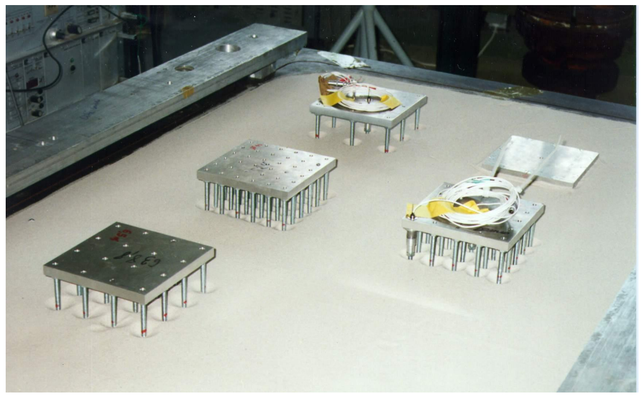
1988
note d'information technique du LCPC
ouvrages d'art courants

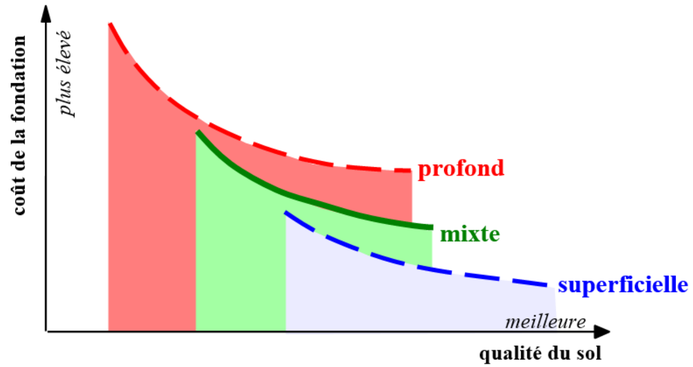
En France : culture ouvrages d'art … les années 1990 et 2000

Recherche LCPC & LRPC

- Favoriser l'utilisation des fondations mixtes
- Comportement et calcul sous charges latérales et moment de renversement
- Instrumentation d'ouvrages
- Retro-analyse d'ouvrages existants
- Lien avec la pratique internationale

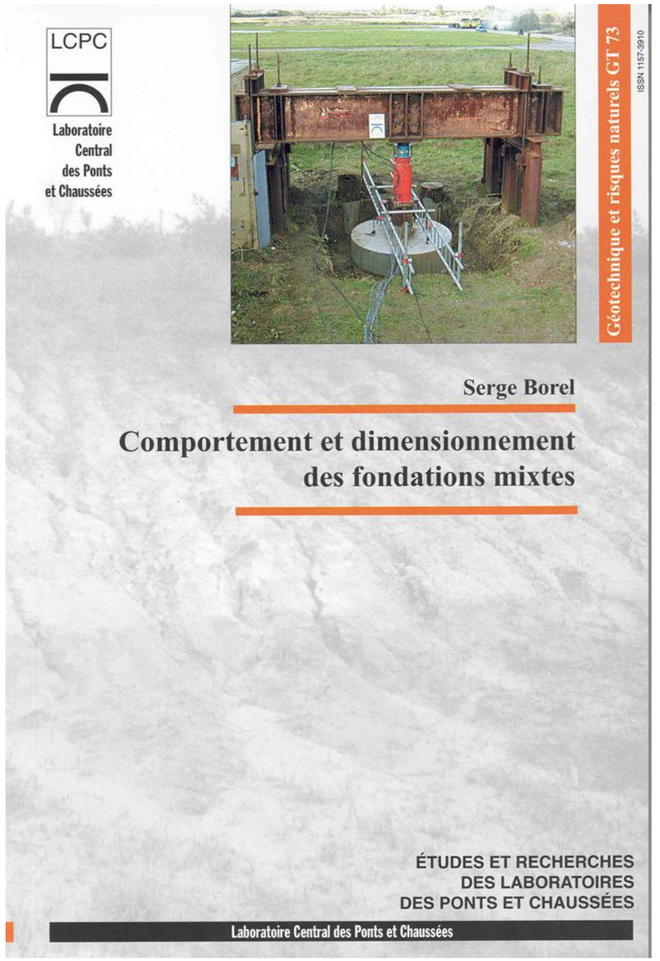






En France : culture ouvrages d'art
… les années 1990 et 2000

Olivier Combarieu, Michel Bustamante, Jean-Pierre Magnan
Patrick Berthelot, Carlo Viggiani, Daniel Gouvenot
4 juillet 2001



2001

En France :

… les années 2010 et 2020

NF P94-262 - Juillet 2012
Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes

1 Domaine d'application

(2) On peut définir plusieurs types de fondations selon leurs dimensions et leur profondeur (fondations superficielles, semi-profondes ou profondes), leur mode de réalisation et leur mode de fonctionnement (fondations superficielles, sur sol en place ou sur sol amélioré ou renforcé par inclusions rigides ou souples, fondations mixtes, fondations profondes) (Note 1).

NOTE 1 – Ainsi, des fondations profondes au sens de l'élancement peuvent parfaitement être utilisées dans le cadre d'un projet prévoyant un mode de fonctionnement intermédiaire entre celui d'une fondation superficielle, où toute la charge est reprise par le sol en place sous la semelle, et celui d'une fondation profonde au sens traditionnel, qui reprend à elle seule la totalité de la charge.

— Fondation mixte : le terme « fondation mixte » s'applique à l'ensemble semelle et pieux conçu et calculé avec contact direct entre les deux et en tenant compte des possibilités réelles de mobilisation simultanée des réactions dans le sol, par les pieux et la semelle.

8.3 États limites de service

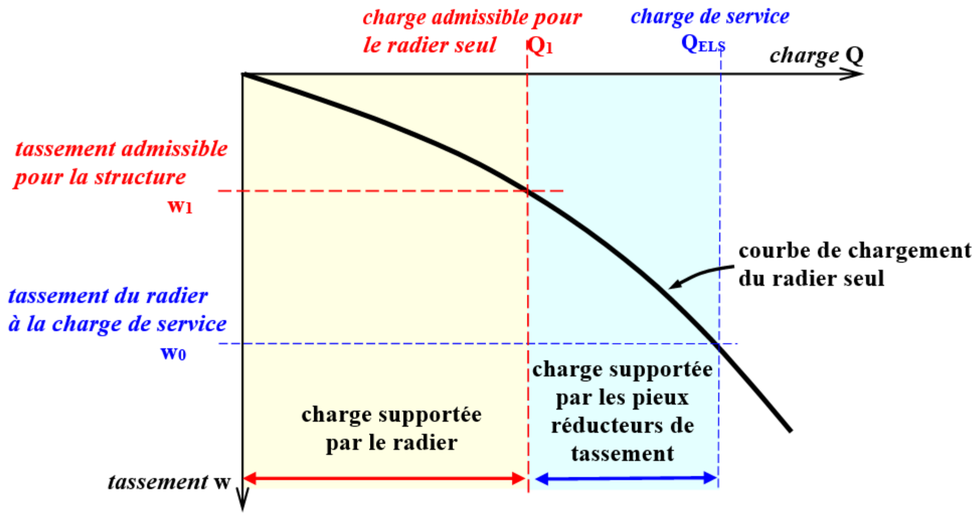
NOTE 2 – Lorsque cela est approprié (sollicitations transversales, géométrie complexe, fondations mixtes) il convient d'utiliser des méthodes numériques d'interaction sol – structure (Article 8.6).

A l'international :
… radier mixte et bâtiment de grande hauteur

- **Le cocktail gagnant :**
  Un sol (argile raide, argile molle)
  un territoire (Londres, Frankfort, Suède)
  une équipe de recherche & consultant
  interaction conception et instrumentation

- **Ecole anglaise : Burland (1986) – pieux réducteurs de tassement**
  des pieux placés sous les colonnes les plus chargées
  pieux dimensionnés à la charge de fluage

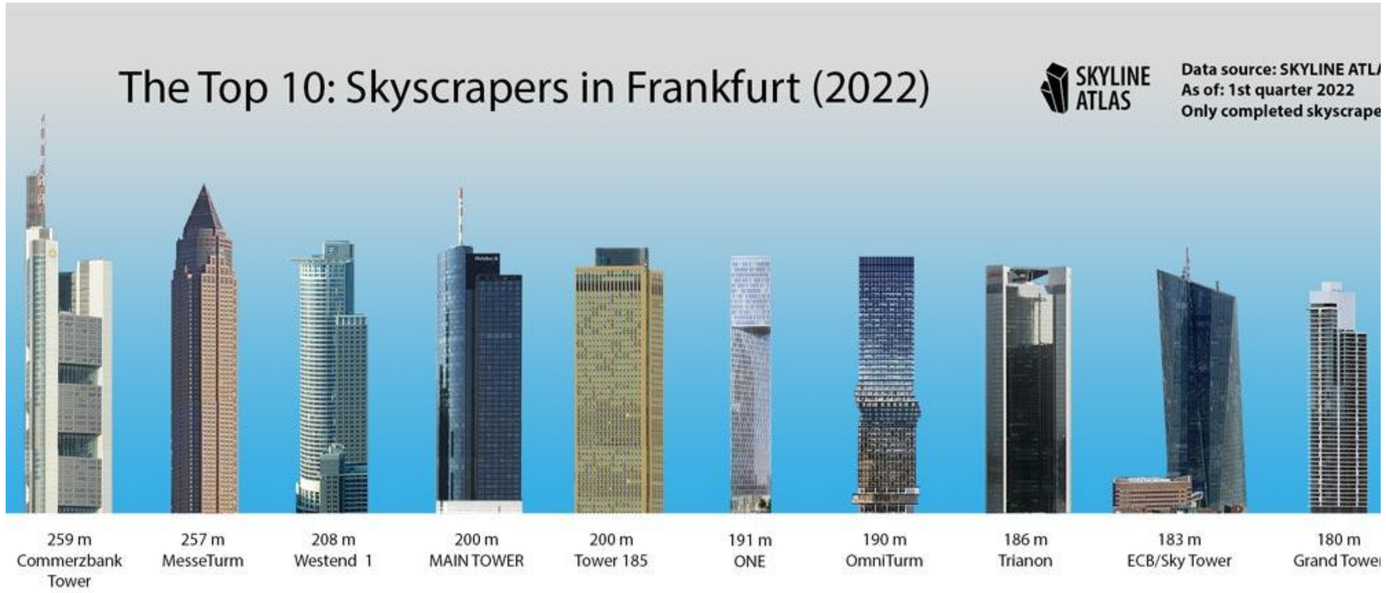
- **Ecole suédoise : Hansbo (1984) – creep pile**
  limiter la pression sous le radier à la surconsolidation
  pieux dimensionnés à la charge de fluage

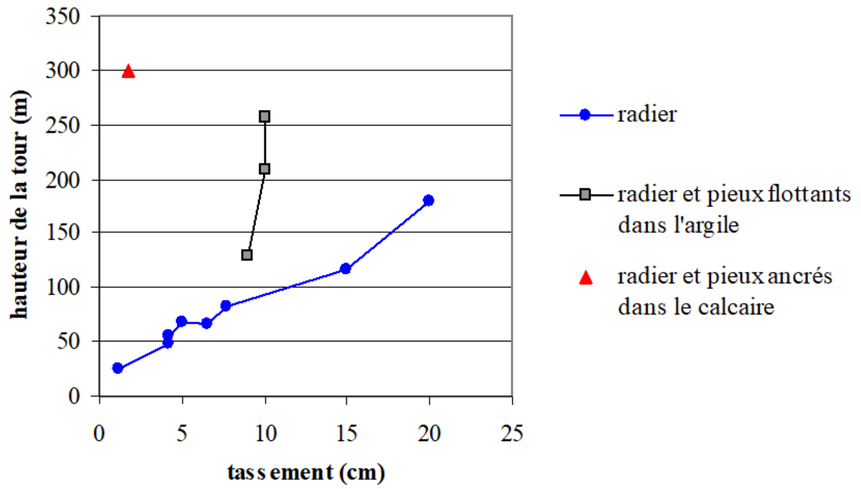


Queen Elizabeth II Conference Center
1986

A l'international :
… radier mixte et bâtiment de grande hauteur

Ecole allemande : Katzenbach





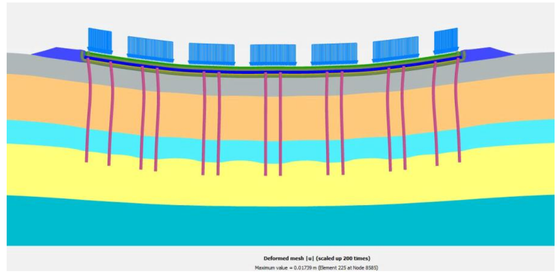
Ecole australienne : Randolph, Poulos

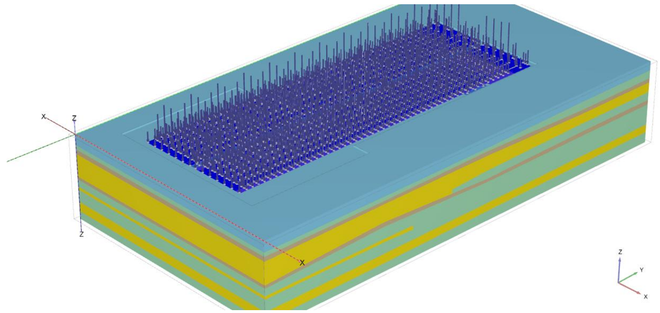
A l'international :
… radier mixte et bâtiment de grande hauteur

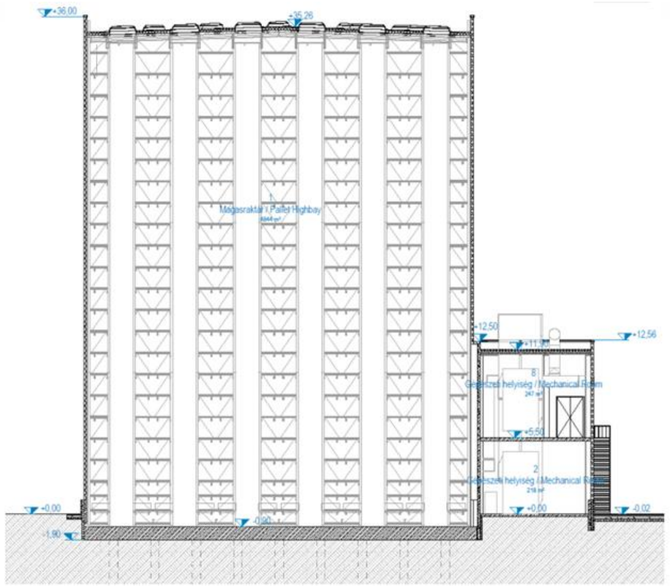
Bâtiments industriels

Szepeshazi (2022), HBM / Soletanche Bachy Hungary

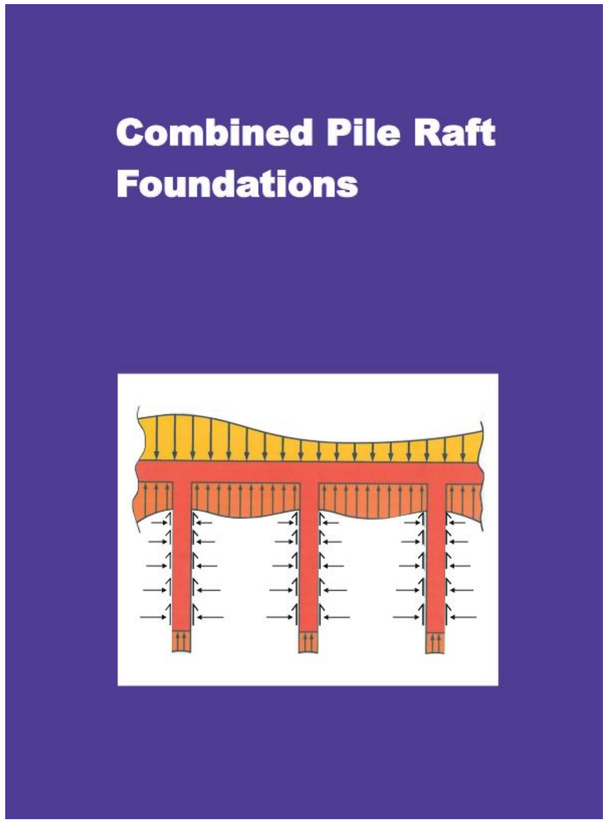
2013 -> 2022
3D FEM et instrumentation
40%de réduction du volume de béton des fondations



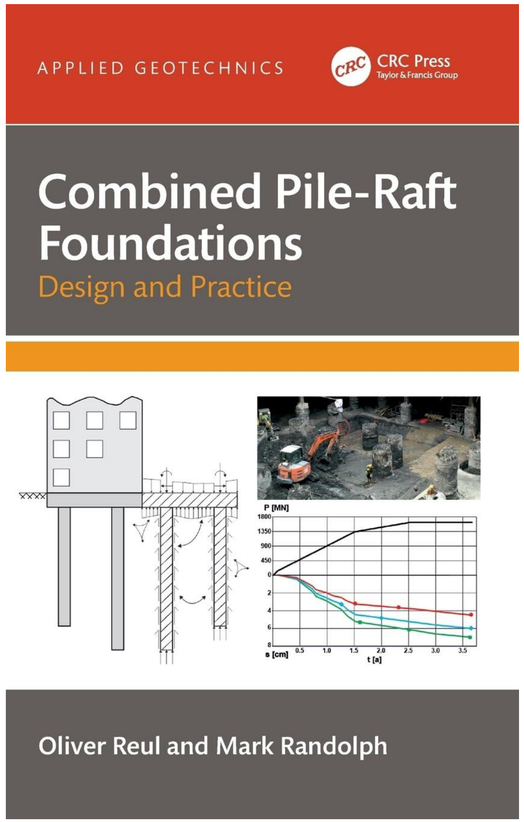




A l'international :
… radier mixte et bâtiment de grande hauteur



Combined Pile-Raft Foundation Guideline (ISSMGE TC 212 2013)



2024

Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024
GEOTECHNICAL ENGINEERING CHALLENGES
TO MEET CURRENT AND EMERGING NEEDS OF SOCIETY
© 2024 the Authors
ISBN 978-1-032-54816-6
DOI 10.1201/9781003431749-344
Open Access: www.taylorfrancis.com, CC BY-NC-ND 4.0 license

ECSMGE 24
XVIII EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING

Eurocode 7 – second generation – piled foundations

Eurocode 7 – deuxième génération – pieux

Ch. Moormann*
University of Stuttgart, Institute of Geotechnical Engineering, Stuttgart, Germany
S. Burlon
Terrasol - Setec, Paris, France
christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de

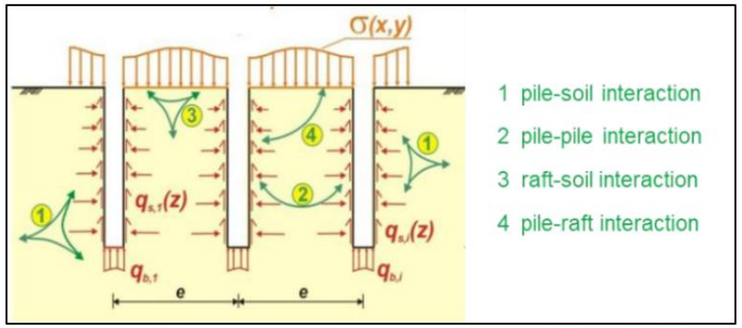
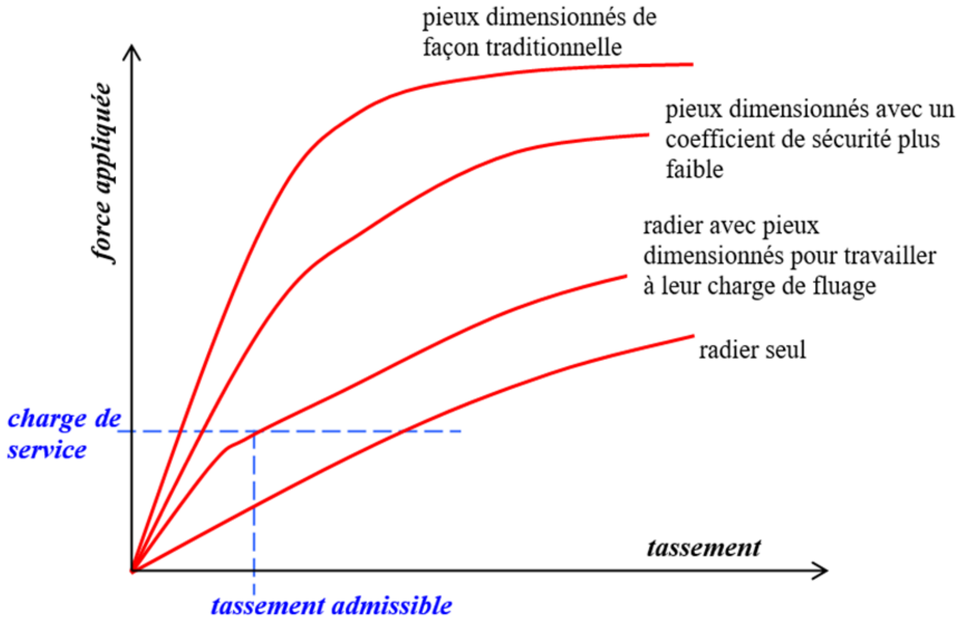


Figure 4. Interaction effects to be considered for the verification of piled rafts according to EN 1997-3, 6.5.6.

EN 1997-3:2025
Eurocode 7

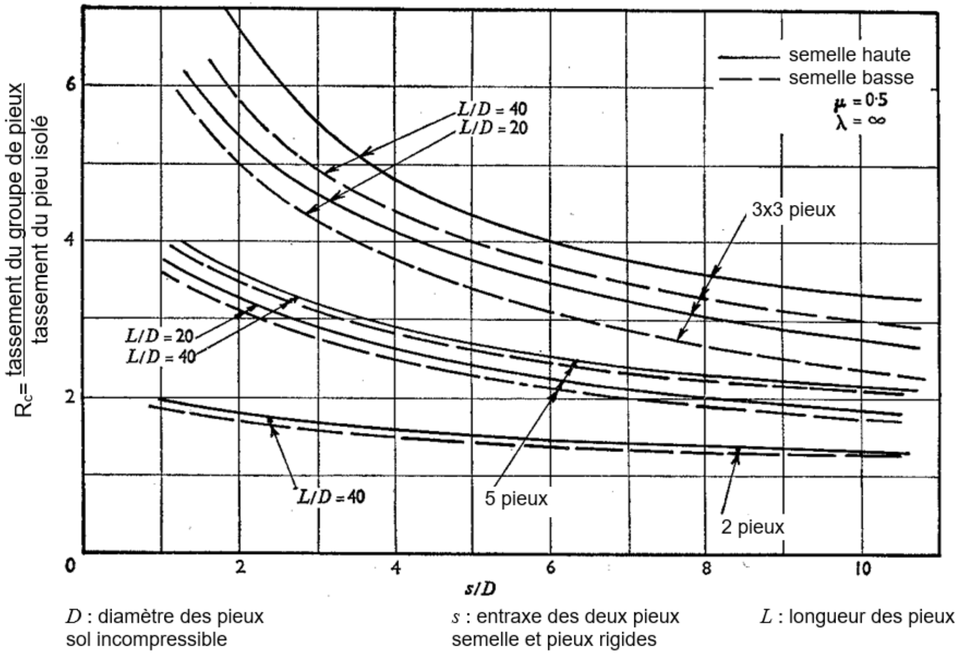
Les méthodes de calcul
… du plus simple au plus complexe



Groupe de pieux « traditionnel »

Interaction quasi élastique

Réduction marginale du tassement grâce au contact semelle / radier



D : diamètre des pieux
sol incompressible

s : entraxe des deux pieux
semelle et pieux rigides

L : longueur des pieux

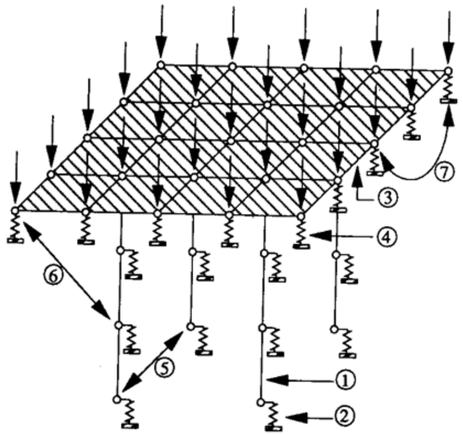
Butterfield et Banerjee, 1971

Fondations mixtes

Prise en compte des non linéarités

Les méthodes de calcul
… du plus simple au plus complexe

Estimation des déplacements, Interaction entre pieux et avec la semelle / le radier



Clancy & Randolph, 1993

1 élément de pieu représenté par une poutre

2 cisaillement et pression du sol sur le pieu représentés par un ressort non linéaire

3 élément de radier représenté par une plaque

4 pression du sol sous le radier représentée par un ressort équivalent

5 interaction entre deux éléments de pieux différents (équations intégrales)

6 interaction entre un élément de radier et un élément de pieu (équations intégrales)

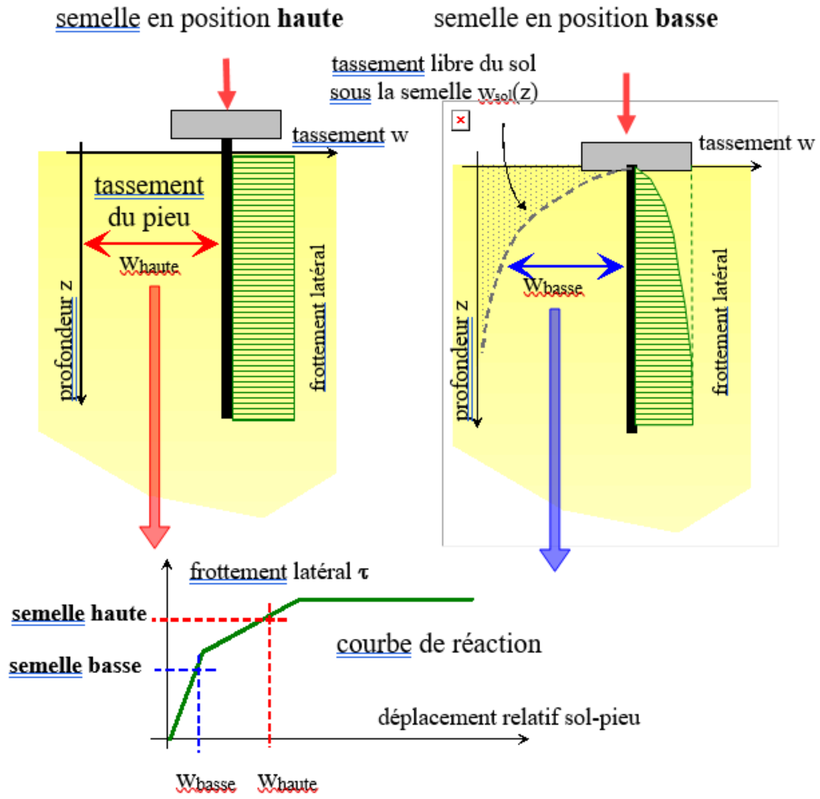
7 interaction entre deux éléments de radier (équations intégrales)

analyse plus complet/complexe plus spécifique au site

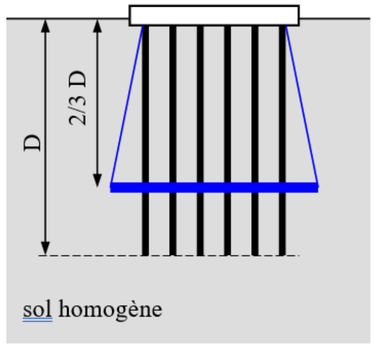
éléments finis	(problème quelconque)
éléments de frontière	(sol élastique linéaire)
méthode hybride	(courbes de réaction)
facteurs d'influence	(plaque sur ressort)
abaques	

dimensionnement facile d 'utilisation

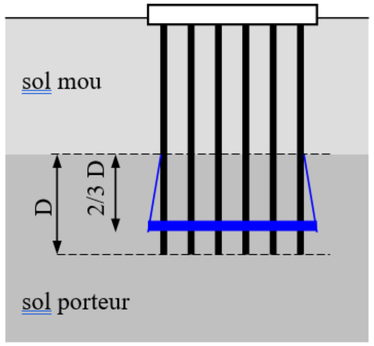
Les méthodes de calcul
… du plus simple au plus complexe



Combarieu, 1988

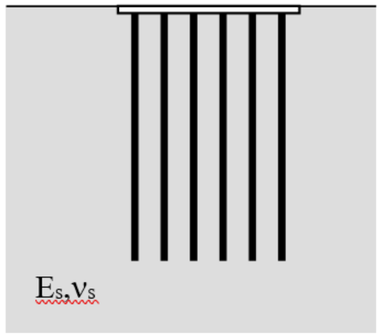


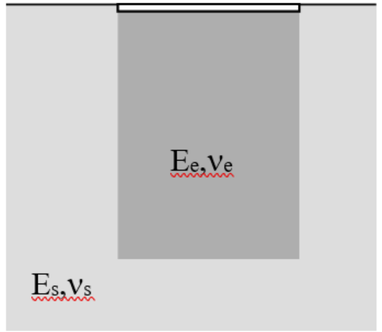
pieux flottants



pieux traversant un horizon mou

Radier équivalent

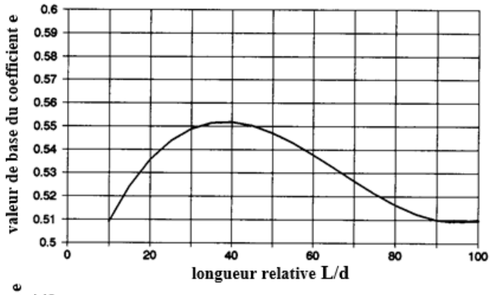


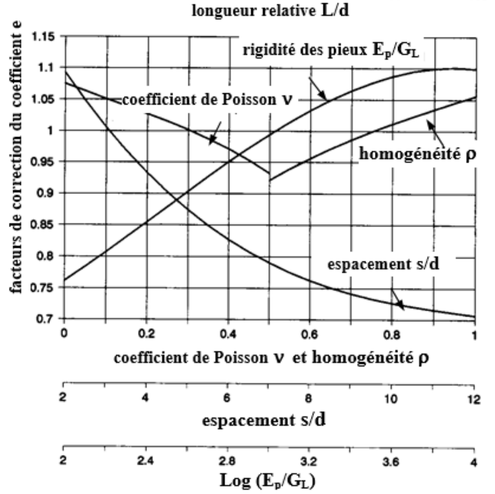


Homogénéisation

Les méthodes de calcul
… du plus simple au plus complexe

$$R_s = \frac{\text{tassement du groupe}}{\text{tassement d'un pieu isolé sous la charge moyenne des pieux du groupe}}$$





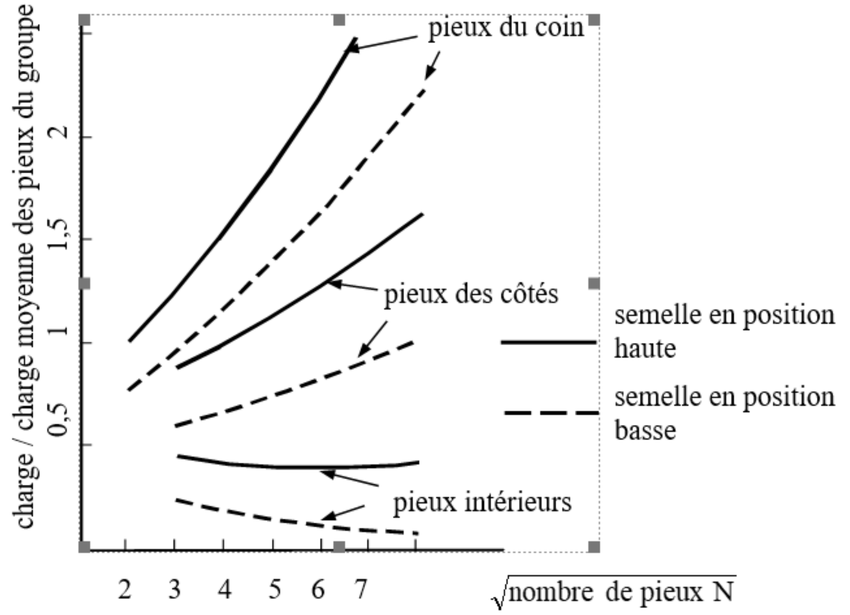
$R_s = n^e$

- **n** : nombre de pieux du groupe
- **d** : diamètre des pieux
- **L** : longueur des pieux
- **s** : espacement entre les axes des pieux
- E_p : module d'Young du pieu
- $r = G_{L/2}/G_L$: coefficient d'homogénéité du sol
- G_L : module de cisaillement du sol à la profondeur L (niveau de la pointe des pieux)
- $G_{L/2}$: module de cisaillement du sol à mi-profondeur L/2
- ν : coefficient de Poisson du sol

Fleming et al., 1992

comportement élastique linéaire du sol et des pieux

$E_p/E_s = 10000$
$s/d = 3$
$L/d = 25$
$\nu = 0,5$

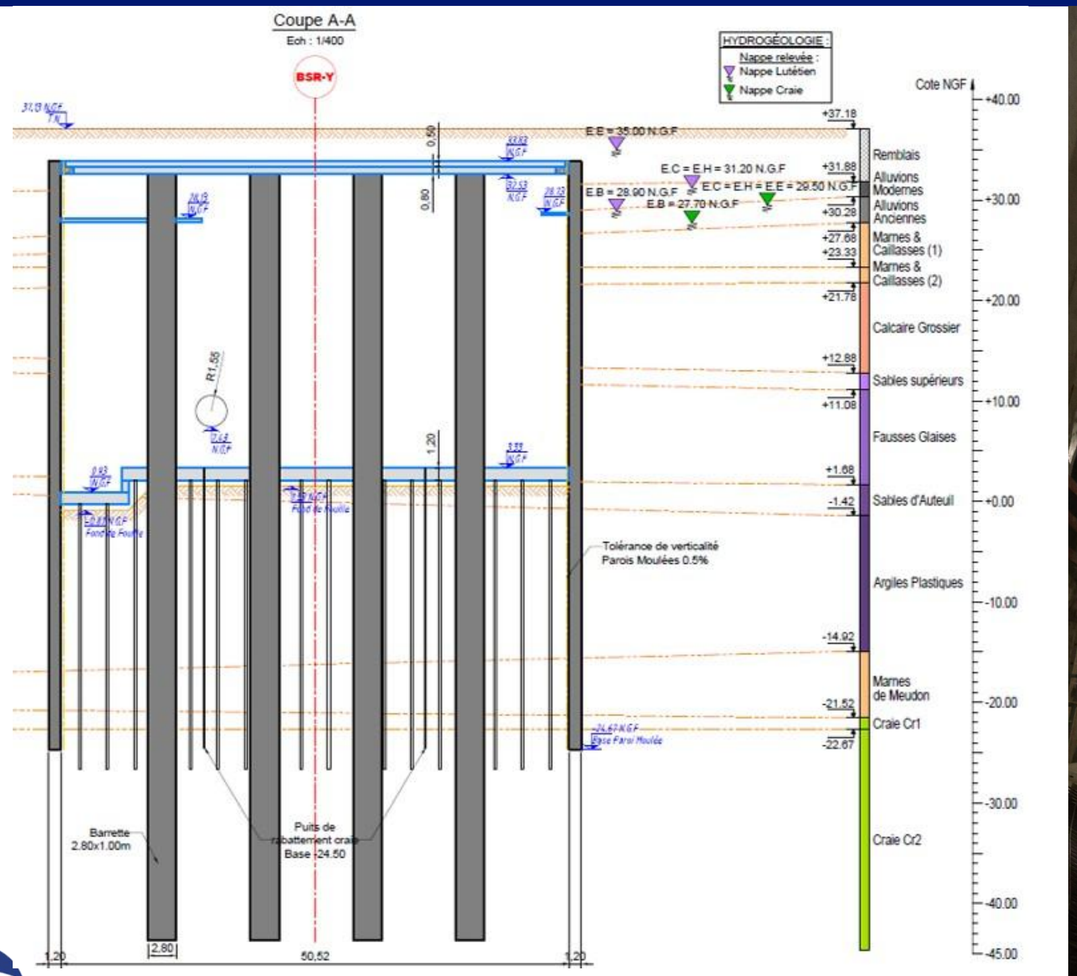


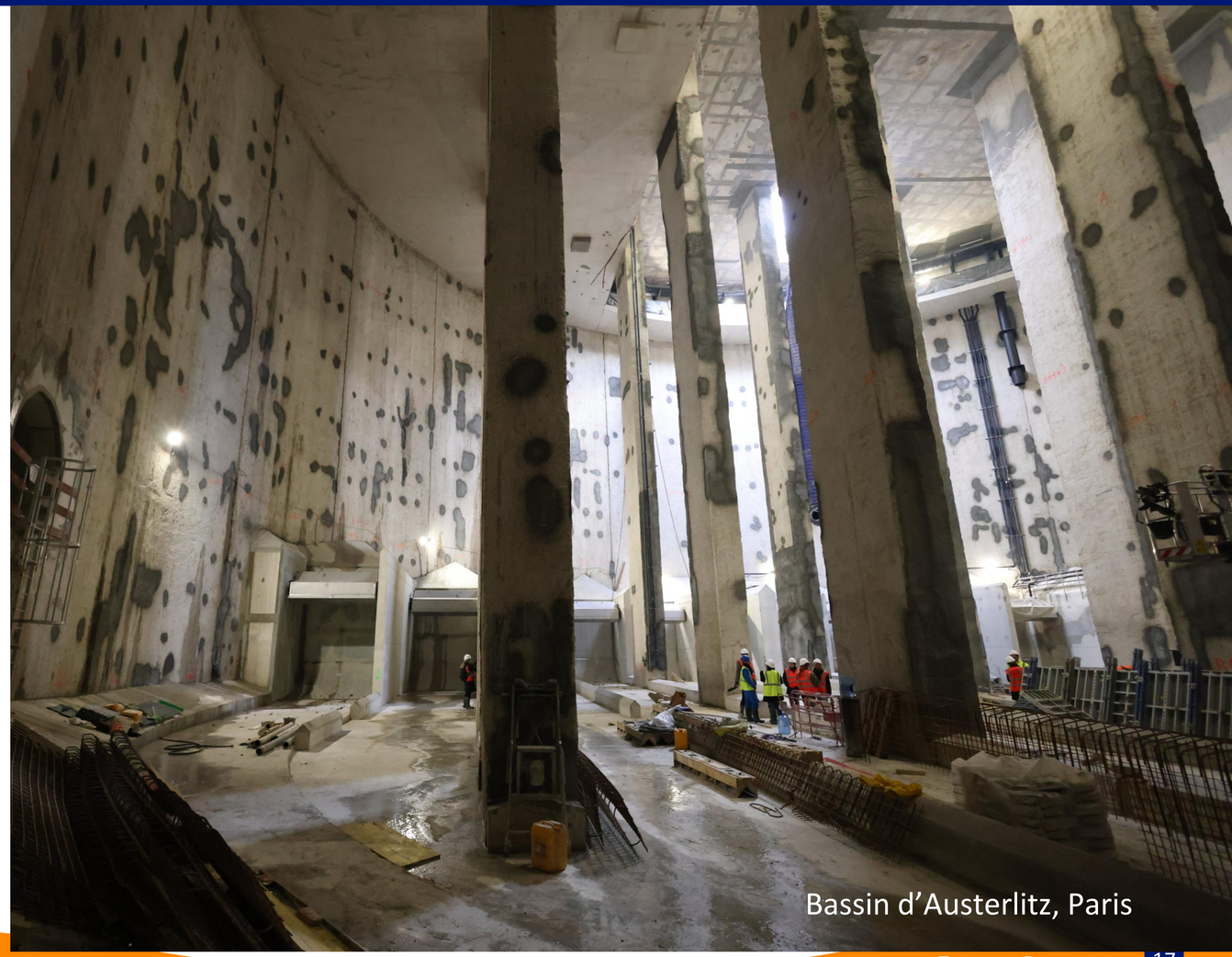
Kuwabara, 1989

Conclusion

- En France : culture ouvrage d’art
- A l’international : radiers mixtes et bâtiments de grande hauteur
- Les méthodes de calcul : du plus simple au plus complexe

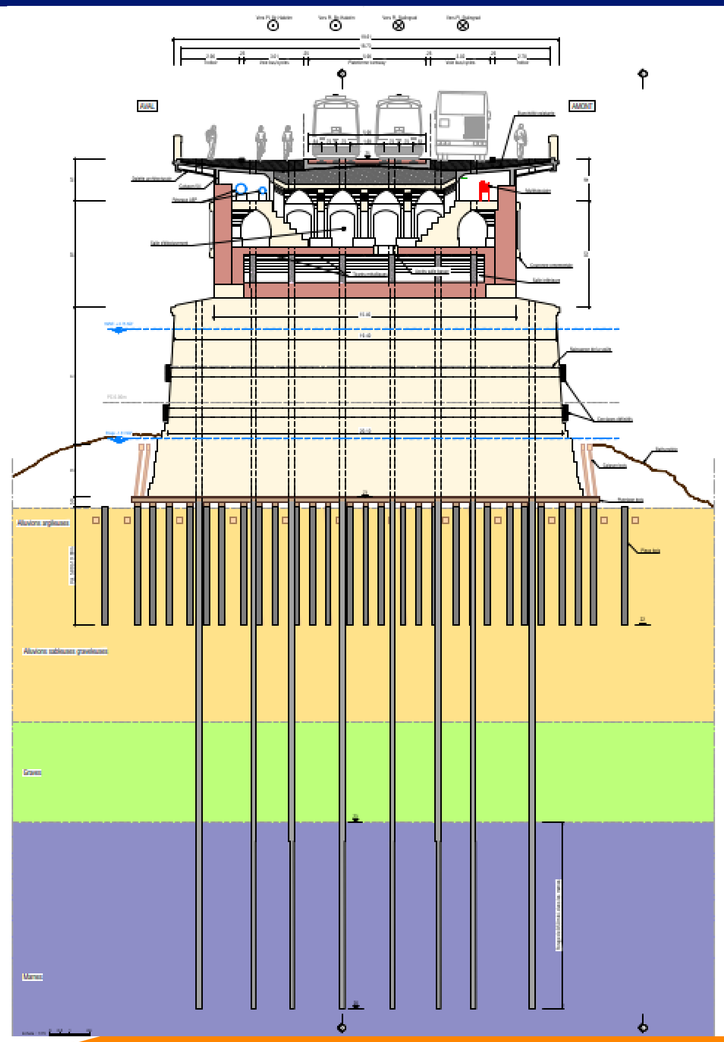
Les fondations mixtes …
…une situation finalement courante ?





Bassin d'Austerlitz, Paris

Les fondations mixtes …
…une situation finalement courante ?



Pont de pierre, Bordeaux

cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Webinaire « Fondations mixtes »

Historique & Principes Généraux

BOREL, Serge

SOLETANCHE BACHY

9 SEPTEMBRE 2025