

# Comparaison des règlements australien et français pour le dimensionnement des pieux - Prise en compte des essais de chargement

## French and Australian Pile Design Comparison – Load Testing Influence on Design

Bretelle S.  
GHD, Perth, Australie

**RÉSUMÉ :** L'utilisation des pieux pour la réalisation de fondations d'ouvrages de toute taille est une méthode couramment utilisée dans le monde entier. L'approche réglementaire relative au dimensionnement de ces éléments de fondations reste différente, pour des raisons diverses comme la nature des sols dans chaque pays ou des raisons culturelles. Au-delà de la simple comparaison des approches réglementaires Française (Fascicule 62) et Australienne (AS2159) et à partir de l'étude comparative illustrée par un type de pieu et une stratigraphie de sol standard, cet article vise à montrer les principales caractéristiques des deux approches. L'une définit de manière précise les paramètres d'interaction à partir des résultats des essais en place (Approche Française), l'autre repose de manière plus importante sur l'interprétation de l'ingénieur pour le choix des paramètres, et insiste sur les essais de chargement en permettant leur prise en compte au travers de la définition d'un « facteur de risque » (Approche Australienne). Finalement, l'intérêt des essais de chargement est démontré au travers de l'estimation de la longueur optimale nécessaire à l'obtention des caractéristiques de portance requises.

**ABSTRACT:** Piling is commonly used as foundation system in all countries. Design standards remain quite different, for cultural reasons, but also due to the different types of soils encountered in each country. This paper compares French (Fascicule 62) and Australian (AS2159) approaches, describing the design methodology and comparing both approaches on a detailed example. French standard provides the relationship between measured characteristics and interaction design parameters, and a unique set of reduction factors on resistance. Australian standard lets the parameter choice to the geotechnical engineer and defines different reduction factors on resistance depending on site geotechnical risk. Finally, the way each standard accounts for pile testing is described, the example showing optimisation opportunity when pile testing is undertaken on site.

**MOTS-CLÉS :** Pieux, dimensionnement, pondération, essais chargement, comparaison

**KEYWORDS:** Pile, design, safety factors, risk, load testing, comparison.

## 1 INTRODUCTION

Les pieux constituent une solution de fondation couramment utilisée dans le monde entier pour des projets de toutes tailles. La pratique du dimensionnement géotechnique de ce type de fondation dans un contexte international met en exergue une variabilité importante des approches réglementaires.

La réalisation d'essais de chargement statiques ou dynamiques, pratique courante sur les grands projets, permet de valider les paramètres pris en compte dans le dimensionnement, mais aussi, de réduire les incertitudes qui entourent la définition des paramètres d'interaction sol pieu par une mesure directe. Elle se révèle donc une source d'information précieuse pour l'optimisation du dimensionnement.

Cet article présente dans un premier temps un rappel des méthodes et une revue des principales pondérations des actions et des résistances applicables au dimensionnement des pieux suivant les deux réglementations. Une synthèse sous forme de tableau et un exemple permettent d'apprécier les différences de longueur de pieu résultant des différentes approches réglementaires, en considérant des charges et un contexte géotechnique type.

Dans un deuxième temps, une comparaison des méthodes de prise en compte des résultats des essais de chargement dans le dimensionnement est détaillée. On se limite au cas où les essais de chargement confirment la capacité portante supposée, l'exemple est complété par la prise en compte des résultats des essais pour l'optimisation de la longueur des pieux.

## 2 RAPPEL DES MÉTHODES

### 2.1 Pratique Française

En France, la pratique usuelle est l'application du Fascicule 62 ou du DTU 13.2, pour le dimensionnement des pieux. Ces deux textes reposent essentiellement sur les essais pressiométriques, mais permettent aussi le choix des paramètres d'interaction à partir de pénétromètre statique (CPT).

Une première étape du dimensionnement consiste à choisir un profil de sol représentatif. Il relève de la pratique de l'ingénieur qui synthétise l'ensemble des données disponibles, puis définit un profil de calcul. Celui-ci ne correspond pas forcément exactement à chaque résultat de sondage. Toutefois, le Fascicule 62 propose une formulation qui permet d'effectuer des calculs directement à partir des valeurs mesurées. Dans ce cas, l'analyse de capacité portante peut se faire pour chaque sondage.

On reprend ci-après les grandes lignes du dimensionnement suivant le fascicule 62, pour les sables. Le lecteur se reportera au texte complet pour des compléments, en particulier pour les autres sols. Les habitués reconnaîtront aussi certains raccourcis pour le calcul des valeurs caractéristiques, qui ont bien sûr été simplifiés pour cet article.

Pour le dimensionnement des pieux, la capacité portante se décompose de la façon suivante :

- ✓ Le frottement extérieur  $Q_{su} = \sum q_{si} \pi D l_i$  qui s'applique sur la surface périphérique (frottement à l'interface sol-pieu) ;

- ✓ La résistance en pointe  $Q_{pu} = S q_{pu}$  qui s'applique sur la section de pointe (la section complète dans le cas du pieu foré).

avec

- ✓  $S$  = section totale de la pointe du pieu ;
- ✓  $D$  = diamètre du pieu ;
- ✓  $q_{pu}$  = contrainte ultime en pointe du pieu ;
- ✓  $q_{si}$  = frottement latéral unitaire dans chaque couche  $i$  ;
- ✓  $l_i$  = longueur du pieu dans chaque couche  $i$ .

La contrainte de rupture en pointe est donnée par l'expression :

$$q_{pu} = k_c q_{ce}$$

$q_{ce} = \frac{1}{2} \int q_c(z) dz$  (la résistance en pointe mesurée par le pénétromètre  $q_c$  est intégrée entre 0.5m au-dessus et 1,5m au-dessous de la pointe du pieu)

$k_c$  est le facteur de portance. Il dépend du mode de mise en place des pieux et du type de sol (voir tableau 1).

Tableau 1. Facteur de portance  $k_c$  (Fascicule 62).

Nature des terrains	Pieux mis en place sans refoulement de sol	Pieux mis en place avec refoulement de sol
Argiles, limons	0.40	0.55
Sables, graves	0.15	0.50
Craies A - B	0.20 - 0.30	0.20 - 0.45

Les valeurs du frottement latéral sont déterminées en fonction du mode de mise en place et de la catégorie de sol, par l'intermédiaire du coefficient  $\beta : q_s = q_c / \beta$  (Voir tableau 2)

Tableau 2. Choix du coefficient  $\beta$  (Fascicule 62).

Nature des terrains	$\beta$	$q_s, max$ (kPa)
Sables, graves	200	120
Pieux forés		
Sables, graves ( $q_c < 15$ MPa)	250	40
Pieux forés tubés - tube récupéré		
Sables, graves ( $q_c > 20$ MPa)	300	120
Pieux forés tubés - tube récupéré		

Les combinaisons d'actions prévalant au dimensionnement des pieux sollicités par des charges permanentes  $G$  sont les suivantes :

- ✓ ELU fondamental  $1.35 G < (Q_{su} + Q_{pu}) / 1.4$
- ✓ ELS quasi permanent  $G < (0.7 Q_{su} + 0.5 Q_{pu}) / 1.4$

Les combinaisons de dimensionnement ne varient pas en fonction de la complexité du site, de la qualité de la reconnaissance de sol, ou de la spécificité du problème.

La parution de l'Eurocode 7, et la mise en place progressive des annexes nationales spécifiques aux pieux conduit à utiliser de nouvelles méthodes de dimensionnement. Elles ne sont toutefois pas encore usuellement mises en œuvre, l'annexe nationale Française portant sur le dimensionnement des fondations profondes étant parue en Juillet 2012.

## 2.2 Pratique Australienne

La réglementation Australienne diffère par son approche. Celle-ci accorde plus d'importance aux résultats des CPT et aux essais de laboratoire (donnant la cohésion et l'angle de frottement). Les méthodes de prise en compte de la variabilité des actions et

des incertitudes sur les résistances diffèrent, non pas dans le principe, mais dans les coefficients utilisés.

L'AS 2159 ne propose pas de valeurs de frottement latéral ou de résistance en pointe. Il rappelle les principes nécessaires à la détermination de la capacité portante ultime :

- ✓ Analyser les paramètres géotechniques provenant de la reconnaissance de sol sur le site ;
- ✓ Analyser les résultats d'essais de chargement dynamique ou d'instrumentation de battage ;
- ✓ Analyser les résultats des essais statiques.

Dans le cas où des corrélations sont utilisées, elles doivent avoir été obtenues dans des conditions similaires (méthode d'installation, types de sol) et démonstration doit être faite de cette similarité.

La résistance ultime du pieu s'exprime alors comme dans le Fascicule 62, en respectant la logique de l'interaction :

$$R_{d,ug} = f_{ms} A_s + f_b A_b$$

Avec

- ✓  $A_b$  = section totale de la pointe du pieu ;
- ✓  $A_s$  = surface du fut du pieu (négligeant les 1.5 m supérieurs) ;
- ✓  $f_b$  = contrainte ultime en pointe du pieu ;
- ✓  $f_{ms}$  = frottement latéral unitaire (différencié dans chaque couche si nécessaire).

Les combinaisons d'actions prévalant au dimensionnement des pieux sollicités par des charges permanentes  $G$  sont les suivantes :

- ✓ ELU (ULS)  $1.20 G < \phi_g * R_{d,ug}$
- ✓ ELS (SLS) vérification des tassements

Le coefficient de réduction de la résistance géotechnique ( $\phi_g$ ) est le paramètre qui constitue la plus grande différence entre les deux réglementations. Le facteur géotechnique ( $\phi_g$ ) est déterminé de la façon suivante :

- ✓ Les facteurs de risque sont évalués sur une échelle de 1 à 5 (risque très faible à risque très élevé) à l'aide du tableau 3 ; A chaque risque est attribué un poids (importance relative de ce risque dans l'ensemble du dimensionnement) ;
- ✓ Le risque global (ARR) est la moyenne pondérée de l'ensemble des risques identifiés ;
- ✓ La valeur de ( $\phi_{gb}$ ) est alors choisie en fonction du tableau 4 ;
- ✓  $\phi_g$  est calculé en fonction du nombre et du type d'essais, et est égal à  $\phi_{gb}$  en l'absence d'essais.

Tableau 3. Choix des facteurs de risque (AS2159).

Risque Site	Poids
Complexité géologique	2
Importance de la reconnaissance de sol	2
Quantité et qualité des données géotechniques	2
Risque Dimensionnement	Poids
Expérience du même type de fondations dans le même contexte géotechnique	1
Méthode de détermination des paramètres de dimensionnement	2
Méthode de dimensionnement	1
Utilisation d'essais in situ et de mesures pendant l'installation	2
Risque Installation	Poids
Niveau de contrôle pendant la construction	2
Niveau de contrôle de la structure pendant et après la construction	0.5

Par exemple, pour évaluer le risque lié à la Complexité géologique, les exemples suivants sont proposés dans l'AS2159 :

- ✓ 1 (très faible risque) correspond à des couches subhorizontales, et à des caractéristiques de sols et de roches bien définies ;
- ✓ 3 (risque moyen) correspond à un site avec une variabilité notable, mais sans changements brusques de stratigraphies ;
- ✓ 5 (risque très élevé) est utilisé pour un site très variable, avec des karsts ou des failles impliquant le niveau de fondation.

Tableau 4. Choix du coefficient  $\phi_{gb}$  (AS2159) pour un système de fondation redondant.

Moyenne pondérée du risque (ARR)	catégorie globale de risque	$\phi_{gb}$
ARR < 1.5	Très faible	0.76
1.5 < ARR < 2.0	Très faible à faible	0.70
2.0 < ARR < 2.5	Faible	0.64
2.5 < ARR < 3.0	Faible à modéré	0.60
3.0 < ARR < 3.5	Modéré	0.56
3.5 < ARR < 4.0	Modéré à fort	0.53
4.0 < ARR < 4.5	Fort	0.50
ARR > 4.5	Très fort	0.47

### 2.3 Exemple de dimensionnement

#### 2.3.1 Données géotechniques

L'exemple retenu pour illustrer l'utilisation des deux règlements portera sur le dimensionnement de pieux forés (Pieux forés tubés – tube récupéré) de 60 cm de diamètre.

La capacité portante sera déterminée suivant le fascicule 62 et l'AS 2159, avec le pénétromètre statique dont le log est reporté sur la figure 1.

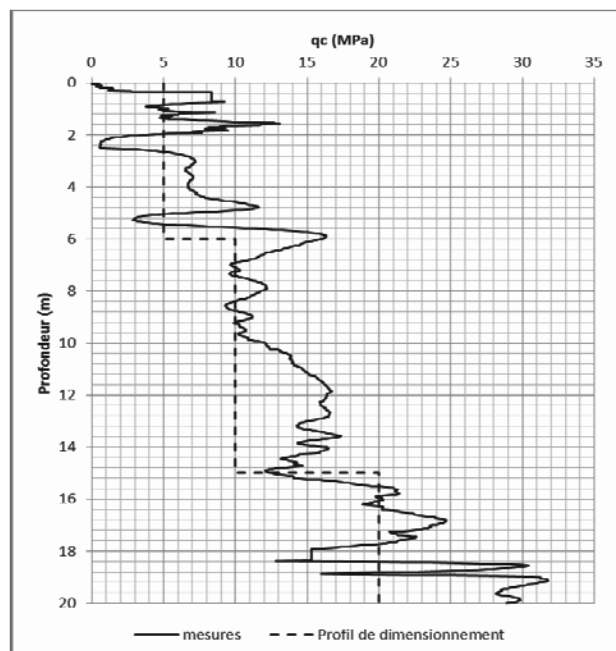


Figure 1. Caractéristiques de sol mesurées et profil de calcul  
Les couches rencontrées sont constituées de :

- ✓ Un sable lâche avec  $q_c=5$  MPa de 0 à 6m ;
- ✓ Un sable moyennement compact avec  $q_c=10$  MPa de 6 à 15m ;
- ✓ Un sable dense avec  $q_c=20$  MPa de 15 à 20 m.

Afin de simplifier la comparaison, un profil de dimensionnement unique est proposé sur le log. On se reportera aux commentaires spécifiques à chaque réglementation pour le choix du profil de dimensionnement.

La charge de dimensionnement non pondérée est de 1 100 kN, constituée essentiellement de charges permanentes.

#### 2.3.2 Dimensionnement suivant le Fascicule 62

Les classes de sol applicables suivant les catégories du fascicule 62 sont :

- ✓ Un sable A (lâche de 0 à 6m),
- ✓ Un sable B (moyennement compact de 6m à 15m),
- ✓ Un sable C (dense de 15m à 20m).

Les caractéristiques de la pointe sont les suivantes :

$$K_c = 0,15 \text{ (sable pieu mis en place sans refoulement)}$$

$$q_{ce} = 20 \text{ MPa}$$

$$q_{pu} = 3 \text{ MPa}$$

$$\text{Résistance en pointe : } Q_{pu} = S q_{pu} = 850 \text{ kN}$$

Pour ce qui concerne le frottement, les valeurs unitaires se décomposent comme suit :

- ✓ Sable de 0 à 6m :  $q_s = 20$  kPa
- ✓ Sable de 6 à 15m :  $q_s = 40$  kPa
- ✓ Sable de 15 à 20m :  $q_s = 65$  kPa

La résistance en frottement est :  $Q_{su} = \sum q_{si} \pi D l_i$   
 $Q_{su} = \pi * 0,6 * (20*6+40*9+65*5) = 1530 \text{ kN}$

Les vérifications suivantes sont effectuées pour justifier qu'une longueur de pieu de 20m est juste suffisante :

Tableau 5. Vérifications de capacité portante (Fascicule 62).

Cas de charge	Charge pondérée	Résistance pondérée du sol
ELU fondamental	1.35 G = 1500	$(Q_{su} + Q_{pu}) / 1.4 = 1700$
ELS quasi permanent	G = 1100	$(0.7 Q_{su} + 0.5 Q_{pu}) / 1.4 = 1100$

#### 2.3.3 Dimensionnement suivant l'AS2159

Il n'y a pas de raisons pour choisir des paramètres d'interaction différents de ceux recommandés par le Fascicule 62, on peut d'ailleurs noter que les publications de M. Bustamante sont souvent citées en référence en Australie.

La résistance ultime du pieu de notre exemple est donc la même dans les deux approches. Seule la vérification pondérée de capacité portante va être différente.

Le risque est évalué pour un site relativement homogène, avec une reconnaissance de bonne qualité et un dimensionnement avec une méthode éprouvée dans les mêmes conditions. Par contre le contrôle pendant la construction est très limité ; les facteurs de risque choisis sont reportés dans le tableau 6.

La valeur de ARR déduite de l'évaluation détaillée dans le tableau 6 est de 2.4, ce qui va donner une valeur de  $\phi_{gb}$  de 0.64, correspondant à un risque géotechnique faible.

Tableau 6. Evaluation des facteurs de risque (AS2159).

Risque	Poids * Risque
<b>Site</b>	
Complexité géologique	2 * 3
Importance de la reconnaissance de sol	2 * 1
Quantité et qualité des données géotechniques	2 * 1
<b>Dimensionnement</b>	
Expérience du même type de fondations dans le même contexte géotechnique	1 * 1
Méthode de détermination des paramètres de dimensionnement	2 * 1
Méthode de dimensionnement	1 * 1
Utilisation d'essais in situ et de mesures pendant l'installation	2 * 5
<b>Installation</b>	
Niveau de contrôle pendant la construction	2 * 5
Niveau de contrôle de la structure pendant et après la construction	0.5 * 5

Les vérifications de capacité portante suivantes sont effectuées :

Tableau 7. Vérifications de capacité portante (AS2159).

Cas de charge	Charge pondérée	Résistance pondérée du sol
ELU site à risque faible - pas de test	1.2 G = 1320	$(Q_{su} + Q_{pu}) * 0.64 = 1520$
ELU cas le plus défavorable risque très élevé - $\phi_{gb}$ de 0.47	1.2 G = 1320	$(Q_{su} + Q_{pu}) * 0.47 = 1120$

On note déjà que pour un site à risque faible, une réduction de longueur est possible (de 20 m à 18m), alors que dans le cas d'un site à risque très élevé, une longueur de 24 m sera nécessaire.

### 3 PRISE EN COMPTE DES ESSAIS

#### 3.1 Pratique Française

Le fascicule 62 permet de prendre en compte les résultats des essais statiques pour déterminer (après une analyse critique des résultats des essais) les paramètres de frottement et de résistance en pointe. Un coefficient d'abattement de 1.2 sera appliqué sur les valeurs mesurées si le pieu n'est pas instrumenté le long du fût.

#### 3.2 Pratique Australienne

La réalisation d'essais de pieux est fortement recommandée, voire obligatoire pour certains ouvrages. La prise en compte des essais de pieux est effectuée de la manière suivante :

$$\phi_b = \phi_{gb} + (\phi_{if} - \phi_{gb}) K$$

Avec

- ✓  $\phi_{gb}$  déterminé ci-dessus ;
- ✓  $\phi_{if}$  facteur pour prendre en compte le type de test (0.9 pour un test statique, 0,8 pour un essais dynamique avec « signal matching » de type CAPWAP, et  $\phi_{gb}$  en l'absence de test) ;
- ✓ K dépend du nombre de tests p en pourcent du nombre total de pieux,  $K=1.33 p / (p + 3.3) \leq 1$ .

### 3.3 Exemple de d'optimisation

#### 3.3.1 Résultats des essais

Lorsque le dimensionnement est effectué dans un contexte ou une zone où les paramètres d'interaction sont déjà bien connus, du fait de l'expérience de cas similaires, l'essai de pieu va surtout confirmer les paramètres déjà choisis pour le dimensionnement.

#### 3.3.2 Dimensionnement suivant le Fascicule 62

Le fascicule 62 ne permet pas de modification du dimensionnement lorsque les essais de pieux ne modifient pas les paramètres d'interaction.

#### 3.3.3 Dimensionnement suivant l'AS2159

La réalisation sur le site de 4% d'essais dynamiques permettra d'obtenir une valeur de  $\phi_{gb}$  de 0.74.

Les vérifications de capacité portante sont alors modifiées comme suit :

Tableau 8. Vérifications de capacité portante avec essais (AS2159).

Cas de charge	Charge pondérée	Résistance pondérée du sol
ELU 4% test dynamiques $\phi_{gb}$ de 0.74	1.2 G = 1320	$(Q_{su} + Q_{pu}) * 0.74 = 1760$
ELU 1% d'essais statiques - $\phi_{gb}$ de 0.72	1.2 G = 1320	$(Q_{su} + Q_{pu}) * 0.72 = 1710$

La réalisation d'essais de pieux sur ce site permettrait une réduction de la longueur des pieux de 20m à 17m, soit une réduction de longueur de 15%.

La réalisation d'essais de pieux qui confirment les paramètres de dimensionnement permet systématiquement de réduire la longueur des pieux.

### 4 CONCLUSION

Cet article a permis de mettre en évidence les principales différences entre les réglementations Française et Australienne pour le dimensionnement des pieux. L'approche Française définit de manière précise les paramètres d'interaction à partir des résultats des essais en place, l'approche Australienne repose de manière plus importante sur l'interprétation de l'ingénieur pour le choix des paramètres, et insiste sur les essais de chargement en permettant leur prise en compte au travers de la définition d'un « facteur de risque ».

### 5 REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon mari et mon fils pour leur patience pendant la période de rédaction de cet article, ainsi que pour leur relecture.

Bien entendu, cet article n'aurait pas vu le jour sans mon expérience en France, à Terrasol pour la maîtrise des concepts géotechniques, chez Saipem, pour l'ouverture Internationale, chez Cathie Associates pour la compétence relative aux essais de pieux et enfin en Australie, où GHD me donne l'opportunité de travailler sur des projets avec des centaines de pieux.

### 6 REFERENCES

- Fascicule 62 - Titre V du CCTG intitulé "Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil".
- DTU 13.2 - Travaux de fondations profondes pour le bâtiment.
- AS 5100.3-2004 Bridge design: Foundations and soil supporting structures.
- AS 2159-2009 Piling: Design and installation.